

是德科技

# 能量转换效率测量方法

应用指南

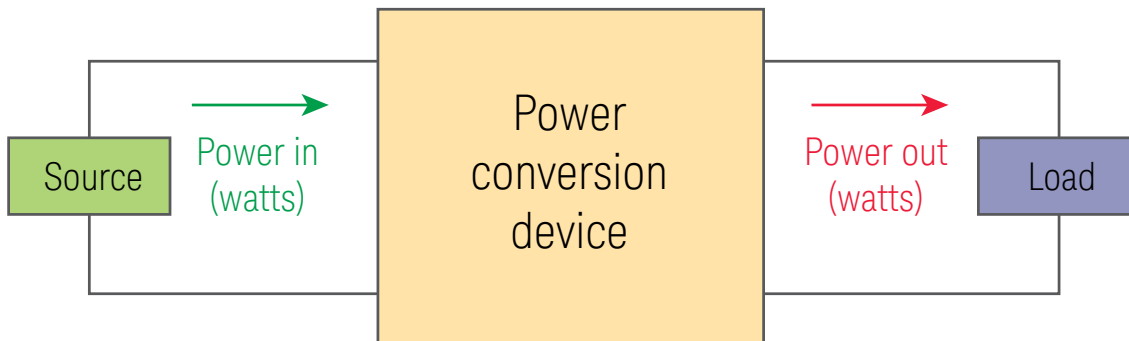
## 什么是能量转换效率？

效率是对为完成特定任务而投入的时间和精力的有效性评估。如果此任务是将一种形式的能量转换为另一种能量，那么转换效率指的是能量转换的实施效果。对于电力转换过程而言，效率的测量方式为输出功率（单位为瓦特）除以输入功率（单位为瓦特），用百分比表示。在电力电子学中，使用希腊字母（ $\eta$ ）来表示效率。参见图 1。

理想的电力转换过程的效率为 100%。但是，达到 100% 的效率是不可能的，因为所有真实的电子器件均会以热能的形式损失部分能量。部分输入功率用于能量转换过程本身，因此输入功率不会完全转换为输出功率。因此，效率必定小于 100%。

## 能量转换效率为什么重要？

显而易见，能量转换效率越高，损耗的能量就越少。能量损耗会产生诸多成本：资金，因为我们为消耗的能源付费；时间，因为我们必须更频繁地为电池供电设备充电；产品尺寸，因为能量损耗所产生的热量必须得到恰当消散；以及环境污染，因为需要产生更多能量来补偿损耗的能量。为降低与能量转换过程相关的成本，工程师投入大量精力以期尽量提高转换过程的效率。国际标准对交流电源供电的家用电器的功耗水平进行了限制。例如，在美国，美国能源部（DOE）规定了能源效率标准，要求产品必须符合这些标准。此外，“能源之星”计划还督促各厂商自愿遵循比 DOE 标准更为严苛的标准。此类计划突出了合理设计能量转换过程的重要性，此类设计能够减少能耗和提高效率。另外，HEV/EV（混合动力电动汽车/电动汽车）市场的快速发展，以及车辆电气化程度的日益提高，推动着对提高能量转换技术效率的需求不断高涨。所有这些发展趋势，促使您需要合理测量和管理自身设计的功耗情况。



$$\text{Efficiency}(\%) = \eta = \frac{\text{Power out (W)}}{\text{Power in (W)}} \times 100$$

图 1. 效率（ $\eta$ ）是用输出功率（单位为瓦特）除以输入功率（单位为瓦特）所得结果的百分比。

## 如何测量能量转换效率？

由于能量转换效率实际上就是两个功率测量值的比例，因此效率测量方式实际上就是功率的测量方式。有效功率（测量单位为瓦特），是指确实发挥作用或产生热量的这部分功率。它是所消耗的能量的比例。测量电力采用的方法取决于功率信号的形式。对于简单的直流信号，电压和电流始终保持恒定，有效功率（单位为瓦特）即是测得的直流电压与直流电流的乘积。您可以使用标准万用表来进行这些测量。但是，对于交流信号而言，电压和/或电流会随着时间而变化，有效功率更难测量，从而需要使用更专业的设备。

