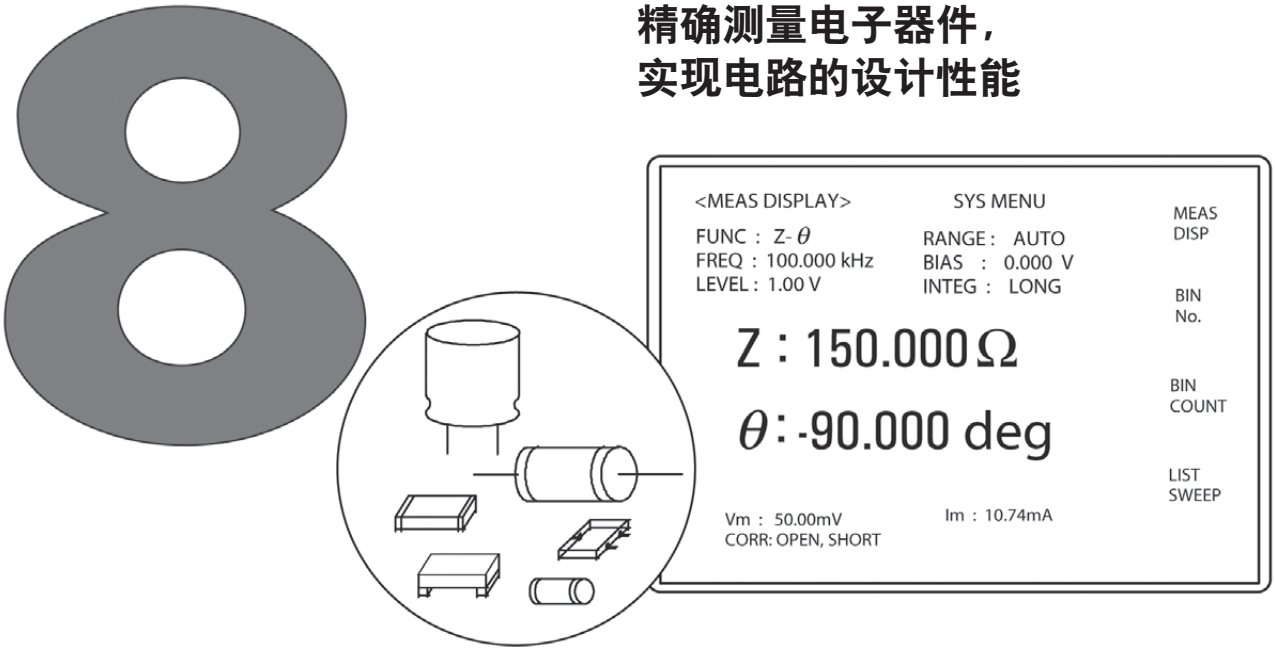
安捷伦
成功测量阻抗的8点提示

应用指南346-4

精确测量电子器件，
实现电路的设计性能



Agilent Technologies

目录

提示1. 阻抗参数的确定和选择

提示2. 选择正确的测量条件

提示3. 选择适当的仪器显示参数

提示4. 测量技术具有局限性

提示5. 进行校准

提示6. 进行补偿

提示7. 消除相位偏移和端口扩展的误差

提示8. 夹具和连接器维护

首先需要了解的基本知识

测量阻抗有几种不同的技术和方法，应该根据测量的频率范围、要测量的阻抗参数以及想要显示的测量结果来选择一个具体的测试技术。

自动平衡电桥技术在从毫欧姆到兆欧姆很宽的阻抗测量范围内有极高的测量精度，与之相适应的测量频率范围可以从几Hz到110 MHz。

IV和**RF-IV**技术在从毫欧姆到兆欧姆的阻抗测量范围内的测量精度同样很好，与之相适应测量频率范围可以从40 Hz到3 GHz左右。

传输／反射技术在非常宽的频率范围，从5 Hz到 110 GHz以上，测量50欧姆或75欧姆附近的阻抗值时，具有非常高的测量精度。

LCR表和阻抗分析仪的主要区别之一是它们对测量结果的显示方式。LCR表用数字显示测量结果，而阻抗分析仪既可以用数字也可以用图形显示测量结果。

LCR表或阻抗分析仪所采用的测量技术和仪表的类型无关，根据测量的频率范围，它们可以采用RF-IV、IV或自动平衡电桥技术。

用户会出于各种原因而需要测量器件的阻抗。一个典型的情况是工程师们需要对用在其所设计的电路中的器件的阻抗特性进行测量，因为通常情况下这些器件的供应商只给出了器件阻抗值的额定数据。

在某种程度上，在决定产品的最终设计性能，甚至决定制成品的生产时都会与产品所用器件的阻抗值有关，最终产品的性能和质量会受到器件的测量精度以及对器件的测量是否够全面的影响。

