

是德科技

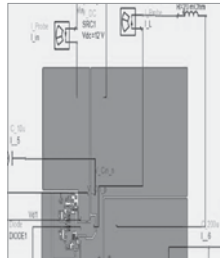
# 提高新一代功率转换器设计的可靠性与效率 (第 1 部分)

功率器件和元件评测

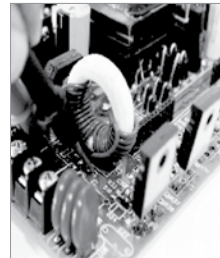
应用指南



Power Device  
and Component  
Evaluation



Electronic  
Design  
Automation



Hardware  
Design and  
Debug



Design  
Validation/  
Certification

# 引言

减少能源消耗以及二氧化碳排放的需求正在推动着功率电子和功率转换器飞速发展。汽车电气化和家用能源管理系统大幅增加,而且越来越普遍地使用可再生能源,这进一步推动了节能减排的实现。功率转换器设计的两个主要推动因素提高转换效率和增强可靠性。在太阳能等绿色能源应用中,能源平准化成本(LCOE)是客户为其太阳能设施选择何种太阳能逆变器的主要决定因素。效率和可靠性是LCOE算法的两个主要变量,而LCOE算法决定了逆变器公司是否可以获得销售机会。在混合动力电动汽车(HEV)以及电动汽车(EV)领域中,可靠性与汽车制造商的名誉息息相关,同时还关系到安全性和人身安全。因此,在汽车的设计和测试阶段,必须对其不同的电气子系统进行全面的EV测试。

对于诸多使用硅基功率器件的功率转换器应用,此类设计推动因素已将近达到上限或极限水平。基于碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)的宽带隙(WBG)功率器件的出现,为提高此类设计推动因素的上限水平带来了曙光。WBG器件开关速度更快,可适应更高的电压和更宽泛的温度范围,提高新一代功率转换器设计的效率与可靠性,并可减小器件尺寸。但是我们需要先了解并克服设计与测试挑战,使其功效得到充分发挥,才有可能使基于WBG功率器件的功率转换器设计成为主流。

本文是四部分系列的第一部分,主要介绍功率转换器设计周期的各个阶段。在每个阶段,我们都将介绍新一代功率转换器的设计与测试挑战,并将论述可帮助您攻克这些挑战的硬件和软件工具。我们将重点论述如何改善先前提及的设计推动因素:提高效率、改善可靠性以及减小器件尺寸。此外,我们还会关注WBG器件给功率转换器设计过程带来的设计和测试挑战。本系列分为四个部分,每个部分将会论述设计周期中的一个阶段:

1. 功率元器件评测
2. 设计软件仿真
3. 硬件设计与调试
4. 设计验证与认证

## 功率器件和元件评测

在设计周期的这个阶段，工程师想要评测在新一代功率转换器设计中使用的新功率器件（MOSFET 和 IGBT），以确保提供具备竞争力的设计，在市场竞争中获胜。随着宽带隙（WBG）器件（比如碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN））的出现，功率器件评测工作的挑战性大幅上升。与硅器件相比，WBG 器件具备诸多卓越功能，可通过更快的压摆率实现更快开关，能够应对更高的电压，温度范围更为宽泛。这些功能可带来诸多优势，比如提高功率转换器设计的效率并减小其尺寸。但是，这些优势也使得其评测以及向未来设计的整合变得更具挑战性，我们将在下文中论述这一点。了解功率半导体器件的性能技术指标和可靠性，对于设计能否取得成功至关重要；原因在于功率半导体器件的性能很大程度上决定了整个功率转换器电路的效率和可靠性。可惜，功率器件制造商提供的技术资料通常没有给出详细的信息，无法满足此类需求。技术资料中规定的测量条件通常不同于实际使用条件，而且提供的信息通常拥有较大的裕量，未提供器件变体的相关信息。因此，仅仅使用元器件制造商提供的信息，通常很难设计出可靠且高效的电路。这一点对于 WBG 器件而言，更是如此，原因在于制造商在技术资料中包含和不包含的技术指标各有不同。