为获取有效功率（单位为瓦特），必须将某一时刻的瞬时电压  $v(t)$  与某一时刻的瞬时电流  $i(t)$  相乘，获得某一时刻的瞬时功率  $p(t)$ 。由于此瞬时功率随时间而变化，因此您必须计算平均值，方法为：对整数个周期内的功率进行积分运算，再将该值除以总积分时间，从而得到平均值。此计算可得出电压为  $v(t)$  且电流为  $i(t)$  时，器件在电路中所消耗的瓦特数。假定电压和电流均是周期  $T$  内的周期波形，那么周期  $T$  内周期波形的功率计算方式如下：

$$\text{Average power in watts} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) * i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

以下章节更加详细地描述了这些测量以及测量所使用的设备。

### 功率和效率测量采用万用表

上述平均功率（单位为瓦特）公式的一个特殊情况是电压和电流均为直流形式，这意味着电压和电流不随时间而变化。只有在这种情况下，才可使用万用表提供测量值，计算有效功率（单位为瓦特）。万用表适用于执行简单的单次测量（比如交流或直流电压、交流或直流电流、电阻），但是不具备直接功率测量功能。测量功率需同时测量电压和电流，而常见的万用表一次只能测量一个参数。因此，如果使用万用表测量功率，那么您必须使用两个单独的万用表（一个测量电压；一个测量电流），或者您可以使用同一个万用表在不同的时间来测量两个参数。如果电压和电流均为纯直流形式（不随时间而变化），那么在不同时间测量电压和电流是可行的；按照定义，它们不会发生变化。虽然这种情况比较少见，但是也可能出现，重申一下，只有在这种情况下，才可使用一个万用表执行测量，再根据测量值计算功率。

如果电压或者电流信号为交流形式（随时间而变化），那么您不能使用万用表提供的测量值来计算功率（单位为瓦特）。万用表的交流电压和交流电流功能可以测量 RMS（均方根）值，将两者相乘后，得到的是视在功率（单位为 VA（伏安）），而非有效功率（单位为瓦特）。有效功率（单位为瓦特）是计算效率时要用到的重要功率测量值。

### 使用示波器执行功率和效率测量

由于平均功率（单位为瓦特）测量需要同时获取一段时间内的电压和电流值，因此示波器是完成这一任务的理想仪器。借助合适的电压和电流探头，示波器可轻松捕获电压-时间和电流-时间波形。但是，从这些波形获得功率测量值（单位为瓦特）面临着更大的挑战。基础型示波器的功能有限，无法帮您完成此项任务。但是有许多示波器还拥有算数运算功能，能够对这两个波形进行乘法运算。如果您使用此功能，将电压波形与电流波形相乘，将会得到瞬时功率波形。此波形为瞬时伏安而非所需的功率，因此您需要使用示波器的其他测量功能来获得功率值。例如，如果您的示波器拥有内置测量功能，能够计算波形的平均值，那么您可以对瞬时功率波形应用此测量功能，获得功率值。请确保以精确的整数个周期为基础执行这一操作，如此才能获得精准的结果。为获得能量转换器件的效率值，您必须使用四个通道来完成此任务：两个用于测量输入电压和电流，获得输入功率，另外两个用于测量输出电压和电流，获得输出功率。然后，用输出功率（单位为瓦特）除以输入功率（单位为瓦特），即可计算出效率。图 2 和图 3 为示波器功率测量示例，测试对象为微型逆变器，其输入端（~31 V，绝大部分为直流形式）连接太阳能电池阵列仿真器，输出端（~240 V，交流）连接交流电网。输入功率的测量值为 238.245 W，输出功率的测量值为 230.814 W，计算所得的效率为 96.88%。

