

低电平测量手册

精密直流电流、电压和电阻测量技术



KEITHLEY

A GREATER MEASURE OF CONFIDENCE

低电平测量手册

精密直流电流、 电压和电阻测量技术

第六版

崔建平 汪铁华 译
戚继明 王中武 校

©2005, 美国吉时利(Keithley)仪器公司
版权所有

序

电子测量技术是现代信息技术的基础。在信息产业链中,测量技术、通信技术和计算机技术分别完成了信息的采集、传输和处理,使其在推动国民经济高速增长,促进传统工业现代化的过程中起到了决定性的作用。因此我们将电子测量技术与仪器称为其他关联产业发展的催化剂、倍增器和战斗力。

电流、电压和电阻是国际量值体系(SI)中的三个重要参量单位,其与人类科学技术的发展密不可分,同时也是电子测量技术和仪器的基本研究对象。当电流、电压信号的量值小到一定程度,比如纳伏、皮安时,对它们的准确测量就变得非常的复杂困难。然而科学技术的进步又要求必须对这种微弱的信号进行精确的捕捉和测量,例如航空航天测控、半导体集成电路的测试、新型材料的研究、以及生命科学发展所需的分析测试等等。为此一代又一代的科学家和工程技术人员在茫茫噪声的大海中探索、搜寻,目的就是使仪器可测量的灵敏度越来越高,对被检测信号的分辨能力越来越强,以至于逼近其物理极限值。

众所周知,美国 Keithley 公司在微弱信号测量领域堪称一绝,具有数十年来积累下的深厚理论功底和丰富实践经验,其不仅制造出了全系列的高技术产品,而且为业内人士贡献了“低电平测量手册”一书。该手册自 1972 年面世,至今已出了第六版。该手册避免了繁杂的数学推导,完全从测试中的实际问题出发,深入浅出地让读者了解到如何正确地进行低电平测量,以达到对微弱电信号进行捕获和定量分析的目的。手册中不仅有比较严谨的测量术语的定义,还有具体的消除或避免测量误差的方法与应用实例,可以让读者一目了然,非常实用;可称为是现学现用、立竿见影的范例。

应广大读者和用户要求,我们组织翻译、出版了“低电平测量手册”的中文版,目的就是让更多的从事弱小信号测量的工程技术人员能更直接、更迅速地理解这本手册中的理念和方法、并应用其中提出的方案以解决测试实践中的问题。

“低电平测量手册”第 1 章和全部插图由崔建平翻译,第 2、3、4 章由汪铁华翻译,全书经戚继明、王中武校对。鉴于时间仓促,水平有限,手册中文版的缺点、错误在所难免,望读者阅读后多提宝贵意见,以便今后再版时更正。

在此感谢美国吉时利(Keithley)仪器公司北京办事处对本书翻译、出版提供的帮助。希望“低电平测量手册”中文版的出版为所有关心它的读者带来预期的帮助和收益。

崔建平

2005 年 9 月 18 日

译者简介

崔建平先生

1975年毕业于北京工业大学无线电系。高级工程师、中国电子学会高级会员。历任北京无线电技术研究所技术员、工程师、研究室主任、所长助理、付所长，美国 AMERITEC 公司中国首席代表，《电子测量与仪器学报》总编。三十年来一直从事电子测量仪器及计算机通信系统测试等领域技术研发和管理工作。

汪铁华先生

1964年毕业于北京大学无线电电子学系。教授级高级工程师、中国电子学会高级会员。1980年教育部派赴加拿大访问学者。北京市有突出贡献专家，1991年荣获首批国务院政府特殊津贴。多年来从事数字式电子测量仪器、微型计算机方面的研制工作及相关领域的专业技术英语口语译、笔译工作。

戚继明先生

生于1931年，江苏无锡人。学历：大学本科。主要从事于俄文与英文翻译、电子测量与仪器情报分析和研究。1982年创办《国外电子测量技术》杂志，任主编至2005年。1987年创办《电子测量与仪器学报》，现任常务副社长兼副总编。90年代先后编著出版了《英汉电子测量技术词汇》和《现代英汉电子测量与仪器技术词汇》，分别由宇航出版社和电子工业出版社出版。为推动我国电子测量技术的发展作出了贡献。

王中武先生

1987年毕业于北京大学无线电电子学系，后在中国计量科学研究院获理学硕士。资深市场营销人员，现任美国吉时利仪器公司中国区市场经理。王中武先生于1990在中国计量科学研究院工作，任技术工程师，1994年加盟吉时利仪器公司做销售代表，后任区域营销经理，通讯市场销售经理，中国区营销经理等职位，有多年的市场营销经验。在微弱信号测量方面有许多经验，在全国许多城市、大学及研究所进行过微弱信号测量方面的讲座和技术交流会。

目 录

第一章 低电平直流测量仪器

1.1	引言	1-3
1.2	测量的理论极限	1-3
1.3	仪器定义	1-5
1.3.1	静电计	1-5
1.3.2	数字多用表	1-7
1.3.3	纳伏表	1-7
1.3.4	皮安表	1-8
1.3.5	源 - 测量单元	1-8
1.3.6	数字源表仪器	1-8
1.3.7	弱电流前置放大器	1-9
1.3.8	微欧姆计	1-9
1.4	正确理解仪器的技术指标	1-9
1.4.1	准确度术语的定义	1-10
1.4.2	准确度	1-10
1.4.3	指标降低	1-13
1.4.4	噪声和噪声抑制	1-14
1.4.5	速度	1-16
1.5	电路设计基础	1-16
1.5.1	电压表电路	1-16
1.5.2	安培计电路	1-18
1.5.3	库仑计电路	1-22
1.5.4	高阻欧姆计电路	1-23
1.5.5	低阻欧姆计电路	1-26
1.5.6	完整的仪器	1-30

第二章 高源内阻的测量

2.1	引言	2-2
-----	----------	-----

2.2	高源内阻的电压测量	2-2
2.2.1	负载误差和保护技术	2-2
2.2.2	绝缘电阻	2-11
2.3	弱电流测量	2-14
2.3.1	泄漏电流和保护	2-14
2.3.2	噪声和源阻抗	2-19
2.3.3	零点漂移	2-21
2.3.4	产生电流	2-22
2.3.5	输入端压降	2-28
2.3.6	过载保护	2-30
2.3.7	交流干扰和衰减	2-32
2.3.8	使用库仑计测量弱电流	2-33
2.4	高电阻测量	2-37
2.4.1	恒压法	2-37
2.4.2	恒流法	2-38
2.4.3	高欧姆值电阻器的特性	2-43
2.5	电荷测量	2-44
2.5.1	误差源	2-44
2.5.2	零点检查	2-46
2.5.3	扩展静电计的电荷测量范围	2-46
2.6	一般静电计要考虑的问题	2-47
2.6.1	恰当的连接	2-47
2.6.2	静电干扰和屏蔽	2-49
2.6.3	环境因素	2-51
2.6.4	速度问题的考虑	2-52
2.6.5	约翰逊噪声	2-57
2.6.6	电缆、接头与夹具	2-61
2.6.7	模拟输出	2-65
2.6.8	浮地输入	2-66
2.6.9	静电计的校验	2-67

第三章 低源内阻的测量

3.1	引言	3-2
-----	----------	-----

3.2	低电压的测量	3-2
3.2.1	偏置电压	3-2
3.2.2	噪声	3-10
3.2.3	共模电流和反向误差	3-15
3.3	低电阻的测量	3-16
3.3.1	引线电阻和四线方法	3-16
3.3.2	热电动势和偏置补偿的方法	3-19
3.3.3	非欧姆接触	3-23
3.3.4	器件的发热	3-24
3.3.5	干电路测试	3-24
3.3.6	电感性器件的测试	3-26

第四章 典型应用介绍

4.1	引言	4-2
4.2	高源内阻电压测量的应用	4-2
4.2.1	电容器的介电吸收	4-2
4.2.2	电化学测量	4-5
4.3	弱电流测量的应用	4-9
4.3.1	电容器漏电的测量	4-9
4.3.2	弱电流半导体测量	4-12
4.3.3	用光电倍增管进行光测量	4-14
4.3.4	离子束电流的测量	4-17
4.3.5	雪崩光电二极管反向电流的测量	4-19
4.4	高阻测量的应用	4-21
4.4.1	印制电路板的表面绝缘电阻测试	4-21
4.4.2	绝缘材料电阻率的测量	4-23
4.4.3	半导体电阻率的测量	4-27
4.4.4	高阻值电阻器电压系数的测量	4-37
4.5	电荷测量的应用	4-38
4.5.1	电容的测量	4-39
4.5.2	使用法拉第杯测量物体上的静电电荷	4-40

4.6	低电压测量的应用	4-41
4.6.1	标准电池的比对	4-41
4.6.2	高分辨率温度测量和微热量测量	4-44
4.7	低阻测量的应用	4-46
4.7.1	接触电阻	4-46
4.7.2	超导体的电阻测量	4-49
4.7.3	导电材料电阻率的测量	4-52
第五章	低电平仪器选择指南	
5.1	引言	5-2
5.2	仪器和附件选择指南	5-2
附录 A	低电平测量故障诊断指南	
附录 B	电缆和连接器组件	
附录 C	技术术语	
附录 D	安全性考虑	

第 一 章

低 电 平 直 流 测 量 仪 器

图1-1：本文中使用的标准符号

前缀			
符号	英文前缀	中文前缀	幂次
y	yocto -	幺[科托]	10^{-24}
z	zepto -	仄[普托]	10^{-21}
a	atto -	阿[托]	10^{-18}
f	femto -	飞[母托]	10^{-15}
p	pico -	皮[可]	10^{-12}
n	nano -	纳[诺]	10^{-9}
μ	micro -	微	10^{-6}
m	milli -	毫	10^{-3}
(元)	(元)	(元)	10^0
k	kilo -	千	10^3
M	mega -	兆	10^6
G	giga -	吉[咖]	10^9
T	tera -	太[拉]	10^{12}
P	peta -	拍[它]	10^{15}
E	exa -	艾[可萨]	10^{18}
Z	zetta -	泽[它]	10^{21}
Y	yotta -	尧[它]	10^{24}

量			
符号	英文单位	中文单位	量
V	volts	伏[特]	电动势
A	amperes	安[培]	电流
Ω	ohms	欧[姆]	电阻
C	coulombs	库[仑]	电荷
S	seconds	秒	时间
W	watts	瓦[特]	功率
F	farads	法[拉]	电容
Hz	cycles/s	赫[兹]	频率
K	degrees	度	温度

1.1 引言

直流电压、直流电流和电阻值是人们在使用数字多用表（英文简称为DMM）时经常测量的参数，通常这些仪器对于测量大于 $1\text{ }\mu\text{V}$ 或 $1\text{ }\mu\text{A}$ 或小于 $1\text{G}\Omega$ 的信号是足够的了。本书中使用的标准符号详见图1-1所示。但是，当测量那些对仪器灵敏度的要求已接近理论极限的低电平信号时，必须使用诸如静电计、皮安表和纳伏表等更灵敏的仪器。

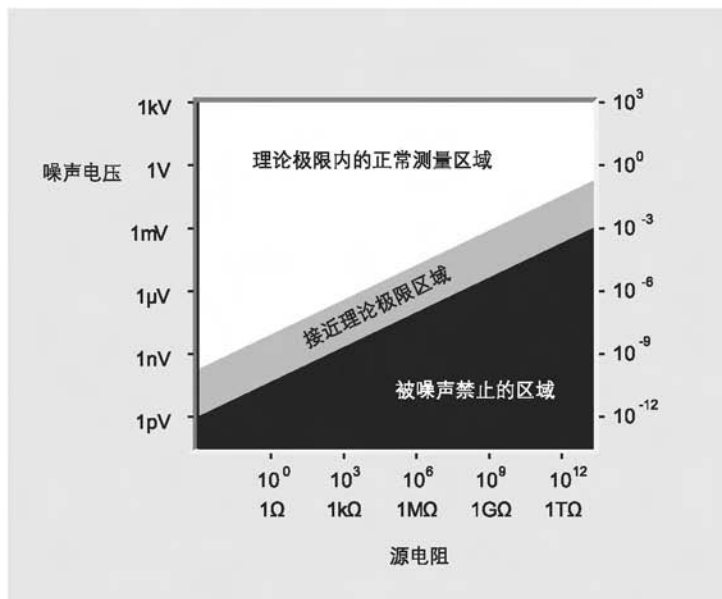
本章对电学量直接测量的理论极限和测量用的仪器作了概述，其中包括了对仪器的介绍和基本仪器电路的介绍。为便于阅读，其将分成以下几部分：

