

# 泰克公司电力电子测试 | 应用文集



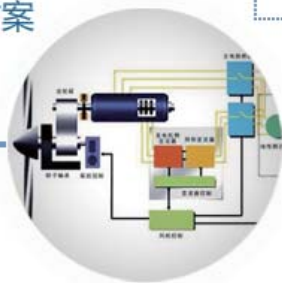
LED测试解决方案



开关电源测试  
解决方案



节能设计解决方案



变频/逆变器测试  
解决方案



浮动测量解决方案



## 泰克，全球测试测量领导厂商 缩短与下一代创新的距离



几乎每次您在浏览网站、点击鼠标、使用手机通话或打开电视机时，都会接触到泰克的技术。60多年以来，工程师们不断向泰克寻求测试，测量和监测解决方案，以应对设计挑战，提高生产效率，大幅缩短产品上市时间。泰克公司创始人在1946年发明了世界上第一台触发式示波器，始于这个突破性的技术创新，如今的泰克已经崛起成为全球最大的测试、测量和监测设备供应商之一，为专注于电子设计、制造及先进技术开发的工程师提供支持。

泰克公司提供通用测试产品包括示波器、误码仪、信号源、逻辑分析仪、频谱分析仪、电源、万用表、频率计和探头夹具附件，以及各种视音频测试、测量和监测产品。在示波器市场，泰克是全球销量最大的公司，也是80%工程师的首选品牌。凭借最广泛的数字示波器产品种类、最高的测量精度、最丰富的产品特性、最全面的分析功能以及我们的获奖服务与支持，泰克能够满足您对测试的任何苛刻需求。

泰克在各领域赢得了广泛的客户群，包括全球通讯、计算机和半导体行业以及航空航天、消费电子、教育和广播等，在许多以技术创新闻名的业界巨擘的设计中心、实验室以及通信网络之中，都有泰克的技术和产品。

- 观看公司视频介绍
- 下载最新产品目录
- 检索行业分类解决方案

[www.tek.com.cn](http://www.tek.com.cn)

泰克中国客户服务中心：400-820-5835

 关注我们的微博：@泰克科技 [www.weibo.com/tekchina](http://www.weibo.com/tekchina)

# 目 录

## 第一章 现代电力电子行业应用方案

- a. 泰克LED照明驱动测试方案····· 1
- b. 泰克变频驱动设计调试方案·····4
- c. 泰克伺服数控行业测试方案·····9
- d. 泰克开关电源测试方案·····12
- e. 泰克消费电子产品节能设计应用·····22

## 第二章 电力电子测试技术与应用技巧

- a. 浮地与隔离通道示波器·····25
- b. 电源测量与分析入门手册·····32
- c. 差分测量与差分探头·····50
- d. 电流探头使用技巧·····64
- e. 电源纹波测量技巧·····66
- f. 待机和泄露电流测试·····68

## 第三章 行业培训讲义

- a. 开关电源的测量与验证·····70
- b. LED照明驱动测量技术·····114
- c. 泰克公司变频器测试方案·····131
- d. 大功率逆变器的测试技术·····146

## 第四章 泰克测试选型指南

- a. 示波器及探头选型指南·····164
- b. 泰克高压探头资料·····167
- c. 泰克高压差分探头·····170
- d. 泰克电流探头资料·····174

## 第五章 其它泰克测试仪器方案介绍

- a. MDO4000系列混合域示波器·····186
- b. DMM4000系列数字万用表·····189
- c. AFG3000系列任意波形/函数发生器·····191
- d. FCA/MCA3000系列频率计数器数/分析仪微波频率计数器/分析仪·····192
- e. PWS4000/2000系列程控DC电源·····193-194

# **第一章**

## **现代电子电力行业应用方案**

# 泰克 LED 照明驱动测试解决方案

LED(发光二极管)照明是目前高速发展的新型行业，LED照明具有节能、环保、长寿命、易控制、免维护等特点，越来越受到市场的喜爱。众多国家已经制定政策，计划在数年内采用LED照明技术替代白炽灯。随着LED半导体技术的发展，LED的发光亮度更高，价格更低，LED照明的普及时代已经到来。

## LED 照明驱动面临的设计要求

LED本质上是电流驱动器件，发光强度和颜色都与驱动电流有关。恒流驱动电源是理想的LED驱动电源，但出于成本考虑，对于发光品质要求不高的场合，也使用部分恒压驱动电源。LED的光电转换效率很高，但驱动电源的效率参差不齐，在整体上制约着LED照明系统的整体效率，使LED照明系统的节能高效的特点难以充分发挥。随着社会对供电质量的要求不断提高，人们越来越关注用电设备带来的电能质量和谐波问题。如欧盟已经发布标准，规定功率大于25W的电源设备必须具备功率因数校正电路。

## 输入电能质量测试

测量驱动电源的输入功率、功率因数和谐波有很多方法，使用具有电源分析功能的泰克示波器产品可以轻松实现这些电能质量测量。使用一路通道测量输入电压、一路通道测量输入电流，配合示波器内置的电源分析软件，所有的电能质量相关参数可以直接显示在屏幕中。

## 驱动电源效率提升与测试

评估LED照明系统效率的关键在驱动电源，低效的驱动电源将导致整个照明系统的效率不高，难以发挥LED照明高效率的特点。而驱动电源效率和电源内部的开关损耗直接相关。损失在开关器件中的能量会转化为热量聚集在电源内。因此降低功率器件的损耗不但是提高电源效率的要求，也是提高系统热稳定性和可靠性的关键

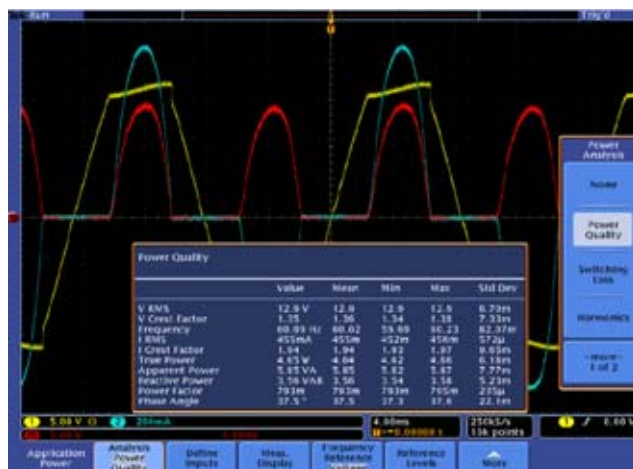


图1. 电能质量参数测试

因素。功率器件的开关损耗测量不易实现。由于器件在导通和关断工作状态下的电压幅度相差巨大，一般的示波器产品无法在如此大的动态范围下准确测量导通状态下的微小电压，导通损耗无从测量。对于高速切换的功率器件，只能通过电压和电流相乘得到瞬态功率的办法计算功率。这时电压和电流必须是同一时刻的波形，否则误差巨大。但电压探头和电流探头的原理和结构不同，对于高速切换信号的时间延迟也不同。如果不能准确地校正这一时间偏差，示波器的测量结果是不可信的。泰克的示波器电源测量方案具有强大的探头校准功能完全消除时间延迟误差。(详见相关介绍应用文章)。

使用泰克公司的高压差分探头测量MOSFET的Vds，同时用电流探头测量Ids即可得到MOSFET开关过程的瞬时功率波形。通过相关的参数设置得到稳定的周期信号显示后，泰克功率分析软件可以直接给出开启、关断、导通等各时间段的功率和能量损耗值。独特的波形搜索功能更可以轻松找到电源或负载变化时最大损耗的发生时刻。

## 第一章：现代电子电力行业应用方案



图 2. MOSFET 开关损耗测试

### 输出纹波测试

输出纹波会影响 LED 的光输出效果。但减小纹波需要使用更高品质和容量的电容。为提高电源整体的使用寿命，设计师往往倾向于采用无电容方案。工程师必须在输出纹波指标上确定折中方案。因此准确地测量纹波就显得十分重要。泰克示波器电源测试方案中具有纹波测量功能，可以一键完成纹波参数的测量。正如前面提到过的，LED 是恒流驱动器件，高品质的驱动电源需要有很好的电流纹波指标。泰克带宽高达 120MHz 的电流探头可以保证用户准确地测试出输出电流中的各种频率纹波，不会漏失高频成分。

此外，如果工程师希望通过简单的数字表完成这项任务，泰克数字万用表的双参数测量功能可以轻松实现。在测量直流电压和电流的同时，DMM4000 系列数字万用表可以同时显示交流电压或电流成分。



图 3. 输出纹波测试



图 4. 使用 DMM4000 数字表的双参数测量功能测试纹波

### 准确测量输出功率

输出纹波带来的另外一个问题是对输出功率测量的影响。传统的功率测量采用下面的公式测量功率。

$$P = V_{rms} \times I_{rms} \times \cos\phi$$

由于 LED 驱动电源的输出带有大量的纹波，普通的工频功率计的带宽是有几 KHz，对输出中的高频信号会有很大的衰减，遗漏这部分高频分量，造成实际测量结果偏低。

采用示波器瞬时功率积分的方法计算功率，可以有效地避免这些问题，轻松获得准确的功率值。

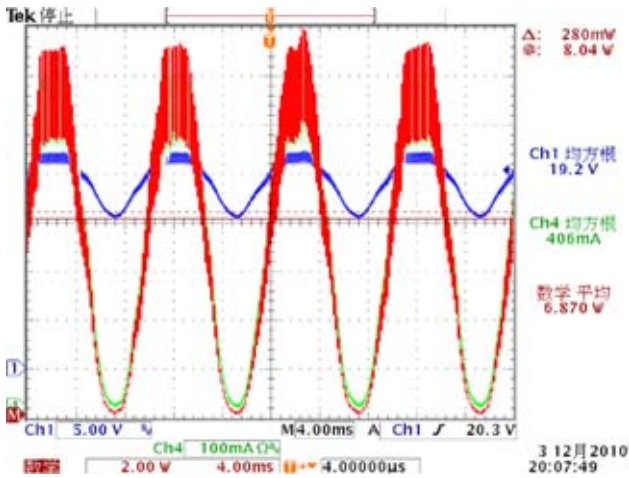


图 5. 示波器使用瞬时功率积分法测量输出功率

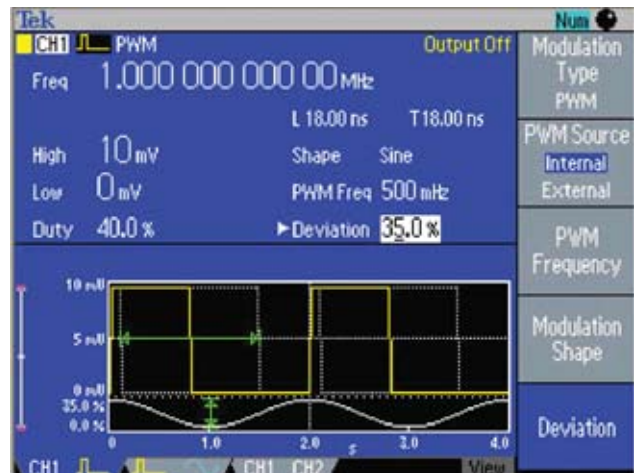


图 6. AFG3000 的 PWM 信号输出功能

### 调光电路的设计与测试

调光功能是高档 LED 照明产品需要的功能，也是 LED 照明进入家庭照明的必要条件。LED 调光的最新技术是 PWM 调光技术。通过产生不同脉宽的 PWM 信号，控制功率器件的开启和关断的比例，从而达到调节输出光通量的目的。相比于其他调光方式。PWM 调光不改变 LED 流过的电流大小，灯具不会出现偏色，也避免了电阻调光带来的能量损失，保持了 LED 照明的高效率。泰克的 AFG3000 任意波形发生器可以轻松实现 PWM 信号的输出，使用者可以任意改变 PWM 变化的形式，脉宽输出的比例以及变化规律，所有的操作只需在面板上摁一下按钮。发生器内置的阻抗调节功能可以适应更多的电路需要。

### 总结

LED 照明是绿色环保产业，市场需求和国家政策的双重推动必将带来 LED 产业的高速发展。工程师面临缩短开发时间和降低设计成本的压力。泰克 LED 照明驱动测试方案能够提高测试效率、增加测试准确度，帮助工程师轻松完成开发测试。



### 配置方案

泰克 LED 测试推荐方案	
示波器	DPO4000B/3000 数字荧光示波器 +DPOxPWR 功率分析模块
探头	TMDPO200 高压差分探头 +TCP0030 电流探头
数字万用表	DMM4040 6.5 位台式数字万用表
任意波形发生器	AFG3022B 任意波形发生器
台式电源	PWS4323 系列台式程控电源
软件	SignalExpress 仪器控制和数据采集软件
特点：电源质量，开关损耗，谐波，安全工作区，调制，纹波和转换速率的自动测量；自动校准探头偏差，保证测试精度。轻松产生 PWM 信号，实现调光电路设计	
基本测试方案	
示波器	TPS2012B
探头	P5201 高压差分探头 +A622 电路探头
万用表	3.5 位 /4.5 位 Fluke 手持万用表
信号发生器	AFG3021B
台式电源	PWS2323 台式电源
特点：实现基本测试，全部任务手动实现，成本低	

# 泰克变频驱动设计调试方案

变频驱动技术已经广泛地应用在工业生产和日常生活的各个领域，从冶金、石化、纺织行业，到冰箱、空调和洗衣机，变频器在我们身边几乎无处不在。随着节能减排要求的不断提高，市场要求变频驱动设备厂商生产出更加高效节能、调速性能更优秀、更加智能的产品。大容量、高效率、高可靠和智能化已经成为变频器市场的发展方向。

作为变频驱动设备的开发设计人员，工程师们需要一套完善的工具，在设计开发的各个阶段，调试和验证电路设计。特别是随着总线技术的发展和智能化要求的不断提高，密切跟随负载变化的快速响应功能和工业总线控制功能，成为变频器设计的一个重要部分。在众多的调试工具和方案中，泰克公司以示波器为核心的综合调试方案发挥着重要作用。

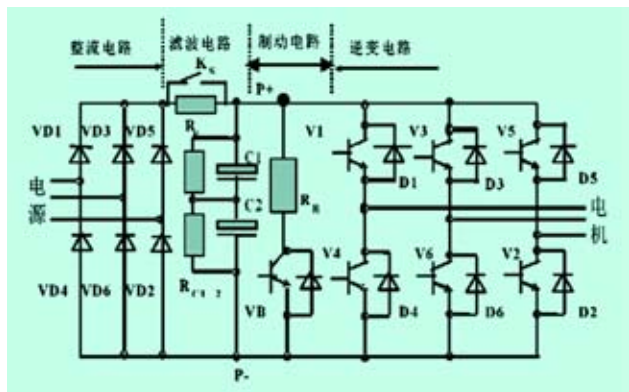


图 1. 变频器驱动电路框图

## 电能质量和转换损耗分析

变频器是能量转换和驱动设备，对变频器功率和效率测量是不可缺少的。在电气效率方面，一个重要的影响因素是 IGBT 本身的损耗影响。泰克示波器具有功率测量和损耗测量的工能，配合使用业内指标最为优秀的泰克高压差分探头和电流探头，泰克示波器可以准确测量出输入或输出功率，以及 IGBT 的损耗情况。如果选配泰克功率分析模块，这些操作更可以简化到按几个按钮即可得到测试结果。主要测试内容包括：有功功率、无功功率、视在功率、功率因素、相角、IEC61000 规定的谐波测试、开关损耗、安全工作区以及 dv/dt, di/dt 结果。

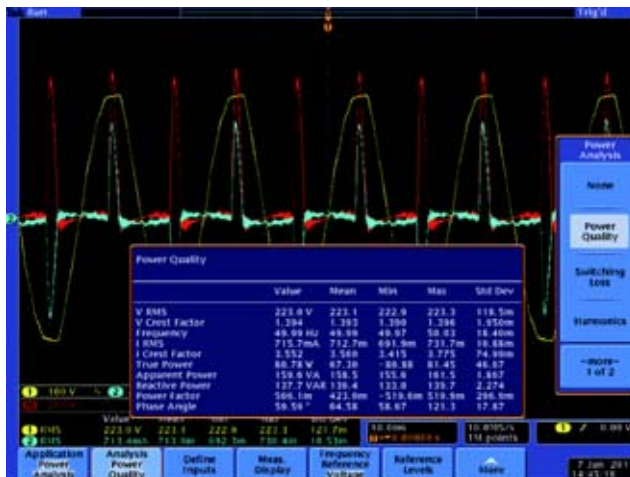


图 2. 电能质量参数测量





图 3. 电流谐波分析



图 4. 储能电容的纹波测量

### 电容器选择与纹波测量

很多变频设备的中间储能环节使用的是电容器,对于电解电容器来说,温升是影响使用寿命的一个重要因素,而温升和电容器的电流纹波有效值的平方成正比,因此准确测量并减小电流的纹波十分重要。泰克示波器拥有业内最优秀的电流探头,拥有高达 120MHz 带宽,可以准确测量低至 1mA 的纹波,使用者可以完全信赖测量结果。

### SPWM 信号测试

SPWM 调制信号是设计人员必须观测的信号,工程师们需要检测实际输出的 PWM 电压信号的基波的频率、波形和有效值是否正确。通过泰克独有的 FilterVu 功能或趋势测量功能,设计人员可以轻松看到输出信号的实际基波形状。这与其他公司通过增加滤波器的方式不同,它不会带来额外的相位偏移问题。

### 变频驱动系统的现场调试

变频器在实际使用时,常常需要根据实际情况调整参数设置,特别是大功率的电机拖动系统,由于驱动设备功率大、电压高,驱动设备与电机之间距离较远,传输电缆带来的影响需要补偿。如果补偿措施不当,会造成电机端子的过电压;此外供电系统的电压波动还有可能造成系统“脱扣”问题。

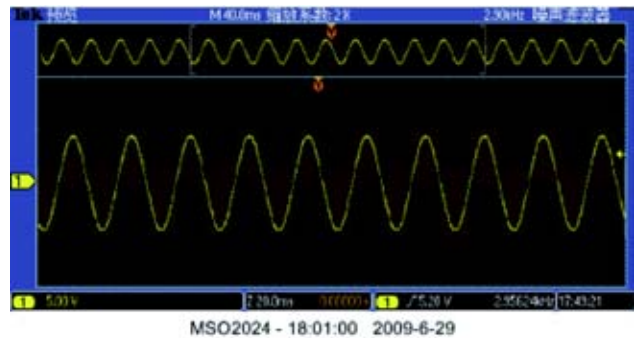


图 5. 驱动输出电压信号 SPWM 基波测试

解决这些问题示波器无疑是最佳选择,但传统的示波表和普通示波器往往不能有效地完成。首先示波表虽然能够用电池供电作浮地测量,但有限的存储长度无法高精度地捕获一个工频周期的全部信号。虽然有些示波器也标称具有较长的存储长度,但由于内存复用和波形管理的问题,实际使用时要么无法捕获预期长度的波形,要么在繁多的波形中无法发现工程师感兴趣的波形点。泰克的 MSO/DPO4000B 示波器拥有每通道独立的高达 20M 存储器,独特的波形导航功能可以快速的定位过电压位置。

## 第一章：现代电子电力行业应用方案

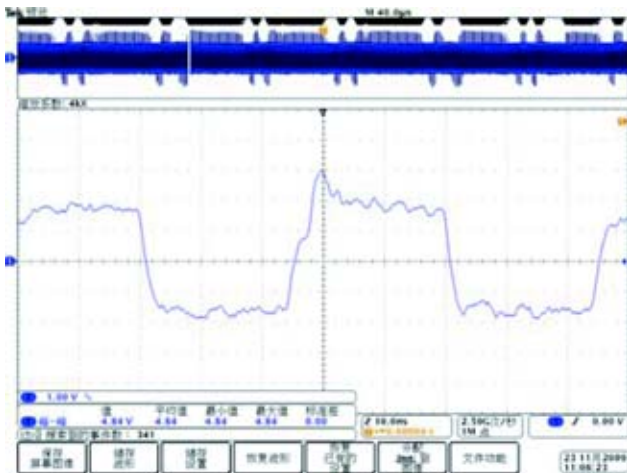


图 6. 电机拖动系统驱动电压的过电压毛刺捕获与分析



图 7. RS485 总线的触发和解码

### 通信串行总线解码

目前很多变频器与上位机的通信是使用 RS485 总线或 CAN 总线实现。泰克的 MSO/DPO 系列示波器具有串行总线的解码和触发功能,也就是说可以使用一帧总线传输的数据作为触发条件,查看指令发出之前和之后系统的驱动变化过程。

### 控制系统调试

现在的变频设备内部广泛地使用了大量工业总线和传感器,变频器设计已经不再是简单的功率输入、输出电路的检测。工程师需要在系统层面上全面地观测整个系统的工作状态。如当上位机发送一个速度设定指令后,设备是如何反应的? 经过多长的时间,输出信号达到了设定条件? 当变频器中的某一个温度传感器发出报警后,系统如何判断实际发生了什么问题? 系统如何响应? 这些问题在一定程度上可以使用软件仿真的办法调试。但工程师们都知道软件调试和实际的硬件工作是有区别的,特别是当系统出现一些预料之外的问题时。下面通过一个控制系统的例子加以说明。

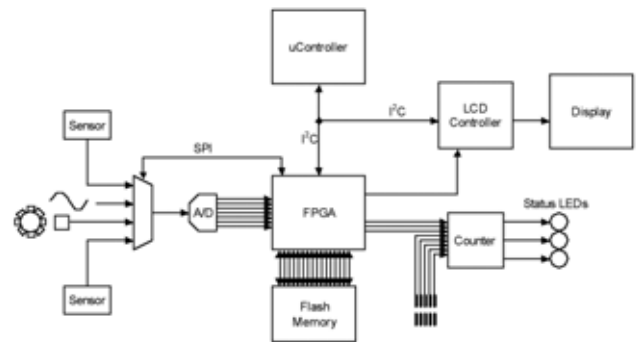


图 8. 控制系统框图

如图八所示,这是一个空调系统的温度控制部分,温度信号通过多个温度传感器进入 MUX 多路复用器,之后完成 A/D 转换,传送到 FPGA。MUX 与 FPGA 之间由 SPI 总线控制。微控制器通过 I<sup>2</sup>C 总线控制 FPGA 和 LCD 控制器,以显示实际温度。FPGA 输出 3 路并行总线,到状态指示灯 LED。如需温度调整,则通过其他总线控制空调系统的变频驱动电机。

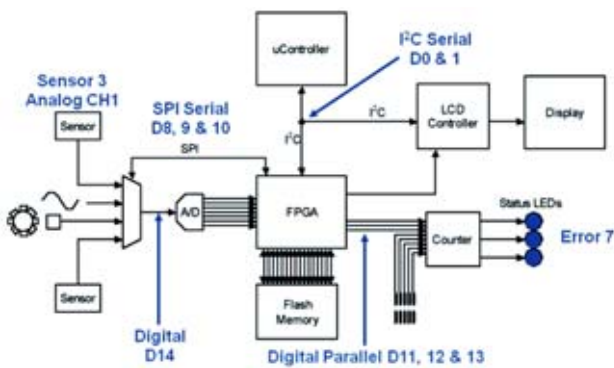


图9. #7error 故障 和测试连接

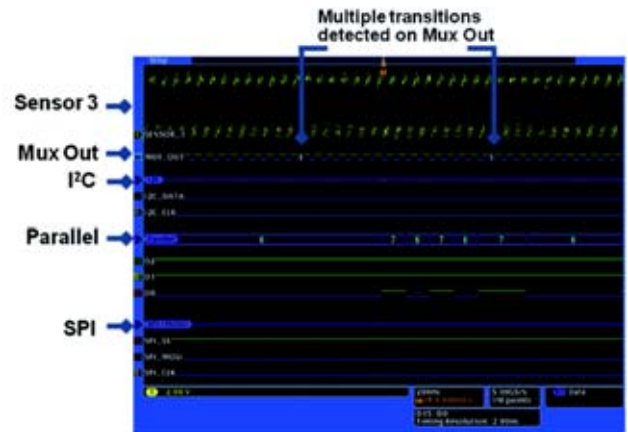


图10. 发现“7”前面的白边

工程师遇到的问题是：系统加电后，状态指示灯全部亮起报警，也就是显示“111”，因为111代表二进制数的7，我们称之为#7故障。

为全面了解系统到底出现了什么问题，我们将外部传感器的模拟信号、MUX OUT输出、I<sup>2</sup>C总线信号，SPI总线信号和三路并行总线信号同时接入泰克的MSO4000系列混合信号示波器，做系统级分析。当LED显示111时，并行总线上传输的数据应当为“7”，我们把它作为触发条件进行信号捕获。我们发现当出现“7”时，MUXOUT信号中有一个亮白色的竖条。泰克示波器显示方面的特色是：有亮白色代表其中还有细节为展示出来，可以放大显示。展开后发现有一个数字毛刺。MUX OUT是外部温度传感器信号，对应此时的传感器信号，没有发现类似的毛刺。而对应这一上升毛刺，在之后一段时间还有一个负向毛刺。由此我们怀疑这个毛刺可能有临近电路的串扰有关。我们接入附近的Xtalk信号，发现正是这个信号的快速变化，在MUXOUT电路中感应出串扰，造成系统出现#7错误。修改PCB布线后问题解决。

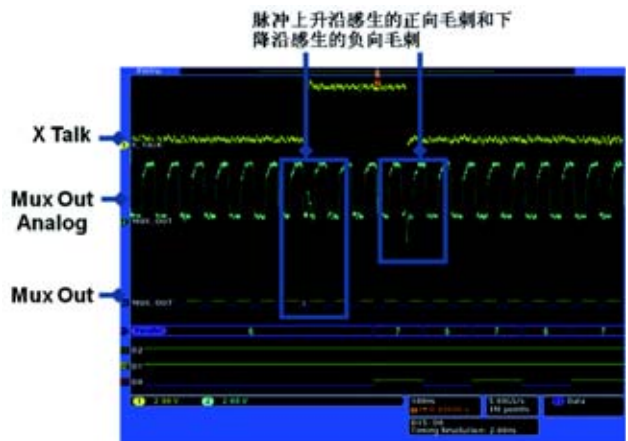


图11. 发现串扰

通过上面的例子我们可以看出，当前的变频器设计已经不再局限于功率电路的设计和调试。功率、效率、损耗、纹波以及系统分析都是工程师面临的挑战。泰克DPO/MSO系列混合信号示波器可以将电力电子分析功能和总线分析以及混合信号分析功能集于一身，配合泰克优质探头，帮助开发人员轻松完成设计和调试工作，极大提高工作效率。

## 第一章：现代电子电力行业应用方案

### 泰克推荐测试方案

变频驱动设备设计验证推荐方案	
示波器	MSO/DPO4000B/3000 数字荧光示波器 +DPOxPWR 功率分析模块 +COMP/EMBD/AUTO 总线分析模块(视使用的总线类型而定) * 如没有并行总线测试需求且同时解码的串行总线不超过 2 条，可以选择 DPO 系列示波器
探头	TMDP0200 高压差分探头 +TCP0030 电流探头(低压 690V 以下小功率系统) THDP0100 高压差分探头 +TCP0150 电流探头(中压 690V-1500V 系统) THDP0200 高压差分探头 +TCPA400+404XL 电流探头(高压大功率系统)
任意波形发生器	AFG3022B 任意波形发生器 产生 PWM 门极驱动信号 如驱动信号幅值要求超过 10V，可以选择 AFG3011 高驱动电压型号
数字万用表	DMM4040 6.5 位台式数字万用表
软件	SignalExpress 仪器控制和数据采集软件
特点：	电源质量，开关损耗，谐波，安全工作区，PWM 调制，纹波和转换速率的自动测量； 驱动电压信号毛刺捕获和分析； 工业控制总线分析解码和触发； 驱动板所需 PWM 信号模拟发生。
基本测试方案	
示波器	MSO/DPO2000 示波器
探头	P5201 高压差分探头 +A622 电路探头 (低压系统，其他电压等级设备请参阅泰克探头选型表)
信号发生器	AFG3021B
万用表	3.5 位 /4.5 位 Fluke 手持万用表
特点：	实现基本测试，全部任务手动实现，成本低
现场测试方案	
示波器	THS3000 手持示波器
探头	P5122 单端高压探头，A622/A621 电流探头
特点：	电池供电 7 小时，直接进行现场浮地测试

# 泰克伺服数控行业测试方案

## 需求与现状

随着工业生产自动化程度的提高,越来越多的机械设备和运动系统需要精确地速度、位置控制。在新设备研发和现有设备的技术改造中,大量使用变频调速和伺服、数控系统。运动控制成为当今自动化领域的热点之一。

从控制原理上看,不论是简单的步进电机控制,还是对直流无刷或交流伺服电机的控制,都是通过控制电路产生特有规律的驱动脉冲,控制驱动器中的IGBT等器件产生电机的驱动信号。对于设计人员来说,验证通过控制算法产生的驱动脉冲是否符合控制要求是一项非常重要的任务。此外,IGBT驱动信号必须满足同一桥臂上的两个驱动脉冲不能重叠而且保证有一定的死区间隔的要求(否则会造成桥臂短路)。这些问题如果不做检查验证,可能会出现驱动电路烧毁的严重故障。

作为控制单元,控制板卡需要和设备中的各种传感器和上位机通信。板卡中的各种I/O接口需要验证工作的可靠性。对于工控领域至今广泛使用的RS485/422/232总线,工程师一直以来缺少得力的工具快速地完成调试工作。大量的手工解码,不但花费大量设计时间,还不能有针对性地捕捉和分析特定指令下的执行反馈。自动化行业的设计人员需要更方便快捷的调试工具。

## 解决方案

泰克的DPO/MSO系列示波器拥有独特的波形搜索能力,可以通过用户设定的条件,自动找到一段时间内,驱动脉冲的错误状态,如桥臂短路和死区时间不足等。如图二所示,通过设定建立保持时间搜索条件,示波器自动将距离过近或重叠的驱动脉冲组标记出来。使用此功能可以从控制电路的设计初期,保证了电路的安全性,确保系统的安全稳定工作。

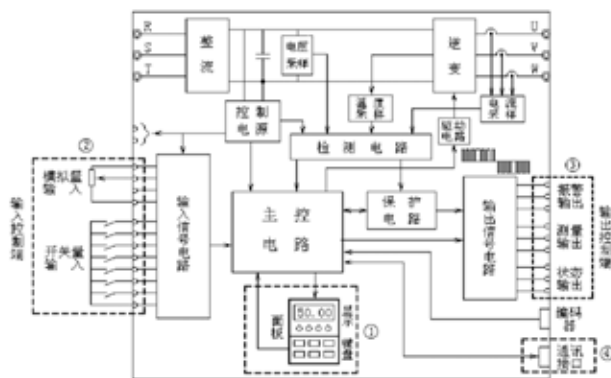


图1. 典型的伺服控制电路

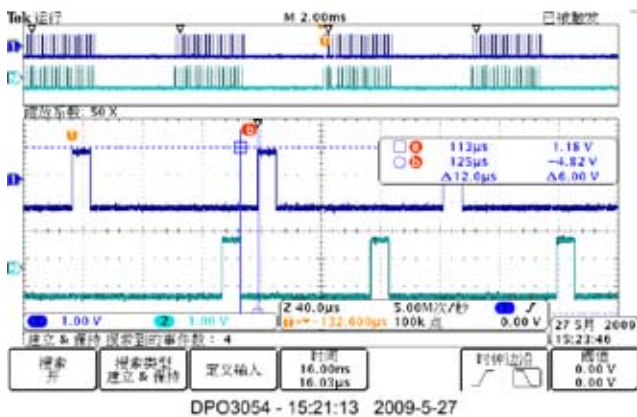


图2. 波形搜索功能自动查找到死区时间不足的同一桥臂驱动脉冲组

## 第一章：现代电子电力行业应用方案

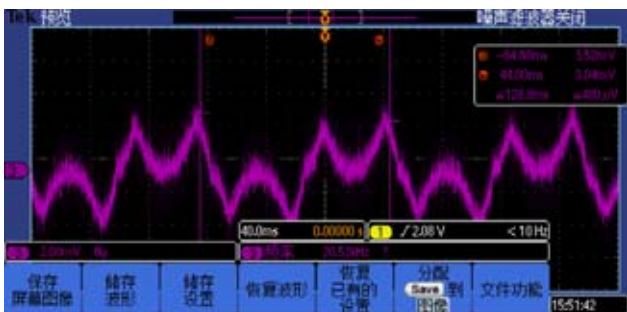


图 3. SVPWM 调制控制下轻载状态下的电流波形

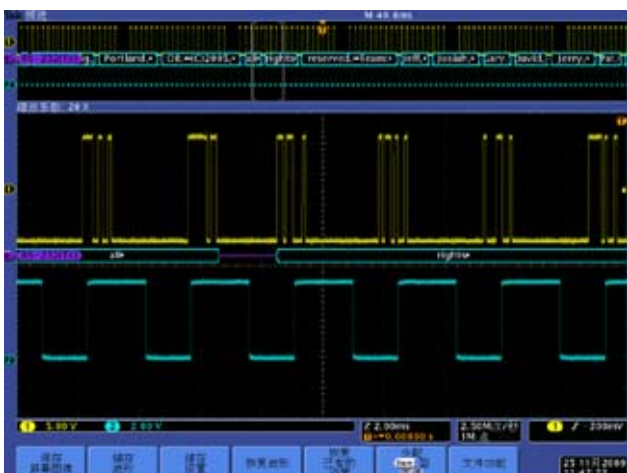


图 4. 黄色的 RS232 波形被自动解码同时测试到一组时钟信号

伺服驱动系统根据伺服和调速要求,改变驱动脉冲的脉冲宽度和变化规律,使系统的执行机构,按照设定的模式改变驱动电流的大小和波形。泰克示波器独有的趋势分析和可变低通滤波功能,可以准确地测量出驱动电流或驱动电压的 PWM 变化规律,帮助工程师调试参数或改进设计。

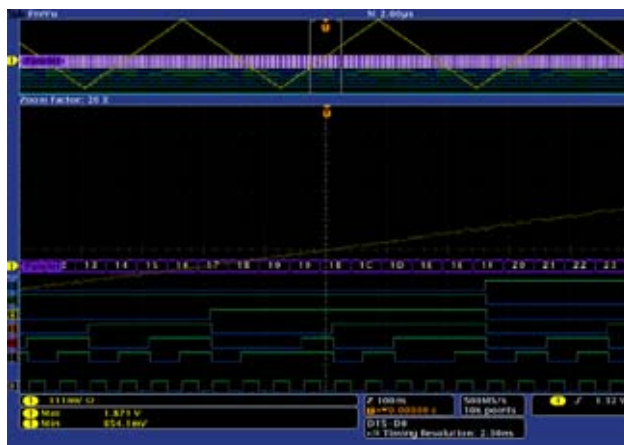


图5. 黄色传感器的模拟信号和A/D变换后的6位数字信号以及转换后的 16 进制数据

各种RS485/232或CAN总线接口电路的调试可以用泰克示波器加COMP或AUTO串行总线分析模块轻松完成。DPO/MSO系列示波器不但能够自动解码,以二进制、十六进制或ASCII码显示总线传输信息,还可以根据用户设定的分隔符,将数据显示成分组的指令信息,与用户的编程语句十分接近。这些数据可以通过数据表的方式保存下来,方便工程师和编程人员商讨故障的真正原因。总线触发功能可以使工程师捕获某一指令发出后的系统执行情况的全部信息。多通道的DPO/MSO示波器更可以在调试一种总线时,同时观测发生的其他信号或总线的的数据,真正做到了系统级的分析。

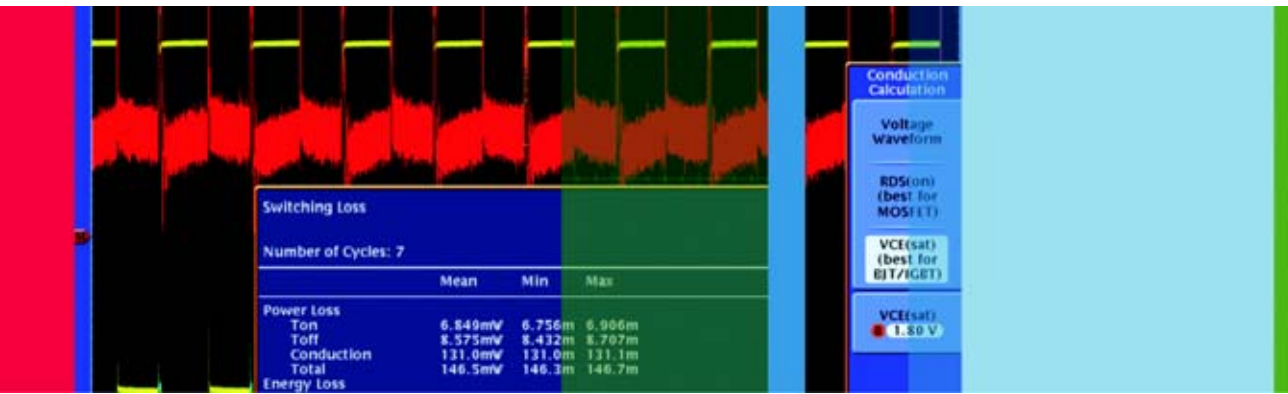
在控制板卡中有大量的传感器输入电路。泰克示波器的混合信号调试功能方便工程师调试各种A/D,D/A电路,如温度传感器、电流采样传感器这样的系统检测和保护信号,以及位置和速度控制的旋转变压器,编码器或光栅尺的输出信号。对于各种开关量和并行总线数据,同样可以轻松处理。

典型配置

泰克推荐方案	
示波器	MSO4000B/3000 数字荧光示波器 COMP/EMBD/AUTO 总线分析模块(视使用的总线类型而定)
探头	TMDP0200 高压差分探头 +TCP0030 电流探头(低压 690V 以下小功率系统) (低压系统, 其他电压等级设备请参阅泰克探头选型表)
台式电源	PWS4323 系列台式程控电源
任意波形发生器	AFG3022B 双任意波形发生器 产生各类传感器信号
数字万用表	DMM4040 6.5 位台式数字万用表
基本测试方案	
示波器	MSO/DPO2000 示波器 (如比调试并行总线和 A/D, 可选择 DPO 型号)
探头	P5201 高压差分探头 +A622 电路探头 (低压系统, 其他电压等级设备请参阅泰克探头选型表)
信号发生器	AFG3021B
万用表	3.5 位 /4.5 位 Fluke 手持万用表
特点: 实现基本测试, 全部任务手动实现, 成本低	

方案比较

	泰克 MSO/DPO 示波器	示波表	其他示波器
驱动脉冲故障检测	有, 可自动查找并标记	无	无
总线通讯解码和捕获	有, 可解码成指令语句, 带有事件表功能, 两路以上总线同时解码	无	无 或 有限(只能做 简单解码), 单路
驱动脉冲趋势分析	有可通过 trend 功能, 或 FilterView 实现	无	无
A/D, D/A 电路分析	有, 具有多种显示和 分析方法(MSO 系列)	无	有(限混合信号示波器)
控制板卡系统级 联合调试	可以, 用一台示波器在 同一个屏幕上完成	无	无
启、制动, 运行状态 变化过渡过程捕获	可以, 5M/20M 每通道的长存储 保障了高精度的长时间捕获	不能	不能



# 泰克开关电源测试方案

## 应用指南

### 引言

从儿童玩具到计算机和办公设备、再到工业设备，许多不同的电子设备都要使用电源，电源用来把电能从一种形式转换成另一种形式，以使设备正确运行。常用的电源包括：把AC电压转换成稳定的DC电压的AC到DC转换器；把电池电源转换成要求的电压电平的DC到DC转换器。

电源分成不同的类型，包括传统线性电源到为复杂动态工作环境设计的高效开关式电源(SMPS)。设备负载和需求在不同时间可能会大幅度变化。即使是商用开关电源也必须能够承受突然出现的远远超过平均工作电流的峰值电流。从静止条件到最坏情况条件，电源或电源系统设计工程师必需了解电源在各种条件下的行为。



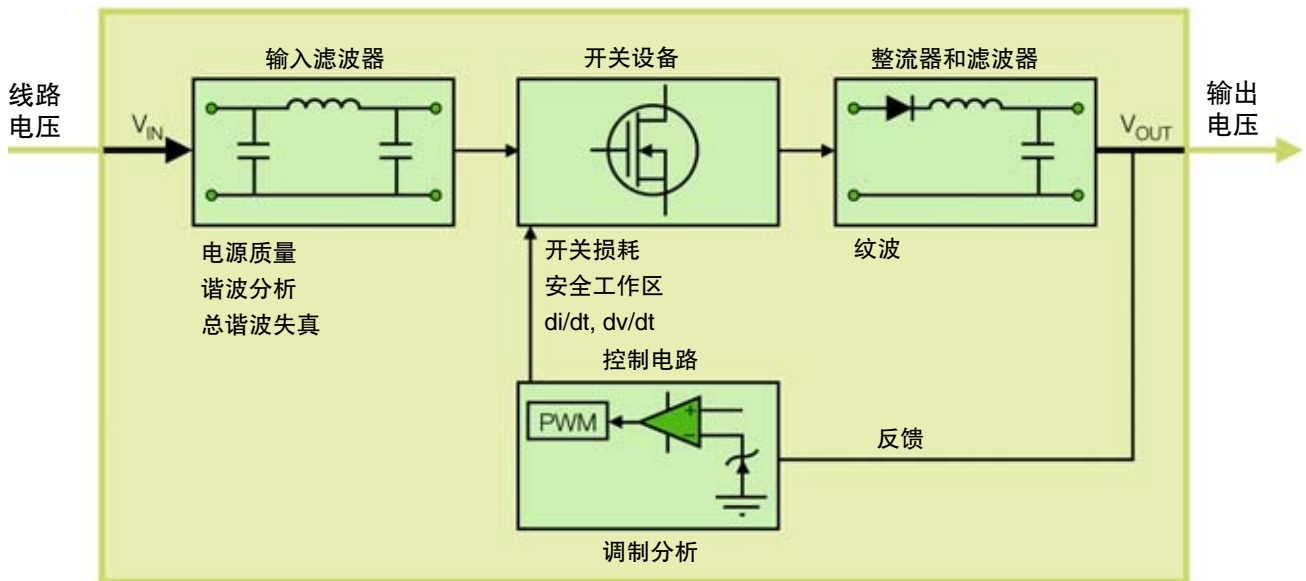


图 1. 使用 DPOxPWR 电源分析软件检定 SMPS 元器件。

从历史上看, 检定电源特点意味着使用数字万用表测量静态电流和电压, 然后在计算器或计算机上进行繁琐的计算。今天, 大多数工程师正转向示波器, 把示波器作为首选的电源测量平台。

本应用指南将介绍使用泰克 MSO/DPO4000B 或 MSO/DPO3000 系列示波器进行常见的开关式电源测量, 如图 1 所示。通过选配电源测量和分析软件(DPOxPWR), 这些示波器提供了自动测量功能, 可以快速进行分析, 简化设置, 校正探头偏移, 实现最大精度。

### 准备进行电源测量

在理想情况下, 电源的工作方式应与设计和建模的工作方式一模一样。但事实上, 各种元器件都是不完美的, 负载会变化, 电源可能会失真, 环境变化会影响性能。提高性能、改善效率、缩小尺寸、降低成本的需求, 则进一步提高了电源设计的复杂性。

考虑到这些设计挑战, 必须正确设置测量系统, 准确捕获波形进行分析和调试。要考虑的主要项目有:

- 示波器采集模式
- 消除电压探头和电流探头之间的偏移
- 消除探头偏置
- 电流探头消磁
- 带宽限制滤波器

## 第一章：现代电子电力行业应用方案

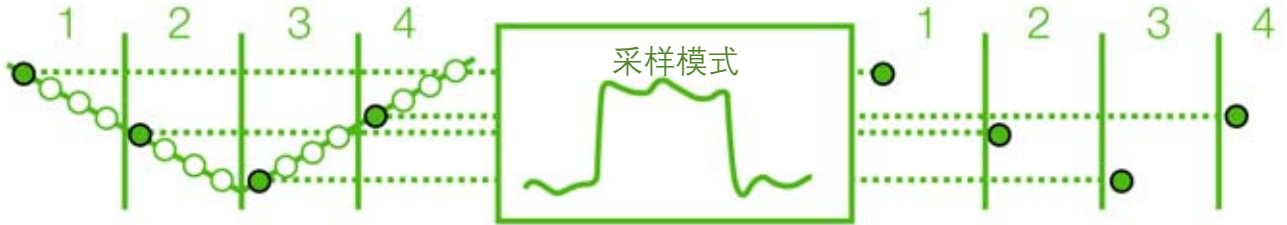


图 2. 采样模式。

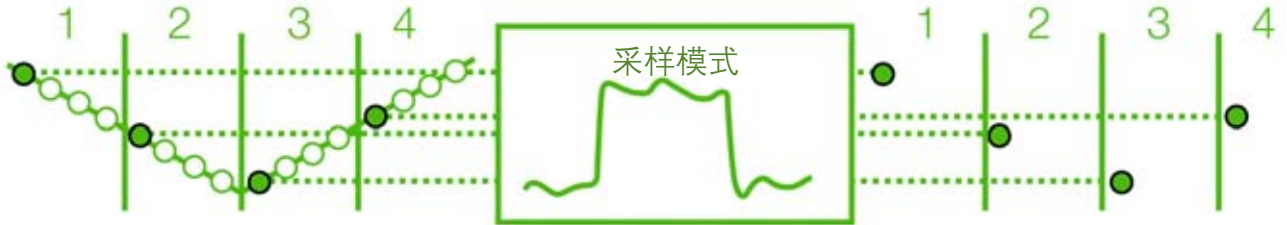


图 3. 平均模式。

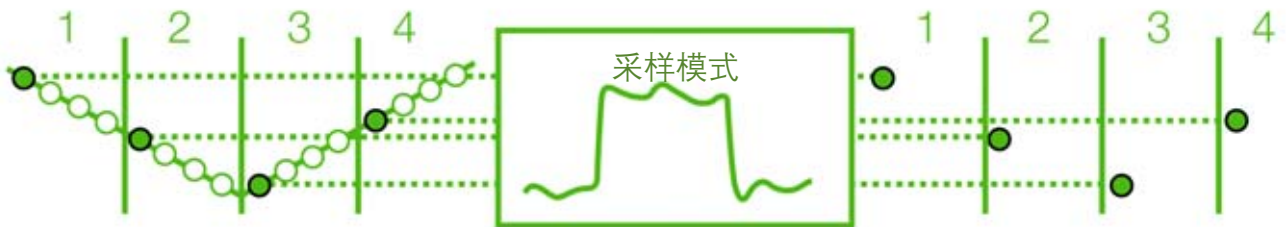


图 4. Hi-Res 模式。

### 示波器采集模式

示波器采集模式控制着怎样采样、处理和显示电信号。得到的波形点是数字值，存储在存储器中，显示构成波形。大多数示波器支持不同的采集模式，选择的采集模式可能会影响电源测量的精度。必需了解采集模式怎样工作以及其对波形和后续电源测量的影响。

每台示波器都提供了采样模式，这是最简单的采集模式。如图 2 所示，通过在每个波形间隔中保存一个样点（波形间隔在图中表示为 1, 2, 3, 4），示波器创建一个波形点。采样模式建议用于要求在不重复信号上进行多次采集的测量，如纹波和噪声分析。

大多数示波器制造商提供的另一种采集模式是平均模式。在平均模式下，示波器象采样模式一样，在每个波形间隔中保存一个样点。但是，在平均模式下，将平均来自连续采集的对应波形点，生成最终显示的波形，如图 3 所示。平均模式降低了噪声，而又不会损害带宽，但要求重复信号。平均模式特别适合执行谐波分析或电源质量分析测量，如真实功率、无功功率和视在功率。

泰克还提供了 Hi-Res 模式。在这种模式下，将平均在一个波形间隔内采集的多个连续样点，从单个采集中生成一个波形点，如图 4 所示。其结果，降低了带宽，进而降低了噪声，改善了低速信号的垂直分辨率。Hi-Res 特别适合为电源供电及在一次采集中采集数据时进行调制分析。Hi-Res 可以改善测量精度，如开关损耗，这些测量基于数学计算值，如瞬时功率。

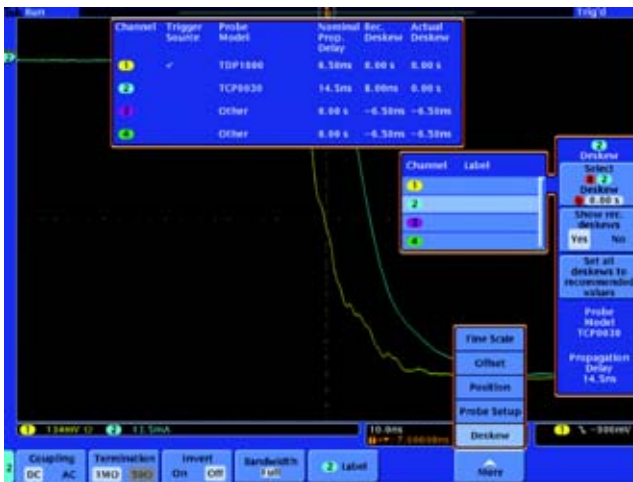


图 5. 电压探头和电流探头之间的默认定时偏移。

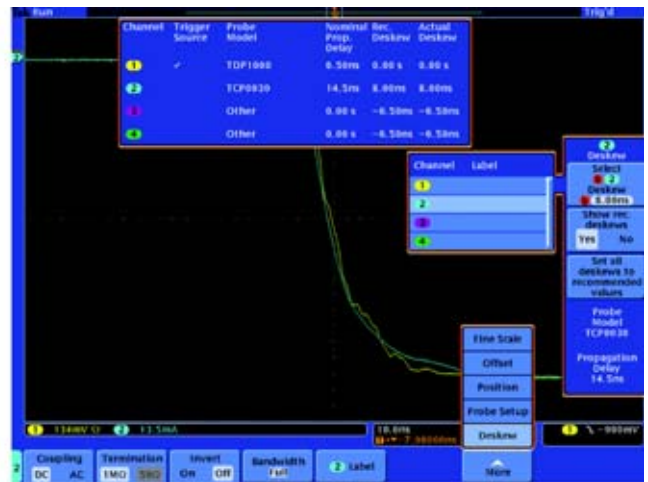


图 6. 校正电压探头和电流探头之间标称定时偏移。

## 消除电压探头和电流探头之间的偏移

在使用数字示波器进行电源测量时，必需测量流经被测设备的电压及电流。这一任务要求使用两只不同的探头：一只电压探头（通常是高压差分探头），一只电流探头。每只电压探头和电流探头都有自己的特性传播延迟，在这些波形中产生的边沿不可能自动对准。电流探头和电压探头之间的延迟差称为偏移，会导致幅度和定时测量不准确。必需了解探头的传播延迟对最大峰值功率和面积测量的影响，因为功率是电压和电流的乘积。如果电压信号和电流信号没有完美对准，那么会得到不正确的结果。

泰克MSO和DPO系列提供了“偏移校正”功能，消除探头之间的偏移。在选择了Deskew菜单后，会显示一个信息框，其中描述了每条通道的探头型号、标称传播延迟、推荐偏移校正和实际偏移校正。图5中的电压和电流波形有大约8 ns的偏移，信息框中显示了每只探头的传播延迟。TDP1000（泰克差分电压探头）的标称传播延迟为6.5 ns，TCP0030（泰克电流探头）的标称传播延迟为14.5 ns，传播延迟相差8 ns。

校正探头之间的偏移非常简单，只需选择“Set all deskews to recommended values”（把所有偏移校正设置为推荐值）侧面聚光按钮，如图6所示。选择这个选项将把探头的Actual Deskew（实际偏移校正）值调节到Recommended Deskew（推荐偏移校正）值。Recommended Deskew值基于探头的标称传播延迟，标称传播延迟存储在探头的内存中，其前提是探头支持TekVPI®，一般支持自动校正探头偏移。

## 第一章：现代电子电力行业应用方案



图 7. 泰克偏移校正脉冲发生器和偏移校正夹具。



图 8. 手动消除电压探头和电流探头之间的定时偏移。



图 9. 泰克 TCP0030 AC/DC 电流探头，带有消磁/自动清零功能。

选择“Set all deskews to recommended values”(把所有偏移校正设置为推荐值)将考虑探头的标称传播延迟差，它将非常接近正确的偏移校正，但仍不能精确地对准波形。为精确对准波形，实现最大测量精度，要求使用TEK-DPG (偏移校正脉冲发生器)和偏移校正夹具。

TEK-DPG 为电源测量偏移校正夹具(泰克部件编号 067-1686-XX)提供了一个源信号，如图 7 所示。在把探头连接到偏移校正夹具后，可以手动拨入“Actual Deskew”(实际偏移校正)，改变偏移校正值，精确对准波形。图 8 说明 TDP1000 探头的 Actual Deskew 值已经调节了 680 ps，从 6.5 ns 调节到 7.18 ns，实现了最大精度。

### 消除探头偏置

差分探头一般会有较小的电压偏置。这个偏置会影响精度，必须先消除这个电压偏置，然后才能继续测量。大多数差分电压探头拥有内置的 DC 偏置调节控制功能，可以相对简单地消除偏置。

在进行测量前，可能还需要调节电流探头。通过把 DC 余额清零到平均值 0 A 或尽可能接近 0 A，可以调节电流探头偏置。基于 TekVPI 的探头，如 TCP0030 AC/DC 电流探头，内置自动消磁/自动清零程序，用户只需在探头补偿盒上按一个按钮就可以了。

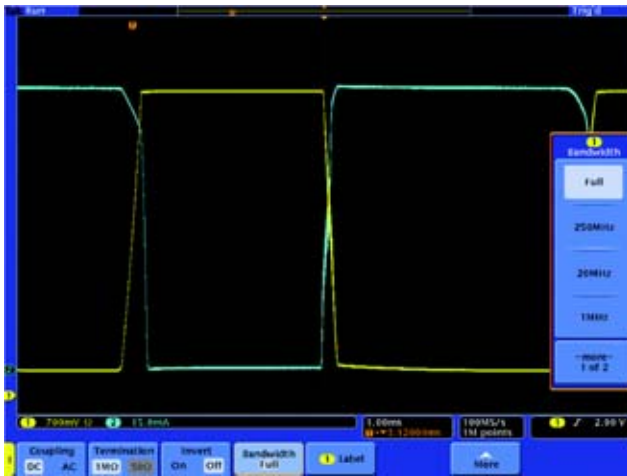


图10. 连接TDP1000的MSO/DPO4000B系列示波器上提供的带宽限制滤波器。

### 消磁

电流探头还应包括简便易用的消磁功能。消磁功能去掉变压器核心中残余的任何DC通量，这可能是由输入电流量过大而引起的。这种残余通量会导致输出偏置误差，应去掉这种误差，以提高测量精度。

泰克 TekVPI 电流探头提供了一个消磁警告指示灯，会警告用户将执行消磁操作。由于电流探头随着时间推移可能会有明显的漂移，进而影响测量精度，因此消磁警告指示灯是一种实用功能。

### 带宽限制滤波器

限制示波器带宽可以从显示的波形中去掉噪声或不想要的高频成分，提高信号的干净程度。MSO/DPO 系列提供了内置带宽限制滤波器，如图 10 所示。在某些情况下，探头可能还会配备带宽限制滤波器。

用户在使用这些滤波器时要小心，因为可能会从测量中去掉n阶谐波中包含的频率成分。例如，如果要测量1 MHz信号，要评估40阶谐波，那么至少要求40 MHz的系统带宽。把带宽限制滤波器设置成20 MHz(如图10所示实例提供的选项)将删除这一测量要求的频率成分。

### 电源测量

在正确设置测量系统后，可以开始执行电源测量。常用的电源测量可以分成三类：输入分析、开关设备分析和输出分析。

#### 输入分析

实际环境电源线永远不会提供理想的正弦波，线路上总有一些失真和不纯。开关式电源为电源提供了非线性负载。因此，电压波形和电流波形并不是完全相同的。在输入周期某个部分会吸收电流，导致在输入电流波形上产生谐波。分析电源输入时的主要测量项目有：

- 谐波
- 电源质量

# 第一章：现代电子电力行业应用方案



图 11. 使用 DPOxPWR 进行谐波分析。

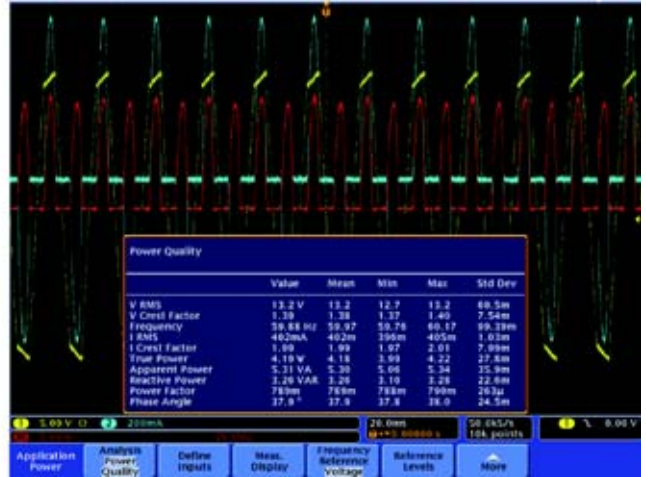


图 12. 使用 DPOxPWR 测量电源质量。

## 谐波

开关电源一般会生成以奇数阶为主的谐波，直到电网。其影响具有累积性特点，随着连接到电网的开关电源越来越多(如办公室中增加更多的台式电脑)，返回电网的谐波失真的总百分比会上升。由于这种失真会导致热量在电网的线缆和变压器中积聚，因此必需使谐波达到最小。业内制订了 IEC61000-3-2 等法规标准，监控来自特定非线性负载的电源质量。

确定这些失真的影响是电源工程的一个重要部分，使用示波器、而不是万用表具有明显的好处。测量系统必须能够捕获到基础频率 50 阶谐波的谐波成分。电源线频率通常为 50 Hz 或 60 Hz，但对某些军事和航空应用，线路频率可能是 400 Hz。应该指出的是，信号畸变可能包含频谱成分，其中带有更高的频率成分。由于现代示波器的高采样率，可以以非常高的细节(分辨率)捕获快速变化的事件。相比之下，传统功率计会由于反应时间相对较慢而漏掉信号细节。

执行谐波分析就象进行普通波形测量一样简便。由于在这种情况下信号是重复的周期波形，因此触发和显示起

来非常简单。应至少显示五个周期，以保证良好的频率分辨率，垂直标度应设置成信号在显示屏上占用尽可能多的竖格，以获得最佳的测量精度。

图 11 显示了电源负载电流的谐波分析结果。在 Display 菜单中，可以选择特定谐波测量。本例中选择了五阶谐波。用户可以选择以表格方式或以图形方式查看结果，并可以选择是否查看 “All, Odd, or Even”(所有、奇数或偶数)谐波。谐波数据可以保存为 CSV 文件，保存到 USB 存储设备中。另外还显示相对于基础谐波和 RMS 值的总谐波失真(THD)值。这些测量功能适用于分析是否满足 IEC61000-3-2 和 MIL-STD-1399 等标准，DPOxPWR 电源测量应用软件标配了这些功能。

## 电源质量

电源质量不仅取决于发电机，还取决于电源和最终用户的负载。电源上的电源质量特点决定着电源的“健康”状况，决定着非线性负载导致的失真影响。如图 12 所示，DPOxPWR 电源应用软件使用下述自动测量功能提供一个结果表：V<sub>RMS</sub> 和 I<sub>RMS</sub>、电压和电流峰值因数、真实功率、无功功率、视在功率和功率因数。

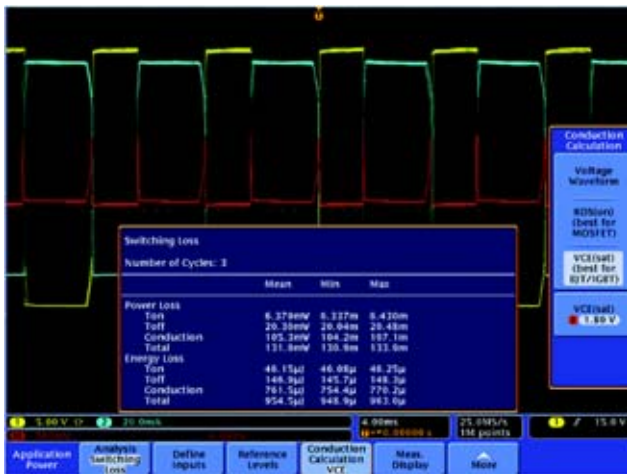


图 13. 使用 DPOxPWR 测量 IGBT 的开关损耗。

### 开关设备分析

大多数现代系统中流行的 DC 电源结构是开关式电源 (SMPS)，这些电源因能够高效处理变化的负载而闻名。SMPS 最大限度地减少了损耗元器件的使用，如电阻器和线性模式晶体管，而重点使用无损耗(理想情况下)的元器件。SMPS 设备还包括一个控制段，其中包含脉宽调制稳定器、脉冲速率调制稳定器和反馈环路等单元。

SMPS 技术依托电源半导体开关设备，如金属氧化物场效应晶体管(MOSFET)和绝缘门双极晶体管(IGBT)。这些设备提供了快速开关时间，能够耐受没有规律的电压峰值。此外，其在 On 状态或 Off 状态下消耗的功率非常小，实现了很高的效率，而生成的热量很低。开关设备在极大程度上决定着 SMPS 的整体性能。开关设备的主要指标包括：

- 开关损耗
- 安全工作区
- 转换速率

### 开关损耗

晶体管开关电路在转换过程中消耗的能量一般最大，因为电路寄生信号会阻碍多台设备同时开关。在从 OFF 状态转换到 ON 状态时开关设备(如 MOSFET 或 IGBT)中丢失的能量称为开机损耗。类似的，在开关设备从 ON 状态转换到 OFF 状态时丢失的能量称为关机损耗。由于寄生电容中的耗散单元及二极管中存储的电感和电荷，晶体管电路会在开关过程中丢失能量。正确分析这些损耗对检定电源及测量其效率至关重要。

如图 13 所示，在选定采集区域内完整周期(在默认状态下是整个波形)上进行开关损耗测量，将在采集中、而不是采集之间累积这些指标的统计数据。

测量开机损耗和关机损耗的主要挑战是损耗发生的时间周期非常短，而在开关周期其余时间损耗会达到最小。这要求电压流形和电流波形之间的定时非常精确，测量系统偏置要最小化，测量的动态范围要足以准确地测量 On 和 Off 电压和电流。如前所述，必须清零探头偏置，必须对电流探头消磁，去掉探头中任何残留的 DC 通量，必须使通道之间的偏移达到最小。

## 第一章：现代电子电力行业应用方案

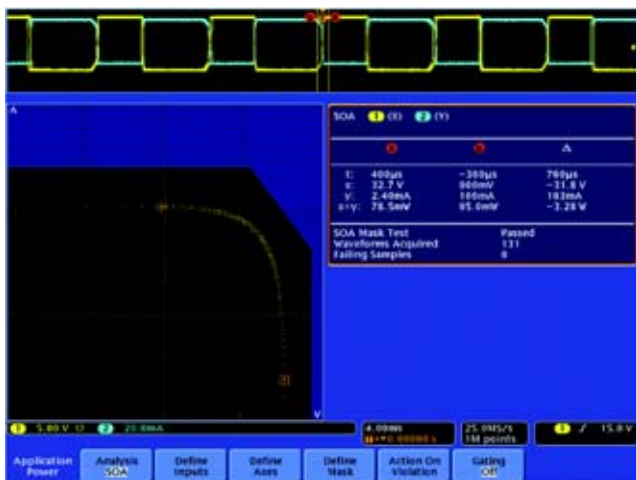


图 14. 使用 DPOxPWR 进行 SOA 模板测试。

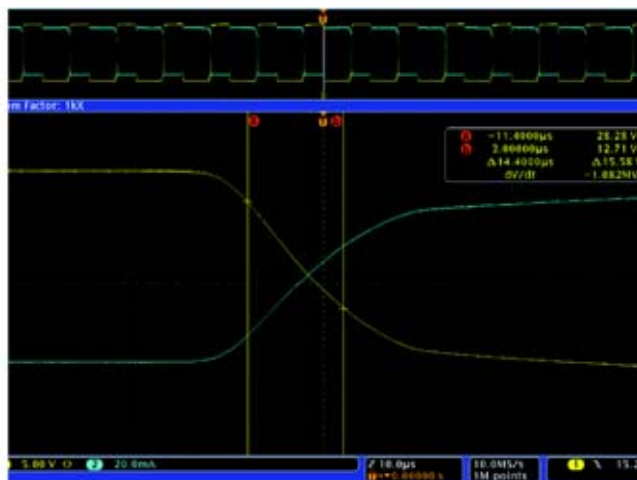


图 15. 使用 DPOxPWR 进行转换速率测量。

另一个主要挑战是，准确测量开关损耗要求高动态范围。开关设备的电压在 On 状态和 Off 状态之间大幅度变化，因此在一次采集中很难同时准确地测量这两种状态。有三种方式使用 MSO/DPO 系列确定正确值：

- 测量传导过程中开关设备的电压下跌。由于这个电压与未传导时开关设备中的电压相比一般非常小，因此通常不可能在示波器相同的垂直设置下同时准确地测量这两个电压。
- 根据设备技术资料提供  $R_{DS(on)}$  值(最佳的 MOSFETs 模型)。这个值是传导时设备漏极和源极之间的预计开点电阻。
- 根据设备技术资料提供  $V_{CE(sat)}$  值(最佳的 BJTs 和 IGBTs 模型)。这是饱和时从设备集电极到发射机的预计饱和电压。

### 安全工作区(SOA)

晶体管的安全工作区(SOA)定义了设备在不会损坏的情况下工作的条件，特别是电压一定时有多少电流可以通过晶体管。如果超过这些限制，晶体管可能会失效。SOA 是一种图形测试技术，它考虑了开关设备的各种限制，如最大电压、最大电流、最大功率，保证开关设备在规定的极限范围内正常运行。