这份资料提供一些有用的信息来帮助工程师们熟悉自动平衡电桥、IV和RF-IV测试技术的使用。对于使用反射法测量阻抗的技术人员，可以从安捷伦编号为1291-1的应用指南“提高网络分析仪使用能力的8条提示”(文献编号为5965-8166CHCN)中找到类似的信息。

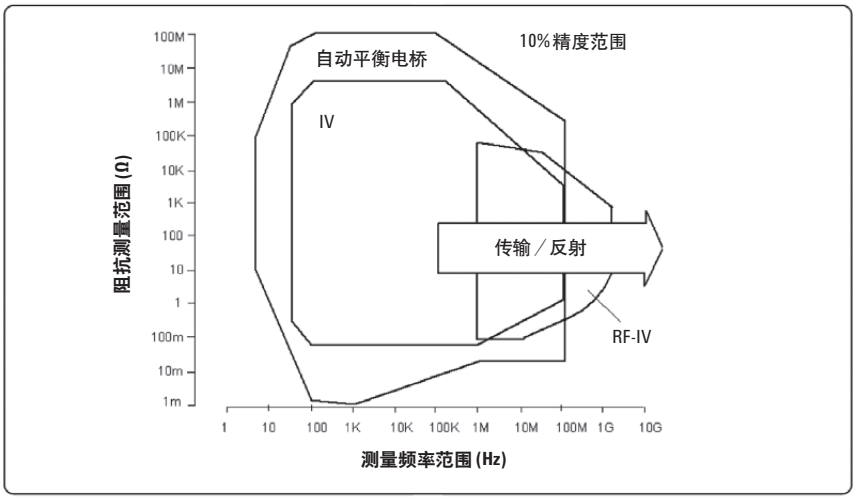


图0-1. 各种测量方法和相应的测量精度范围

提示1.
阻抗参数的确定和选择

阻抗是表征电子器件特性的参数之一。阻抗(Z)的定义是器件在给定的频率下对交流电流(AC)所起的阻碍作用。

阻抗通常用复数量(矢量)的形式来表示，可以把它画在极坐标上。坐标的第一和第二象限分别对应正的电感值和正的电容值；第三和第四象限则代表负的电阻值。阻抗矢量由实部(电阻 —— R)和虚部(电抗 —— X)组成。

图1-1所示是阻抗矢量的值落在极坐标系统中第一象限的情况。

电容(C)和电感(L)的值可从电阻(R)和电抗(X)值中推导出来。电抗的两种形式分别是感抗(X_L)和容抗(X_C)。

品质因数(Q)和损耗因数(D)也可从电阻和电抗的值中推导出来，这两个参数是表示电抗纯度的。当Q值偏大或D值偏小时，电路的质量更高。Q的定义是器件所储存的能量与其做消耗的能量的比值。D是Q的倒数。D还等于“tan δ”，其中δ是介质损耗角(δ是相位角θ的余角)。D和Q均属于无量纲的量。