此外，WBG 功率器件的压摆率更快，会产生高频分量，进而可能激起周围电路出现谐振情况，致使功率工程师需以射频工程师的思维进行思考。这意味着除了评测功率器件外，还需确保新功率器件周边的元件和 PCB 设计能够支持 WBG 功率器件更高的性能和功能。完成评测后，必须精准了解功率器件及其周边元件的技术指标与参数，将其提供给设计流程的下一阶段，以便确保精准的软件模型和功率转换电路仿真。

在接下来的章节中，我们将论述评测 WBG 功率器件所需执行的测试。为简单起见，我们将把功率器件测试分为两大主要类别：静态测试和动态或双脉冲测试。在第三节中，我们将论述如何对设计中 WBG 功率器件周边的元件进行评测和表征。

## 静态测试:

对功率器件执行静态测试, 是为了了解功率器件的性能, 包括以下参数:

- IV 参数 ( $R_{on}$ 、 $BV$ 、泄漏电流、 $V_{th}$ 、 $V_{sat}$  等)
- 输入、输出和反向传输电容 ( $C_{iss}$ 、 $C_{oss}$ 、 $C_{rss}$ 、 $C_{ies}$ 、 $C_{oes}$ 、 $C_{res}$ ) 和  $R_g$

测量这些参数通常需要多种仪器, 比如曲线追踪仪和 LCR 表。但即使是采用了所需的全部仪器, 由于夹具的影响, 精确度通常也不理想, 并且通常无法在预期的 I 或 V 工作电平对这些参数进行测试。当需要在宽泛的工作温度范围内验证功率器件的性能时, 这些挑战会变得更加复杂。

作为半导体行业中有着悠久历史的功率器件精准测试解决方案提供商, 是德科技开发了能够表征功率器件的解决方案, 目标用户是最终用户或功率转换器设计人员, 而且其功能可以调整以满足 WBG 器件的需求。该解决方案就是 B1506A 功率器件分析仪。B1506A 提供高精度 IV 曲线追踪仪的功能, 能够对输入、输出和反向传输电容 ( $C_{iss}$ 、 $C_{oss}$ 、 $C_{rss}$ 、 $C_{ies}$ 、 $C_{oes}$ 、 $C_{res}$ ) 进行测量。但它还能够以功率器件的实际工作电平进行测量, 覆盖范围高达 1500 A 和 3 kV。

除了测量静态 IV 和电容, 它还能够测量栅极电荷, 根据开关频率计算功耗并建立模型, 参见下图。



图 1. B1506A 功率器件分析仪

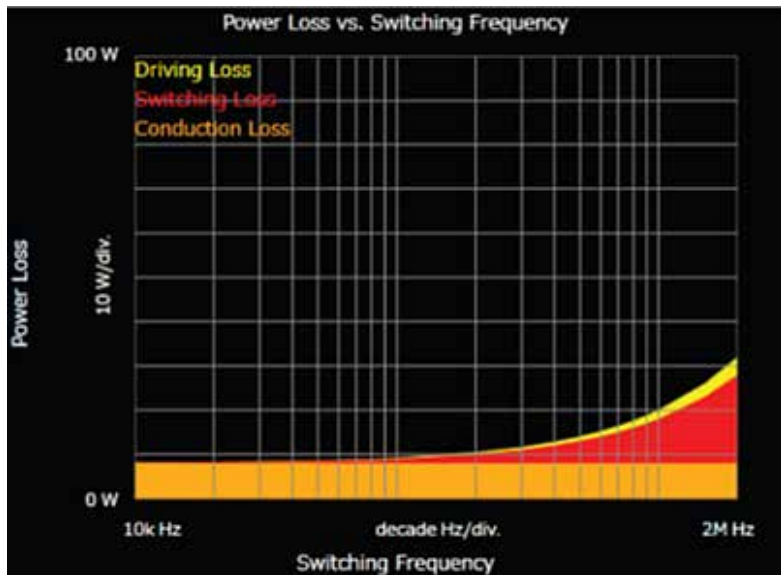


图 2. B1506A 基于开关频率建立功耗模型

B1506A 还提供可选的温度测试功能, 因此, 您可以在很宽的温度范围内验证功率器件的性能。所有这些都综合于一个解决方案中, 通过易于使用的用户界面和夹具实现自动化。如果您已经拥有 IV 曲线追踪仪并且只需要电容测量功能以及漏电和击穿测量功能, 可选择 B1507A 功率器件电容分析仪。关于 是德科技功率器件分析仪的更多信息, 请访问 <http://www.keysight.com/find/B1506A>