被测器件：  
微型逆变器

两个差分  
电压探头

两个电流探头

示波器

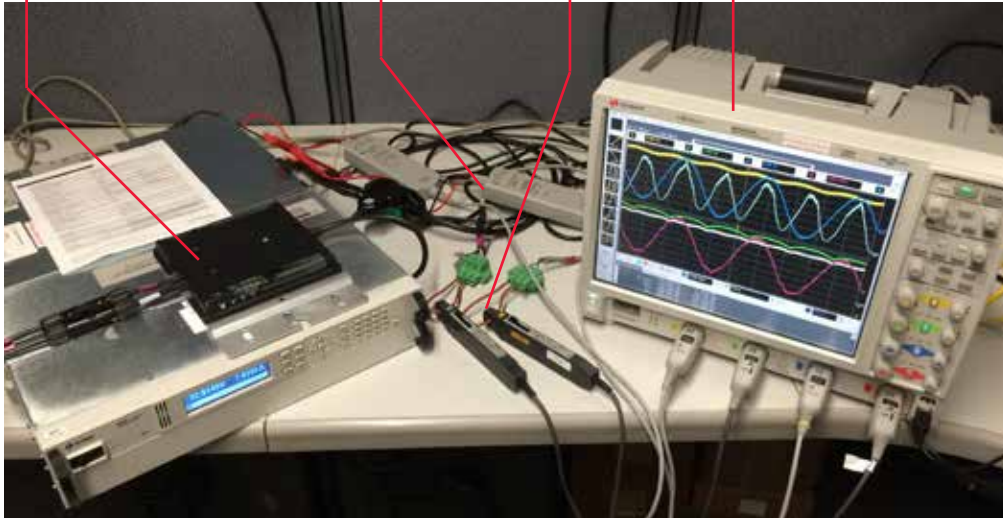


图 2. 是德科技四通道示波器利用算术运算功能, 从电压和电流波形得出微型逆变器的输入和输出功率波形。然后, 功率波形平均测量可得到功率值, 再从功率值计算出效率。

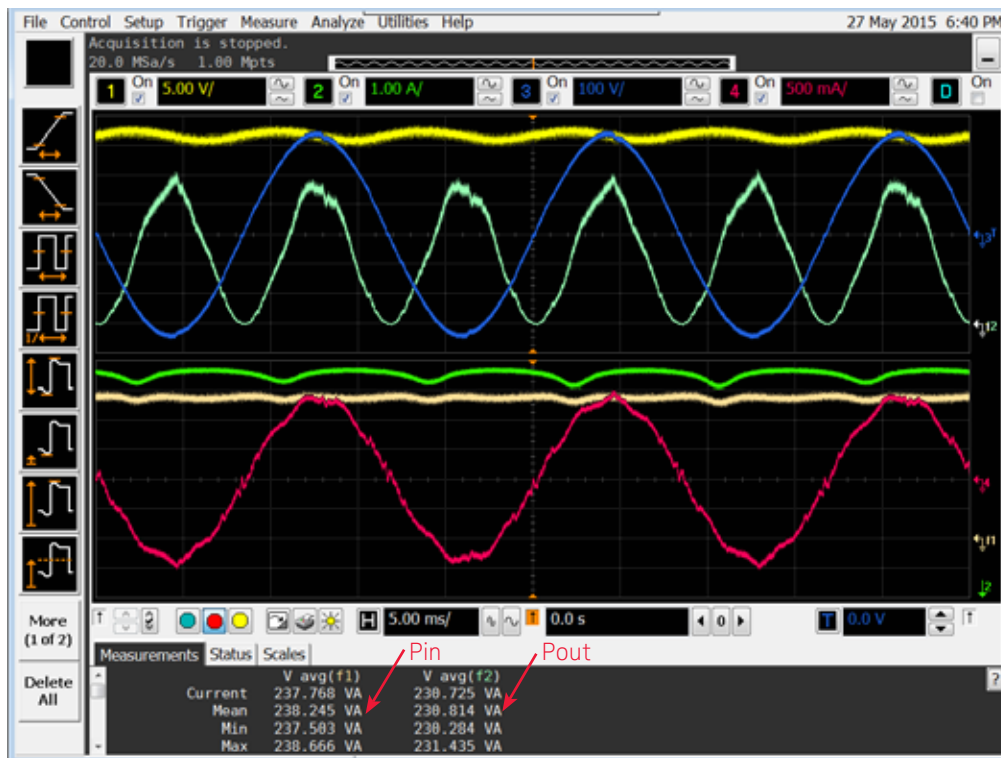


图 3. 示波器屏幕快照的特写显示了功率数据计算结果。平均输入功率为 238.245 W, 平均输出功率为 230.814 W, 计算得出此微型逆变器在特定工作条件下的效率为 96.88%。