图1-2显示的是阻抗与可以从阻抗值中所推导出的参数的关系。

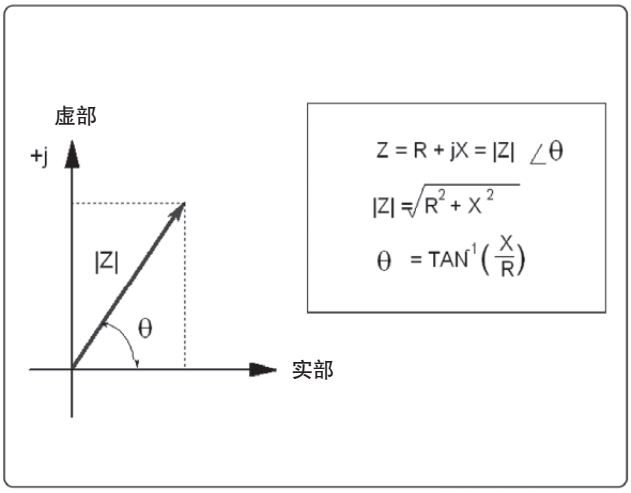


图1-1. 阻抗的矢量表示

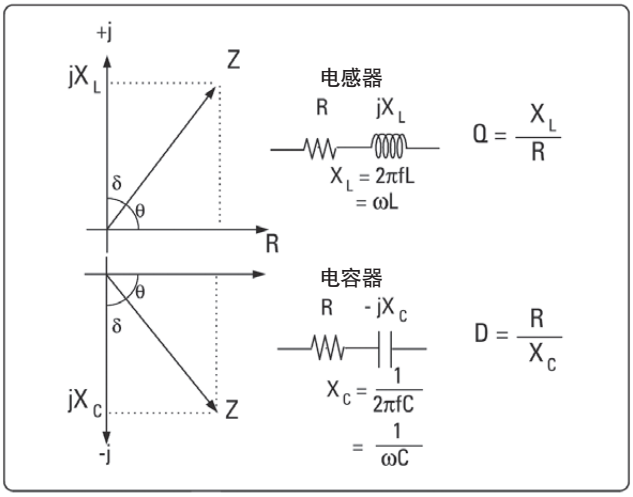


图1-2. 电容器和电感器参数

提示2.
选择正确的测量条件

器件制造商给出的器件阻抗值所代表的是在规定的测量条件下器件所能达到的性能，以及在生产这些器件时所允许出现的器件性能的偏差。如果在设计电路时需要很精确地知道所使用器件的性能的话，就有必要专门对器件进行测量来验证其实际值与标称值之间的偏差，或在不同于制造商测试条件的实际工作条件下测量器件的阻抗参数。

由于寄生电感、电容和电阻的存在，所有器件的特性会随着测量频率的变化而变化的现象是非常常见的。

图2-1显示的是一个常用的电容器在理想情况下其阻抗随频率变化的特性和实际上有寄生参数存在时其阻抗随频率变化的特性之间的差别。

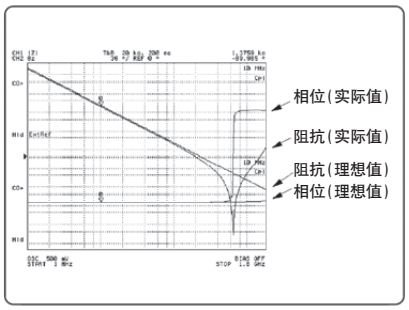


图2-1. 电容器的频率特征

器件阻抗的测量结果还会受到在测量时所选择的测量信号的大小的影响，图2-2显示的是阻抗测量结果随着交流测量信号的大小而变化的情况：

- 电容值(或材料的介电常数，即K值)的测量结果会依赖于交流测量信号电压值的大小。
- 电感值(或材料的磁滞特性)的测量结果会依赖于交流测量信号电流值的大小。

如图3和其中的公式所示，在测量时实际施加在被测器件两侧的交流电压VDUT是和它自身的阻抗、信号源的内阻以及信号源的输出电压有关的。

使用仪表的自动电平控制(ALC)功能可使被测器件(DUT)两侧的电压保持在一个恒定的值上。如果仪表内部没有ALC功能但是有监测信号大小的功能，可以利用这个功能给这种仪表编写一个相当于ALC功能的控制程序来保证被测器件两端上的电压稳定。

通过控制测量积分时间(相当于数据采集时间)可以去除测量中不需要的信号的影响。利用平均值功能可以降低测量结果中的随机噪声。延长积分时间或增加平均计算的次数可以提高测量精度，但也会降低测量速度。在仪表的操作手册中对这部分内容都有详细的解释。