## 动态测试:

功率器件的动态或双脉冲测试通常包括发送高电流脉冲至一个或多个功率器件, 测量功率器件所产生的电压和电流开关波形, 以及热特性。为了产生脉冲, 功率转换器设计人员可以使用高功率脉冲发生器或构建双脉冲测试电路。两种方法各有其优缺点。选择哪种方法合适, 通常取决于工程师进行测试的偏好。下图显示了采用合适的是德科技仪器搭建的功率器件动态测试装置。

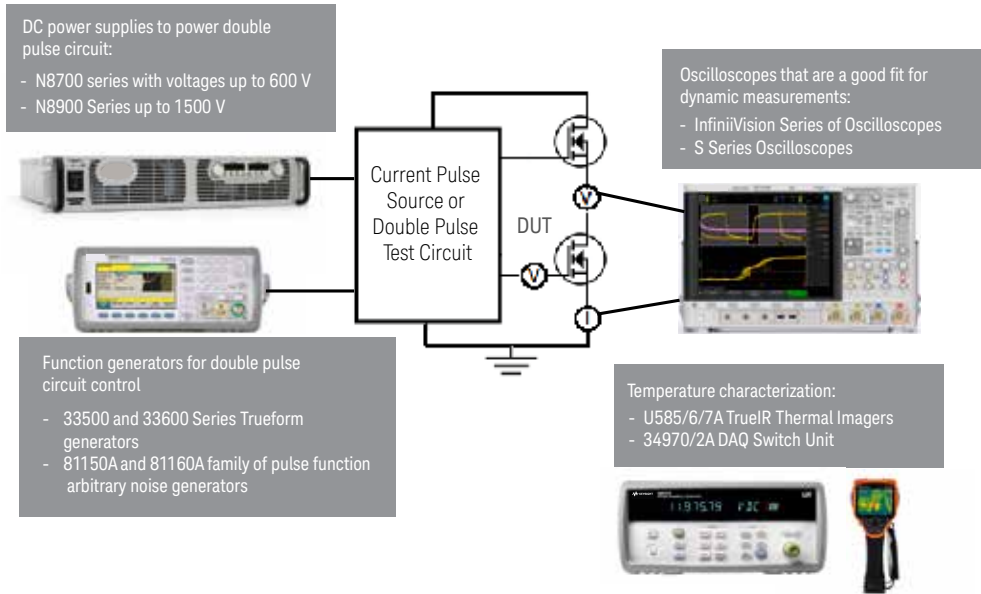


图 3. 功率器件动态或双脉冲测试装置

在进行动态测试时, 工程师目前面临的一个最大的测试挑战是对 WBG 功率器件的开关波形 (电压和电流) 进行精确表征。如果我们考虑首先测量电压波形, 那么一个测试挑战就是捕捉和测量峰值到峰值开关电压, 其范围可能为 100 至 1000 伏特, 压摆率有时超过 100 V/1 ns。由于压摆率如此之快, 必须考虑测量仪器和任何传感器的带宽。计算上升或下降沿的方程式可以表达如下:

$$\text{带宽} = 0.5 / \text{上升时间 (10\% 至 90\%)}$$

通过使用上述方程式, 上升时间为 10 ns 的开关波形带宽大约为 100 MHz。由于任何适用测量仪器的额定带宽通常表示比其带宽低 3 dB, 以便精确测量快速压摆率, 您可能希望选择额定带宽比开关波形带宽高出 2 到 3 倍的仪器。对于上面提到的 100 MHz 带宽示例, 您可能希望确保仪器带宽至少为 200 MHz 或更高。

您所用仪器的动态范围和测量分辨率也同样很重要。例如, 在开关电压为 100 伏特时, 精确测量饱和电压电平在 10 至 100 毫伏范围内的器件可能会是一个挑战。