- 1.2 测量的理论极限，讨论对于低电平测量而言的理论极限和仪器本身的极限值。
- 1.3 仪器定义分别介绍静电计、数字多用表、纳伏表、皮安表、源-测量单元、数字源表、弱电流放大器和微欧姆计。
- 1.4 正确理解仪器的技术指标，回顾仪器技术指标中的术语，如准确度、分辨率、灵敏度、传递稳定性、指标降低、温度系数、时间漂移、噪声抑制 NMRR 和 CMRR 以及速度。
- 1.5 电路设计基础，分别介绍电压表、静电计、纳伏表和安培计、分流式安培计、反馈式皮安表、高速皮安表、对数式皮安表电路的基本设计原理。

1.2 测量的理论极限

测量灵敏度的理论极限取决于在电路中的电阻所产生的噪声。参见第2.6.5节和第3.2.2节所讨论的，电压噪声是与电阻、带宽和绝对温度乘积的平方根成正比的。图1-2中计算出了在室温300K、响应时间为0.1-10秒范围内的电压测量理论极限。从图中可见，高源电阻限制了电压测量的理论灵敏度，就是说当确信可以测量一个具有 $1\text{ }\Omega$ 源电阻的 $1\text{ }\mu\text{V}$ 信号时，如果该信号的源电阻变为 $1\text{T}\Omega$ ，则测量就会变得不可能。因为在源电阻为 $1\text{M}\Omega$ 时对于 $1\text{ }\mu\text{V}$ 的测量已经接近理论极限了。这时候采用通常的数字多用表是无法完成这类测量的。

图 1-2：电压测量的理论极限



除了电压或电流的灵敏度不够（大多数数字多用表的灵敏度不超过每个字 $1\ \mu\text{V}$ 或 1nA ）之外，与专门进行低电平直流测量的更灵敏的仪器相比，在测量电压时数字多用表的输入偏置电流¹也很大，而且其输入电阻也比较低，这些特性都会引起测量误差。对这些内容更详细的讨论请参见第二章和第三章。

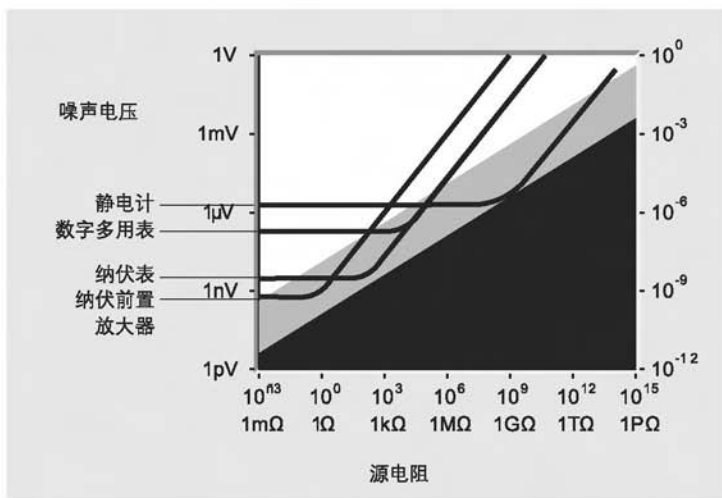
数字多用表的技术特性决定了其不可能测量接近理论极限的信号，如图 1-3 所示。但是如果源电阻小于 $1\text{M}\Omega$ 或者分辨率的要求低于 $0.1\ \mu\text{V}$ （即低源电阻的测量），被测信号电平未接近理论极值，数字多用表会有很好的用武之地。对于较高的电压灵敏度要求，如果源电阻较低（由于理论测量极限值的要求源电阻必须低），则纳伏表是测量非常接近理论极限信号电平的更好选择。对于很高的源电阻例如 $1\text{T}\Omega$ ，数字多用表就无能为力了，因为数字多用表的输入电阻范围在 $10\text{M}\Omega$ 到 $10\text{G}\Omega$ 之间，与 $1\text{T}\Omega$ 的源电阻差了若干数量级，结果会引起很严重的输入负载误差：

注¹ 流过有源器件或仪器输入引线中的电流。对电压测量来说，理想的输入电流应为零，所以，一切输入电流都代表误差。对电流测量来说，信号电流变成测量仪器的输入电流，然而在未向仪器的输入端加入信号电流时，总是存在某些背景电流，这种不希望的电流就是仪器的输入偏置电流常常也称为**偏置电流**。

泄漏电流是另一种由不希望的电阻通路(称为泄漏电阻)两端的电压产生的不希望的误差电流，这项电流和偏置电流合在一起就是总的误差电流。

同时几个皮安的输入电流会产生很大的电压偏置误差。因此只有具备级高输入电阻的静电计，才能测量这种高源电阻电压（已近似于理论极限的电压信号）。同样道理，由于数字多用表通常具有较高的输入端电压降，其影响到在弱电流测量是分辨率不会优于 1nA，而静电计和皮安表由于很低的输入端压降和很高的灵敏度更适合做接近理论极限的弱电测量。

图1-3: 在各种源电阻下典型的数字多用表(DMM)、纳伏表(nVM)、纳伏前置放大仪器(nV PreAmp)和静电计(Electrometer)的测量极限值



1.3 仪器定义

有很多不同类型的仪器可以做为直流测量的工具，其中包括静电计、数字多用表、纳伏表、皮安表、源-测量单元 (SMU)、数字源表、弱电前置放大器和微欧姆计。以下各节将分别介绍并比较这些仪器的特性。

1.3.1 静电计

静电计是一种高度精密的直流多用测量仪表。不仅可以完成一般直流数字多用表的测量功能，凭借特殊的输入特性和高灵敏度，静电计也可胜任常规多用表力所不及的电压、电流、电阻和电荷的测量。

在下列条件下必须使用静电计：

1. 检测时测量的范围已超过了常规仪器的允许极限：

* 电流小于 10nA (10^{-8}A)

* 电阻大于 $1\text{G}\Omega$ ($10^9\Omega$)

2. 负载误差必须最小化, 如:

* 被测电压源电阻高于 $100\text{M}\Omega$ (含 $100\text{M}\Omega$)

* 测量电流时的输入端压降要求小于几百毫伏时 (对只有几伏或更低电压的源测量电流时)

3. 需要电荷测量功能

4. 被测量信号位于或接近图 1-2 中所示的约瑟夫逊噪声极限区域。

静电计的其它特点是容易操作, 可靠和坚固耐用。

电压表功能

静电计的输入电阻非常高, 其典型值可达 $100\text{T}\Omega$ ($10^{14}\Omega$), 而且输入偏置电流小于 3fA ($3 \times 10^{-15}\text{A}$)。这种性能决定了它能够以非常小的电路负载来测量电压。

由于具有高输入电阻和低偏置电流, 静电计电压表对被测电路的影响极小。结果静电计常被用来测量一般多用表无法检测的电压值, 例如静电计可以测量一个 500pF 电容器上的电压, 而不会使该电容器明显地放电。它还能够测量压电晶体和高阻抗 pH 计电极上的电位。

安培计功能

做为安培计, 静电计能够测量仅由理论极限值或仪器的输入偏置电流所限制的微弱电流, 而且其输入端压降比普通的数字多用表要低的多。

基于极低的输入偏置电流和输入端压降, 静电计能够检测低至 1fA (10^{-15}A) 的电流。由于具有极高的灵敏度, 故可用于测量光电倍增管和电离室输出的电流, 以及诸如半导体、质谱仪和其它设备中的微弱电流。

欧姆计功能

静电计可以用恒流法或恒压法测量电阻。使用恒流法时, 静电计的高输入电阻和低偏置电流使它可以测量高达 $200\text{G}\Omega$ 的电阻。使用恒压法时, 静电计向未知电阻施加恒定的电压, 测量电流, 然后计算出电阻值。这种方法的好处在于可以在已知电压下测量未知电阻器。使

用这种方法静电计，可以测量高达 $10\text{P } \Omega$ ($10^{16} \Omega$) 的电阻。

库仑计功能

电流积分和电荷测量是只有静电计才具有的功能，在数字多用表中找不到这样的功能。静电计中的库仑计可以检测低至 10fC (10^{-14}C) 的电荷，相当于一个有源积分器电路，因而具有极低（通常低于 $100 \mu\text{V}$ ）的输入端压降。

与安培计相比，由于没有内部电阻导致的噪声，故库仑计测量的电流值可以更低，如到 1fA (10^{-15}A)，详见本书的 2.3.8 节。

1.3.2 数字多用表

数字多用表品种繁多、范围很宽，它包括了从廉价的 3 1/2 位手持机型到高精度的系统式数字多用表。由众多制造商生产的大多数型号性能都不能接近前面所讨论的测量理论极限。这种限制并不意味着数字多用表是一种不适用的仪器，事实上绝大多数测量都是在远离理论极限的水平进行的，而数字多用表正是为满足这种常规测量需要而设计的仪器。

虽然低电平测量定义为趋近于理论极限，且在数字多用表量程以外，但是现代科技缩小了数字多用表和低电平测量仪器之间的差距。例如更灵敏的数字多用表可以检测到 10nV 的直流电压，分辨 10pA 的直流电流和测量高达 $1\text{G } \Omega$ 的电阻。虽然这些性能指标与前述的更灵敏的静电计相比仍有相当不足，但在本手册中叙述测量原理和分析准确度时都将数字多用表与纳伏表、皮安计、静电计或 SMU 一并考虑。其中的差别仅在于测量的量级，当测量接近理论极限时，必须考虑全部的影响因素，而测量远离极限时，只需关心少数几个基本参数即可，如准确度、负载影响等。

1.3.3 纳伏表

纳伏表是一种非常灵敏的电压表，如图 1-3 所示。这类仪器是在接近理论极限的范围测量低源内阻的电压信号的最佳选择。与测量高源内阻电压的静电计相比，纳伏表的电压噪声和电压漂移更低一些，电流噪声和电流漂移则是静电计要更低一些。输入电阻类似于数字多用表，而远低于静电计。

和静电计一样，纳伏表也象数字多用表那样可靠、易于使用。其

突出的特性是电压灵敏度可达1pV。大多数纳伏表不是多功能的仪器，并且没有静电计那么复杂。

1.3.4 皮安表

皮安表是安培表的一个门类，其实质上是静电计中安培表功能的延续。与静电计相比，皮安表具有类似的低输入端压降，相同或稍快的测量速率，较低的电流灵敏度和低廉的价格。皮安表还可能具有其它特殊的性能，如高速对数响应或内置的电压源等。

1.3.5 源-测量单元 (SMU)

顾名思义，源-测量单元 (SMU) 同时具有测量和源两种功能。在测量仪器上附加电流和电压源功能，为各种低电平测量应用提供了额外的灵活性。例如：很高的电阻值可以通过在其两端施加电压，测量流过的电流值而获得。增加了源功能的SMU显然较使用几台独立的仪器更方便，更适于应用在检测产生I-V特性曲线的半导体芯片或其它器件的测试方面。

典型的 SMU 可提供以下四种功能

- * 电压测量
- * 电流测量
- * 电压源
- * 电流源

这些功能可以单独使用亦可按下列方式组合使用

- * 做为电压源的同时测量电流，或
- * 做为电流源的同时测量电压

SMU的许多特性类似于静电计，因此它适用于低电平测量。其输入电阻非常高（典型值为100T Ω 或更高），做高源内阻电压测量时减小了电路的负载误差。极小电流测量灵敏度类似于皮安表，有的低于10fA。

源-测量单元的另一个重要特点是其扫描功能。无论电压还是电流均可以特定的增量在指定的量程内进行扫描，同时测量每一阶梯的电流或电压值。SMU 内置的源-延迟-测量循环可以使测量速度最优化，以保证当电流需要足够的建立时间和测量的完整性。

1.3.6 数字源表 (SourceMeter[®]) 仪器

在很多方面数字源表仪器与源-测量单元是类似的，包括电流和电

压源，电流和电压测量以及扫描等性能。此外数字源表仪器还可直接显示电阻测量值。

典型的数字源表不像源-测量单元那样具有极高输入电阻或极低的弱电流测量能力。数字源表是为常规的测试和高速生产测试等应用而设计的。它通常用于中低电平测试和研发实验室。