其它有可能影响测量结果的物理和电气因素还包括直流偏置、温度、湿度、磁场强度、光强度、振动和时间等。

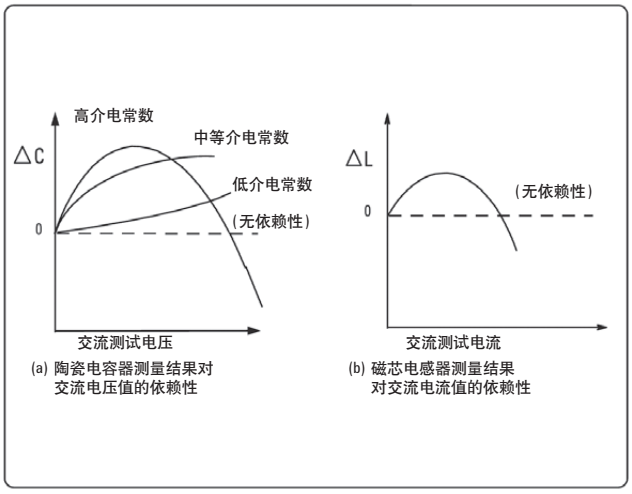


图2-2. 测量结果对测量信号大小的依赖性

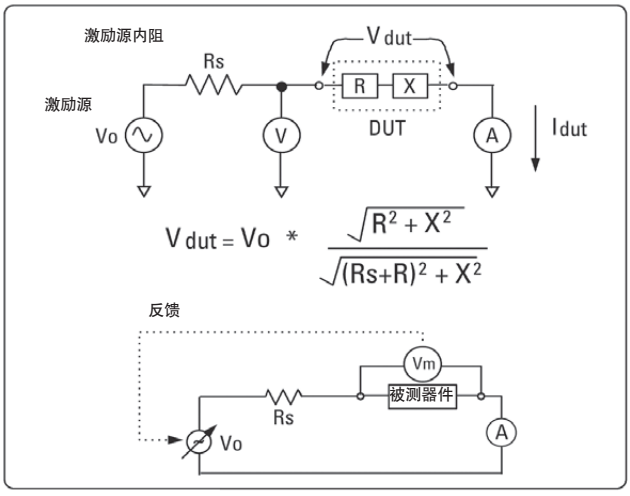


图2-3. 实际施加到被测器件上的信号和保证信号稳定的原理

提示3.
选择适当的仪器显示参数

现在有很多阻抗测量仪器都能够测量阻抗矢量的实部和虚部，然后再把它们转换为其它所需要的参数。

如果一个测量结果显示为阻抗(Z)和相位(θ)，那么被测器件的主要参数(R、C、L)和其它所有寄生参数所表现出来的综合特性就体现在|Z|和θ的数值的大小上。

如果要想显示一个被测器件除阻抗和相角以外的其它参数，可以使用它的二元模型等效电路，如图3-1所示。在区分这些基于串联或并联电路模式的二元模型时，我们用脚注“p”代表并联模型，用“s”代表串联模型，例如Rp、Rs、Cp、Cs、Lp或Ls。

在现实世界中没有器件是纯粹的的电阻、纯粹的电容、纯粹的电感。任何常用的器件通常都会有一些寄生参数(例如由器件的引脚、材料等引起的寄生电阻、寄生电感和寄生电容)存在，表现器件主要特性的部分和寄生参数部分结合在一起会使一个简单的器件在实际工作中表现得就像一个复杂的电路一样。

近年来新推出的阻抗分析仪都带有等效电路分析的高级功能，可以用三元或四元电路模型的形式对测量结果进行进一步的分析，如图3-2所示。使用这种等效电路分析功能可对器件更为复杂的寄生效应进行全面分析。

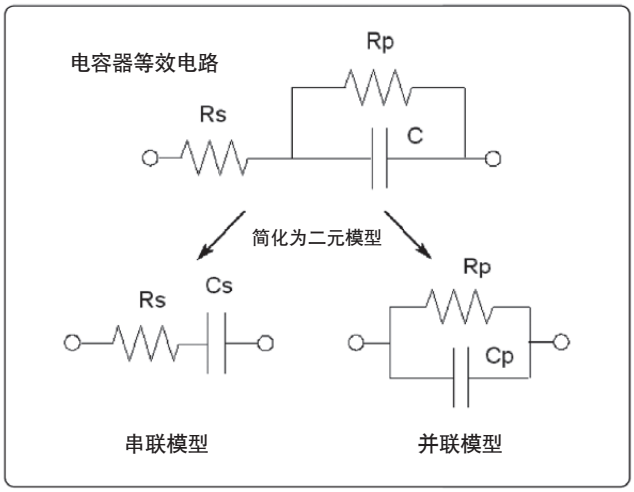


图3-1. 测量结果的等效电路模型

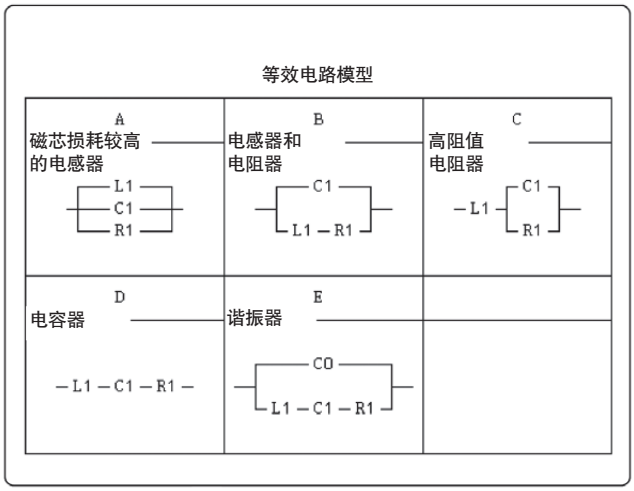


图3-2. 等效电路分析功能

提示4.
测量技术具有局限性

在产品设计和生产制造的测量中，我们经常被问到的问题恐怕就是:“测量结果的精度有多高?”