为了测量期间开关电流, 可以使用传统的霍尔效应电流探头。但是, 在需要较低的电感和较高的带宽时, 测量电流的首选方法是同轴分流器或电流变换器。

为了准确捕获 WBG 器件的电压和电流开关波形, 通常使用的测量仪器是示波器。示波器是测量功率器件开关特性的好工具, 因为它们具有很宽的测量带宽、多个信道(需要电流和电压), 并且能够通过合适的电压和电流探头和/或传感器处理大电压和电流值。在以下章节, 我们将介绍是德科技的一些示波器, 它们提供了先进的功能, 可用于动态测试 WBG 器件。

## InfiniiVision 3000、4000 和 6000 X 系列示波器

InfiniiVision X 系列示波器提供同类产品较为优秀的性能, 它配有方便使用的用户界面, 包括大尺寸触摸屏, 可以更好地查看和分析开关波形。此外, InfiniiVision 示波器还提供可选的内置函数/任意波形发生器。该发生器能够控制双脉冲测试电路, 并可以测量单个仪器中产生的开关波形。示波器与发生器整合为一体, 可以减少测试装置的复杂程度。InfiniiVision X 系列示波器标配有大量先进的触发功能、高级波形运算功能, 以及自动化波形表征测量。还可提供一个可选的功率测量应用程序, 用于通过自动化装置和测量(包括开关损耗和  $R_{ds(on)}$ ) 来分析功率开关电路。我们将在该系列的第三部分论述该功率测量应用程序如何帮助您优化功率转换器设计并加快设计流程。

## Infiniium S 系列示波器

是德科技的 Infiniium S 系列示波器提供了出色的测量技术, 具有高分辨率和宽大的动态范围, 可在评测功率器件时测量开关波形。S 系列示波器提供 10 位测量分辨率、超深的采集存储器, 以及高达 8 GHz 的测量带宽。尽管市场上有的示波器号称具备 12 位 ADC 分辨率, 这主要是一种营销手段, 因为它们的测量精度实际上根本无法充分利用如此高的分辨率。这就像是在卖车, 速度计的读数可能高达 120 MPH, 但动力传动系统实际上只能达到 80 MPH。为了实现更出色的测量性能, S 系列不仅采用了高性能 ADC, 而且采用低噪声输入信号调理和精确的 20 GSa/s 实时采样, 从而能够充分发挥 10 位 ADC 的性能。S 系列提供同类产品较为优秀的有效位数 (ENOB) 分辨率, 甚至比号称 12 位分辨率的示波器还要高。

## 示波器探头

在测量动态开关波形时, 示波器只是其中一部分。另一个关键部分是探测。是德科技提供大量差分 and 单端探头, 它们分别具有不同的电压范围和带宽。例如, 10076C 是一种适用于 WBG 电压测量的单端探头, 它具有高达 4 kV 的电压电平处理能力和 500 MHz 的带宽。该探头成本较低, 并且具有非常宽的电压量程和带宽。对于电流测量, 很多设计人员采用同轴分流器, 可以采用高带宽单端或差分电压探头, 以及示波器中内置的运算功能对其进行测量。是德科技还提供大量探测附件, 确保连接良好并减少寄生效应, 实现精准测量。关于是德科技示波器探测解决方案的更多信息, 请访问 [www.keysight.com/find/scopes-power](http://www.keysight.com/find/scopes-power), 然后点击“查看测量选件和探测解决方案。”

## 功率器件的热特性表征

在测试期间表征 WBG 功率器件的温度曲线, 对于未来设计的性能和长期可靠性也是至关重要的。是德科技提供多个方案满足您的特殊需求。如需执行和记录多通道直接温度测量, 34970A、34972A DAQ 测量单元经证明是功率电子行业的理想仪器。它们通过模块化方法来完成多通道温度测量以及其他常见测量, 比如电压和电流。它还提供了一款免费的测量记录软件, 我们将在该系列第四部分进行更详细的介绍。