与只能做单点测量的数字多用表不同，数字源表由于其内置了源功能，所以可以用来生成一组电流-电压 (I-V) 特性曲线，这对于半导体器件和材料的测试是非常有用的。

当做为电流源时，数字源表可与纳伏表一起使用，通过自动反转电流源的极性，修正偏置误差来测量极低的电阻（即 Delta 模式）。

1.3.7 弱电流前置放大器

某些型号的SMU或数字源表可配置远端弱电流前置放大器。这种设计可以使灵敏的放大器电路与SMU或数字源表脱离，这样就可以使仪器最灵敏的部分非常接近被测设备，从而消除了一个主要的误差来源即电缆自身的噪声和漏电。

1.3.8 微欧姆计

微欧姆计是一种设计用于低电阻测量的特殊类型的欧姆计，采用的电阻测量技术类似于数字多用表，但电路经过优化，从而典型的微欧计可以测量低至 $10\ \mu\Omega$ 的电阻。

使用微欧计进行电阻测量必须采取四线技术以使测试电缆和连接器带来的误差减至最小。微欧计通常具有偏置补偿和干电路测试等特性，以优化低电阻的测量。偏置补偿是使用脉冲式测试电流的方法，以消除热电动势 (EMF) 的影响。干电路测试模式则将跨接在被测电阻两端的电压限制在很小的范围（典型值为 $<20\text{mV}$ ），以避免在测试继电器、连接器和开关等器件时击穿氧化膜或其它薄膜。

1.4 正确理解仪器的技术指标

正确理解仪器的技术指标对于做好低电平测量工作是十分重要的。虽然在众多技术指标中准确度占据主要地位，但是诸如噪声、漂移、速度和其它可能降低技术指标的参数亦不容忽略。

1.4.1 准确度术语的定义

本节给出了有关仪器准确度的若干术语的定义。其中一些术语将在后续段落中予以讨论。表1-1汇总了与仪器各项技术指标有关的参数间的换算关系。

灵敏度(SENSITIVITY)— 仪器所能检测得到的信号中的最小变化量。

分辨率(RESOLUTION)— 仪器所能检测到的最小信号所占的比例分量。

重复性(REPEATABILITY)— 在相同测试条件下相邻的成功测量结果之间的一致性。

再现性(REPRODUCIBILITY)— 在给定的变化条件下，相同量值测试结果之间的一致性。

绝对准确度(ABSOLUTE ACCURACY)— 测量结果与被测量真值或其标准认定值之间的接近程度。准确度常被分成增益和偏置二项。

相对准确度(RELATIVE ACCURACY)— 用被测值与参考值之间的相对关系表示出的测量准确度。

误差(ERROR)— 与被测量值的真值相比测量的偏差（差值或比值）。请注意真值就其本质而言是不可确定的。

随机误差(RANDOM ERROR)— 受随机分布误差影响的大量测量结果的平均值与真值的偏差。

系统误差(SYSTEMATIC ERROR)— 受系统自身分布误差影响的大量测量结果的平均值与真值的偏差。

不确定度(UNCERTAINTY)— 对测量中可能产生的误差的评估，即估计与被测量的实际量值可能产生的偏差范围。不确定度与准确度相反。

精度(Precision)是一个与这里定义的许多术语相比更加定性的指标，指测量中不确定性的程度。适用于可重复性或可再现性测试等场合，而不适用于在其他应该用准确度（ACCURACY）的场合。

1.4.2 准确度

在任何测量场合中最重要的考虑因素之一就是读数的准确度。对任何给定的测试设置来说，有几个因素能够影响准确度。最重要的因素是仪器本身的准确度它可以用几种方法来表示，包括满度的百分数、读数的百分数或这二者的组合。仪器准确度的要素将在下面的段落中加以介绍。

表 1-1 技术指标变换因子

百分数	ppm	位数	比特数	dB	相对于 10V	稳定到额定 准确度时的时 间常数倍数
10%	100000	1	3.3	-20	1V	2.3
1%	10000	2	6.6	-40	100mV	4.6
0.1%	1000	3	10	-60	10mV	6.9
0.01%	100	4	13.3	-80	1mV	9.2
0.001%	10	5	16.6	-100	100 μ V	11.5
0.0001%	1	6	19.9	-120	10 μ V	13.8
0.00001%	0.1	7	23.3	-140	1 μ V	16.1
0.000001%	0.01	8	26.6	-160	100nV	18.4
0.0000001%	0.001	9	29.9	-180	10nV	20.7

其它的因素如输入负载、泄漏电阻和泄漏电流、屏蔽和保护等，也可能对总的准确度有重大的影响，这些重要的测量考虑因素将在第二章和第三章讨论。

测量仪器的技术指标

仪器的准确度通常规定为读数的百分数，加上量程的百分数（或者最低有效位的字数）。例如，典型数字多用表的准确度技术指标可以表达为： $\pm$ （读数的 0.005% + 量程的 0.002%）。注意，在读数接近满度时读数的百分数最重要，而当读数为满度的一小部分时，量程的百分数更重要。

准确度也可以用 ppm（parts per million，即百万分之一）来表示。通常，这种准确度技术指标表示为 $\pm$ （读数的 ppm + 量程的 ppm）。例如高分辨率数字多用表的直流电压准确度可能表示为 $\pm$ （读数的 25ppm + 量程的 5ppm）。

分辨率

数字仪器的分辨率由可以显示的数字值决定，而该数字值又决定于位数。典型的数字静电计可能有 $5\frac{1}{2}$ 位，意思是由 5 个完整的位（每一位的数值可以从 0 到 9），加上首位的半位（可以取值为 0 或 ± 1 ）。这样 $5\frac{1}{2}$ 位显示可以指示出 0 到 199999，共 200000 个字。显示的分辨率为最小字数与最大字数之比（对 $5\frac{1}{2}$ 位显示来说为 $1/200000$ 或 0.0005%）。

例如：4 $\frac{1}{2}$ 位表的技术指标为 $\pm$ （0.05% + 1 个字），10.000V

的读数相当于总误差 $\pm (5\text{mV}+1\text{mV})$ 或 $\pm (\text{读数的} 0.05\% + \text{读数的} 0.01\%)$ ，总共为 0.06% 。一般地说，分辨率越高准确度越好。

灵敏度

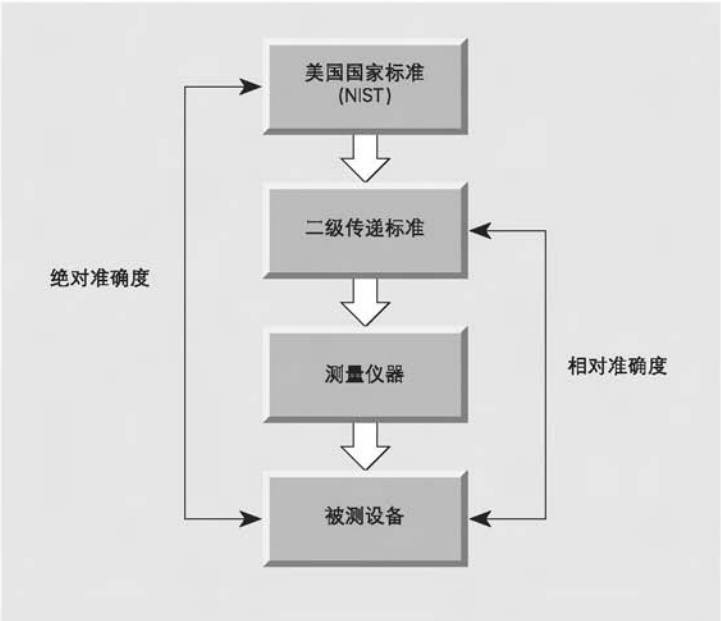
测量的灵敏度是可以探测出的被测信号的最小变化量。例如，电压灵敏度为 $1\text{ }\mu\text{V}$ 表示输入信号小于 $1\text{ }\mu\text{V}$ 的变化将不会在读数中反映出来。与此类似，电流灵敏度为 10fA ，则意味着只有大于该数值的电流变化才能探测出来。

测量仪器最终的灵敏度决定于其分辨率和最低测量量程。例如， $5\frac{1}{2}$ 位数字多用表在 200mV 量程时的灵敏度为 $1\text{ }\mu\text{V}$ 。

绝对准确度和相对准确度

如图1-4所示，绝对准确度是仪器直接溯源到NIST（美国国家标准技术研究院）的一级标准的准确度。绝对准确度可以规定为 $\pm (\text{读数的百分数} + \text{字数})$ ，或者也可以表达为 $\pm (\text{读数的ppm} + \text{量程的ppm})$ 。这里ppm表示百万分之一。

图1-4：绝对准确度和相对准确度的对比



相对准确度（见图 1-4）规定了仪器相对于某一个二级参考标准的准确度。和绝对准确度一样，相对准确度可以规定为 $\pm$ （读数的百分数+字数），或者表达为 $\pm$ （读数的 ppm+ 量程的 ppm）。

传递稳定度

相对准确度的一种特殊情况是传递稳定度。它定义了很短的时间段内，很窄的温度范围内，仪器相对于某一二级参考标准的准确度（通常在 5 分钟和 $\pm 1^\circ\text{C}$ 之内）。在必须相对于某一已知的二级标准进行高准确度的测量时，传递稳定度特别有用。

根据准确度技术指标计算误差项

为了说明如何由仪器的技术指标计算测量误差，我们假定下列的仪器参数：

准确度： $\pm$ （读数的 25ppm+ 量程的 5ppm）

量程：2V

输入信号：1.5V

其误差计算如下：

$$\begin{aligned}\text{误差} &= 1.5 (25 \times 10^{-6}) + 2(5 \times 10^{-6}) \\ &= (37.5 \times 10^{-6}) + (10 \times 10^{-6}) \\ &= 47.5 \times 10^{-6}\end{aligned}$$

所以，读数可以落在 $1.5\text{V} \pm 47.5 \mu\text{V}$ 的范围内，误差为 $\pm 0.003\%$ 。

1.4.3 指标降低

准确度的技术指标，由于温度和时间漂移等因素的影响会有所降低。如下所述：

温度系数

工作环境的温度能够影响准确度。因此，仪器的技术指标通常是在规定的温度范围内给出的。吉时利公司新的静电计、纳伏表、数字多用表和 SMU 的准确度技术指标，通常都在 18°C 到 28°C 的温度范围内给出。在这个温度范围之外，规定了温度系数，如 $\pm (0.005\% + 0.1 \text{ 字}) / ^\circ\text{C}$ ，或者 $\pm$ （读数的 5ppm+ 量程的 1ppm）/ $^\circ\text{C}$ 。和准确度技术指标一样，对数字显示仪器来说，温度系数表达为读数的百分数加上最低有效位的字数（或者读数的 ppm+ 量程的 ppm）。如果仪器工作在 18°C 到 28°C 的温度范围之外，必须考虑这个系数。按照前面介绍的方法可以计算出低于 18°C 或高于 28°C 时的误差。

时间漂移

大多数电子仪器,包括静电计、皮安表、纳伏表、数字多用表、SMU和数字源表仪器的准确度和其它参数,在长时间内无论设备是否工作,都会变化。由于这种变化,仪器的技术指标通常都指明一个时间间隔。超过这个时间间隔就不能保证仪器的准确度。这个时间间隔在仪器的技术指标中给出,通常为90天或1年。前面我们已经注意到,传递稳定度的技术指标是在很短的时间(典型值为5到10分钟)内规定的。

1.4.4 噪声和噪声抑制

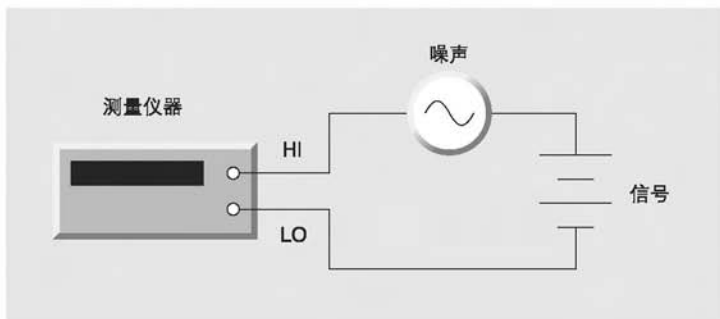
实际上,在进行任何电子测量工作时都要考虑噪声。但是,在进行低电平测量工作时噪声问题特别重要。所以,在评价仪器的性能时,很好地理解噪声的技术指标和术语是非常重要的。