仪器的测量精度实际上取决于被测器件的阻抗值和所采用的测量技术，如第2页图0-1所示。

在确定测量结果的精度时，需要把测量到的被测器件的阻抗值和所使用仪表在所适用的测量条件下的精度进行比较才可以知道。

图4-1显示了在测量频率为1 MHz时，1 nF电容器的阻抗值为159 Ω。

仪表关于D值和Q值的测量精度的指标通常不同于仪表关于其它阻抗参数测量精度的技术指标。

对于低损耗(D值很低，Q值很高)器件，R值相对于X值而言是非常小的。R值的细小变化将会引起Q值的很大变化，如图4-2所示。

如果测量结果的误差跟所测到得的R的值相近似的话，就会导致D或Q值的测量结果是负数的现象。

需要时刻注意的是，测量结果的误差包括仪表自身的测量误差和测量夹具引起的误差。

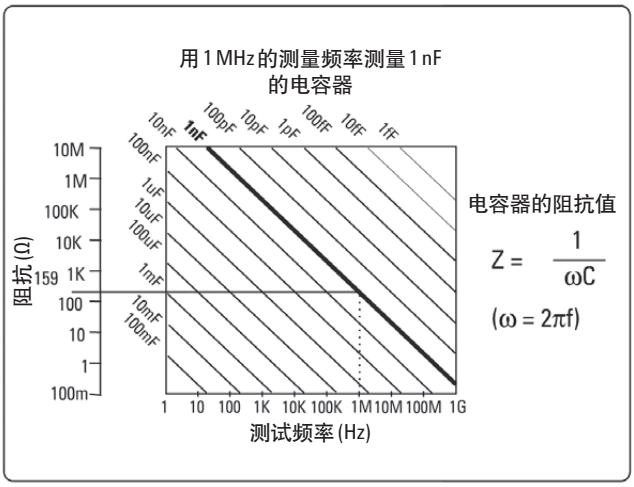


图4-1. 电容器的阻抗值和所选择的测量频率有关

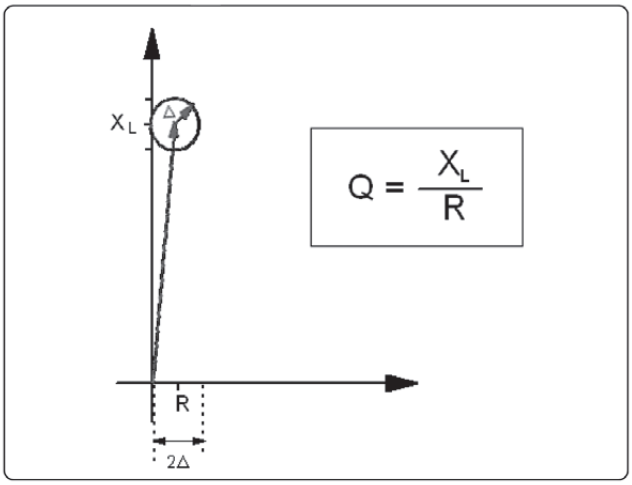


图4-2. Q值测量误差的示意图

提示5.
进行校准

进行校准的目的是给仪表定义一个能够保证测量精度的基准面，如图5-1所示。通常都是在仪表的测量端口上进行校准，在测量时用校准数据对原始数据进行修正。

安捷伦科技采用自动平衡电桥技术的仪表在出厂时或是在维修中心都做过基础的校准，可以在一定时期内(通常为12个月)，不论在测量中对仪表进行何种设置，测量结果都可以达到仪表指标规定的测量精度，操作人员使用这种仪表时是不需要进行校准操作的。

对不采用自动平衡电桥技术的仪表而言，在仪表初始化和设置好测量条件之后，使用一套校准件对仪表进行基础校准是必须的。在使用校准件对这类仪表进行校准时，这个提示所提供的信息是很有用的。

一些测量仪表还提供固定校准模式和用户校准模式供使用者选择。固定校准模式是在预先设定(固定)的频率上对校准件进行测量得到校准数据。在固定校准频点之间，校准数据可以通过内插法计算出来。