是德科技还提供 U5855/6/7A 系列热像仪, 用于功率器件热性能曲线的实时分析和趋势分析。包含的分析软件增加了报告功能, 比如点线分析、趋势图和调色板。该手持式工具能够有力补充和加快功率器件的热性能表征。

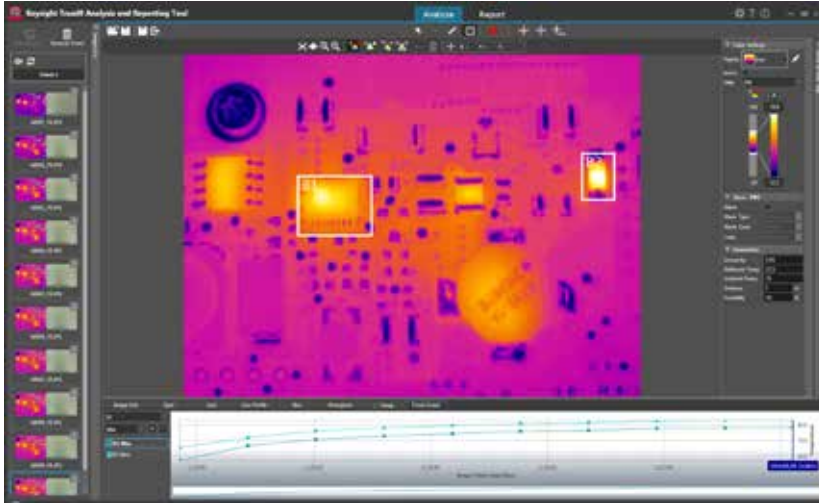


图 4: 采用是德科技 U5855/6/7A 分析软件对电路板进行表征得到的热像图, 其中显示了关键器件的热性能趋势。图像底部的图表显示图片中选中的两个点的温度趋势

为了给双脉冲电路供电并对其进行控制, 是德科技提供了一系列直流电源和函数/任意波形发生器, 其功能专门针对功率电子和功率转换器设计而优化。我们将在第三部分对此进行更详细的论述, 但您可以在图 3 中查看推荐型号。

## 评测周边元件:

除了评测功率器件外,您还需要对其周边元件进行评测和表征,其中包括连接器、电感器、二极管,甚至是 PCB 设计。在验证各种条件下的性能、确保可靠性,以及搭建更精确的软件仿真以减少设计硬件原型的成本和时间时,这一点至关重要。在静态测试章节中详细论述的 B1506A 功率器件分析仪是该领域的理想工具,同时还提供:

- 宽泛的电压和电流量程提供精确的 IV 分析
- 高电压电平的电容测量
- 具有高电流偏置的电感直流电阻测量
- 验证周边元件在较宽温度范围内的性能

是德科技还提供完整系列的 LCR 表,可用于对周边元件进行高精度的阻抗测量。是德科技 LCR 表被誉为业界标准仪器,因为它们在很多宽的阻抗测量范围内提供了同类产品中较为出色的准确性和可重复性。

## 评测 WBG 器件的近射频效应

随着控制环路越来越密集,开关速度越来越快,并且引入了 WBG 器件,功率转换设计变得越来越复杂。WBG 器件因为具有快速上升和下降压摆率,可能会在电路中产生高频分量。因此,需要更加复杂的阻抗分析工具对功率转换器件进行测试。只使用一个简单的、适用于所有条件的集总电路,再也无法建立功率电子电路的模型,相反,必须通过可靠的功率电路仿真器来分析电路并建立模型,以便了解其阻抗在宽广的频率范围内是如何变化的。是德科技提供了两个性能卓越的产品系列,帮助您进行此类分析:

- E4990A 阻抗分析仪
  - 频率范围: 20 Hz 至 10/20/30/50/120 MHz
  - 阻抗范围 (10% 精度): 25 mΩ 至 40 MΩ
- E4991B 阻抗分析仪
  - 频率范围: 1 MHz 至 500 MHz/1 GHz/3 GHz
  - 阻抗范围 (10% 精度): 120 mΩ 至 52 kΩ