开关设备制造商的产品技术资料会概括对开关设备的某些限制。其目标是保证开关设备将容忍电源在最终用户环境中必须处理的工作边界。SOA 测试变量可能包括各种负载场景、工作温度变化、高和低线路输入电压等等。如图 14 所示，可以创建一个用户自定义模板，保证开关设备在电压、电流和功率方面满足规定的容限。模板违规在电源应用中会报告为故障。

### 转换速率

为检验开关设备是否实现最大工作效率，必须测量电压信号和电流信号的转换速率，检验电路操作满足规范。如图 15 所示，可以使用示波器，利用测量光标，确定开关信号的转换速率，简化门驱动检定和开关  $dv/dt$  或  $di/dt$  计算。



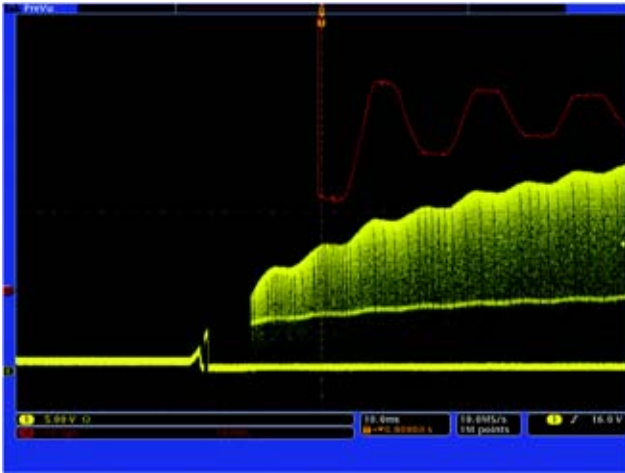


图 16. 使用DPOxPWR在开机过程中对IGBT门驱动进行调制分析。

### 输出分析

在理想情况下，DC 电源的输出不应有任何开关谐波或其它不理想的噪声成分。实际上这是不可能的。输出分析测量对确定输入电压或负载变化对输出电压的影响至关重要。这些测量包括：

- 调制分析
- 纹波

### 调制分析

MSO/DPO4000B和MSO/DPO3000系列的数字荧光采集技术在调试电路时提供了独特的优势，特别是识别开

关电源中过度调制影响。这些示波器拥有 50,000 wfm/s 波形捕获速率，比普通数字存储示波器(DSO)高了许多倍。在考察调制效应时，这提供了两种优势。第一，示波器在更多的时间内是活动的，处理波形进行显示所用的时间较少。因此，示波器捕获调制的机会明显提高。第二，数字荧光显示技术可以更简便地实时看到被调制波形。显示屏会高亮度显示信号轨迹经过最频繁的区域，这在很大程度上与模拟示波器类似。调制比连续重复的主波形暗，因此更容易看到。

还可以使用泰克示波器简便地测量调制效应。图 16 显示了控制着电源上电流模式控制环路输出的被调制信号。在反馈系统中，调制对控制环路具有重要意义。但是，调制太多会导致环路变得不稳定。注意在调制频次较低的区域中波形较暗。红色的波形是数学运算波形，显示了在电源振荡器启动时，在 IGBT 门驱动信号上进行的周期间脉宽测量的发展趋势。由于数学运算波形代表脉宽测量值(采用时间单位)，可以使用光标测量脉宽变化。数学运算值表示采集的波形中选定调制指标的发展趋势。在本例中，它表示振荡器控制环路在启动过程中的响应。还可以使用这种调制分析，测量电源控制环路对输入电压变化(“线路稳压”)或负载变化(“负载稳定”)的响应。

### 纹波

纹波是叠加到电源 DC 输出上的 AC 电压，它表示为正常输出电压的百分比或峰峰电压。线性电源通常会看到接近于线路频率两倍(~120 Hz)的纹波，而开关电源可能会看到几百 kHz 的开关纹波。

# 泰克消费电子产品节能设计应用

## 节约能源：设计者，消费者和环境的三赢之选

今天，便携式的电子设备到处可见——家庭、医院、学校、钱包里、口袋中。看起来便携设备的清单涵盖了几乎所有的事物：从移动电话到笔记本电脑，从照相机到MP3播放器，再到掌上游戏系统等等。随着便携设备的爆发式增长，消费者对电池使用时间也有了更高的期望。十年前，典型的移动电话在一次充电以后可能可以工作四个小时。而现在，它充电一次就可能可以使用好几天。

要增加电池的使用时间，就必须使用节能设计。在设计较为简单的时候，我们强调的是优化包括电源在内每个器件，使它们可以拥有最高的性能并消耗最少的能量。

随着单台便携式电子设备的性能提高、功能增强，驱动这些设备的嵌入式系统的复杂程度明显提高。这些系统非常复杂，已不再是之前的单个元件，而是包含了多个相互作用、功能各异的器件。今天新的能源管理技术着眼于整个嵌入式系统，以降低总消耗功率。

使用电线供电的设备，包括服务器和个人电脑等，也集成了这些技术，以满足商业企业、消费者以及政府对降低能耗的要求。越来越多的人开始使用电子设备，并且人均电子设备的数目也不断增加。消费者和商业企业面对的电力成本急速增加。现在，每年全球的耗电量增加大约2%，全球的政府需要开发更高的电网容量以满足这些增长需求。而提高能效是提供这些额外需要的最快捷、最清洁、最经济的方法。

面对普遍并逐渐升高的需求，工程师使用技术革新来回应：新的技术和材料在达到同样的功能时消耗更少的电力，这样就创造了能源使用管理的新方法。

## 能耗

现在能源转化效率已可达到90%，很难在此基础上实现进一步提升。既然能源转化率已基本达到极致，关注的要点开始转为最小化嵌入系统的能耗。

一条降低能耗的途径是提高设计中每个功能的能效。在很多电子设备中，显示器是能耗最高的部件之一，使用LED作为背光的新显示技术能显著节约能源。另一个例子是，我们可以在信号的传输过程中使用最小化能耗的技术

验证、调试和检定今天的节能设计，设计人员需要新的、不同于传统的测试方法。下面的章节中，我们将着眼于这些变化。

## 一个例子：液晶显示器的LED背光

液晶显示(LCD)技术最重要的一项进步是使用发光二极管(LED)来提供背光，以减少能耗。背光的用处是：用于从侧面、顶部或背面照亮LCD面板。

直到现在，大多数LCD显示器还在使用冷阴极荧光灯(C CFL)作为背光。在这些设计中，典型的显示系统包括了一个电源逆变器来产生交流高压，初始的数千伏电压产生电弧，然后电源提供几百伏的电压以提供维持通过灯气的电流。灯气在电流的作用下发射出紫外(UV)光，灯泡上的荧光粉涂层吸收这些紫外光的能量，以可见光的方式向外辐射。

相比起来，LED背光使用并排串联的LED作为光源。对于高保真显示器，白色背光应该含有红色、绿色和蓝色(RGB)的LED。在一些要求较低的应用中，白光可以使用包裹有紫外线LED的荧光囊来提供；或者使用蓝色LED和滤光器配合获得。

LED背光和CCFL背光相比,有几个显著的优势,包括:

■ 更薄, 更轻便的 LCD 显示器

LED在相似的情况下一般都小于CCFL, 让设计可以使用更薄的导光板或扩散器。这样可以大幅减低显示器的厚度和体积。

■ 机械结构的防冲击和抗震性更高

CCFL是玻璃管结构, 震动会显著降低器件的工作寿命

■ 减小功耗

虽然LED和CCFL背光的发光效率(使用流明/瓦为单位)相似, 但是LED辐射的光是单向的, 所以这些光可以更有效地耦合到显示器上。这样LED背光可以使用更少的能量来提供同样的亮度。同时, LED背光还让设计人员可以改变显示器特定区域的背光亮度(使用RGB LED时甚至可以改变背光的颜色), 以获得更高的能效。

■ 低压, 降低电磁干扰(EMI)

CCFL背光需要电源逆变器来产生300-400V的交流电压。相比起来, 典型的LED背光可能只需要一个DC-DC的电源以产生30-40V的直流电压。在设计中使用非屏蔽的电缆来传输这个低压直流, 产生近场EMI都可能更低。

驱动LED背光

LED背光从电气模型上可以看做是正向压降固定的多个LED(典型值为每个LED2.5V-3.5V, 由元件特性和颜色决定), 而LED亮度则由通过元件的电流控制。

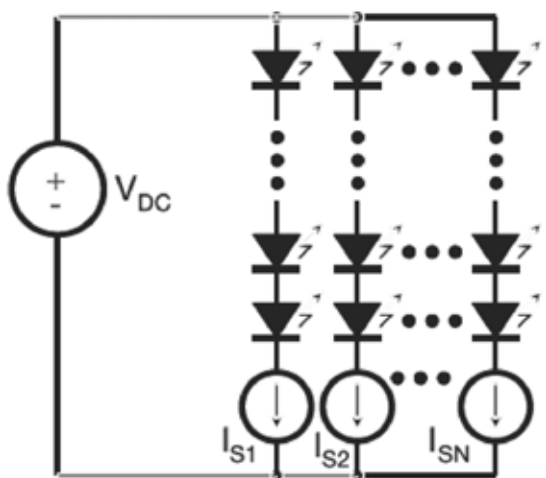


图 17. LED 恒流源背光驱动器,

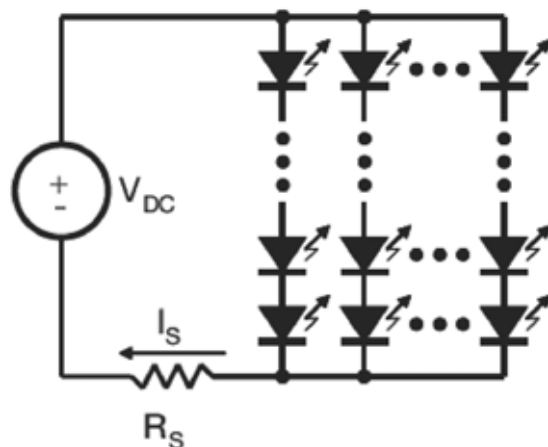


图 18. LED 背光驱动器，带有限流电阻

使用带有限流电阻的直流电压驱动背光是最简单办法, 如图 18 所示。因为 LED 个体之间的正向压降可能有较大不同, 所以这种电路可以在每条 LED 串联链路上使用恒流源替代简单电阻的方法加以改进, 如图 17 所示。

如果应用中要求非常高的显示亮度, 最低的功耗, 或能在很大的范围内控制亮度, 则需要使用其它的驱动方式。

按照人视觉系统的两个已知特性, 交流电流可以用来替代直流电流。只要切换频率高于大约 100Hz(高于“闪光融合”率), 人将不会感到背光的闪烁。同样, 人眼有影像存留的功能, 会试图“记住”短时间内的峰值亮度, 而不是反应长时间内的平均亮度。人眼这样的特性让我们可以通过调节峰值电流的占空比来控制感知的亮度。

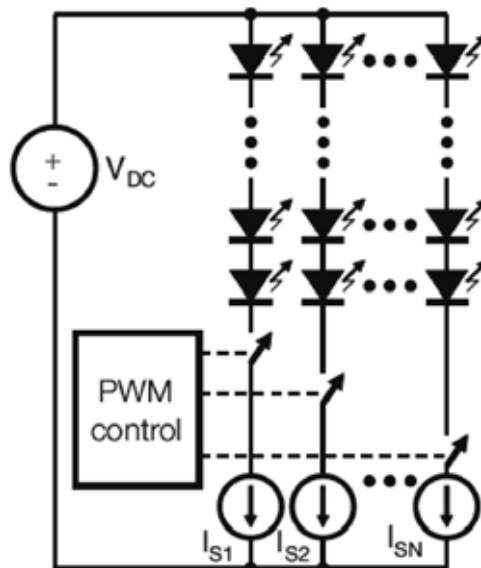


图 19. 带有调制电流源的背光 LED 驱动器

## 第一章：现代电子电力行业应用方案

脉冲宽度调制(PWM)或电流占空比控制方案，如图 19 所示，相比之前的简单恒流源来说有许多优势。如需感觉较高的亮度，可以在较低的平均功率水平上相应提高 LED 的峰值电流。因为亮度控制是由调节 LED 电流的占空比来控制的，平均电流和亮度可以被控制，而无需改变电源电压。这样，设计人员可以着眼于优化电路的 DC-DC 变换器的效率。最后，因为峰值电流并未改变，LED 工作在相同的电流水平上(例如，白光 LED 通常为 15-20mA)，其辐射的颜色也是恒定的。

### 测试背光功率

由于 CCFL 和 LED 背光驱动器电路在电压和电流上有显著区别，所以需要不同的测量设备。

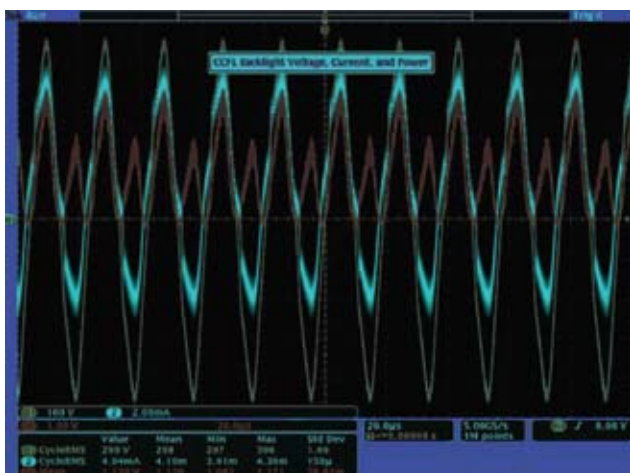


图 20. 用 MSO4000 系列示波器进行 CCFL 背光功率测试的显示界面

图 20 显示了使用示波器测试 CCFL 背光电路的结果。交流电压(黄色波形)大约是 900V 峰峰值，需要使用高压差分探头来探测。此例中使用的是 Tektronix P5200 系列高压差分探头。电流(蓝色波形)则在毫安量级，这样就需要高灵敏度的电流探头。这里，使用了 Tektronix TCP 系列电流探头。红色波形显示的是 CCFL 管的瞬时功率消耗情况，反映出平均功率大约是 1.1 瓦。

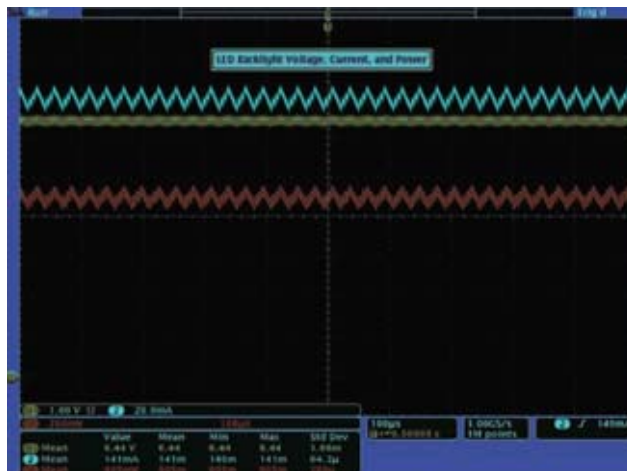


图 21. 用 MSO4000 系列示波器进行 LED 背光功率测试的显示界面

对照前图，图 21 显示了使用示波器验证 LED 背光电路性能的测量结果。如图，直流电压(黄色波形)大约是 6.4V。这个信号使用了 Tektronix TDP 系列差分探头测试。电流(蓝色波形)在数百毫安的量级。红色波形显示的是 LED 的瞬时功率消耗情况，反映出平均功率大约是 900 毫瓦。和 CCFL 背光电路相比，节约了大约 200 毫瓦的功率。

随着便携化趋势的深入，在这些使用电池供电的电子设备上，与 CCFL 相比，基于 LED 的液晶显示器拥有显著的优势。LED 背光简化了产品设计，使用它制造的耐用轻便的显示器显著降低了能耗。示波器提供了评估 LED 背光性能所必须的工具，包括测量和统计随时间变化的器件电压电流性能，以及测量电压和电流微小变化的灵敏度。

### 结论

能效设计技术带来了新的、复杂的测试挑战，需要设计工程师进行大量的、艰苦的测试，以调试快速变化的信号、复杂的协议和电流电压的微小变化。

验证、调试和检定这些设计，强大而完备的测量工具必不可少。最新节能设计技术需要高性能、高效率的测试工具。这些工具包括示波器、逻辑分析仪、探头、信号源和万用表。简化复杂测量的自动化软件包也是这套工具的重要组成部分。

随着对产品能效要求的不断提高，验证和调试当今最新设计的工作常常十分复杂，而合适的测量工具可以简化并加速这些工作。

## **第二章**

# **电力电子测试技术与应用技巧**



# 浮地和隔离通道示波器

## 应用指南

本应用指南将介绍电源测量术语, 阐述为进行浮地测量提供的不同选项, 重点介绍每种选项的优点和缺点。

最苛刻的浮地测量要求源自电源控制电路, 如马达控制器、不间断电源和工控设备。在这些应用领域中, 电压和电流可能会很大, 足以给用户和/或测试设备带来危险。在测量浮地高压信号时, 有许多选项可以考虑。每个选项都有自己的优点和缺点。

## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

### 差分测量与浮地测量比较

所有电压测量都是差分测量。差分测量定义为两点之间的电压差。电压测量分成两类：

1. 参考地电平测量
2. 非参考地电平测量(也称为浮地测量)

### 传统示波器

大多数传统示波器把“信号参考”端子连接到保护接地系统上，通常称为“接地”。通过这种方式，所有应用到示波器的信号或示波器提供的信号都会有一个公共连接点。

这个公共连接点通常是示波器机箱，通过AC供电设备电源线中的第三条线接地，来保持在(或接近)零伏。这意味着每个输入通道参考点都捆绑在一个接地参考源上。

不应该使用传统无源探头，直接在参考地电平的示波器上进行浮地测量。视流经参考引线的电流数量，传统无源探头会开始变热；在电流足够高时，它会类似熔丝那样熔化断开。

### 浮地测量技术

为进行高压浮地测量提供的不同选项包括：

- 隔离输入示波器
- 差分探头
- 电压隔离装置
- “A - B”测量技术
- 示波器“浮地”技术

### 术语表

#### 共模信号

两个输入上共同的输入信号成分(幅度和相位完全相同)。

#### 共模范围

差分放大器可以抑制的共模信号的最大电压(从接地)。

#### 共模抑制比

衡量差分放大器抑制共模信号能力的一个性能指标。由于共模抑制一般会随着频率提高而下降，因此通常会指定特定频率的CMRR。

#### 差分模式或差模

差分放大器两个输入之间的不同信号。差模信号(VDM)可以表达为：

$$VDM = (V+input) - (V-input)$$

#### 差模信号

两个输入之间不同的信号。

#### 差分测量

两点之间的电压差。

#### 差分探头

为差分应用专门设计的探头。有源差分探头在探头尖端包含一个差分放大器。无源差分探头与差分放大器一起使用，可以进行校准，精确匹配两条信号路径中(包括参考引线)的DC和AC衰减。

#### 浮地测量

任何一点都没有参考地电平(地电位)的差分测量。

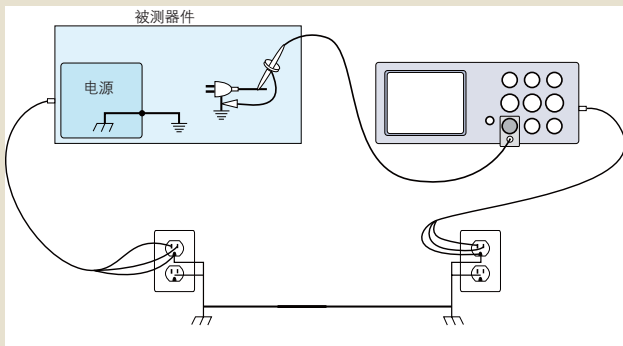
#### 接地环路

当两个或两个以上的单独接地路径在两个或两个以上的点捆绑在一起时，会出现接地环路。结果是一个导体环路。在存在变化的磁场时，这个环路会变成变压器的次级电路，作为短路线圈操作。附近承载非DC电流的任何导体都会产生磁场，激发变压器。许多导线、甚至数字IC输出引线中的AC线路电压都会产生这种激发作用。环路中循环的电流会在环路内部任何阻抗中积聚电压。这样，在任何给定时点上，接地环路中的各个点都不会位于相同的AC电位。

### 术语表(续)

把示波器探头地线连接到被测电路上，如果电路“接地到”接地装置，那么会产生接地环路。作用在路径内部阻抗上的循环电流会导致电压电位积聚在探头接地路径中。

这样，示波器输入BNC连接器上的“接地”电位与被测电路中的接地不同(即“此接地非彼接”)。这种电位差可以是几微伏，也可以高达几百毫伏。由于示波器从输入BNC连接器的外壳上参考测量，因此显示的波形可能并不表示探头输入上的实际信号。随着被测信号的幅度下降，误差变得更加明显。



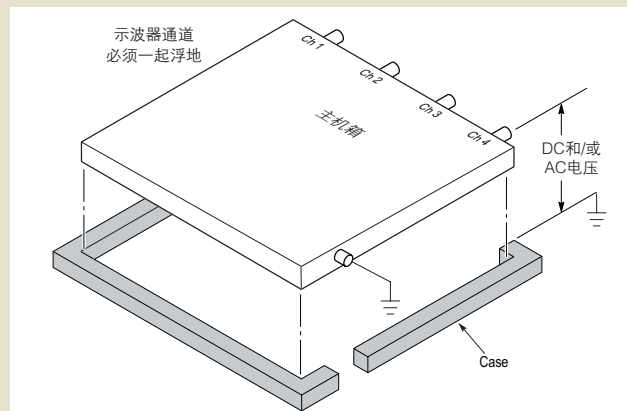
把示波器探头地线连接到被测电路上，如果电路“接地到”接地装置，那么会产生接地环路。

### “单端测量”

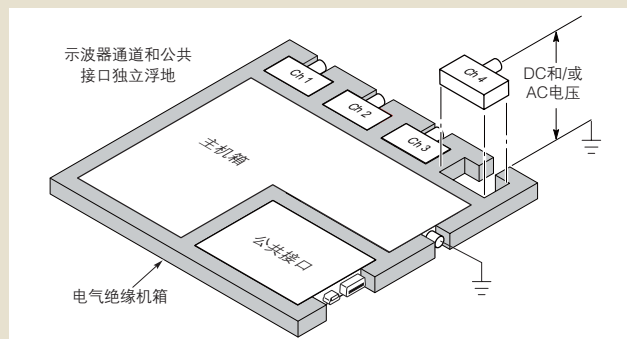
在使用AC线路电源及使用标准三线电源线操作时，带有接地输入通道、电池供电的示波器表现出来的局限性与传统示波器一样。然而，在使用电池操作时，这些示波器可以一次进行高达30 V<sub>RMS</sub>的单一安全浮地测量。记住，所有输入公共源都捆在一起。

### 共地结构和隔离通道结构比较

大多数台式示波器使用下面所示的结构。在这种结构中，在进行多通道测量时，所有输入信号必须有相同的电压参考，共享的默认参考是“大地”接地。如果没有差分前置放大器或外部信号隔离器，这些台式示波器则不适合进行浮地测量。



与传统台式示波器结构相比，这种隔离通道结构中的电压参考没有在仪器内部连接在一起。因此，每个输入的参考点必须连接到一个参考电压上。独立浮地隔离输入仍有寄生电容耦合。这可能会发生在输入参考点和环境之间，及输入参考点之间。基于这一原因，建议把参考点连接到系统接地或另一个稳定电压上。如果输入的参考点连接到高速和/或高压信号上，那么您应该了解寄生电容。





## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

### 说明

#### 隔离输入示波器测量

采用IsolatedChannel™输入结构的示波器，如TPS2000B或THS3000系列，提供了真正的、完整的通道到通道和通道到电源线隔离能力。每条通道相互单独隔离，同时与其它非隔离器件隔离。在使用IsolatedChannel™示波器进行浮地测量时，必须使用专门设

计的无源探头，如TPP0201，进行高达30 V<sub>RMS</sub>的浮地测量；或使用THP0301，进行高达300 V<sub>RMS</sub>的浮地测量；或使用P5122/P5150探头，进行高达600 V<sub>RMS</sub>的浮地测量。与大多数传统示波器使用的无源探头不同，这些类型的探头在BNC连接上绝缘，防止发生触电；

参考引线是为耐受额定浮地电压而设计的。(如需更多信息，请参阅本应用指南后面“注意类别和电压”一节中的讨论)

#### 差分探头测量

通过使用差分探头系统，可以通过泰克TDS/DPO/MSO和大多数其它接地示波器进行浮地测量。某些差分探头(如P6246、P6247、P6248和P6330)是为幅度较低快速信号优化的。其它探头(如P5200A、P5205A和P5210A)则

处理速度较慢、电压幅度较高的信号。ADA400A差分前置放大器即使在高噪声环境中，仍能显示低频率、超低幅度的差分信号。

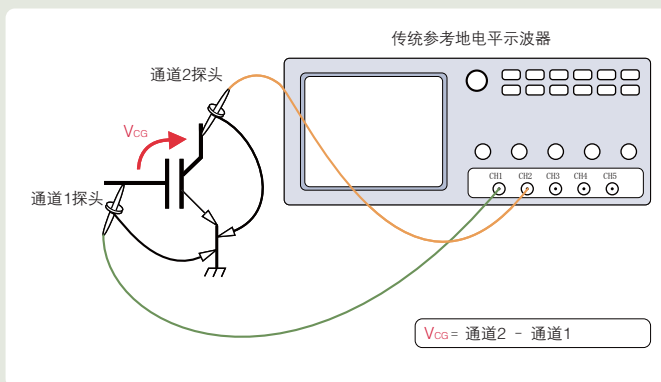
#### 电压隔离器测量

顾名思义，隔离器在浮地输入与参考地电平输出之间没有直接的电气连接。

信号通过光学或分路光学/变压器手段耦合。

#### “A - B”测量 (也叫伪差分测量)

“A - B”测量技术可以使用传统示波器及无源电压探头，间接进行浮地测量。一条通道测量“正”测试点，另一条通道测量“负”测试点。从第一个测量值中减去第二个测量值，去掉两个测试点的公共电压，以便观察不能直接测量的浮地电压。示波器通道必须设置成相同的伏特/格；探头应与示波器配套，使共模抑制比达到最大。

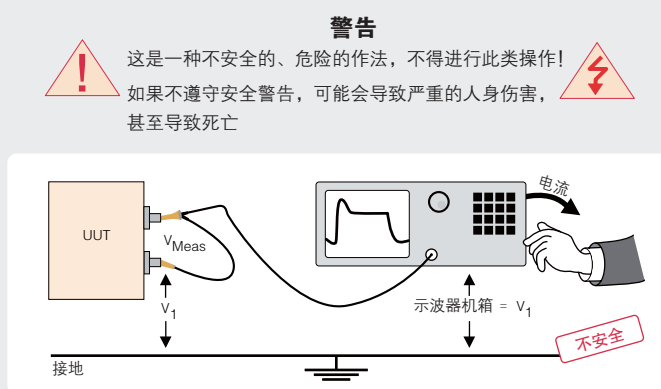


■ 测量参考地电平电压的两只探头实例

#### “浮地”传统接地示波器

使用不会把接地传送到次级电路的隔离变压器，或通过把示波器的AC市电电源线地线切断，是一种常用的有风险的示波器浮地测量方式。

“浮地”参考地电平示波器把所有可以接触到的相同电压的金属(包括机箱、机壳和连接器)作为探头参考引线连接的测试点。



■ 浮地测量，危险电压发生在示波器机箱上。 $V_1$ 可能有几百伏！

## 优点和缺点

## 优点

隔离输入通道示波器为进行浮地测量提供了一种安全可靠的方式。通道到通道隔离和通道到接地隔离的明显好处是能够同时观察参考到不同电压的多个信号。

另一个优点是能够在不增加专用探头成本或昂贵笨重的电压隔离器的情况下实现这一点。通道到电源线隔离消除了信号源接地与示波器之间的路径。

## 缺点

与差分探头不同，隔离输入通道没有提供均衡浮地测量。到地的阻抗在尖端(+)输入和参考(-)输入之间是不同的。由于隔离通道的参考(-)输入不像普通示波器那样有默认的参考电平，因此必须把探头的参考引线连接到DUT的参考点上。

由于没有到接地的分路，因此荧光灯和大楼布线放射的工频场可能会在示波器读数上导致更多的基线噪声。使用平均采集模式会减轻这种基线噪声提高。

## 优点

差分探头为调整接地示波器进行浮地测量提供了一种安全的方法。除安全性优势外，使用这些探头可以改善测量质量。差分探头提供了均衡测量输入电容，因此可以使用任何一条引线安全地探测电路中任何点。在比电压隔离器更高的频率上，差分探头一般CMRR性能更好。

另一种优点是全面利用示波器的多条通道，同时观察多个信号，参考不同的电压。

## 缺点

探头仍有一条到接地的电阻路径，因此如果电路对泄漏电流灵敏，那么差分探头可能并不是最佳的解决方案。

其它缺点包括增加了一层成本，具体视示波器功能，可能要求独立的电源，这增加了成本和体积。在出厂时，必须手动确定每种测量的增益和偏置特点。

## 优点

电压隔离器为安全测量浮地电压提供了一种手段，由于隔离器没有到

地的电阻路径，因此对泄漏电流异常灵敏的应用来说，它们是一个很好的选择。

## 缺点

电压隔离器增加了一层成本。必须使用单独的电源和隔离放大器箱。

在出厂时必须为每一项测量手动确定增益和偏置特点。

## 优点

使用“A - B”测量技术的优势在于，几乎任何示波器和标配探头都可以简便地完成这一点。记住，两个测试点必须参考地电平。因此，

如果任意一个测试点都是浮地的，或如果整个系统都是浮地的，那么不适用这种方法。

## 缺点

在进行“A - B”测量时，要使用两条示波器通道。这种技术的主要限制是共模范围相当小，这源于示波器的垂直通道动态范围。一般来说，其不来自地电平的volts/division设置的10倍。在共模电压大于差模电压时，“A - B”测量技术可能会被认为是从两个大

电压中提取小的差异。这种技术适合共模信号的幅度与差模信号相同或低于差模信号，且共模成分是DC或低频，如50 Hz或60 Hz电源线的的应用。在测量幅度适中的信号时，它从测量中有效消除了接地环路电压。

## 优点

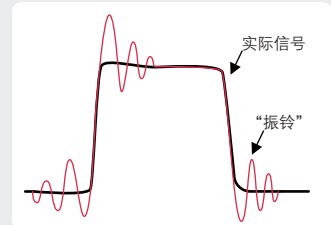
尽管“浮起测量设备”是一种利用现有设备进行浮地测量，消除频率较低的信号上接地环路的方法，但它是一种不安全的、危险的作法，不应采用这种方法。

压可能不会立即导致故障，但即使示波器恢复到正确接地操作，将来仍可能会导致发生危险故障(电击和危险)。

在较高的频率上，切断接地可能不会中断接地环路，因为电源线供电的仪器在接地以上浮地时会表现出大的寄生电容。振铃可能会破坏浮地测量。浮地示波器没有均衡输入。参考一侧(探头上的“接地”夹)有一个明显的到地电容。参考点连接的任何源阻抗将在快速共模跳变中

加载，使信号发生衰减。更糟糕的是，高寄生电容可能会损坏某些电路。如果把示波器的地线连接到逆变电路上桥臂的门控端，会导致器件关闭变慢，从而损坏电路。这种故障通常伴随着工作台上出现小的火花。

另一个缺点是其一次只能进行一项测量。记住，所有输入参考都相互捆绑在一起。一旦浮地一个输入参考，所有输入参考现在都在同一水平上浮地。



▶ 寄生电感和电容导致的振铃使信号失真，使测量无效

## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

### 泰克TPS2000B和THS3000系列 IsolatedChannel™示波器

TPS2000B系列拥有泰克经过验证的台式示波器性能，具有4条隔离通道结构，专为测量工业电力信号而设计。这种仪器与选配电源捆绑套件(TPS2PBND2)配套使用时，确立了同类产品中的高级浮地测量标准。电源捆绑套件包括4只无源高压探头(P5122)及电源测量和分析软件包(TPS2PWR1)。电源测量和分析软件包提供了电源分析测量(有功功率、无功功率、功率因数、相角)、波形分析测量(RMS、波峰因数、频率)、谐波测量及开关损耗测量。

THS3000系列是为使用示波器时要求更高便携性、而又不降低台式仪器性能或执行浮地测量能力的工程师们设计的。这种手持式仪器坚固耐用，重量型，一块电池可连续工作7个小时，支持自动测量功能，在实验室操作和现场操作中提供了很大的通用性。该仪器的隔离通道、高压采集(高达1000 V<sub>RMS</sub> CAT II)及高级波形记录功能可以安全进行浮地测量，特别适合经常需要把实验室中的测量与现场中的测量关联起来的用户。

#### 注意CAT和电压

为进行浮地测量选择适当的电压探头

怎样选择探头和示波器组合：

##### 1. 确定测量(或过压)类别

IEC 61010-1国际标准为电压测量仪器规定了四种过压类别。一类到四类过压都是依据瞬态信号期间可能存在的电气能量多少确定的。

在IEC 61010-1中，电压测量仪器根据耐受电压瞬态信号的能力来划分等级。

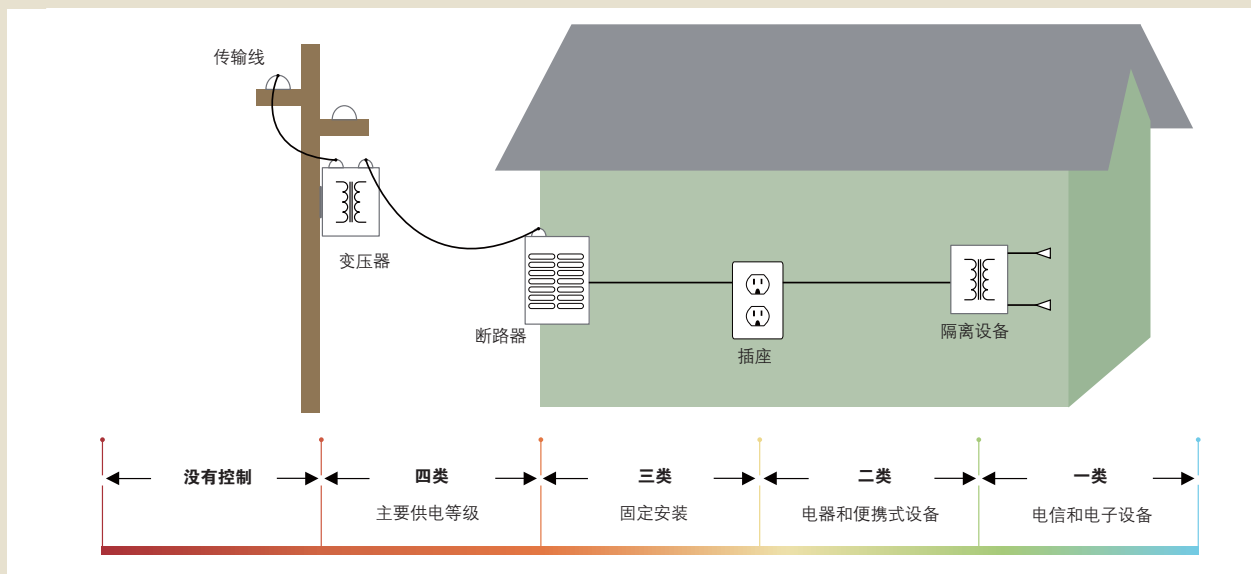
##### 2. 确定最大浮地电压

类别描述摘要	
四类	用来对低压项目中的电压执行测量(<1,000 V)。
三类	用来在楼宇系统中执行测量。
二类	用来在直接连接低压系统的电路上执行测量。
一类	用来在没有直接连接市电的电路上执行测量。

##### 3. 确定最大尖端到接地电压。

##### 4. 确定从探头尖端到参考引线的最大电压。

##### 5. 确定屏幕上希望的最大峰峰值读数。

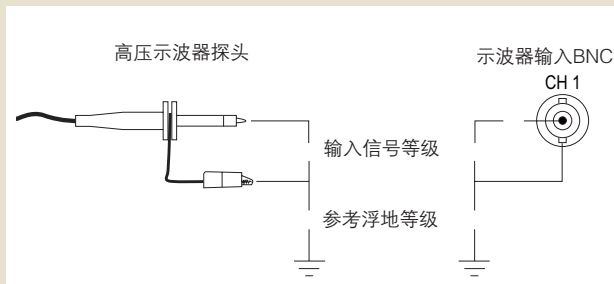


## 注意CAT和电压(续)

为TPS2000B和THS3000系列示波器选择适当的电压探头

	探头名称				
	TPP0201	THP0301	P5150	P5122 <sup>1</sup>	
最大探头尖端到接地电压	300 V <sub>RMS</sub> CAT II	300 V <sub>RMS</sub> CAT III	1000 V <sub>RMS</sub> CAT II	DC耦合时 1000 V <sub>RMS</sub> CAT II	
最大参考地电平(浮地)电压	30 V <sub>RMS</sub>	300 V <sub>RMS</sub> CAT III	600 V <sub>RMS</sub> CAT II	600 V <sub>RMS</sub> CAT II	
衰减设置	10x	10x	50x	100x	
带宽	200 Mhz	300 Mhz	500 Mhz	200 Mhz	
探头类型	无源	无源	无源	无源	
屏幕上峰峰值电压 <sup>2</sup>	TPS	400 V <sub>P-P</sub>	400 V <sub>P-P</sub>	2000 V <sub>P-P</sub>	2828 V <sub>P-P</sub>
	THS	849 V <sub>P-P</sub>	849 V <sub>P-P</sub>	2828 V <sub>P-P</sub>	2828 V <sub>P-P</sub>
屏幕上RMS电压 <sup>2</sup>	TPS	141 V <sub>RMS</sub>	141 V <sub>RMS</sub>	707 V <sub>RMS</sub>	1000 V <sub>RMS</sub>
	THS	300 V <sub>RMS</sub>	300 V <sub>RMS</sub>	1000 V <sub>RMS</sub>	1000 V <sub>RMS</sub>

<sup>1</sup> P5122 探头不应该用来在TPS2000 上对DC > 300 V的信号进行AC耦合测量。  
<sup>2</sup> 受到仪器垂直分辨率限制(TPS = 5V/div, THS = 100V/div)。



## 实例：

需要测量线路到线路240 VRMS三相Y型有源谐波滤波器上的峰峰值电压。

## 1. 确定所需安装类别的最大额定输入电压：三类

- 某种类别等级允许的最大输入电压一般也适用于较低类别的环境。例如，如果仪器等级为300 V<sub>RMS</sub> CAT III，那么在二类环境中在300 V<sub>RMS</sub>的仪器上工作也是安全的。
- 对更高的电压电平，仪器会通常额外确定较低类别的等级值，如同时确定300 V<sub>RMS</sub> CAT III和600 V<sub>RMS</sub> CAT II。这种情况并不是通用的，因此用户必须在仪器文档中明确检验多个类别的安全电压等级。

## 2. 确定要求的最大浮地电压(接地到参考电压)

- 这一实例的测量要求为240 V<sub>RMS</sub>。
- 因此，只有THP0301、P5150和P5122探头适合。

## 3. 确定最大探头尖端到接地电压要求

- 在本例中，工程师确定其大约为140 V<sub>RMS</sub>。
- 全部四只探头都满足这一要求。

## 4. 确定从探头尖端到参考引线的最大电压

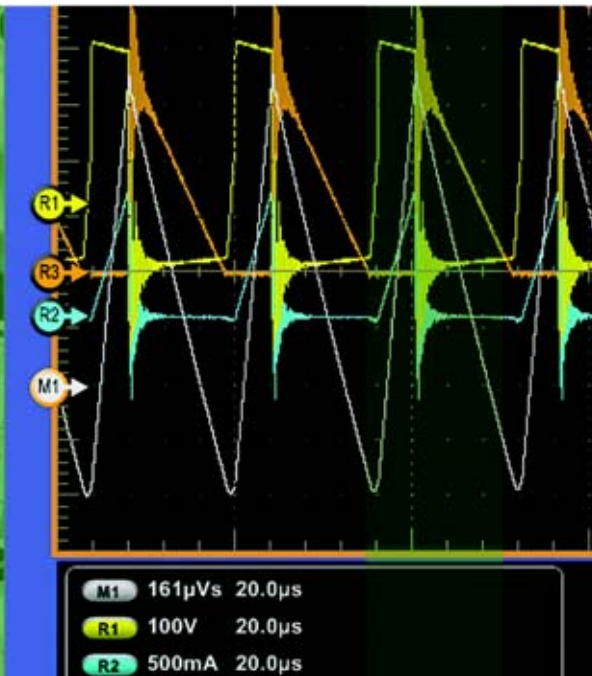
- 预计被测信号的最大电压是240 V<sub>RMS</sub>。
- 这使探头只限于从THP0301、P5150和P5122探头中选取。

## 5. 确定需要的衰减

- 计算与240 V<sub>RMS</sub>对应的最大峰峰值电压
- 因此，所需的可以观察的电压范围是：240 V<sub>RMS</sub> ×  $\sqrt{2} \times 2 = 679$  V<sub>P-P</sub>。
- TPS2000B系列在屏幕上最大垂直设置为5V/div，共8格。
- THS3000在屏幕上最大垂直设置为100V/div，共8格。
- 需要的探头衰减 = 观察电压 / 最大垂直设置 / 格数。
- TPS2000B：679 V<sub>P-P</sub> / 5 / 8 = 17x，只有P5150和P5122提供了足够的衰减。
- THS3000：679 V<sub>P-P</sub> / 100 / 8 = 1x，所有探头都提供了足够的衰减。

## 6. 选择满足最低要求的探头

- 对TPS2000B，P5150和P5122探头适合这一测试场景。
- 对THS3000，THP0301、P5150和P5122探头适合的这一测试场景。



# 电源测量和分析

## 入门手册

### 目录

引言	33	消除探头偏置和噪声	41
电源设计问题指向测量需求	33	自动消除偏置	41
开关式电源基础知识	33	手动去掉偏置	41
有源元件测量: 开关单元	34-41	无源元件测量: 磁性元件	42
开关式设备中的功率损耗原理	34	电感基础知识	42
关闭损耗	34	使用示波器测量电感	42
启动损耗	35	磁性功率损耗基础知识	43
功率损耗	35	磁芯损耗	43
安全工作区	36	铜线损耗	43
动态开点电阻	36	使用示波器测量磁性功率损耗	44
进行有源元件测量	36	磁性属性基础知识	44
选择适当的测量解决方案	37	B-H曲线	45
示波器的性能指标	37	磁性属性测量	46
上升时间	37	使用示波器测量磁性属性	47
采样率	37	电源线测量	48-49
记录长度	37	电源质量测量基础知识	48
电源测量和分析软件	37	使用示波器测量电源质量	49
电源探头	39	总结	49

### 引言

电源是把电能从一台设备转换到另一台设备的元件、子系统或系统，其通常从交流(AC)电源转换成直流(DC)电源。从个人电脑到军事设备和工用机械，电子设备的正常运转离不开DC电源的性能和可靠性。

电源分成许多不同的类型和规格，包括传统模拟式电源到高效的开关式电源。所有这些电源都面临着复杂的动态工作环境。设备负载和需求在不同时间之间可能会大幅度变化。即使是商用开关电源，也必须能够承受突然出现的远远超过平均工作电流的峰值电流。设计电源或设计采用电源的系统的工程师必需了解电源在静止条件到最坏条件下的行为。

从历史上看，检定电源行为意味着使用数字万用表进行静态电流和电压测量，然后在计算器或PC上麻烦地进行计算。今天，大多数工程师正转向示波器，作为首选的电源测量平台。

**现代示波器可以配备集成电源测量和分析软件，简化设置，更轻松地进行测量。用户可以定制关键参数，自动进行计算，在几秒钟内查看结构，而不只是原始数字。**

本入门手册将重点介绍怎样使用示波器和专用软件测量开关式电源设计。

### 电源设计问题指向测量需求

在理想状态下，每个电源的行为方式都应与设计使用的数学模型类似。但在实际环境中，元件是不理想的，负载会变化，线路电源可能会失真，环境变化会改变性能。此外，性能和成本需求变化也进一步提高了电源设计的复杂性。考虑一下下面的问题：

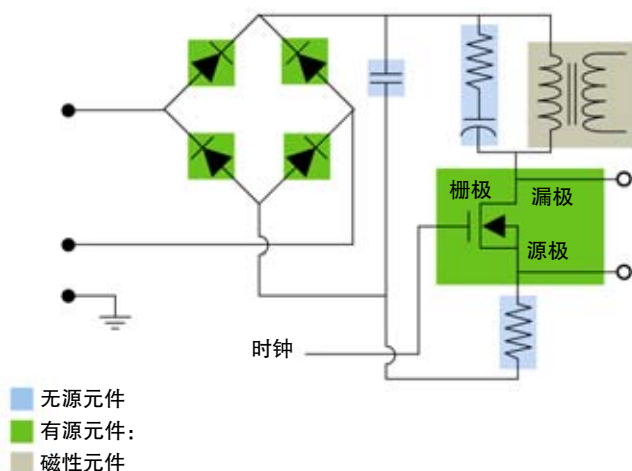
- 电源可以保持高于额定输出容量多少瓦？保持多长时间？
- 电源散发多少热量？在过热时会出现什么情况？要求多少冷却气流？
- 在负载电流大幅度提高时会发生什么情况？设备能够保持额定输出电压(负载稳压)？电源对输出完全短路会作出什么样的反应？
- 在电源输入电压变化时会发生什么情况(线路稳压)？

设计人员需要开发出占用空间更少、能耗效率更高、减少散热量、降低制造成本、满足更严格的EMI/EMC标准的电源。只有严格的测量体系，才能引导工程师实现上述目标。

### 开关式电源基础知识

在大多数现代系统中，流行的DC电源结构是开关式电源(SMPS)，这种电源因能够高效处理负载变化而闻名。典型SMPS的电源信号路径包括无源元件、有源元件和磁性元件。SMPS最大限度地减少了有损耗的元件的使用量，如电阻器和线性模式晶体管，重点采用(在理想条件下)没有损耗的元件，如开关式晶体管、电容器和磁性元件。

## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧



SMPS设备还包括一个控制段，其中包含脉宽调制稳定器、脉冲速率调制稳定器和反馈环路等单元<sup>1</sup>。控制段可以有自己电源。图 1 是简化的 SMPS 示意图，其中显示了包括有源单元、无源单元和磁性单元的电源转换段。

SMPS 技术依托电源半导体开关设备，如金属氧化物场效应晶体管(MOSFET)和绝缘门双极晶体管(IGBT)。这些设备提供了快速开关时间，能够耐受没有规律的电压峰值。同样重要的是，其在 On 状态或 Off 状态下消耗的功率非常小，实现了很高的效率，而生成的热量很低。开关设备在极大程度上决定着 SMPS 的整体性能。开关设备的关键测量项目包括开关损耗、平均功率损耗、安全工作区等等。

<sup>1</sup> 本入门手册介绍与电源路径有关的测量，包括与输出有关的内部单元的测试。控制段测量是比较传统的基于波形和基于逻辑的观测项目，本文中不涉及这些测量。

### 有源元件测量：开关单元

#### 开关式设备中的功率损耗原理

晶体管开关电路在转换过程中消耗的能量通常会达到最大，因为电路寄生信号会阻止设备立即开关。“关闭损耗”是指开关设备从 ON 转换成 OFF 时损耗的能量，“启动损耗”则是指开关设备从 OFF 转换成 ON 时损耗的能量。

#### 关闭损耗

图 2 说明了怎样计算关闭损耗。在  $t_1$  后，开关电流下降，二极管电流上升，时间  $(t_2 - t_1)$  取决于驱动器对 MOSFET 的栅极到漏极电容  $C_{gd}$  的充电速度。

可以使用下面的公式估算转换过程中损耗的能量：

$$E_{off} = \frac{1}{2} \cdot V_g \cdot i_L \cdot [t_2 - t_0]$$

其中：

- $E_{off}$  是转换过程中开关损耗的平均能量。
- $V_g$  是栅极电压。
- $i_L$  是流经电感器的电流。
- $t_2$  是转换结束时间。
- $t_0$  是转换开始时间。

这个公式假设流经  $C_{ds}$  和  $C_{gd}$  的电压(从漏极到源极的电容)呈线性上升。 $C_{ds}$  和  $C_{gd}$  是寄生电容。

在实际环境器件中，电容  $C_{ds}$  和  $C_{gd}$  呈高度非线性化，一般会随着漏极到源极电压变化。这在一定程度上会影响上面介绍的理论计算。在 IGBT 中，由于尾电流现象，电流的下降时间会比较高。这些差异使得工程师必须捕获电压不一致的实际曲线。带有专用电源测量软件的示波器可以大大简化这些测量。

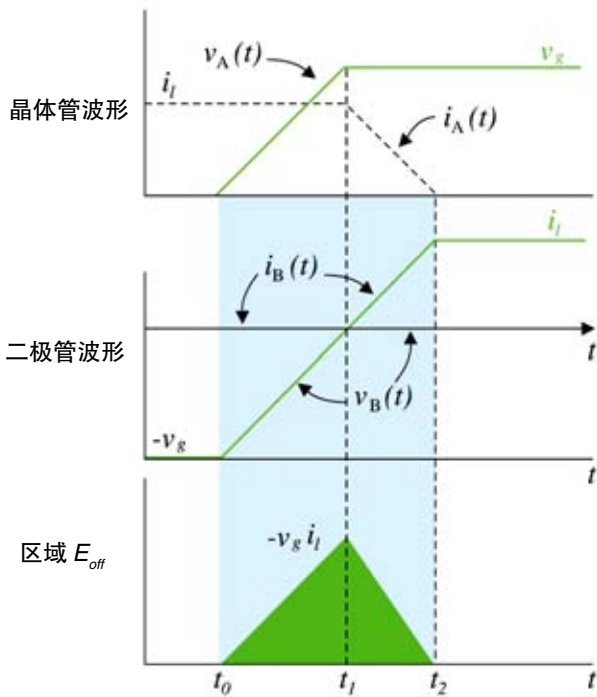


图 2. 关闭损耗的计算。

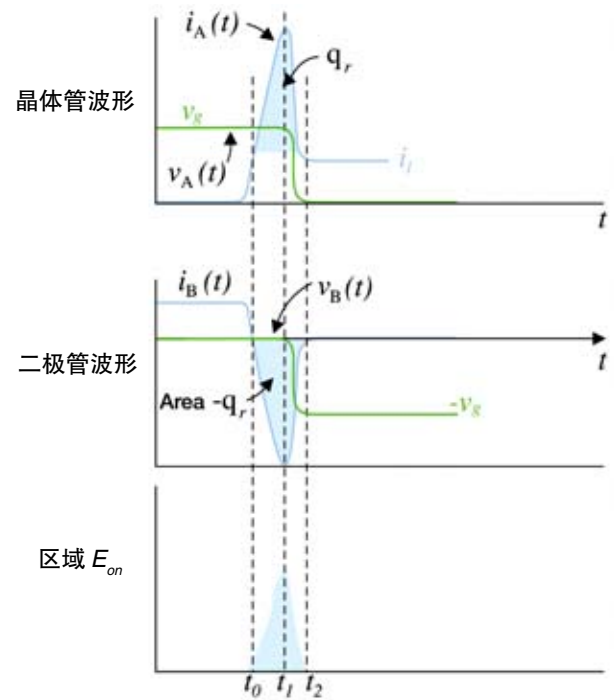


图 3. 启动损耗的计算。

### 启动损耗

图 3 是带有箝位电感负载和二极管恢复电荷的 MOSFET 的启动损耗。在使用箝位电感负载启动 MOSFET 时，直到存储的电荷恢复时才能积聚二极管电压。因此，二极管会在负方向上持续传导电流，直到阻塞电压，这会导致开关发生巨大的损耗。反向恢复电流依赖于二极管路径中的外部电路。二极管中的电荷取决于正向电流及二极管关闭转换过程中电流下降的  $di/dt$ 。

可以使用下面的公式估算转换过程中损耗的能量：

$$E_{on} = \int_{t_0}^{t_1} v_a(t) \cdot i_a(t) \cdot dt$$

<sup>2</sup> 摘自美国科罗拉多大学 Rober A. Erickson 所作的《电源电子基础知识》，有所简化。

其中：

- $E_{on}$  是转换过程中开关损耗的平均能量。
- $v_a(t)$  是瞬时栅极电压。
- $i_a(t)$  是流经开关的瞬时电流。
- $t_1$  是转换结束时间。
- $t_0$  是转换开始时间。

### 功率损耗

总损耗是开关中的平均功率损耗，包括开关损耗和传导损耗。总损耗的计算公式如下：

$$P_{Loss} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} V_{switch}(t) \cdot I_{switch}(t) \cdot dt$$

其中：

- $P_{Loss}$  是开关中的平均功率损耗。
- $V_{switch}$  是流经开关的瞬时电压。
- $I_{switch}$  是流经开关的瞬时电流。
- $T_s$  是开关周期。



## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

### 安全工作区

开关设备安全工作区(SOA)指标汇制了电压对电流图,以检定设备的工作区域,其通常用来创建电源预计将遇到的各种工作条件的 SOA 曲线。

开关设备制造商的产品技术资料会概括对开关设备的某些限制。其目标是保证开关设备将容忍电源在最终用户环境中必须处理的工作边界。SOA 测试变量可能包括各种负荷方案、工作温度变化、高和低线路输入电压等等。图 4 是 SOA 曲线实例。

SOA 测试通常使用下面的公式计算功率：

$$P_n = V_n I_n$$

其中：

- $P_n$ 是瞬时功率。
- $V_n$ 是电压。
- $I_n$ 是电流。
- $n$ 是样点数。

计算平均功率的公式如下：

$$P_{Avg} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n=N} V_n I_n$$

其中：

- $N$ 是开关周期中的样点数。

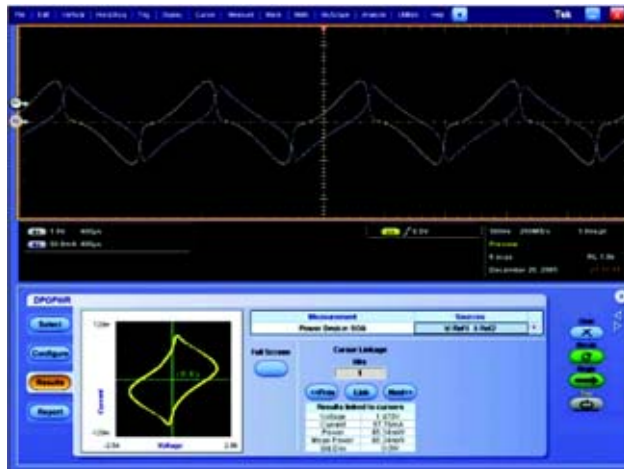


图 4. 这个实例摘自泰克 DPO4000, 说明了 SMPS 的 SOA 曲线。可以把这个曲线与开关设备制造商公布的数据进行对比。

### 动态开关电阻

可以使用元件产品技术资料中给出的  $R_{DS(on)}$  值, 估算开关设备在“on”状态下的电阻。但是, 实际电阻(进而是开关传导损耗)并不是恒定不变的, 可能会随着开关电压或电流变化而明显变化。

### di/dt 和 dv/dt

di/dt 指标表示电流在开关过程中的变化速率, dv/dt 指标则表示电压在开关过程中的变化速率。

### 进行有源元件测量

对习惯了使用示波器进行高带宽测量的工程师来说, 电源测量由于频率相对较低, 似乎会比较简单。但实际上, 电源测量带来了高速电路设计人员从未面对的一系列挑战。

流经开关设备的电压可能会非常大, 通常是“浮动的”, 即不参考地电平, 信号的脉宽、周期、频率和占空比会不一致。必须真实地捕获和分析波形的不理想特点。

### 选择适当的测量解决方案

在测量开关电源时，必需选择能够胜任工作的工具。为在测试过程中启动和关闭SMPS，可能要求来自信号源的脉冲激励信号。为准确地仿真正常工作条件下的门驱动信号，激励信号必须有可以调节的占空比、边沿跳变时间和频率。为驱动IGBT设备，激励源还必须能够生成要求的电压，一般在12 V – 15 V。

当然，示波器必须有基本带宽和采样率，处理SMPS内部的开关频率。此外，示波器必须有深存储器，提供在以高定时分辨率进行低频长采集时所需的记录长度。电源测量还要求至少两条通道，一条用于电压测量，一条用于电流测量。

把设备连接到示波器的探头也同样重要。测试中要求同时使用多种探头，如单端探头、差分探头和电流探头。应用软件可以提高电源测量的简便性和可靠性，进一步完善了这一系列工具。

### 示波器的性能指标

选择示波器时考虑的主要性能指标有上升时间、采样率、记录长度及提供的电源测量分析软件。

#### 上升时间

尽管开关信号速度相对较低，但信号的上升时间可能会相当快。为准确地进行测量，示波器的上升时间至少要快五倍，才能捕获快速跳变的关键细节。

$$RiseTime_{oscilloscope} = \frac{RiseTime_{SwitchingSignal}}{5}$$

例如，如果开关信号的上升时间为5 ns，那么示波器的上升时间至少应该是1 ns，才能准确地进行测量。为提供这么快的上升时间，示波器的带宽一般至少要达到350 MHz。

#### 采样率

采样率用每秒样点数(S/s)表示，指数字示波器采集信号样点的频率。采样率越快，波形分辨率越高，波形越详细，关键信息或事件丢失的可能性越低。为检定SMPS开关过程中一般出现的振铃，示波器的采样率必须足够快，以便捕获开关信号边沿上的多个样点。

#### 记录长度

示波器捕获测量期间事件的能力取决于使用的采样率及存储采集的信号样点的存储器的深度(记录长度)。存储器的填充速度与采样率直接成正比。在采样率设置得足够高，能够以高分辨率详细地信号时，存储器会迅速填充。

对许多SMPS电源测量，必需捕获1/4周期或1/2周期(90度或180度)的工频信号；有些测量甚至要求捕获整个周期。60 Hz工频的1/2周期的时间是8 ms多。在采样率为1 GS/s时，需要8M点的记录长度，才能捕获这么长的时间。

#### 电源测量和分析软件

应用软件可以大大提高示波器上电源测量和分析的简便程度，其自动执行常用测量，提供详细的测试报告，简化了某些复杂的测量情况，如测量高低压信号，进行开关损耗和功率损耗测量。



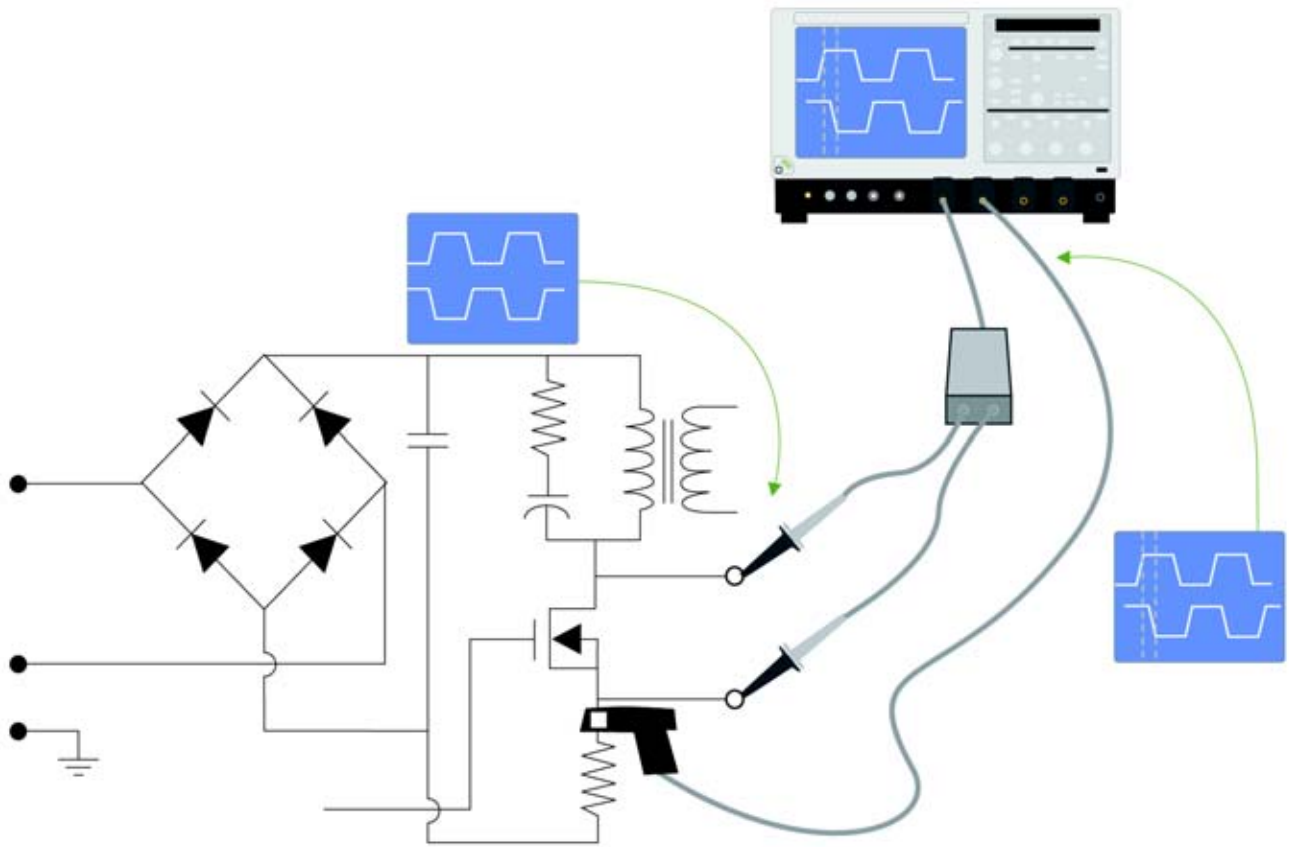


图 8. 传播延迟对电源测量的影响。

### 电流探头

数字示波器进行电源测量时，必需测量流经 MOSFET 开关设备漏极到源极的电压和电流或流经 IGBT 的集电极到发射器电压。这一任务要求使用两只不同的探头：一只高压差分探头和一只电流探头。后一种探头通常是非插入式霍尔效应型探头。每种探头都有自己的特性传播延迟。这两种延迟之差称为偏移，会导致定时测量不准确及功率波形失真。

必需了解探头的传播延迟对最大峰值功率和区域测量的影响。毕竟，功率是电压和电流之积。如果相乘的两个变量并没有在时间完美对准，那么结果会不正确。在探头没有正确校正偏移时，会损害测量精度，如开关损耗。

图8所示的测试设置比较了探头尖端上的信号(下面的轨迹显示画面)与传播延迟后示波器前面板上的信号(上面的显示画面)。

## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

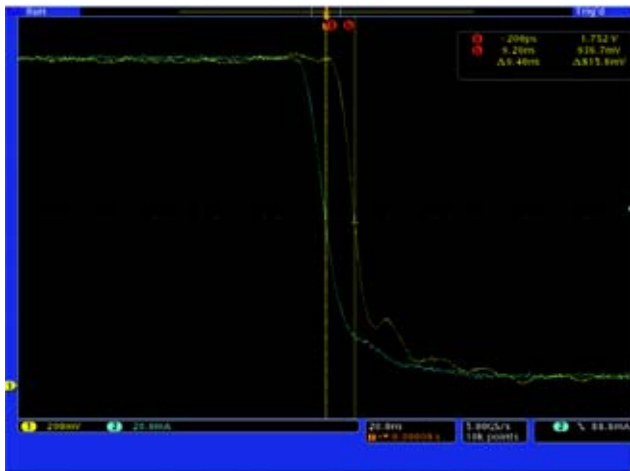


图 9. 电压信号与电流信号之间 9.4 ns 的偏移。

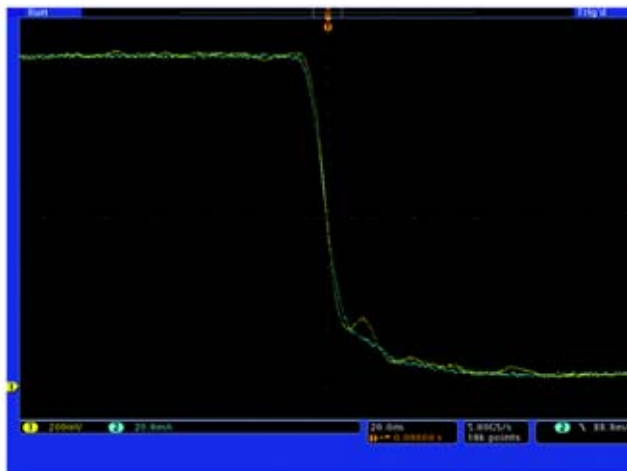


图 11. 在偏移校正过程中电压信号与电流信号对准。

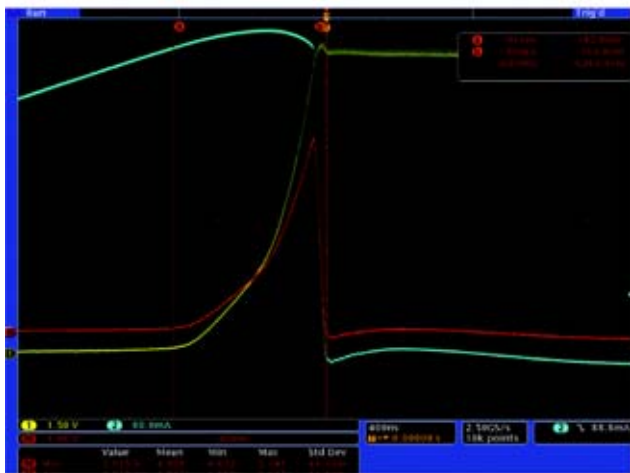


图 10. 在这一偏移下，功率波形的峰值幅度是 4.958 W。

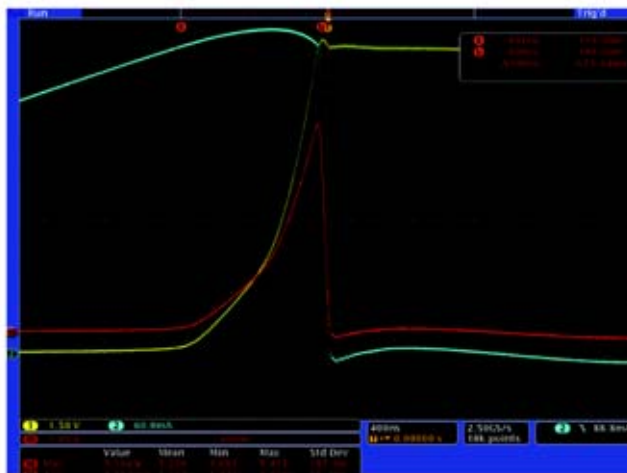


图 12. 在偏移校正后峰值幅度上升到 5.239 W (高出 5.6%)。

图9到图12是演示了探头偏移影响的实际示波器屏幕图。图9揭示了电压探头和电流探头之间的偏移，图10显示了在没有校正两只探头偏移前获得的测量结果(4.958 W)。