部分示波器具备非常独特的功率测量选项，可大幅简化这些测量值的获取。例如，是德科技 InfiniiVision 4000 和 6000 X 系列示波器装有功率测量应用程序（DSOX4PWR 和 DSOX6PWR），可通过利用示波器上的四个通道并在选件中进行功率和效率计算来直接测量效率。示波器可针对能量转换器件提供可接受的功率和效率类型测量功能，但是当其用于了解能量转换器件内部的功率波形而非在器件外部以端对端的方式评测时，其真正的功率测量优势才得以显现。是德科技示波器的功率应用程序可帮助您分析开关和线性电源的可靠性、效率以及性能，尤其是了解能量转换电路和元件的高频开关损耗。

虽然示波器可提供卓越的带宽功能，但是其电压测量精度并不出色，主要原因在于常用设计只提供 8 位垂直分辨率。此外，大多数示波器采用接地参考输入端，需要您使用差分探头，这会加大设置复杂程度，并增加测量误差。电流探头的精度仅为百分之几，而且其偏移情况更是众所周知，因此您必须经常对其做消磁和归零处理。为获得精准的功率测量值，必须同时获取电压和电流波形。如果涉及高频波形，因为电压和电流探头测量路径中的信号传播时延有差异，所以会发生时滞，您必须对此加以补偿。如果频率较低，比如交流线路电压频率，则不存在上述问题。

## 使用功率分析仪执行功率和效率测量

许多功率分析仪均经过专门设计，可以提供简易且精准的效率测量。此类仪器通常拥有多个隔离输入端，用于同时测量能量转换器件的输入电压和电流，以及输出电压和电流。分析仪会将电压信号与电流信号相乘，并对合成的功率波形执行积分运算，以精准得出功率测量值（直接以瓦特表示）。然后，通过用输出功率除以输入功率，即可直接显示效率值。虽然分析仪的带宽无法与示波器媲美，但是通常足以捕获许多应用中出现的波形类型，在分析 50 Hz 或 60 Hz 的电路（包含谐波）时尤其如此。功率分析仪具备高达 16 位的垂直分辨率，其测量精度比分辨率为 8 位的示波器要高很多。

例如，是德科技的 PA2201A IntegraVision 功率分析仪便具备精准且便捷显示效率测量值所需的所有功能。它的两个通道均能捕获电压、电流以及功率波形，您可以同时查看这六个波形。IntegraVision 具备 5 百万次/秒采样速率、16 位数字化的功能特性，可实时捕获波形，其带宽高达 2 MHz，可提供 0.05% 的基本精度。电压和电流输入端可浮动至 1,000 V 以上或接地水平以下，从而无需使用差分电压探头，并且能够消除相关的设置复杂性和测量误差。每个通道均拥有电压输入端、两个电流分流器输入端（2 Arms 和 50 Arms）以及电流探头输入端，让您能够灵活选择首选方式来执行精准且可靠的电流测量。

图 4 和图 5 显示了使用 IntegraVision 功率分析仪进行效率测量的示例，测量对象为先前提及的同一微型逆变器。由于输入端采用浮动形式，而且此类功率分析仪可直接透过内部分流器精准测量电流，因此无需使用差分电压探头或电流探头。IntegraVision 屏幕快照可同时显示微型逆变器输入端和输出端的电压、电流以及功率波形，而无需像示波器一样需设定波形运算功能。它可通过这些波形直接计算效率，此处显示为 96.05%。