串模抑制比

串模抑制比(NMRR)说明了仪器抑制或衰减高、低输入端之间出现的噪声的能力。如何抑制噪声的方法是使用积分型A/D变换器对特定频率(通常为50或60Hz)的噪声进行衰减,而让低频或直流的串模信号通过。如图1-5所示,串模噪声是叠加到希望的输入信号上的误差信号。检测出的串模噪声表现为峰值噪声或直流信号偏差,串模抑制比按下式计算:

$$NMRR=20 \log \left[\frac{\text{峰值串模噪声}}{\text{峰值测量偏差}} \right]$$

图1-5: 串模噪声

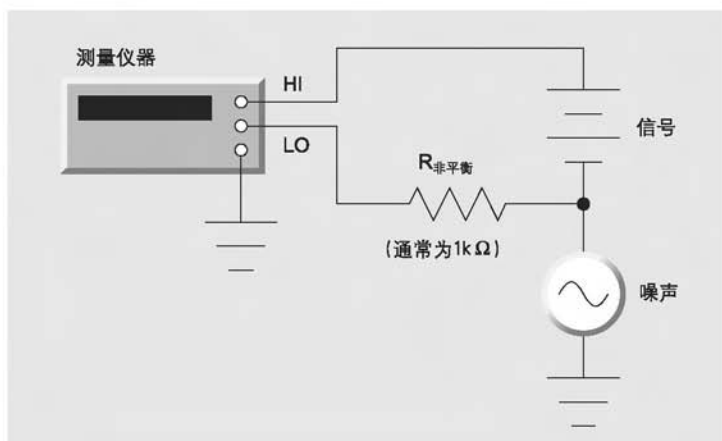


如果不采取措施将叠加到信号上的串模噪声减到最小，串模噪声会对测量产生严重的影响。仔细的屏蔽通常能够衰减串模噪声，很多仪器都有内部的滤波器以进一步降低这种噪声的影响。

共模抑制比

共模抑制比（CMRR）说明了仪器抑制高、低输入端与机箱地之间出现的噪声的能力。如图 1-6 所示，CMRR 通常在一条输入引线上有 1k 电阻器的不平衡条件下测量。

图1-6：共模噪声



虽然共模噪声的影响通常没有串模噪声严重，但是这种噪声仍然是灵敏的测量工作中的一个影响因素。为了尽量降低共模噪声，将屏蔽只连到测试系统的一个点上才行。

噪声的技术指标

NMRR 和 CMRR 一般都在 50 或 60Hz 以 dB 为单位给出，因为这种频率是我们最感兴趣的干扰频率。CMRR 常常也在直流下给出。NMRR、CMRR 的典型数值分别为 $>80\text{dB}$ 和 $>120\text{dB}$ 。

噪声抑制比每增加 20dB 噪声电压或电流就降低 10 倍，例如 80dB 的抑制比，表示噪声降低 10^4 倍，而 120dB 表示噪声将降低 10^6 倍。所以，在 80dB 抑制比下，1V 的噪声信号将降低到 $100\text{ }\mu\text{V}$ ，而在 120dB 抑制比下将降低到 $1\text{ }\mu\text{V}$ 。

1.4.5 速度

在很多测试工作中，仪器的测量速度常常是很重要的。仪器的测量速度常常表达为在给定的仪器工作条件下每秒钟内的读数数目。积分时间和滤波器的量值等因素会影响仪器总的测量速度。然而，改变这些工作模式还可能改变分辨率和准确度，所以常常要在测量速度和准确度之间进行折衷。

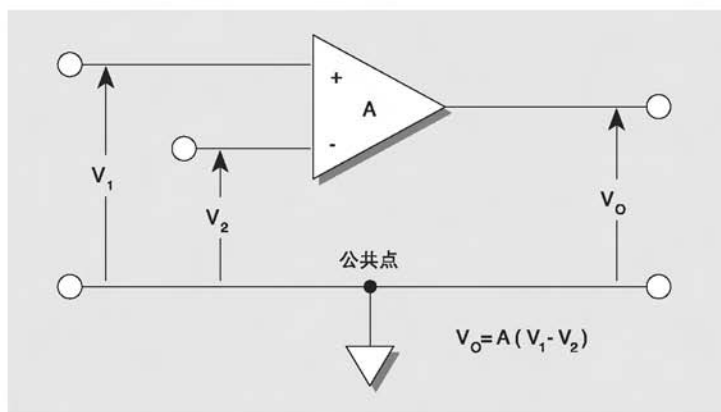
在进行低阻抗测量时，常常要考虑测量的速度。在阻抗较高时，电路的建立时间变得更加重要，并常常成为决定总测量速度的主导因素。第 2.6.4 节将对电路的建立时间问题进行更详细的讨论。

1.5 电路设计基础

很多低电平测量仪器的设计，无论是电压表、安培计、欧姆计或是库仑计，使用的电路一般都可以按照运算放大器来理解。图 1-7 示出一个基本的运算放大器其输出电压为：

$$V_o = A (V_1 - V_2)$$

图1-7：放大器的基本工作原理



运算放大器的增益 (A) 非常大，至少有 10^4 到 10^5 ，常常为 10^6 。放大器具有以公共 (Common) 引线端子为参考的电源，图中未示出。

流入运算放大器输入端的电流理想情况下为零，引入适当的反馈可使输入端的电压差 ($V_1 - V_2$) 降低到接近零。

1.5.1 电压表电路

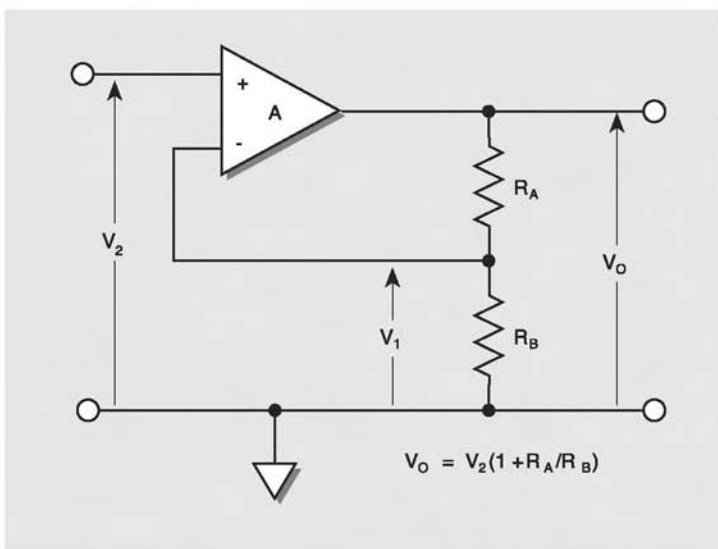
静电计电压表

在按图1-8连接时，运算放大器变成电压放大器。由于偏置电流很低，所以流过 R_A 和 R_B 的电流相同，假定增益 A 非常高，则电路的电压增益为：

$$V_0 = V_2 (1 + R_A/R_B)$$

输出电压 (V_0)，由输入电压 V_2 和电阻器 R_A 与 R_B 设定的放大器增益来决定。若 V_2 加到放大器的输入端，运算放大器的高输入电阻成为 V_2 的唯一负载，而且唯一从源吸取的电流是运算放大器非常低的输入偏置电流。在很多电路（如静电计电压表）中， R_A 短路， R_B 开路从而得到 1:1 的单位增益。

图1-8：电压放大器



纳伏表的前置放大器

与图1-8所示相同的基本电路结构也可以用作纳伏表的输入前置放大器。由于需要更高的电压增益，所以相应设置 R_A 与 R_B 的数值。纳伏表的前置放大器典型增益数值为 10^3 。

静电计和纳伏表的特性不同，所以这两种仪器对运算放大器的要求也有所不同。静电计电压表使用的运算放大器，最重要的特性是低输入偏置电流和高输入阻抗。纳伏表输入前置放大器的最重要的要求，则是低输入噪声电压。

1.5.2 安培计电路

有两种电流测量的基本技术，即分流安培计技术和反馈安培计技术。数字多用表 and 老式的静电计使用分流的方法，而皮安表和静电计的电流功能则只使用反馈安培计结构。

分流安培计

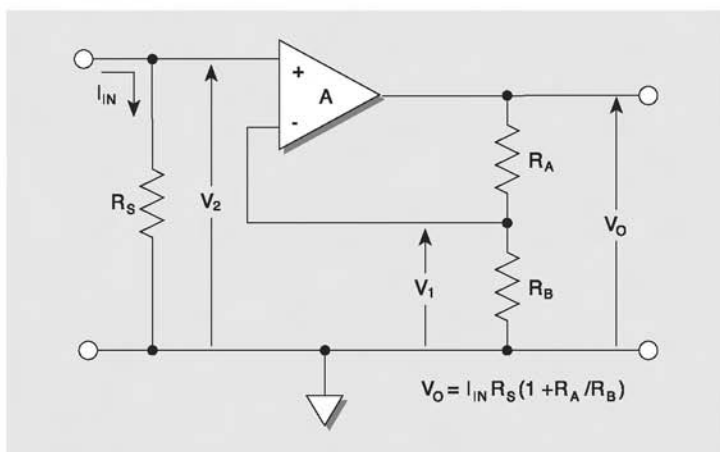
在电压表的输入端并联一个电阻器就构成了分流安培计，如图 1-9 所示。输入电流 (I_{IN}) 流过分流电阻器 (R_S)，输出电压定义为：

$$V_0 = I_{IN} R_S (1 + R_A / R_B)$$

由于下面介绍的几种理由，一般最好使用尽可能小的 R_S 值。

首先，低阻值电阻器比高阻值电阻器准确度高，其时间和温度稳定性及电压系数等性能都更好。其次，低阻值电阻器降低了输入时间常数，使仪器的响应时间更短。为了尽量降低电路负载，安培计的输入电阻 (R_S) 应当很小以便降低输入端压降 (V_2)。然而要注意减小分流电阻会降低信号噪声比。

图1-9：分流放大器



反馈安培计

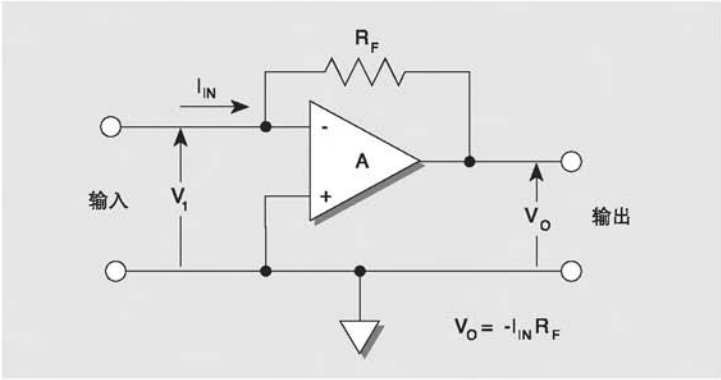
在图1-10所示的电路结构中，输入电流 (I_{IN}) 流过反馈电阻器 (R_F)，放大器 (A) 的低偏置电流对电流 (I_{IN}) 的影响很小，可以忽略，放大器的输出电压计算如下：

$$V_0 = -I_{IN} R_F$$

所以输出电压可以用来度量输入电流，总的灵敏度由反馈电阻器 (R_F) 决定。电路的低输入端压降以及相应的快速上升时间是由高增益运

算放大器实现的。此运算放大器迫使 V_1 接近于 0。

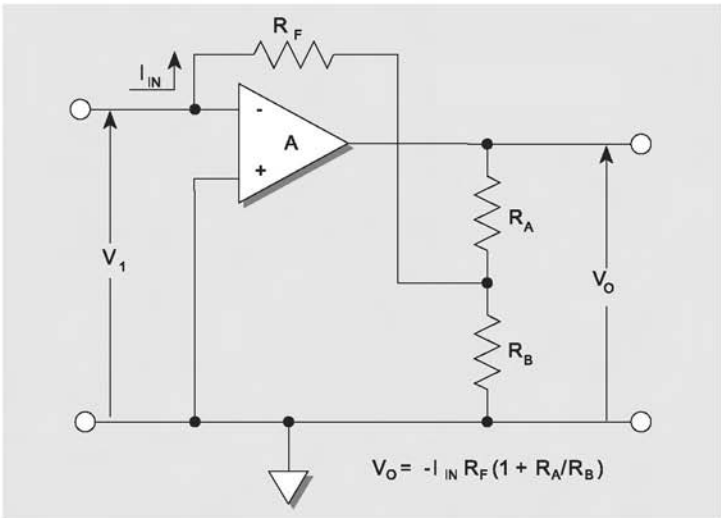
图1-10：反馈放大器



和电压表电路一样，可以使用如图 1-11 所示的组合电路来改变皮安表放大器的增益。这里增加的 R_A 和 R_B 形成一个“乘法器”，其输出电压为：

$$V_0 = -I_{IN} R_F (1 + R_A / R_B)$$

图1-11：电压增益可选的反馈放大器



高速皮安表

反馈皮安表的上升时间通常受反馈电阻器 (R_F) 和并联电容 (C_F) 形成的时间常数的限制。实现高速测量的基本方法是, 仔细地进行皮安表的机械设计以尽量减少寄生并联电容。