图11显示了校正探头偏移的影响。两条参考轨迹重叠，表明延迟已经均衡。图12中的测量结果说明了正确校正偏移的重要性。这一实例证明，偏移引入了5.6%的测量误差。准确校正偏移减少了峰峰值功率损耗测量的误差。

某些电源测量软件将自动校正选定探头组合的偏移。软件控制着示波器,使用实时电流信号和电压信号调节电压通道和电流通道的延迟,消除电压探头和电流探头之间的传播延迟差异。

另外还有一种静态偏移校正功能,其基于某些电压探头和电流探头拥有恒定的可重复的传播延迟。静态偏移校正功能根据选定探头的嵌入传播时间表,自动调节选定电压通道和电流通道的延迟。这种技术提供了快捷简便的方式,可以使偏移校正达到最小。

### 消除探头偏置和噪声

差分探头和电流探头可能会有较小的偏置。这会影响精度,在继续测量前必须消除这个偏置。某些探头内置自动去掉偏置的方法,其它探头则要求手动去掉偏置。

#### 自动消除偏置

配有泰克 TekVPI™ 探头接口的探头与示波器相结合,可以去掉信号路径中的任何DC偏置误差。按TekVPI探头上的 Menu 按钮,会在示波器上调出一个 Probe Controls 框,显示 AutoZero 功能。



图 13. TDSWPWR3 软件菜单上的信号调节选项。这个选项把开关设备“Off”期间的电流设为零。

选择 AutoZero 选项将自动清零测量系统中存在的任何 DC 偏置误差。TekVPI 电流探头在探头机身上还有一个 Degauss/AutoZero 按钮。压下 AutoZero 按钮将去掉测量系统中存在的任何 DC 偏置误差。

#### 手动去掉偏置

大多数差分探头内置 DC 偏置整理控制功能,可以相对简单地去掉偏置。类似的,在进行测量前,必需先调节电流探头。

注意,差分探头和电流探头是有源设备,总会存在一定的低电平噪声,即使在静止状态下。这种噪声会影响依赖电压波形和电流波形数据的测量项目。某些电源测量软件包括信号调节功能(图 13),可以使固有探头噪声的影响达到最小。

## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

### 无源元件测量：磁性元件

无源元件是指不放大信号或开关信号的元件。电源采用全系列无源元件，如电阻器和电容器，但从测量角度看，主要重点要放在磁性元件(磁性器件)上，特别是电感器和变压器。电感器和变压器都由外面缠着几圈铜线的铁芯组成。

电感器的阻抗会随着频率提高而提高，对较高频率的阻挡作用要高于较低频率，因此适合滤波电源输入和输出上的电流。

变压器把初级线圈的电压和电流耦合到次级线圈上，提高或降低信号电平(电压或电流，但不能同时是两者)。因此，变压器可以在初级线圈上接受 120 V 的电压，然后在次级线圈上逐步下降到 12 V，同时次级线圈上的电流会成比例提高。注意这不视为放大，因为信号净功率不会提高。由于变压器初级线圈和次级线圈并没有在电气上相连，因此它们也用来实现电路单元之间的隔离。

有助于确定电源性能的部分指标包括：

- 电感
- 功率损耗(磁性元件)
- 磁性属性

### 电感基础知识

电源使用电感器作为能量贮存设备、滤波器或变压器。作为变压器时，电感器可以帮助保持开关式电源中的振荡。设计人员需要监测这种设备在工作条件下的行为。电感值取决于电流和电压来源、激发信号、波形和工作频率。电感使用下面的公式确定：

$$L = \frac{\int -Vdt}{I}$$

其中：

- $L$  是电感(单位为亨利)。
- $V$  是流经电感器的电压。
- $I$  是流经电感器的电流。
- $dt$  是信号中的变化速率或转换速率。

可以使用几种不同的解决方案测量电感。例如，LCR 仪表使用内置信号发生器激励被测电感器，然后使用电桥平衡技术，测量设备阻抗。LCR 仪表使用正弦波作为信号源。

但在实际环境的电源中，信号是高电压高电流方波，因此，大多数电源设计人员首选在电源动态变化的环境下监测电感器行为，以获得更准确的信息。

### 使用示波器测量电感

测量实际电源中电感器最常用的工具是示波器。电感测量本身非常简单，只是探测流经磁性元件的电压和电流，在很大程度上与前面介绍的开关设备测量类似。

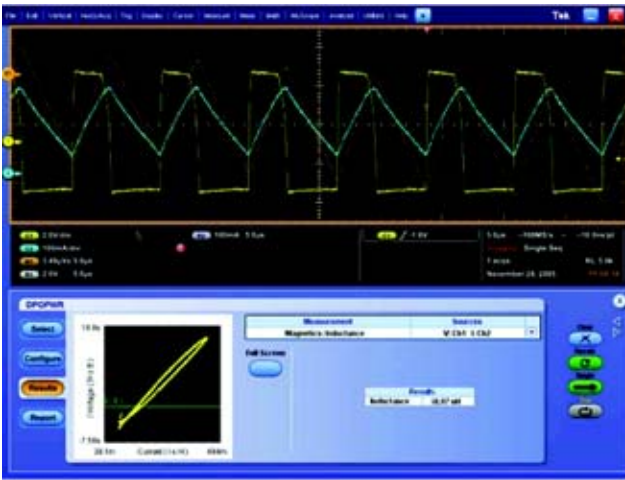


图 14. DPOPWR 应用软件的电感测量结果。

图 14 是电感测量结果。这里，软件计算的电感为 58.97 微亨。

### 磁性功率损耗基础知识

磁性功率损耗影响着电源的效率、可靠性和热性能。有两种功率损耗与磁性单元有关：磁芯损耗和铜线损耗。

#### 磁芯损耗

磁芯损耗由磁滞损耗和涡流损耗构成。磁滞损耗与 DC 通量频率有关，每单位容量磁滞损耗用下面的公式表示：

$$P_{Hyst} = \int H \cdot dB$$

其中：

- $P_{Hyst}$  是每单位容量的磁滞损耗。
- $H$  是场强
- $B$  是通量密度。

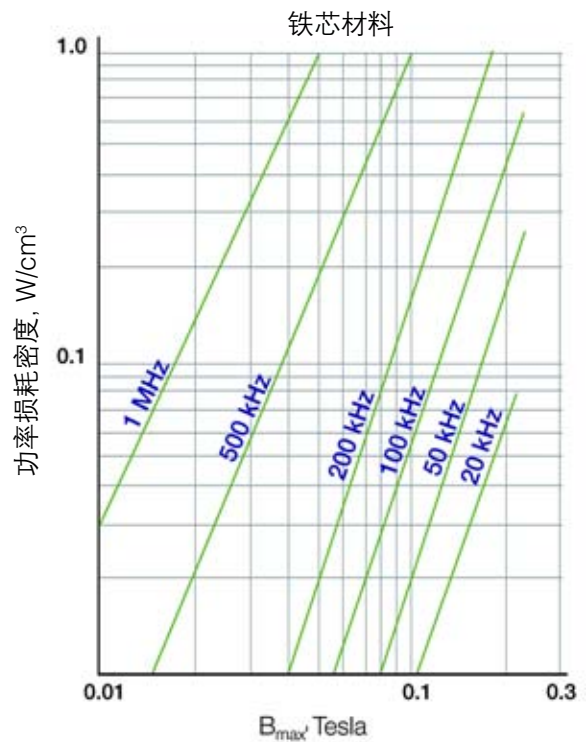


图 15. 各种开关频率下的磁芯损耗与通量密度曲线。

可以使用磁芯制造商的产品技术资料计算磁芯损耗，如图 15 所示。这里，制造商指定了一三象限工作时正弦激励的损耗。制造商还指定了经验关系，来计算不同 AC 通量密度和频率下的磁芯损耗。

#### 铜线损耗

铜线损耗源于铜绕组线的电阻。计算铜线损耗的公式如下：

$$P_{cu} = I_{rms}^2 \cdot R_{wdg}$$

其中：

- $P_{cu}$  是铜线损耗。
- $I_{rms}$  是流经磁性元件的 rms 电流。
- $R_{wdg}$  是线圈电阻，这个电阻取决于 DC 电阻、趋肤效应和接近效应。



## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

### 使用示波器测量磁性功率损耗

可以使用磁芯厂商的产品技术资料及运行电源测量软件的示波器测量结果，迅速得出总功率损耗和磁芯损耗。可以使用这两个值，计算铜线损耗。在知道了不同的功率损耗成分后，可以确定磁性元件上的功率损耗成因。

磁性元件功率损耗计算方法在一定程度上取决于被测的元件类型。被测设备可以是单线圈电感器，也可以是多线圈电感器，还可以是变压器。图 16 显示了单线圈电感器的测量结果。

通道 1 (黄色轨迹)是流经电感器的电压，通道 2 (蓝色轨迹)是使用非插入型电流探头测得的流经电感器的电流。电源测量软件自动计算和显示功率损耗值，这里显示的是 173.95 mW。

多线圈电感器要求的方法略有不同。总功率损耗是各个线圈的损耗之和。

$$TotalPowerLoss = PowerLoss_{s1} + PowerLoss_{s2} + PowerLoss_{s3} + \dots$$

计算变压器上的功率损耗，进一步把公式变为：

$$TotalPowerLoss = PowerLoss_{pk} - (PowerLoss_{s1} + PowerLoss_{s2} + \dots)$$

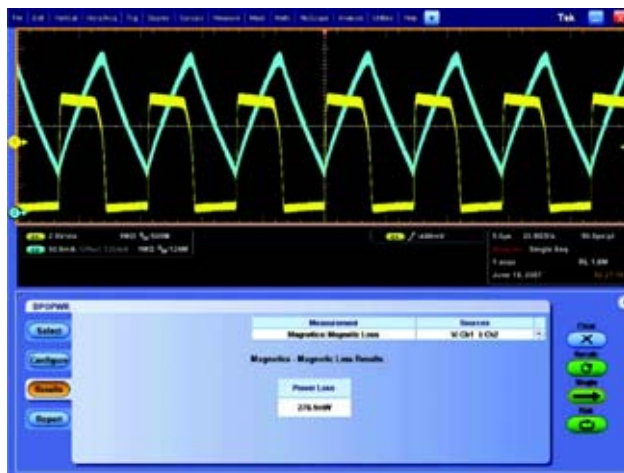


图 16. DPOWPR 测量的单线圈电感器上的功率损耗。

在初级线圈上测得的功率损耗将包括次级线圈反射的功率，因此，必需测量初级线圈和次级线圈上的功率，然后使用变压器公式计算功率损耗。

### 磁性属性基础知识

开关式电源必须在各种工作条件下保持可靠性。为实现最优性能，设计人员一般会使用制造商提供的B-H (磁滞)曲线，指定磁性元件、变压器和电感器。这些曲线定义了磁性元件磁芯材料的性能包络，必须在磁滞曲线的线性区域内，维护工作电压、电流、拓扑和转换器类型等因素。很明显，变量这么多，维护起来相当不易。

检定磁性元件的工作区域，同时在 SMPS 内保持工作，对确定电源的稳定性至关重要。测量程序包括绘制磁滞环路曲线及考察电感器和变压器的磁性属性。

## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

磁性通量密度(B)

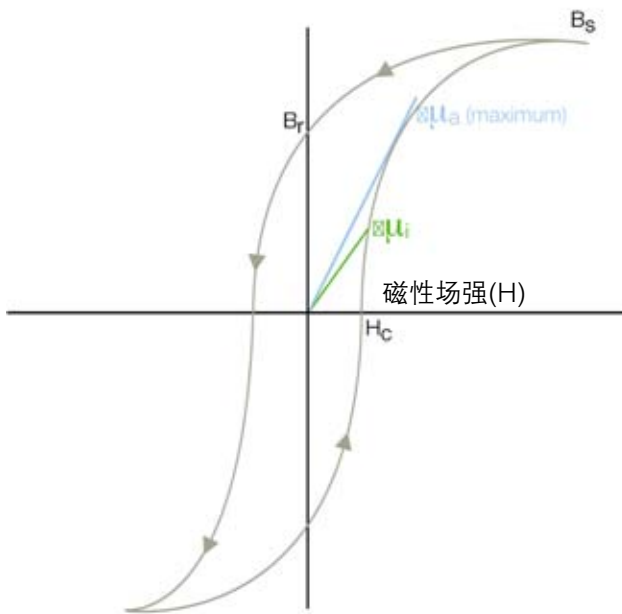


图 17. 磁性元件典型的 B-H (磁滞) 曲线。

### B-H 曲线

B-H 曲线检定磁性属性，图 17 是正弦激励典型的 B-H 曲线。

为进行 B-H 曲线测量，一开始时需要下述信息：

- 流经磁性元件的电压,  $V$
- 磁性电流,  $I$
- 圈数,  $N$
- 磁长度,  $L$
- 横截面面积,  $A$
- 表面积,  $S$

与图 17 有关的下述定义都使用这些变量：

磁场强度(H)是用来感应被测材料中磁通量的磁场,单位为每秒安培。

$$H_k(t) = I_k(t) \cdot \frac{N}{l}$$

饱和通量密度( $B_s$ )是材料中感应的最大磁性通量密度,而不管外部应用的场幅度 H 如何。

$$\Phi_k = \int V_k(t) dt$$

和：

$$B_k(t) = \frac{\Phi_k}{(N \cdot S)}$$

剩磁( $B_r$ )是在生成磁滞环路时在外部应用的磁场(H)返回零后材料中剩余的感应的磁性通量密度。

矫磁力( $H_c$ )是 H 轴和磁滞环路的截距上的 H 值,表示导致感应的通量密度(B)在磁滞环路测量期间到达零所需的外部场。 $H_c$ 与正负轴对称。

初始导磁系数( $\mu_i$ )是在 H 接近零时感应的磁性通量密度(B)与应用场(H)之比,这是磁滞环路上任一点的 B 与 H 之比。此外,最大幅度导磁系数是磁滞环路正周期第一象限上的 B 与 H 之比,是从原点画出的直线斜率。

## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

### 磁性属性测量

电感器作为电源输入和输出上的滤波器使用,可以有单个线圈,也可以有多个线圈。

在进行磁性属性测量时需要下述信息:

- 流经磁性元件的电压,  $V$
- 磁性电流,  $I$
- 圈数,  $N$
- 磁长度,  $L$
- 横截面积,  $A$

电感器电压和电流的公式如下:

$$V_L(t) = R \cdot i_L(t) + L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$$

在典型的DC到DC转换器中,线圈中的通量计算公式如下:

$$L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = N \cdot \frac{d\phi_L(t)}{dt}$$

和

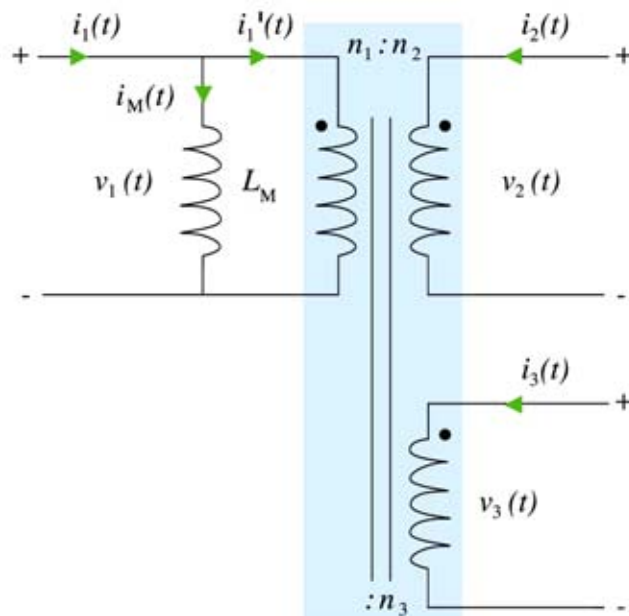
$$\phi_L [(n+1)T_s] = \phi_L [nT_s]$$

图 18 是可以作为耦合电感器或变压器使用的典型的多线圈磁性单元。计算这一电路操作的电气公式如下:

$$\frac{v_1(t)}{n_1} = \frac{v_2(t)}{n_2} = \frac{v_3(t)}{n_3}$$

和

$$i_1'(t) \cdot n_1 = -i_2(t) \cdot n_2 - i_3(t) \cdot n_3$$



理想的变压器

图 18. 多线圈磁性单元。

和

$$i_1(t) = i_M(t) + i_1'(t)$$

为计算净磁化电流,必需测量  $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$  和  $i_3(t)$ 。在净磁化电流一定时, B-H 分析程序与单线圈电感器使用的程序类似。通量取决于净磁化电流。在所有线圈中测得的矢量和为磁化电流。

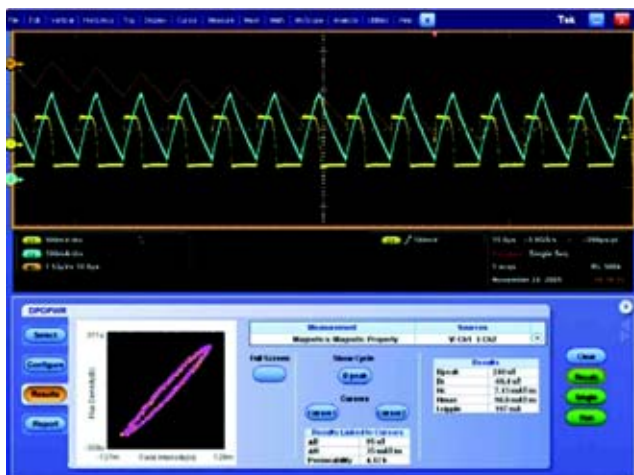


图 19. 单线圈电感器的 B-H 曲线。

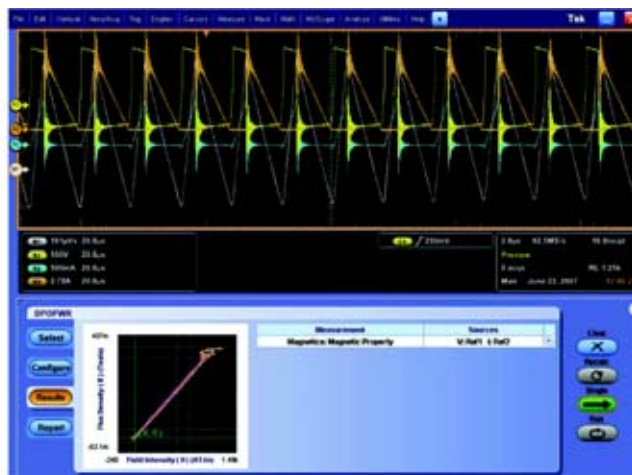


图 20. 变压器的 B-H 曲线。

### 使用示波器测量磁性属性

专用电源测量软件可以大大简化示波器测量磁性属性的过程。在许多情况下，只需测量电压和磁化电流就可以了，软件会为您完成磁性属性指标的计算过程。图19说明了单线圈电感器上的磁性属性测量结果。还可以使用初级电流源和次级电流源在变压器上执行测量。

在图 20 中，通道 1 (黄色轨迹)是流经变压器的电压，通道 2 (蓝色轨迹)是流经初级线圈的电流，通道 3 (洋红色轨迹)是流经次级线圈的电流。软件使用通道 2 和通道 3 数据，确定磁化电流。

某些电源测量软件还为磁性元件创建具体的 B-H 曲线，检定其性能。首先输入磁芯圈数、磁长度和横截面面积，然后软件会计算 B-H 曲线。

## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

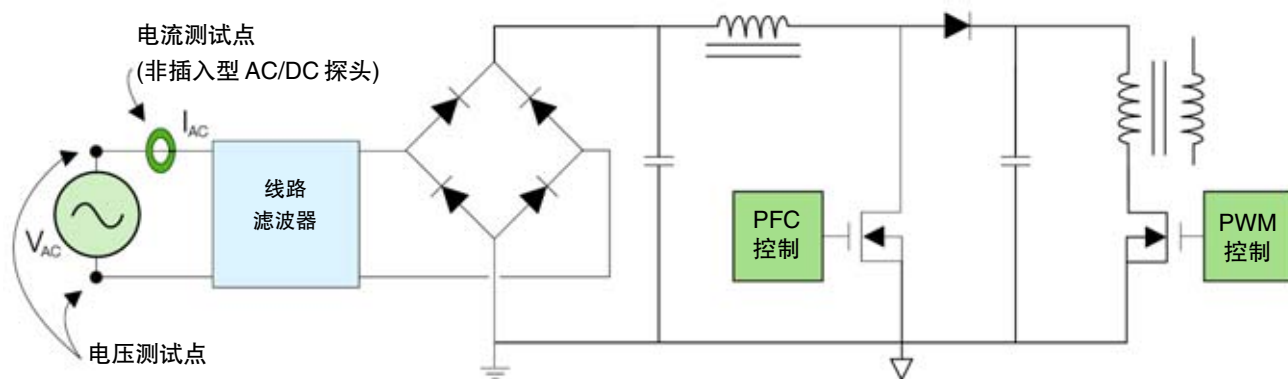


图 21. SMPS 电源(仅初级侧)和电源质量测试点简化的示意图。测量电源质量需要同时输入  $V_{AC}$  和  $I_{AC}$  读数。

### 电源线测量

电源线测量检定电源与其使用环境之间的交互情况。要注意的是，电源可以采用任何规格，从个人电脑中的小型风扇盒，到工厂内大小适中为设备提供动力的发动机，到为电话群和服务器群提供支持的大规模电源。每种电源都对馈电的输入电源(一般是市政电源)有一定影响。

为确定插入电源的影响，必须直接在输入电源线上测量电源电压和电流参数。

#### 电源质量测量基础知识

电源质量并不单纯依赖发电厂，还依赖于电源设计和制造及最终用户的负载。电源的电源质量特点决定着电源的“健康状况”。

实际环境中的电源线永远不会提供理想的正弦波，而是在线路上总有一定的失真和非理想特点。开关电源给电源带来了非线性负载。因此，电压波形和电流波形并不是完全相同。输入周期的某个部分会吸收电流，在输入电流波形上产生谐波。确定这些失真的影响是电源工程设计中的重要组成部分。

为确定电源线上的功耗和失真，必需在输入阶段测量电源质量，如图 21 所示的电压测试点和电流测量点所示。

电源质量指标包括：

- 真实功率
- 视在功率或无功功率
- 功率因数
- 波峰因数
- 根据 EN61000-3-2 标准进行电流谐波测量
- 总谐波失真(THD)

### 使用示波器测量电源质量

运行电源测量应用软件的数字示波器为替代测量电源质量的传统工具—功率计和谐波分析仪提供了强大的解决方案。

必须使用示波器，而不是老式工具。仪器必须能够捕获直到基础谐波 50 阶谐波的谐波成分。根据相应的本地标准，电源工频通常是 50 Hz 或 60 Hz。在某些军事应用和航空应用中，工频可以是 400 Hz。当然，信号畸变可能会包含更高的频率。由于现代示波器采样率高，它可以以非常高的细节(分辨率)捕获快速变化的事件。相比之下，传统功率计由于响应时间相对较慢，可能会漏掉信号细节。此外，示波器记录长度足以采集所需的周期数，即使在非常高的采样分辨率下也不例外。

软件工具加快了测量过程，使设置时间达到最小。通过在示波器上运行的全功能电源测量软件，在几秒钟内执行冗长的程序，可以自动完成大多数电源质量测量。通过减少手动计算数量，示波器可以作为用途非常广泛、非常高效的功率计。图22是强大的电源测量软件实例。

示波器探头也有助于安全可靠地进行电源测量。为电源应用设计的高压差分探头是观测浮动电压信号的首选工具。

要特别注意电流探头，可以通过多种方式实现电流探头结构：

- AC 电流探头基于电流变压器(CT)技术。CT 探头是非插入型探头，但不能感应信号中的DC成分，可能会导致测量不准确。
- 电流并联。这种设计要求中断电路，可能会导致探头本身内部的电压下跌，可能会影响电源测量精度。
- AC/DC 电流探头一般基于霍尔效应传感器技术。这种设备以非插入方式传感AC/DC 电流，能够使用一条连接读取 AC 成分和 DC 成分。

AC/DC 电流探头已经成为迎接开关式电源中电源质量测量挑战的首选工具。

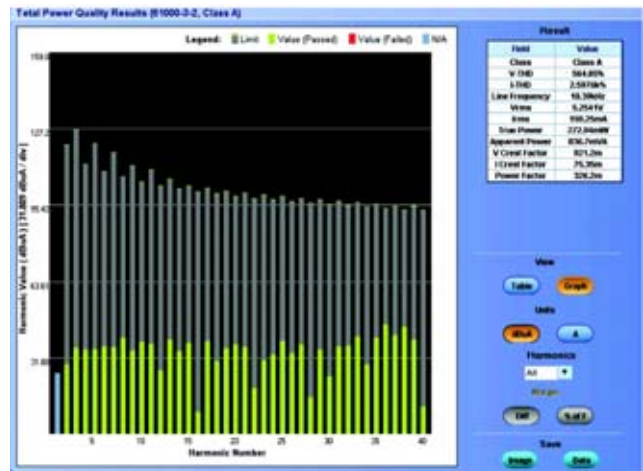


图 22. 使用 DPOWPR 测量和分析软件获得的电源质量结果，测量指标包括真实功率、视在功率、波峰因数、总谐波失真、功率因数及电流谐波柱状图。

### 总结

电源是几乎每种电源供电的电子产品不可分割的组成部分，开关式电源(SMPS)已经成为数字计算、联网和通信系统中的主导结构。一个开关式电源的性能或故障可能会影响昂贵的大型系统的命运。

为保证新兴 SMPS 设计的可靠性、稳定性、性能和一致性，唯一的方式是进行测量。SMPS 测量分成几大类，如有源设备测量、无源设备测量(主要是磁性元件)和电源质量测量。某些测量可以处理浮动电压和高电流，其它测量则要求数学密集型分析，提供有意义的结果。电源测量可能会非常复杂。

现代数字示波器已经成为检定和调试测量的首选工具。在配备相应的探测工具和自动测量软件时，示波器简化了挑战性的 SMPS 测量，提供了快速准确的测量结果。

# 差分测量与差分探头

## 初步介绍差分测量、放大器类型、应用及怎样避免常见错误

### 技术说明

#### 引论

所以测量都是两点测量

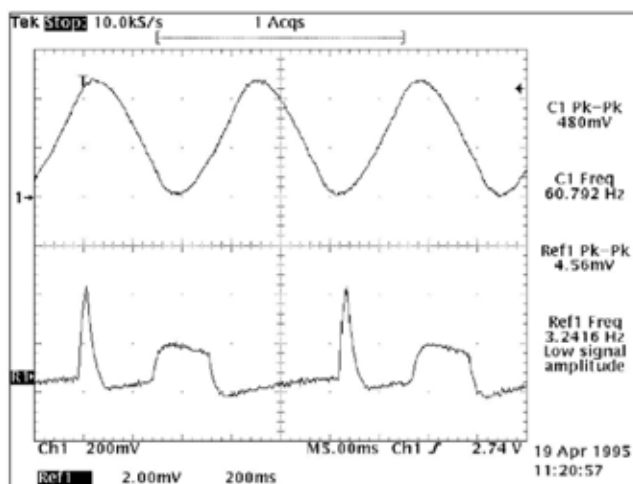
人们一直在一条电路的两点之间测量电压,不管是使用电压表还是使用示波器。当示波器探头接触电路中的一点时,即使没有连接地线,通常也会在显示器上出现波形。在这种情况下,测量的参考点是经过示波器机箱的安全接地通往电路中的电气地。

数字电压表通过两个探头测量两点之间的电位。由于这两个探头是彼此隔离的,因此这两点可以位于电路中任何地方。但情况并不总是如此。在数字电压表出现前,人们使用VOM(万用表)手持式仪表测量“浮动”电路。由于这些仪表是无源的,因此它们往往会给被测电路带来负荷。使用高阻抗VTVM(真空管电压表),可以执行侵入性较小的测量。VTVM有一个重大的局限性,即其测量总是以地为参考点。VTVM外壳接地,并连接到参考引线上。由于固态增益电路的问世,高性能电压表可以与地线隔离,从而可以执行浮动测量。

目前的大多数示波器,如老式VTVM,只能测量以大地为参考点的电压,地线则连接到示波器机箱上。这称为“单端”测量,探头地线提供了参考通路。遗憾的是,有时这种局限性会降低测量的完整性,或不可能进行测量。

如果被测电压位于两个电路节点之间而且这两点均未接地,那就不能使用传统的示波器探测技术。常见的实例是测量开关电源中的栅极驱动信号(参见图1)。

像普通电话线路中的那种平衡信号(在两条引线之间,且没有地回路)是不能直接测量的。我们将会看到,甚至某些“以地为参考”的信号也不能如实地使用单端技术来测量。



当存在500mV<sub>p-p</sub>、60Hz的共模噪声时,使用传统示波器探头不能测量模拟的4mV<sub>p-p</sub>心跳波形(上图)。差分放大器则可以从噪声中提取信号。

#### 如果地线不成其为地线

我们都听说过“接地环路”,书本上教我们避免“接地环路”。但接地环路是怎样破坏示波器测量的呢?当两条或多条单独的接地通路聚结于两点或多点时,将会产生接地环路。其结果是导体连成了一个环。当出现变化的磁场时,这个环就成了变压器的次级,其本质是一个短路线匝。在其附近传送非直流电流的任何导体都可以产生激励这个变压器的磁场。主配线中的交流线电压、甚至数字集成电路的输出引线,都可能产生这种激励。在环路中循环的电流会在环路内任何阻抗的两端产生电压。这样,在任何给定的瞬间,接地环路中的不同点将不处在同一电位。把示波器探头的地线连接到被测电路的地上,如果电路“接地”到大地,就会形成接地环路(参见图2)。循环电流作用在探头通路内部的阻抗上会在其中产生电压电位。

目录

引论.....50

差分测量基础.....53

差分测量概述.....53

共模抑制比(CMRR).....53

其他指标参数.....55

    差模范围.....55

    共模范围.....55

    最大共模转换速率.....55

差分放大器和探头的类型.....56

    内置差分放大器.....56

    高电压差分探头.....56

    高增益差分放大器.....57

    高性能差分放大器.....57

    差分无源探头.....57

    高带宽有源差分探头.....57

    电压隔离器.....57

差分测量的应用.....58

    功率电子部件.....58

    系统功率分配.....58

    平衡信号.....59

    传感器.....59

    生物物理测量.....60

维持测量的完整性.....60

    测量的误差源.....60

    输入连接.....61

    接地.....61

    输入阻抗对 CMRR 的影响.....62

    共模范围.....62

    测量完全浮动信号.....63

    带宽.....63

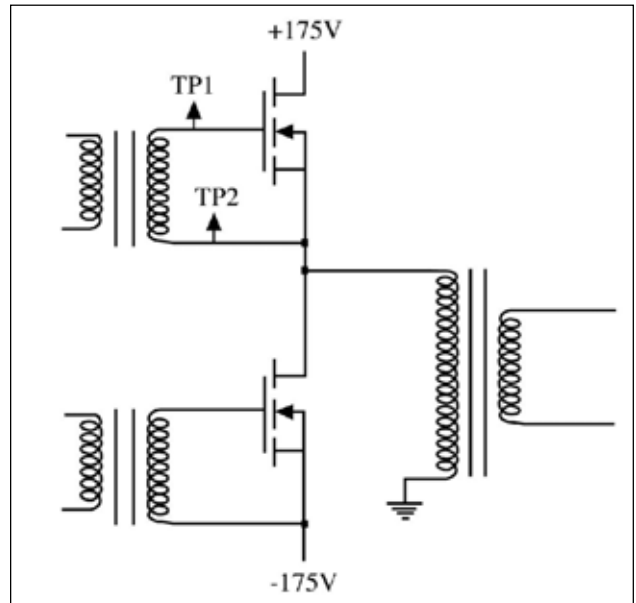


图 1. 在测试点 TP1 和 TP2 之间测量开关电源中的栅极驱动信号。两点都没有接地。

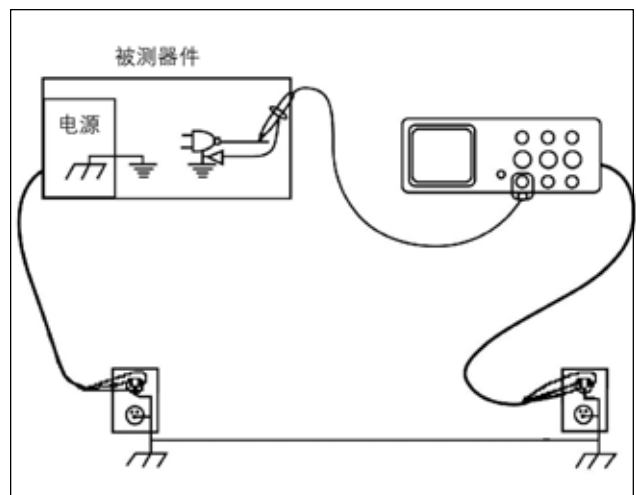


图 2. 示波器探头形成的接地环路。示波器的金属机箱和被测器件连接到安全地和内部电源公用线上。示波器探头地则通过输入端 BNC 连接器连接到示波器机箱上。



## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

这样，示波器输入端 BNC 连接器上的“地”电位就不同于被测电路中的地电位(也就是说“地线不成其为地线”)。这种电位差可以是几微伏,也可以高达几百毫伏。由于示波器以输入端 BNC 连接器外壳作为测量参考点,故显示的波形可能并不代表探头输入端上的实际信号。当被测信号的幅度下降时,误差会变得更加明显,这在传感器和生物医学测量中十分常见。

在这些情况下,人们经常会去掉探头的接地线。只有在测量频率极低的信号时,这种方法才有效。在较高的频率上,探头开始在信号中增加因谐振电路(由触点电容和屏蔽电感组成)产生的“环”(参见图 3)。(正因为如此,您永远要使用尽可能短的地线。)

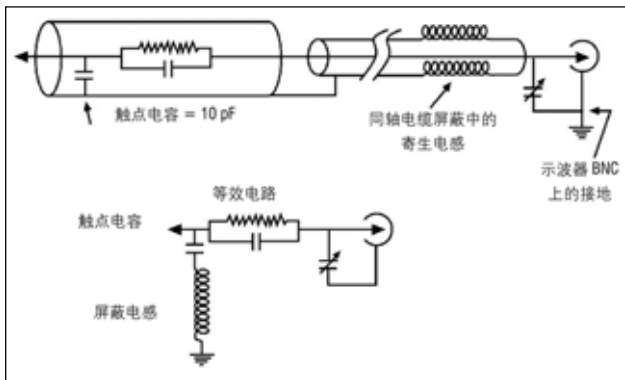


图 3. 探头触点电容和接地电感形成的串联谐振电路。

我们现在遇到了一种两难的情况:造成接地环路,在测量中增加误差:或去掉探头地线,在波形中增加环!

为了断开接地环路而经常试用的第二种方法是“浮动”示波器或“浮动”被测电路。“浮动”是指在被测试设备上或在示波器上使安全接地的导线开路从而断开与大地的连接。浮动示波器或浮动被测设备(DUT)之后,便可利用短地线使环达到最小,而且不会产生接地环路。

这种作法本身具有危险性,因为在主配线发生短路时,它会使电击保护措施失效。(某些专用电池操作的便携式示波器采用绝缘材料,可以安全进行浮动测量。)在严格接地的示波器(或被测设备)的电源线中放一个合适的接地故障断路器(GFCI),可以恢复操作人员的安全。但要知道,如果没有低阻抗的接地连接,示波器的放射辐射和传导辐射现在可能会超过政府标准,也会给测量本身造成干扰。在较高的频率上,断开接地线也不可能打破接地环路,因为“浮动”电路实际上通过杂散电容耦合到大地(参见图 4)。

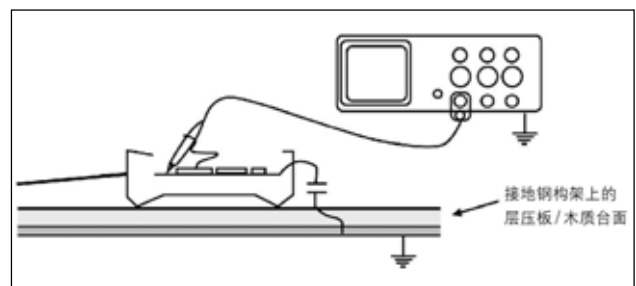


图 4. 使用接地的示波器探测“浮动的”电池供电手机。手机电路和钢制工作台构架之间的电容对高频率构成了虚拟接地环路。

即使测量系统没有引入接地环路,被测设备内部仍可能存在“地线不成其为地线”的综合症(参见图 5)。大的静态电流和低频电流作用在设备接地通路中的电阻性元件和电感性元件上便产生了电压梯度。在这种情况下,电路中某一点的“地”电位将不同于另一点的“地”电位。

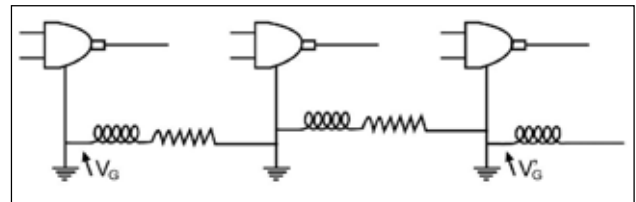


图 5. 接地布线系统中的微小寄生电感和电阻导致  $V_G \neq V'_G$ 。

例如，系统中高增益放大器的输入端的地与电源的“地”电位相差几毫伏。为了精确地测量放大器所看到的输入信号，探头必须参考放大器输入端的地。这些效应多年来一直是灵敏模拟系统的设计人员所面临的挑战。在快速数字系统中也有同样的效应。接地布线系统中的微小电感可能会在其两端产生电位，导致“地面反跳”。检修受到接地电压梯度影响的系统是非常困难的，因为设计人员不能真正查看各个器件所“看到”的信号。把示波器探头地线连接到器件的“接地”点上，会导致不确定性，这些不确定性使新通路的影响添加到接地梯度中。在连接探头地线时，如果电路中的问题变好(或变差)，则表明确实发生了变化。我们真正需要的是—种能够用示波器测量可疑器件输入端上的实际信号的方法。

通过使用适当的差分放大器、探头或隔离器，可以执行精确的两点示波器测量，而不会引入接地环路或使测量失败、扰乱被测器件或使用户面临电击危险。

市场上为示波器提供了多种差分放大器和隔离系统，每一种都针对特定的一类测量进行了优化。为了选择合适的解决方案，必须理解各种术语。

## 差分测量基础

### 差分测量概述

理想的差分放大器放大两个输入端之间的“差”信号，而且会彻底抑制两个输入端共用的任何电压(参见图6)。其转换公式是：

$$V_o = A_v (V_{+in} - V_{-in})$$

其中  $V_o$  参考大地电位。

受关注的电压，或差信号，称之为差分电压或差模信号，表示为  $V_{DM}$  ( $V_{DM}$  就是上述转换公式中的  $V_{+in} - V_{-in}$ )。

两个输入端共用的电压称为共模电压，用  $V_{CM}$  表示。差分放大器忽略  $V_{CM}$  的特性称为共模抑制或  $CMR$ 。理想的差分放大器会抑制所有的共模成分，不管其幅度和频率是多少。

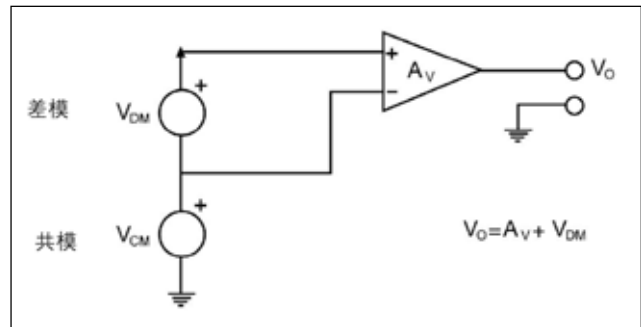


图6. 差分放大器

在图7中，差分放大器用于测量逆变器电路中上部的MOSFET(场效应管)栅极驱动信号。随着MOSFET的通和断，源极电压从正电源汇流条摆到负电源汇流条。变压器可以使栅极信号以源极为参考点。差分放大器允许示波器以足够的分辨率(如2V/分度)测量实际VGS信号(摆幅为几伏)，同时抑制几百伏的源极到地的跃迁。

### 共模抑制比(CMRR)

差分放大器的实际实现方案并不能抑制所有的共模信号。少量共模信号将作为误差信号出现在输出中，无法从预期的差分信号中辨别出来。衡量差分放大器消除不希望共模信号的能力，称为共模抑制比或简称为  $CMRR$ 。 $CMRR$  的真正定义是“差模增益除以相对于输入的共模增益”：

$$CMRR = A_{DM} / A_{CM}$$

## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

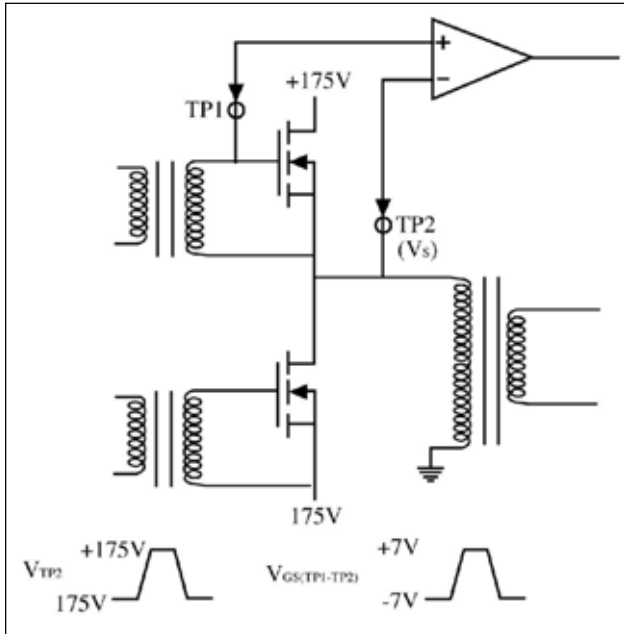


图 7. 用来测量逆变器桥电路中上部晶体管的栅极 - 源极电压的差分放大器。注意在测量过程中，源极电位变化了 350V。

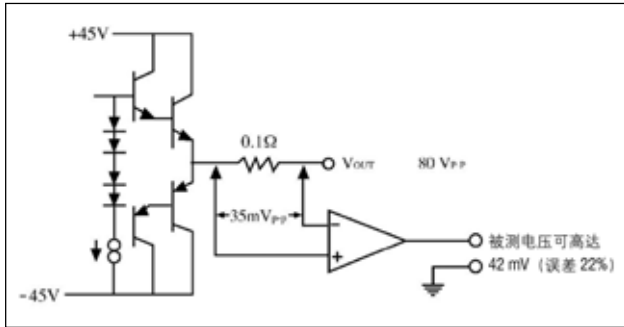


图 8. CMRR 为 10,000:1 的差分放大器的共模误差。

为了进行评估，我们可以估算出没有输入信号时的 CMRR 性能。于是 CMRR 成为在输出端看到的 VDM 的表现值(由共模输入生成的)。其值可表示为比率(10,000:1)或者以 dB(分贝)表示：

$$\text{dB} = 20 \log(V_{\text{DM}}/V_{\text{CM}})$$

10,000:1 的 CMRR 值相当于 80dB。例如，设想我们需要测量图8中的音频功率放大器输出阻尼电阻器上的电压。在满负荷时，阻尼器两端的电压(VDM)应达到 35mV,输出摆幅(VCM)为 80V<sub>p-p</sub>。我们使用的差分放大器的 CMRR 指标为 10,000:1(1 kHz 时)。用 1kHz 的正弦波驱动放大器使之达到满功率，共模信号的万分之一将在差分放大器的输出端错误地表现为 VDM，其值为 80V/10,000 或 8mV。对于实际值为 35mV 的信号来说，8mV 意味着高达 22% 的误差！

CMRR 指标给出的是绝对值，并未规定误差的极性(或相位偏移的程度)。所以，用户不能简单地从显示的波形中减去这个误差。CMRR 通常在直流时取最高值(最好)，并且随 VCM 频率的增加而降低。有些差分放大器用曲线表示 CMRR 指标与频率的函数关系。

让我们再看一下逆变器电路。晶体管开关 350V，而我们期望在栅极上有大约 14V 的摆动。逆变器工作在 30kHz。在试图估算 CMRR 误差时，我们很快遇到了问题。逆变器中的共模信号是一个方波，而 CMRR 指标设想的是正弦的共模成分。由于方波含有比 30kHz 高得多的频率的能量，所以 CMRR 可能比 30kHz 那一点的标定值要差。

只要共模成分是非正弦的，确定 CMRR 误差范围最快的方法就是试验测试法(参见图 9)。临时将两条输入线接到 MOSFET 的源极。示波器现在只显示共模误差。你现在可以确定误差信号的值是否有意义。请记住，这里并没有指出 VCM 和 VDM 之间的相位差。所以从差分测量结果中减去所显示的共模误差也不能正确地消除误差项。

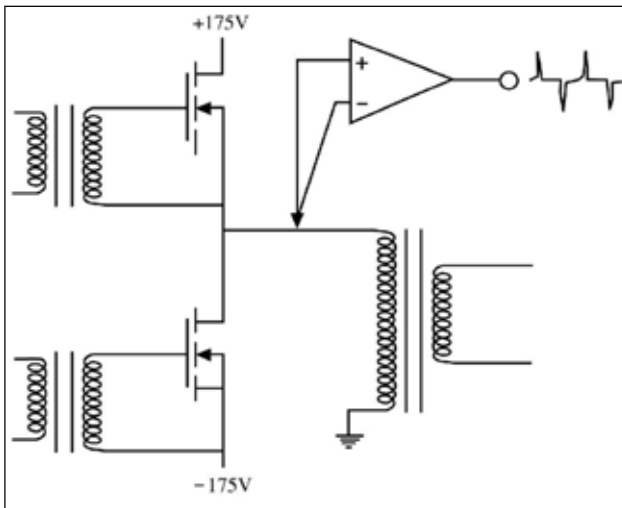


图9. 对共模抑制进行试验测试。由同一点驱动两个输入端。残留的共模出现在输出端。此项测试没有发现不同的源极阻抗的影响。

这是在实际测量环境中确定共模抑制误差范围的一种便利的测试方法。但有一种效应是这个测试没有捕获到的。两个输入端接到同一点上，在放大器看来驱动阻抗没有差别。这种情况会产生最佳的CMRR。当差分放大器的两个输入端是由差别明显的源极阻抗驱动时，CMRR值会降低。这种效应的详情将在以后讨论(参见第13页输入阻抗对CMRR的影响)。

#### 其他指标参数

差模范围相当于放大器或单端示波器输入端的输入范围指标。超出此范围的输入电压将使放大器受到过渡驱动，导致输出被削波或非线性失真。

共模范围是放大器能够抑制共模信号的电压窗口。共模范围通常大于或等于差模范围。共模范围有可能随着放大器增益的不同设置而改变，这取决于放大器的拓扑。

超出放大器的共模范围可以在输出端导致各种结果。在有些情况下，输出波形未被削波，可以生成与真实的输入信号非常近似的输出波形，但有一些附加的偏移。这时显示的波形与期望的波形非常接近，足以让用户毫不迟疑地接受。在进行差分测量前先检验共模信号是否处于可接受的共模范围之内，总不失为一个好方法。

最大共模转换速率适用于某些差分放大器和大多数隔离器。这项指标常令人困惑但却非常重要。一部分困惑源自仪器制造商之间缺少标准的定义。而且不同的放大器和隔离器在超出最大共模转换速率时的表现也不尽相同。最大共模转换速率实质上是对CMRR指标的补充。本指标的单位一般为 $\text{kV}/\mu\text{S}$ 。

有些类型的差分放大器也像其他放大器一样，在超出小信号的带宽指标之前就超出了大信号转换速率的限制。当差分放大器一端或两端被驱动到转换速率的极限时，共模抑制就会急剧降低。与CMRR不同的是，最大转换速率并不意味着输出端共模馈通量的增加。一旦超过了最大共模转换速率，一切均无从谈起 - 输出就像被钳位在一个电源汇流条上。

但是对于隔离器来说，这种影响表现得为更加渐进 - 就像差分放大器中的CMR一样。随着共模转换速率的增加(与频率相对)，有更多的共模成分“馈通”到输出端。这个指标从直觉上表示的是在输出端出现已知的馈通量时的最大共模转换速率。需要注意的是，某些隔离器的共模转换速率实际上就是最大非破坏性极限。这一点非常重要。当转换速率比最大指标低得多时，进行有意义的测量的能力将会受损。在使用隔离器时，最好能在重要的测量之前先测试共模馈通。这很容易做到，只需在探头触点和参考线上都用同一共模信号驱动并观察输出信号。

## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

### 差分放大器和探头的类型

内置差分放大器。很多示波器都能够用内置的功能进行最简单的差分测量。这种方式叫做“channel A - channel B”(通道 A 减通道 B)方式或者“准差分”方式。虽然性能上受到限制，这项技术还是适合一些测量的需求的。为了进行差分测量，要使用两个垂直通道，一个用于正输入，一个用于负输入。用于负输入的通道被设置成反转方式，显示方式则设置为“ADD Channel A + Channel B”(通道 A 加通道 B)。为了正常工作，两个输入必须设定在相同的标度系数，两个输入探头也必须是同型号的。现在显示器上出现的就是两个输入端的差电压。

为了获得最大的 CMRR，两个通道的增益应当匹配。这不难做到，只须将两个探头连接到方波信号源并使信号源的振幅保持在设定的“电压/分度”的动态范围之内(大约  $\pm 6$  分度)。将一个通道的增益方式设置为“uncalibrated-variable”(非校准 - 可变)，并调节可变增益控制旋钮直到显示的波形成为平直的轨迹。这项技术的主要局限性在于其共模范围比较小，这是示波器垂直通道的动态范围造成的。一般来说，其值小于“电压/分度”设定值的 10 倍(相对于地)。只要  $V_{CM} > V_{DM}$ ，获得了差分结果的这种工作方式就可以认为是从两个大电压中提取了小差值。

在模拟信号数字化以后，大多数数字存储示波器是在数字域中完成波形的数学分析。在减掉了共模信号之后，模数转换器有限的分辨率常常不适于检查所得到的差分信号。由于两个通道的交流增益没有精确地匹配，高频的 CMRR 相当低劣。

这项技术适用于共模信号的振幅等于或低于差模信号，以及共模成分为直流或低频(如 50 或 60Hz 的供电线)的情况。在测量中等幅度的信号时，这项技术可以有效地消除接地环路。

高电压差分探头。最近，市场上出现了高电压有源差分探头。一种采用固定衰减(带可变换差分增益)的新的拓扑可以使这些探头在所有的增益设置上保持其全部的共模范围。这种单一的衰减器大大降低了复杂程度从而减少了用户的成本。

这种探头为测量线连电路(通常用于开关电源、功率变换器、电动机、电灯镇流器等)提供了费用合理而又安全的方法。由于共模范围高达 1,000V，这种探头就不需要极其危险的“浮动示波器”的做法。最近，工作场所意外伤害监控组织，如美国的 OSHA(职业安全和健康条例)，强化了他们对设备接地的检查，违者将处以高额罚款。

除了安全上的好处之外，这种探头还可改进测量质量。一个明显的好处是能够充分利用示波器的多个通道来同时观察涉及不同电压的多个信号。由于这是真正的差分探头，故两个输入端均为高阻抗，即高电阻和低电容。浮动示波器和隔离器不具有平衡式的输入。参考点(探头上的“接地”夹)有相当大的对地电容。参考点所连接的任何源阻抗在快速共模跃迁过程中都会承受负荷，并使信号衰减。

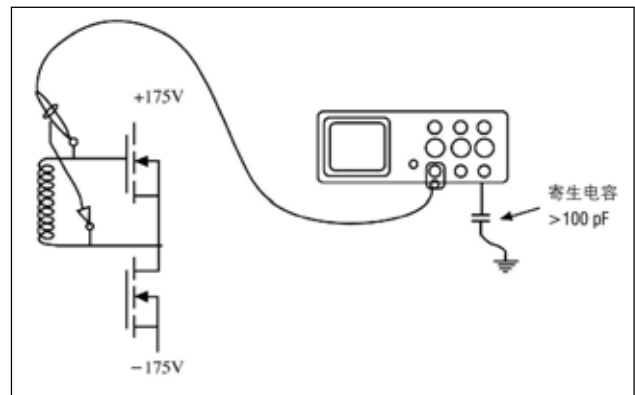


图 10. 即便示波器处于“浮动”状态，寄生电容也会形成交流分压器从而增加测量的误差。注意：回动的探头引线会给栅极增加  $> 100$  pF 的电容，有可能破坏电路。

更有甚者，高电容还可能损坏某些电路(参见图 10)。将示波器的公共端接到逆变器上部的栅极可以使栅极驱动信号滞后，阻碍器件的关断并破坏输入桥。这种故障通常还会在工作台上出现小火花，很多功率电子器件的设计人员都可以作证。

使用平衡的低输入电容的高压差分探头，可以用任何引线安全地探测电路上的任一点。

**高增益差分放大器。**高增益差分放大器经常属于外接附件，可以使示波器测量幅度极低的信号，甚至小到几个微伏。为了避免因接地环路和接地梯度效应造成的破坏，这些信号总是以差分方式进行测量的，即便它们是以地为参考。当源不以地为参考时，共模信号可以比有用的差模信号大几个数量级。为了克服这个问题，这些放大器的 CMRR 值极高，经常达到 1,000,000:1 或者更高。

有些高增益放大器还具有可以改善低幅度测量完整性的附加功能。可选的低通滤波功能可以使用户从低频信号中去除频带外噪声。差分偏移功能可用于消除引入到输入配线或传感器桥的偏置电压中的伽伐尼电位。为了能用于高驱动阻抗的信号源，有些型号还允许用户将输入设定在几乎无限大的阻抗上。

对任何差分放大器来说，通道增益最轻微的不匹配都会使放大器的高 CMRR 值大大降低。当应用中需要使用示波器探头时，只能使用相同的非衰减模式(1X)，因为衰减的探头可能匹配得不够好，不足以保持 CMRR 值。

**高性能差分放大器。**带有插入式放大器的示波器的出现使得高性能差分放大器的使用成为可能。这种放大器综合了许多特性，适合于多种应用。校准的偏压补偿可以使该放大器用于单端模式，其轨迹可以参考距地几千个分主的位置。

这样就有可能精确地测量电源中的波纹谷值以及功率放大器的净空度。最先进的高速钳位电路能使放大器从超标几百倍的输入过载中迅速恢复。这就提供了直接测量放大器和 DAC 电路的稳定时间的可能性。

这种放大器的特点是带宽指标高达 100MHz 以上，CMRR 特性也很好。但是 CMRR 指标是在两个输入端直接连在一起而且用低阻抗信号源驱动的情况下获得的。在实际应用中，信号源阻抗和通道增益的差异会使高频时 CMRR 值明显降低。

**差分无源探头。**为了尽量减少性能的退化，这些放大器只能使用特别匹配的差分无源探头。要保证按照探头制造商给出的程序针对该放大器对探头进行单独校准。

**高带宽有源差分探头。**这种探头在其触点处对信号进行缓冲，以此保持高频 CMRR 的质量，故可消除无源探头导致的性能下降问题。这种探头具有高带宽(100MHz 以上)、高灵敏度，而且有极佳的高频 CMRR 性能。这种探头一般用于测量磁盘驱动器的读出电路(其信号本质上是差分信号)。由于在查找地面反跳问题时不会改变接地梯度，这种探头在探查高速数字电路时得到越来越普遍的应用。

**电压隔离器。**尽管电压隔离器不是真正的差分放大器，但它们提供了安全地测量浮动电压的一种手段。与差分放大器相比，隔离器也有一些折衷的优势，选择哪一种则取决于应用。如其名称所示，隔离器并不直接连接浮动的输入端与接地的输出端。信号的耦合是通过光学方法或多路径的光学/变压器方法实现的。其物理配置有两种：集成的单件系统和分立的发送器/接收器系统。

发送器与接收器分立的型号是靠光缆相连。发送器由可充电电池供电，可以远离接收器。在信号发源地的环境下不适于人或示波器的情况下，这种方式是很有用的。隔离器还可用于极高的共模电压。浮动电压指标通常受手持式探头的绝缘电压的制约。如果断电的被测设备可以连接探头，则浮动电压只受发送器与地之间的物理间距的限制。

由于隔离器没有对地的电阻性通路，所以在对泄漏电流极为敏感的应用中是一种很好的选择。装有灵敏的 GFCI(接地故障断路器)的电路，如医用电子设备，在连接到差分放大器时可能引起 GFCI 跳闸。而没有终止于地的衰减器也使隔离器对静态(直流)共模电压具有无限的 CMRR。

## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

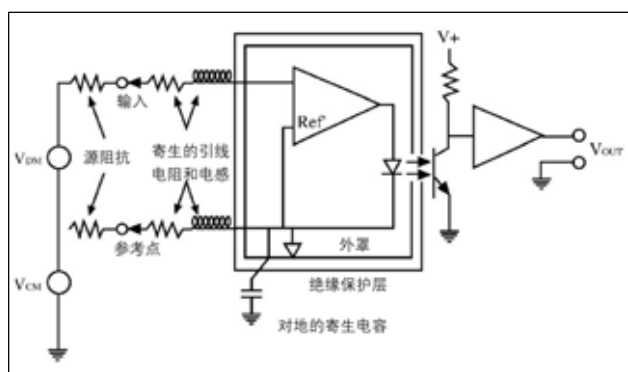


图 11. 隔离外壳产生的不平衡输入电容。由此形成的交流分压器使得探头夹子处的  $V_{ref} \neq V_{ref}$

隔离器的劣势在于它不是真正的差分放大器，也就是说，它的输入是不平衡的(参见图 11)。测量(+)输入端和参考(-)输入端对大地的电容差别相当大。这就产生了与前述浮动示波器相同的问题。参考引线的源阻抗在高频段与接地电容形成了一个衰减器。

将参考点连接到电路中驱动阻抗最低的点上(必要时可颠倒示波器的通道以便重新获得正确的极性)即可使这些问题的影响减至最小。如果隔离器的发送器与接收器是分立的，应尽可能将发送器与接地表面相隔离，以便最大限度地减少对地的电容耦合。将隔离器置于纸板箱或木制板条箱内都可以显著改进其性能!