固定校准模式在固定校准频率之间的频点上的内插数据有时会存在较大的误差，当测量频率较高时这些内插校准数据的误差可能会非常大。

用户校准模式是在与实际测量中所选择使用的频率完全一样的频点上对校准件进行测量得到教准数据，对于一些具体的测量而言，用户校准模式不会产生校准数据的内插误差。

特别需要注意的是，用户校准模式得到的校准数据仅对测量条件和校准条件(指仪表的状态)完全一样的情况有效。

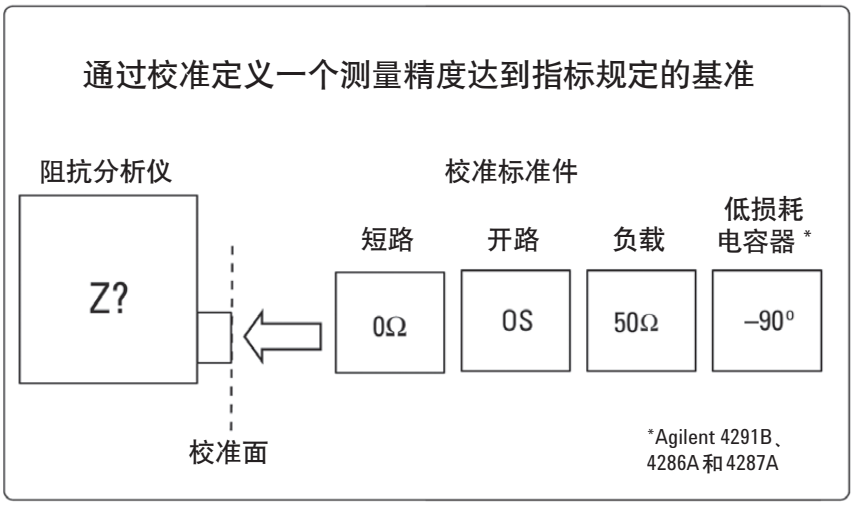


图5-1. 校准面

提示6.
进行补偿

补偿不同于校准，补偿对提高测量精度的效果取决于仪器的校准精度，因次必须在校准完成之后再执行补偿的操作。

如果可以把被测器件直接连在校准面上进行测量，那么仪表的测量结果是能够达到指标所规定的精度要求的。但是，通常都会在校准面和被测器件之间连接一个测试夹具或适配器，因而必须对这种中间部件的残留阻抗进行补偿才可以得到精确的测量结果。

由测试夹具或适配器引起的测量误差可能会非常大，而总的测量精度是由仪器的精度和被测器件与校准面之间的误差源组成的。

验证补偿的效果是否能使随后的测量正常进行是非常重要的。一般而言，在补偿时，开路条件下的补偿测量器件的阻抗值应当至少是被测器件阻抗值的100倍以上，而短路条件下的阻抗值应当低于被测器件阻抗值的1/100。

开路补偿可降低或消除杂散电容，而短路补偿可降低或消除测量夹具引起的能够导致误差增大的残留电阻和电感。

在进行开路或短路补偿测量时，应该使补偿器件两个引脚(即所谓UNKNOWN引脚)之间的距离与实际测量时被测器件引脚之间的距离一样，这样可以保证补偿测量和实际测量所碰到的寄生阻抗是一致的。

当测量端口被扩展到安捷伦提供的标准夹具距离之外、或者用户使用自己设计的测量夹具、或者在测量系统中还使用了扫描仪时 —— 这些情况都涉及到在测量中又引入了额外的无源器件或电路(例如巴仑、衰减器、滤波器等),那么在做补偿时，除了要做开路和短路补偿之外，还要做负载补偿。进行负载补偿所用到的器件的阻抗值一定是已知的而且要精确，并且还应当选择与被测器件的阻抗(在全部的测试条件下)和尺寸类似的器件做负载补偿器件。可把性能很稳定的电阻器或电容器当成负载补偿测量器件使用。

在选择补偿器件时一种比较实际的做法是先用一个标准夹具，在进行完开路和短路补偿之后再去测量准备当补偿负载用的器件，用这种方法来确定负载补偿器件的阻抗值，然后可以把这个阻抗值输入给仪表作为补偿测量标准件的值。

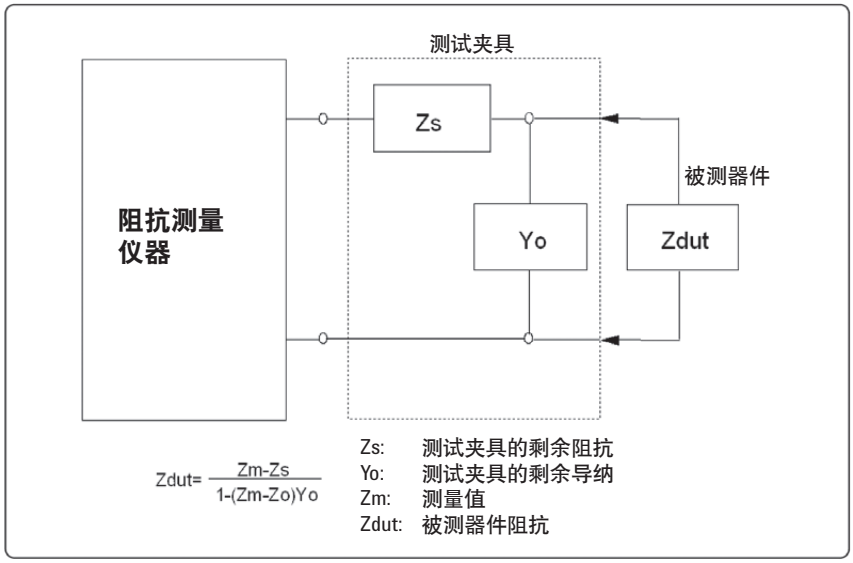


图6-1. 开路／短路补偿

提示7.
消除相位偏移和端口扩展的误差

通过电缆长度校正、端口扩展或电延迟，可将校准面扩展至测量电缆末端或夹具表面，这些种校正可降低或消除测量电路中的相移误差

当需要把仪表的测量端口延伸使其远离校准面时，如图7-1所示，延长电缆的电气特征会影响总的测量性能。以下这些办法可以降低这些影响:

- 尽量使用短的电缆来做测量端口的延伸。
- 使用高度屏蔽的同轴电缆，以阻隔外部噪声产生的影响。
- 尽量使用损耗非常小的同轴电缆，因为在扩展测量端口的操作中是假设不存在电缆损耗的，因此损耗最小的电缆可以避免测量精度的劣化。

开路／短路补偿无法减少由测试夹具引起的相移误差。

在测量频率达到射频范围时，应当在延长电缆的末端进行校准。如果在延长电缆的末端不能连接校准件，那么当延长电缆比较短而且特性很好时，可以用端口延伸来代替校准。

在使用自动平衡电桥仪表的情况下，如果测量电缆或延伸电缆是非标准的(不是由安捷伦提供的)，那么应该电缆或夹具的末端进行开路／短路／负载补偿。安捷伦自动平衡电桥仪表所使用的端口延长标准电缆(1、2或4米)使用电缆长度补偿数据进行误差校正，通常在使用时应该把这些标准延长电缆末端的屏蔽层连接到一起。

任何形式的端口扩展都有局限性，它们都会因为测量电路的损耗和／或相位偏移而引起测量误差，在进行端口延伸之前必须要对这种操作的局限性有清楚的了解。

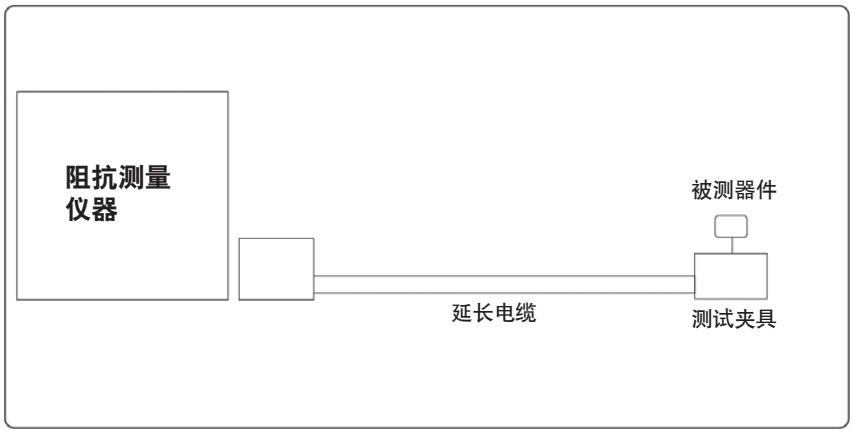


图7-1. 测量端口扩展

提示8.
夹具和连接器维护

高质量的电气连接能够确保进行精密的测量。每一次把被测器件与仪表或测量电缆、夹具进行连接时，接合面的特征都会随着连接的质量而有所不同，接合面的阻抗失配会影响测试信号的传播。

应当经常留意测试端口的接合表面、适配器、校准标准件、夹具连接器和测试夹具等的质量和状态。连接的质量取决于以下因素：

- 连接的组成部分
- 采用的技术
- 经常进行高质量维护
- 保证清洁度
- 按照标准要求保存仪表和部件

连接的组成部分

俗话说“一环薄弱，全局必垮”。测量系统也是如此。如果测试系统中使用了低质量的电缆、适配器或夹具，那么系统的整体质量都会降到最低水平。

采用的技术

通过使用力矩扳手和一些常识，可确保在进行重复连接时不出现器件损坏。器件损坏包括配合表面的刮痕和变形。

经常进行高质量维护

多数测量部件接合表面的部分都是可以替换的，把已经多次使用而性能变差的部分换掉。有的部件接合表面的部分是不可以替换或修复的，那么应该定期用新的部件去替换旧的部件。

保证清洁度

使用无腐蚀性／无损溶剂(例如去离子水和纯异丙醇)和无尘布擦拭接合表面可以保证它们的阻抗不受油迹或其它杂质的影响。请注意，一些塑料在使用异丙醇时会发生性质的该变。

按照标准要求保存仪表和部件

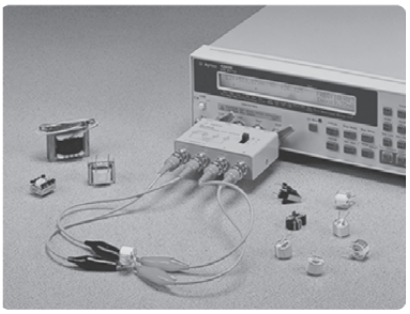
如果仪器的包装不提供附件袋，那么应当使用有盖的塑料盒和塑料封套来保护所有未在使用状态下的接合表面。

安捷伦阻抗测量仪表

安捷伦提供极为广泛的阻抗测量设备，足以满足您的应用需求。下文将简单介绍一些阻抗测量仪表。如欲了解更多信息，请参阅本指南末尾的产品文献。

LCR表

LCR表能够轻松、精确地测量元件，例如电容器、电感器、变压器和机电装置。这些仪器能够在特定的测量条件(例如测试频率和信号电平)下工作，这对于研发、生产测试和QA环境来讲十分重要。