对反馈回路进行略微的修改就可以有效地消除残存的并联电容, 如图 1-12 所示。如果使 $R_1 C_1$ 的时间常数和 $R_F C_F$ 的时间常数相等, 那么电路中阴影区域的性能就和 C_F 为零时 R_F 的性能相同。在这种情况下匹配时间常数是很容易的, 因为这时所涉及的电容都是常数, 不受输入电容的影响。

对数皮安表

用具有对数电压电流关系的二极管或三极管来代替皮安表中的反馈电阻器就构成了对数皮安表, 如图 1-13 所示。这时输出电压 (及仪表的显示) 等于输入电流的对数。结果无需改变反馈元件就可以在仪表上读出几个数量级范围内的电流。

图1-12：消除并联电容

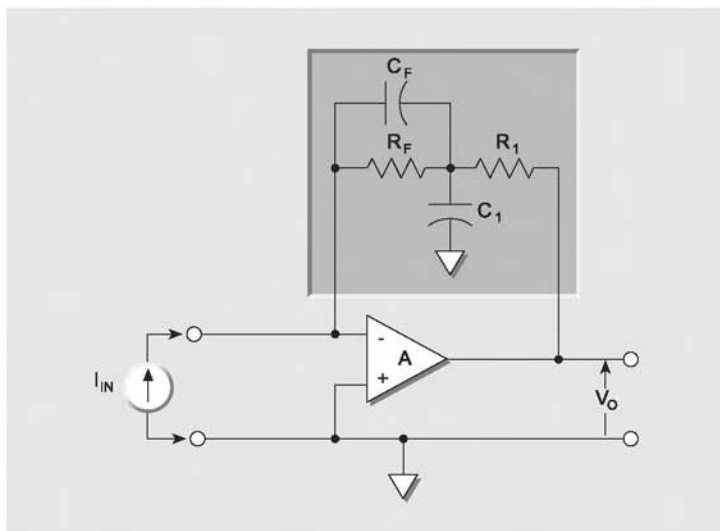
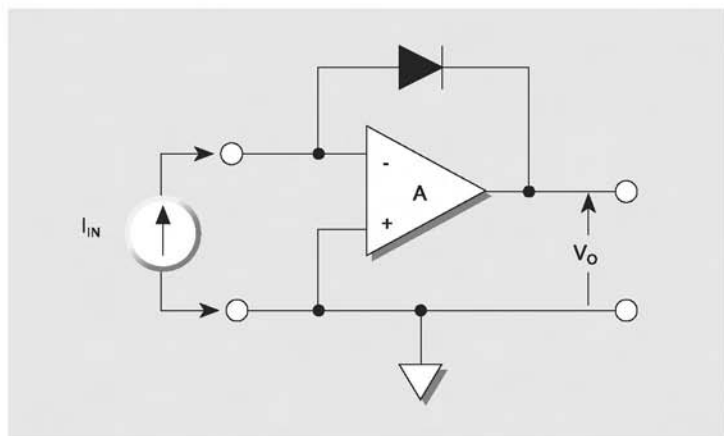


图1-13：对数皮安表



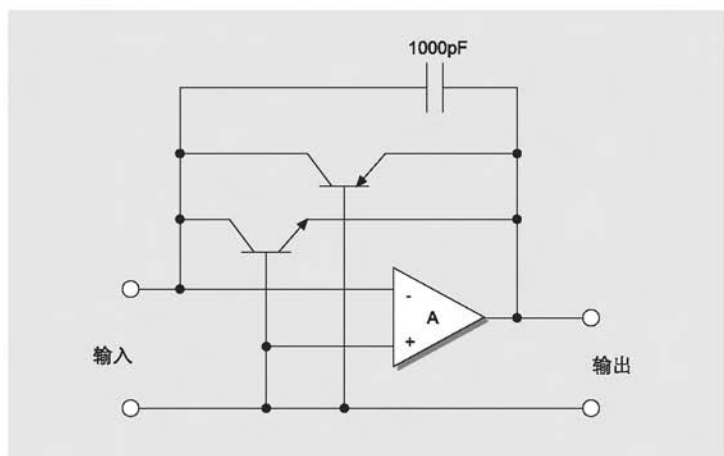
对数皮安表的主要优点是能够在几个数量级的范围内跟踪电流的变化，而无须改变量程。

这种方法，较大的缺点是损失了准确度和分辨率。然而，也有些数字式皮安表，采用自动量程和数字对数变换的方法，这可将准确和宽动态范围结合了起来。

如果将两个二极管反向并联，则此电路就可以在双极性输入信号的情况下工作。

采用小信号三极管代替二极管，可以得到较好的结果。图1-14示出反馈通路采用一个NPN晶体管和二个PNP晶体管来实现双极性工作。

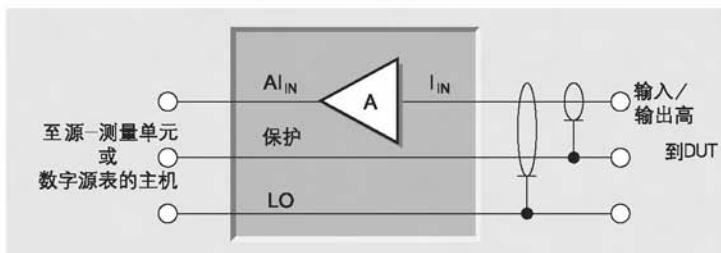
图1-14：双极性对数电流 - 电压变换器



远地前置放大器电路（加电压测电流模式）

图1-15示出一个典型的前置放大器电路。在加电压测电流模式下，源—测量单元（SMU）输出程控电压并测量从电压源流出的电流。由保护电路包围的灵敏的输入电路，可以直接连到DUT上以进行完全保护的测量。远地前置放大器将流过DUT的弱电流信号放大，这样连接远地前置放大器和测量主机的电缆就只载荷高电平信号从而尽量降低了电缆噪声的影响。

图1-15：远地前置放大器加电压测电流模式



1.5.3 库仑计电路

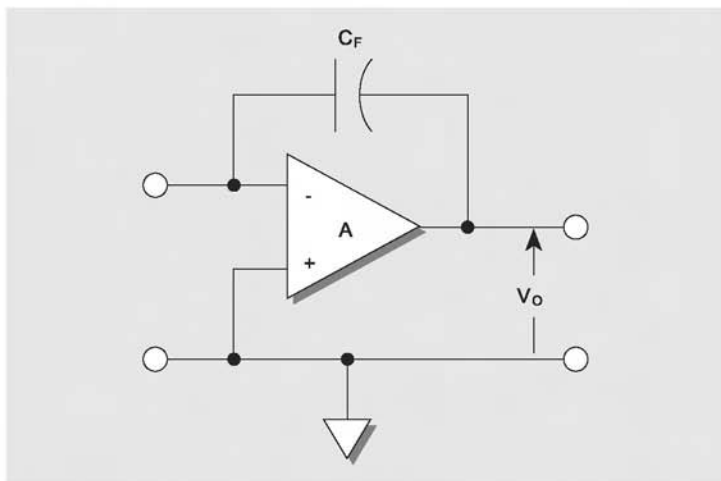
库仑计测量已经储存在电容器中的电荷，或者可能由某些电荷生成过程产生的电荷。

对于带电的电容器来说， $Q=CV$ 。其中： Q 是电容器上的电荷，单位为库仑， C 是电容，单位为法拉， V 是电容器上的电压，单位为伏特。运用这个关系式，测量电荷的基本方法是将被测电荷传送给已知容量的电容器，然后测量该已知电容的电压。于是， $Q=CV$ 。

静电计对于测量电荷是非常理想的。因为很低的偏置电流在短的时间间隔内不会改变传送的电荷，其高输入电阻也不允许电荷漏掉。

静电计使用反馈式电路来测量电荷。如图1-16所示。在此电路配置结构中，输入电容为 AC_F 。所以，使用合理容量的 C_F 就能获得很大的有效输入电容。

图1-16：反馈式库仑计



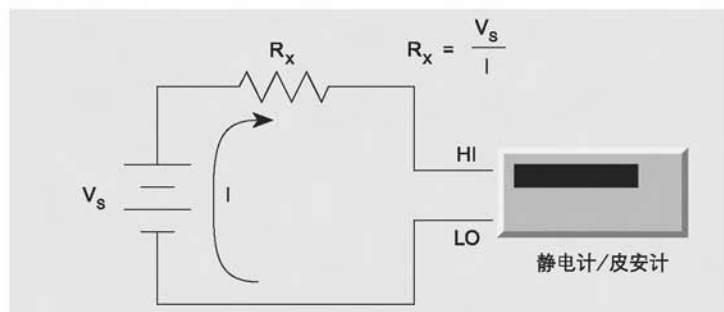
1.5.4 高阻欧姆计电路

静电计皮安计和电压源

在此配置结构（图1-17）中，电压源（ V_s ）与未知电阻器（ R_x ）所有的电压都出现在 R_x 上，根据电压源的电压数值和测量出的电流就可以计算出未知电阻。

这种方法的好处是速度非常快，根据电源电压和所用绝缘材料的情况，使用这种方法可以测量阻值极高的电阻。而且，使用可调的电压源，还可以直接得到被测电阻对电压的依赖关系。

图1-17：使用外接电压源的高阻测量

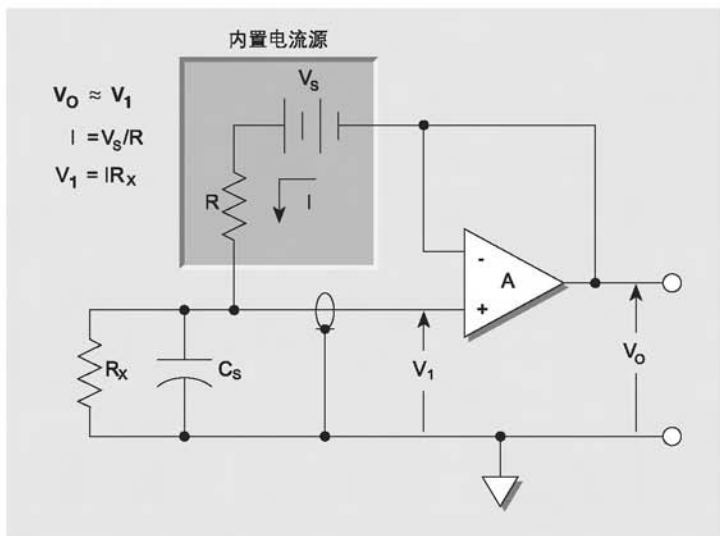


通常，这种方法需要使用两台仪器：一台电压源和一台皮安计或静电计。然而，有的静电计和皮安计内部装有电压源，能够直接测量电阻。

使用内置电流源的静电计欧姆计

图 1-18 示出另一种形式的静电计欧姆计的基本电路结构。由 V_s 和 R 形成的内置恒流源迫使已知的电流流过未知电阻 (R_x)。产生的电压降正比于未知电阻，仪表直接指示出电阻值，而不是电压值。

图1-18：带内置电流源的静电计欧姆计

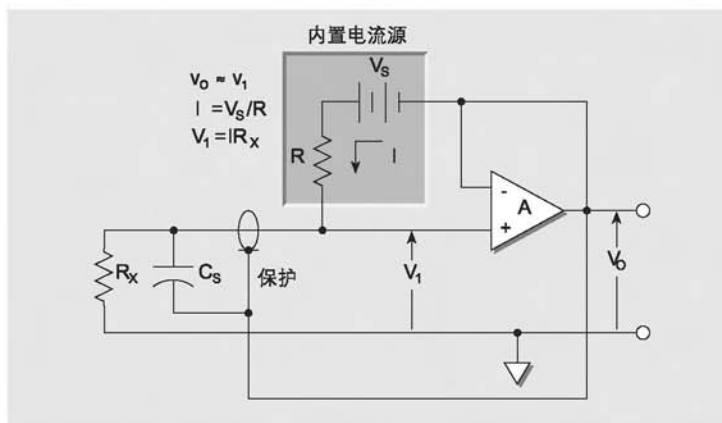


这种方法的缺点是未知电阻上的电压是其电阻值的函数，所以不容易控制。非常高阻值电阻的电压系数通常都很大，所以用恒压法进行测量会更加有意义。此外，对于大于 $10\text{G}\Omega$ 的电阻来说，测量的响应速度会相当慢。采用保护技术可以部分地解决这个问题。