### 差分测量的应用

#### 功率电子部件

高电压差分放大器是测量线路连接电路的理想的手段，这种电路包括开关电源的原线圈、电动机、电灯镇流器，以及其他类似的系统。这种电路不需要“浮动示波器”这样的危险做法。低的输入电容也不会增加栅极驱动电路的负荷而影响逆变器的运行。

在描述功率开关器件(如 MOSFET 和 IGBT)的特性时常要测量动态饱和和特性。带有高速输入钳位电路的高性能差分放大器能够精确地测量导通饱和度，即当器件关断时过驱动(满标度的几百倍)之后的几纳秒。这样就可以使用精确测量饱和特性所需要的高灵敏度。

在测量次级电路时这种放大器也是有用的。通过激活校准的偏压补偿(也叫比较电压)，放大器也可用于单端模式以监视波纹谷和线性稳压器的净空度(参见图 12)。若将偏压补偿设定到输出电压，则可以在各种动态负荷条件下以高灵敏度直接测量  $V_{CE}$  净空度。

#### 系统功率分配

在开发高精度模拟量、混合信号和高速数字系统时，常常要解决功率分配方面的问题。这种工作可能是设计者最可怕的梦魇。CAD 系统经常也无助于事，因为很难或者根本不可能为引起此类问题的微小的寄生效应建立模型。配备了差分放大器的示波器是追踪和鉴别系统中的故障点的最好工具。

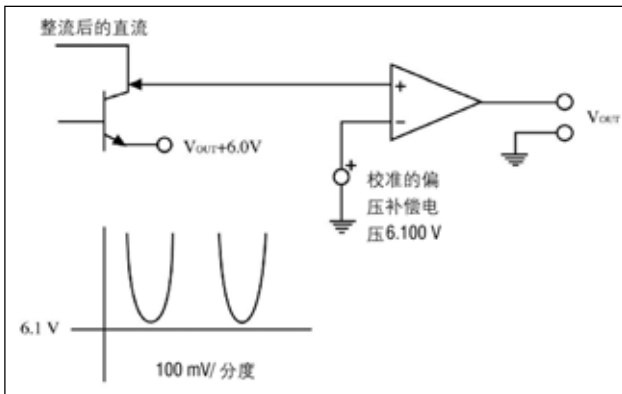


图12. 用校准的偏压补偿精确测量输出稳压器集电极上的电源波纹谷。注意：示波器设定在100mV/分度，地电位在屏幕外61个分度。

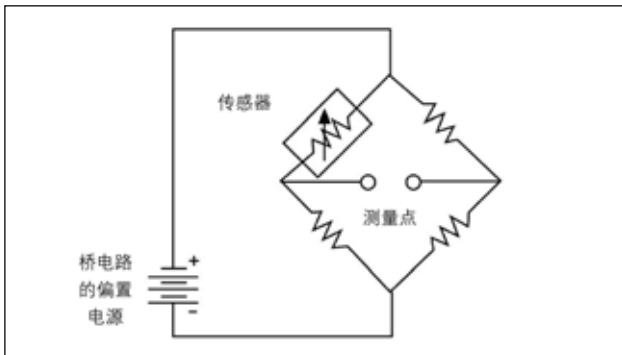


图13. 平衡桥电路中的传感器。在两个分压支路的抽头之间进行差分测量。

单端测量常常将功率分配问题隐藏起来。因为这种测量为被测信号另外提供了接地路径。这不仅使测量发生了变化，而且也常常会影响电路的工作，可能改进也可能降低电路的性能。

将差分探头置于集成电路的电源引线上，可以给出器件电源的真实状况。逻辑器件的引线电感常常使集成电路与局部的旁路电容隔离开来。即便电源看似纯净，接地和电源引脚也可能相对于系统中的其他地线发生漂移。移动探头可以跟踪单个器件的地与系统中其他地之间的动态接地电压梯度。数字系统中的地面反跳效应可能更容易测量。在集成电路的输入引脚及接地引脚之间进行探查就可给出该器件所看到的实际信号的状况。

### 平衡信号

有些系统使用的信号本质上就是差分信号。当信号两端共有同一的驱动阻抗时就认为这两端是平衡的。平衡系统专业音频设备、电话和磁记录系统(模拟与数字存储器)中是很普遍的，这里仅给出少数几例。差分信号在高速数字系统中也分布的越来越普遍。如果对这种信号一次测量一端并将结果“相加”，那么这种低效率的尝试充其量是一种容易出错的方法。当只有信号的一端承载探头时能量就经常转移到未被测量的一端。以差分方法测量平衡系统可以得到信号的真实描述。

### 传感器

差分测量普遍应用于传感器系统。由于信号幅度小，还需要消除接地环路，所以就排除了使用单端测量的可能性。“传感器”一词使人想到了用于测量机械现象的设备，如测量加速度、振动、压力等等。差分测量技术的应用已超出了这一范围，还包括视频和医学成像器、麦克风、化学传感器，等等，不一而足。

电阻值可以发生变化的传感器经常工作在所谓平衡桥的配置中(参见图13)。这种配置是利用三个已知电阻器和传感器构成一对分压器。桥电路电源为这对分压器提供偏压，而在分压器的抽头之间进行差分式的电压测量。这种配置的好处是消除了电源波动的影响。在系统被激励之前，传感器经常生成一个代表其稳态的直流输出电压。为了获得高分辨率，最好是将直流成分去掉。如果需要测量极低的频率成分( $<2\text{Hz}$ )，在放大器输入端采用交流耦合是无效的。为了适应这种需求，很多高增益差分放大器都有差分偏移功能。这种功能实际上是在一个输入端串接一个浮动的可调电源，这样就允许放大器保持直流耦合。偏移控制的范围相当大，在较高的增益设置中可达到 $\pm 100$ 万分度。



## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

### 生物物理测量

**警告:** 不要在人体上接入包括差分放大器在内的任何电子仪器,除非这种仪器是专为人而设计的。合适的设备应被确认符合由所在国批准的专门的法规。

测量神经活动所形成的电信号面临着诸多挑战。这种信号的幅度极低,常常小于1毫伏。共模成分可能比有用信号大几百倍甚至几千倍。源阻抗也相当高。差分信号通常被高幅度的噪声破坏。所幸的是高增益差分放大器可以用来测量这些信号。1,000,000:1 或者更高的 CMRR 指标可以有效地消除共模成分。

为了应付输入信号的高阻抗,可将放大器的输入电阻配置为无限大。(注意:如果标本未经其他设备接地,应当使用通过 100k $\Omega$  电阻接地的单独的探头以便减少共模范围超载的机会。)皮肤触点一般采用银/氯化银电极。这样可以建立与皮肤的离子连接,还可生成半电池电压为 400mV 的伽伐尼电池用以给测量加入偏置电压。放大器的差分偏移可用于去除偏压同时又保持低频响应特性。由于大多数生物物理活动发生在 20Hz 以下的频率,可以利用有限带宽滤波器减少高频差分噪声但不会使有用信号发生改变。

### 维持测量的完整性

#### 测量的误差源

像其他的测量方法一样,差分测量也受到产生误差的条件制约。这些误差在结果中也许很明显,也许并非显而易见,还有可能被误认为是想要的测量结果。下面将讨论一些比较常见的误差源。为了了解产生误差的原因和避免的方法,首先需要对差分示波器或探头的内部运行情况有一个基本的了解。

系统的核心是差分放大级(参见图 14)。其图示符合与运算放大器相同。差分放大器像运算放大器一样可以抑制输入的共模信号而只放大两个输入端的电压差。与运算放大器不同的是,差分放大器具有已知的、有限的增益。在有些配置中,增益可由用户选择。输出是单端的,而且以地为参照。为了获得很高的阻抗,输入部分常采用 FET(场效应管)。输入信号可以通过高阻抗的衰减器以使大信号减小到放大器可以处理的范围。对于衰减器的要求要比单端放大器高很多。两端必须有相同的直流和交流衰减。衰减量的不匹配对 CMRR 具有第一位的影响。例如,为了保持 100,000:1 的 CMRR 指标,衰减器的匹配度必须好于十万分之一(0.001%);这样就在差分放大器中不给误差留下余地!当然,还需要从信号源开始全程保持这种匹配度。

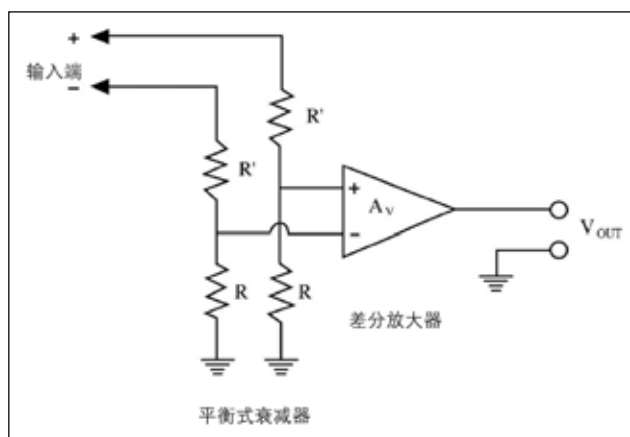


图 14. 带衰减器的差分放大器简图。

### 输入连接

一般来说,差分放大器或探头与信号源的互连是产生误差的最大来源。为了维持输入的匹配,两个通道应尽可能一样。两个输入端的任何接线的都应长度相同。如果使用探头,其型号与长度也应相同。在测量高共模电压的低频信号时,应避免使用带衰减的探头。在高增益时则完全不能使用这种探头,因为不可能精地平衡它们的衰减量。当高电压或高频率的应用需要衰减时,应使用为差分放大器专门设计的专用无源探头。这种探头具有精密调整直流衰减和交流补偿的装置。为获得最佳的性能,每一个特定的放大器都应专用一套探头,而且要根据这套探头附带的程序针对该放大器进行校准。

一种常用的方法是将+和-输入缆线成对绞扭在一起。这样可减少拾取线路频率干扰和其他噪声的可能。以间隔方式布线的输入缆线(参见图15)的作用相当于变压器的一个线圈。穿过这个环路的任何交流磁场都会感应出一个电压,此电压作为差分成分出现在放大器的输入端,而且会如实地合计到输出上去!若将输入引线绞接在一起(如图16),则感应电压往往出现在VCM通道,可以被差分放大器抑制。

在共模信号超量的高频测量中可以将两条输入线绕在铁氧体磁环上而得到改善。这样作可衰减两个输入端共有的高频信号。由于差分信号是在两个方向上穿过磁芯,因此不受影响。

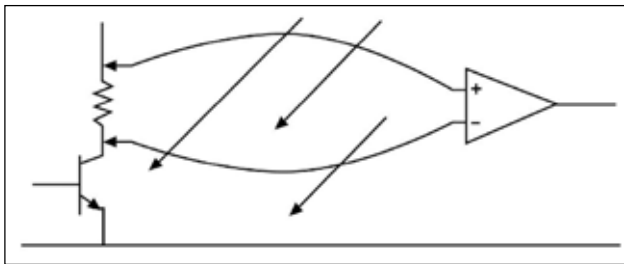


图15. 随时间变化的磁场穿过间隔开的引线时感生出电压,犹如变压器的线圈。此电压作为差分成分输入放大器并累加到真正的VDM信号-上。

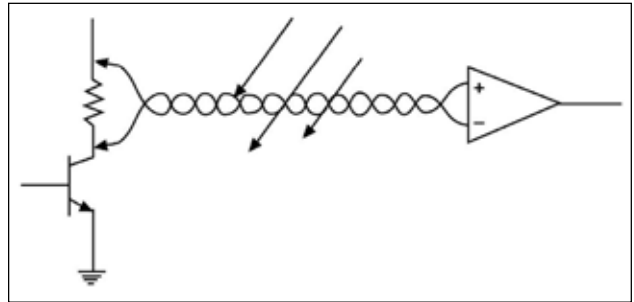


图16. 将输入引线绞扭在一起,环路面积非常小,故穿过其中的磁场较少。感应电压往往出现在VCM通道,可以被差分放大器抑制。

### 接地

大多数差分放大器的输入连接器是外壳接地的BNC连接器。在使用探头或同轴输入线缆连接时,总会有如何接地的问题。由于测量应用千差万别,故没有严格的标准可循。

在测量低频的低电位信号时,地线一般最好是只接在放大器一侧,而不要接在两个输入端上。这样可给感应到屏蔽层的电流提供返回的通路,但又不会形成接地环路而对测量或被测设备形成干扰。

在高频部分,探头的输入电容与引线电感形成串联“空腔”谐振电路,并可能结成环状。在单端测量中,使用尽可能短的接地线可使这种效应减至最小。这样会降低电感量,有效地增高谐振频率,使其有望超出放大器的带宽。差分测量是在两个探头接触点之间进行的,其中并不涉及接地的概念。然而如果因为共模成分的快速上升而产生了环,则使用短的接地线可减少谐振电路中

## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

的电感量，从而减少了环状成分。在有些情况下，也可以用附加接地线的方法减少快速差分信号所产生的环。如果共模源在高频时对地的阻抗很低，也就是被电容器旁路，就属于这种情况。如其不然，附加地线可能会使情况变得更糟！如果发生了这种事，可试着将探头一起在输入端接地。这样可以通过屏蔽降低有效电感。

当然，将探头的地接到电路可能会生成接地环路。在测量高频信号时这通常不会产生问题。测量高频时的最好忠告就是试着用和不用接地引线进行测量；然后采用能给出最好结果的设置。当把探头接地引线接到电路时，要切记将它接地！在使用差分放大器时很容易忘记地线的连接在哪里，因为它们可以探查电路的任何地方而不会有发生损害的危险。

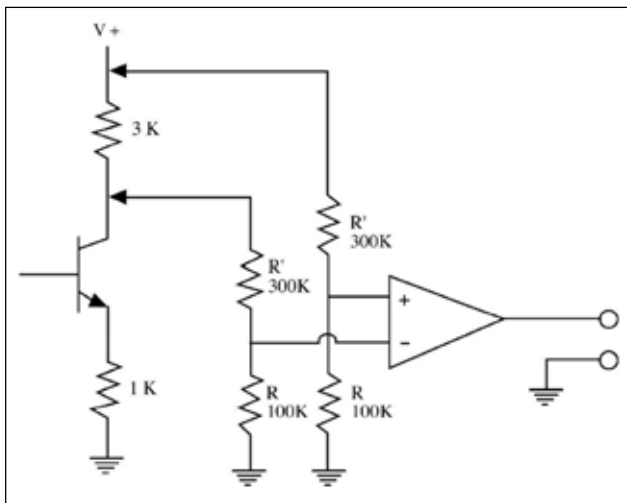


图 17. 源阻抗不平衡所造成的影响。+ 输入衰减器是从  $0\Omega$  驱动的，但 - 输入衰减器是从  $3k\Omega$  以下驱动的。结果与  $900k\Omega$  相加，使衰减增加而 CMRR 降低。

### 输入阻抗对 CMRR 的影响

任何源阻抗的作用就是与输入电阻(直流)和输入电容(交流)组成一个分压器。对单端测量来说，阻抗的影响一般可以忽略，因为误差很少能达到 1%。但对差分测量，这个小的误差造成输入增益的不匹配，这会减少共模抑制的能力(见图 17)。

测量差分放大器的 CMRR 指标通常是经过 T 型 BNC 连接器共同驱动两个输入端。这样向输入端看进去的阻抗差实际为零。现实中的信号源理应具有相同的驱动阻抗。但这很难做到。于是，CMRR 的实际性能要比放大器的指标低得多。

如果放大器的输入阻抗、衰减倍数和源阻抗全都已知，那么通过计算每个输入分支的分压比就可以确定实际的 CMRR。不过，若只对测量的实绩做出主观的判断会更容易些。

很多高增益放大器都可以配置成仪器用放大器。仪器用放大器没有输入衰减器，本身的输入电阻是无限大( $>10^{12}\Omega$ )。在源阻抗相当高时(如生理学实验)这种方式可以大大改善低频的 CMR。尽管仪器用放大器的输入电阻为无限大，其输入电容还是有的。随着共模频率的增加，信号源的高阻抗对 CMR 的改善效果将迅速退化。由于仪器用放大器没有输入衰减器，其共模范围和差模范围都比较狭窄。

### 共模范围

任何放大器都有可能被过驱动，并引起输出的“钳位”。当输入的差模信号大到足以强制放大器超出其输出动态范围时，差分放大器也会发生同样的效应。差分放大器还要了承受另一种过载，即超出输入共模范围。当预期的信号所依附的电压(VCM)超出了放大器的输入共模范围时就会发生这种情况。

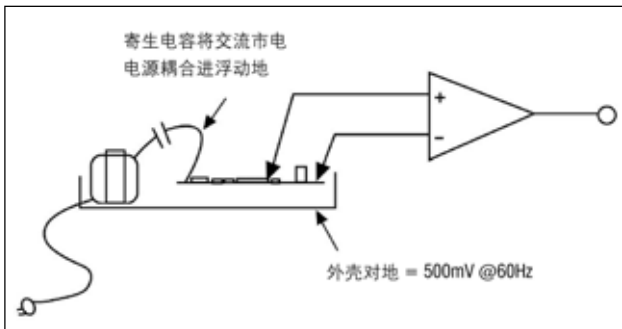


图18. 消费音频电子部件中的VCM。这些设备通常使用双芯电源线，其机箱和电路都是浮动的。

由于放大器抑制了共模信号，所以动态范围受到输入级而不是输出摆幅的限制。带输入衰减器的放大器共模范围比差模范围大。由于共模成分在测量中是看不到的（但愿如此），所以共模范围过载对于用户可能并不明显。当共模成分为直流时尤其如此。在超出VCM范围时，有些放大器的拓扑仍然近似地给出带有明显增益误差的差分信号。由于波形貌似正确，很多用户被这种错误的测量结果所愚弄。

有些放大器带有过载指示器以警告用户发生了共模过载的情况。一个好的方法就是在进行重要的测量之前先检验共模是否在规定的范围之内。只要将一个输入端接地并且用放大器本身测量共模成分就可以很容易地进行检验。然后再对另一个输入端重复此过程。

### 测量完全浮动信号

完全浮动（没有任何接地）的信号源在用差分放大器进行测量时会造成特殊的问题。常见的例子有电池供电的电子设备、消费音频部件和实验用生理标本。由于没有分支阻抗接地，该地区的任何交流电场都可以通过电容耦合到被测设备中去（参见图18）。在这种测量环境中充斥着从荧光灯和建筑物配线中辐射出来的线路频率电场。当这种电场耦合到被测设备中时，便产生了共模电压。若耦合量足够大而放大器的输入阻抗又比较高，就可能不经意间超出了放大器的共模范围。当放大器配置成仪器用放大器时尤其如此，因为对线路频率的负载阻抗近乎无限大。

通过提供分支阻抗接地、减少电容性耦合或者减少场强等都可以避免出现过载的情况。增加到地的并联支路是最为容易的方法。这种方法不需要直接短路，通常有10kΩ的电阻就足够了。如果加入分支阻抗对被测设备或测量过程造成了干扰，可以试着将被测设备用接地的金属屏蔽物封装起来以减少电容性耦合。这实际上是加了一个给交流电场提供接地通路的法拉第屏蔽。最后一个方法是设法将场强减至最小。作为一个好的开始，可以用白炽灯替代荧光灯以及使用电路配线与被测设备之间保持最大距离。

### 带宽

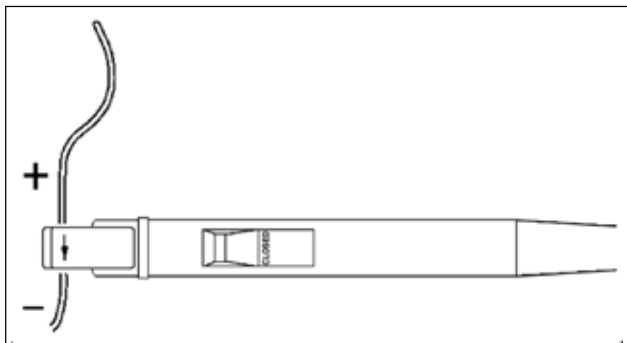
差分放大器和单端示波器放大器一样，常可以对带宽限制进行控制。高增益放大器可以提供低通频率的选择。带宽限制可减少高频噪声成分并使低频的降低减至最小。带宽限制滤波位于输入信号被转换为单端之后。所以，使用带宽限制不会增加高频的输入共模范围。

# 电流探头使用技巧

## 应用指南

### 使用电流探头的注意事项

1. 请仔细阅读说明书上的安全注意事项以及探头量程。
2. 钳式电流探头必须将滑块推到底，直到探头显示：“CLOSED”。
3. 每一次测量之前对于有源电流探头需要预热20分钟以上才能保证测量结果的精确。
4. 每一次测量之后都需要进行探头消磁(Degauss)，避免剩磁对测量结果的影响。
5. 如果需要更高的测量精度，在每次使用前，请使用泰克专用的电流校准夹具进行校正。
6. 注意电流方向



### 探头的消磁与平衡

为进行精确的测量，您必须经常对探头进行消磁与平衡调节。消磁可以消除探头铁心内的寄生磁场，否则将造成零点的漂移和测量误差。每次进行消磁后都需要调节探头的零点平衡，消除存在的偏移。在下列各种条件下都需要进行消磁与平衡：



- 每次打开示波器进行 20 分钟预热以后
- 每当发生过载的时候
- 每当探头暴露在强磁场中
- 每次发现空载直流偏置非零时

### 消磁与平衡调节步骤：

1. 将示波器输入通道设为零参考点。
2. 将探头的输出连接示波器，如果是TCPA系列或者TCP202 电流探头，同时使用泰克 TDS3000 以上型号的示波器，示波器将该通道显示刻度设为安培/格。
3. 探头不钳任何导线的情况下，将滑块推到底，直到显示 CLOSED。
4. 按 DEGAUSS(消磁)按键。

将示波器打到最小刻度，比如 1mA/格或 10mA/格。调节平衡旋钮，直到波形轨迹线与零点重合。

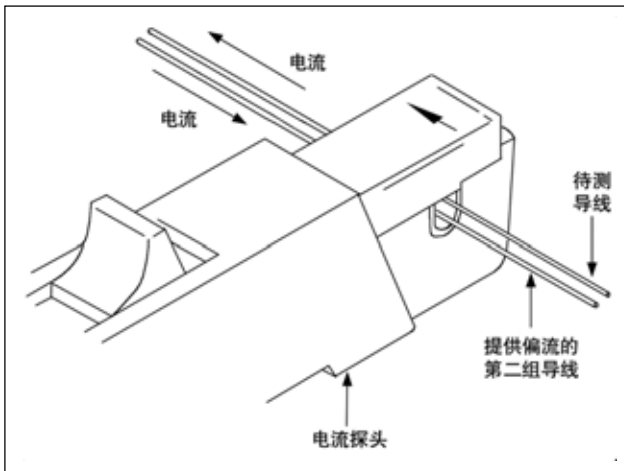
## 第二章：电力电子测试技术与应用技巧

### 如何测量大的直流电流

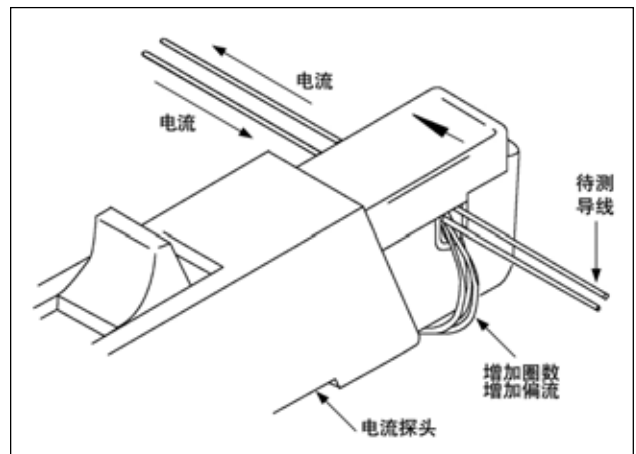
如果您需要测量叠加在大的直流信号上的交流成分,或者您希望扩展您的探头的直流测量量程,您可以使用第二条导线增加偏流来实现。

通过增加偏置电流,您测量的直流电流就是二组导线电流之间的差值。您现在将测得的数值加上偏置直流电流的数值就可以运算出实际电流的值。

您可以将例外一根只通过直流成分的导线与待测导线一起放在钳口内,需要第二根导线电流的方向与待测信号相反。参见下图:

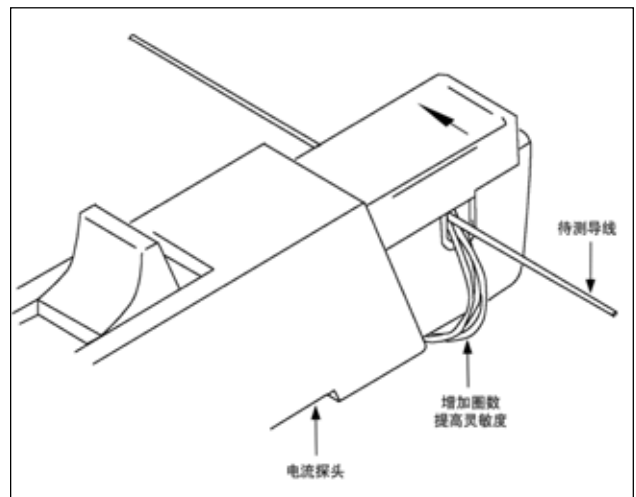


您可以通过在钳口多绕几圈的方法提高直流偏置的数值。现在直流偏置的数值将等于流过导线的直流乘以圈数。例如,如果第二根导线电流为 100mA 直流,绕钳口 5 圈,那么等效的直流偏置电流就是 100mA 乘以 5,为 500mA 直流。



### 如何提高测量小电流的精度

如果测量非常小的电流成分,您可以通过在钳口多绕几圈的方法提高测量灵敏度。这时探头的灵敏度提高绕的圈数相同的倍数。在示波器上观测波形时,您相应地除以这一倍数就得到正确地读数,比如,如果导线环绕钳口 5 圈,示波器读出的电流是 50mA,实际值就应该是 10mA。



# 电源纹波测量技巧

## 应用指南

目前开关电源已取代传统电源供应器,成为大多数电子产品的电源组件,广泛地使用于桌上型计算机、显示器、笔记本电脑、传真机、复印机等设备上。最主要的原因是开关电源具有体积小,重量轻及效率高等多项优点,缺点则是输出噪声较大,本文的目的就是来探讨直流开关电源供应器的输出噪声。

### 电源纹波噪声的定义

输出噪声定义:此噪声是附着于直流成分上的交流成份,此交流成份包含周期性与随机性信号,英文称为 PARD (Periodic And Random Deviation),其波形如下图:

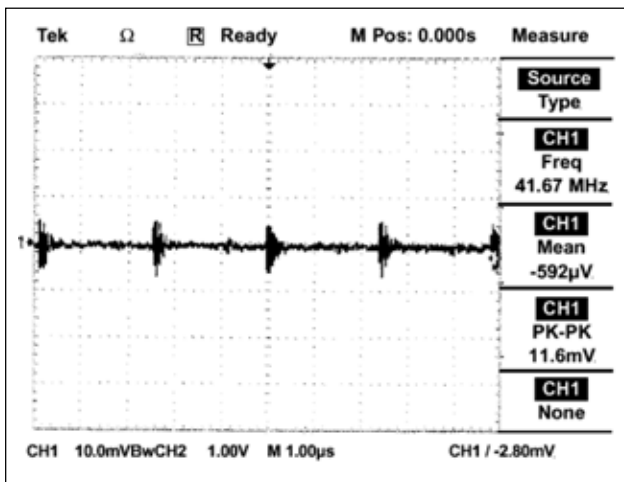


图 1. 开关电源的输出噪声波形

由于开关电源采用高频切换 (20 KHz 以上) 技术,配合脉冲宽度调制 (PWM) 及输出滤波电路,可以将市电转换成 IC 电路所需的直流电压,例如 +5V、+12V、-5V、-12V、+3.3V 等电压,但经此种转换的副作用是在直流成份中含有少许的交流成份,若此交流成份 (以下称为噪声) 过大则会使应用电路产生误动作。以 5V 为例,若直流中心电压为 5.00V,噪声若为 1.0 V<sub>p-p</sub>,则任何瞬时值的电压可能已经超过 4.75V - 5.25V 的容许范围,(此为一般逻辑 IC 正常之工作电压范围),因而可能误动作或当机出现,因此输出噪声影响不可谓不大。一般而言,开关电源的输出噪声规格为其输出直流电压的1% 以下,例如以 +5V、+12V 为例,其输出噪声规格分别为 50m V<sub>p-p</sub>与 120m V<sub>p-p</sub>。

### 输出噪声的控制

通常开关电源供应器在设计时,便需将输出噪声控制在这一规格内,才算完成,而产品量产时,可能因为零件(如输出变压器、快速二极管体、滤波电容器等)材质规格不同,或误装、漏装,等因素造成出杂讯(纹波)超过规格,为避免这些情况,在检测时将开关电源每个输出的噪声列为检测项目是必须的。

### 输出纹波的检测

示波器是最普遍，常用的检测设备，测试时应注意下述规范，否则其检测结果差异甚大。

### 避免地回路影响

应尽量使用差分输入或浮地示波器。因为一般示波器的输入 BNC 的负端是与示波器机壳相连通的，而示波器机壳又与输入电源的接地端连接，若直接用探头测量输出端，可能造成地回路电流，因而影响测量结果，因此应该避免。采用差分输入的示波器是正确的检测接法，如图二为 INTEL 建议的检测连接图。

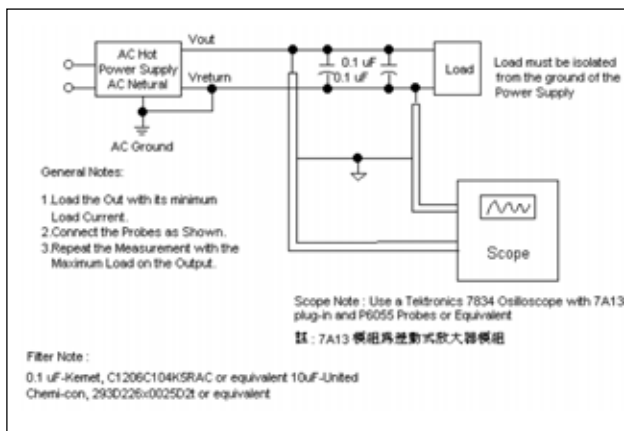


图 2. INTEL 建议的 PARD 差分检测连接图

### 测试条件

在测试规范中应明确说明是否在被测端加入旁路电容器及其材质、容量、数量等，如图二中 INTEL 即加入 10uF 及 0.1uF 电容器以便仿真主机板上的系统电容。这部份并没有通则要求，视需求条件而定，在测试时应说明是否有旁路电容器，否则测试值会有不小差异。

### 带宽

示波器的频宽会影响检测结果，一般规格为 20MHZ，或 30MHZ (INTEL 要求规格)，数字式示波器之取样速率必须高 PARD 频率 2 倍以上。

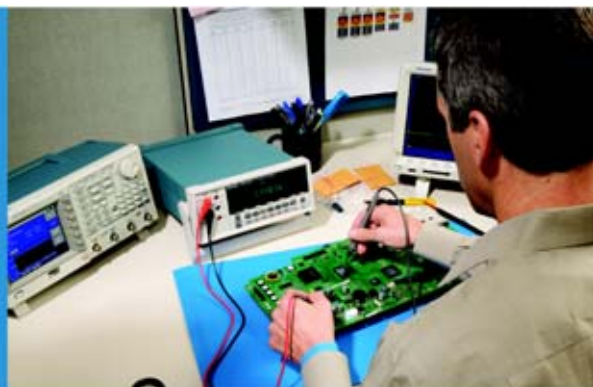
### 衰减选择

由于纹波噪声一般较小，使用较大衰减的探头会造成信号过小，测量结果不准确。建议选择 1:1 探头，交流耦合方式。

### 输入阻抗

低输入阻抗 (如 50Ω) 可以比高输入阻抗 (如 1MΩ) 防止其它讯号的干扰。此部份并无通则要求，但测试时应说明其输入阻抗，否则数值会有不小之差异。





# 待机和泄露电流测试

## 应用指南

在当前电子器件中,测量待机功率或电流泄漏是设计验证和调试过程中的一项常见任务。由于消费者需要电池工作时间更长、能耗效率更高的产品,设计工程师必须认真管理电流泄漏中丢失的能量,这要求准确地进行测量。

器件中通常会设计有待机电流泄漏,这是提供“即时开机”功能的产品、带有一直启动的时钟显示器的消费电子、以及充电器等功率转换设备的副作用。由于能量是功率乘时间,即使待机功率电平低,其在长时间周期内也可能会消耗大量的能量,耗用AC电源电量,耗干电池。

准确测量纳安级的低电平泄漏电流,是大多数数字万用表面临的一个挑战。泰克DMM4020万用表提供了一块专用电路,可以以1 nA的分辨率测量泄漏电流,解决了这一挑战。

### 测量待机电流泄漏

测量待机电流看上去象是一份容易的任务。它只需把优质万用表(DMM)的引线连接到相应端子上,直接测量电流安培数就可以了。但事实上,这一任务并不是这样简单,因为电流泄漏一般很低,只有几纳安,使用传统DMM进行测量可能会不准确。

DMM测量电流的方式通常是以与被测电路串联的分流电阻形式应用已知电阻,允许电流流过电路。在电流流动时,DMM会测量经过分流电阻器的电压下跌量,使用欧姆定律计算电流。这种分流电阻器方法在分流装置中引入了下跌电压,称为负担电压,如图1所示。负担电压成为误差来源,因为根据基尔霍夫电压定律(KVL),要从电路中提供的电压中减去这个负担电压,可能会出现50%以上的误差。

通过使用较低的分流电阻,可以减少错误数量,高端DMM则提供了可变分流值,允许选择电流量程。但是,使用低分流电阻值会提高测得的电压灵敏度,使测量变得不准确、不稳定。

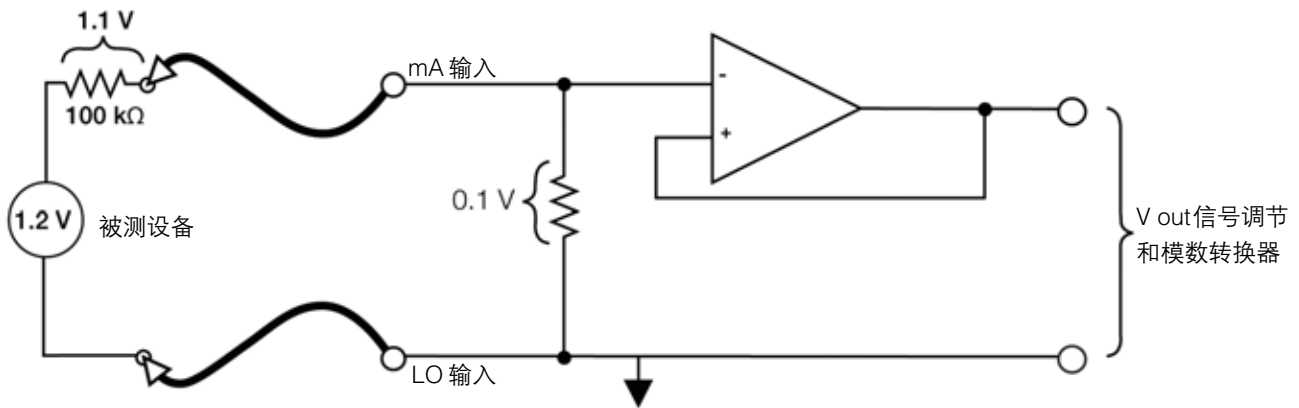


图 1. 分流万用表电路作为安培表使用。

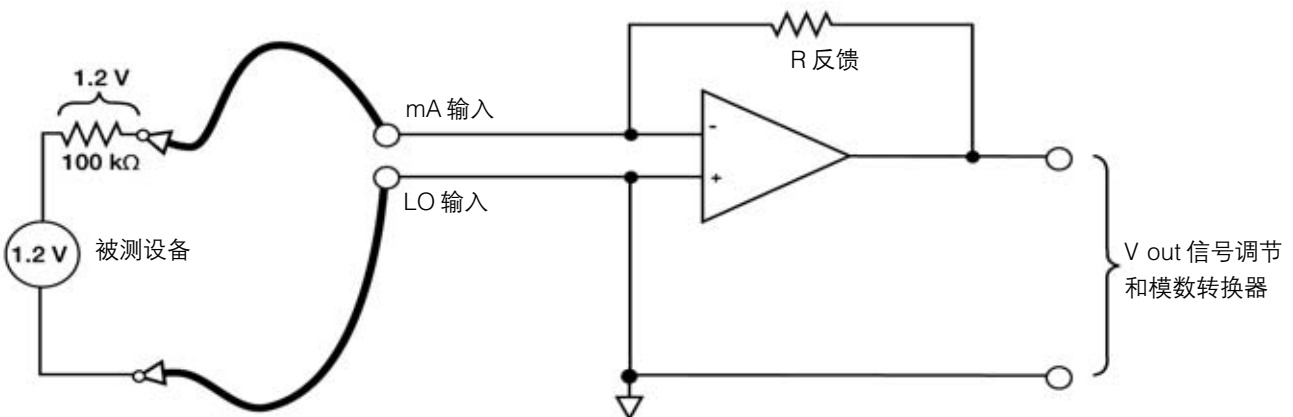


图 2. 反馈 DMM 中的电路作为低电流安培表使用。泰克 DMM4020 万用表就是这样一种工具。

通过使用与电路串联的电流到电压放大器(运算放大器)转换技术,在低电流应用中作为安培表使用 DMM,可以大大改善准确度,如图 2 所示。例如,1.2 V dc 电源的电路及 100 k $\Omega$  测试负荷的设备,计算得到的电流为 12  $\mu$ A。但是,由于增加了串联仪表分流电阻(10 k $\Omega$ ),测得的经过被测器件的电流将下跌到 10.909  $\mu$ A。为改善低电流测量的灵敏度,安培表设计工程师将提高分流电阻;随着分流电阻提高,误差也会提高。

泰克 DMM4020 数字万用表在两个低直流量程中采用电流到电压运算放大器:2000  $\mu$ A 和 200  $\mu$ A。在这些量程中,运算放大器在电路中引入低阻抗,把未知输入电流转换成电压,而不需要低电阻分流装置,从而消除了负担电压。结果,对指明量程的低电流测量,仪器提供了高达 1 nA 的分辨率及 0.03% 的准确度,对测量负荷影响达到最小。现在,通过使用泰克 DMM4020 台式万用表,可以准确地测量待机电流。

### 注意误差来源

在进行低电流测量时,要了解可能的测量误差来源及怎样防止这些误差来源影响测量。常见误差点包括:

- 外来的泄漏电流,如尘土、油脂、助焊剂等污染物导致的泄漏电流。不管是被测器件、测试仪器本身、还是测试电缆或连接器,污染物都可能会为电流提供其它的流动路径,从而在测量中引入误差。在进行低电流测试时,应使用酒精清洁所有有可能被污染的表面。
- 任何类型的噪声都可能会在低电流读数中引入误差:
  - AC 电源噪声可能会压倒灵敏的放大器,导致读数不准确。滤波有一定帮助,使用同轴电缆或屏蔽双绞线测试电缆可以减少错误的读数。
  - 任何类型的声音噪声都可能会给测量过程引入振动。而振动则会导致导体相对于绝缘体运动,在电路中产生噪声,进而引起误差。
  - 在分流装置或被测器件的热能刺激电路中的电子随机运动和碰撞时,会产生热噪声。得到的电压和电流与电路中的电阻的平方成比例(来自被测器件和测量电路)。使用电阻较低的分流装置有一定帮助。

# **第三章**

## **行业培训讲义**

## 开关电源的测量与验证

泰克科技(中国)有限公司



**Tektronix**

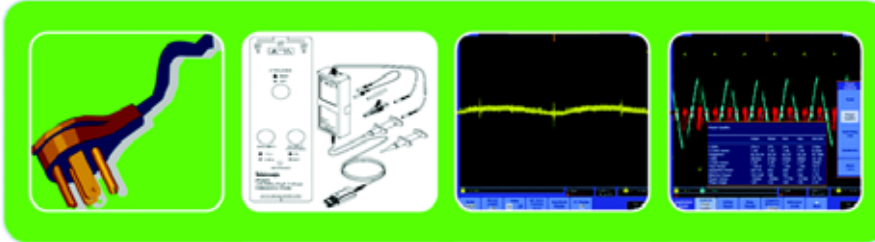
### 开关电源测试仪器

- 数字万用表: 电压, 电流, 频率
- 可编程电源: AC, DC, 任意波
- 函数发生器
- 电子负载: CC恒流, CV恒压, CR恒阻, CP恒功率
- LCR 表: 电阻, 电容, 电感
- 阻抗分析仪: 电阻, 电容和电感阻抗
- 频谱分析仪: 频域测试
- 功率计: 功率分析, 电压, 电流, 频率
- 示波器: 时域, 频域分析

2

**Tektronix**

## 示波器应用于电源电路测量的四大考虑

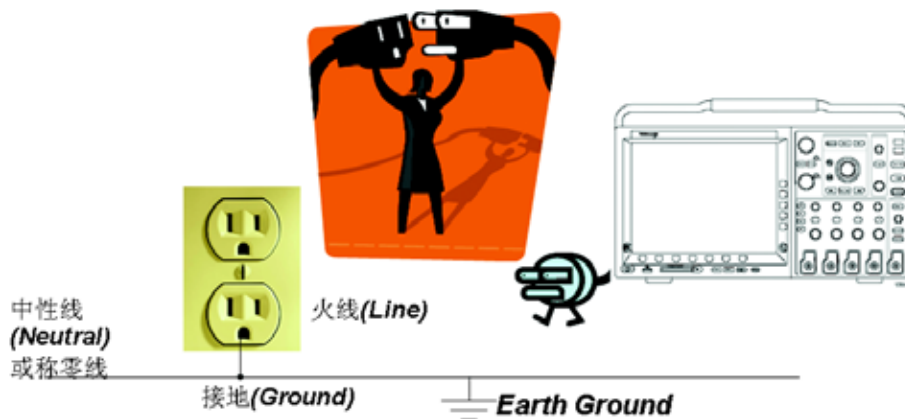


安全	探头	采集	分析
<ul style="list-style-type: none"><li>• 如何安全地使用示波器</li><li>• 浮动电压测量技术</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 了解探头的负载效应</li><li>• 了解高压差分探头的规格及使用技巧</li><li>• 了解电流探头的规格及使用技巧</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 示波器的准确度</li><li>• 采集模式的应用</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 快速傅立叶变换的使用</li><li>• 高级数学运算的使用</li><li>• 电源分析软件的应用</li></ul>

3

Tektronix

## 安全测量：示波器的电源必须正确的接地



4

Tektronix

### 安全测量：千万不要浮接您的示波器！

- 不可剪断或损坏示波器电源线的接地！
  - 这是非常危险的操作
  - 会导致得到不正确的测量值
  - 可能导致示波器的损坏
  - 可能导致待测电路的损坏
  - 有许多其他安全的测量方法！

示波器机壳金属与BNC接头的电压= $V_1$

Tektronix

### 在电力电子领域单端测量并不可行 如何安全地执行测量工作？

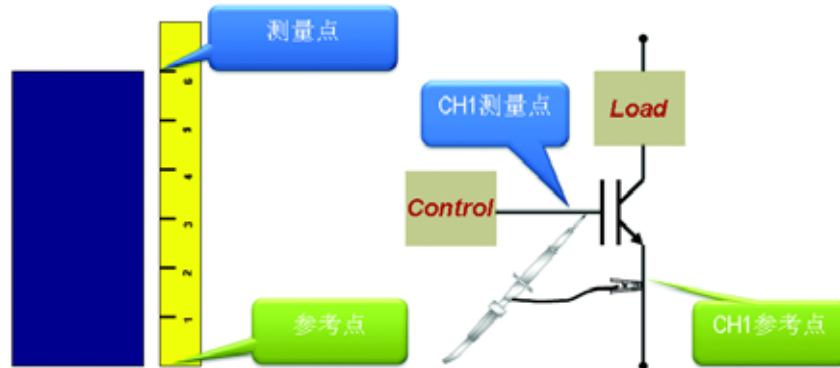
- 马达控制器(Motor controllers)
- 开关电源(Switching power supplies)
- 换流器/逆变器(Inverters)
- 三相电源(3-phase power sources)
- 不断电系统(UPS)
- 过程控制装置(Process control equipment)

如何测量“A”与“B”点间的电压？

Tektronix

## 差分测量概念

- 所有高度和电压的测量都是差分的
  - 因为所有的测量都必须有一个参考点

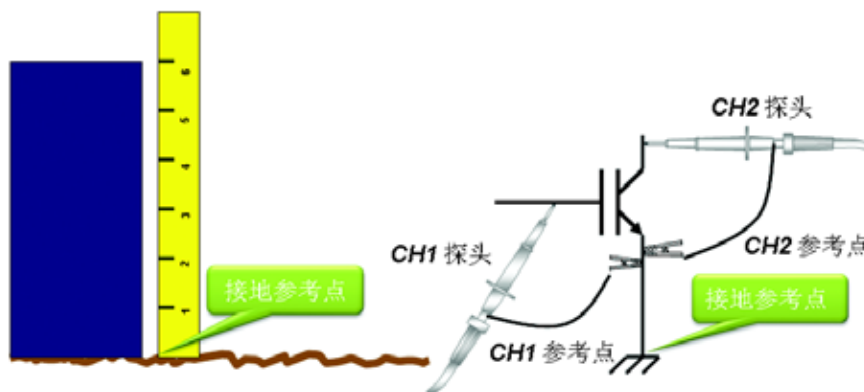


7

Tektronix

## 接地参考点测量

- 接地是一般常见的参考点
  - 一般示波器都是使用“接地”来当作参考点

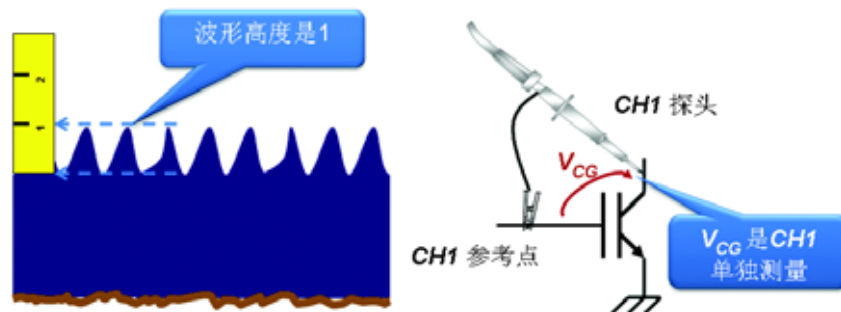


8

Tektronix

## 浮地测量(非接地参考点测量)

- 浮地测量亦是差分测量，但是由于参考点并不是“接地”，而是参考点与地之间已有一高度或电压存在
  - 危险!!不要拿一般示波器和无源探头来测试!



9

Tektronix

## 浮地测量的方法

- 浮起(*Floating*)示波器
- “A 减 B”测量技术(又称为*Pseudo-Differential*)
- 差分探头(*Differential Probe*)测量技术
- 隔离通道(*Isolated-input*)示波器与浮地测量

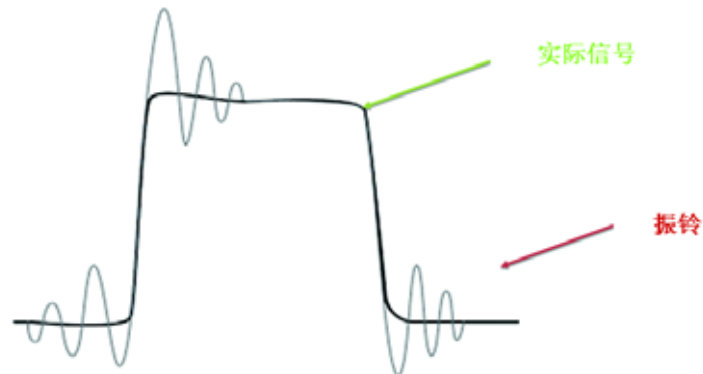
10

Tektronix



## 浮起(Floating)示波器

- 这是一种**不安全、不准确**的测量方法
  - 由于浮起仪器电源与地的寄生电感与电容造成信号的振铃与失真

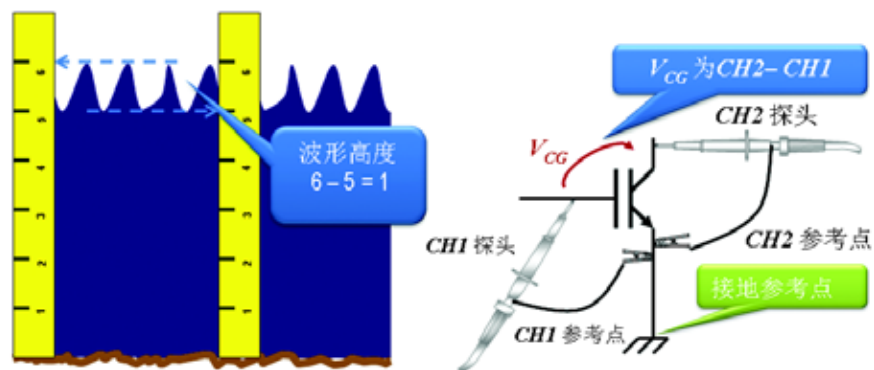


11

Tektronix

## “A 减B” 测量法(又称为伪差分)

- 非接地的两点测试,可藉由两点对地的信号相减而得到这两点的信号差
- 这是一种安全但不准确的替代测量方法

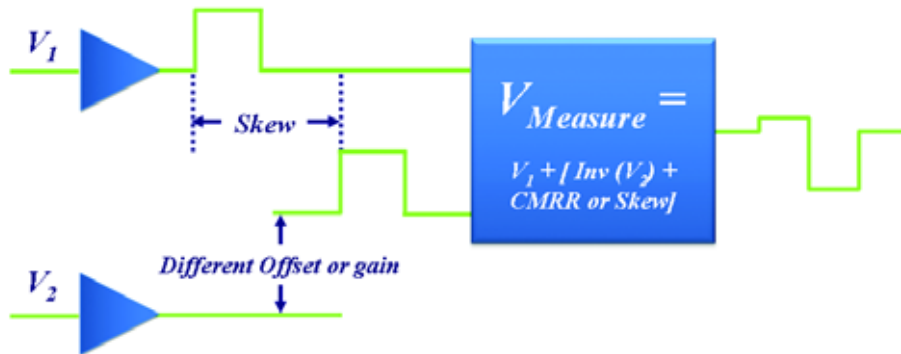


12

Tektronix

## “A 减 B”测量法的问题

- **CMRR 很差**
  - 典型的 **CMRR 100:1 @ DC / 20:1 @ 1MHz**
  - 相较于差分探头典型的 **CMRR 10,000:1 @ DC / 2000:1 @ 20MHz**
- 通道间的传导延迟时差 (**Skew**) 及不同的偏移或增益
  - 导致振幅及时序误差
- 必须使用两个通道才能测量一组差分信号

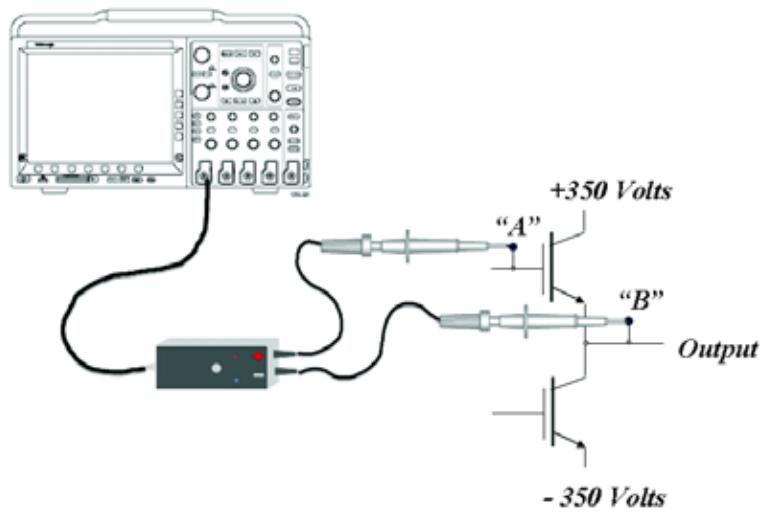


13

Tektronix

## 差分探头(Differential Probe)测量技术

- 这是一种安全、准确的测量方法

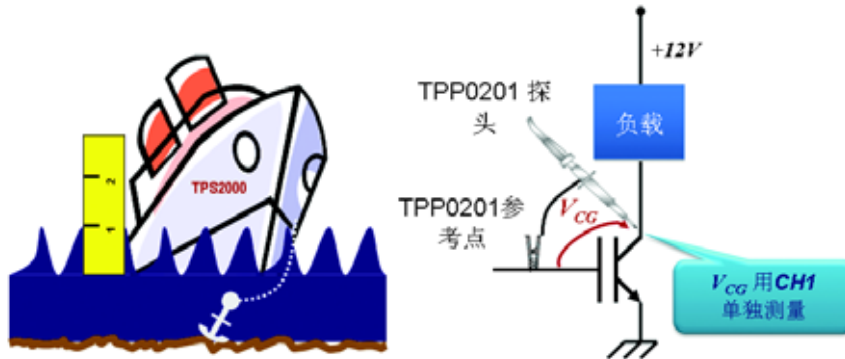


14

Tektronix

## 隔离通道(Isolated-input)示波器与浮地测量

- 隔离通道是将大地隔离,所以有了隔离通道就可以作安全的浮接测量.
  - **TPS2000** /B系列是唯一可用来做浮地测量的示波器
  - **TPS2000B** 系列所搭配的标准探头TPP0201可承受浮接测试电压高达 $30V_{RMS}$

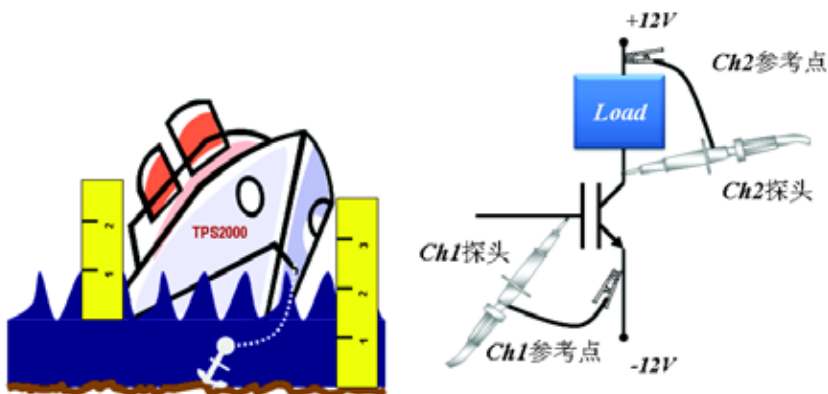


15

Tektronix

## 隔离通道(Isolated-input)示波器与浮地测量

- 因为是隔离通道,所以每个通道都能够单独测量不同的参考点.
  - 提示:测量电路中的差分电压应尽量低一些
  - 附注:浮动距离不可超过锚的深度



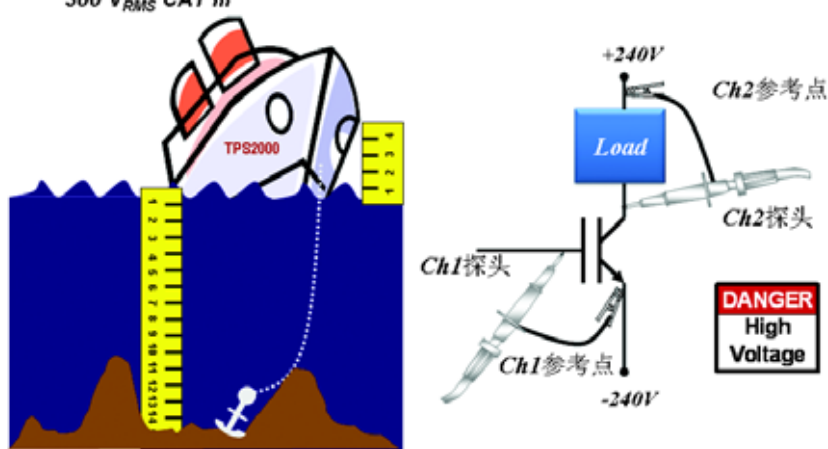
16

Tektronix

## 隔离通道的安全

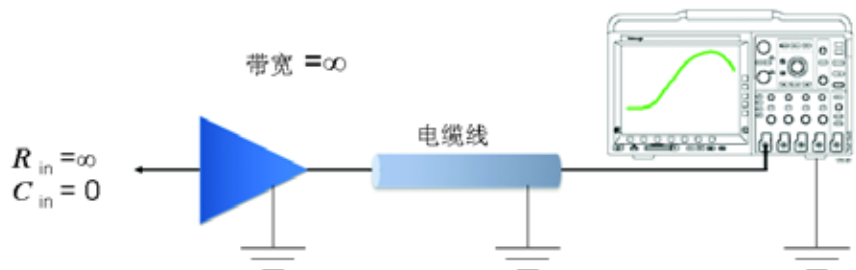
■ 不可超过仪器或探头所规定的电压范围!

- **TPS2000B** 系列所搭配的标准探头TPP0201可承受浮测试电压高达 $30V_{RMS}$
- **TPS2000B** 系列所搭配的探头P5122可承受浮接测试电压高达 $600 V_{RMS}$  CAT II或 $300 V_{RMS}$  CAT III



17

## 四大考虑之探头：理想的电压探头

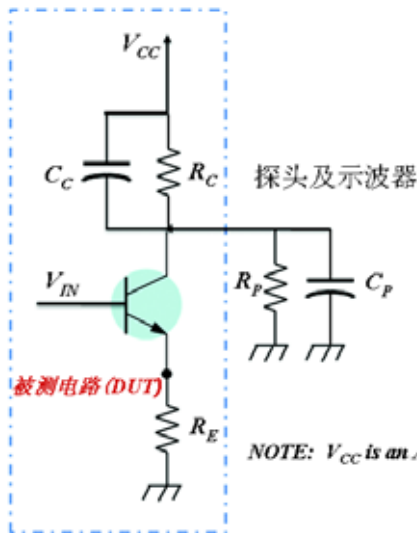


■ 理想的电压探头模型—理想的探头是没有负载效应，也就是不会对测量造成任何影响

- 带宽无限大
- 输入电容为 0，输入电阻无限大
- 动态范围无限大(Dynamic Range)
- 1:1无衰减
- 无延迟、无相位偏移(Phase Shift)
- 机械结构适合测量应用

18

### 探头不仅影响测量系统也影响被测电路



■ 未接探头与示波器时

$$Gain = \frac{-R_C}{R_E}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R_C C_C}$$

■ 接上探头与示波器后

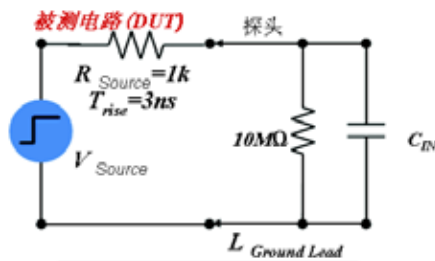
$$Gain = \frac{-(R_C // R_P)}{R_E}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot (R_C // R_P)(C_C + C_P)}$$

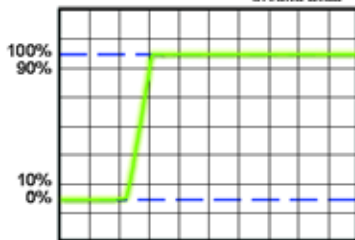
19

Tektronix

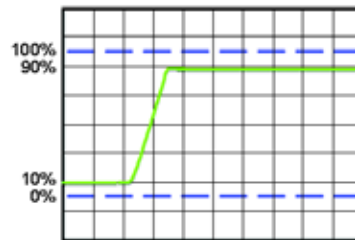
### 电阻负载效应会导致振幅降低



输入电阻与待测电路会形成一个分压电路，进而导致上升时间变慢及振幅降低



Source Signal

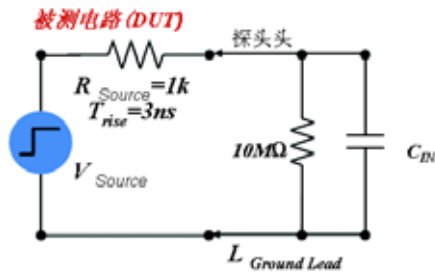


Effects of Input Resistance

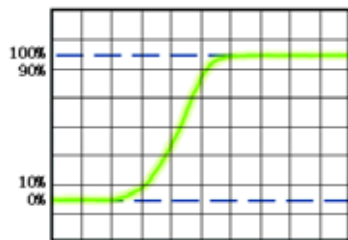
20

Tektronix

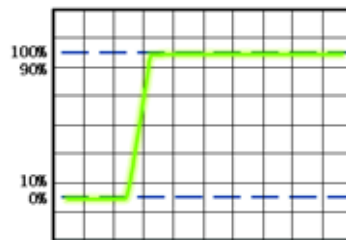
## 探头的电容负载效应导致上升时间增加



$t_r \approx 2.2 (R_{source} \times C_{in})$   
 1X 无源探头  
 $C_{in} = 100pF \approx 220ns$   
 10X 无源探头  
 $C_{in} = 10pF \approx 22ns$



■ 1X无源探头的上升时间波形



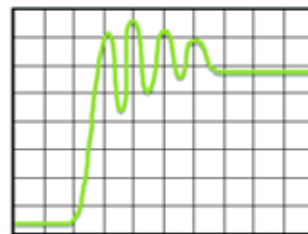
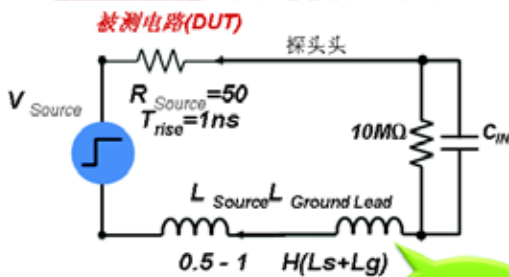
■ 10X无源探头的上升时间波形

21

Tektronix

## 探头接地线的电感负载效应

- 电感性造成阻抗不匹配，带宽越宽影响越大
- 接地线的长短会影响电感效应的大小，结果会产生脉冲信号的振铃(Ringing)



一个10X无源探头  $C_{in} = 10 pF$  及  
6" 接地线的等效线路

接地线  
等效电感

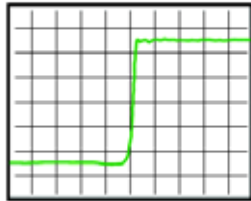
左侧等效线路的探头所造成的振铃

典型6"接地线探头所造成的的振铃频率  $= \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} = 70MHz \rightarrow t_r = 5ns$

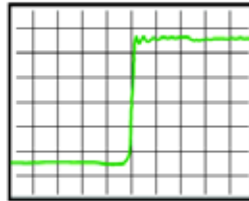
22

Tektronix

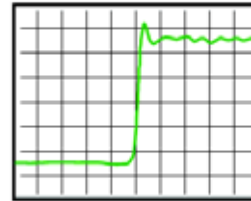
## 接地线的电感效应(导致振铃)



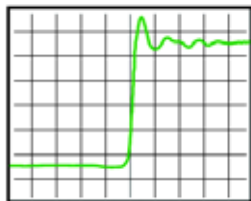
电缆线直接连接



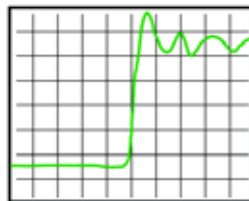
BNC 探头头连接



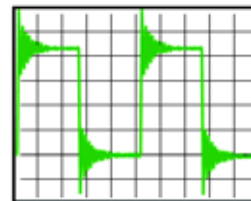
1" 接地线



3" 低阻抗接地线



6" 接地线

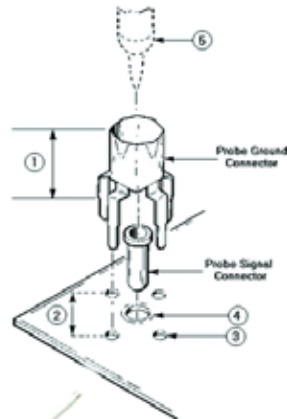


未接接地线

23

Tektronix

## 尽可能缩短接地线长度



- 使用弹簧状的短接地套件
- 使用电路板测试点转接器
  - Tektronix 2.5mm 超小型探头
  - P/N 131-2766-03 (package of 2)
  - 尺寸:
    1. 安装高度0.280吋(最大)
    2. 孔距 0.195吋(最小)至0.205吋(最大)
    3. 直径0.034吋(最小)至0.041吋(最大)
    4. 直径0.053吋(最小)到0.063吋(最大)
    5. 探头直径 0.094吋



24

Tektronix

### 低频补偿效应（影响振幅测量）

正确补偿

1 ms/div

1 μs/div

过补偿

1 ms/div

1 μs/div

欠补偿

1 ms/div

1 μs/div

■ 使用无源探头时须确认探头的低频补偿是否正确  
 ■ TDS1000/2000B/TPS2000 可使用探头检查功能确认

25

### CAT 等级

- **CAT 等级**,根据 **IEC 61010**的定义,描述仪器设备在设计时在电气环境中可承受的瞬间电压范围.
- 根据你所在配电系统的位置,可预估瞬间电压的大小.
  - **CAT IV**:户外,三相电压进入建筑物之前(瞬间到**6 kV<sub>pk</sub>**)
  - **CAT III**:电力配线,固定安装(瞬间到**4 kV<sub>pk</sub>**)
  - **CAT II**:屋内插座,电源设备,手提式设备(瞬间到**2.5 kV<sub>pk</sub>**)
  - **CAT I**:特定电子装置,通讯,电子设备的信号位准(瞬间到**500 V<sub>pk</sub>**)

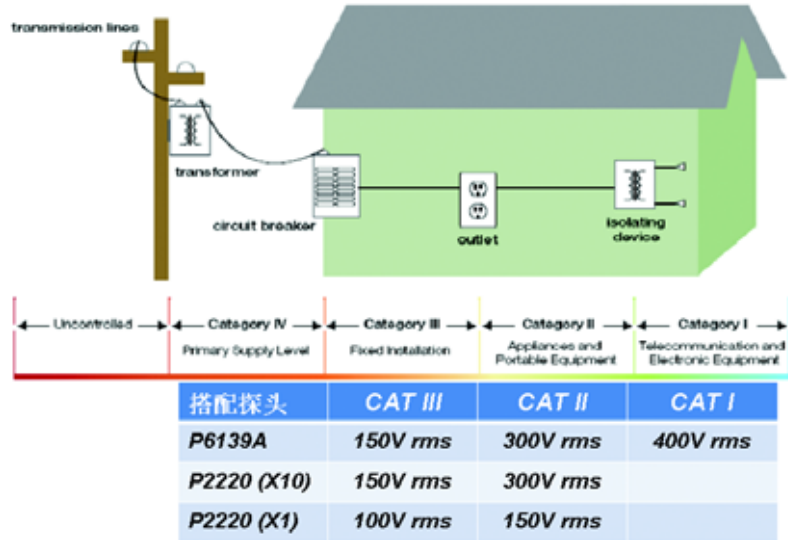
Transmission Lines → transformer → circuit breaker → outlet → isolating device

← Uncontrolled → Category IV Primary Supply Level → Category III Fixed Installation → Category II Appliances and Portable Equipment → Category I Telecommunication and Electronic Equipment →

25



## 最大测量电压的范例

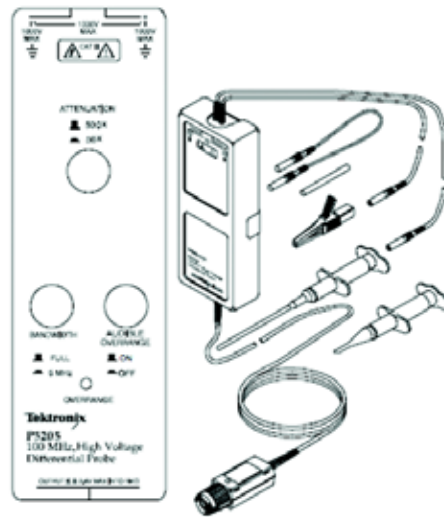


27

Tektronix

## 高压差分探头的应用须知(以P5205为例)

- 安全限制(voltage between either input and earth ground)
  - 单端1000V (Max)
  - 50X差分130V (DC+ Peak AC)
  - 500X差分1300V (DC+ Peak AC)
- 超量程侦测
  - 需注意仅侦测差分电压是否过范围
  - 无法侦测单端是否过范围



28

Tektronix

### 差分探头

- 不绞合探测电缆
- 绞合探测电缆
- 加CM扼流环

No Stranded Wire:  
 $V_{DS-peak} = 436V$

Stranded Wire:  
 $V_{DS-peak} = 435V$

CM Filter:  
 $V_{DS-peak} = 394V$

Tektronix

### 高压差分探头的应用须知(以P5205为例)

- 导线必须双绞以降低电感负载效应
- 注意延伸导线对高频的影响
  - 测量频率超过10MHz时不建议使用延伸线
  - 带宽选择为5MHz时使用延伸线不会影响性能
  - 不可仅接一根延伸线

With extension leads

Without extension leads

Tektronix

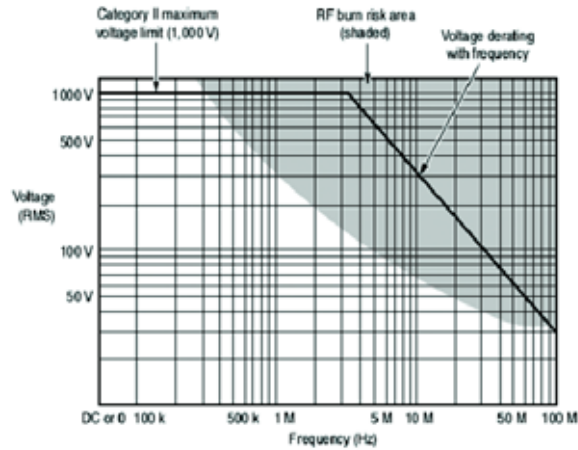
## 高压差分探头的应用须知(以P5205为例)

### ■ 额定测量能力下降曲线

- 随测量频率变高而导致的电压测量能力下降

### ■ 注意阴影区域(RF Burn)的测量步骤

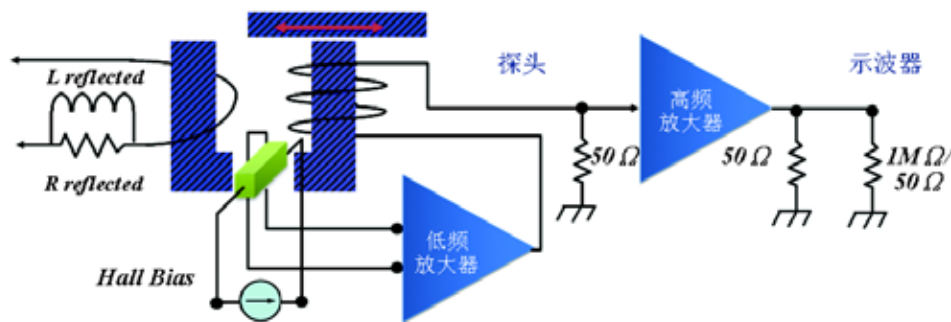
- 连接或移除探头时须先将待测电路电源关闭以确保安全



31

Tektronix

## 电流探头的应用须知：有源电流探头模型



32

Tektronix

## TCP0030/TCP0150 -交流/直流电流探头

**■ TCP0030**

- 直接连接 TekVPI 示波器
  - DPO2000/DPO3000
  - DPO4000B/DPO5000/DPO7000
- 测量范围：1mA 到30A(动态范围宽广)
- 带宽：直流至 120 MHz
- 50A 峰值脉冲功能

**■ TCP0150**

- 直接连接 TekVPI 示波器
  - DPO2000/DPO3000
  - DPO4000B/DPO5000/DPO7000
- 测量范围：150A (RMS)
- 带宽：直流至 20 MHz
- 500A 峰值脉冲功能