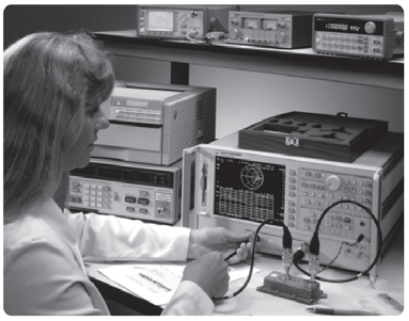


阻抗分析仪

安捷伦阻抗分析仪能够测量因特定测量条件改变而引起的元件性能的特征变化。性能特征的变化以图形格式显示。这些分析仪具备复杂的功能，包括游标和编程，可简化对测量结果的评测。它们还具备一些特性，可为研发提供特征评估，并为QA提供可靠性评估(包括温度特征)。

网络分析仪

网络分析仪利用传输／反射技术在射频和微波频率上执行阻抗测量。它们的图形显示配有游标和编程功能，可简化测量结果的分析。安捷伦网络分析仪适用于研发和QA领域。



组合分析仪

安捷伦组合分析仪将矢量网络、频谱和阻抗测量三种功能集于一身。这些仪器可为工程师提供多种功能，覆盖了从电路设计到元件评测的广泛应用。

产品文献

1. *LCR表、阻抗分析仪、测试夹具选型指南(5952-1430CHCN)。*
2. *经济型射频网络分析仪(5967-6316CHCN)。*

主要网络资源

www.agilent.com/find/component_test

欢迎订阅免费的

安捷伦电子期刊

www.agilent.com/find/emailupdates
根据您的选择,即时呈送产品和应用软件新闻。

www.axiestandard.org
AdvancedTCA® Extensions for Instrumentation and Test (AXIe) 是基于AdvancedTCA标准的一种开放标准,将AdvancedTCA标准扩展到通用测试和半导体测试领域。安捷伦是AXIe联盟的创始成员。

www.lxistandard.org
局域网扩展仪器(LXI)将以太网和Web网络的强大优势引入测试系统中。安捷伦是LXI联盟的创始成员。

www.pxisa.org
PCI扩展仪器(PXI)模块化仪器提供坚固耐用、基于PC的高性能测量与自动化系统。

安捷伦渠道合作伙伴

www.agilent.com/find/channelpartners
黄金搭档:安捷伦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。

安捷伦优势服务

安捷伦优势服务旨在确保设备在整个生命周期内保持最佳状态,为您的成功奠定基础。我们不断投资开发新的工具和流程,努力提高校准和维修效率,降低拥有成本,以便您保持卓越的竞争力。您还可以使用Infoline网上服务更有效地管理设备和服务。通过共享测量与服务方面的专业经验,我们能够帮助您设计创新产品。

www.agilent.com/find/advantageservices

Agilent Electronic Measurement Group
DEKRA Certified
ISO 9001:2008
Quality Management System

www.agilent.com/quality

如欲获得安捷伦科技的产品、应用和服务信息,请与安捷伦公司联系。如欲获得完整的产品列表,请访问:
www.agilent.com/find/contactus

请通过Internet、电话、传真得到测试和测量帮助。

热线电话: 800-810-0189、400-810-0189
热线传真: 800-820-2816、400-820-3863

安捷伦科技(中国)有限公司
地址: 北京市朝阳区望京北路3号
电话: (010) 64397888
传真: (010) 64390278
邮编: 100102

上海分公司
地址: 上海张江高科技园区
碧波路690号4号楼1-3层
电话: (021) 38507688
传真: (021) 50273000
邮编: 201203

广州分公司
地址: 广州市天河北路233号
中信广场66层07-08室
电话: (020) 38113988
传真: (020) 86695074
邮编: 510613

成都分公司
地址: 成都高新区南部园区
天府四街116号
电话: (028) 83108888
传真: (028) 85330830
邮编: 610041

深圳分公司
地址: 深圳市福田中心区
福华一路六号免税商务大厦3楼
电话: (0755) 83079588
传真: (0755) 82763181
邮编: 518048

西安分公司
地址: 西安市碑林区南关正街88号
长安国际大厦D座5/F
电话: (029) 88867770
传真: (029) 88861330
邮编: 710068

安捷伦科技香港有限公司
地址: 香港北角电气道169号25楼
电话: (852) 31977777
传真: (852) 25069292

香港热线: 800-938-693
香港传真: (852) 25069233

E-mail: tm_asia@agilent.com

本文中的产品指标和说明可不经通知而更改
©Agilent Technologies, Inc. 2011

出版号: 5968-1947CHCN

2011年12月 印于北京

Agilent Technologies