带保护欧姆模式的静电计欧姆计

图 1-19 示出图 1-18 中的电路的变形结构。其中，HI 输入节点由运算放大器输出的保护电压环绕起来。放大器为单位增益，所以保护电压实际上与 V_1 的电位相同。这就大大消除了输入电缆的电容 (C_s) 的影响，所以测量 $10\text{G}\Omega$ 以上的电阻时就会快得多。

图1-19：带保护欧姆模式的静电计欧姆计

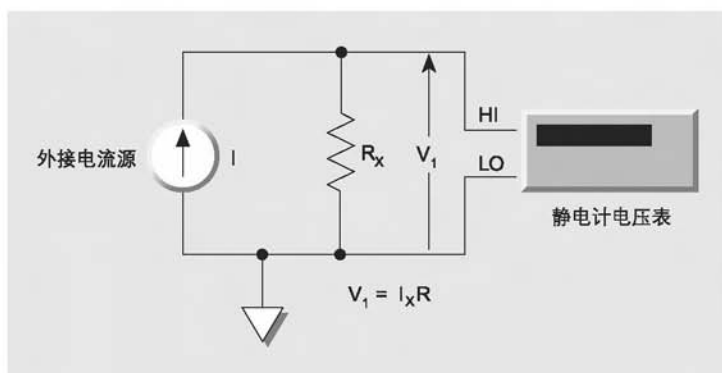


如第2.4.2节所讨论，保护模式还大大降低了输入电缆泄漏电阻的影响。

静电计电压表和外部电流源

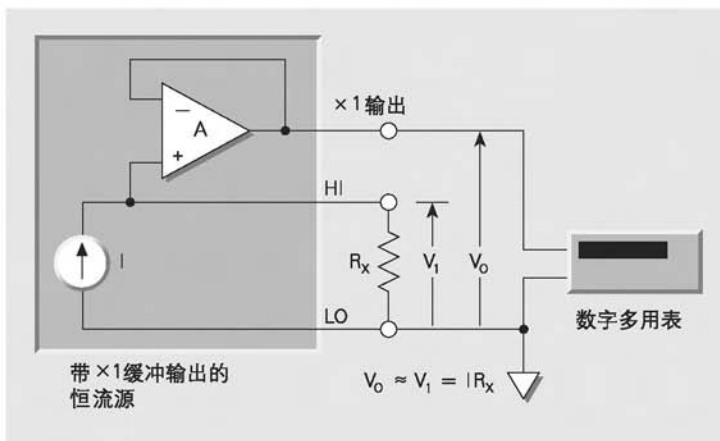
在图1-20所示的这种方法中，电流源产生的电流 (I) 流过未知电阻器 (R_x)。用静电计电压表测量产生的电压降，再由该电压和电流计算出未知电阻 R_x 的数值。

图1-20：使用外接电流源和静电计电压表的高阻测量



如果电流源带有×1的缓冲输出,则可以使用低阻抗的电压表(如数字多用表)来读取 R_x 上的电压。这种方法示于图 1-21。

图1-21: 使用真实电流源和数字多用表的高阻测量



1.5.5 低阻欧姆计电路

纳伏表和外部电流源

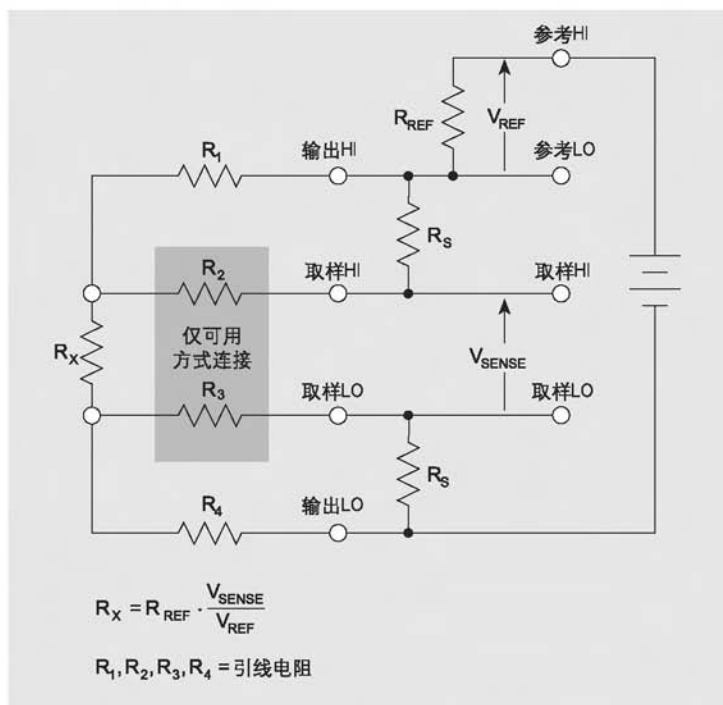
在图 1-20 中,如果用纳伏表代替静电计,就可以用这个电路来测量很低的电阻 ($< \mu \Omega$)。使用四线方法来消除测量中的引线电阻。可以使用能够自动改变极性的电流源来修正偏置。首先,在正极性测试电流之下测量电压,然后在负极性测试电流之下再测量一次电压。对两次测量读数之差进行平均就消除了偏置。

数字多用表欧姆计

典型的数字多用表使用图 1-22 所示的比率技术进行电阻测量。当选择电阻功能时,欧姆电压源、参考电阻 (R_{REF}) 和被测电阻 (R_x) 构成串联电路。电压源的电压使电流流过两个电阻器。这两电阻中的电流相同,所以,测量参考电阻和未知电阻上的电压就可以决定未知电阻,并计算其数值如下:

$$R_x = R_{REF} \cdot \frac{\text{取样 Hi- 取样 Lo}}{\text{参考 Hi- 参考 Lo}}$$

图1-22：比率法测量电阻



电阻器 (R_S) 提供两线或四线电阻测量的自动选择功能。在用于两线模式时，测量结果包括由 R_1 和 R_4 表示的引线电阻。当未知电阻比较低，如小于 100 Ω 时，四线模式会给出更好的准确度。由于取样 (Sense) 电路具有很高的输入阻抗，所以引线电阻 R_2 和 R_3 不会产生明显的误差。

微欧姆计

示于图 1-23 的微欧姆计也采用四线比率技术。与数字多用表不同，微欧姆计没有内部电阻器 (R_S)，所以四条引线都要连接才能进行测量。并且，向未知电阻提供测试电流的接线端子用源 HI 和源 LO 的标号来表示。

图1-23：微欧计测量电阻

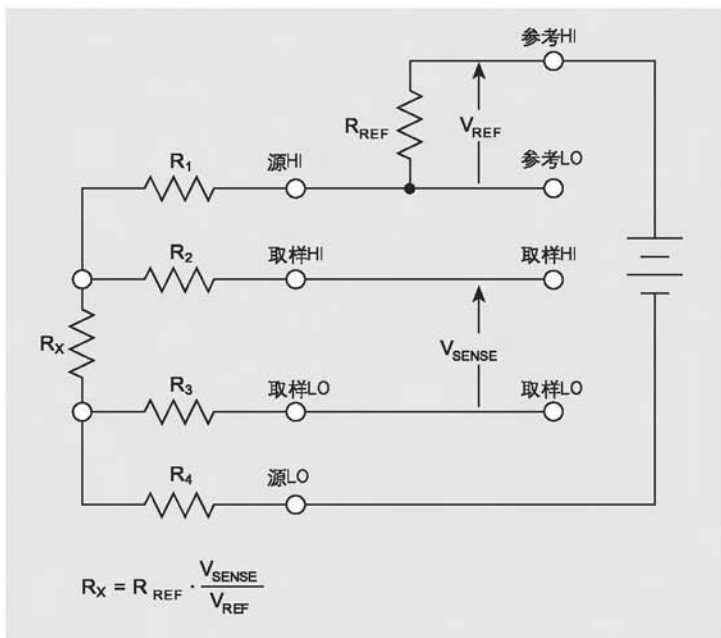


图1-24所示的脉冲驱动模式使微欧姆计能够消除被测未知电阻上的寄生偏置电压。在测量过程中，未知电阻上的电压要测量两次，一次测量时驱动电压打开，另一次测量时驱动电压关闭。驱动电压关闭时电阻上出现的电压为偏置电压。将其从驱动电压打开时测量的电压中减去，从而得到更准确的电阻测量结果。

图1-25所示的干电路测试模式中，在电流源端子之间增加了一个电阻器 R_{SH} ，以便将开路电压限制到小于20mV。这样就避免击穿被测器件上的绝缘薄膜，从而更好地反映出低信号电平之下的器件性能。现在仪表必须测量电阻器(R_{SH})上的电压以及参考电阻器和未知电阻器上的电压。有关于干电路测试的更详细的信息，请见第3.3.5节。

图1-24：脉冲模式下的微欧计

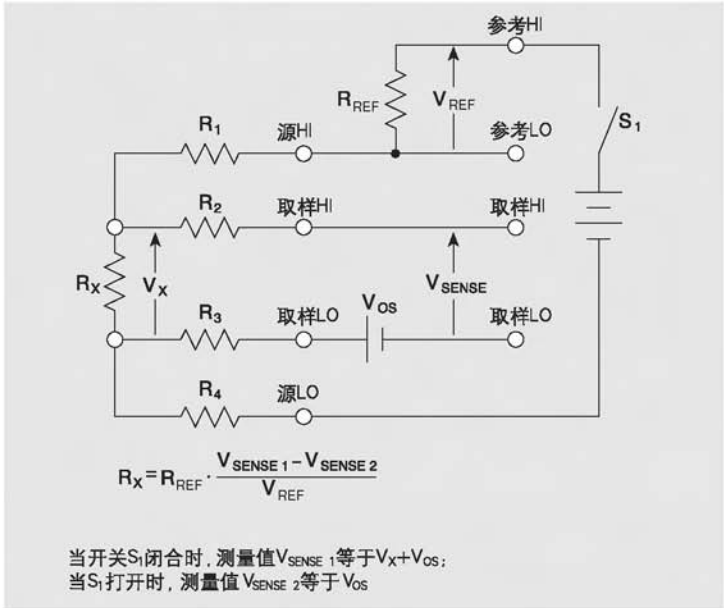


图1-25：微欧计中的干电路测试功能

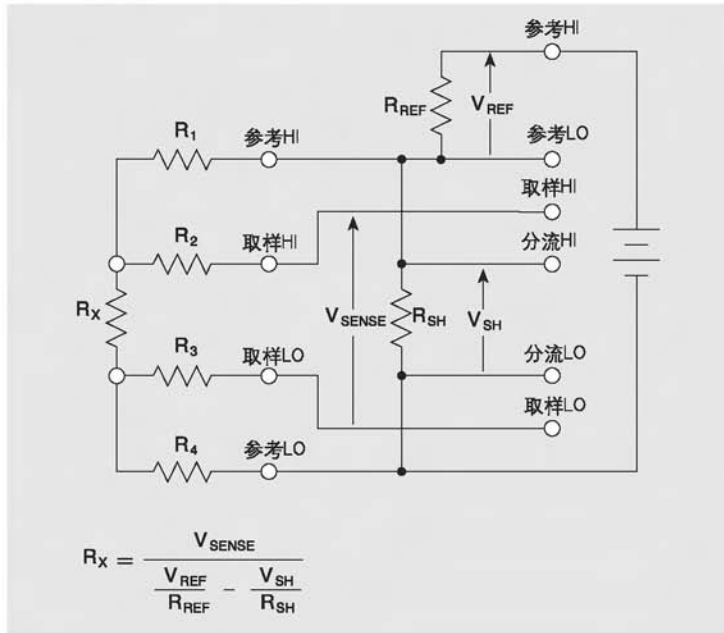
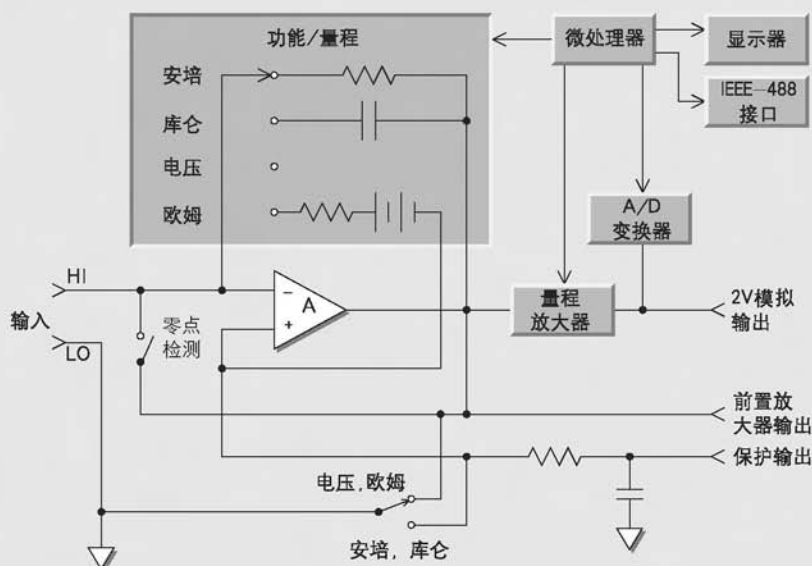