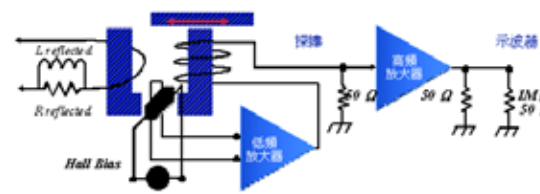
## 电流探头的最大测量电流

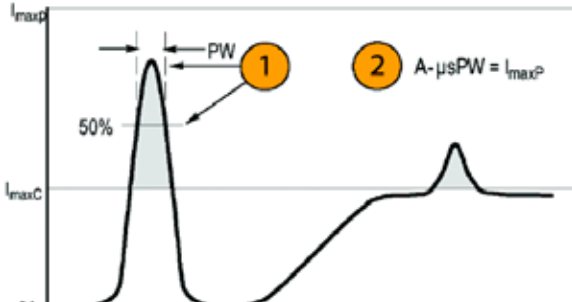
**■ 最大脉波电流**


- 需注意随频率及温度变化的额定测量能力下降曲线

**■ 最大连续电流**

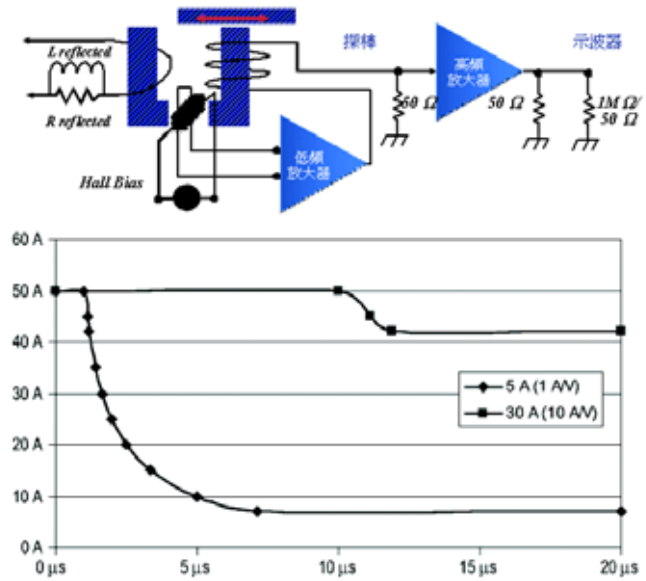
**■ 安培-秒 乘积**







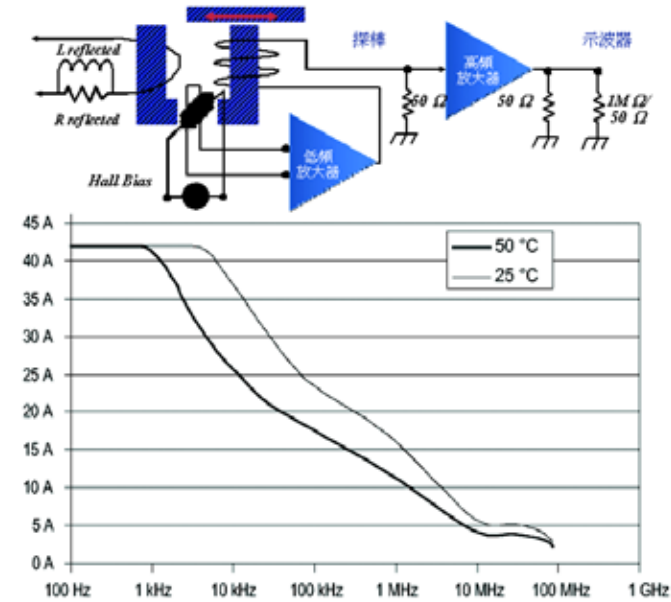
### 峰值电流与脉波宽度之关系图



35

Tektronix

### 峰值电流与频率间的额定测量能力下降曲线



36

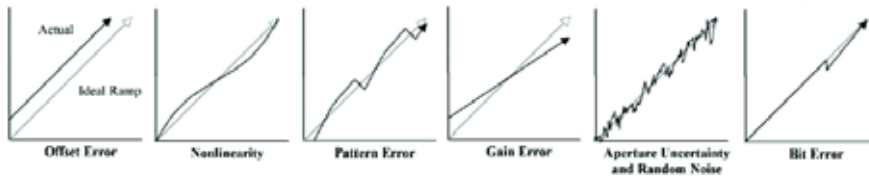
Tektronix

## 四大测量考虑之采集：示波器的准确度

A/D 垂直位数	最小解析位阶	满刻度准确度%
6 bits	1/64	1.56%
8 bits	1/256	0.39%
10 bits	1/1024	0.097%
12 bits	1/4096	0.024%

大多数示波器为八位  
水平准确度

但为何最佳的示波器垂直准确度仅为1-1.5%  
内部频率及取样率决定水平准确度

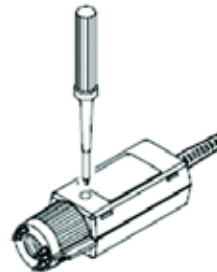


37

Tektronix

## 未执行系统校正对测量的影响

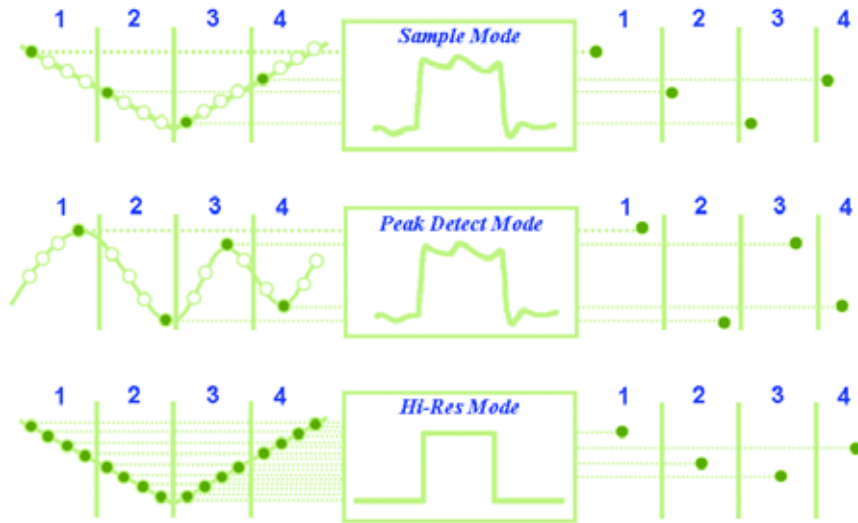
- 示波器及探头的offset归零校正
  - 影响Conduction loss的准确度
- 探头延迟时差校正
  - 影响Switching loss的准确度



38

Tektronix

## 采集模式的种类



39

Tektronix

## 采集模式的应用

- 取样模式(**Sample mode**) –示波器一般的操作模式
  - 适用于大多数的情形
- 平均模式(**Average mode**) –将多次采集的波形平均
  - 降低随机噪声,稳定测量值
  - 但是信号必须是重复的、稳定的、持续存在的
- 高分辨率模式(**Hi Res mode**) –平均取样区间中的取样点
  - 必须有额外的取样率才能工作,仅适用于中、低速时基档位(取样率小于 **100MS/s**)
  - 于采集的波形上以额外的取样率来平均波形,所以适用于单击或非重复性讯号的随机噪声平均
  - 藉由平均可增加测量分辨率
- 峰值检测模式(**Peak Detect mode**) –于取样区间采集最大值/最小值
  - 可在低速的时间档位(**time/div**)发现突刺(**Glitch**)信号
- 包络模式(**Envelope mode**) –堆栈取样区间采集之最大值/最小值
  - 长时间观察信号的变化

40

Tektronix

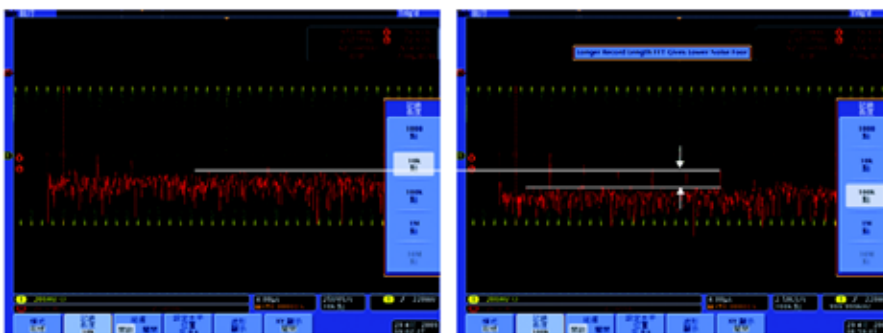
## 快速傅立叶变换的应用

- **FFT**的应用
  - 信号的失真与谐波
  - 找出系统噪声来源
  - 电源的谐波分析
- 记录长度对快速傅立叶变换的重要性(需注意示波器记录长度于FFT时的设定范围)
  - 较长的记录长度可降低噪声水平(*Noise Floor*)
  - 记录长度可维持取样率使频率分辨率提升
- 窗口的应用
  - *Rectangular*
  - *Hamming*
  - *Hanning*
  - *Blackman/Harris*
- 其他注意事项

41

Tektronix

## 较长的记录长度可降低噪声水平(*Noise Floor*)



内存: **10k**  
时基: **4us/div**  
取样率: **250MS/s**

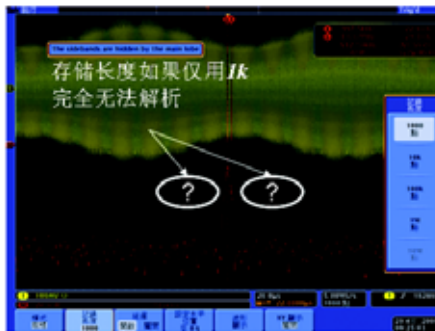
内存: **100k**  
时基: **4us/div**  
取样率: **2.5GS/s**

42

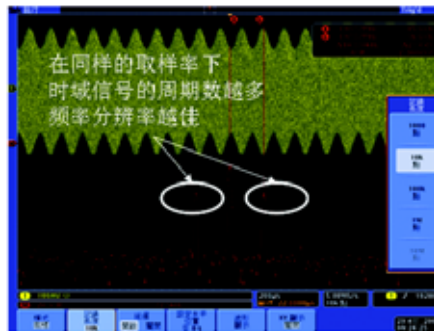
Tektronix



### 存储长度可维持取样率使频率分辨率提升(范例1)



内存: 1k  
 时基: 20us/div  
 取样率: 5MS/s



内存: 10k  
 时基: 200us/div  
 取样率: 5MS/s

43



### 不同窗口的应用选择

窗口种类	频率分辨率	振幅分辨率	应用
RECTANGULAR	最佳(1) 几乎等于无窗口	最差(4)	事件前后讯号位准几乎不变的瞬时或丛集(Burst) 振幅相等、频率接近的正弦波 频谱变化缓慢的宽带随机噪声
HAMMING	次佳(2)	次差(3)	正弦、周期性及窄频随机噪声
HANNING	次差(3)	次佳(2)	事件前后讯号位准不同的瞬时或丛集(Burst)
BLACKMAN/HARRIS	最差(4)	最佳(1)	检查单频信号的高次谐波

44



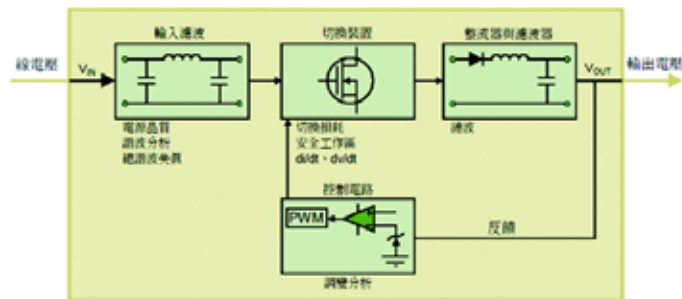
## 四大测量考虑之四：分析



Tektronix

## 四大测量考虑之分析：示波器的测试项目

- 输入端：电源质量(Power Quality)，谐波(Harmonics)
  - 示波器？功率分析仪？
- 开关器件：开关损耗(Switching Loss)，安全工作区(SOA)，爬升率(Slew Rate)
- 输出端：纹波(Ripple)及噪声
- 反馈电路：调制(Modulation)
- 磁性组件Magnetic components (core loss and BH curves)
  - Spectral Analysis and Hi-Power Finder
- 各类瞬时时序：Setup Time and Hold Time.



45

Tektronix

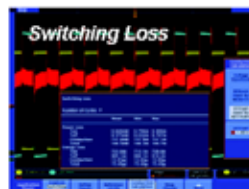
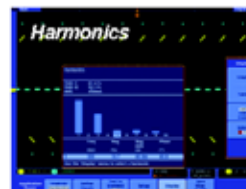
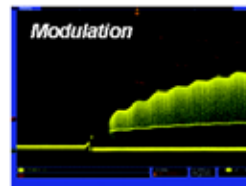
		TPS2000B 系列	TDS3000C 系列	DPO/MSO3000 系列	DPO/MSO4000 B 系列	DPO/MSO6000 系列
规格	带宽	100M-200MHz	100-500MHz	100-500MHz	350M-1GHz	350M-2GHz
	内存深度	2.5k	10k	5M	20M	12.5M/最高250M
	最高取样率	1G/2GS/s	1.25G-5GS/s	2.5GS/s	2.5G/5GS/s	最高10GS/s
电能质量测量	V rms	■	■	■	■	■
	I rms	■	■	■	■	■
	有功功率(True Power)	■	■	■	■	■
	视在功率(Reactive Power)	■	■	■	■	■
	无功功率	■	■	■	■	■
	功率因素	■	■	■	■	■
	波形因素	■	■	■	■	■
	相位角	■	■	■	■	■
	谐波分析	■	■	■	■	■
	总谐波失真	■	■	■	■	■
认证测试	EN61000-3-2预认证测试	■		■	■	■
	符合MIL-STD-1399标准环境测试	■		■	■	■
有源器件测量	开关损耗测量	■	■	■	■	■
	安全工作区	■	■	■	■	■
	动态电阻(dv/dt, di/dt)	■	■	■	■	■
	调变分析			■	■	■
无源器件测量	电感		■	■	■	■
	磁滞					■
	磁通密度					■
	B-H磁滞曲线					■

47

Tektronix

## DPO/MSO4000B及3000系列电源分析方案

- 自动测量电源相关分析如下
  - 电源质量(Power Quality)
  - 谐波(Harmonics)
  - 开关损耗(Switching Loss)
  - 安全工作区(SOA)
  - 爬升率(Slew Rate)
  - 纹波(Ripple)
  - 调制(Modulation)
- 快速执行探头延迟时差校正

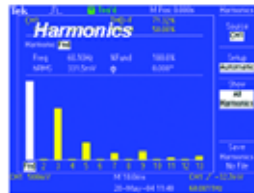


48

Tektronix

## TPS2000B系列便携式电源调试方案

- 隔离通道，可用一般无源式探头安全地测量浮动电压
- 轻巧的设计，两颗电池的总操作时间可达八小时
- 电源测量功能包含
  - 显示W、VA、VAR
  - 谐波分析(Harmonics)
  - 开关损耗分析(Switching Loss)

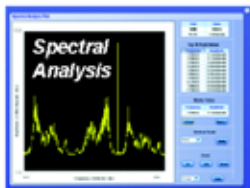


49

Tektronix

## DPO5000及DPO7000系列电源分析方案

- 自动测量电源相关分析如下
  - 电源质量(Power Quality), 谐波(Harmonics)
  - 切换损失(Switching Loss), 安全工作区(SOA)
  - 爬升率(Slew Rate)
  - 纹波(Ripple)
  - 调制(Modulation)
  - 磁性组件Magnetic components (core loss and BH curves)
  - Spectral Analysis and HI-Power Finder
- 快速执行探头延迟时差校正
- 客户定制化报告



50

Tektronix

## 开关电源供应器设计验证及相关电性测量应用

- 输入参数
  - 谐波分析、浪涌电流、骤升骤降、电能质量、功率效率
- 功率测量
  - 开关损耗、磁损耗
- 可靠性
- 保护

51

Tektronix

## IEC61000-3-2 设备分类

设备输入电流  $\leq 16\text{ A}$  每相

**Class A:**  
电机驱动设备，三相平衡  
负载设备

**Class C:**  
照明设备，包括调光  
设备

**Class B:**  
便携工具，电弧焊接设  
备

**Class D:** ( $P \leq 600\text{W}$ )  
个人电脑，电视接收机

52

Tektronix

### 第三章：行业培训讲义

谐波标准: IEC61000-3-2

谐波次数 (n)	Class-A	Class-D	
	最大允许谐波电流Maximum permissible Harmonic Current (A)	每瓦允许的最大谐波电流Maximum permissible Harmonic Current Per watt (mA / W)	最大允许谐波电流Maximum permissible Harmonic Current (A)
奇次谐波Odd Harmonics			
3	2.30	3.4	2.30
5	1.14	1.9	1.14
7	0.77	1.0	0.77
9	0.40	0.5	0.40
11	0.33	0.35	0.33
13	0.21	Use following equations	
15 ≤ n ≤ 39	0.15 X 15/n		
13 ≤ n ≤ 39 (Class D)		3.85/n	2.25/n
偶次谐波Even harmonics			
2	1.08	Not Applicable	
4	0.43		
6	0.30		
8 ≤ n ≤ 40	0.23 X 8/n		

53 Tektronix

### 测量输入电流谐波

Power Source L' N' → Switching Power Supply → Load V<sub>o</sub>

Field	Value
Class	Class D
V-THD	873.85m%
I-THD	153.61%
Line Frequency	59.92Hz
Vrms	109.27V
Irms	2.6246A
True Power	155.00W
Apparent Power	286.8VA
V Crest Factor	1.411
I Crest Factor	3.642
Power Factor	540.5m

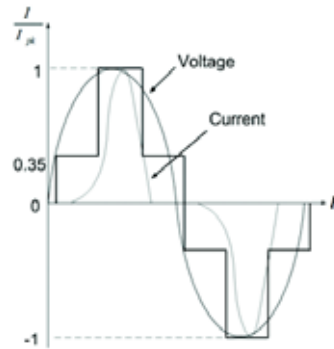
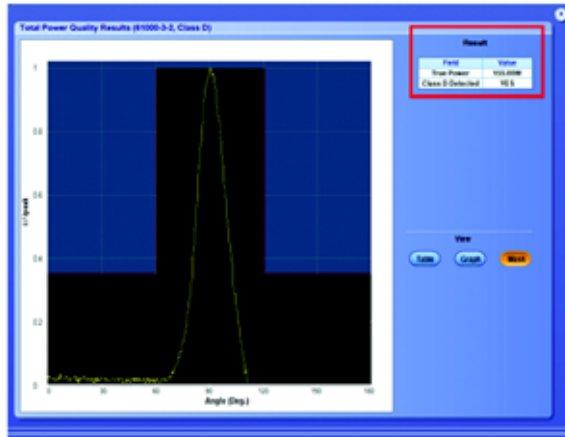
谐波表

谐波棒图

54 Tektronix

### 测量Class-D标准要求

Result	
Field	Value
True Power	155.00W
Class D Detected	YES



- D类标准的要求
1.  $P_{in} < 600W$
  2. 至少 95% 输入电流波形在包络以内

Tektronix

### 示波器和功率计测量谐波结果比较



Tektronix

## 示波器和功率计测量谐波结果比较

	示波器	功率计	误差(%)
$V_{rms}$ (V)	109.26	110V	0.67%
$I_{rms}$ (A)	2.62	2.64A	0.75%
电源频率(Hz)	59.92Hz	60Hz	0.13%
有功功率	154.99	159.3	2.7%
视在功率(VA)	286.78VA	290.7VA	1.34%
功率因数	0.54	0.547	1.28%
V 波峰因数(%)	1.411 %	1.42 %	0.63%
I 波峰因数(%)	3.642 %	3.65 %	0.71%

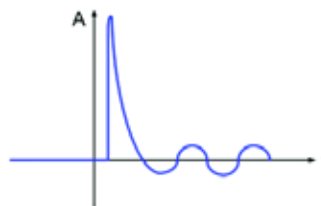
57

Tektronix

## 浪涌电流

### ➤ 什么是浪涌电流？

浪涌电流指电气设备开机时从滤波电容产生的最大瞬态输入电流



### ➤ 浪涌电流影响

- 烧坏保险丝
- **Circuit breaker tripping**
- 电路可能损坏

### ➤ 改进

- 浪涌限制器
- 软启动装置
- 负温度系数热敏电阻

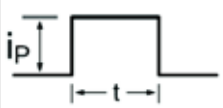





58

Ref: <http://www.ametherm.com/inrush-current/inrush-current-faq.html>

Tektronix



### 保险丝选择

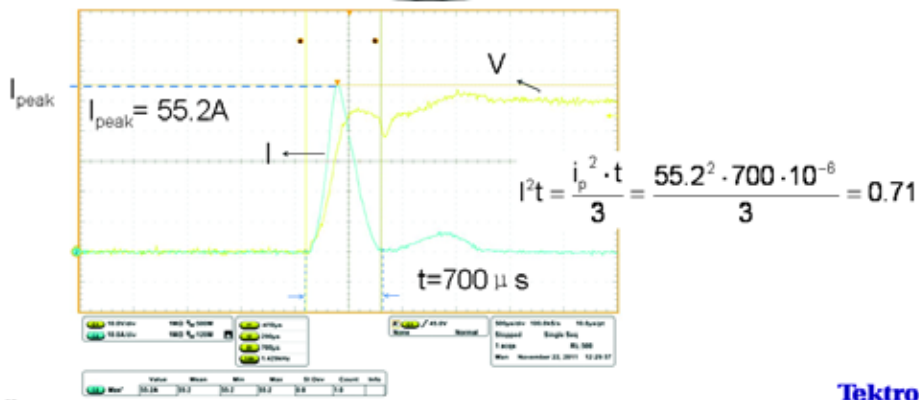
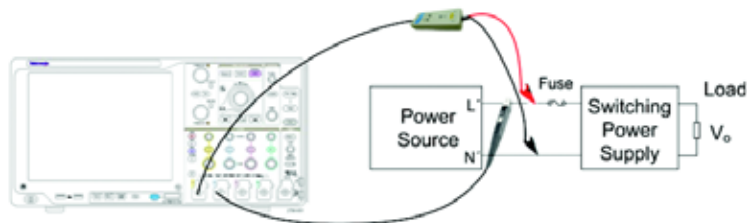
波形	公式	波形	公式
	$I^2 \cdot t = i_p^2 \cdot t$		$I^2 \cdot t = \frac{i_p^2 \cdot t}{3}$
	$I^2 \cdot t = \frac{(i_p^2 + i_p \cdot i_b + i_b^2) \cdot t}{3}$		$I^2 \cdot t = \frac{i_p^2 \cdot t}{5}$
	$I^2 \cdot t = \frac{1}{2} \cdot i_p^2 \cdot t$		$i = i_p \cdot e^{-kt}$ $I^2 \cdot t \cong \frac{i_p^2 t}{2}$

Ref: [http://www.littelfuse.com/data/en/Short\\_Form\\_Product\\_Catalogs/LF\\_elec\\_prod\\_guide.pdf](http://www.littelfuse.com/data/en/Short_Form_Product_Catalogs/LF_elec_prod_guide.pdf)

59



### 浪涌电流: 预触发



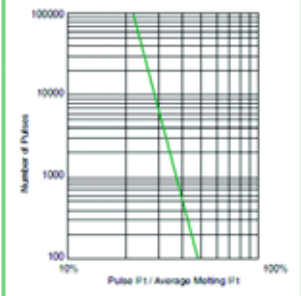
60



### 保险丝选择

Chart 3

100,000 Pulses	Pulse I <sup>2</sup> t = 22% of Nominal Melting I <sup>2</sup> t
10,000 Pulses	Pulse I <sup>2</sup> t = 29% of Nominal Melting I <sup>2</sup> t
1,000 Pulses	Pulse I <sup>2</sup> t = 38% of Nominal Melting I <sup>2</sup> t
100 Pulses	Pulse I <sup>2</sup> t = 48% of Nominal Melting I <sup>2</sup> t



Note: Adequate time (10 seconds) must exist between pulse events to allow heat from the previous event to dissipate.

$$I^2t = \frac{i_p^2 \cdot t}{3} = \frac{55.2^2 \cdot 700 \cdot 10^{-6}}{3} = 0.71$$

$$0.71 \div 22\% = 3.227$$

$$I^2t > 3.227 \text{ A}^2\text{S}$$

ORDERING INFORMATION:

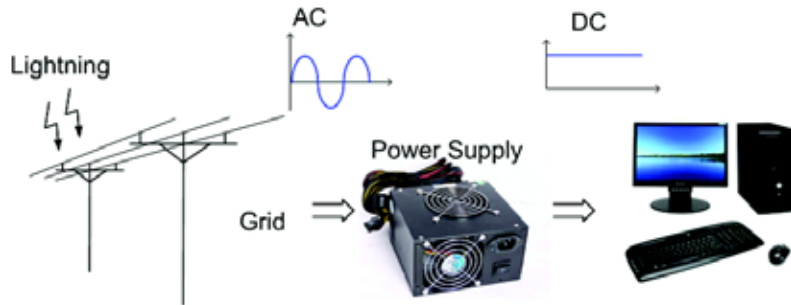
Std. Type Catalog Number	Mil. Type Catalog Number	Ampere Rating	Voltage Rating	Nominal Resistance Cold Ohms	Nominal Melting I <sup>2</sup> t A <sup>2</sup> Sec.
0251 062	0253 062	1/16	125	7.0	0.000113
0251 125	0253 125	1/8	125	1.70	0.00174
0251 250	0253 250	1/4	125	0.665	0.0116
0251 375	0253 375	3/8	125	0.395	0.0296
0251 500	0253 500	1/2	125	0.280	0.0598
0251 750	0253 750	3/4	125	0.175	0.153
0251 001	0253 001	1	125	0.128	0.256
0251 1.25		1 1/4	125	0.100	0.390
0251 01.5	0253 01.5	1 1/2	125	0.0823	0.587
0251 002	0253 002	2	125	0.0473	0.405
0251 02.5		2 1/2	125	0.0360	0.721
0251 003	0253 003	3	125	0.0290	1.19
0251 03.5		3 1/2	125	0.0240	1.58
0251 004	0253 004	4	125	0.0204	2.45
0251 005	0253 005	5	125	0.0155	4.44
0251 007	0253 007	7	125	0.0105	10.4
0251 010	0253 010	10	125	0.00705	25.5
0251 012		12	32	0.0055	45.2
0251 015	0253 015	15	32	0.00416	68.8

Note: Higher Ampere Ratings Available. Contact Technical Assistance for Details.

61 Ref: <http://datasheet.octopart.com/251001-Littelfuse-datasheet-1594.pdf>



### 电能质量



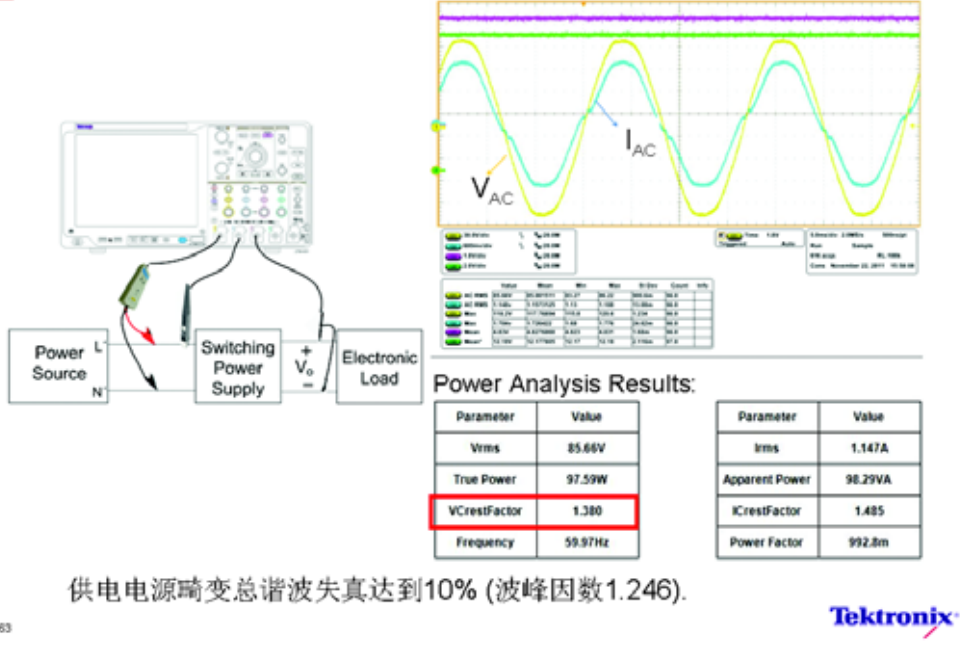
- 电能质量
- 电力扰动Disturbance
- 干扰Perturbation
- 电力系统异常Irregularities
- 骤升与骤降Surges and Sags

- 电压谐波失真Distortion
- 欠电压Brownout
- 故障Fault

62



### 输入电压失真、畸变

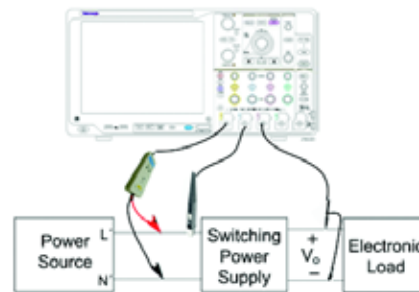


63

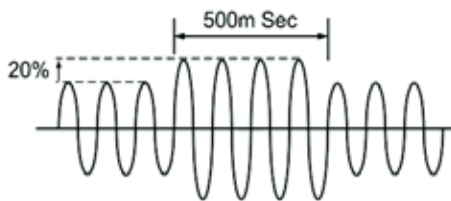
Tektronix

### 输入电压骤升骤降

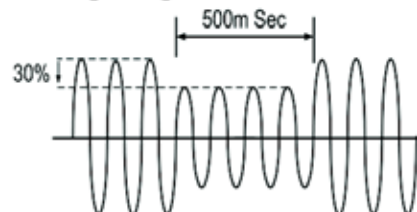
- 骤升: 264 Vac to 293 Vac for 500 msec and back to 264 Vac
- 骤降: 100V<sub>ac</sub> to 70 V<sub>ac</sub> for 500m sec and back to 100V<sub>ac</sub>



Voltage Surges



Voltage Sags

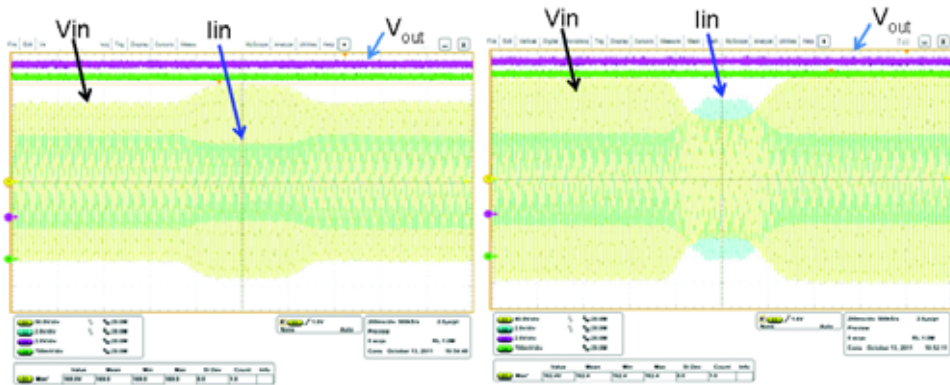


64

Tektronix

### 输入电压骤升骤降

1. Select **Trig**
2. Select **Runt**



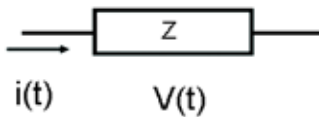
65

### 功耗计算基本原理

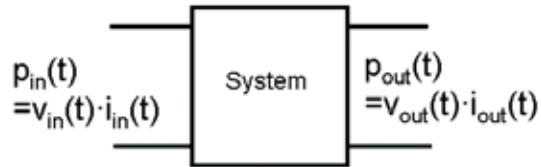
瞬时功率:  $p(t) = v(t) \cdot i(t)$

平均功率:  $P_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt$

One-Port Network



Two-Port Network

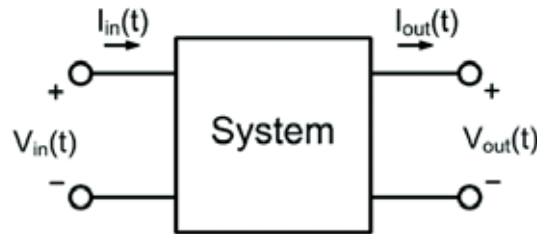


• Everything goes back to the fundamentals!!

66

Tektronix

### 电源系统效率



$$p_{in}(t) = v_{in}(t) \cdot i_{in}(t)$$

$$p_{out}(t) = v_{out}(t) \cdot i_{out}(t)$$

$$P_{in,avg} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_{in}(t) \cdot i_{in}(t) dt$$

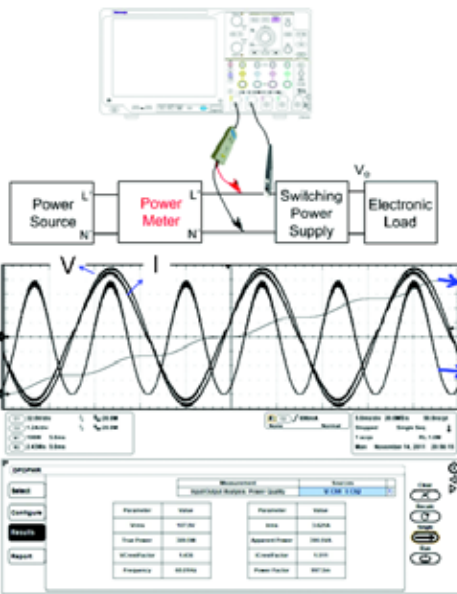
$$P_{out,avg} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_{out}(t) \cdot i_{out}(t) dt$$

$$\text{Efficiency} = \frac{P_{out,avg}}{P_{in,avg}}$$

67



### 功率分析



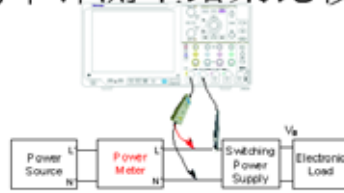
Power Quality (@Load=300W)			
V <sub>rms</sub>	107.9V	I <sub>rms</sub>	3.621A
True Power	389.5W	Apparent Power	390.5VA
V-CF	1.436	I-CF	1.511
f	60.01	PF	0.9975

$$\begin{aligned} \text{Efficiency} &= \frac{P_{out,avg}}{P_{in,avg}} \\ &= \frac{300W}{389.5W} \\ &= 77\% \end{aligned}$$

68



### 示波器和功率计测量结果比较



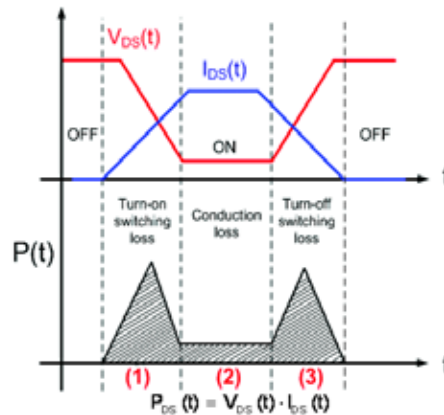
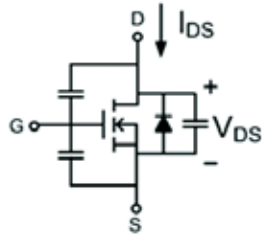
	示波器	功率计	Error(%)
$V_{rms}$ (V)	107.9V	108.27V	0.3%
$I_{rms}$ (A)	3.621A	3.634A	0.35%
Line Frequency (Hz)	60.01Hz	60Hz	0.01%
True Power	389.5W	392.3W	0.71%
Apparent Power (VA)	390.5VA	393.4VA	0.73%
Power Factor	0.9975	0.9974	0.1%
V Crest Factor (%)	1.436	1.417	1.3%
I Crest Factor (%)	1.511	1.483	1.8%



69

### 开关损耗分析

- MOSFET
  - 开启损耗
  - 传到讯号
  - 截止损耗



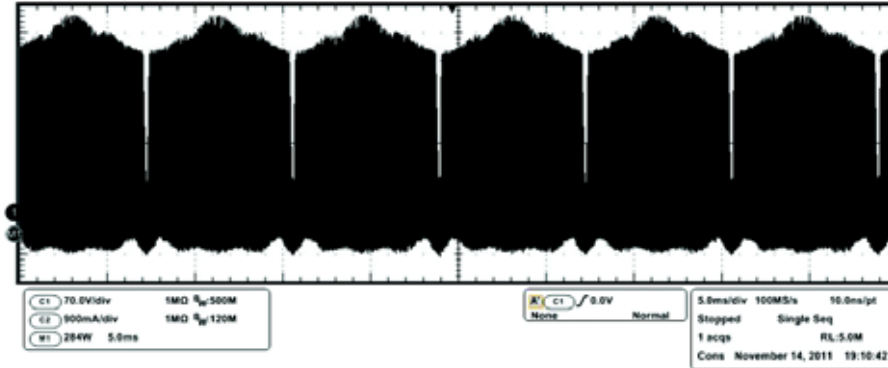
Power Losses of Switch = Turn-on switching loss (1)  
 + Conduction loss (2)  
 + Turn-off switching loss (3)

Switching frequency ↑ ⇒ Turn-on and turn-off switching losses ↑



70

### 开关损耗分析



Type	Power Loss			Energy		
	Min	Max	Average	Min	Max	Average
$t_{on}$	269mW	5.10W	3.38W	4.52uJ	85.6uJ	56.7uJ
$t_{off}$	0.0W	787mW	451mW	0.0J	13.2uJ	7.56uJ
Total Avg	Avg Loss : -11.1W			Avg Energy : -187uJ		

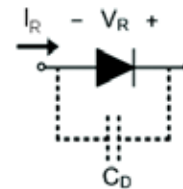
Tektronix

71

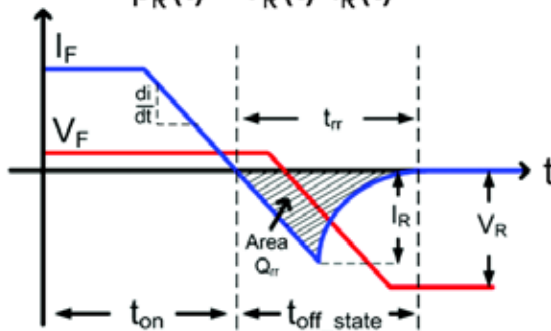
### 二极管的损耗计算

#### ➤ Diode

最大瞬时正向电压:  $V_F$   
 最大瞬时反向电流:  $I_R$   
 最大回复时间:  $t_{rr}$



$$p_R(t) = v_R(t) \cdot i_R(t)$$



$$P_{cond} = \frac{1}{t_{on}} \int V_F(t) \cdot I_F(t) \cdot dt$$

$$P_{off\_state} = \frac{1}{t_{off\_state}} \int V_R(t) \cdot I_R(t) \cdot dt$$

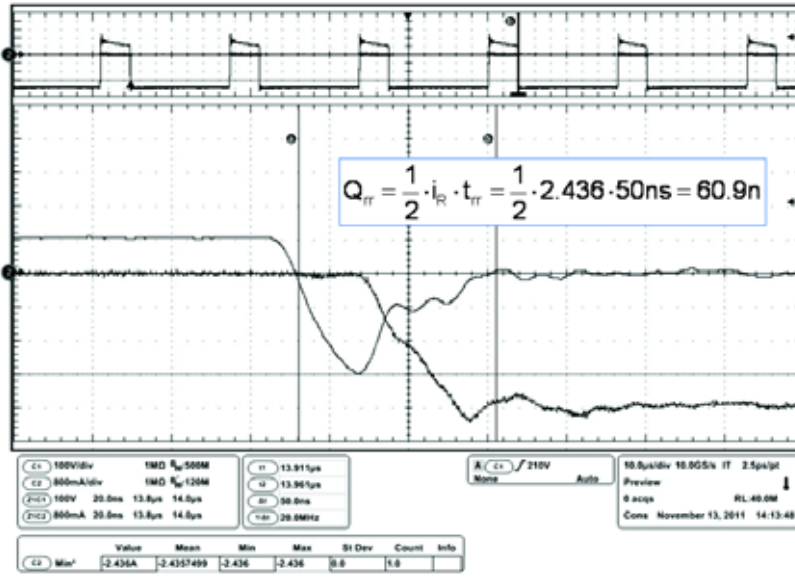
$$Q_{rr} = \frac{1}{2} \cdot I_R \cdot t_{rr}$$

Ref: <http://ecee.colorado.edu/~rwe/papers/APEC00.pdf>

Tektronix

72

## 二极管损耗计算

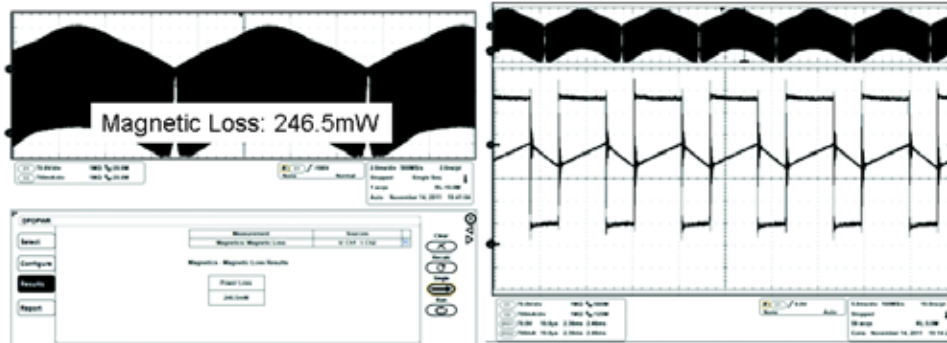
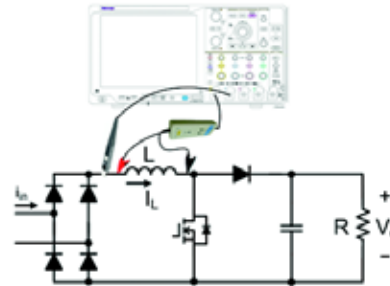


73

Tektronix

## 磁性器件损耗

1. Select **Analyze > Power Analysis.**
2. Select **Select.**
3. Select **Magnetics > Magnetic Loss**



74

Tektronix



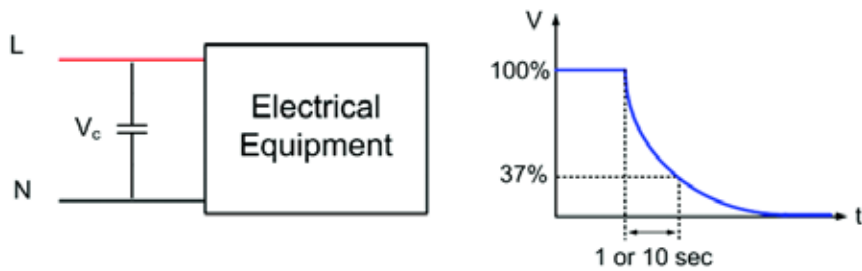
## 6.4. 保护

- 6.4.1. 安全法规Safety Regulatory
- 6.4.2. 电磁兼容Electromagnetic Interference (EMI)
- 6.4.3. 静电保护Electrostatic Discharge (ESD)
- 6.4.4. 短路Short Circuit
- 6.4.5. 过电流Overcurrent
- 6.4.6. 过电压Overvoltage

75

Tektronix

## 电容放电电压



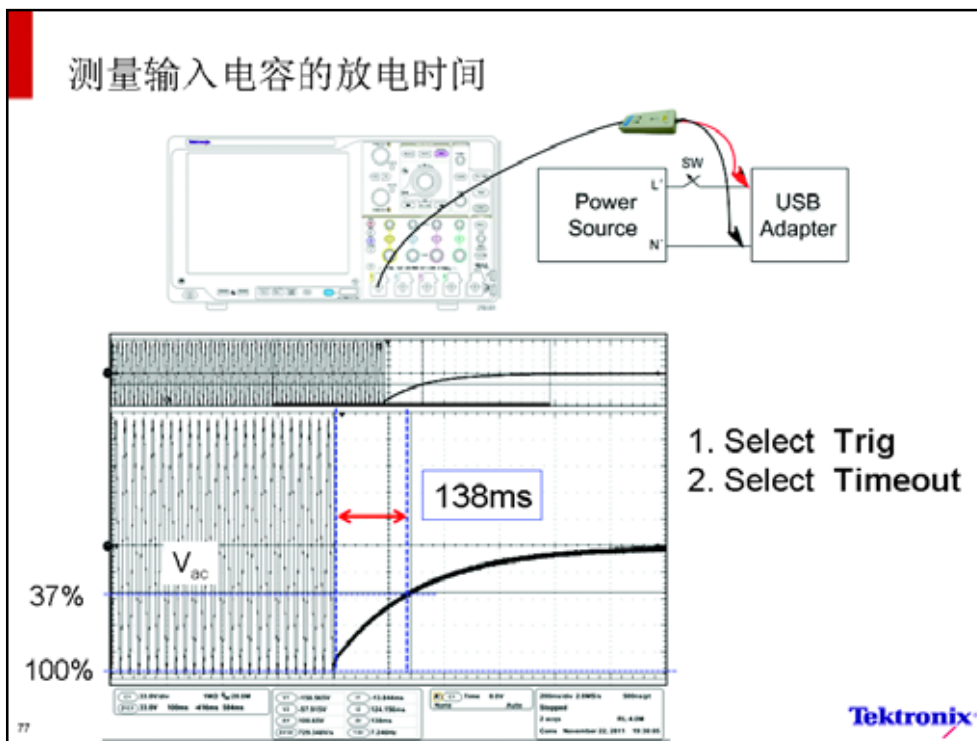
Standard of discharging time (IEC 60950, UL60950)

1 sec	Pluggable Equipment
10 sec	Permanently Connected Equipment

[xx] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60950  
2.1.1.7 Discharge of capacitors in the primary circuit

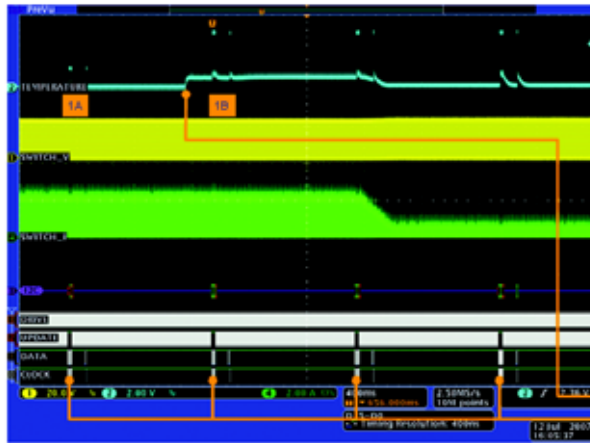
76

Tektronix





## 在温度变化导致的电流变化期间 充电器的运行情况

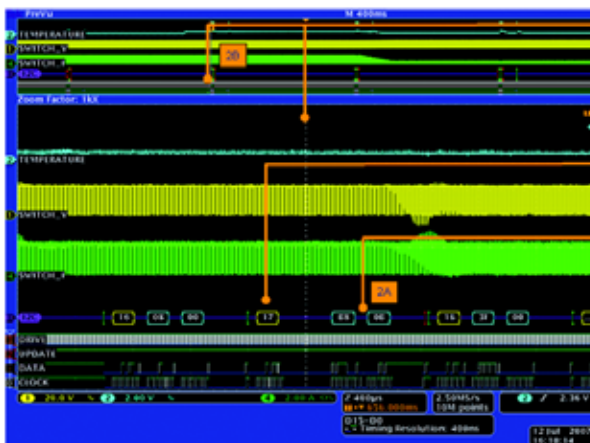


- 周期
  - 屏幕显示充电器4秒中的运行情况，显示对温度变化作出响应
- 完整的视图
  - 激励 (温度)
  - 通信 (I2C)
  - 对充电器开关电源的影响 (电压和电流)
  - 监测控制环路中的线路 (更新)
- 对变化的响应
  - 温度变化
  - 由充电器读取

81

Tektronix

## 从初始读数中解码I<sup>2</sup>C数据

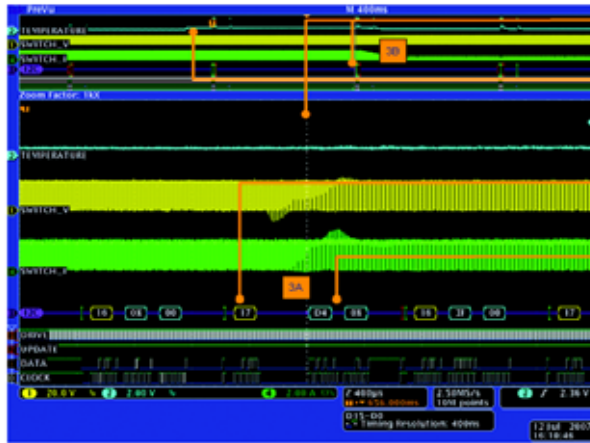


- 放大的总线解码位置
  - 一直保持查看总曲线时间
- 读命令 (0x17)
- 原来的温度值 (0x0BB8)
  - 先从低比特开始
- 还没有变化
  - 这个I2C读数是电池保护电子器件测量新温度之前获得的
  - 因此，数据还没有变化 (0x0BB8)

82

Tektronix

### 在读取温度后解码I<sup>2</sup>C数据

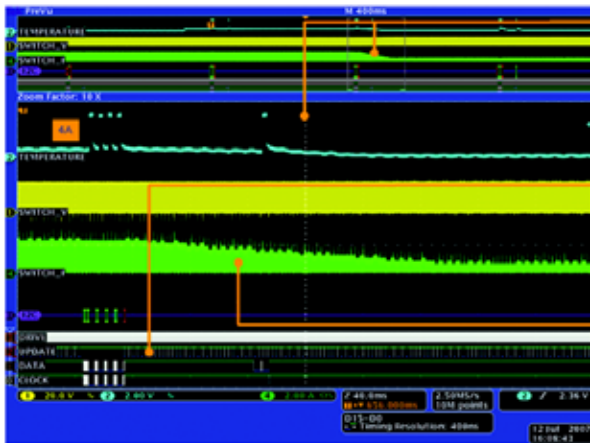


- 下一个样点上放大的位置
  - 发生在电池保护电子器件测量温度变化之后
- 读命令 (0x17)
- 更新的温度值 (0x08D4)

83

Tektronix

### 电流逐渐下降

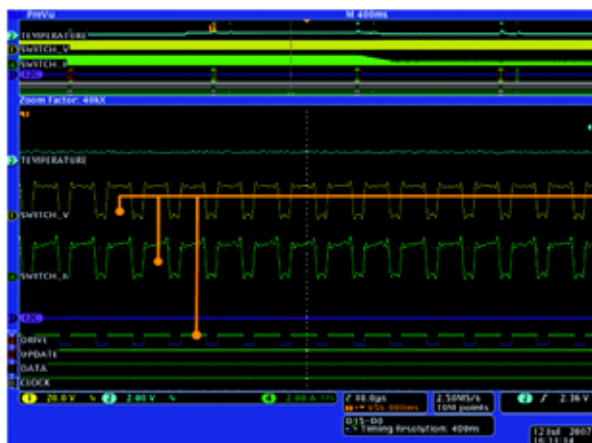


- 放大的视图
  - 获得I2C读数之后的周期中显示了逐渐调节电流
- 电流更新
  - 每个“Update”脉冲会递增校正电流，直到它到达较低温度要求的新的较低值
  - 从高到低平稳调节电流电平
    - ~ 10 ms间隔
    - ~ 200 ms跳变
    - 从~ 2 A变成~ 0.25 A

84

Tektronix

## 开关供电电流和电压波形



- 深存储器的好处
  - 放大同一捕获数据，显示详细的电流波形和电压波形
- 完整的视图
  - 与模拟信号同时显示数字驱动信号，因此可以测量驱动延迟和开关时间
  - 电流波纹测量结果显示，在电流电平从高跳变到低期间可以很好地控制电源电感器波纹

85

Tektronix

## 锂电池充电器应用总结

### ■ 实现的目标

- 测量充电器对温度变化的响应
  - 在温度变化大约200毫秒后电流变化
  - 解码的I<sup>2</sup>C数据正确显示了温度
- 确认电流变化期间的控制稳定性
  - 电流从2A平稳变成0.25 A

### ■ 我们了解了哪些内容

- 示波器的I<sup>2</sup>C解码功能对观察采用该通信系统的系统具有重要意义
- 单一采集显示了整个变化周期，同时也显示了开关电源的详细运行情况

86

Tektronix

## 经销产品简介

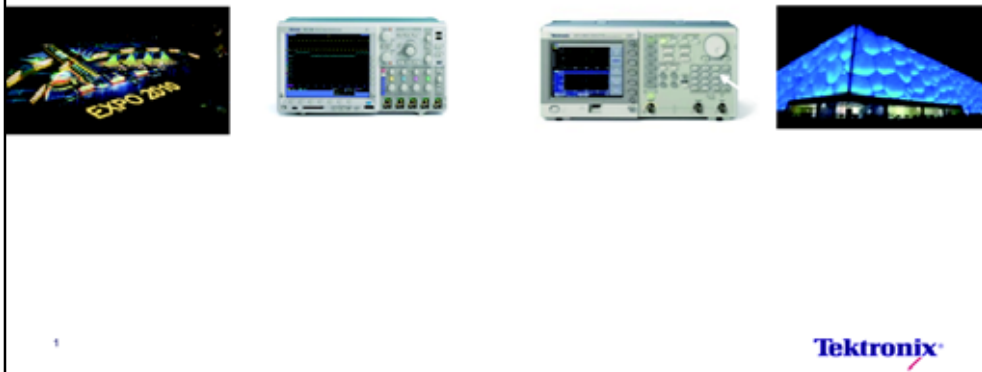
	4000B系列 DPO/MSO	3000系列 DPO/MSO	2000系列 DPO/MSO	TDS3000C系 列	TPS2000B系 列	TDS2000C系 列	TDS1000B系 列
模拟通道	2,4(DPO)	2,4(DPO)	2,4(DPO)	2,4	2,4 isolated	2,4	2
数字通道	16(MSO)	16(MSO)	16(MSO)	-	-	-	-
带宽	350MHz至 1GHz	100MHz至 500MHz	100MHz至 200MHz	100MHz至 500MHz	100MHz至 200MHz	60MHz至 200MHz	40MHz至 100MHz
上升时间	1.0 ns至350 ps	3.5 ns至700 ps	3.5 ns至2.1 ns	3.5 ns至700 ps	3.5 ns至2.1 ns	5.8 ns至2.1 ns	8.4 ns至3.5 ns
垂直准确度	±1.5%	±1.5%	±3%	±2%		±3%	
水平准确度	±5ppm	±10ppm	±25ppm	±20ppm		50ppm	
实时采样率	2.5或5GS/s	2.5GS/s	1GS/s	1.25至5GS/s	1或2GS/s	1或2GS/s	500M或 1GS/s
时序逻辑分析	16.5GS/s MagniVu On	8.25GS/s MagniVu On	1GS/s	N/A	N/A	N/A	N/A
独立内存	20M	5M	1M	10k	2.5k	2.5k	2.5k
波形导航功能		标准配备				N/A	
系列特色	Flexray解码	内置75Ω阻 抗	FilterVu	Wave Alert, 交替触发	智能型自动设定(Smart Autoset), Auto Ranging, 探头检查精英, 终生保固		
标准触发	边缘, 串行逻辑, 脉冲宽度, 滤波, 多通道设定和保 持, 上升/下降时间, 视频, 并行总线(MSO)			边缘, 脉冲, 逻辑, 视频	边缘, 脉冲, 视频		
选购触发解码	I2C, SPI, UART, RS232/422/485, CAN/LIN			N/A	N/A	N/A	N/A
选购触发解码	I2S, 高级视频		N/A	高级视频	N/A	N/A	N/A
功率测量	DPO4PWR	DPO3PWR	N/A	N/A	TPS2PWR	N/A	N/A

87

Tektronix

# LED照明驱动测量技术

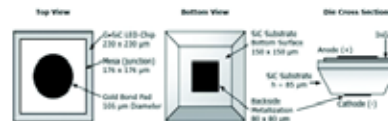
泰克科技（中国）有限公司



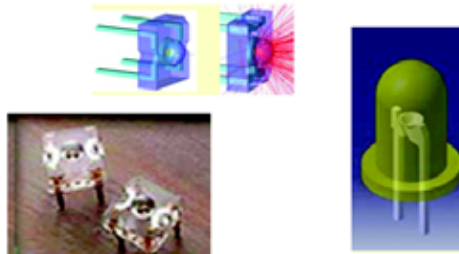
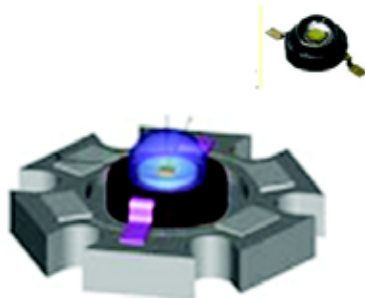
## 发光二极管（LED）

半导体照明（发光二极管，light-emitting diode 英文简称LED）是一种新型的固态光源，已经在特殊照明领域显现出节能效果

UT230 芯片图解



E2 1000 芯片图解



Tektronix



## LED的特性

- 节能
  - “绿色照明”，其发光效率达到40%，
- 光照效率高
  - 光的方向性强，光的利用率高，光学部分做好了，光效可达95%以上；
- 使用寿命长
  - LED的寿命理论上可达10万个小时
- 环保：
  - LED光的方向性强，利用率高，减少了光的漫射，也就减少了光的污染；
  - LED光源为半导体材料，不含任何有害物质
- 色彩丰富
  - LED光源的颜色几乎可以覆盖整个光谱
- 可控性
  - 可以利用控制系统进行各种控制；
- 反应速度快

3

Tektronix

## LED的应用

LED显示屏幕

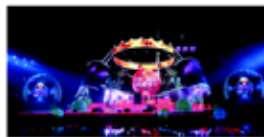


LED汽车  
照明和车灯



LED照明

商业、普通、路灯等



LED指示

仪器、设备、道路交通等



LED背光源



4

Tektronix

## 几种照明方式效能对比

品名	寿命 (H)	光效 (lm/w)	启动特性	频闪	电磁干扰	环保	抗震性	易损性
白炽灯	1000	15	快	严重	无	-	差	玻璃材质易损坏
荧光灯 (TE)	5000	50	慢	重	大	汞污染	差	玻璃材质易损坏
节能灯 (紧凑型)	6000	80	慢	轻	大	汞污染	差	玻璃材质易损坏
LED	10000	150	极快	无	小	绿色	好	全固体不易损坏

LED 照明成本分析

LED	2002	2007	2012	2020	白炽灯	荧光灯
投资成本(\$/Mlm-h)	12	1.25	0.30	0.13	1.25	0.18
运行成本(\$/Mlm-h)	3.50	0.93	0.47	0.35	4.38	0.82
拥有成本(\$/Mlm-h)	15.50	2.18	0.77	0.48	5.63	1.00

5

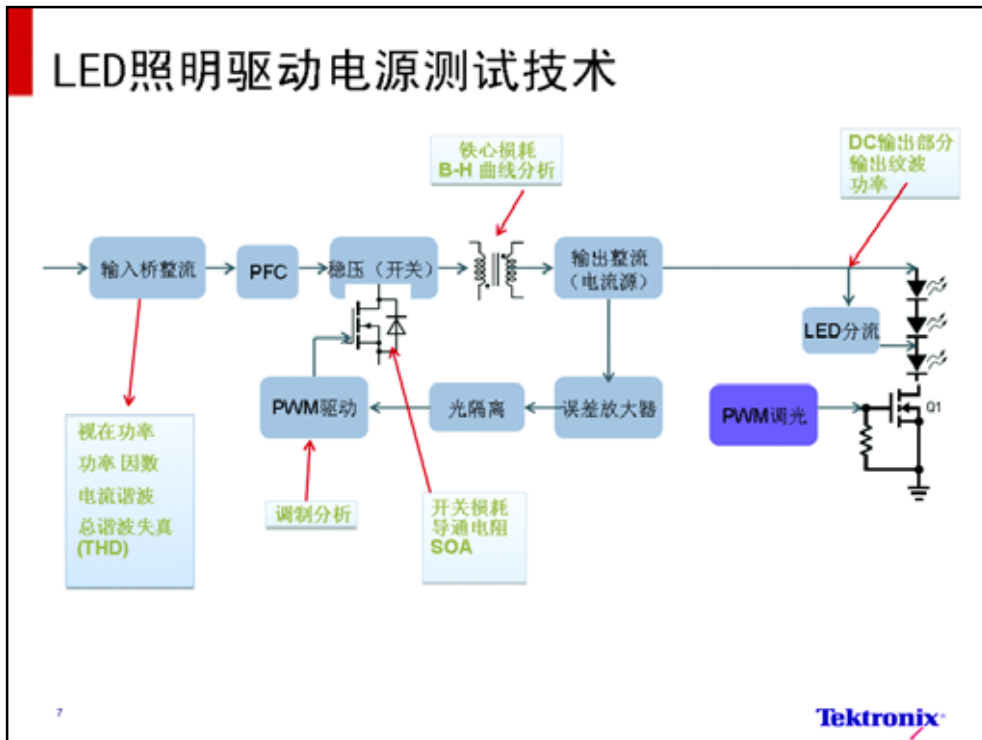
Tektronix

## LED照明对驱动电源的要求

- 高可靠性
- 高效率
- 高功率因数
- 驱动方式
  - 恒压供电
  - 恒流供电
- 浪涌保护
- 保护功能
- 防护方面
- 使用寿命长
- 要符合安规和电磁兼容的要求。

6

Tektronix



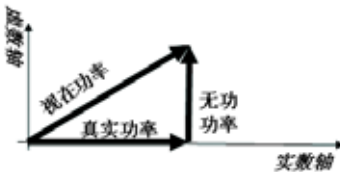
## 电能质量的测试

- 测量项目
  - RMS值、
  - 波峰因数、
  - 有效功率、
  - 无功功率、
  - 视在功率、
  - 功率因数
  - 电压和电流相角测量
- 仪器配置
  - 仪器：DPO4000B/DPO3000
  - 附件：P5200A+TCP0030/TCP202
  - PWR电源模块

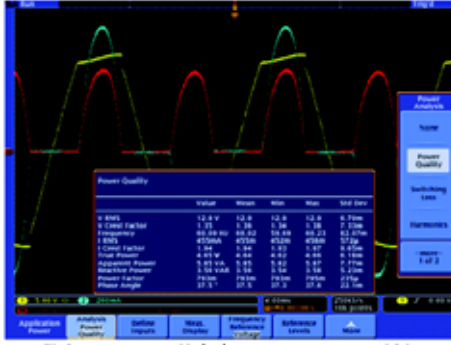
**Tektronix**

## 电能质量测量


- 视在功率 =  $I_{rms} * V_{rms}$



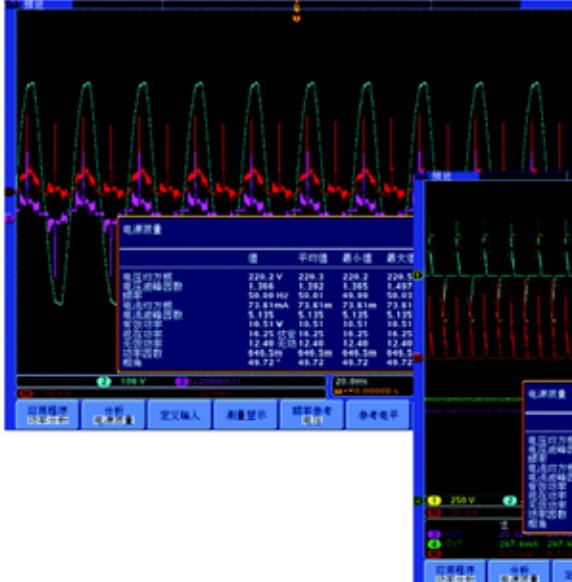

- 功率因数 =  $\frac{\text{真实功率}}{\text{视在功率}}$
- 波峰因数 =  $\frac{V_{peak}}{V_{rms}}$




带有DPO4PWR的泰克MSO/DPO4000示波器

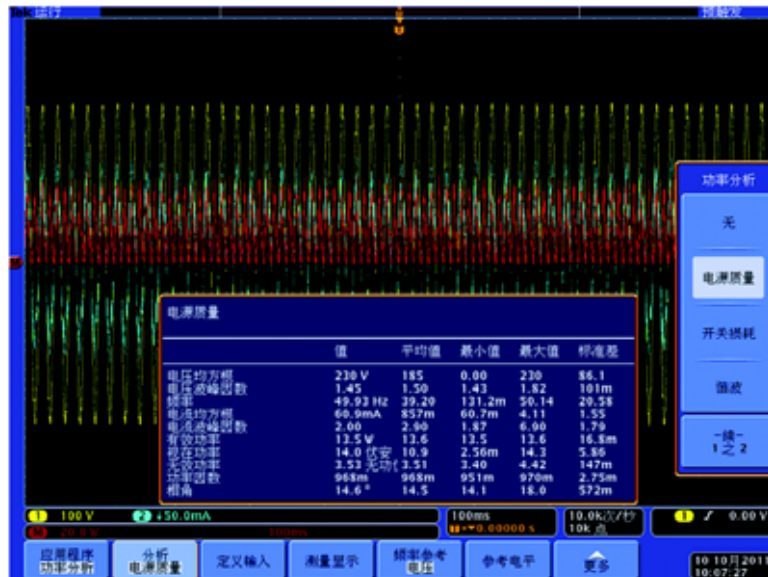


## 电能质量测量 AC输入电压和电流



## 电能质量测量

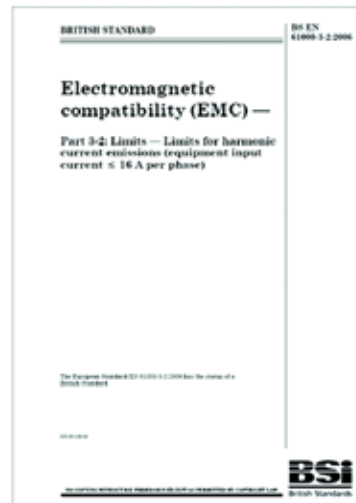


11

Tektronix

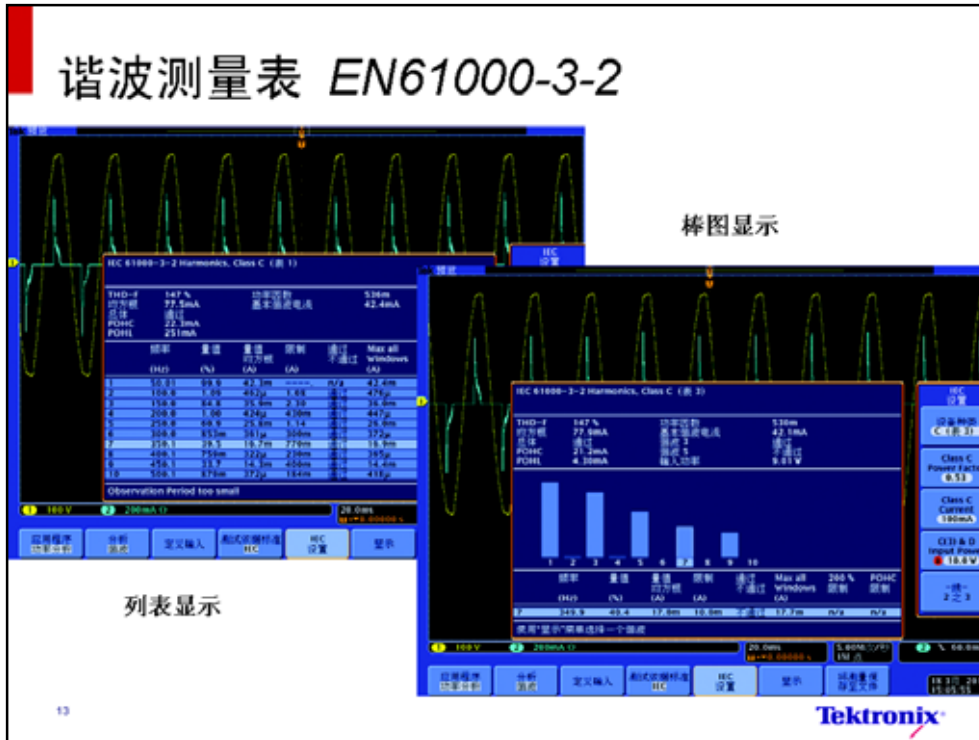
## 谐波测量

- 测量项目
  - THD-F、THD-R
  - RMS测量及每个谐波的幅度和相位
  - IEC 61000-3-2标准进行测试
- 仪器配置
  - 仪器：DPO4000B/DPO3000
  - 附件：P5200A+TCP0030/TCP202
  - PWR电源模块