图 5. 是德科技阻抗分析产品系列

E4990A 系列采用自动平衡桥方法来进行阻抗测量, E4991B 系列采用射频 I-V 方法进行阻抗测量。自动平衡桥和射频 I-V 方法都是基于电压-电流比与阻抗的线性关系,由欧姆定律可以得到。因此,其理论阻抗测量灵敏度是恒定的,与使用网络分析仪的方法相比,可以在很宽的阻抗范围内实现高精度测量。E4990A/E4991B 阻抗分析仪还具有卓越的测量稳定度,这要归功于其接收机部分的优秀设计。该设计可以尽量减少漂移误差,使分析仪能够在长时段内进行精确的特性表征。是德科技还提供 E5061B ENA 系列网络分析仪,其选件 3L5/005 支持网络分析、



阻抗分析以及增益/相位分析。虽然它无法提供像 E4990A 和 E4991B 一样的阻抗分析精度或稳定性, 但却提供了一个真正的多功能分析工具选项。下面图表为 E4990A、E4991B 和 E5061B 的精度与频率比较:

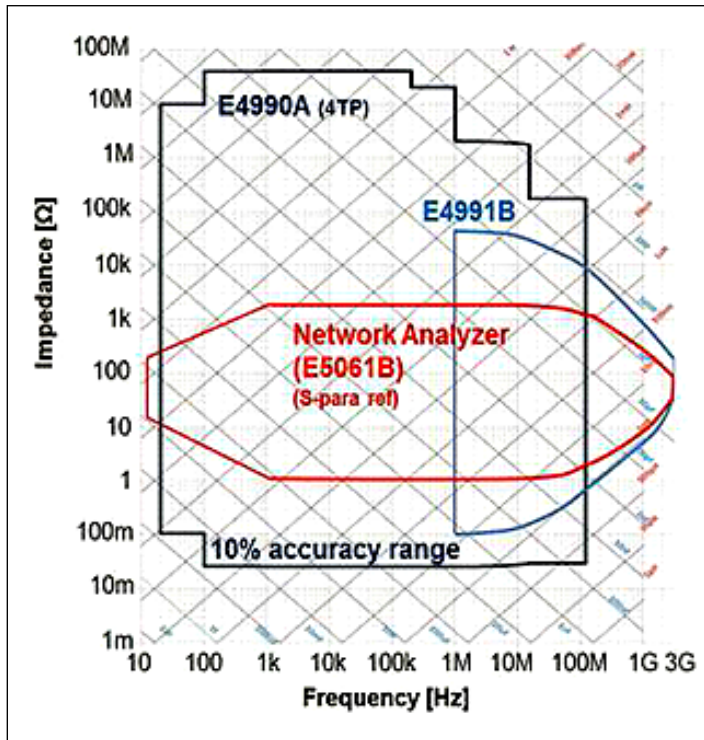


图 6. E4990A、E4991B 和 E5061B 的 10% 阻抗精度范围

关于是德科技 LCR 表和阻抗分析仪的更多信息, 请访问以下链接:

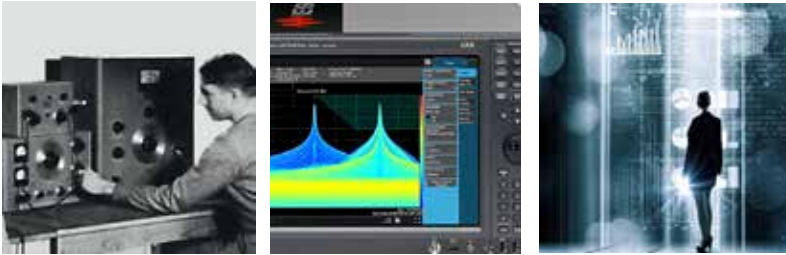
<http://www.keysight.com/find/impedance>

## 总结

在本应用指南中, 我们探讨了功率电子工程师在评测、表征和建模其新一代功率转换器设计中的宽带隙器件时遇到的挑战。同时, 我们也解释了是德科技如何通过提供各种先进的工具、解决方案和专业技术, 来帮助用户应对宽带隙器件面临的一些评测和设计挑战。例如, B1506A 功率器件分析仪提供了一整套解决方案, 能够对功率器件的 IV、CV 和栅极电荷特性进行表征。是德科技品质出众的阻抗分析仪系列可以在很宽的频率范围内对宽带隙器件周围的电路元件进行表征, 从而确保您能够正确应对宽带隙器件的近射频效应。