图1-26：典型的数字式静电计



1.5.6 完整的仪器

数字式静电计

图 1-26 为典型数字式静电计的方框图。其模拟部分与前面讨论的电路类似。在其输入端采用一个静电计前置放大器以提高灵敏度并提高输入电阻。主放大器的输出送到模拟输出和 A/D 变换器。量程切换和功能切换不需人工控制，而是由微处理器控制。

微处理器还控制 A/D 变换器并管理仪器所有其它方面的工作。送到 A/D 变换器的输入信号一般为直流 0-2V。A/D 变换以后，将数字信号送往显示器和数据输出口（IEEE-488 或 RS-232）。

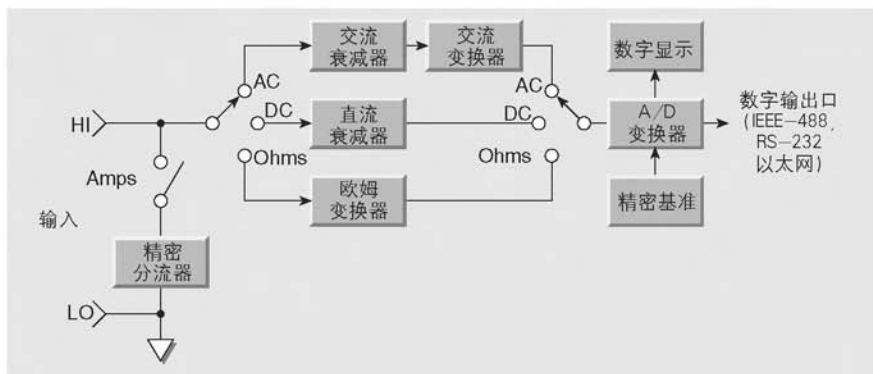
数字多用表（DMM）

大多数的数字多用表具有五种测量功能：直流电压、交流电压、欧姆、直流电流和交流电流。如图 1-27 所示，使用各种信号处理电路将输入信号变为直流电压，然后再由 A/D 变换器转换成数字信号。

直流和交流衰减器电路提供直流和交流功能的量程切换。交流变换

器将交流信号转换成直流信号,而欧姆变换器则给出直流模拟信号以进行电阻测量。用精密分流器将电流转换成电压以实现电流测量功能。

图1-27: 数字多用表方框图

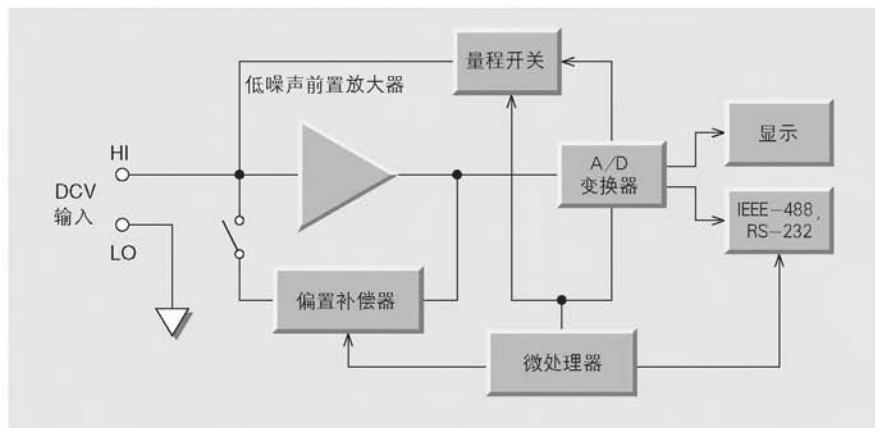


对输入信号进行适当的处理以后,再由A/D变换器变成数字信息。接着将该数字信息送往显示器和数字输出口(IEEE-488、RS-232或以太网口)。

纳伏表

纳伏表是专门适合测量非常低电压的电压表。如图1-28所示,纳伏表使用一个低噪声的前置放大器将信号放大到适合A/D变换器工作的电平(典型值为满度2-3V)。专门设计的前置放大器电路确保不希望有的噪声、热电动势和偏置电压保持在绝对最小的数值。

图1-28: 典型的纳伏表



为了消除内部的偏置，由偏置或漂置补偿电路在测量周期的特定期间来测量前置放大器的偏移电压。随后从被测的信号中减去测量出的偏置电压，以便最大限度地提高测量的准确度。

输入信号经过前置放大器放大之后，再由 A/D 变换器变成数字信号。然后将数字信息送往显示器和 IEEE-488 接口。

源—测量单元 (SMU)

SMU 在一台仪器中提供四种功能：电压测量、电流测量、电压源和电流源。一般地说，这种仪器能够同时输出电压、测量电流以或者同时输出电流、测量电压。

当配置成电流源、电压测量时（如图 1-29 所示），SUM 的功能为高阻抗电流源，并具有电压测量（和电压极根）功能。

选择本地取样（Sense）或远地取样决定了在哪里进行电压测量。本地取样时，在 SMU 的输出端测量电压。远地取样时，在被测装置上测量电压，从而消除了引线电阻产生的电压降。

图中的保护（Guard）放大器（ $\times 1$ 的缓冲器），保证保护（Guard）端和输出 HI 端总是处在同一电位。恰当地运用保护技术实际上可以消除电缆、测试夹具（test fixture）和连接器中的泄漏通路。当配置成加电压、测电流模式时（如图 1-30 所示），SMU 的功能为低阻抗电压源，并具有电流测量（和电流极根）功能。

数字源表仪器

和 SMU 一样，数字源表仪器也能输出电流、输出电压、测量电流、测量电压。然而，数字源表仪器还有第六个端子——保护取样端（Guard Sense），使用它可以对网络电阻或网排电阻等进行更准确的测量。当配置成电流源时（如图 1-31 所示），数字源表仪器的功能为高阻抗电流源，并具有电压钳位能力，能够测量电压、电流或电阻。

在电压测量时，取样 Sense 选择（两线本地或四线远地模式）决定了在哪里进行测量。本地取样时，在仪器的 IN/OUT 端子上进行电压测量。四线远地取样时，利用取样端子直接在被测设备上电压测量。这样就消除了引线电阻产生的电压降。

当配置成电压源时（如图 1-32 所示），数字源表仪器的功能为低阻抗电压源，并具有电流钳位能力，能够测量电流、电压或电阻。取样电路用来连续监视输出电压并根据需要调节电压源。

Figure 1 is a schematic diagram of the test system for the protection function of the microcontroller. The diagram shows a current source connected to a circuit. The circuit includes a buffer (x1) and a protection unit. The circuit is divided into three main sections: Output HI, Sampling HI, and Sampling LO. Each section has a protection unit and a ground connection. A voltage meter is connected to the circuit via a switch that can be set to 'Local' (本地) or 'Remote' (远控). The diagram also shows a 'Current Source' (电流源) and a 'Protection' (保护) unit.

Figure 1 is a schematic diagram of the control system for the power supply. It shows a voltage source (电压源) connected to two current meters (电流表). The first current meter is connected to the output HI and protection lines. The second current meter is connected to the sampling HI, protection, and output LO lines. The voltage source has a feedback loop labeled '调整电压源(反馈)'. The control system is divided into '本地' (local) and '远控' (remote control) modes, indicated by dashed lines and switches.

图1-31：数字源表仪器电流源模式

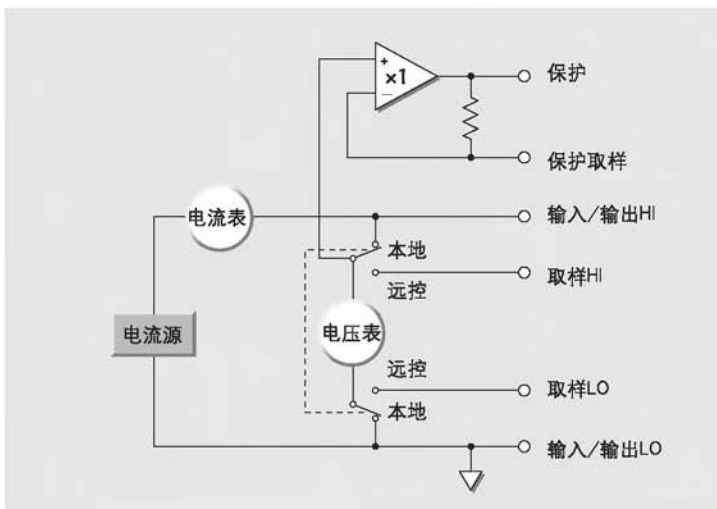
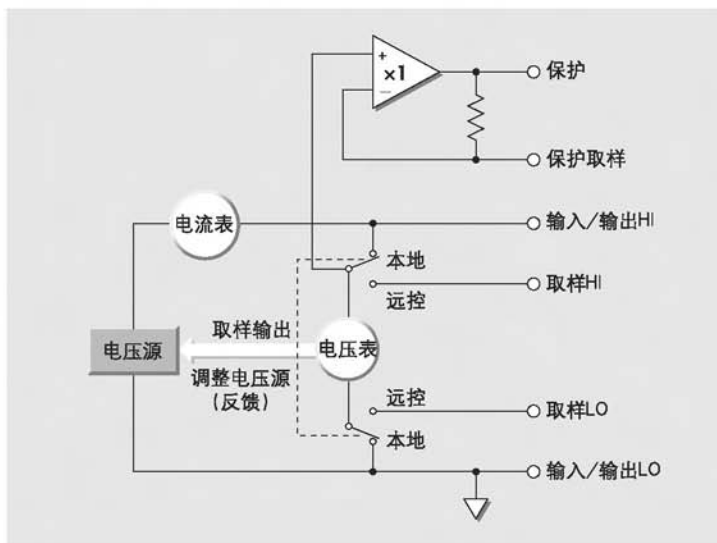


图1-32：数字源表仪器电压源模式



第 二 章

高 源 内 阻 的 测 量

2.1 引言

正如本书第一章所述，高源内阻的测量包括：低直流电压、弱直流电流、高电阻和电荷的测量。用来测量这些高阻源的仪器包括静电计、皮安表和源-测量单元 (SMU)。第一章介绍了这些仪器及其测量功能的基本电路，第二章则介绍与这些测量功能有关的各种干扰和误差来源以及最大限度地提高测量高阻源的准确度的更详细信息。为了便于参阅，第二章的内容编为下列各节：

- 2.2 高阻电压测量：讨论负载误差、使用保护技术尽量降低这种误差以及有关用于高阻测量的各种绝缘材料的信息。
- 2.3 弱电流测量：有关成功地进行弱电流测量的内容，包括：泄漏电流和保护技术、噪声和源阻抗、零点漂移、产生电流 (generated current)、输入端压降、过载保护和用库仑计测量弱电流。
- 2.4 高电阻测量：介绍测量高电阻的恒压和恒流方法，还包括高阻值电阻器的信息。
- 2.5 电荷测量：讨论电荷测量中的误差来源和尽量降低误差的方法、零点检查和电荷测量功能的扩展。
- 2.6 一般静电计要考虑的问题：一般性地讨论影响高阻测量的技术和误差来源。若干标题包括：测量连接、静电干扰和屏蔽、环境因素和速度考虑等。

2.2 高源内阻的电压测量

对高源内阻电压源的测量容易产生几种误差，诸如：电压表输入电阻和输入偏置电流以及外部分流电阻和电容引起的负载误差。下列各段讨论这些误差的来源和将其影响减到最小的方法。关于不适当的连接和静电干扰引起的误差，请参见第 2.6 节。

2.2.1 负载误差和保护技术

输入电阻负载

对高内阻电压源的测量容易产生由仪表输入电阻和连接电缆泄漏电阻引起的负载误差。实际的电压表可以由一个理想的无限大输入电阻的电压表 (V_M) 与一个确定大小的输入电阻器 (R_{IN}) 相并联来表示，