12

Tektronix



## 谐波测量表 EN61000-3-2

### 谐波文件存储

Tektronix DPO3014, version v2.23, serial number C012698

IEC 61000-3-2 Class C (Table 3)

THD-F 158.17%

RMS 0.056958 A

Overall Fail

POHC 0.014059 A

POHL 0.002846 A

Frequency (measured) 49.983217 Hz

Frequency (rated) 50 Hz

Observation Period 10.000000 s

1.5s Filter ON

Harmonic Grouping ON

Power Factor (measured) 0.504675

Power Factor (rated) 0.6

Power Factor method MEASURED

Fundamental Current (measured) 0.030037 A

Fundamental Current (rated) 1.000000 A

Fundamental Current method MEASURED

Harmonic 3 Fail

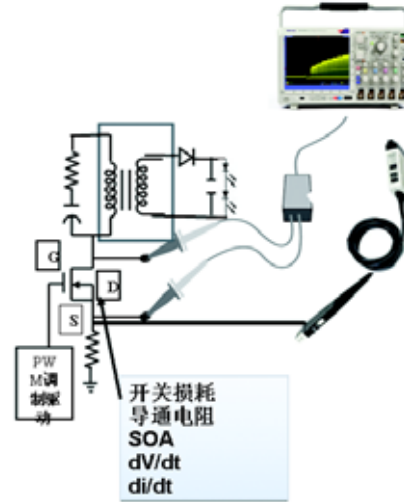
Harmonic 5 Fail

Freq Hz	Mag %	Mag RMS A	Limit A	Pass/Fail	Max all windows Limit A	POHC Limit
1	49.983217	99.92449	0.030034	nan	r/f	0.030037 r/f
2	99.966434	2.552678	0.000767	nan	r/f	0.000904 r/f
3	149.949651	90.591637	0.027211	0.022497	Fail	0.027236 r/f
4	199.932868	2.407126	0.000723	nan	r/f	0.000882 r/f
5	249.916086	79.825092	0.022374	0.012572	Fail	0.0222 r/f
6	299.899303	2.201421	0.000661	nan	r/f	0.000831 r/f
7	349.88252	54.351405	0.016325	0.006617	Fail	0.016353 r/f
8	399.865737	2.059303	0.000619	nan	r/f	0.000771 r/f
9	449.848954	38.319434	0.01151	0.003908	Fail	0.011553 r/f
10	499.832171	2.02915	0.000569	nan	r/f	0.000708 r/f
11	549.815388	31.597834	0.009491	0.002316	Fail	0.009565 r/f
12	599.798605	2.000591	0.000601	nan	r/f	0.000681 r/f
13	649.781822	32.20678	0.009674	0.00196	Fail	0.009762 r/f
14	699.765039	2.010419	0.000604	nan	r/f	0.000686 r/f
15	749.748257	32.788844	0.009849	0.001698	Fail	0.009948 r/f
16	799.731474	1.903077	0.000572	nan	r/f	0.000652 r/f
17	849.714691	30.179196	0.009605	0.001499	Fail	0.009112 r/f
18	899.697908	1.751795	0.000526	nan	r/f	0.000617 r/f
19	949.681125	25.573912	0.007682	0.001341	Fail	0.007729 r/f
20	999.664342	1.674765	0.000503	nan	r/f	0.000587 r/f
21	1049.647559	21.479589	0.006451	0.001213	Fail	0.006518 r/f
22	1099.630776	1.685413	0.000506	nan	r/f	0.000583 r/f
23	1149.613993	19.414913	0.005852	0.001108	Fail	0.005905 r/f
24	1199.59721	1.829856	0.0005	nan	r/f	0.000619 r/f
25	1249.580428	18.419707	0.00553	0.001019	Fail	0.005598 r/f
26	1299.563645	1.900768	0.000571	nan	r/f	0.000642 r/f
27	1349.546862	16.859562	0.005064	0.000944	Fail	0.005122 r/f
28	1399.530079	1.885234	0.000566	nan	r/f	0.000638 r/f
29	1449.513296	14.428879	0.004334	0.000878	Pass	0.004381 r/f
30	1499.496513	1.870417	0.000562	nan	r/f	0.000629 r/f
31	1549.47973	12.192882	0.003662	0.000822	Pass	0.003697 r/f
32	1599.462947	1.72437	0.000518	nan	r/f	0.000581 r/f
33	1649.446164	10.906637	0.003283	0.000772	Pass	0.003309 r/f
34	1699.429381	1.62563	0.000488	nan	r/f	0.000549 r/f
35	1749.412599	10.303029	0.003095	0.000728	Pass	0.00312 r/f
36	1799.395816	1.557282	0.000468	nan	r/f	0.000523 r/f
37	1849.379033	9.300246	0.002793	0.000689	Pass	0.002834 r/f
38	1899.36225	1.410892	0.000424	nan	r/f	0.000484 r/f
39	1949.345467	7.764231	0.002332	0.000653	Pass	0.002383 r/f
40	1999.328684	1.388381	0.000417	nan	r/f	0.000464 r/f

Tektronix

## 功率器件测量和分析

- 测量项目
  - 开、关、传导损耗
  - 总功率及能量损耗
  - 安全工作区
  - 调制分析
  - BH曲线分析、磁损
  - $dv/dt$ ,  $di/dt$ 测量
- 仪器配置
  - DPO5000/4000B/3000
  - P5200A+TCP0030/TCP202
  - PWR电源模块



15

Tektronix

## 开关损耗测量

- 开点损耗
  - 在开关设备从非传导状态变成传导状态时的能量损耗
- 传导损耗
  - 开关设备在饱和时的损耗
- 闭点损耗
  - 在开关设备从传导状态变成非传导状态时的能量损耗

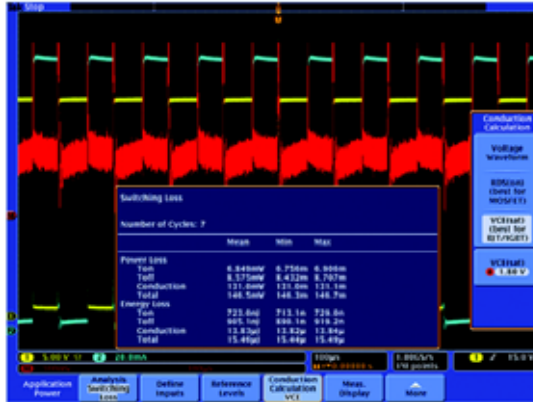


16

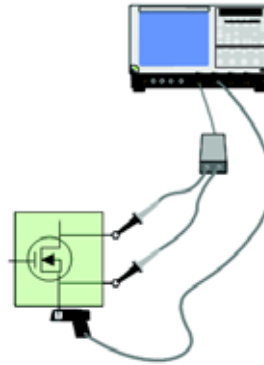
Tektronix

## 开关损耗测量

- 简单的开关损耗测量是测量流经开关设备的电压及流经开关设备的电流。
- 电源分析软件将计算开点损耗、闭点损耗和传导损耗。
- 警告：电压波形和电流波形之间的定时必须准确。



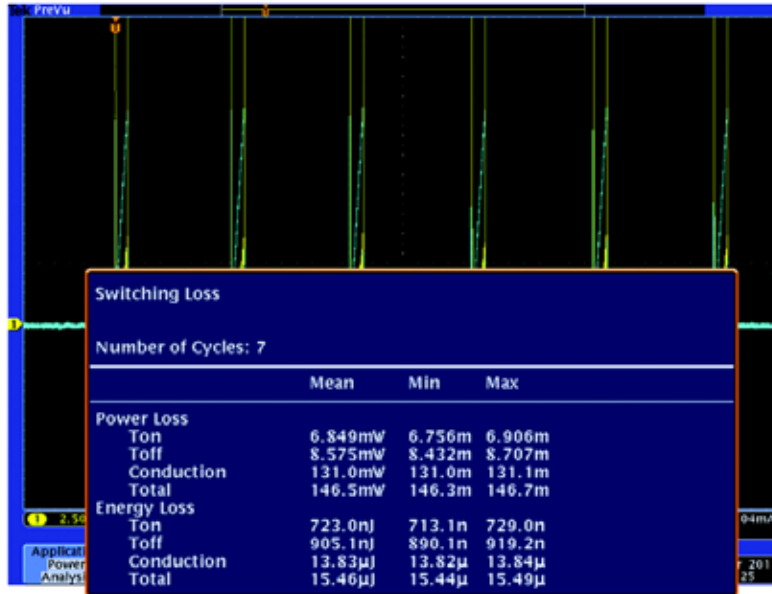
带有DPO4PWR模块的泰克MSO/DPO4000示波器



Tektronix

## 开关电源和能量损耗测量

总和 = 开点损耗 + 闭点损耗 + 传导损耗



18

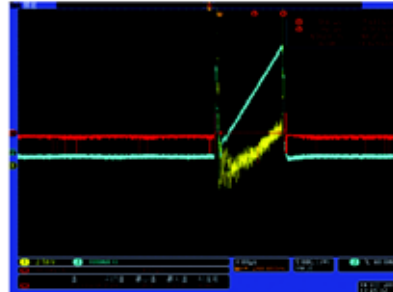
Tektronix



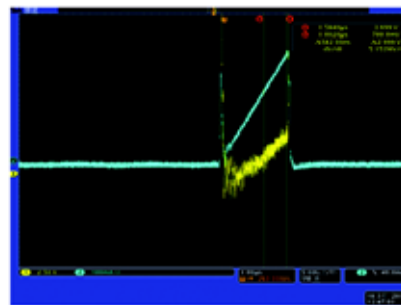
## RDS ON或Vset的测试

### 测试

- P5205预热后不接信号短接调整直流偏置
- 设Ids为触发源 测量的Rds=7.2 Ω
- P5205接Vds在DUT不通电的条件下在做一次直流偏置调整
- 选择高分辨率模式
- 通电后尽可能垂直放大Vds (以通道不饱和为基准)



测量的Vset=3.7V



19

## 安全工作区模板测试

### 用户自定义模板

- 检定设备的工作区域
- 使用下面的公式计算瞬时功率:

$$P_n = V_n I_n$$

- 其中:
  - $P_n$  是瞬时功率。
  - $V_n$  是电压。
  - $I_n$  是电流。
  - $n$  是样点。
- 测量变量可以包括不同的负载、工作温度、高和低线路输入电压、等等



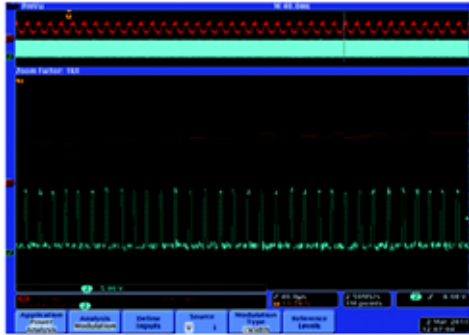
20

Tektronix

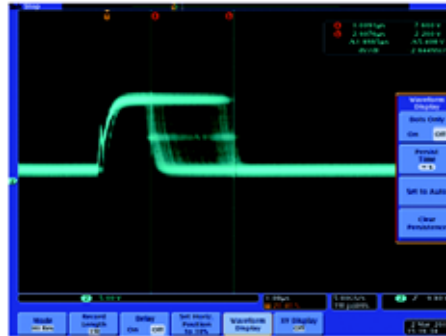
## 调制分析

开关的控制信号电压

- 调制在控制环路的反馈系统中具有重要意义
  - 调制太多会导致环路变得不稳定
  - 在调制频次较低的区域中，波形较暗



观察到的PWM及对脉宽、周期和占空比的分析



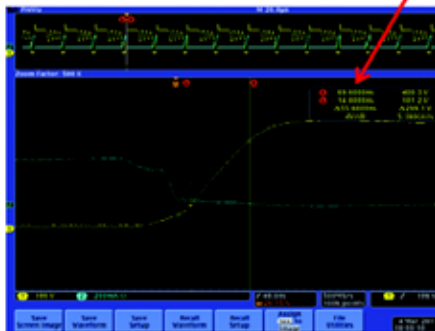
用余辉的功能观察PWM信号

21

Tektronix

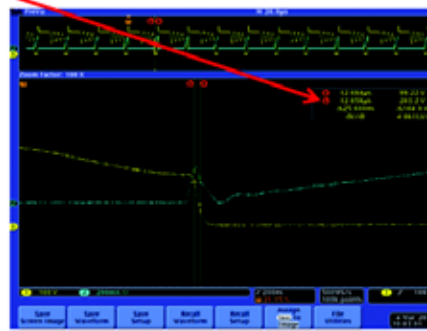
## dv/dt, di/dt的测量

光标读取dv/dt



上升沿

Parameter  
 Drain Source voltage slope  
 $V_{DS} = 640\text{ V}$ ,  $I_D = 8\text{ A}$ ,  $T_J = 125\text{ }^\circ\text{C}$



下降沿

Symbol	Value	Unit
dv/dt	50	V/ns

22

Tektronix

## 驱动输出的参数测试

- 测量项目：
  - DC输出的纹波电压和纹波电流
  - DC输出的电流稳定度
  - DC输出功率
- 仪器配置
  - DPO4000B/3000/2000
  - DMM4020/4040
  - TCP0030+TPP0502

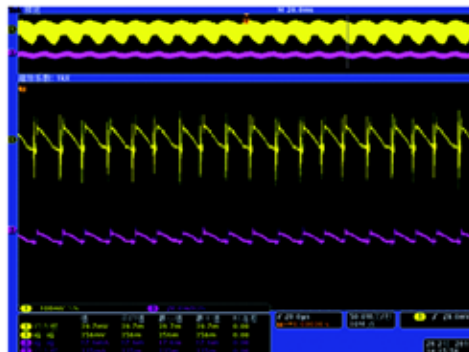
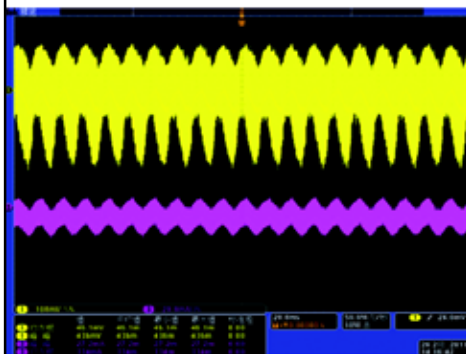


23

Tektronix

## DC输出纹波电流测量

- LED的驱动一般多采用恒流驱动，才能发挥其亮度效率及色彩亮丽的优势
- LED生产商建议：纹波电流应介于正向电流的 $\pm 5\% \sim \pm 20\%$
- 纹波电流越大，LED的热能损耗越大，对结温以及寿命会影响很大



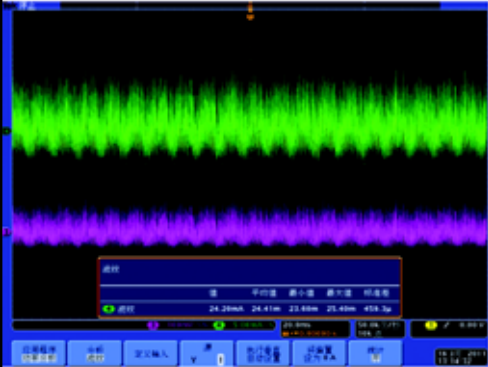
CH1:电压纹波 CH3:电流纹波

24

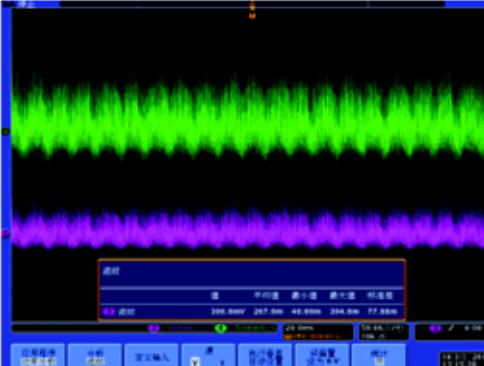
Tektronix

### 第三章：行业培训讲义

## DC输出纹波电压测量



电流纹波

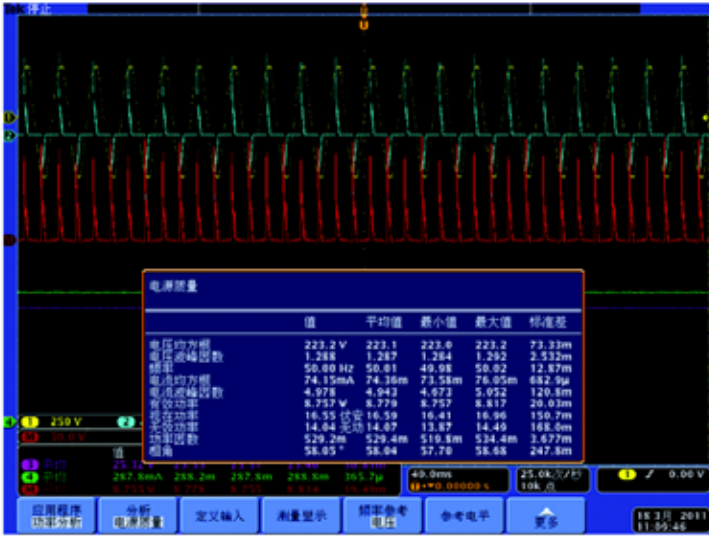


电压纹波

25

Tektronix

## DC输出功率测量

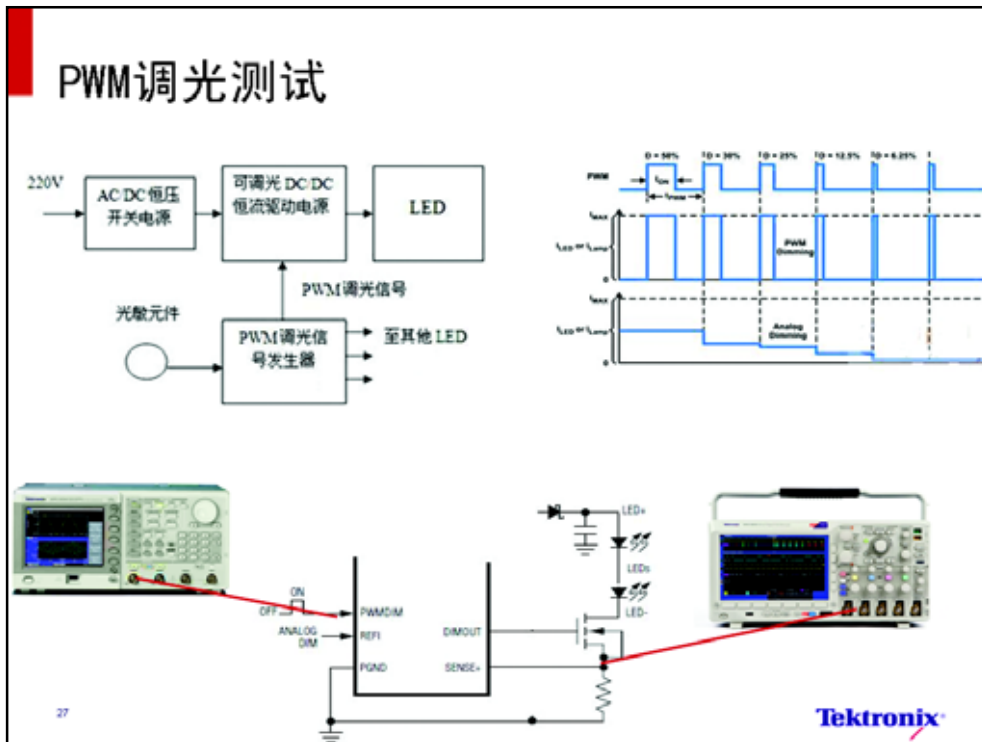


输出：电流=287.8mA, 电压=25.32V, 效率：  
 $P_{out}/P_{in}=7.287/8.755=83.2\%$

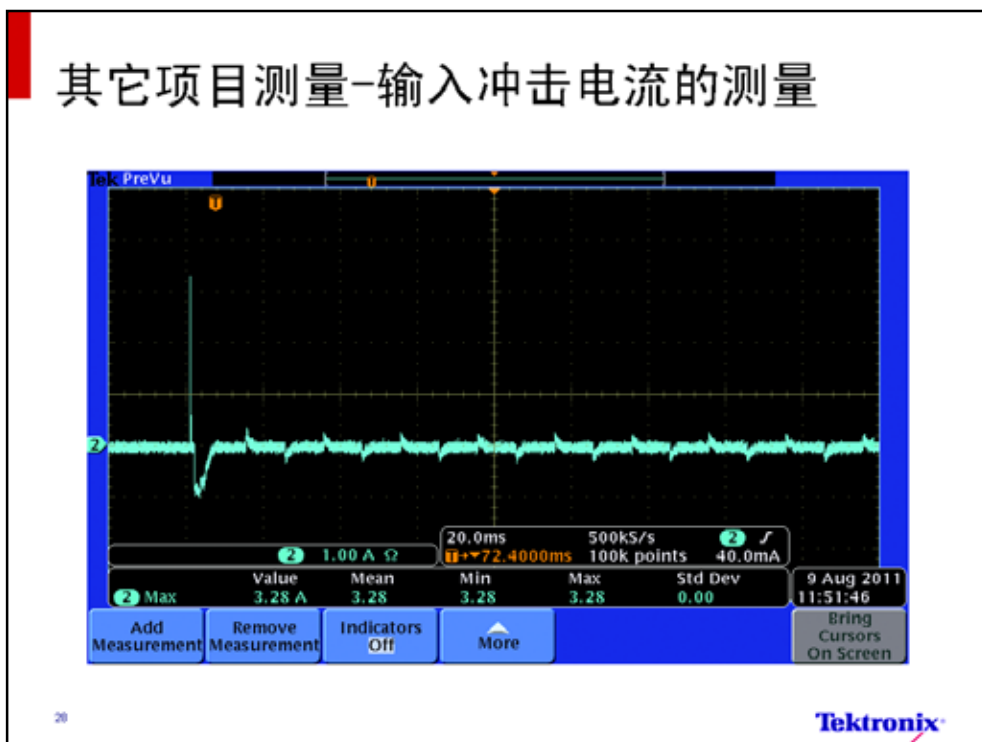
26

Tektronix

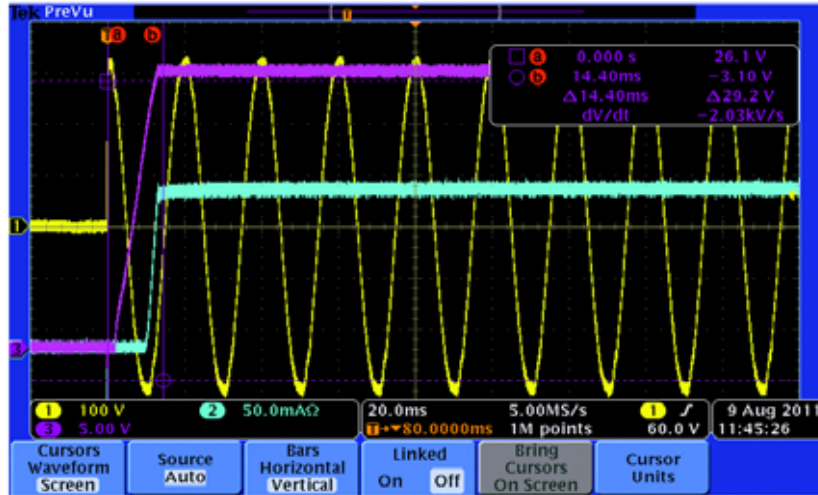
## PWM调光测试



## 其它项目测量-输入冲击电流的测量



## 其它项目测量-启动、关断时间的测量



29

Tektronix

## TEKTRONIX的测试方案和优势

- 优势
  - ✓ 最为完整的产品系列：示波器、万用表、DC电源、函数信号源、多点测温仪
  - ✓ 完整的探头附件方案：电流探头、高压探头、差分探头
  - ✓ 最长的存储深度：20M
  - ✓ 最佳的电流纹波测量方案
  - ✓ 专业的电源分析功能：电源参数、谐波、调制、器件损耗、纹波、磁性材料
- 仪器配置
  - ✓ DP05000/4000B/3000/2000、TPS2000B+PWR
  - ✓ TCP0030/TCP202
  - ✓ P5200A/P5201
  - ✓ DMM4020/4040
  - ✓ PWS4000
  - ✓ ARC3021B

30

Tektronix



**Tektronix的LED  
照明测试方案  
及特点**

PWR电源测量和分析模块

电流探头  
TCP0030  
TCPA300+TCP312  
TCP202



DPO3000

电压探头  
P5200、P5205  
P2221、TPP0502



DPO2000



DPO4000



DMM4000



AFG3021B

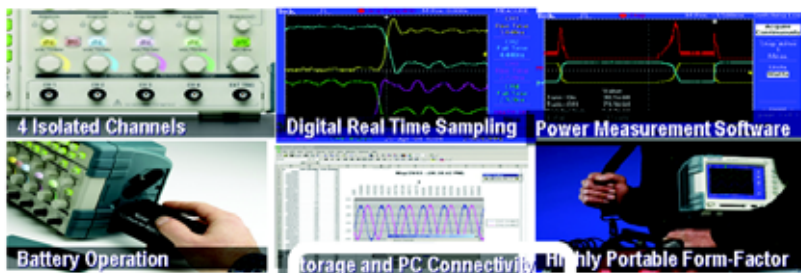
**Tektronix**

## TEKTRONIX的测试项目

类别	测试项目	常用仪器	TEKTRONIX仪器	优点
电源质量测量	RMS值、波峰因数、真实功率、无功功率、视在功率、功率因数及电压和电流相角测量；	功率表	DPO+PWR+PROBES	一键测量
谐波测量	THD-F、THD-R和RMS测量及每个谐波的幅度和相位，IEC 61000-3-2标准进行测试；	功率分析仪	DPO+PWR+PROBES	
开关器件测量	开、关、传导损耗和总功率及能量损耗；安全工作区；调制分析；BH曲线分析	--	DPO+PWR+PROBES	完整的探头附件
纹波测量	纹波电压和电流	--	DPO+PWR+PROBES	独有1mA的电流测量，高频响应的电压测量，
PWM调光分析	调光比	--	AFG3021B、DPO	满足未来需求
效率		--	DPO+PROBES *2	一台仪器 实现测量
电流	输出电流精度和稳流范围	DMM	DMM4020	小电流测量能力

## TPS2000B 系列的独特性能

TPS2000 B可以提供



	TPS2012B	TPS2014B	TPS2024B
隔离通道	2	4	4
带宽	100MHz	100MHz	200MHz
采样率	1GS/s	1GS/s	2GS/s
电池工作(one battery)	5.5 hours	4.5 hours	4.5 hours
保修	3 years	3 years	3 years

33

Tektronix

## 完美的测试平台

助您轻松应对调试复杂设计



34

Tektronix



## 泰克公司变频器测试方案

泰克科技（中国）有限公司



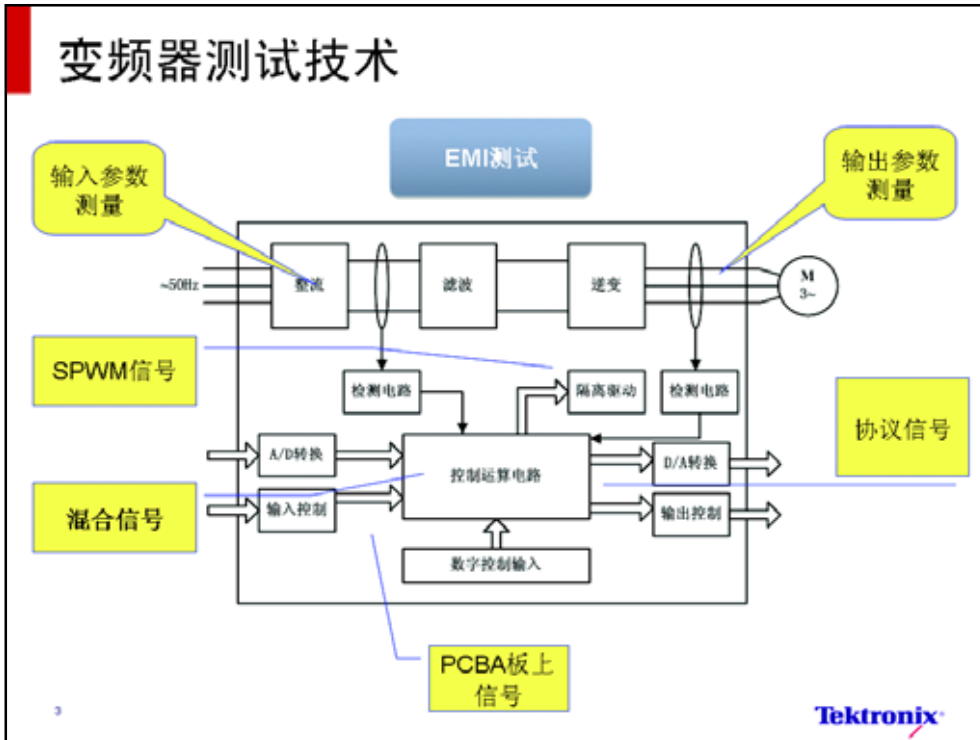
**Tektronix**

### 大纲

- 变频器测量技术
  - 整流部分测试
  - 滤波部分测试
  - 逆变部分测试
  - 驱动部分测试
  - 控制部分测试
  - 接口部分测试
  - 系统的诊断
- 泰克变频器测试方案及特点

2

**Tektronix**



## 变频器的测试技术

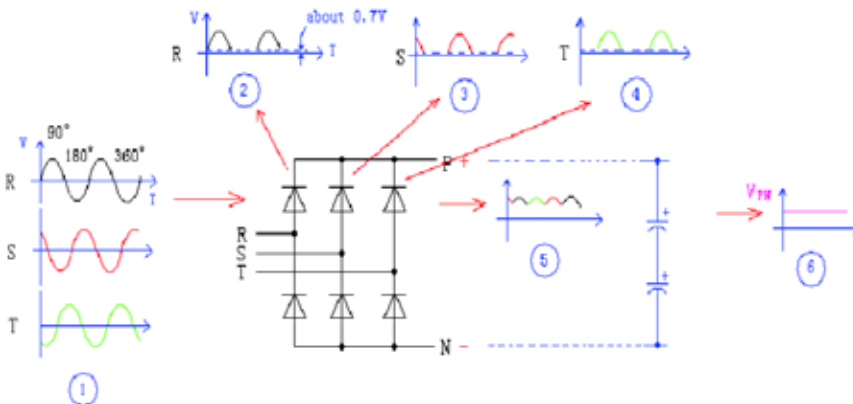
类别	测试项目	常用仪器	TEKTRONIX 仪器	优点
整流侧	整流输出波形测量	示波器	DPO	
	纹波测量	示波器	DPO	
	谐波测量（失真）	功率分析仪	DPO+PWR	同时显示波形和测量参数
	视在功率、有功功率测量、功率因素	功率分析仪	DPO+PWR	同时显示波形和测量参数
	内部控制电源的输出电压、纹波	示波器		
逆变侧	IGBT损耗测量	功率表	DPO+PWR	同时显示波形和测量参数
	磁性元件损耗及B-H特性	变压器测试仪	DPO+PWR	同时显示波形和测量参数
	驱动脉冲幅度、死区测量	示波器	DPO	
	输出电压和电流测量、输出功率测量	功率表	DPO2000	FilterVu功能
控制部分	SPWM(SVPWM)输出电路	示波器	DPO	
	速度反馈单元正交编码电路	信号源	AFG+MSO	双通道产生正弦信号,输入和输出同时观察
	A/D,D/A电路（电压采样、输出电流采样、IPM模块的温度采样）	万用表	MSO	
	混合信号（MCU、DSP和模拟）分析	混合信号示波器	MSO	
	FPGA测试	芯片厂商提供	MSO+FPGAView	内核测试, 占用资源少
	接口总线电路 RS232 SPI		DPO+AUTO+EMBED+COMP	

5

Tektronix

## 三相全桥整流电路

交—直—交电路的整流和滤波



- 变频器的进线电源可以是三相380-500V, 或三相200-240V, 也可以是单相200-240V; 也可以是690V。
- 电源电压在690V以下称为低压变频器, 1000V以上称为中压或高压变频器。
- 进线电源的相序不影响电机的转向。
- 大多数变频器采取三相全波整流, 整流器件为功率二极管

Tektronix

## 变频器测试技术---谐波测量标准

- GB/T14549-93：变频器电网侧谐波电压符合GB/T 14549-93电能质量公用电网谐波要求。
- IEEE Std 519-1992：变频器电网侧谐波电流含量符合

中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估 (GB/Z 17625.4—2000) (IEC 61000-3-6)

注入公共连接点谐波电流允许值 单位: A

标准电压/kV	基准短路容量/MV·A	谐波次数及谐波电流允许值							
		5	7	11	13	17	19	23	25
0.38	10	62	44	28	24	18	16	14	12
6	100	34	24	16	13	10	9.0	7.4	6.8
10	100	20	15	9.3	7.9	6.0	5.4	4.5	4.1

各国谐波管理标准比较

	电压畸变率 %	谐波		系统电压 /kV
		奇次%	偶次%	
英国	4	3	1.95	6.6-11
美国	一般电力为5 专用为8	—	—	2.4-69
德国	5.8	5次 7次 11次 13次	—	10-30
澳大利亚	5	4	2	<33
日本	3	1	0.75	配电系统
中国	10	5	2	配电系统

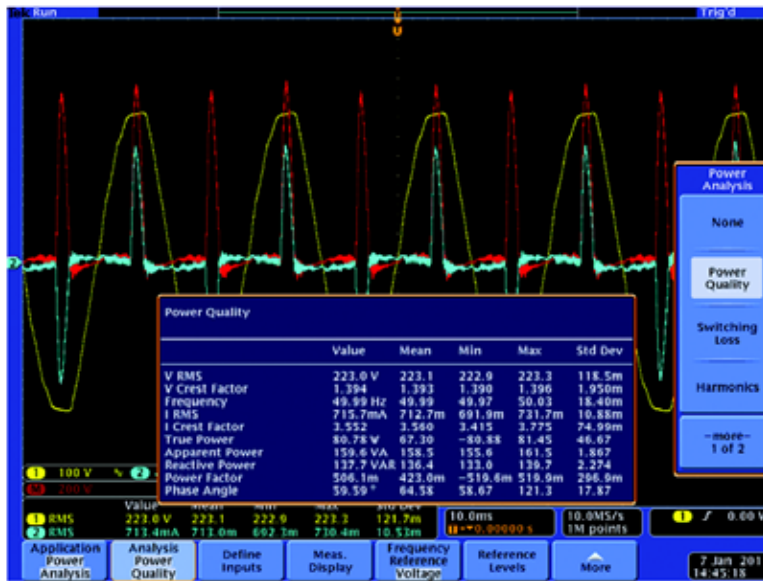
IEC 变频器相关技术标准

电网电压/kV	电压总谐波畸变率 THD%	各次谐波含有率%	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2
6-10	4.0	3.2	1.6

7

Tektronix

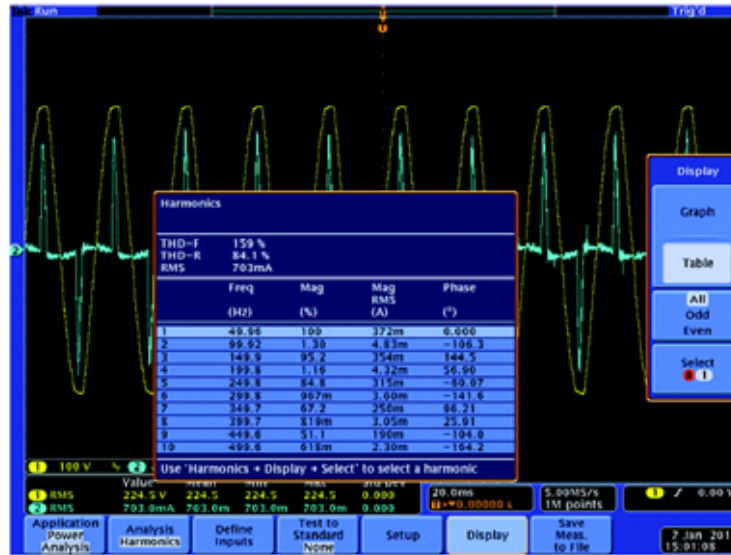
## 变频器测量技术---AC输入电压和电流



8

Tektronix

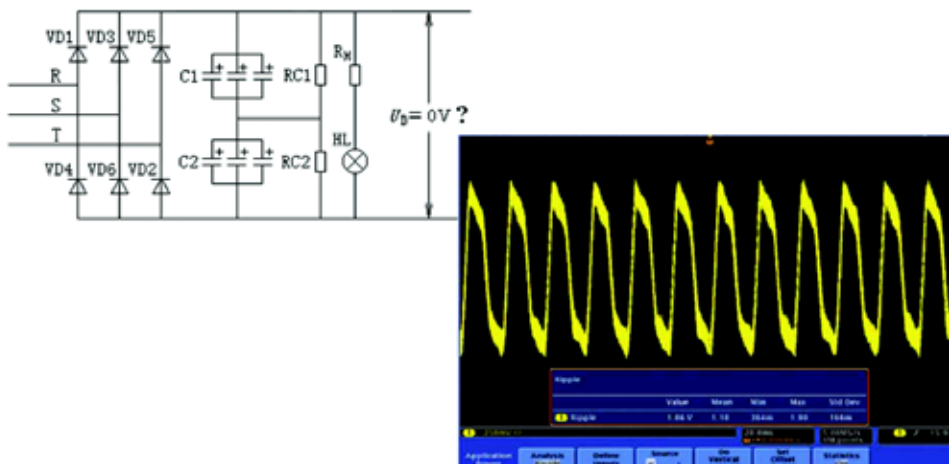
## 变频器测量技术---谐波测量表



9

Tektronix

## 变频器测量技术---纹波测量



电压值  $\sqrt{2}$  线电压，6倍工频频率的脉动波形  
 DPO2000的FilterVu功能可以帮助滤除高频纹波的干扰

10

Tektronix

## 变频器测量技术---纹波电流测量

测量的必要性：电容器在实际使用时如果超过电容器规定的Max Allowable Ripple Current，产品温度就会升高，超出其最高使用温度，就会对电容器性能产生影响，从而影响整个电路和设备。

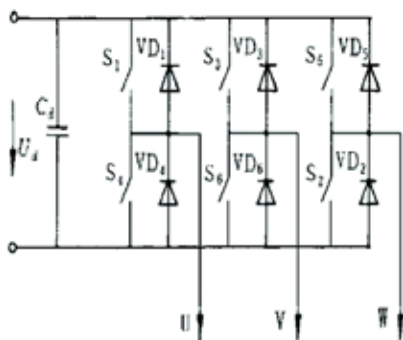
R. V. (V) 额定电压		35			
Cap. (μF) 容量	Ripple Current 纹波电流	Case size $\phi$ DxL (mm) 产品尺寸			
		22	25	30	35
3,300	1.43	22x25			
3,900	1.65	22x30			
4,700	1.89	22x35	25x25		
5,600	2.02	22x40	25x30		
6,800	2.28	22x45	25x35		
8,200	2.67	22x50	25x40	30x30	
10,000	2.92		25x45	30x35	
12,000	3.26		25x50	30x40	35x30
15,000	3.74			30x45	35x35
18,000	4.16				35x40
22,000	4.92				35x50

11

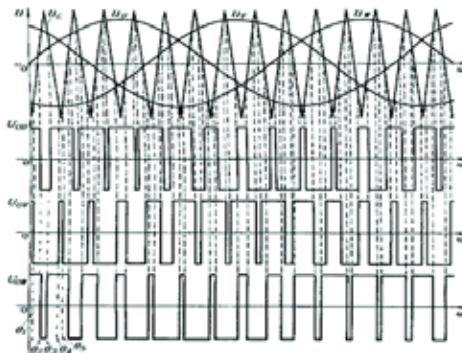
Tektronix

## 变频器逆变电路工作原理

交—直—交电路的 逆变电路



三相正弦脉冲宽度调制波形



逆变器的功能：

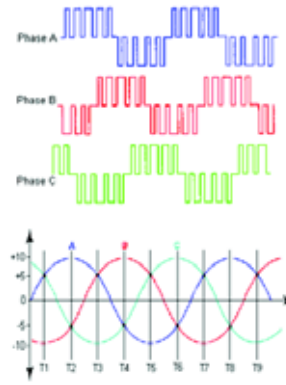
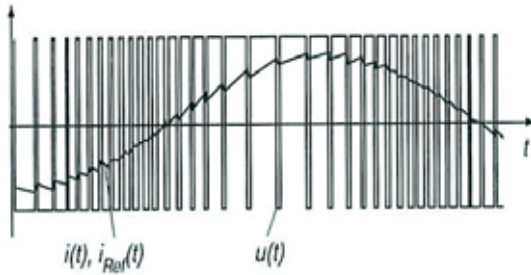
- 通过改变开关管导通时间改变输出电压的频率
- 通过改变开关管导通顺序改变输出电压的相序

12

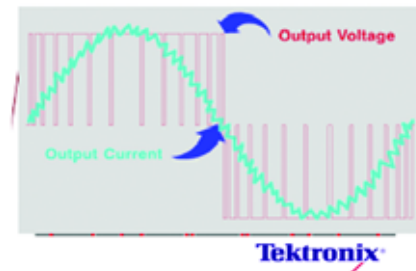
Tektronix

## 逆变输出波形

### 变频器的输出波形



变频器输出电压方波经L/R积分为电流波形近似为正弦波

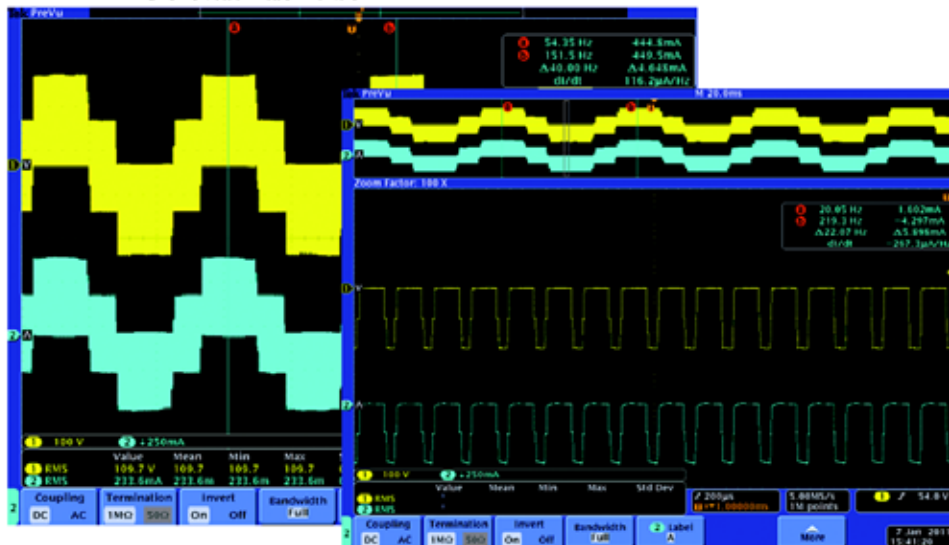


13

Tektronix

## 逆变输出波形

### 变频器输出波形

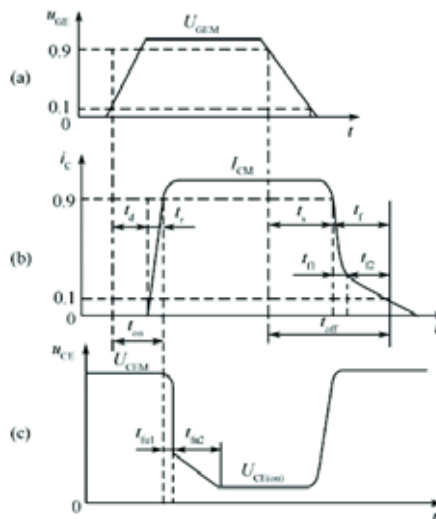


14

Tektronix

## IGBT损耗测量技术

- IGBT的损耗测量
  - 电压范围1/2Vd 对于380v三相系统 < 270v 对于单相系统 < 160v
  - 电流 视变频器的容量而定，几A到一两百安培，视变频器容量和负载而定



15

Tektronix

## IGBT驱动控制-调制

- PWM (Pulse Width Modulation) 调制
  - PWM调制是：利用半导体开关器件的导通和关断把直流电压调制成电压可变、频率可变的电压脉冲列。
  - SPWM调制是：采用三角波和正弦波相交获得的PWM波形直接控制各个开关可以得到脉冲宽度和各脉冲间的占空比可变的呈正弦变化的输出脉冲电压电压，能获得理想的控制效果：输出电流近似正弦
  - 载波频率必须高，才能保证调制后得到的波形与调制前效果相同



16

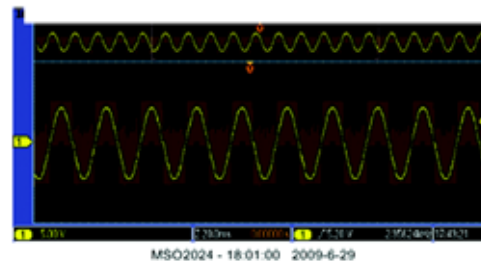
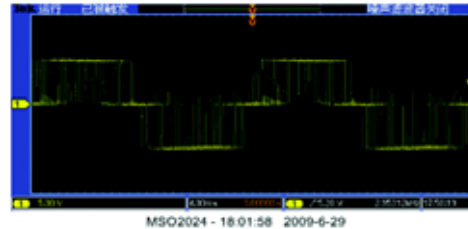
Tektronix



## PWM调制规律测定

### ■ 驱动部分测量

- 测量每个IGBT门极接受到的驱动信号及其传输延时和信号畸变
- 观测同组驱动脉冲时间上的一致性
- 观测同桥臂驱动脉冲间的死区互锁和保护机制是否奏效



17

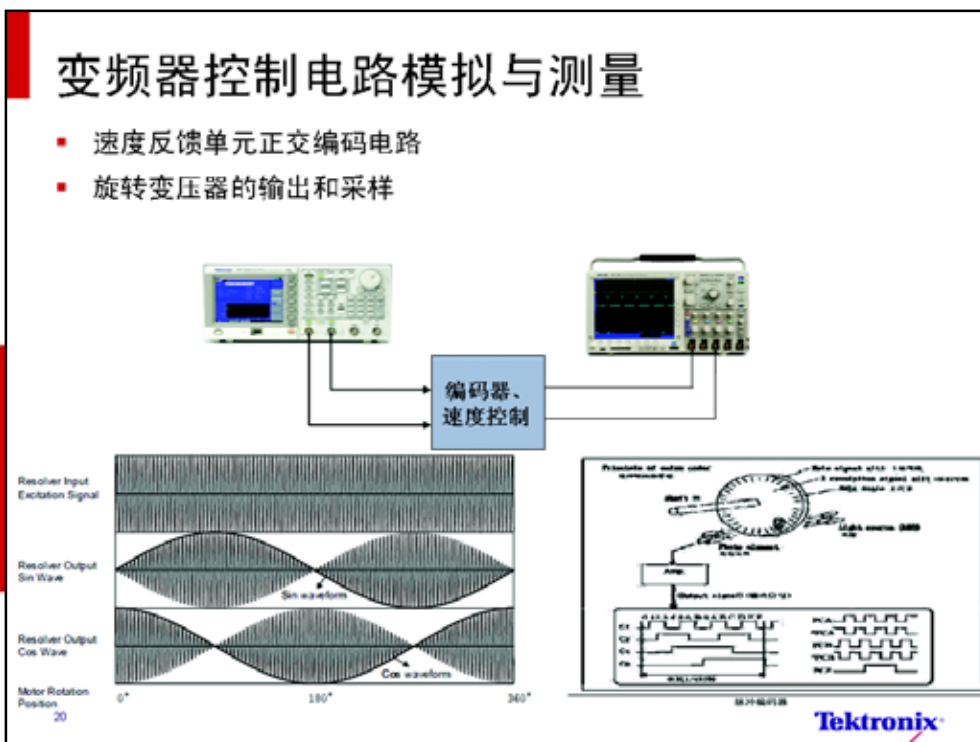
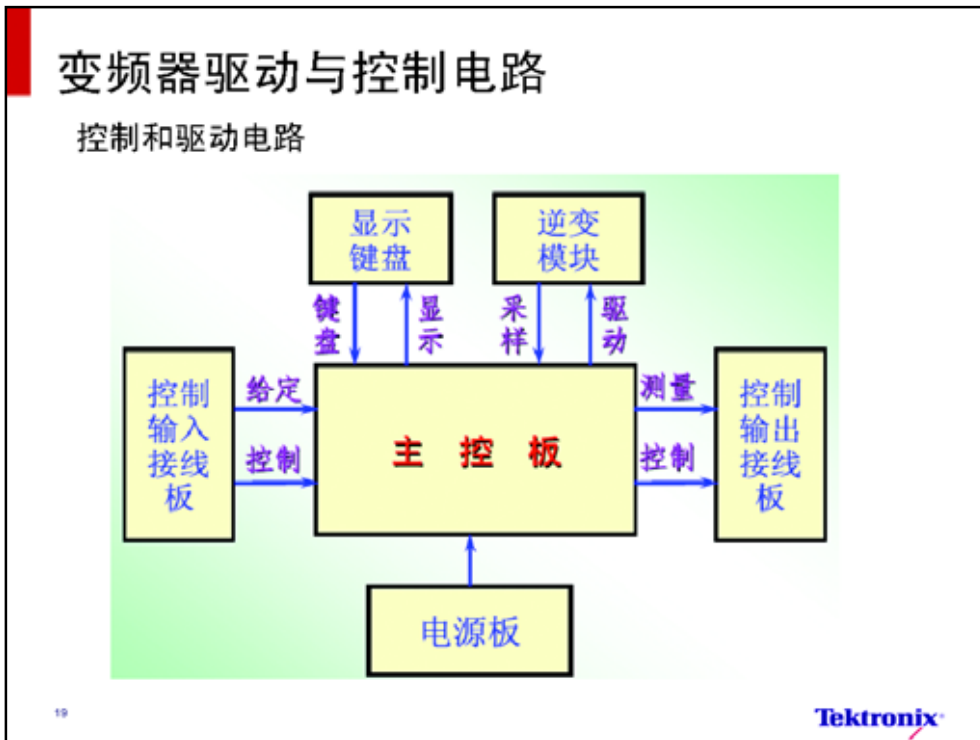
Tektronix

## 变频器控制电路测量

- 控制部分测量
  - I/O信号A/D、D/A
  - 速度反馈信号
  - 旋转编码器的测试
  - 电流反馈回路
- 测量仪器及配置
  - MSO4000B、MSO3000
  - AFG3022B

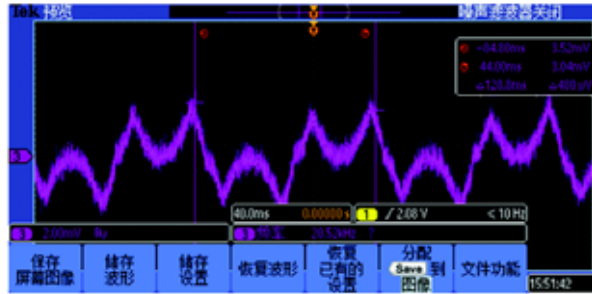
18

Tektronix



## 控制电路模数转换电路测试

- A/D, D/A电路测量（电流反馈、电压反馈）



SVPWM调制控制下轻载状态下的电流波形

21

Tektronix

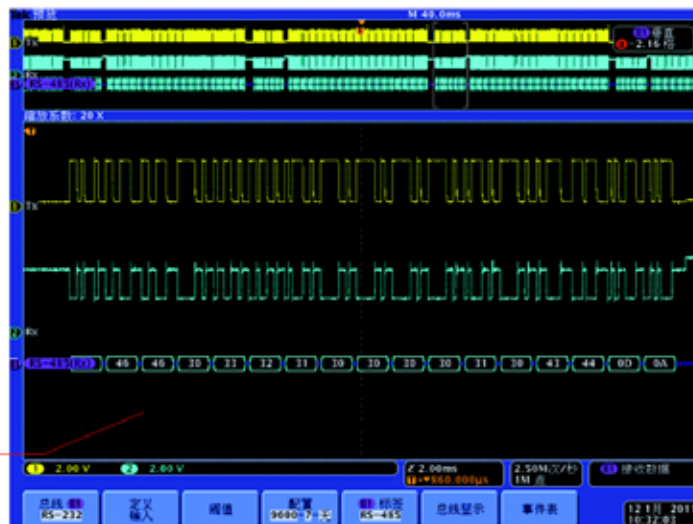
## 接口与通信协议的测试和诊断

RS-232/422/485/UART触发和解码

- Trigger On
- Tx Start Bit
- Rx Start Bit
- Tx End of Packet
- Rx End of Packet
- Tx Data
- Rx Data
- Tx Parity Error
- Rx Parity Error

RS-485

RS485触发和解码



22

Tektronix

## 并行总线触发、解码和搜索

- 触发并行总线数据
  - 带时钟输入或不带时钟输入
- 以十六进制或二进制查看解码后的数据
- 使用Wave Inspector 搜索和标记特定数据值
- 使用事件表格式查看数据

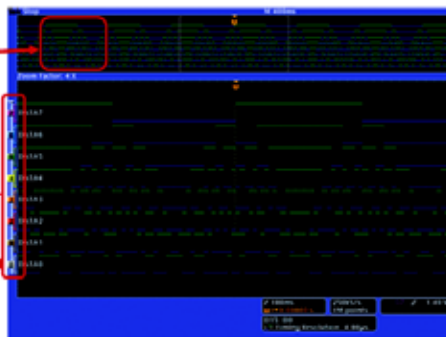


23

Tektronix

## 带色码的数字波形显示

- 逻辑值高用绿色表示  
逻辑值低用蓝色表示
- 波形分组，简化在屏幕上定位数字波形的工作
- 数字通道指示符带有色码，颜色与数字探头上的通道标签一致

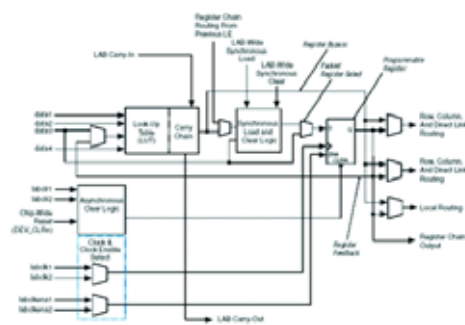
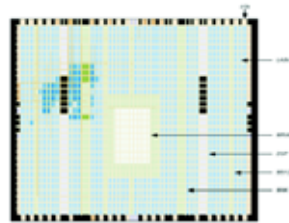


24

Tektronix

## 变频行业使用FPGA的趋势

- FPGA - 现场可编程门阵列
  - 采用逻辑单元阵列LCA (Logic Cell Array)
  - 包括：可配置逻辑模块CLB (Configurable Logic Block)、输出输入模块IOB (Input Output Block) 和内部连线 (Interconnect)
  
- FPGAs 应用
  - 自动化、信息技术
  - 消费电子
  - 数据处理
  - 数字图像和视频
  - 嵌入式
  - 本地网络
  - 工业仪器
  - 医疗电子
  - 网络、通信
  - 无线通信
  - . . . .