被测器件：  
微型逆变器

IntegraVision  
功率分析仪

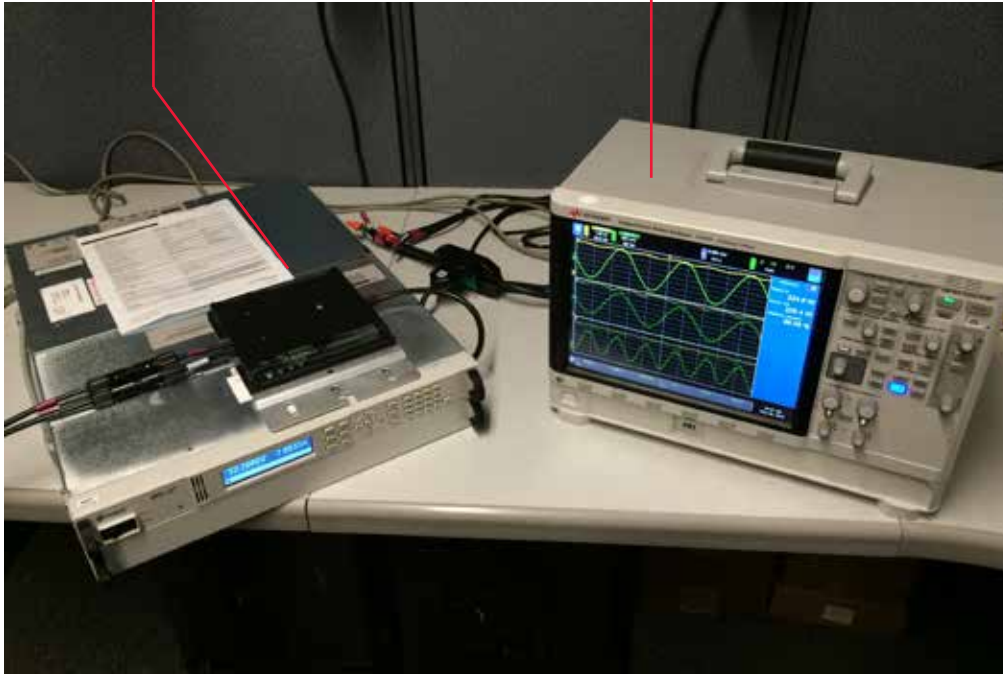


图 4. 由于每个通道均可同时测量电压和电流，因此是德科技 PA2201A IntegraVision 功率分析仪仅通过两个通道即可显示微型逆变器的输入和输出电压、电流以及功率波形。此外，它还内置了功率和效率测量，这些测量得到的结果比使用示波器计算出的值要精准得多。