## 演进

我们独有的硬件、软件和技术人员资源组合能够帮助您实现下一次突破。  
我们正在开启技术的未来。



从惠普到安捷伦再到是德科技

### myKeysight

myKeysight

[www.keysight.com/find/mykeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)  
个性化视图为您提供最适合自己的信息！

### 是德科技服务

**KEYSIGHT SERVICES**  
Accelerate Technology Adoption.  
Lower costs.

[www.keysight.com/find/services](http://www.keysight.com/find/services)

我们拥有业界领先的技术人员、流程和工具，可以提供深度的设计、测试和测量服务。最终的结果就是：我们帮助您应用新的技术，而工程师为您改进流程并降低成本。



### 是德科技保证方案

[www.keysight.com/find/AssurancePlans](http://www.keysight.com/find/AssurancePlans)

10 年的周密保护以及持续的巨大预算投入，可确保您的仪器符合规范要求，精确的测量让您可以继续高枕无忧。

[www.keysight.com/go/quality](http://www.keysight.com/go/quality)



### 是德科技公司

DEKRA 认证 ISO 9001:2015

质量管理体系

### 是德科技渠道合作伙伴

[www.keysight.com/find/channelpartners](http://www.keysight.com/find/channelpartners)

黄金搭档：是德科技的专业测量技术和丰富产品与渠道合作伙伴的便捷供货渠道完美结合。

[www.keysight.com/find/solution](http://www.keysight.com/find/solution)

如欲获得是德科技的产品、应用和服务信息，请与是德科技联系。如欲获得完整的产品列表，请访问：[www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)

### 是德科技客户服务热线

热线电话: 800-810-0189、400-810-0189  
热线传真: 800-820-2816、400-820-3863  
电子邮件: [tm\\_asia@keysight.com](mailto:tm_asia@keysight.com)

### 是德科技 (中国) 有限公司

北京市朝阳区望京北路 3 号是德科技大厦  
电话: 86 010 64396888  
传真: 86 010 64390156  
邮编: 100102

### 是德科技 (成都) 有限公司

成都市高新区南部园区天府四街 116 号  
电话: 86 28 83108888  
传真: 86 28 85330931  
邮编: 610041

### 是德科技香港有限公司

香港铜锣湾希慎道 33 号  
利园 1 期 45 楼 4567 室内  
电话: 852 31977777  
传真: 852 25069233

### 上海分公司

上海市虹口区四川北路 1350 号  
利通广场 19 楼  
电话: 86 21 26102888  
传真: 86 21 26102688  
邮编: 200080

### 深圳分公司

深圳市福田区福华一路 6 号  
免税商务大厦裙楼东 3 层 3B-8 单元  
电话: 86 755 83079588  
传真: 86 755 82763181  
邮编: 518048

### 广州分公司

广州市天河区金穗路 62 号侨鑫国际中心 17 楼  
雷格斯侨鑫国际中心 1772 室  
电话: 86 20 38390680  
传真: 86 20 38390712  
邮编: 510623

### 西安办事处

西安市碑林区南关正街 88 号  
长安国际大厦 D 座 501  
电话: 86 29 88861357  
传真: 86 29 88861355  
邮编: 710068

### 南京办事处

南京市鼓楼区汉中路 2 号  
金陵饭店亚太商务楼 8 层  
电话: 86 25 66102588  
传真: 86 25 66102641  
邮编: 210005

### 苏州办事处

苏州市工业园区苏华路 1 号  
世纪金融大厦 1611 室  
电话: 86 512 62532023  
传真: 86 512 62887307  
邮编: 215021

### 武汉办事处

武汉市武昌区中南路 99 号  
武汉保利广场 18 楼 A 座  
电话: 86 27 87119188  
传真: 86 27 87119177  
邮编: 430071

### 上海MSD办事处

上海市虹口区欧阳路 196 号  
26 号楼一楼 J+H 单元  
电话: 86 21 26102888  
传真: 86 21 26102688  
邮编: 200083