25

Tektronix

## 调试带有FPGA的嵌入式系统的问题

- 功能定义错误
  - 在 FPGA级或者系统级
  - 功能系统的配合问题
  
- 系统级定时问题
  - 异步事件
  - 实际互联，特别对于速度
  - 难于仿真定时异常
  
- IC之间的信号问题
  - 噪声、串扰、反射、负载效应、EMI
  
- 互联可靠性问题
  - 焊点、连接端
  
- 电源问题
  - 瞬态和负载变化
  - 高功耗
  
- 未发现的FPGA 设计错误，由于未完成的仿真
  - 太复杂：提供100%代码
  - 太费时：执行和运行



26

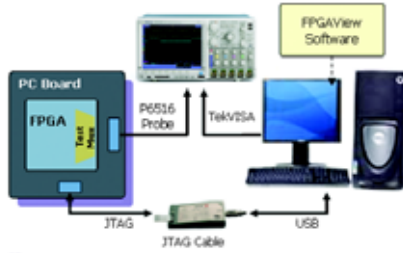
Tektronix

## 泰克FPGAView调试方案

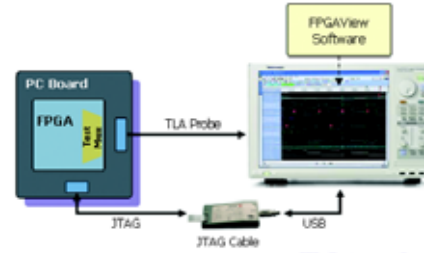
- **FPGAView™**
  - Supports Xilinx and Altera FPGA devices
  - Software package developed by First Silicon Solutions (www.fs2.com)
  - Runs on Windows 2000 and Windows XP machines

Function	Solution
<b>Multiplexer</b>	Xilinx: FS2 TestCore Altera: Quartus® II v5.1
<b>Control Software</b>	FS2 FPGAView™
<b>Test Equipment</b>	MSO4000 Mixed-Signal Oscilloscope, or TLA Series Logic Analyzer (>v4.3)
<b>JTAG Cable</b>	Xilinx: Platform Cable USB and Others Altera: USB-Blaster™ or ByteBlaster™

### ▶ Mixed-Signal Oscilloscope



### ▶ Logic Analyzer



27

Tektronix

## 泰克变频器测试解决方案

产品阶段	研发	生产	服务和维修
关注焦点	技术	投资回报率, 成本降低	成本
测试要求	高性能	低成本, 足够的性能	通用性
<b>TEKTRONIX 解决方案</b>	MSO4000B MSO3000 AFG3000 DMM4040 DMM4050	TDS2000 DPO2000 DMM4020	TDS2000C TPS2000B
附件要求	PWR, FPGA, COMP, EMBD P5200, P5205 TCP300V400VA62X(TAP0150	P5200, P5205, P5210 A621/2, TCP404XL, TCP0150	
优势	方案完整、附件齐全 快速系统诊断和测试(混合信号) 动态范围大(抗饱和能力) 波形导航和搜索能力 最长的存储深度(20M) 方便的高级函数运算	独特的FilterVu滤波 通道隔离	品牌及价格

28

Tektronix

## 完美的测试平台

### 助您轻松应对调试复杂设计



## 变频器研发典型测试仪器

### 研发和测试设备

类别	主要设备
性能测试设备	电流测试系统、三相PWM测试仪、示波器、柔性电流探头、功率分析仪、电子负载、AC SOURCE、DC SOURCE、高压直流电源、LCR测试仪
热测试设备	热成像仪、精密测温仪、红外测温仪
EMC测试设备	静电测试装置、电源浪涌测试 (SURGE) 装置、电快速脉冲群测试 (EFT) 装置、高频噪声测试仪、EMI测试系统、BCI测试系统、近场探头、屏蔽房
安规测试设备	安规综合测试仪、耐压测试仪、接地连续性测试仪、绝缘电阻测试仪、100kV冲击电压测试系统
环境试验测试设备	程控温湿度箱、快速温变箱、高低温冲击箱、温度低气压试验箱、盐雾试验箱、高温烘箱、小功率振动台、5吨大推力振动台

30

Tektronix

# 大功率逆变器的测试技术

泰克科技（中国）有限公司



**Tektronix**

## 逆变器

- 概念：逆变器是一种将直流电（DC）转化为交流电（AC）的装置。
  - 交流侧接电网为有源逆变。
  - 交流侧接负载为无源逆变
  
- 分类：逆变器根据发电源的不同
  - 煤电逆变器
  - 太阳能逆变器
  - 风能逆变器
  - 核能逆变器。

2

**Tektronix**



## 逆变技术的应用

- 新能源的开发和利用：如光伏、风能等。
- 交流电机调速用变频器
- 不间断电源、感应加热电源
- 电网谐波补偿
- 开关稳压电源和各种专用电源

3

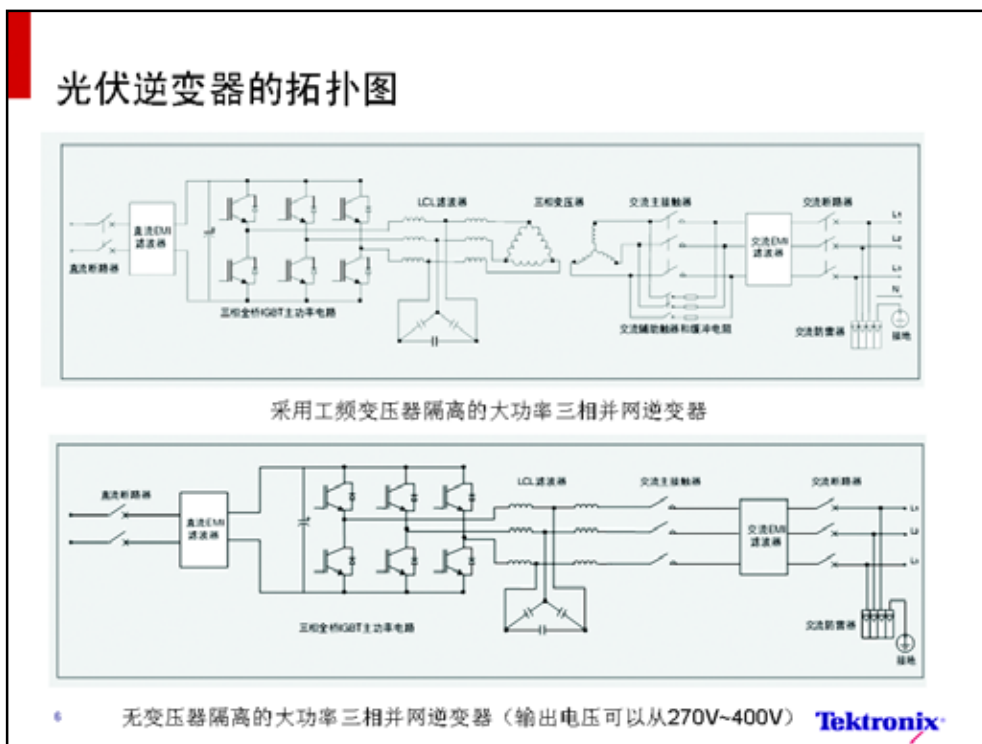
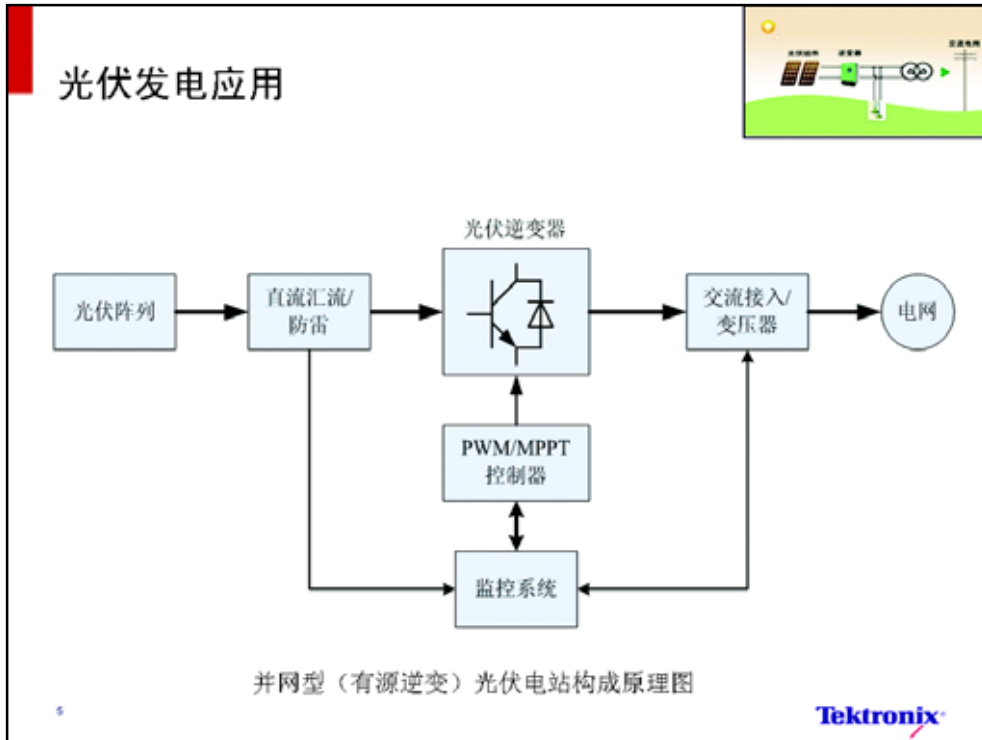
Tektronix

## 光伏系统的逆变器

- 光伏发电系统中的逆变器，包括无源逆变和有源逆变两种形式。
- 无源逆变：用于孤立型光伏电站，通过逆变器将直流逆变为方波或经SPWM调制为正弦波交流电，直接向交流负载供电。
- 有源逆变器：用于并网光伏发电，通过逆变器以SPWM的方式产生交流调制正弦电源，并使输出正弦波的电压幅值、频率及相位等变量与公共电网一致。
- 光伏发电系统中的逆变器
  - 按输入侧直流储能元件类型可进一步划分为电压型逆变和电流型逆变两类；
  - 按拓扑结构又可分为单相半桥逆变电路，单相全桥逆变电路和三相全桥逆变电路三种。

4

Tektronix



## 风力发电应用方式

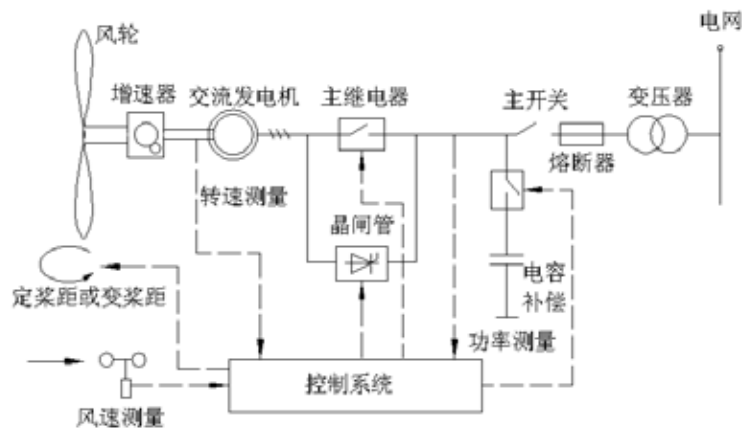
- 微型风电机  
风机、蓄电池、控制器、逆变器
- 大型风电机  
叶轮；传动系统；发电机； 刹车系统； 偏航系统  
；塔架；控制监测系统
- 大型风电场  
并网供电

7

Tektronix

## 并网运行的风力发电机组

并网运行的水平轴式风力发电机组由风轮、增速齿轮箱、发电机、偏航装置、控制系统、塔架等部件组成，其结构如图所示



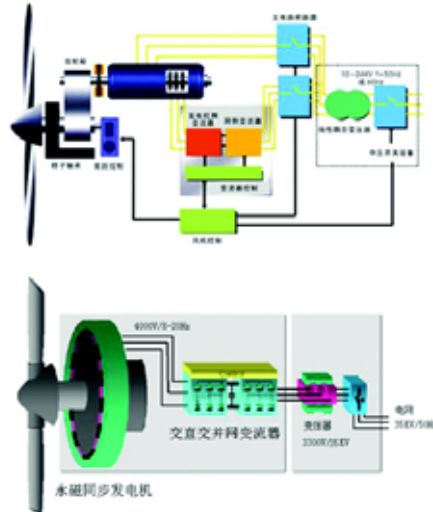
8

并网运行的水平轴风力发电机组的原理框图

Tektronix

## 逆变器电气测试需求

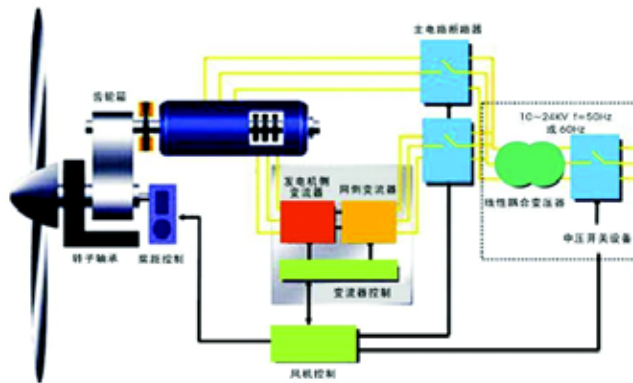
- 风电技术高速发展，新技术不断涌现
  - 恒速恒频型发展为变速恒频型
  - 定桨距发展为变桨距
  - 主流MW级风力发电机
    - 双馈型异步发电机变速恒频系统
    - 直驱式永磁同步发电系统
- 设计电气系统的新要求
  - 大容量，四象限运行的变流器设计的测试与分析
  - 软并网过程的检测与分析
  - 直流母线电压波动的测试
  - 变流器SPWM调制分析测试
  - 伺服驱动系统的测试（变桨距、偏航系统）



9

Tektronix

## 示波器在风电设备开发中的作用



在高电压大电流的电力电子器件测试中，示波器是不可缺少的必需设备，此外在观测PWM调制规律、测试电力电子器件损耗、捕捉瞬态异常信号，结合总线控制信号的模数联合调试的工作中，示波器有着不可替代的作用

10

Tektronix

## 如何选择示波器类测试工具

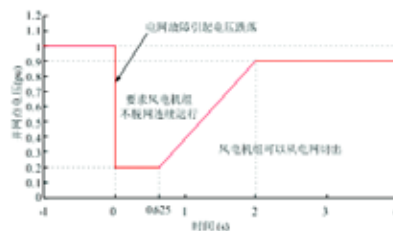
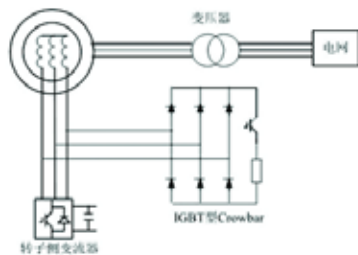
- 足够的存储长度
  - 保证每个转换的边沿采集到8-10个样点
  - 至少完整采集半个工频周期的信号
- 异常波形的发现和捕获能力
  - 偶然发生的异常波形的显示和捕获能力
  - 长存储条件下的异常自动查找能力
- 完善的探头方案和探头偏差校准能力
  - 高压差分 and 电流探头
  - 探头的自校准和时间偏差校准功能
- 结合常用工业总线的模/数联合调试能力
  - 常用总线解码和触发功能
  - 模数混合信号调试能力

11

Tektronix

## 应用一 捕获低电压穿越LVRT过程 (电压异常响应特性)

- 低电压穿越
  - 指在发电机并网点电压跌落的时候，逆变器能够保持并网，甚至向电网提供一定的无功功率，支持电网恢复，直到电网恢复正常，从而“穿越”这个低电压时间(区域)。
- 泰克长存储示波器可以捕获电网电压跌落和CROWBAR电路切入工作的全过程

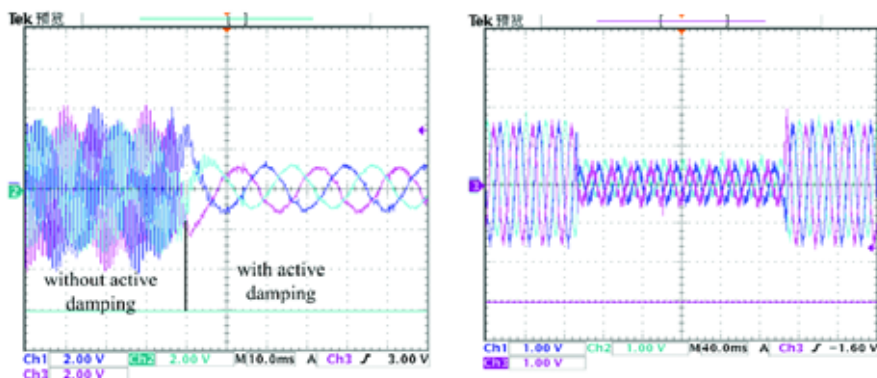


12

Tektronix

## 低电压穿越 (LVRT)

参考试验波形



13

Tektronix

## 应用二 频率异常响应特性测试

### 过/欠频状态

- 并网条件下的变流器在电网电压频率低于或高于一定频率变化范围时，要及时从电网中切断，防止电网崩溃

频率范围	运行要求
<48Hz	根据逆变器允许运行的最低频率或电网要求而定
48-49.5Hz	每次低于49.5Hz时能连续运行10分钟
49.5-50.2Hz	连续运行
50.2-50.5Hz	每次高于50.2Hz，应具有连续运行2分钟的能力，同时具有0.2s内停止向电网供电的能力
>50.5Hz	0.2s内停止向电网供电，且不允许再并网

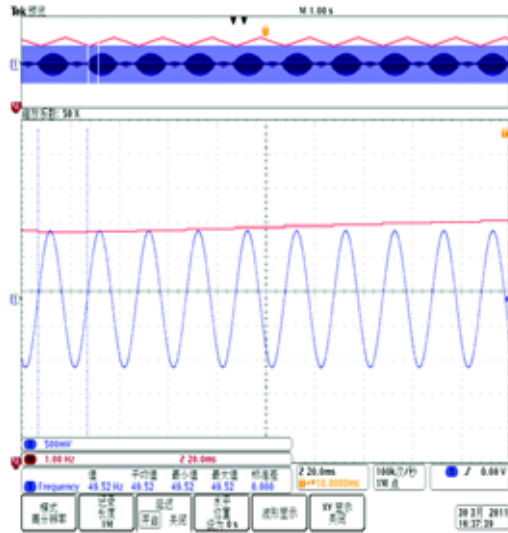
以上数据摘自国家电网公司关于光伏并网的规定

14

Tektronix

### 应用二 频率异常响应特性测试

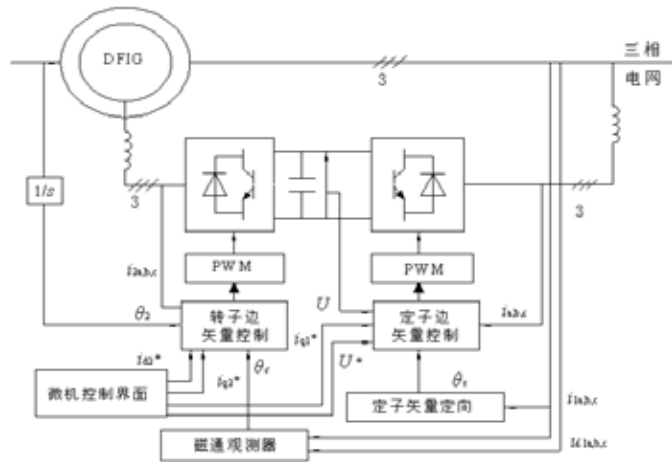
- 计算整个过程的频率变化曲线，测试从频率超标点到变流器切断的过程。
  - 高分辨率采集
  - 使用频率趋势计算，得到整个过程中每个周期的频率
    - 公式:  $Trend(Freq(CH1))$
  - 定位频率最大变化点
  - 测量频率超标到系统切出的过程



15

Tektronix

### 应用三 PWM调制测试



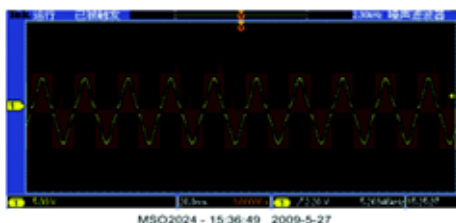
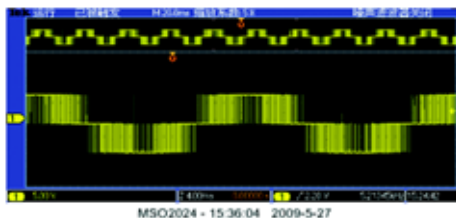
设计人员需要测量变流器的IGBT器件的驱动脉冲信号是否按照设定的规律运行，需要一种直观观测PWM信号的方法，特别是转子侧在不同工况下的驱动情况

16

Tektronix

### 应用三 PWM调制测试（FilterVu功能）

- SPWM、SVPWM、直接转矩控制等控制理论的本质是IGBT门级驱动按照设计规律变化
- 工程师需要测量变频输出电压与PWM信号是否一致
- 泰克方案：
  - 泰克示波器独特的FilterVu功能可以滤掉输出电压信号的PWM方波波形，显示出PWM变化趋势

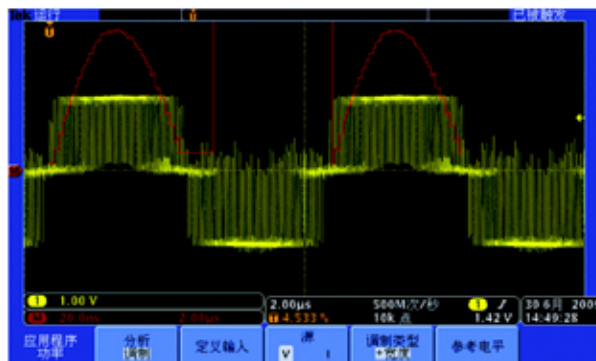


17

Tektronix

### 应用三 PWM调制测试（趋势测量功能）

- 使用DPO4PWR的趋势功能，观察PWM输出
- 如果使用DP03000以上示波器+PWR模块，可以使用调制分析的功能，利用正/负脉冲宽度，正负占空比的趋势测量，达到上一节试验的效果。
- 注意，需要根据实际情况，调节参考电平值，正半周时参考电平为正值，负半周时，参考电平为负值。



18

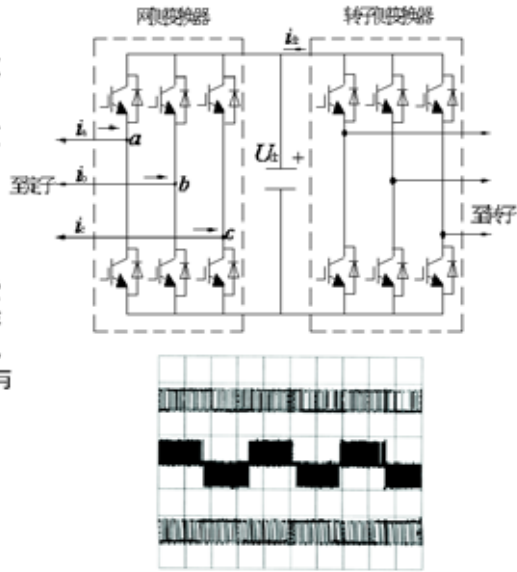
MSO3054 - 15:48:17 2009-6-30

Tektronix



### 应用四 驱动脉冲测量

- 观测同组驱动脉冲时间上的一致性
- 观测同桥臂驱动脉冲间的死区互锁和保护机制是否奏效
- DPO系列示波器
- 优点：使用逻辑关系的波形搜索功能，查询长时间窗口下是否存在同时驱动同一桥臂 IGBT 的情况（CH1 高且 CH2 也为高，或者 CH1 与 CH2 之间的死区互锁延时过短）

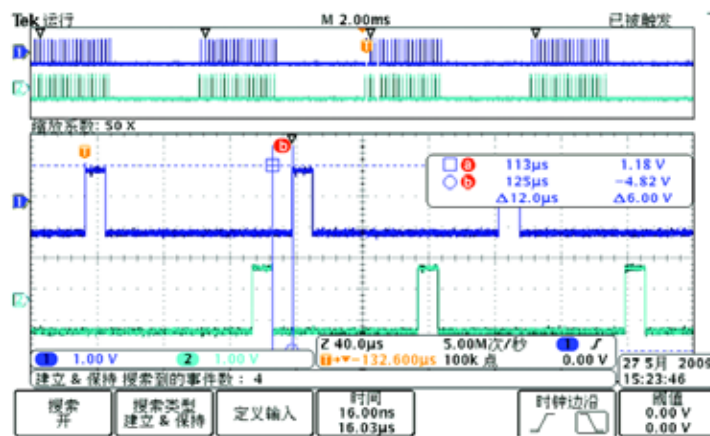


(a) 控制信号 PWM、PWM、及 PWM - PWM 的波形

19



### 应用四 驱动脉冲测量



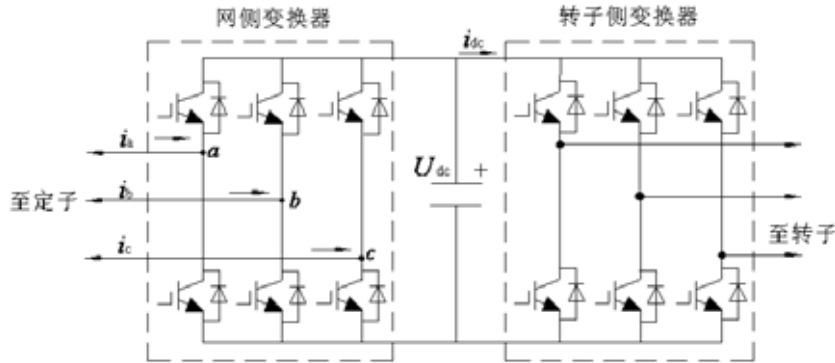
DPO3054 - 15:21:13 2009-5-27

- 使用泰克示波器独有的波形搜索功能，可以快速找到长时间范围内同一桥臂上可能存在的驱动脉冲重叠

20



应用五 功率器件测试（开关损耗测量）



由IGBT电力电子器件组成的双PWM变频器的主电路

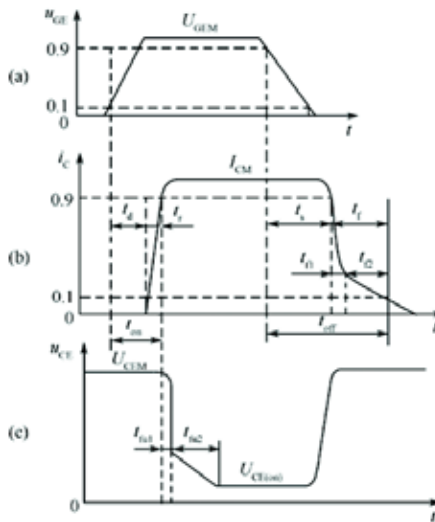
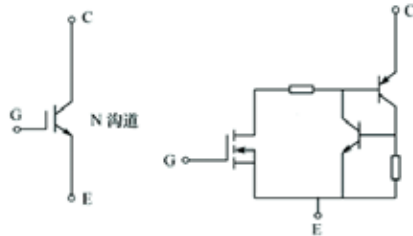
- 变流器的主要原件是IGBT，IGBT本身的损耗不但是造成能量损失的重要原因，过高的损耗还会造成器件温升过高，影响设备的正常工作

21

Tektronix

应用五 功率器件测试（开关损耗测量）

- IGBT的损耗测量
- 在门极的控制下，源极和漏极应当快速的导通和关断。否则，开启和关断的过程会消耗一定的功率，当功率达到一定程度，可能会烧毁IGBT。损失在IGBT上的功率也是变流设备本身功耗的一个重要来源



22

Tektronix

## 泰克的逆变电路损耗测量方案

- DPO系列示波器+THDP/P52系列高压差分探头+TCP系列电流探头
- 优点：
  - 长存储长度能捕获整个工频周期的上千次开关过程
  - 波形搜索功能帮助用户快速找到最小或最大的损耗时刻
  - 高级数学运算和积分功能，帮助用户测量一个工频周期或选定的一段时间内的总损耗
  - 长存储+波形搜索可以实现在负载变化时找到HiPower点

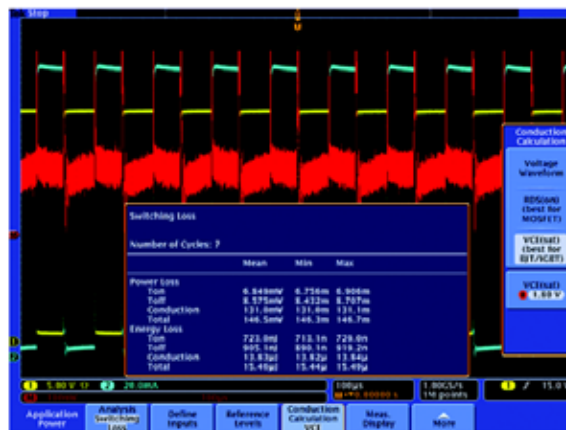


23

Tektronix

## 应用五 功率器件测试（开关损耗测量）

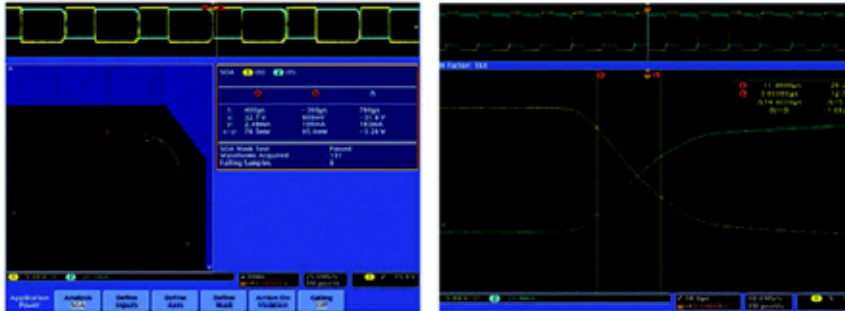
- 开关损耗测试
- 测量IGBT工作状态下的损耗功率和能量
  - Ton
  - Toff
  - Tconduction
  - Ttotal
- 通过波形搜索功能找到高功率损耗点



24

Tektronix

### 应用五 功率器件测试（安全工作区和dv/dt, di/dt）



- 安全工作区测试，检测最大电压、最大电流和最大功率点
  - 可用户自定义工作区
- 测量和查找dv/dt, di/dt时刻，简化门级驱动的检定。

25

Tektronix

### 应用六 直流母线的电流波动测量

- 能源行业的众多设备中的储能环节使用电解电容，其使用寿命与温度直接相关

$$L = L_0 \times 2^{\frac{T_{max} - T_a}{10}} \quad \text{---- 4.1}$$

L : Estimated life(Hr)  
 L<sub>0</sub> : Life at rated temperature (Hr)  
 T<sub>max</sub> : Rated Temperature (°C)  
 T<sub>a</sub> : Ambient Temperature (°C)

- 电容器内部温升与纹波电流的平方成正比

$$\Delta T_c = \frac{I^2 \times R}{\beta \times S} \quad \text{---- 4.2}$$

ΔT<sub>c</sub> : Surface heat rise (°C)  
 I : Ripple current (Arms)  
 R : ESR of capacitor (Ω)  
 S : Surface area of capacitor (cm<sup>2</sup>)  
 β : Heat radiation factor (W/°C·cm<sup>2</sup>)

- 控制纹波电流能有效提升变流装置的整体寿命

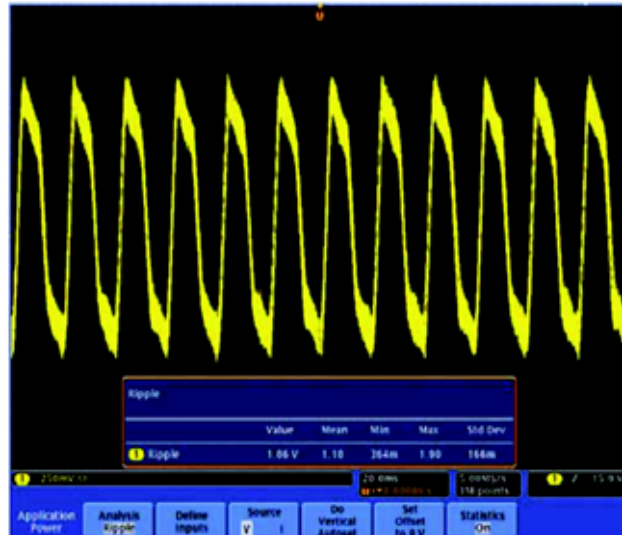
26

Tektronix

## 应用六 直流母线的电流波动测量

### 直流波动测量

- 直接显示百分比或有效值、峰峰值
- 带有统计功能
- 电压和电流波动均可测量

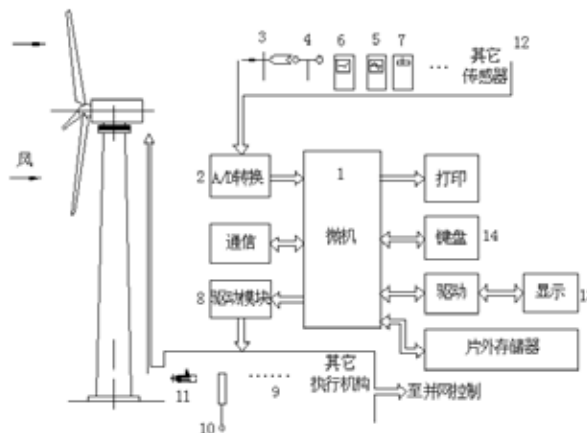


27

Tektronix

## 应用七 伺服驱动系统调试

- 变桨距系统、偏航系统都是典型的伺服系统
- 变桨距系统多为电液伺服系统
- 偏航系统有角度、电缆缠绕等传感器控制

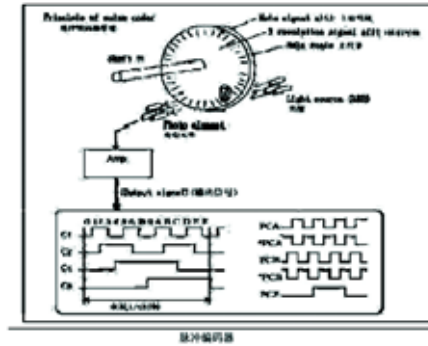


28

Tektronix

### 应用七 伺服驱动系统调试

- 风速、角度和位置传感器是伺服系统的重要组成部分，此外转子电流、网侧电压等信号也需要测量
- 使用MSO示波器的逻辑通道，检测传感器的编码电路输出是否正确。配合长存储示波器，可以调制当位置或角度变化为某一值时（并行总线的一种解码数据）DSP发出启动或终止电机工作的信号

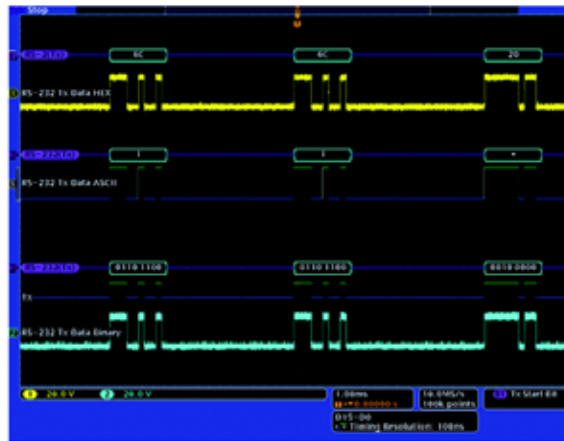


29

Tektronix

### 应用七 伺服驱动系统调试（总线调试）

- 现代风电机组采用了大量的工业总线用于通信，如CAN, RS232/485
- 泰克示波器具有总线解码功能，可以将I2C、SPI、RS232/422/45、CAN/LIN、并行总线解码、触发，并和模拟信号一起完成系统级的调试。



30

Tektronix

## 应用八 电能质量测量

- 有功功率定义:

$$P=U*I*\cos\phi$$

U是电压的有效值 (Urms), I是电流的有效值 (Irms),  $\phi$  是电压和电流的相角

- 瞬时功率积分法 (示波器的功率测量方法)

$$p=u*i$$

一定时间内的功率

$$P=\int u*i dt$$

- 使用第一种方法, 电压和电流必须是有效值。对于含有高次谐波的情况, 很难准确测量有效值
  - 普通的功率测量仪器只测量工频有功功率, 仪器的带宽只有几KHz。无法测量出高次谐波
  - 测量变流器输出功率, 测试仪器必须有足够高的带宽

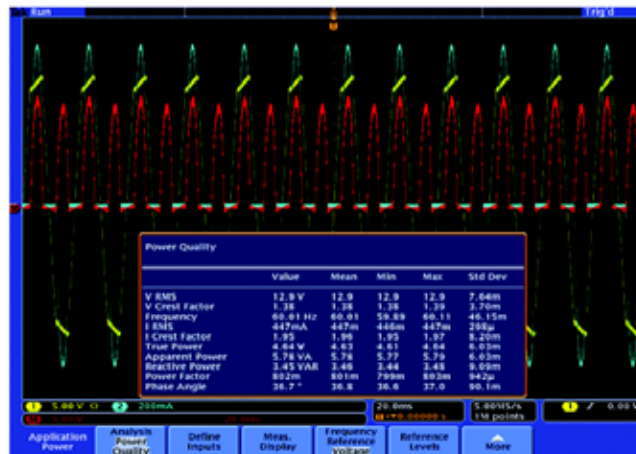
31

Tektronix

## 应用八 电能质量测试

电能质量测试:

- 电压有效值
- 电流有效值
- 电压的波峰因数
- 电流的波峰因数
- 有功功率
- 视在功率
- 无功功率
- 功率因数
- 相角



32

Tektronix

## 并网电流谐波要求

国网公司对于光伏电站并网的谐波要求

表 2 注入公共连接点的谐波电流允许值

标称电压(kV)	基准短路容量(MVA)	谐波次数及谐波电流允许值(A)											
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24
6	100	43	34	21	34	14	21	11	11	8.5	16	7.1	13
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7
66	300	16	13	8.1	13	5.1	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5
110	750	12	9.6	6	9.6	4	6.8	3	3.2	2.4	4.3	2	3.7
		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0.38	10	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12
6	100	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8
10	100	3.7	4.1	3.2	6	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1
35	250	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5
66	300	2.3	2.6	2	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6
110	750	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1	1.9

表 1 谐波电压限值要求

谐波次数	限值要求 (%)
2~9	4.0
11~16	2.0
17~20	1.5
21~24	0.6
25~30	0.3

表 2 谐波电压限值要求

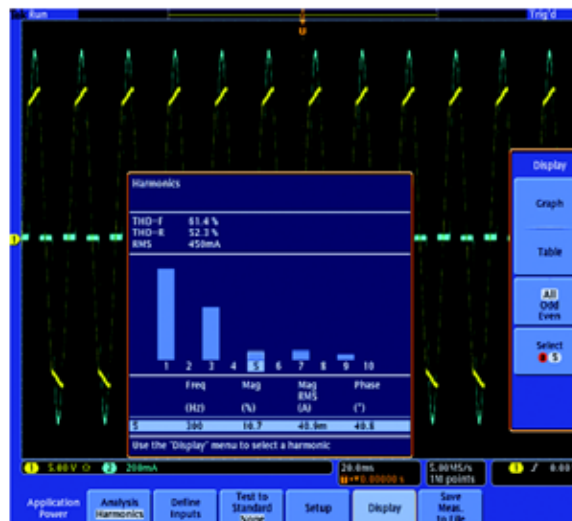
谐波次数	限值要求 (%)
2~10	1.0
11~16	0.5
17~20	0.375
21~24	0.15
25~30	0.075

总谐波<5%

## 应用八 电能质量测试

### 谐波测试

- 测量电压或电流的谐波
- 显示THD和真有效值数据
- 基波可以是50Hz, 60Hz, 400Hz或用户自定义。
- 最多显示51次谐波
- 采用IEC61000-3-2、MIL-STD-1399标准, 也可用户自定义
- 棒图显示或图表显示
- 结果可以存成文件





## MSO/DPO系列示波器



4000B系列



3000系列



2000系列

	4000B系列	3000系列	2000系列
带宽	1 GHz, 500 MHz, 350 MHz	500 MHz, 300 MHz, 100 MHz	200 MHz, 100 MHz
通道数量	4条模拟通道 16条模拟通道 (MSO系列)	2条或4条模拟通道 16条模拟通道 (MSO系列)	2条或4条模拟通道 16条模拟通道 (MSO系列)
记录长度	20 M点	5 M点	1 M点
波形捕获速率	>50,000 wfms/s	>50,000 wfms/s	5,000 wfms/s
并行总线分析	是 (MSO系列)	是 (MSO系列)	是 (MSO系列)
适配串行总线分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PC, SPI</li> <li>• CAN, LIN, FlexRay</li> <li>• RS-232/422/485/UART</li> <li>• PS/LJR/J/TDM</li> <li>• LAN, 1553</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PC, SPI</li> <li>• CAN, LIN</li> <li>• RS-232/422/485/UART</li> <li>• PS/LJR/J/TDM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PC, SPI</li> <li>• CAN, LIN</li> <li>• RS-232/422/485/UART</li> </ul>
适配分析软件包	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 电源分析</li> <li>• HDTV和自定义视频</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 电源分析</li> <li>• HDTV和自定义视频</li> </ul>	

35

Tektronix

## 泰克—测试仪器专家

逆变设计，泰克提供给您的不只是示波器



36

Tektronix

# **第四章**

## **泰克测试选型指南**

## 第四章：泰克测试选型指南

# 示波器及探头选型指南

		TPS2000B系列 加TPS2PWR1模块	TDS3000C 加TDS3AAM模块	DPO/MSO4000B DPO/MSO3000系列 加DPOxPWR模块	DPO/MSO5000 加DPOPWR选件
技术指标	带宽	100M–200MHz	100M–500MHz	100M–1GHz	350M–2GHz
	记录长度	2.5K	10K	20M/5M	12.5M/125M(选件)
	采样率 (所有通道同时打开)	2Gs/s	5Gs/s	5Gs/s, /2.5Gs/s	10Gs/s
	示波器最大输入电压	300V rms	150V rms	300V rms	300Vrms,425Vpeak
专用功能	自动化探头校准			√	√
	隔离和浮地通道	√			
	Windows操作系统				√
	电池供电操作	√	√		
	FFT分析功能	√	√	√	√
电能质量 测量	Vrms	自动	自动	自动	自动
	Irms	自动	自动	自动	自动
	有功功率	自动	手工	自动	自动
	无功功率	自动		自动	自动
	视在功率	手工	手工	自动	自动
	功率因数	自动	手工	自动	自动
	波峰因数	自动	手工	自动	自动
	相角	自动	手工	自动	自动
	谐波	自动	手工	自动	自动
	总谐波失真	自动		自动	自动
输入输出 分析	工频纹波	手工	手工	自动	自动
	开关噪声	手工	手工	自动	自动
谐波一致 性测试	EN61000-3-2 一致性预测试	手工		自动	自动
	M L 1399	手工		自动	自动
有源器件 测试	开关损耗测试	手工	手工	自动	自动
	安全工作区测试(SOA)	手工	手工	自动	自动
	动态电阻测试 (di/dt, dv/dt)	手工	手工	自动	自动
	调制分析			自动	自动
无源器件 测试	电感测试				自动
	磁性功率损耗				自动
	磁通量密度		手工	手工	自动
	B-H曲线				自动

# 泰克电流测试解决方案

带宽	峰值脉冲		最大交流 峰值值	最大直流		安培秒积 A*S	钳口直径 mm	接口形式	MDO4000/ DPOMSO 4000B/3000	MSO/DPO 2000	TDS3000C	TPS2000B	TDS2000C /1000C-SC	其他厂家示 波器
	A	A		A	A									
<b>电流测试系统</b>														
TCPA300	DC-100M	50A	60A	5A @ 1AV 30A @ 10AV	50A* $\mu$ S 500A* $\mu$ S	3.8	TekProbe II 和 BNC	•	•	•	•	•	•	•
TCP312	DC-50M	50A	100A	25A @ 5AV 50A @ 10AV	500A* $\mu$ S --	3.8	TekProbe II 和 BNC	•	•	•	•	•	•	•
TCPA300	DC-15M	150A	424A	25A @ 5AV 150A @ 50AV	3000A* $\mu$ S 15000A* $\mu$ S	21X25	TekProbe II 和 BNC	•	•	•	•	•	•	•
TCPA400	DC-2M	750A	1414A	750A	--	21X25	TekProbe II 和 BNC	•	•	•	•	•	•	•
TCP404XL														
<b>直接连接型电流探头</b>														
TCP0030	DC-120M	50A	84A	5A 30A	50A* $\mu$ S 500A* $\mu$ S	3.8	TekVPI	•	•+P					
TCP0150	DC-20M	150A	424A	25A @ 2.5AV 150A @ 150AV	3000A* $\mu$ S 15000A* $\mu$ S	21x25	TekVPI	•	•+P					
TCP202	DC-50M	50A	40A	15A	500A* $\mu$ S	3.8	TekProbe II	• + $\Delta$		•	•+1103	•+1103	•+1103	•+1103
<b>其他电流探头</b>														
P6021	120-60M	250A	15A	0.5A	500A* $\mu$ S	3.8	BNC	•	•	•	•	•	•	•
P6022	935-120	100A	6A	0.2A	9A* $\mu$ S	3.58	BNC	•	•	•	•	•	•	•
CT1	25K-1G	12A	1.4A	0.3A	1A* $\mu$ S	1.78	BNC	•	• $\Omega$	•	•	•	•	•
CT2	1.2K-200K	36A	7A	0.3A	50A* $\mu$ S	1.32	BNC	•	• $\Omega$	•	•	• $\Omega$	• $\Omega$	• $\Omega$
CT6	250K-2G	6A	0.7A	0.2A	0.25A* $\mu$ S	0.8	BNC	•	•					
A621	5-50K	2000A	4000A	--	1A* $\mu$ S	54	BNC	•	•	•	•	•	•	•
A622	DC-100K	100A	200A	100A	--	11.8	BNC	•	•	•	•	•	•	•

- $\Delta$  可以直接连接使用
- +  $\Delta$  连接TPA-BNC适配器使用
- + P 可以直接连接使用，主机需要加配TEKVI电源适配器
- $\Omega$  通过50欧姆终端适配器连接
- +1103 连接1103电源使用
- 纯交流探头
- 交流流探头

详细信息请查阅：<http://www.tek.com/zh/products/accessories/>

## 高压与高压差分探头选型表

类型	型号	最大输入电压 DC+ACpk	最大浮地电压 V	带宽 MHz	上升时间 ns	衰减比	输入阻抗	接口形式	MDO4000/DP OMSO4000B/ 3000	MDO/DPO 2000	TDS3000C	TPS2000B	TDS2000C /1000C-SC	其他厂家示 波器
无源高压	P5100A	1000V 2500Vpk		500	1.75ns	100X	40MΩ 1.5pF	BNC	●	●	●	●	●	●
无源高压	P5122	1000V	600Vrms CATIII	200	2.2ns	100X	100MΩ 4pF	BNC	●	●	●	●	●	●
无源超高压	P6015A	20KV 40KVpk		75	4ns	1000X	100MΩ 3pF	BNC	●	●	●	●	●	●
无源高压	TPP0850	1000V 2500Vpk		800	<700ps	50X	40MΩ 1.5pF	TEK-VPI	●					
无源高压/纹 波信号	TPP0502	300V		500	<700ps	2X	2MΩ 12.7pF	TEK-VPI	●					
类型	型号	差分输入电压 DC+ACpk	共模输入电压 V	带宽 MHz	共模抑制 比 CMRR	衰减比	输入阻抗	接口形式	MDO4000/DP OMSO4000B/ 3000	MDO/DPO 2000	TDS3000C	TPS2000B	TDS2000C /1000C-SC	其他厂家示 波器
中压差分	TMDP0200	±750V ±75V	550V CATI 300V CATIII	200	>-60dB	250X 25X	5MΩ <2pF	TekVPI	●	●+P				
中压差分	P5202A	±640V ±64V	640CATIII	100	>-50dB	200X 20X	5MΩ <4pF	TEKPROBE	●+Δ	●+Δ+P	●	●+1103	●+1103	●+1103
高压差分	THDP0200	±1500V ±150V	1000V CATIII 600V CATIII	200	>-60dB	500X 50X	10MΩ <2pF	TekVPI	●	●+P				
高压差分	P5201	±1300V ±130V	1000 CATIII	25	>-50dB	500X 50X	4MΩ <5.5pF	BNC	●	●	●	●	●	●
高压差分	P5200A	±1300V ±130V	1000 CATIII	50	>-50dB	500X 50X	5MΩ <4pF	BNC	●	●	●	●	●	●
高压差分	P5205A	±1300V ±130V	1000 CATIII	100	>-50dB	500X 50X	5MΩ <4pF	TEKPROBE	●+Δ	●+Δ+P	●	●+1103	●+1103	●+1103
超高压差分	THDP0100	±6000V ±600V	2300CATI 1000 CATIII	100	>-60dB	1000X 100X	40MΩ <2.5pF	TekVPI	●	●+P				
超高压差分	P5210A	±5600V ±560V	2200 CATII	50	>-50dB	1000X 100X	20MΩ <3pF	TEKPROBE	●+Δ	●+Δ+P	●	●+1103	●+1103	●+1103

● 可以直接连接使用  
 ●+Δ 连接TPA-BNC适配器使用  
 ●+P 可以连接使用，主机需要加配TEKVPI电源适配器  
 ●+Δ+P 连接TPA-BNC适配器使用，主机需要加配TEKVPI电源适配器  
 ●+1103 连接1103电源使用  
 详细信息请查阅：<http://www.tek.com/zh/products/accessories/>

# 泰克高压探头

P5100A • TPP0850 • P5120 • P5122 • P6015A 产品技术资料



P5120

## 主要特点和优点

### P5100A

- DC – 500 MHz
- 2500 V<sub>peak</sub>, 1000 V CAT II
- 100X, 支持读数编码
- UL3111-1, EN61010-1, IEC61010-2-031, CSA1010.1, CSA1010.2.031
- 7-30 pF 补偿范围

### TPP0850

- DC – 800 MHz
- 2500 V<sub>peak</sub>, 1000 V CAT II
- 50X, 支持读数编码
- 设计用于MSO/DPO5000和MSO/DPO4000B系列示波器

### P5120

- 适用于TPS2000系列
- DC – 200 MHz
- 1000 V<sub>RMS</sub> CAT II
- 支持浮动电压最高600 V<sub>RMS</sub> CAT II 或 300 V<sub>RMS</sub> CAT III
- 20X
- 15 – 25 pF 补偿范围
- 适用于TPS2000系列
- UL61010B-2-031, EN61010-2-031, IEC61010-2-031, CSA61010.2.031

### P5122

- 仅适用于TPS2000系列
- DC – 200 MHz
- 在采用DC耦合时, 1000 V<sub>RMS</sub> CAT II<sup>1</sup>
- 支持浮动电压最高600 V<sub>RMS</sub> CAT II
- 100X
- IEC61010-031

### P6015A

- 高压 – 20kV DC/40 kV 峰值(100 ms 脉宽)
- 高带宽 –DC – 75 MHz
- 硅树脂介电材料
- 选配 1000X 读数编码
- 宽补偿范围(7-49 pF)
- 重型通用地线和鳄鱼夹

## 第四章：泰克测试选型指南

### 应用

- 电源设计
- 设计马达驱动器
- 电子镇流器
- 电源半导体
- 开关式控制器件
- UPS 系统
- 电源转换器

\*1 P5122 探头不应用来在偏置大于 300 V DC 的信号上进行 AC 耦合测量。  
P5120 探头推荐用来测量高压 DC 电源上的纹波。

### P5100A 高压探头

P5100A 是一种低输入电容的高压探头(2.5 kV),是为较高频率的应用设计的。探头可以进行补偿,使插件和示波器与 7–30 pF 的标称输入电容相匹配。多种螺钉附件可以简便地连接被测设备。

### TPP0850 高压探头

TPP0850 为高压信号(最高 2500 V<sub>p-p</sub>)提供了业内带宽最高的探头(800 MHz)。它特别适合测试电源半导体和开关式电源,这些器件的开关速度不断提高,以最大限度地降低功率损耗,因此需要更快的上升时间、更高的带宽及电压更高的探头。TPP0850 满足了这些需求,可以用来测量超出标准通用探头电压工作范围、工作电压为 1200 V<sub>RMS</sub> 的开关晶体管电路。它还可以支持要求更快的上升时间功能的新兴电源应用。

### P5120 和 P5122 IsolatedChannel™ 应用

在许多应用中,非常重要的一点是能够把测量与接地隔开,同时隔离通道之间的公共电压。P5120 或 P5122 与 TPS2000 系列数字存储示波器相结合,不仅为接地测量提供了隔离功能,还可以在通道之间实现全面隔离。P5120 探头推荐用于测量高压 DC 电源上的纹波。P5122 探头不应该用在偏置大于 300 V DC 的信号上进行 AC 耦合测量。



P6015A

### P6015A 高压探头

对电压在 2.5 kV 以上的重型高性能测量, P6015A 是行业标准。您可以测量高达 20 kV<sub>RMS</sub> 的 DC 电压及高达 40 kV 的脉冲(峰值, 100 ms 时间周期)。75 MHz 带宽使您能够捕获快速高压信号。

P6015A 采用环保硅树脂化合物介电材料,不需要重新填充。其它特点包括: 7–49 pF 补偿范围,与相邻放大器输入相配的小型补偿框,适用于大多数泰克数字示波器的读数选项。通过使用读数选项,显示的电压幅度值是实际信号值,而不是缩小了 1,000 倍的值。

**注:** 如果在非泰克数字示波器上使用读数版本,可能会导致读数显示错误。

## 特点

## P5100A/TPP0850/P5120/P5122/P6015A

探头	标称长度	衰减	带宽	上升时间 (典型值)	负载	最大输入 V DC 或 RMS	最大浮动 电压	补偿范围, pF	读数
P5100A	2 m	100X	500 MHz	1.75 ns	40 M $\Omega$ /1.5 pF	2.5kV <sub>peak</sub> 1000 V CAT II	无	7-30	是
TPP0850	1.3 m	50X	800 MHz	<700 ps	40 M $\Omega$ /1.5 pF	2.5kV <sub>peak</sub> 1000 V CAT II	无	无	是
P5120	3 m	20X	200 MHz	2.2 ns	5 M $\Omega$ /11.2 pF	1000 V <sub>RMS</sub> CAT II	600 V <sub>RMS</sub> CAT II, 300 V <sub>RMS</sub> CAT III	15-25	无
P5122	1.2 m	100X	200 MHz	2.2 ns	100 M $\Omega$ /4.0 pF	1000 V <sub>RMS</sub> CAT II	600 V <sub>RMS</sub> CAT III	10-22	无
P6015A	3 m	1000X	75 MHz	4.0 ns	100 M $\Omega$ /3pF	20 kV	无	7-49	无
P6015A 选项 1R	3 m	1000X	75 MHz	4.0 ns	100 M $\Omega$ /3pF	20 kV	无	7-49	是

## 订货信息

## P5100A/TPP0850

100x, 2m 高压探头。

**包括:** 电缆成套标记, 鳄鱼夹, 调节工具, 挂勾尖端(小型), 挂勾尖端(大型), 18英寸地线, 6英寸地线, 说明手册(070-8151-04)。

## 推荐附件

附件	说明
013-0291-xx	探头尖端到 BNC 适配器
206-0060-xx	0.080 英寸直径弹簧尖端

## P5120

20X, TPS2000 系列使用的高压探头。

**包括:** 大型可收缩挂勾尖端, 小型可收缩挂勾尖端, 6英寸公共引线, 18英寸公共引线, 大型鳄鱼夹, 彩色电缆标记, 调节工具, 说明手册(071-1463-xx)。

## P5122

00X, TPS2000 系列使用的高压探头。

**包括:** 大型可收缩挂勾尖端, 小型可收缩挂勾尖端, 6英寸公共引线, 18英寸公共引线, 大型鳄鱼夹, 彩色电缆标记, 调节工具, 说明手册。

## P5120、P5122 推荐附件

参阅 P5120、P5122 探头附件。

## P6015A

1000X, 3m 高压探头。

**包括:** 挂勾探头尖端(206-0463-xx); 香蕉插头尖端(134-0016-xx); 鳄鱼夹- 插到地线上(344-0461-xx); 地线(196-3363-xx); 携带箱(016-1147-xx); 说明手册(070-8223-xx)。

## 选项(仅 P6015A)

选项	说明
选项 1R	3m 长, 带读数

## 服务(仅 P6015A)

选项	说明
选项 C3	三年校准服务
选项 C5	五年校准服务
选项 D1	校准数据报告
选项 D3	三年校准数据报告(要求选项 C3)
选项 D5	五年校准数据报告(要求选项 C5)
选项 R3	三年维修服务
选项 R5	五年维修服务



# 泰克高压差分探头

TMDP0200 • THDP0200 • THDP0100 • P5200A • P5202A • P5205A • P5210A



## 主要特点和优点

- 高达 200 MHz 的带宽
- 高达 6000 V 的差分电压(DC + 峰值 AC)
- 高达 2,300 V 的共模电压(RMS)
- 过量程指示灯
- 经过安全认证
- 可切换衰减
- 可切换带宽限制

## 应用

- 浮地测量
- 开关电源设计
- 马达驱动器设计
- 电子镇流器设计
- CRT 显示器设计
- 电源转换器设计和服务
- 电源设备评估

## 安全的高压探头解决方案

泰克提供广泛的一系列高压探测解决方案,用户可以安全准确地进行浮地测量。

THDP0100 和 P5210A 拥有泰克最大的差分动态范围功能, 允许用户安全地测量高达  $\pm 6000\text{ V}$  的电压。THDP0100 支持高达 100 MHz 的带宽, 在 1/1000 增益时支持高达 2500 V/ns 的转换速率。这些探头带有两种规格的挂钩尖端, 拥有过量程可视和声音指示灯, 在超过探头的线性量程时向用户发出警报。

THDP0200 和 P5205A 有源差分探头能够安全地测量高达  $\pm 1500\text{ V}$  的电压。这些探头可以在 IGBT 电路中高效进行测量, 如马达驱动器和电源转换器。THDP0200 支持高达 200 MHz 的带宽, 在 1/250 增益时支持高达 275 V/ns 的转换速率。

TMDP0200 和 P5202A 是为中压应用设计的, 可以满足高达  $\pm 750\text{ V}$  的差分测量要求。这些探头衰减范围较低, 提供了更好的信噪比。

P5200A 可以用于任何示波器, 使得用户能够在示波器接地的情况下安全地测量浮地电路。P5200A 有源差分探头把浮地信号转换成参考地电平的低压信号, 然后可以在任何参考地电平的示波器上安全简便地显示这些信号。

**警告:** 为确保安全操作, 不要把 P5200A 高压差分探头用于带有浮地输入(隔离输入)的示波器, 如泰克 TPS2000 和 THS3000 系列示波器。P5200A 高压差分探头要求带有接地输入的示波器或其它测量仪器。

## 连接选项

TMDP 和 THDP 系列探头配备 TekVPI® 接口, 可以在示波器与探头之间实现智能通信。按探头菜单按钮, 将在示波器显示屏上启动探头控制菜单, 可以进入所有相关探头设置和控制功能。这些探头是为在 TekVPI® 示波器上操作而设计的, 而不要求 TPA-BNC 适配器。

P52xxA 系列探头配备泰克 TekProbe® 接口, 把标度信息传送给示波器。它可以直接连接配有 TekProbe® 接口的示波器, 在使用 1103 TekProbe® 电源时, 可以直接连接任何示波器。

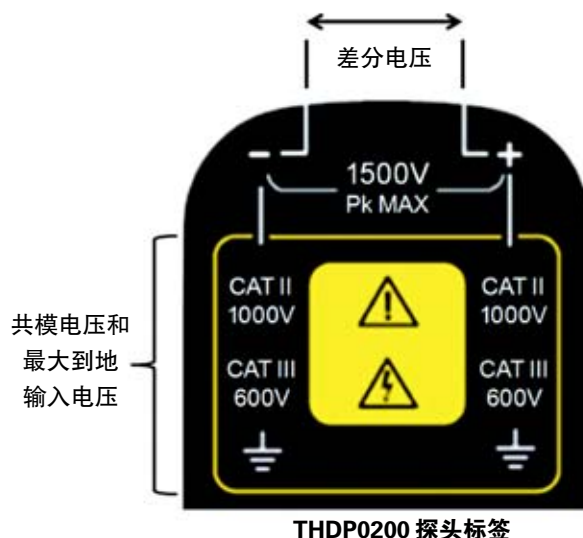
## 特点

## 带有 TekVPI® 接口的探头

特点	TMDP0200	THDP0200	THDP0100
衰减	25X / 250X	50X / 500X	100X / 1000X
差分电压	250X: ± 750 V 25X: ± 75 V	500X: ± 1500 V 50X: ± 150 V	1000X: ± 6000 V 100X: ± 600 V
共模电压	± 750 V	± 1500 V	± 6000 V
最大到地输入电压	550 V CAT I 300 V CAT III	1000 V CAT II 600 V CAT III	2300 V CAT I 1000 V CAT III
带宽	200 MHz	200 MHz	100 MHz
上升时间	<1.8 ns	<1.8 ns	<3.5 ns
转换速率	1/250 增益时 <275 V/ns	1/500 增益时 <650 V/ns	1/1000 增益时 <2500 V/ns
探头尖端输入阻抗	5 MΩ    <2 pF	10 MΩ    <2 pF	40 MΩ    <2.5 pF
典型 CMRR	DC: >-80 dB 1 MHz: >-60 dB 3.2 MHz: >-30 dB 50 MHz: >-26 dB	DC: >-80 dB 1 MHz: >-60 dB 3.2 MHz: >-30 dB 50 MHz: >-26 dB	DC: >-80 dB 1 MHz: >-60 dB 3.2 MHz: >-30 dB 100 MHz: >-26 dB
电缆长度	1.5 m	1.5 m	1.5 m

## 带有 TekProbe® 接口的探头

特点	P5200A	P5202A	P5205A	P5210A
衰减	50X/500X	20X/200X	50X/500X	100X/1000X
差分输入电压	500X: ± 1300 V 50X: ± 130 V	200X: ± 640 V 20X: ± 64 V	500X: ± 1300 V 50X: ± 130 V	1000X: ± 5600 V 100X: ± 560 V
共模电压	± 1300 V	± 640 V	± 1300 V	± 5600 V
最大额定输入电压 (每一侧接地额定值)	1000 V CAT II	450 V CAT II 300 V CAT II	1000 V CAT II	2300 V CAT II 1000 V CAT III
带宽	50 MHz	100 MHz	100 MHz	50 MHz
差分输入阻抗	10 MΩ, 2 pF	5 MΩ, 2 pF	10 MΩ, 2 pF	40 MΩ, 2.5 pF
每个输入和接地之间的输入阻抗	5 MΩ, 4 pF	2.5 MΩ, 4 pF	5 MΩ, 4 pF	20 MΩ, 5 pF
典型 CMRR	DC: >80 dB 100 kHz: >60 dB 3.2 MHz: >30 dB 50 MHz: >26 dB	DC: >80 dB 100 kHz: >60 dB 3.2 MHz: >40 dB 50 MHz: >30 dB	DC: >80 dB 100 kHz: >60 dB 3.2 MHz: >40 dB 50 MHz: >30 dB	
电缆长度		1.8 m		



THDP0200 探头标签

1. 这是探头(+)输入引线和(-)输入引线之间可以测量的最大量程。如果超过这些限制，输出可能会被削波。
2. 最大共模电压和最大到地输入电压(RMS)是每条输入引线(+/-)可以来自接地的最大电压。

## 订货信息

## P5200A、P5202A 和 P5205A

高压差分探头。

包括：2 个挂钩尖端(AC280-FL)，2 个钳子夹(AC283-FL)，2 个鳄鱼夹(AC285-FL)，2 条延伸电缆(196-3523-00)。

注：在订货时请指明电源线选项。

## 电源插头选项(仅适用于 P5200A)

选项	说明
选项 A0	美国电源插头
选项 A1	欧洲电源插头
选项 A2	英国电源插头
选项 A3	澳大利亚电源插头
选项 A5	瑞士电源插头
选项 A6	日本电源插头
选项 A10	中国电源插头
选项 A11	印度电源插头
选项 A12	巴西电源插头

## TMDP0200 和 THDP0200

高压差分探头。

包括：2 个挂钩尖端(AC280-FL)，2 个钳子夹(AC283-FL)，2 个鳄鱼夹(AC285-FL)，2 条延伸电缆(196-3523-00)，2 条测试线(TP175-FL)，1 个高压差分浏览器(THV-BROWSER)，1 个探头固定装置(TPH1000)。

## TMDP0100 和 P5210A

高压差分探头。

包括：2 个探头尖端，2 个大挂钩夹，2 个小挂钩夹，2 个探头头部(重新订货套件编号 020-3070-00)。

## 第四章：泰克测试选型指南



196-3523-00: 扩展器引线(1.5 m)



AC280-FL: 挂钩夹



AC283-FL: 钳子夹



AC285-FL 鳄鱼夹

### 服务选项

选项	说明
选项 C3	三年校准服务
选项 C5	五年校准服务
选项 D1	校准数据报告
选项 D3	三年校准数据报告(要求选项 C3)
选项 D5	五年校准数据报告(要求选项 C5)
选项 R3	三年维修服务
选项 R5	五年维修服务



020-3070-00: 挂钩夹套件

### 探头和附件额定值下降表(共模, 相对地电平, 用于 P52xxA 系列探头)

附件	说明	TPMDP0200/P5202A	THDP0200/P5200A	THDP0100/P5210A
		450 V CAT I 300 V CAT II	/P5205A 1000 V CAT II 600 V CAT III	2300 V CAT I 1000 V CAT III
196-3523-00	2 条扩展器引线(1.5m)	标配	标配	标配
	2300 V CAT I 1000 V CAT III	450 V CAT I 300 V CAT II	1000 V CAT II 600 V CAT III	2300 V CAT I 1000 V CAT III
AC280-FL	2 个挂钩夹	标配	标配	选配
	1000 V CAT III 600 V CAT IV	450 V CAT I 300 V CAT II	1000 V CAT II 600 V CAT III	1000 V CAT I 1000 V CAT III
AC283-FL	2 个钳子夹	标配	标配	选配
	1000 V CAT III 600 V CAT IV	450 V CAT I 300 V CAT II	1000 V CAT II 600 V CAT III	1000 V CAT I 1000 V CAT III
AC285-FL	2 个鳄鱼夹	标配	标配	选配
	1000 V CAT III 600 V CAT IV	450 V CAT I 300 V CAT II	1000 V CAT II 600 V CAT III	1000 V CAT I 1000 V CAT III
020-3070-00	挂钩尖端套件	选配	选配	标配
	2300 V CAT I 1000 V CAT II	450 V CAT I 300 V CAT II	1000 V CAT II 600 V CAT II	2300 V CAT I 1000 V CAT II
TP175-FL	2 条测试引线	标配(TMDP0200)	标配(THDP0200)	选配
	1000 V CAT III 600 V CAT IV	550 V CAT I 300 V CAT III	1000 V CAT II 600 V CAT III	2300 V CAT I 1000 V CAT III



P52xA 系列探头为任何示波器提供了高压差分测量解决方案。

CE



泰克通过 SRI Quality System Registrar 注册 ISO9001 和 ISO14001

# 泰克电流探头资料



## 主要特点和优点

- AC/DC 电流测量
- DC 到 2 GHz 带宽
- 1 mA 到 20,000 A 测量范围
- 分离铁心(钳式)和固定式结构

## 应用

- 马达驱动器
- 开关电源
- 磁盘驱动器
- 电子镇流器
- 逆变器
- 航空航天
- 数据存储设备读出通道
- 半导体特性分析
- 高频模拟电路设计
- ESD 测试
- 信号注入
- 差分电流测量
- 单次和低重复率电流脉冲测量
- 群延时测量

## 电流测量

泰克提供最广泛的高性能电流探头产品。泰克的电流探头提供同时的交直流电流测量，带宽覆盖从直流到 2GHz，幅度从 1mA 到 20000A。

电流探头测量电子流过导体产生的电场。在电流探头的动态范围内，导体周围的场强被转换为线性的电压输出，并可以在示波器或者其它仪器上进行显示和进一步分析。

泰克提供交流或者交直流电流测量系统，有固定和滑块式可分离铁心二种形式。

## 交流和直流电流测量

交流电流在变压器中，随着电流方向的变化，产生电场的变化，并感应出电压。交流电流探头属于无源设备，无需外接供电。稳定的直流电流却不能在变压器中感应出电流。利用霍尔效应，电流偏流的半导体设备将产生与直流电场对应的电压。所以，直流电流探头是一种有源设备，需要外接供电。

两种电流感应设备在一些输出点都会存在非线性问题。特定的交流电流探头在最大幅度点或者最大频率点，同时在最小幅度点和最小频率点都会产生这种非线性滚降现象。直流电流探头从直流到最大频率点都会是线性的，但是也会有最大和最小测量灵敏度。由于我们经常会遇到同时包含交流和直流成分的信号，通过同一只探头测量交直流成分非常重要。另外，看上去像是交流的波形，比如方波，会导通和开启，但是不会低于零安培，实际上包含了明显的直流成分，不能使用只含变压器的交流电流探头进行准确的捕捉。泰克独特的解决方案是集成霍尔元件和变压器于一体，提供更加灵活的测量范围。



TCP202 交直流电流探头

### 分离式铁心(钳式)与固定式铁心

为精确测量场强,我们需要探头铁心完全环绕导线。泰克提供二种机械结构的探头类型:分离式铁心和固定式。分离式(钳式)提供更大的灵活性。通过精密的加工与生产,分离铁心式探头可以钳在导线上,而不需要切断导线。

固定铁心式电流互感器(CT)提供小尺寸和非常高的频率响应,测量非常快,小幅度的电流脉冲和交流信号。它们是专门用以永久性或者半永久性安装在电路中的设备,并有电缆方便地连接或者断开。

### 安培秒乘积

正如前面介绍的,当电流“太大”的时候,变压器铁心材料会由于饱和而产生非线性。“太大”是电流幅度和频率共同作用的结果。电流平均幅度和乘以脉冲宽度称为“安培秒乘积”。

每一探头都有安培秒指标(参看电流探头选择指南表)。如果信号不超过这一指标,电压输出将会是线性的,测量结果就是准确的。

泰克的电流测量系统中还使用一种利用相反的电流互相抵消的现象的特别的技术。电流放大器感应导体中的电流值,并提供一个与之大小相等,方向相反的电流与之抵消。这一“偏置电流”消除变压器中的电流,消除可能的铁心损耗。

### 简便的瞬时功率测量

通过采用 P5205 或 P5210 差分探头和 TCP202 电流探头及相应的 TDS 示波器,可以简便地即时测量功率。还可以在屏幕上计算和显示功率能量。探头上的传播时延相互匹配,可以根据时间校准电流波形和电压波形。通过使用示波器的抗偏斜功能,还可以实现额外的精度。



TCP300/400 系列电流探测系统

### 用于任何示波器的 AC/DC 电流探头 – TCP300/400 系列

TCP312, TCP305, TCP303 带有电流放大器、功率模块及可供选择的四种钳式电流探头,从 DC 到 100 MHz 实现了精确的 AC 和 DC 波形测量。霍尔效应设备电路与泰克电路技术相结合,保证了广大客户预期的卓越的泰克电流探头性能。

### 通用电流探头

A600 系列电流探头可以用于 DMM、Tek Meter® 或示波器。

### 用于任何示波器的 AC 电流探头

分芯 P6021 和 P6022 电流探头在广泛的频率上提供了通用 AC 电流测量功能。这些探头可以用于 1 MΩ 系统。

### 用于泰克 TDS 示波器的 AC/DC 电流探头

TCP202 是为直接连接 TEKPROBE 示波器接口专门设计的通用分芯 AC/DC 电流探头。



CT-6 在线电流探头

### 在线电流探头

CT-6 电流探头具有非常小的波形因数,可以接入当前的读/写前置放大器。CT-1 和 CT-2 电流探头是为永久或半永久在线安装而设计的。实芯变流器带有一个小孔,在电路组装过程中,传送电流的导体将穿过这个小孔。CT-1 和 CT-2 包括一条 42 英寸(107 cm) P6041 探头电缆。

# AC/DC 电流探头

## TCP0030 产品技术资料



### 主要特点和优点

- 简便易用，准确地进行 AC/DC 电流测量
- 直接连接采用新型 TekVPI™ 探头接口的 DPO7000 和 DPO4000 系列示波器
- 在示波器显示屏上自动确定单位标度和读数
- 分芯结构，简便地连接电路
- DC – >120 MHz 带宽
- 30 A<sub>RMS</sub> 最大电流功能
- 50 A 峰值电流功能

- 典型 DC 增益误差低于 1%，精度高
- 准确地测量低至 1 mA 的电流电平
- 低噪声和 DC 漂移
- 简便地消磁和自动清零
- 在探头硬件中及通过访问简便的示波器 UI 显示菜单提供设置控制和探头状态 / 诊断指示灯
- 经过美国和加拿大安全认证

### 应用

- 电源
- 半导体器件
- 逆变器 / 电源转换器
- 电子镇流器
- 工控电子 / 消费电子
- 移动通信
- 马达驱动器
- 交通运输系统

### TCP0030

TCP0030 是一种简便易用的高性能 AC/DC 电流探头，是为用于及直接连接 DPO7000 和 DPO4000 系列示波器上使用的 TekVPI™ 探头接口设计的，而无需使用额外的电源。这款 AC/DC 电流测量探头提供了 >120 MHz 的带宽，并可以选择 5 A 和 30 A 量程。它还提供了杰出的低电流测量功能，支持低至 1 mA 的电流电平精度，这对满足当前极具挑战性的电流测量需求至关重要。

**特点**

带宽— DC –  $\geq 120$  MHz。

上升时间—  $\leq 2.92$  ns。

最大 RMS 电流— 30 A。

最大峰值脉冲电流— 50 A。

最低灵敏度—

1 mA (在支持 1 mV/div 设置的示波器上)。

AC 耦合(在支持 ACD/DC 耦合的示波器上)。

电流范围— 5A 和 30A。

最大裸线电压— 仅使用绝缘线。

**典型特点**

DC 精度—

$\pm 1\%$  典型值。

$\pm 3\%$  保障值。

最大安培秒乘积—  $500 \text{ A} \cdot \mu\text{s}$  (在 30A 范围内)。

插入阻抗—

$1 \text{ m}\Omega @ 10 \text{ kHz}$

$3.5 \text{ m}\Omega @ 100 \text{ kHz}$

$0.08 \Omega @ 1 \text{ MHz}$

$0.15 \Omega @ 10 \text{ MHz}$

$0.7 \Omega @ 100 \text{ MHz}$

$0.85 \Omega @ 120 \text{ MHz}$

信号延迟—  $14.5 \text{ ns}$ 。

**环境**

温度—

工作温度： $0^\circ\text{C} - +50^\circ\text{C}$

非工作温度： $-40^\circ\text{C} - +75^\circ\text{C}$

湿度—

工作湿度： $+30^\circ\text{C}$ 及以下时  $5\% - 95\%$  相对湿度(RH)；

$30^\circ\text{C} - +50^\circ\text{C}$ 时  $5\% - 85\%$  相对湿度，无冷凝。

非工作湿度： $+30^\circ\text{C}$ 及以下时  $5\% - 95\%$  相对湿度(RH)；

$30^\circ\text{C} - +75^\circ\text{C}$ 时  $5\% - 85\%$  相对湿度，无冷凝。

高度—

工作高度：最高 3,000 米(10,000 英尺)

非工作高度：最高 12,192 米(40,000 英尺)

**法规标准**

标准标签—

CE(欧盟)

WEEE (欧盟)

**物理特点**

探头头部尺寸	厘米	英寸
高	3.2	1.25
宽	1.6	0.625
长	20	7.77
其它外观尺寸		
电缆长度	200	79
最大导线直径	0.38	0.15
重量		
毛重	1.55	3.44

**功率要求**

TCP0030 由采用 TekVPI™ 探头接口的 DPO7000 和 DPO4000 系列示波器直接供电。

**推荐示波器**

带有 TekVPI™ 探头接口的 DPO7000 和 DPO4000 系列示波器。

**标配保修**

一年保修，包括部件和人工。

**订货信息****TCP0030**

AC/DC 电流探头。

包括：说明手册(071-1812-xx 英语，或 071-1813-xx 日语，或 071-1814-xx 简体中文)<sup>1</sup>，保护罩(016-1923-xx)，探头地线—长 6 英寸(196-3120-xx)，尼龙便携箱(016-1952-xx)。

<sup>1</sup> 在订货时请指明手册语言。

**语言选项**

选项 L5 — 日语说明手册。

选项 L7 — 简体中文说明手册。

**服务选项**

选项 C3 — 三年校准服务。

选项 C5 — 五年校准服务。

选项 D1 — 校准数据报告。

选项 D3 — 三年校准数据报告(要求选项 C3)。

选项 D5 — 五年校准数据报告(要求选项 C5)。

选项 R3 — 三年维修服务。

选项 R5 — 五年维修服务。

**推荐附件**

电流环路，1 圈， $50 \Omega$ ，带有 BNC 连接器，用于性能检验—  
订购 015-0601-50。



泰克通过 SRI Quality System Registrar 注册 ISO9001 和 ISO14001



# AC/DC 电流探头

TCP0150 产品技术资料



TCP0150

### 主要特点和优点

- 简便易用，准确地进行 AC/DC 电流测量
- 直接连接采用 TekVPI 探头接口的 DPO4000、MSO4000 和 DPO7000 系列示波器
- DC – 20 MHz 带宽
- 150 A<sub>RMS</sub> 最大电流功能
- 500 A 峰值电流功能
- 典型 DC 增益误差低于 1%，精度高
- 准确地测量低至 5 mA 的电流电平
- 低噪声和 DC 漂移

- 在示波器显示屏上自动确定单位标度和读数
- ATE 系统远程可编程 GPIB 控制
- 分芯探头头部结构，简便地连接电路
- 简便地消磁和自动清零
- 在探头硬件中及通过访问简便的示波器 UI 显示菜单提供设置控制和探头状态 / 诊断指示灯

### 应用

- 电源
- 半导体器件
- 逆变器 / 电源转换器
- 电子镇流器
- 工控电子 / 消费电子
- 马达驱动器
- 交通运输系统
- 注：要求 DPO7000 系列 3.0.2 或更高版本固件。要求 MSO/DPO4000 2.06 或更高版本固件。

TCP0150 是一种简便易用的高性能 150 A AC/DC 电流探头，是为用于及直接连接 DPO4000、MSO4000 和 DPO7000 系列示波器上使用的 TekVPI™ 探头接口设计的，而无需使用额外的电源。这款 AC/DC 电流测量探头提供了 20 MHz 的频率带宽，并可以选择 25 A 和 150 A 量程。它还提供了杰出的低电流测量功能，支持低至每格 5 mA 的电流电平精度，这对实现高电平和低电平测量信号的宽动态电流范围至关重要。

**特点****保障特点**

特点	说明
带宽	DC - $\geq 20$ MHz(-3 dB)。额定带宽随着频率提高而下降。参见表 1。(从公式上升时间带宽 = .35/ 上升时间计算得出)
上升时间	$\leq 17.5$ ns
最大 RMS 电流	150 A
最大峰值脉冲电流	500 A
最低灵敏度	5 mA (在示波器 1 mV/div 设置上)。AC 耦合(在支持 ACD/DC 耦合的示波器上)
电流范围	25A 和 150A
最大裸线电压	600 V <sub>RMS</sub> CAT I 和 II 300 V <sub>RMS</sub> CAT III

**典型特点**

特点	说明
DC 精度	$\pm 1\%$ 典型值 $\pm 3\%$ 保障值
最大安培秒乘积	
25 A 范围	3,000 A $\mu$ s
150 A 范围	15,000 A $\mu$ s
插入阻抗	0.03 $\Omega$ @ 1 MHz 0.075 $\Omega$ @ 5 MHz 0.125 $\Omega$ @ 10 MHz 0.3 $\Omega$ @ 20 MHz
信号延迟	$\approx 21$ ns
显示的 RMS 噪声	$\leq 500$ $\mu$ A <sub>RMS</sub> (仅探头)

**环境**

特点	说明
温度	
工作温度	0°C - +50°C
非工作温度	-40°C - +75°C
湿度	
工作湿度	+30°C 及以下时 5% - 95% 相对湿度 (RH); 30°C - +50°C 时 5% - 85% 相对湿度, 无冷凝
非工作湿度	+30°C 及以下时 5% - 95% 相对湿度 (RH); 30°C - +75°C 时 5% - 85% 相对湿度, 无冷凝
高度	
工作高度	最高 2,000 米(6,560 英尺)
非工作高度	最高 12,00 米(40,000 英尺)

**物理特点**

外观尺寸	厘米	英寸
电缆长度	2 米	79 英寸
探头头部尺寸		
长	26.8 厘米	10.55 英寸
宽	4.1 厘米	1.6 英寸
高	15.6 厘米	6.13 英寸
最大导线直径	21 mm x 25 mm	0.83 英寸 x 1.0 英寸
重量	公斤	磅
毛重	0.7865	1.734
功率要求	TCP0150 由采用 TekVPI 接口的 DPO4000、MSO4000 和 DPO7000 系列示波器直接供电	

**推荐示波器**

带有 TekVPI 探头接口的 DPO4000、MSO4000 和 DPO7000 系列示波器。

注：要求 DPO7000 系列 3.0.2 或更高版本固件。

要求 MSO/DPO4000 2.06 或更高版本固件。

## 第四章：泰克测试选型指南

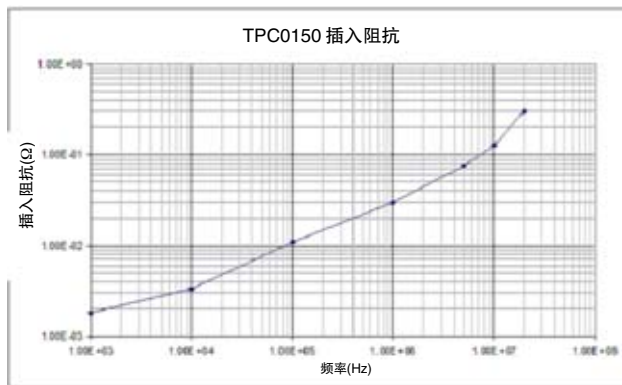


图 1.