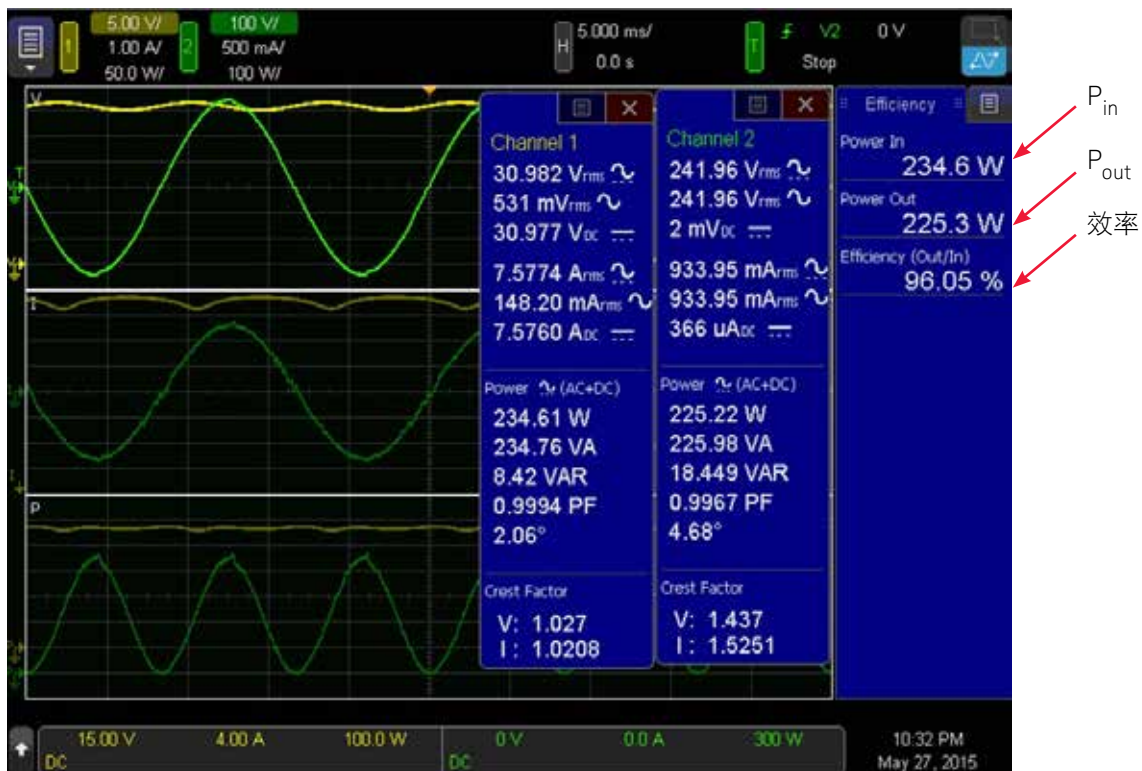


图 5. IntegraVision 功率分析仪屏幕快照的特写，显示了此微型逆变器在特定工作条件下的六个波形以及合成功率和效率测量值。此外，您还可选择显示许多其他测量参数。

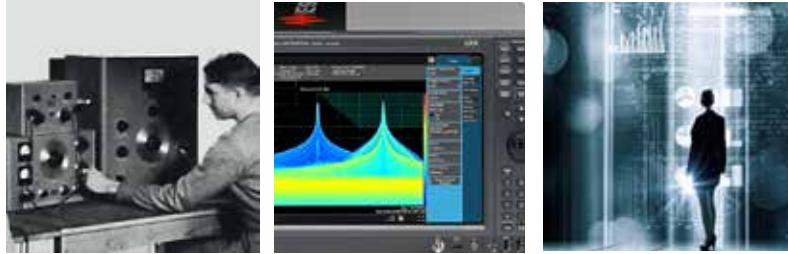
除了能够获得精准的效率测量值外，IntegraVision 功率分析仪还可帮助您准确测量功率、VA、VAR、功率因子、波峰因数、瓦时、安培小时以及谐波。图 5 显示了这些测量值的一部分。功率分析仪还具备动态测量能力，直接实时显示电压、电流以及功率波形，让您能够捕获功率干扰波形（比如功率突增和电压暂降）、断电以及涌入电流。

## 总结

如今的全球环境高度关注能源问题，工程师必须想方设法降低产品功耗并改善产品整体效率。这一点不仅适用于传统家用电器，同样适用于太阳能电网和车辆电气化系统中使用的高功率器件。精准测量能量转换效率，对于降低能耗至关重要。您可以使用不同方法来评测能量转换效率，每种方法均有其优缺点。您可以使用万用表，但是此仪器仅适用于直流信号，不提供直接功率测量功能。示波器可凭借卓越的带宽特性捕获波形，但是垂直精度有限，并采用接地参考，不具备直接电流测量功能。内置效率测量功能的功率分析仪是便捷、精准评测功耗的理想工具。通过功率分析仪，设计人员可尽可能地降低产品的能耗水平，最终改善环境。功率分析仪，比如是德科技的 PA2201A IntegraVision，可便捷地测量能量转换效率。此外，它们还可提供动态测量能力，能够捕获并显示瞬态电压、电流以及功率波形，从而让您只需一台仪器即可进行所有的关键功率测量。

## 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

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一号  
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

本文中的产品指标和说明可不经通知而更改  
© Keysight Technologies, 2018  
Published in USA, April 9, 2018  
出版号: 5992-0840CHCN  
[www.keysight.com](http://www.keysight.com)

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)