TCP0150 最大峰值脉冲对脉宽

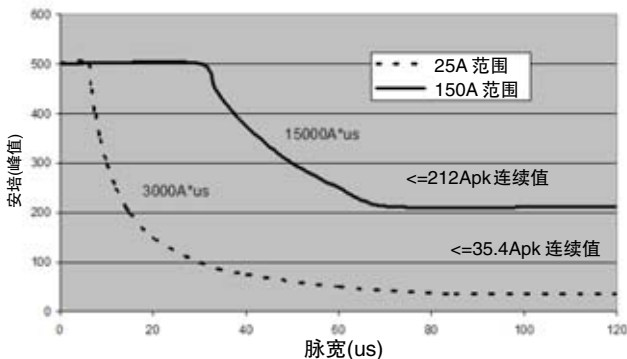


图 2.

### 订货信息

#### TCP0150

AC/DC 电流探头，带有 TekVPI 接口。

包括：保护罩(016-1924-xx)，可溯源校准和数据标准证明。

#### 选项

选项	订购
选项 L0	标配英语说明手册(071-xxxx-xx)
选项 L5	换上日语说明手册
选项 L7	换上简体中文说明手册

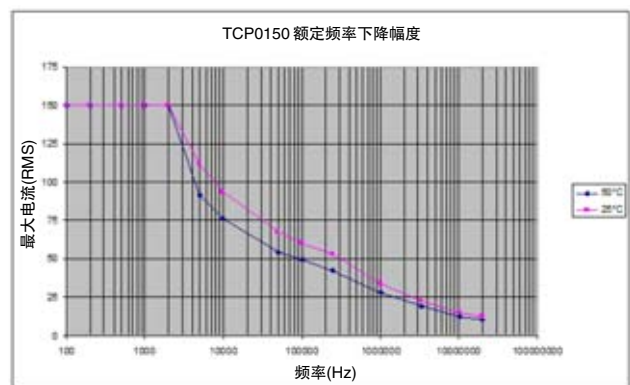


图 3. 施加大于最大连续电流的电流时间不要超过 10 秒，以最大限度地降低加热效应。

### 推荐附件

订购	附件
015-0601-50	电流环路，1圈，50Ω，带有 BNC 连接器，用于性能检验
067-1701-xx	TekVPI 校准夹具
067-1686-xx	DPO7000/70000系列校准/偏移校正夹具

### 服务选项

选项	说明
选项 CA1	校准一次
选项 C3	三年校准服务
选项 C5	五年校准服务
选项 D3	三年校准数据报告(要求选项 C3)
选项 D5	五年校准数据报告(要求选项 C5)
选项 R3	三年维修服务
选项 R5	五年维修服务



泰克通过 SRI Quality System Registrar 注册 ISO 9001 和 ISO 14001



产品遵守 IEEE 标准 488.1-1987, RS-232-C, 泰克标准编码和格式

# 直流耦合电流探头

## TCP202



TCP202 电流探头

### 主要特点和优点

- 操作简便
- 通过 TEKPROBE™ BNC 接头直接与 TDS 系列示波器连接，直接探头识别
- 直流到 50 MHz 带宽
- 15 安培直流 + 峰值交流电流
- 50 安培峰值脉动电流
- $500 \times 10^{-6}$  安培秒乘积
- 安全认证

### 应用

- 马达驱动器
- 开关电源
- 磁盘驱动器
- 电子镇流器
- 逆变器

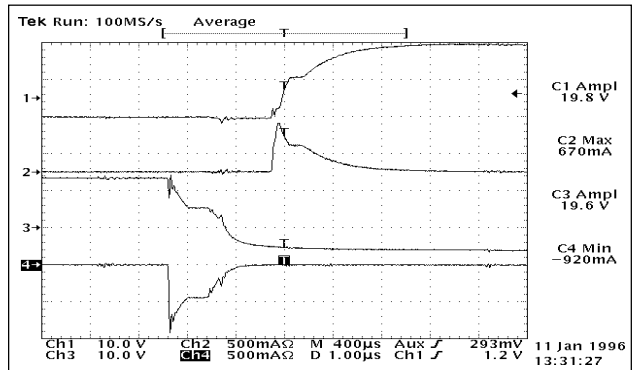
### TCP202 直流耦合电流探头

配合泰克的TDS系列数字示波器，TCP202使得用户可以直接在示波器上读出直流和交流电流值，带来更加清晰准确的显示和测量结果的记录。

TCP202是显示和测量电子电路电流的通用探头。是理想的电源，马达驱动器及其它设备的测试工具。

### 提高电流测量的精度

TCP202 交直流电流探头的精度通常是 3%。但是，如果探头配合特点的 TDS 示波器使用，使用可选件校准器(产品编号: 015-0672-50)对整个系统进行校准，其测试精度可以达到 1%。这一精度提高适合泰克的 TDS 系列示波器，如：TDS5000，TDS7000 系列示波器。



测量 IGBT 电流和电压波形

### 技术参数

带宽 — DC 到 50 MHz.

最大直流 + 峰值交流电流 — 15A

最大峰值脉动电流 — 50 安培

最小灵敏度 — 10 mA/div.

直流精度 —  $\pm 1\%$ (经过探头校准器校正),  $\pm 3\%$

最大裸线电压 — 300 V (CAT I).

典型值:

插入损耗 — 0.002 欧姆 / 1 kHz; 0.1 欧姆 / 5 MHz.

群延时 — 17 ns.

最大线径 — 3.8 mm (0.15 in.).

静电防护 — (IEC 801-2) >8 kV.

安培秒乘积 —  $500 \times 10^{-6}$  安培 \* 秒

上升时间 —  $\leq 7.0$  ns.

### 物理尺寸

重量 — 0.19 kg (0.44 磅).

电缆长度 — 2.2 m (7.2 英尺).

供电 — TCP202 通过 TDS 示波器的 TEK PROBE 接口供电

### 安全

UL 3111-1, CSA1010.1, EN61010-1, IEC61010-1, EN61010-2-032, IEC61010-2-032.

### 订货信息

TCP202 直流耦合电流探头

包括：操作指南(070-9542-00)，参考手册(070-9543-02)

推荐附件

探头校准器 — 015-0672-50.

# 交流 / 直流测量系统

TCPA300 · TCP312 · TCP305 · TCP303 · TCPA400 · TCP404XL



### 主要特点和优点

- 交流 / 直流测量功能
- DC – 100 MHz 电流探头放大器(TCPA300), 当使用:
  - DC – 100 MHz, 30 A DC (TCP312)
  - DC – 50 MHz, 50 A DC (TCP305)
  - DC – 15 MHz, 150 A DC (TCP303)
- DC – 50 MHz 电流探头放大器(TCPA400), 当使用:
  - DC – 2 MHz, 750<sup>1</sup> A DC (TCP404XL)  
(500 A 直流连续电流)
- 直接确定刻度和单位<sup>2</sup> – 示波器屏幕读数通过消除手动计算, 减少了测量误差
- 交流 / 直流输入耦合
- 插入阻抗低 – 降低了被测器件的负荷
- 机械尺寸小 – 减少了桌面空间、贮存和处理更加简便
- 滑块式结构 – 电路连接简便
- 状态指示灯可以通知潜在错误条件
- 降低了直流漂移和噪声
- 经过美国、加拿大和欧洲认证

<sup>1</sup> 额定值随占空比上升而下降。

<sup>2</sup> 要求 TDS TEKPROBE 示波器或带有 TCA-BNC 的 TekConnect 示波器。

### 应用

- 电源、半导体器件、逆变器 / 变压器、电子镇流器、工控 / 消费电子、移动通信、马达驱动器、交通运输系统的开发和分析

### 更高的性能，更简单的操作

TCP300和TCP400系列交流/直流测量系统是为满足当前的电流测量需求设计的非常先进的电流测量系统。这种滑块式探头采用变压器和霍尔效应技术，提供了从DC到100MHz的宽带测量功能，其测量的电流可以低至1mA，也可以高达几千安培(在与CT4变流器一起使用时)。在连接到带有TEKPROBE Level II或Tek Connect(带TCA-BNC)接口的泰克TDS示波器时，可以简单地方便地执行电流测量和计算。

通过增加TDS PWR2功率测量软件等插件，用户可以获得额外的测量功能。由于这种测量功能，电流测量变得前所未有的简便。

### 满足当前的交流 / 直流测量应用需求

TCPA300放大器在与TCP312、TCP305或TCP303探头一起使用时，提供了广泛的一系列电流测量功能，弥补了小电流测量产品与超高电流测量产品之间的空白。这三款探头提供了30A、50A和150A的连续直流测量功能。对更高的电流电平，带有TCP404XL电流探头的TCPA400则可以测量500A的连续直流电流和750A的连续直流电流，其额定值会随着占空比上升而下降。

带TCPA300的TCP312则实现了更高频率的性能，提供了≥100MHz的带宽及最高30A的直流电流。

## 第四章：泰克测试选型指南

### 全面消除测量误差和手动计算工作

这种全新系列的电流测量工具为泰克 TDS3000、TDS400A、TDS500、TDS600、TDS700、TDS5000、TDS6000和TDS7000系列示波器系统的用户提供了自动控制功能及屏幕刻度和单位。状态 LED 可以迅速显示TCP300/400系列的运行状态或在过去可能会导致测量错误的潜在错误条件。

TCP300/TCP400电流测量系统可以无缝地集成TDS系列示波器和TDSPOWER2软件，简便地执行耗时的功率测量和计算。

即使非 TEKPROBE 系统也可以使用 TCPA 300/400 系列，执行相应的电流测量，用户只需把示波器上测得的输出电压乘以 TCPA 300/400 系列量程设定值即可。

### 特点

	TCP312,带 TCPA300	TCP305,带 TCPA300	TCP303,带 TCPA300	TCP404XL,带 TCPA400
带宽(-3 dB)	DC – 100 MHz	DC – 50 MHz	DC – 15 MHz	DC – 2 MHz <sup>1</sup>
上升时间	≤ 3.5 ns	≤ 7 ns	≤ 23 ns	≤ 175 ns
最大额定电流:				
高电流灵敏度范围	10 A/V 量程	10 A/V 量程	50 A/V 量程	1A/mV 量程
DC (连续)	30A	50A	150A	500A (750A <sup>2</sup> )
RMS (正弦)	21.2A	35.4A	150A	500A
峰值脉冲	50A	50A	500A	750A
低电流灵敏度范围	1 A/V 量程	5 A/V 量程	5 A/V 量程	无
DC (连续)	5A	25A	25A	
RMS (正弦)	3.5A	17.7A	17.7A	
峰值脉冲	50A	50A	500A	
DC 精度 (工作温度 0°C 到 50°C)	± 3% 的读数	± 3% 的读数	± 3% 的读数 (10 °C 到 50°C) +3%/-6% 的读数 (0 °C 到 <10 °C)	± 3% 的读数
典型 DC 精度 (工作温度 23°C ± 5°C)	± 1% 的读数	± 1% 的读数	± 1% 的读数	± 1% 的读数
<b>额定值</b>				
最大裸线电压	仅与绝缘导线一起使用		600V <sub>RMS</sub> CAT I & II 300V <sub>RMS</sub> CAT III	
可测量的最低电流 (在 ± 3% 的 DC 精度时)	1 mA	5 mA	5 mA	1A
插入阻抗 (参见下面的曲线)	示波器设为 1mV/格及 20 MHz 限制带宽		示波器设为 1mV/格及 20 MHz 限制带宽	
	在 1 MHz 时 0.08Ω 在 10 MHz 时 0.15Ω 在 50 MHz 时 0.27Ω 在 100 MHz 时 0.7Ω	在 1 MHz 时 0.035Ω 在 10 MHz 时 0.12Ω 在 50 MHz 时 0.4Ω	在 1 MHz 时 0.01Ω 在 5 MHz 时 0.025Ω 在 15 MHz 时 0.1Ω	在 10 MHz 时 0.1mΩ 在 100 MHz 时 0.6mΩ 在 1 MHz 时 8 mΩ 在 2 MHz 时 16 mΩ
<b>典型值</b>				
最大安培秒乘积 (基于放大器量程设置)	50A*μS – 1A/V 500A*μS – 10A/V	500A*μS – 5A/V NA – 10A/V	3,000A*μS – 5A/V 15,000A*μS – 50A/V	NA – 1A/mV
AC 耦合低频带宽	<7 Hz (低通 – 3 dB 点)			
显示的 RMS 噪声 (在 20 MHz 限制带宽时)	≤ 250 μA <sub>RMS</sub>	≤ 1.25 mA <sub>RMS</sub>	≤ 2.5 mA <sub>RMS</sub>	≤ 250 mA <sub>RMS</sub>
信号延迟 (BNC 输出延迟)	17 ns	19 ns	53 ns	103 ns
输入 (探头放大器)	1			
探头开路指示器	支持			
过载指示器	支持			
中止指示器	支持			
不兼容探头指示器	支持			

## 第四章：泰克测试选型指南

### 特点(续)

	TCP312, 带 TCPA300	TCP305, 带 TCPA300	TCP303, 带 TCPA300	TCP404XL, 带 TCPA400
<b>安全认证</b>				
列入美国 NRTL 清单	UL3111-1 (放大器)		UL3111-2-032 ; UL3111-1 (探头和放大器)	
加拿大认证	CAN/CSA C22.2 No.1010.1 (放大器)		CAN/CSA C22.2 No.1010.2.032 CAN/CSA C22.2 No.1010.1 (探头和放大器)	
欧盟标准	EN61010-1/A2 (放大器)		EN61010-1/A2; EN61010-2-032 EN61010-1/A2 (探头和放大器)	
其它	IEC61010-1/A2 (放大器)		IEC61010-2-032 IEC61010-1/A2 (探头和放大器)	
电磁兼容能力	满足：欧盟委员会规定 89/336/EEC, FCC Part 15, Subpart B Class A, AS/NZS 2064.1/2			
供电要求 (TCPA300/TCPA400 放大器)	90 V 到 264 V; 47 到 440 Hz; 50 W 最大 CAT II (自动切换)			
供电要求(探头)	要求 TCPA300 放大器		要求 TCPA400 放大器	
探头型号	TCP312	TCP305	TCP303	TCP404XL
保修	1 年			
<b>探头机械特点</b>				
探头电缆长度	1.5 米 (60 英寸)		2 米 (78.7 英寸)	8 米 (315 英寸)
探头夹规格(最大线号)	3.8 mm (0.15 英寸)		21 mm x 25 mm (0.83 x 1.0 英寸)	
长	20 cm (7.87 英寸)		26.8 cm (10.55 英寸)	26.8 cm (10.55 英寸)
宽	1.6 cm (0.625 英寸)		4.1 cm (1.60 英寸)	4.1 cm (1.60 英寸)
高	3.2 cm (1.25 英寸)		15.6 cm (6.13 英寸)	15.6 cm (6.13 英寸)
重	0.15 公斤(0.33 磅)		0.66 公斤(1.45 磅)	0.88 公斤(1.90 磅)
<b>TCPA300 和 TCPA400 机械特性</b>				
长	17.3 cm (6.8 英寸)			
宽	16.7 cm (6.6 英寸)			
高	9.14 cm (3.6 英寸)			
重	1.14 公斤(2.5 磅)			
<b>环境特点</b>				
工作温度	0 °C到 +50°C (32°F 到 122°F)			
非工作温度	-40°C到 +75°C (-40°F 到 167°F)			
工作湿度	5% 到 95% 相对湿度, 最高 +30°C(86°F)时 5% 到 85% 相对湿度, 最高 +30°C到 +50°C(86°F 到 122°F)时			
非工作湿度	5% 到 95% 相对湿度, 最高 +30°C(86°F)时 5% 到 85% 相对湿度, 最高 +30 °C到 +75 °C (86 °F 到 167 °F)时			
工作高度	最高 2000 米 (6800 英尺)			
非工作高度	最高 12,192 米(40,000 英尺)			

<sup>1</sup> 从上升时间中计算得出。

<sup>2</sup> 额定值随占空比和频率上升而下降。

### 订货信息

#### TCP312

探头; 交流 / 直流, DC 到 100 MHz; 30A DC (要求 TCPA300 放大器)。

#### TCP305

探头; 交流 / 直流, DC 到 50 MHz; 50A DC (要求 TCPA300 放大器)。

#### TCP303

探头; 交流 / 直流, DC 到 15 MHz; 150A DC (要求 TCPA300 放大器)。

#### TCP404XL

探头; 交流 / 直流, DC 到 2 MHz; 500A DC (750A DC, 额定值随占空比上升而下降) (要求 TCPA400 放大器)。

所有 TCP300/TCP400 电流探头均包括: 交流 / 直流探头; 说明书; 探头保护盖; 可溯源的校准证书。

#### TCPA300

放大器; 交流/直流探头, DC到100 MHz, (要求TCP305或TCP312或TCP303探头)。

#### TCPA400

放大器; 交流 / 直流探头, DC 到 50 MHz, (要求 TCP404XL 探头)。

所有 TCPA300/TCPA400 电流探头放大器均包括: 交流/直流探头放大器; 说明书/服务手册; TEKPROBE 接口电缆; 插头对插头BNC电缆(50W); 50W馈通端子; 可溯源的校准证书。

### 选项

#### TCPA300/TCPA400

##### 电源插头选项

选项 A1 — 欧洲插头, 220V, 50 Hz。

选项 A2 — 英国插头, 240V, 50 Hz。

选项 A3 — 澳大利亚插头, 240V, 50 Hz。

选项 A5 — 瑞士插头, 220V, 50 Hz。

选项 A6 — 日本插头, 100V, 110/120V, 60 Hz。

选项 AC — 中国插头, 50 Hz。

选项 A99 — 不带电源线。

### 语言选项

选项 L5 — 日语手册。

所有 TCP300/TCPA300/TCP400/TCPA400 系列

### 服务选项

选项 C3 — 三年校准服务

选项 C5 — 五年校准服务

选项 D1 — 校准数据报告

选项 D3 — 三年校准数据报告(要求选项 C3)

选项 D5 — 五年校准数据报告(要求选项 C5)

选项 R3 — 三年修理服务

选项 R5 — 五年修理服务

### 推荐配件

016-1923-00 — 小型探头保护盖; (用于 TCP305, TCP312, A6302, A6302XL, A6312, TCP202)。

016-1924-00 — 大型探头保护盖; (用于 TCP303, TCP404XL, A6303, A6303XL, A6304XL)。

016-1922-00 — 手提箱; 电流测量系统。

011-0049-02 — 50W 馈通端子。

012-0117-00 — 50W BNC 到 BNC 同轴电缆。

012-1605-00 — TEKPROBE 接口电缆, 把 TCPA300 或 TCPA400 放大器连接到 TDS 系列示波器上。

015-0601-50 — 电流环路, 1圈, 50W, BNC 连接器 (用于 TCP305, TCP312, A6302, A6302XL, A6312, TCP202, TCP303, A6303, A6303XL)。

174-4765-00 — TCPA300/TCPA400 放大器校准适配器。

067-1478-00 — 功率测量偏移校正夹具, 用于 TCP202, TCP305, TCP312, TCP303, A6302, A6312, A6303 系列探头。

CT4 — 交流变流器, 20 kA (与 TCP305, TCP312, TCP202, A6302, A6312 一起使用)。

TDSPWR2 — 功率测量和分析软件, 用于 TDS5000 和 TDS7000 示波器。

如欲在购买示波器时订购:

订购: TDS5052PW2, TDS5054PW2, TDS7054PW2, TDS7104PW2。

如欲作为升级产品订购:

订购: TDS5UP PW2, TDS7UP PW2。



## **第五章**

# **其它泰克测试仪器方案介绍**

# MDO4000 系列混合域示波器

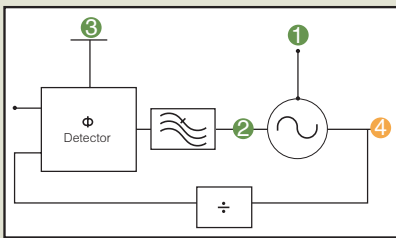
全球首创!

可以同时捕获时间相关的模拟信号、数字信号和总线信号、RF 信号的示波器诞生了!



- RF基本性能**
- 频率范围：两种型号，分别为 50kHz ~ 3GHz 与 50kHz ~ 6GHz
  - 超宽捕获带宽：1GHz 以上
  - DANL：-148dBm (典型值)

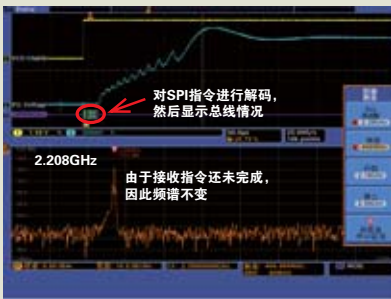
宽：439mm 高：229mm 长：147mm 重：5kg



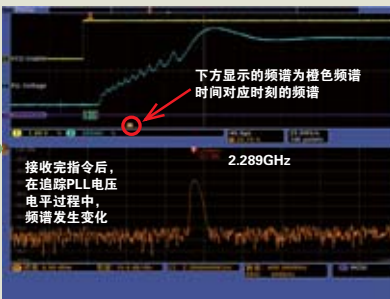
例如，可以列举下面的用法；~ VCO、PLL控制验证实例 ~

在上面的MDO4000系列产品的画面中，按下VCO(①)的启动键之后，用于控制的SPI信号(③)可对PLL发出在2.4GHz范围中改变频率的指令，在VCO上增加电压(②)之后，可以捕捉到频谱(④)变到2.4GHz的情形。与以前使用多台测量仪器不同，现在只需使用一台测量仪器，即可确认VCO的电压电平，另外还可以测量控制指令是否正常发出，频谱是否按指定的功率标准输出，PLL的锁定时间有多长，等等。

[1] 对发出SPI指令时的频谱进行确认



[2] 检查PLL追踪时的频谱变化



[3] 到达2.4GHz，使用光标测量所需时间

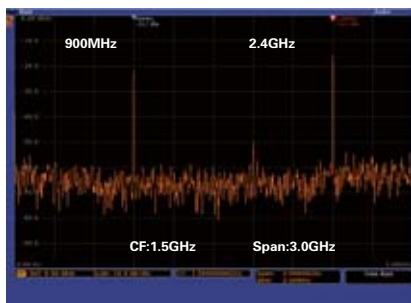


**MDO4000系列适用于以下用途：**

- 用来制定降低EMI的方案
- Zigbee与Bluetooth调试
- 复杂的无线技术调试，尤其是跳频与突发通信技术调试
- 动态分析控制使用的与基带信号联动的通信RF频谱

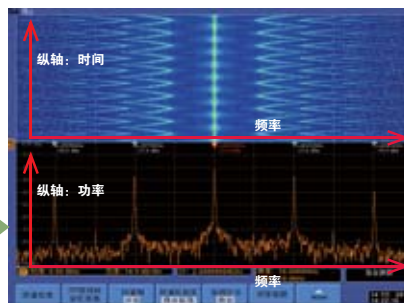
**MDO4000特点：1 捕获宽带RF信号**

一次最多读取3GHz的宽频范围



中心频率：1.5GHz、跨度：3.0GHz、RBW：以3.0MHz进行测量、一次可以读取900MHz与2.4GHz两种ISM波段的RF频谱

频率时间变化使用频谱时间显示。可以对频率变化进行简单确认。



\* 带宽是普通频谱分析仪与测量仪器带宽(大约10MHz)的300倍

**MDO4000特点：2 测量RF信号的时域特性**

可以显示RF的功率、频率和相位随时间变化的轨迹，同时显示频谱(橙色的波形表示RF输入)



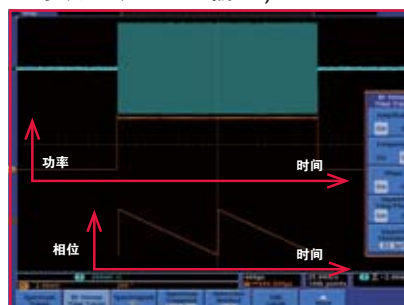
**功率随时间变化显示**

分析RF信号的幅度调制特性



**频率随时间变化显示**

分析RF信号频率随时间变化的特性，如跳频、FSK等

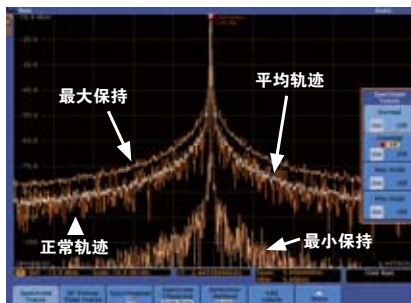


**相位随时间变化显示**

分析RF信号相位随时间变化的特性

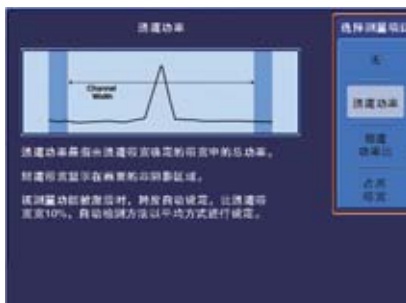
**MDO4000特点：3 完善频谱分析、触发与探测功能**

四种频谱轨迹显示



显示射频信号频谱的四种常用轨迹

RF信号自动测量功能



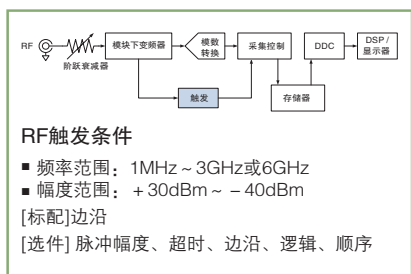
可以自动测量信道功率、邻道功率比、占用带宽

自动峰值标记功能



如果使用人工标记显示功能，还可以显示测量噪声密度和相位噪声参数

使用RF信号作为触发源



使用示波器探头作为频谱分析仪探头



另外还提供了成套近场探头 [型号：119-4146-00]



## 第五章：其它泰克测试仪器方案介绍

### MDO4000技术数据

特点	MDO4054-3	MDO4104-3	MDO4054-6	MDO4104-6
模拟通道	4条模拟通道			
带宽	500 MHz	1 GHz	500 MHz	1 GHz
采样率(1-2通道)	2.5 GS/s	5 GS/s	2.5 GS/s	5 GS/s
采样率(3-4通道)	2.5 GS/s			
数字通道	16条数字通道			
RF通道	1			
频率范围	50 kHz - 3 GHz		50 kHz - 6 GHz	
实时捕获带宽	≥ 1 GHz超宽捕获带宽			
跨度	1 kHz - 3/6 GHz, 1-2-5顺序			
解析带宽	20 Hz - 10 MHz, 1-2-3-5顺序			
参考电平	-140 dBm - +30 dBm, 5 dBm步长			
垂直量程	1 dB/div - 20 dB/div, 1-2-5顺序			
垂直位置	-10 divs - +10 divs			
垂直度量单位	dBm, dBmV, dBμV, dBμW, dBmA, dBμA			
显示的平均噪声电平(DANL)	50 kHz - 5 MHz: <-130 dBm/Hz (<-134 dBm/Hz典型值)			
	5 MHz - 3 GHz: <-148 dBm/Hz (<-152 dBm/Hz典型值)			
	3 GHz - 6 GHz: <-140 dBm/Hz (<-143 dBm/Hz典型值)			
杂散响应				
二阶和三阶谐波失真(>30 MHz)	<-55 dBc (<-60 dBc典型值)			
二阶互调失真	<-55 dBc (<-60 dBc典型值)			
三阶互调失真	<-60 dBc (<-63 dBc典型值)			
其它模数转换杂散信号	<-55 dBc (<-60 dBc典型值)			
映像和IF抑制	<-50 dBc (<-55 dBc典型值)			
残余响应	<-78 dBm			
示波器通道到RF通道串扰	≤ 1 GHz输入频率: 从参考电平<-68 dB >1 GHz - 2 GHz输入频率: 从参考电平<-48 dB			
2 GHz CW时相噪	10 kHz: <-90 dBc/Hz, <-95 dBc/Hz (典型值) 100 kHz: <-95 dBc/Hz, <-98 dBc/Hz (典型值) 1 MHz: <-113 dBc/Hz, <-118 dBc/Hz (典型值)			
电平测量不确定度 (+10 dBm - -50 dBm输入电平)	20°C - 30 °C: < ± 1 dB (< ± 0.5 dB典型值) 超出工作范围时: < ± 1.5 dB			
残余FM	100 ms中 ≤ 100 Hz峰峰值			
最大工作输入电平				
平均连续功率	+30 dBm (1 W)			
损坏前最大DC电压	± 40 V DC			
损坏前最大功率(CW)	+33 dBm (2 W)			
损坏前最大功率(脉冲)	+45 dBm (32 W)(<10 μs脉宽, <1%占空比, ≥ +10 dBm参考电平)			
功率电平触发				
频率范围	1 MHz - 3 GHz		1 MHz - 6 GHz	
幅度范围	+30 dBm - -40 dBm			
极限	CF 1 MHz - 3.25 GHz: 从参考电平-35 dB CF >3.25 GHz: 从参考电平-15 dB			
最小脉冲时间周期	10 μs开点时间, 10 μs最小稳定闭点时间			
RF到模拟通道偏移	<5 ns			
频域轨迹类型	正常, 平均, Max Hold, Min Hold			
时域轨迹类型	幅度随时间变化, 频率随时间变化, 相位随时间变化			
检波方式	+Peak, -Peak, Average, Sample			
自动标记	根据用户可调节门限和漂移值确定1-11个峰值			
手动标记	两个手动标记, 指明频率、幅度、噪声密度和相噪			
标记读数	绝对值或相对值			

※所有MDO4000系列示波器性能与功能和MSO4000B完全相同, 除同时使用3/4通道时的, 其采样率是2.5GS/s。

#### ■ 推荐附件

##### 探头说明

119-4146-00 —— 成套近场探头, 100 kHz - 1 GHz	TPA-BNC —— TekVPI 到TekProbe BNC 适配器
119-6609-00 —— 软单极天线	TEK-USB-488 —— GPIB 到USB 适配器
TPA-N-VPI —— N 到TekVPI 适配器	ACD4000B —— 软手提箱
077-0585-xx —— 服务手册(仅英文)	HCTEK54 —— 硬手提箱(要求ACD4000B)
SIGEXPTE —— NI LabVIEW SignalExpress™ 泰克版 软件(完整版)	RMD5000 —— 机架安装套件
FPGAView-xx —— MSO 支持Altera 和Xilinx FPGA	TEK-DPG —— 偏移校正脉冲发生器
	067-1686-xx —— 偏移校正夹具

#### ■ 多个真正的业内第一

- 业内第一款 集成频谱分析仪的示波器
- 业内第一款 集成的模拟、数字、RF采集系统
- 业内第一款 实现频谱分析时间
- 业内第一款 实现最高达3GHz的捕获带宽
- 业内第一款 拥有综合RF触发
- 业内第一款 拥有自动RF标记
- 业内第一款 提供电流、电压、差分RF探头

#### ■ 推荐探头

泰克提供了100多种不同的探头, 可以满足您的不同应用需求。如需了解泰克提供的完整的探头清单, 请访问 [www.tektronix.com/probes](http://www.tektronix.com/probes)。

##### 探头说明

- TPP0500: 500 MHz, 10X TekVPI 无源电压探头, 3.9 pF 输入电容
- TPP0502: 500 MHz, 2X TekVPI 无源电压探头, 3.9 pF 输入电容
- TPP0850: 2.5 kV, 800 MHz, 50X TekVPI 无源高压探头
- TPP1000: 1 GHz, 10X TekVPI 无源电压探头, 3.9 pF 输入电容
- TAP1500: 1.5 GHz TekVPI 有源单端电压探头。
- TAP2500: 2.5 GHz TekVPI 有源单端电压探头。
- TAP3500: 3.5 GHz TekVPI 有源单端电压探头。
- TDP0500: 500 MHz TekVPI 差分电压探头, ± 42 V 差分输入电压。
- TDP1000: 1 GHz TekVPI 差分电压探头, ± 42 V 差分输入电压。
- TDP1500: 1.5 GHz TekVPI 差分电压探头, ± 8.5 V 差分输入电压。
- TDP3500: 3.5 GHz TekVPI 差分电压探头, ± 2 V 差分输入电压。
- TCP0030: 120 MHz TekVPI 30 A AC/DC 电流探头。
- TCP0150: 20 MHz TekVPI 150 A AC/DC 电流探头。
- P5200A: 1.3 kV, 50 MHz 高压差分探头。
- TMDP0200: 750V 200MHz TekVPI高压差分探头。
- THDP0200: 1500V 200MHz TekVPI高压差分探头。
- THDP0100: 6000V 100MHz TekVPI高压差分探头。
- P5100A: 2.5 kV, 100X 高压无源探头。

#### ■ 三年保修, 包括所有部件和人工费用, 不包括探头。



# DMM4000 系列数字万用表

来自泰克的数字万用表，精测量、大存储、详分析

台式测量仪器系列详细介绍：  
[www.tektronix.com/zh/extraordinary](http://www.tektronix.com/zh/extraordinary)



示波器，万用表，频率计数器，电源，信号发生器等台式系列仪器已相继出现了一个又一个新产品。在一台多功能仪器中实现了多种不同功能，有助于减少调试时间。\*常用软件还附带有SignalExpress，通过它，PC的系列仪器可以集中管理整个检测标准。

## 特色产品 使用DMM4000系列万用表的理由



DMM4000系列数字万用表，提供了最高6.5位分辨率，您可以准确进行电压、电流、电阻、频率、周期、电容和温度测量。您还可以监测和记录测量指标在测量期间的变化或环境范围，查看统计值，了解电路性能如何变化。此外，专用前面板按钮可以快速进入常用功能和参数，缩短设置时间。泰克数字万用表为您最苛刻的测量提供了多功能工具和准确度。

### DMM4000系列的不同之处

### 不要错过这三点

千万不要错过

你可以做什么？

#### 分析模式

- TrendPlot™、直方图，并提供了一个统计测量和分析 (DMM4040型, DMM4050型)

- 绘制测量趋势，以图形方式确定漂移程度和间歇性事件。
- 作为直方图查看结果，发现稳定性或噪声问题。
- 查看多个统计值，如平均值、最小值、最大值和标准偏差，了解信号如何变化。

#### 管理软件

- NI LabVIEW SignalExpress™ Tektronix Edition 泰克标准配备的基本版本

- 使用多个接口端口测量数据记录
- 从一组测试表笔，测量同一信号的两个不同参数
- 复杂的自动化测量和还原过程

#### USB存储器端口

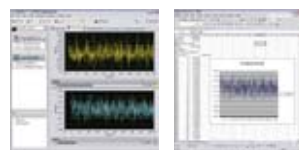
- 前面板USB端口。可以更容易地存储数据和设置 (DMM4040型, DMM4050型)

- 使用前面板端口
- 数据和用户设置可直接记录到USB闪存驱动器

TrendPlot™ 有丰富的分析功能



使用SignalExpress软件，从一个软件环境内部连接和控制多台仪器



前面板USB主机端口。高效的数据存储

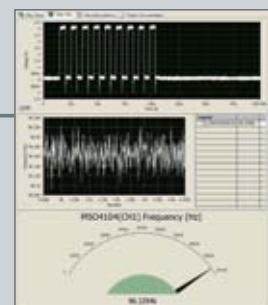


※SignalExpress还拥有专业的版本。

自动测量，分析全面，易于报告

NI LabVIEW SignalExpress™专业版

- 内置功能超过200种：
  - 时间和频域
  - 扩展分析
  - 测量发展趋势
  - 自动扫描功能
  - 极限测试
  - 数据记录
- 直观的拖放界面
- 可定制的图表
- USB即插即用PC连接



## 第五章：其它泰克测试仪器方案介绍



宽度：217mm 高度：88mm 厚度：297mm  
重量：约2.21kg (DMM4020型)，约3.6kg (DMM4040/4050型)

### DMM4020型：

- 5.5位分辨率
- 高达0.015%的基本VDC准确度(1年)
- 真实有效的数值交流
- 测量频率范围：20Hz-1MHz
- 六个设置按钮
- 极限比较模式，指明测试通过/失败

### DMM4040/4050型：

- 6.5位分辨率
- 高达0.0024%的基本VDC准确度(4050型，1年)
- 真实有效的数值交流
- 频率、周期集成测量
- 电容和温度集成测量(型号4050)
- Trendplot™无纸化记录器模式、直方图模式、统计模式
- USB主机前面板端口

基本规格	DMM4020	DMM4040	DMM4050
分辨率	5.5位	6.5位	6.5位
基本VDC准确度：	0.0150%	0.0035%	0.0024%
详细规格	DMM4020	DMM4040	DMM4050
输入	2×4欧姆 4线测量技术		
直流电压输入范围	200mV~1000V	正面和背面 100mV~1000V	
最大输入电压	1000V	1000V	
最大分辨率	1 μV	100nV	
交流电压输入范围	200mV~750V	100mV~1000V	
最大输入电压	750V <sub>rms</sub>	1000V <sub>rms</sub>	
最大分辨率	1 μV	100nV	
输入范围电阻	200Ω~100MΩ	10Ω~1.0GΩ	
最大分辨率	0.001Ω	10 μΩ	
直流电流输入范围	200 μA~10A	100 μA~10A	
最大分辨率	1nA	100pA	
交流电流输入范围	20mA~10A	100 μA~10A	
最大分辨率	0.1 μA	100pA	
测量项目	交流电压，直流电压，直流电流，交流电流，电阻，连续性，二极管，频率		
扩展的测量	-	周期	周期，电容，温度
数学函数	Null, dBm, dB, Min, Max	Null, dBm, dB, Min, Max, Avg, Std Dev, mX+B	
分析能力	上限比较	界限比较，趋势图，柱状图，统计	
显示	双(号)	双(数字/图)	
外部存储	-	USB	
控制端口	后面板RS-232快速连接PC(标配一条USB到RS-232接口适配器电缆)	后面板RS-232, LAN和GPIB, 快速连接PC(标配一条USB到RS-232接口适配器电缆)	
最大外部测量速度	100	995	
附带软件	NI LabVIEW SignalExpress™ Tektronix Edition 软件(基础版)		

附件：196-3520-XX (TL710) 测试线组×1, 备用保险丝, 安全性/手动安装, RS-232的USB适配器电缆, NI LabVIEW SignalExpress™泰克版软件(基础版), 电源线, 校准规范声明

### ▪ 推荐附件

- 196-3520-xx —— 测试线组 (TL710)
- TL705 —— 1000V电阻测量试验的2×4欧姆导线
- TL725 —— 2×4欧姆导线表面贴装器件
- TP750 —— 100Ω RTD温度探头(只适用于4050型)
- SIGEXPTE —— NI LabVIEW SignalExpress™ Tektronix Edition泰克版软件(专业版)
- HCTEK4321 —— 仪器硬手提箱(建议配合仪器软手提箱使用)
- ACD4000 —— 仪器软手提箱
- RMU2U —— 机架安装套件

## 推荐要点

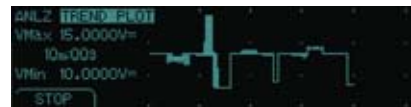
### 专用DC泄漏电流测量(4020型)



前面板USB主机端口。  
高效的数据存储



DMM4040/4050型号搭载了TrendPlot™  
有丰富的解析功能



- 三年保修，涵盖所有部件和人工费用，不包括探头。



## 一系列功能，以满足您的需要！

欢迎查阅DMM4000技术系列丛书，了解最全面的功能。

<http://www.tektronix.com/zh/bench-campaign>

“Raretara捕获了小的漏电流...”

→ DMM4000使你衡量自己的水平

“电路的稳定性将是随着时间的推移...”

→ DMM4000用于记录如果这一趋势出现

“可更容易地精确测量电阻...”

→ 如用DMM4000可以将测量误差降至最小

“Raretara的统计输出功率稳定...”

→ DMM4000的统计数据功能令人感到惊讶



# AFG3000 系列任意波形 / 函数发生器

## 新一代信号发生技术



宽度: 330mm 高度: 156mm 深度: 168mm 重量: 约4.5kg

- 双通道型号
- 输出频率: 10MHz, 25MHz, 100MHz, 240MHz的正弦波
- 输出频率: 5MHz, 12.5MHz, 50MHz, 120MHz的脉冲波
- 上升/下降时间可变脉冲 (高达2.5ns)
- 14位, 250MS/s, 1GS/s或2GS/s的任意波形
- 5.6英寸的显示屏

- 小巧轻便, 操作简单
- USB存储设备插入前面板中
- 大屏幕一目了然地显示所有相关波形参数和波形图。
- 用户可以选择12种不同的标准波形
- 可作为脉冲发生器
- 到50 欧姆输入的幅度高达20Vp-p

基本规格	高输出型	通用模式					
	AFG3011	AFG3021B	AFG3022B	AFG3101	AFG3102	AFG3251	AFG3252
频道	1	1	2	1	2	1	2
噪声带宽 (-3dB)	10MHz	25MHz		100MHz		240MHz	
幅度 (50Ω)	20mV <sub>p-p</sub> ~ 20V <sub>p-p</sub>	10mV <sub>p-p</sub> ~ 10V <sub>p-p</sub>		20mV <sub>p-p</sub> ~ 10V <sub>p-p</sub>		50mV <sub>p-p</sub> ~ 5V <sub>p-p</sub> (200MHz以下)	
输出范围	±20V	±5V		±10V		±5V	

详细规格	高输出型	通用模式					
	AFG3011	AFG3021B	AFG3022B	AFG3101	AFG3102	AFG3251	AFG3252
波形	正弦, 方波, 锯齿波, 脉冲, 和其他 (sin(x)/x, 指数增长, 指数下降, Gaussian, Lorenz, Haversine), DC, 噪声, 任意波形						
正弦波	1μHz~10MHz	1μHz~25MHz		1μHz~100MHz		1μHz~240MHz	
方形波	1μHz~5MHz	1μHz~12.5MHz		1μHz~50MHz		1μHz~120MHz	
锯齿状波	1μHz~100kHz	1μHz~250kHz		1μHz~1MHz		1μHz~2.4MHz	
其它波形	1μHz~100kHz	1μHz~250kHz		1μHz~1MHz		1μHz~2.4MHz	
噪声类型	白高斯						
DC (50Ω)	-10V~+10V	-5V~+5V		-5V~+5V		-2.5V~+2.5V	
脉冲	1mHz~5MHz	1mHz~12.5MHz		1mHz~50MHz		1mHz~120MHz	
脉冲宽度	80.00ns~999.99s	30.00ns~999.99s		8.00ns~999.99s		4.00ns~999.99s	
分辨率	10ps或五数位						
脉冲占空比例	0.001至99.1000% (受脉冲宽度限制)						
边缘过渡时间	50ns~625s	18ns~625s		5ns~625s		2.5ns~625s	
分辨率	10ps或四数位						
其它波形	1mHz~5MHz	1mHz~12.5MHz		1mHz~50MHz		1mHz~120MHz	
其它波形 (突发模式)	1mHz~2.5MHz	1mHz~6.25MHz		1mHz~25MHz		1mHz~60MHz	
有效模拟带宽 (-3dB)	8MHz	34MHz		100MHz		225MHz	
非易失性存储器	4波形						
波形内存和任意采样率	2~128K; 250MS/s			16K~128K; 250MS/s 2~16K; 1GS/s		16K~128K; 250MS/s 2~16K; 2GS/s	
垂直分辨率	14位						
上升/下降时间	80ns以下	20ns以下		8ns以下		3ns以下	
脉宽 (RMS)	4ns	4ns		1ns (1GS/s) 4ns (250MS/s)		500ps (2GS/s) 4ns (250MS/s)	
调制	AM/FM/PM/FSK/PWM						
其他输出模式	扫描 (线性, 对数), 脉冲组 (触发器, 截止)						
频率/分辨率设置	1μHz或12数位						
时基稳定性	±1ppm/年						
振幅分辨率	输入/输出						
外部参考	输入/输出	仅输入		输入/输出		输入/输出	
接口	USB1.1 / LAN / GPIB (SCPI-1999.0, IEEE488-3标准兼容)						

附件: 快速入门用户手册, USB线, CD-ROM光盘 (程序员手册, 服务手册中, LabVIEW/IVI驱动程序包括在内), 光盘 (ArbExpress® 软件), 电源线, 校正证明书 (英语)

### 推荐附件

- RM3100 — 机架安装套件
- 013-0345-XX — 保险丝适配器, BNC-P到BNC-R (仅可被AFG3011使用)
- 159-0454-XX — 保险丝套, 3件, 0.125A
- 012-0482-XX — BNC电缆 (单保护), 0.9m
- 012-1256-XX — BNC电缆 (单保护), 2.7m
- 012-0991-XX — GPIB电缆 (双保护)

- 三年保修, 涵盖所有部件和人工费用, 不包括探头。



## 推荐要点

### 携带方便



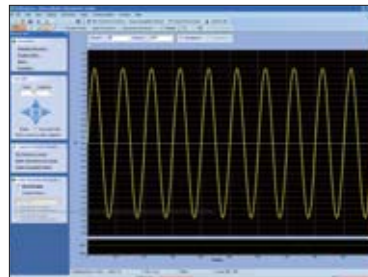
### 双通道型号



### 可作为脉冲发生器



### ArbExpress® 软件, 可以轻松生成任意波形



# FCA/MCA3000 系列

## 频率计数器 / 分析仪微波频率计数器 / 分析仪

来自泰克的频率计数器，更精更快、超越同侪



宽度：210mm 高度：90mm 深度：395mm  
重量：2.7kg

- 通用，高性能，波形快速反应，所有8个型号都具备这三个特性
- 频率分辨率：12位/秒
- 单次时间分辨率：50ps (3100型)  
100ps (3000型)
- 内存的最大测量速度：250kS/s
- 高速传输的 GPIB/USB 接口

- 多参数显示
- 多达3条输入通道
- 多达14种自动测量功能
- 完善的分析功能
- 集成功率计 (MCA系列)

详细规格	通用模式			高性能模式			微波模式	
	FCA3000	FCA3003	FCA3020	FCA3100	FCA3103	FCA3120	MCA3027	MCA3040
频率范围	400MHz	400MHz和3GHz	400MHz和20GHz	400MHz	400MHz和3GHz	400MHz和20GHz	400MHz和27GHz	400MHz和40GHz
解析时间	100ps			50ps			100ps	
Vmax, Vmin分辨率	3mV			1mV			3mV	
解析频率	12位数/秒			12位数/秒			12位数/秒	
自动测量项目	频率，周期，频率比，时间间隔，时间间隔误差，脉冲宽度，上升/下降时间，相角，占空比，最大电压，最小电压，峰值电压							
其他自动测量				总计测量			集成功率计功率范围： -35 +10 dBm	
分析	统计，直方图，趋势图							
显示	双显示方式：数字，图片 (带参数辅助)							
外部接口	GPIB/USB							
测量速度	250kS/s			250kS/s			250kS/s	
内存	750k点			3.75M点			750k点	
GPIB/USB总线的测量速度	5kS/s (块模式)			15kS/s (块模式)			5kS/s (块模式)	
保修	3年							
软件	NI LabVIEW SignalExpress™ Tektronix Edition 调制分析软件TimeView™							

附件：电源线，校正证明书 (英语)，快速入门用户手册，用户手册的CD-ROM，程序，技术规范，调制分析软件TimeView™ (试用版)，NI LabVIEW SignalExpress™ 泰克版软件 (基础版)

### ▪ 推荐附件

- HCTEK4321 ———— 硬携带箱
- ACD4000 ———— 软携带箱
- 174-4401-XX ———— USB主机到设备电缆 (90cm)
- 012-0991-XX ———— GPIB电缆 (双屏蔽, 1m)
- 012-1256-XX ———— BNC针式 (Ma), BNC针式 (Ma) 电缆, 屏蔽电缆, 2.7m, 50Ω
- 012-0482-XX ———— BNC针式 (Ma), BNC针式 (Ma) 电缆, 屏蔽电缆, 90cm, 50Ω
- SIGEXPTE ———— NI LabVIEW SignalExpress™ 泰克版互动测量软件 (专业版)
- TVA3000 ———— TimeView™ 调制域分析软件
- RMU2U ———— 机架安装套件

### ▪ 推荐选项

		FCA系列	MCA系列
MS	中等稳定性	○	标准装备
HS	高度稳定性	○	○
US	超高度稳定性	○	○
RP	后面板连接器	○	×

Opt. D1：英语校准数据报告

Opt. R5：五年保修期

- 三年保修，涵盖所有部件和人工费用，不包括探头。



## 推荐要点

可以根据使用场合选择微波总体性能

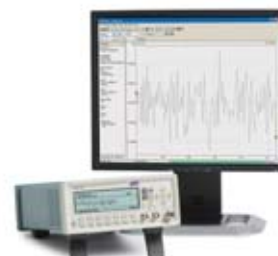


高精度测量，误差最小



选配TimeView™ 调制域分析软件

把FCA/MCA 系列转变为调制域分析仪。可以捕获非常小的频率和时间变化。



完善的分析模式，高效的测试



趋势图



直方图



最小误差的精确测量



# PWS4000 系列程控 DC 电源

来自泰克的 DC 电源，精稳输出，功能丰富，操作简便



宽：214mm 高：88mm  
厚：355mm 重量：约9kg

- 线性稳压电源
- 高达72V输出电压
- 0.03%基本电压精度
- 0.05%基本电流精度
- <5mV<sub>p-p</sub>纹波和噪声

- 在明亮的显示器上同时显示输出电压、电流和极限
- 可以调节过压保护
- 通过数字键盘直接输入参数
- 最多存储40种用户自定义设置
- 列表模式，逐步通过存储的设置，执行测试顺序
- 远程传感，补偿引线电阻

特点	说明
通信	USB设备端口，B型连接器，兼容USBTMC GPIB，选配(要求TEK-USB-488GPIB到USB适配器)
输出、传感、状态和控制	可拆卸螺钉端子块传送下述信号：
输出通道	复制前面板输出
远程传感线路	远程传感连接
控制输入	多功能TTL输入，可以作为触发输入、输出控制线路或数字输入使用
状态输出	多功能TTL输出，可以作为故障指示或数字输出使用

电气技术数据	PWS4205	PWS4305	PWS4323	PWS4602	PWS4721	
DC输出额定值	电压	0~20V	0~30V	0~32V	0~60V	0~72V
	电流	0~5A	0~5A	0~3A	0~2.5A	0~1.2A
	最大功率	100W	150W	96W	150W	86W
负载稳定	电压	<0.01%+2mV				
	电流	<0.05%+0.1mA	<0.05%+1.5mA	<0.05%+0.1mA	<0.05%+0.5mA	<0.05%+0.1mA
线路稳定	电压	<0.01%+1mV	<0.01%+1mV	<0.01%+1mV	<0.01%+2mV	<0.01%+1mV
	电流	<0.05%+0.1mA	<0.05%+0.1mA	<0.05%+0.1mA	<0.05%+0.05mA	<0.05%+0.1mA
纹波和噪声 (20Hz-7MHz)	电压	<1mV <sub>rms</sub> <3mV <sub>p-p</sub>	<1mV <sub>rms</sub> <4mV <sub>p-p</sub>	<1mV <sub>rms</sub> <4mV <sub>p-p</sub>	<1mV <sub>rms</sub> <5mV <sub>p-p</sub>	<1mV <sub>rms</sub> <3mV <sub>p-p</sub>
	电流	<3mA <sub>rms</sub>	<4mA <sub>rms</sub>	<3mA <sub>rms</sub>	<3mA <sub>rms</sub>	<3mA <sub>rms</sub>
设置分辨率	电压	1mV	1mV	1mV	1mV	2mV
	电流	0.1mA				
设置精度	电压	±0.03%+3mV	±0.03%+3mV	±0.03%+3mV	±0.03%+6mV	±0.03%+6mV
	电流	±0.05%+2mA	±0.05%+2.5mA	±0.05%+2mA	±0.05%+1.5mA	±0.05%+1mA
仪表分辨率	电压	0.1mV	0.1mV	0.1mV	0.1mV	0.5mV
	电流	0.05mA	0.05mA	0.01mA	0.05mA	0.01mA
仪表精度	电压	±0.02%+3mV	±0.02%+2.5mV	±0.02%+3mV	±0.02%+6mV	±0.02%+5mV
	电流	±0.05%+2mA	±0.05%+2.5mA	±0.05%+2mA	±0.05%+1.5mA	±0.05%+1mA
电压瞬态响应、稳定时间	负载变化	从0.1A变为1A后，变到75mV最后值以内的时间<150μs				
	设置变化，上升	从1V变为11V后，变到75mV最后值以内的时间<150μs				
	设置变化，下降	从11V变为1V后，变到75mV最后值以内的时间<150μs				
过压保护	范围 (典型值)	1V~19V	1V~29V	1V~31V	1V~59V	1V~71V
	精度 (典型值)	±(0.5%的设置值+0.5V)				
	响应时间 (典型值)	<10ms				

附件：电源线（请指明插头选项。）可溯源校准证明；快速入门用户手册；文档光盘—包括用户手册、程序员手册和技术参考资料National Instruments LabVIEW Signal Express 泰克限定版光盘。

- 三年保修，涵盖所有部件和人工费用，不包括探头。



## 推荐要点

### 精输出

90-150W电源；宽电压/电流范围；精密1m/0.1mA分辨率

### 稳输出

恒定电压（线性稳压），恒定电流；稳定的负载/线性调整率



### 功能丰富

内置电压/电流序列扫描功能；远端补偿功能；USB接口和NI Signal Express智能控制



### 操作简便

旋钮以及直接输入键盘；40种可定义设置；双功能显示，同时显示设置和回读电压和电流仪表读数或极限



# PWS2000 系列程控 DC 电源

来自泰克的 DC 电源，精稳输出，功能丰富，操作简便



高：108mm 宽：256mm  
厚：383mm 重量：约6.7kg

- 线性电源
- 高达72V的输出电压
- 0.05%基本电压精度
- 0.2%基本电流精度
- 10mV/10mA编程分辨率
- <math>3\text{mV}\_{\text{p-p}}</math>纹波和噪声
- 明亮的真空荧光显示器
- 16种用户自定义设置存储
- 通过数字键盘直接输入参数
- 以用户选择的步长改变电压或电流

输入电源特点	说明	
110 V AC设置	99V <sub>rms</sub> ~ 132V <sub>rms</sub>	
220 V AC设置	198V <sub>rms</sub> ~ 264V <sub>rms</sub>	
频率	47Hz~63Hz	
功耗	PWS2185/2323/2721	350VA
	PWS2326	700VA

电气指标		PWS2185	PWS2323	PWS2326	PWS2721
DC输出 额定值	电压	0~18V	0~32V	0~32V	0~72V
	电流	0~5A	0~3A	0~6A	0~1.5A
负载 调整率	电压 $\leq 0.02\%$	$\leq 0.02\%+5\text{mV}$	$\leq 0.02\%+5\text{mV}$	$\leq 0.02\%+6\text{mV}$	$\leq 0.02\%+4\text{mV}$
	电流 $\leq 0.1\%$	$\leq 0.1\%+2\text{mA}$ 典型值			
电源 调整率	电压	$\leq 0.1\%+5\text{mV}$ 典型值			
	电流	$\leq 0.1\%+2\text{mA}$ 典型值			
纹波和噪声 (20Hz~7MHz)	电压	$\leq 1\text{mV}_{\text{rms}}/3\text{mV}_{\text{p-p}}$ 典型值			
	电流	$\leq 5\text{mA}_{\text{rms}}$			
设置分辨率	电压	10mV			
	电流	10mA			
设置精度 (25°C ± 5°C)	电压	$\leq 0.05\%+10\text{mV}$			
	电流	$\leq 0.2\%+10\text{mA}$ 典型值			
回读分辨率	电压	10mV	10mV (<20V); 100mV ( $\geq 20\text{V}$ )		
	电流	10mA			
回读精度 (25°C ± 5°C)	电压	$\leq 0.05\% + 15\text{mV}$ 典型值	$\leq 0.05\%+15\text{mV}(<20\text{V})$ 典型值 $\leq 0.05\%+120\text{mV}(\geq 20\text{V})$ 典型值		
	电流	$\leq 0.1\%+15\text{mA}$ 典型值			
保修期	3年				

附件：电源，电源线，校准方法说明，简体中文用户手册。

- 三年保修，涵盖所有部件和人工费用，不包括探头。



## 推荐要点

### 精输出

90-150W电源；宽电压/电流范围；  
精密1m/0.1mA分辨率

### 稳输出

恒定电压（线性稳压），恒定电流；  
稳定的负载/线性调整率



## 功能丰富

内置电压/电流序列扫描功能；  
远端补偿功能；  
USB接口和NI Signal Express智能控制



## 操作简便

旋钮以及直接输入键盘；  
40种可定义设置；  
双功能显示，同时显示设置和回读电压和电流仪表  
读数或极限



如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！

或登录泰克公司中文网站：[www.tektronix.com.cn](http://www.tektronix.com.cn)

泰克中国客户服务中心全国热线：**400-820-5835**

**泰克科技(中国)有限公司**  
上海市浦东新区川桥路1227号  
邮编：201206  
电话：(8621)50312000  
传真：(8621)58993156

**泰克北京办事处**  
北京市海淀区花园路4号  
通恒大厦1楼101室  
邮编：100088  
电话：(8610)57950700  
传真：(8610)62351236

**泰克上海办事处**  
上海市徐汇区宜山路900号  
科技大楼C楼7楼  
邮编：200233  
电话：(8621)33970800  
传真：(8621)62897267

**泰克深圳办事处**  
深圳市福田区南园路68号  
上步大厦21层G/H/I/J室  
邮编：518031  
电话：(86755)82460909  
传真：(86755)82461539

**泰克成都办事处**  
成都市人民南路一段86号  
城市之心23层D-F座  
邮编：610016  
电话：(8628)86203028  
传真：(8628)86203038

**泰克西安办事处**  
西安市二环南路西段88号  
老三届世纪星大厦20层K座  
邮编：710065  
电话：(8629)87231794  
传真：(8629)87218549

**泰克武汉办事处**  
武汉市解放大道686号  
世贸广场1806室  
邮编：430022  
电话：(8627)87812760/2831

**泰克香港办事处**  
香港九龙尖沙咀弥敦道132号  
美丽华大厦808-809室  
电话：(852)25856688  
传真：(852)25986260

**如需进一步信息**

泰克维护着一套完善的不断扩大的应用指南、技术简介和其它资源，帮助工程师处理尖端技术。请访问 [www.tektronix.com.cn](http://www.tektronix.com.cn)



© 2012年泰克公司版权所有，保留所有权利。泰克产品受到美国 and 国外已经签发和正在申请的专利保护。本文中的信息代替以前出版的所有材料中的信息。技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX和TEK是泰克公司的注册商标。本文提到的所有其它商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

2012年1月

**Tektronix®**