如图2-1所示。将电压源连到电压表的输入端，源的戴文宁等效电路为 V_S 与 R_S 相串联，这时电压表输入端出现的电压 (V_M) 由于 R_S 和 R_{IN} 的分压器作用而减小如下：

$$V_M = V_S \left(\frac{R_{IN}}{R_S + R_{IN}} \right)$$

例如，假定， $R_S = 100k\Omega$ ， $R_{IN} = 10M\Omega$ 。如果 $V_S = 5V$ ，则电压表实际测量出的电压为：

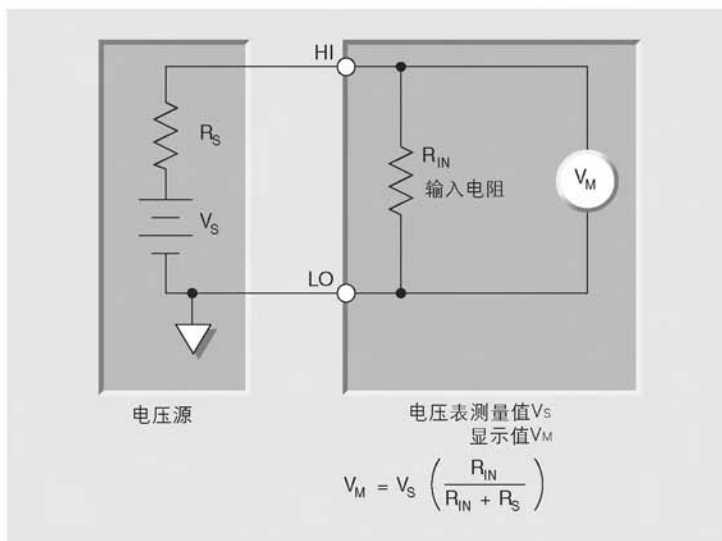
$$V_M = 5 \left(\frac{10^7}{10^5 + 10^7} \right)$$

$$V_M = 4.95V$$

这样，在这个例子中，输入电阻的负载效应将产生 1% 的误差。

仪表的输入电阻应当远远大于源的内阻才能满足对测量准确度的要求。例如，如果希望的准确度为 1%，那么表的输入电阻必须比源的电阻高 100 倍。对于更高的准确度，这个比率必须相应地更高。

图2-1：输入电阻负载效应对电压测量准确度的影响



连接电缆通常不是问题，但是在源电阻非常高时 ($> 10G\Omega$)，或者在极端的环境条件下，却会引起很大的负载误差。可以将电缆保护起来，以降低其对测量的负载效应。这个问题在“分流电阻负载和保护

护”一节进行讨论。

输入偏置电流负载

在测量高电阻源时要考虑的另一个问题是电压表的输入偏置电流。仪器内部电路和内部的偏移电压会在仪器的输入端引起输入偏置电流。如图 2-2 所示，输入偏置电流 (I_{BIAS}) 在源电阻 (R_S) 上产生了误差电压。所以实际测量的电压 (V_M) 与源的电压 (V_S) 有所不同：

$$V_M = V_S \pm I_{OFFSET} R_S$$

例如，假定各参数如下：

$$I_{OFFSET} = 1\text{pA} \quad R_S = 10\text{G} \quad V_S = 10\text{V}$$

那么，电压表实际测量出的电压为：

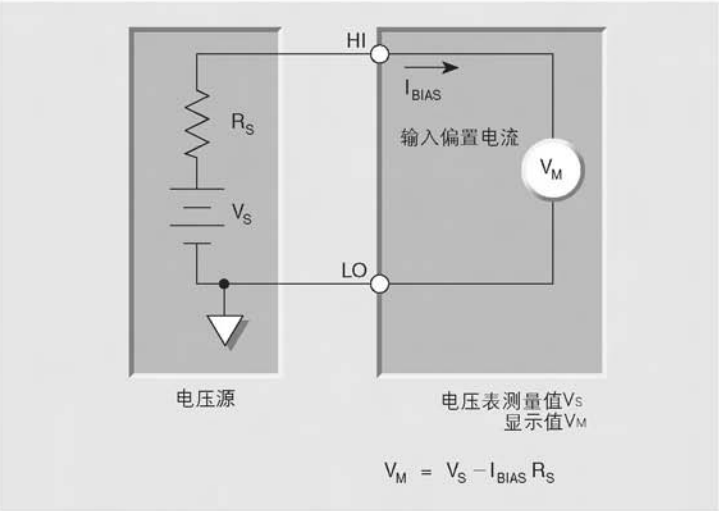
$$V_M = 10 \pm (10^{-12} \cdot 10^{10})$$

$$V_M = 10 \pm 0.01$$

$$V_M = 9.99\text{V} \text{ 或者 } 10.01\text{V} \text{ (取决于偏置电流的极性)}$$

因此，在这个例子中，输入偏置电流引起的误差大约为 0.1%。

图2-2: 输入偏置电流对电压测量准确度的影响



数字多用表和纳伏表的输入偏置电流在 1pA 到 1nA 之间，而数字多用表通常不规定输入偏置电流。静电计以低输入偏置电流而闻名，其输入偏置电流通常在几个飞安 (fA)。皮安计和 SMU 也具有很低的输入偏置电流，但是通常没有静电计低。

虽然输入偏置电流是这种误差的常见来源，但是外电路产生的电流在源电阻上形成的电压降也能引起误差。这种偏移电流的典型来源是绝缘子和电缆。

分流电阻负载和保护

外部的分流电阻，例如：漏电的电缆和肮脏的绝缘子也可能引起负载误差。

跨接在电压源上的任何外部分流电阻都会使测量的电压衰减，如图 2-3 所示。和输入电阻的电压负载作用一样，分流电阻 (R_{SHUNT}) 和源电阻 (R_S) 也形成了一个分压器，并将测量的电压 (V_M) 衰减如下：

$$V_M = V_S \left(\frac{R_{SHUNT}}{R_{SHUNT} + R_S} \right)$$

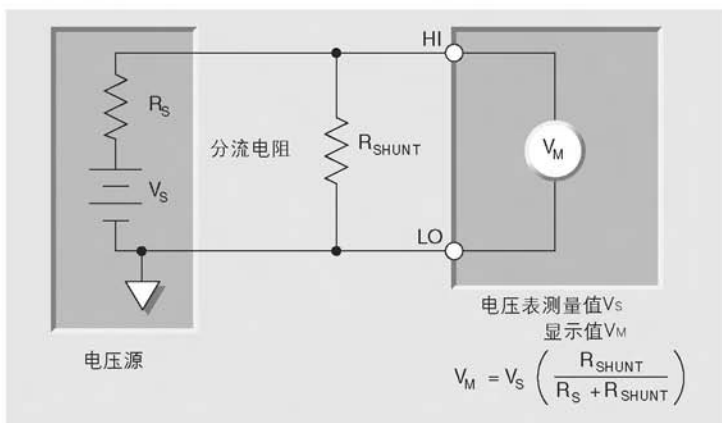
例如，假定， $R_S = 10G$ ， $R_{SHUNT} = 100G$ 。如果 $V_S = 10V$ ，则测量出的电压为：

$$V_M = 10 \left(\frac{10^{11}}{10^{11} + 10^{10}} \right)$$

$$V_M = 9.09V$$

在这个例子中，分流负载引起的误差大约为 9%。

图2-3：分流电阻对电压测量准确度的影响

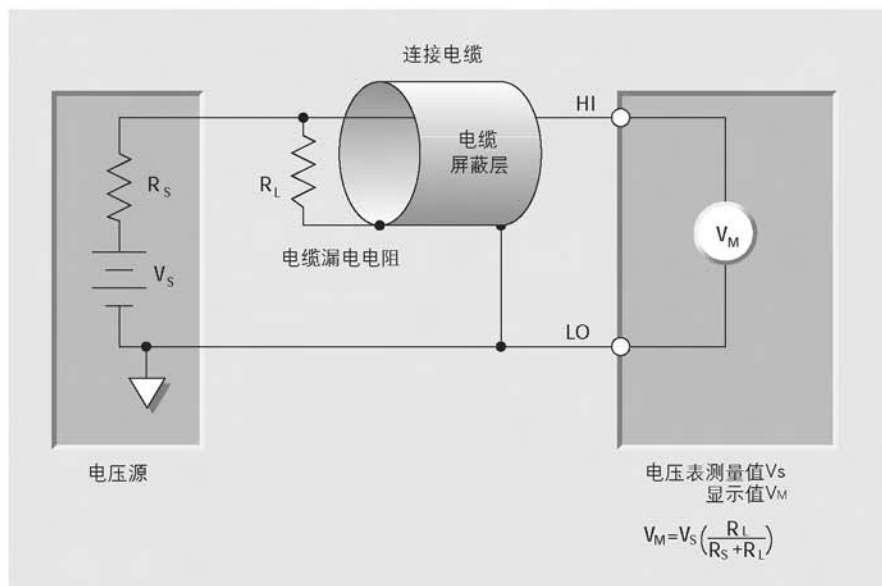


分流电阻负载通常是由电缆泄漏电阻引起的，如图 2-4 所示。在这种情况下，测量的电压 (V_M) 被 R_S 和电缆电阻 R_L 形成的分压器衰减：

$$V_M = V_S \left(\frac{R_L}{R_S + R_L} \right)$$

为了降低由分流电阻引起的误差,使用绝缘电阻尽可能高的电缆、连接器和测试夹具。此外,采用保护技术可以消除任何剩余的误差。

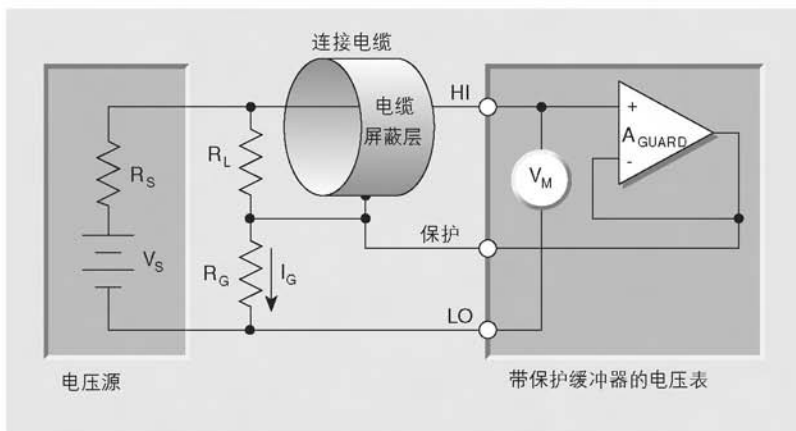
图2-4: 电缆泄漏电阻对电压测量准确度的影响



使用保护技术可以大大降低电缆泄漏引起的误差,如图2-5所示。在采用保护技术的连接配置中,电缆的屏蔽连接到保护缓冲放大器的输出,而不是连到仪表的LO端。 R_G 代表从电缆的屏蔽到表的LO端的电阻, I_G 是为了将屏蔽驱动到与输入HI端相同的电位,而在 R_G 中流过的电流。这个电流由保护缓冲放大器提供,而不是由电压源来提供。由于现在 R_L 上的电压降低了好几个数量级,在大多数情况下,泄漏电流可以忽略。

根据定义,保护是强制将电路中的一个低阻节点与高阻输入端节点近似等电位的一种技术。

图2-5：保护技术的连接配置



在现代的静电计中，前置放大器输出端就是这样的一个节点，并可以用来降低电缆泄漏的影响，如图2-5所示。其另一个好处是还降低了电缆的有效电容，使电路的响应速度加快很多。这一点在“分流电容负载和保护”一节中详细讨论。

源 - 测量单元（SMU）也可以用来测量高电阻源的电压，其保护端也具有类似的改进作用。

当静电计作为电压表使用时，其电路实际上如图2-6所示。保护放大器是一个具有非常高输入阻抗的单位增益放大器。其开环增益 (A_{GUARD}) 的范围在 10^4 到 10^6 之间。用此增益乘以泄漏电阻 (R_L)，测量出的电压变为：

$$V_M = V_S \left(\frac{A_{GUARD} R_L}{R_S + A_{GUARD} R_L} \right)$$

举例：假定 R_S 的值为 10G， R_L 为 100G，并假定 A_{GUARD} 取中等范围的数值 10^5 ， V_S 为 10V，那么仪表测量出的电压为：

$$V_M = 10 \left(\frac{10^{16}}{1.000001 \times 10^{16}} \right)$$

$$V_M = 9.99999V$$

这样，我们就看到采用保护技术时，负载误差小于 0.001%。相反，在同样的源和分流电阻情况下，不采用保护技术时的误差则大约为 9%。

图2-6: 保护泄漏电阻

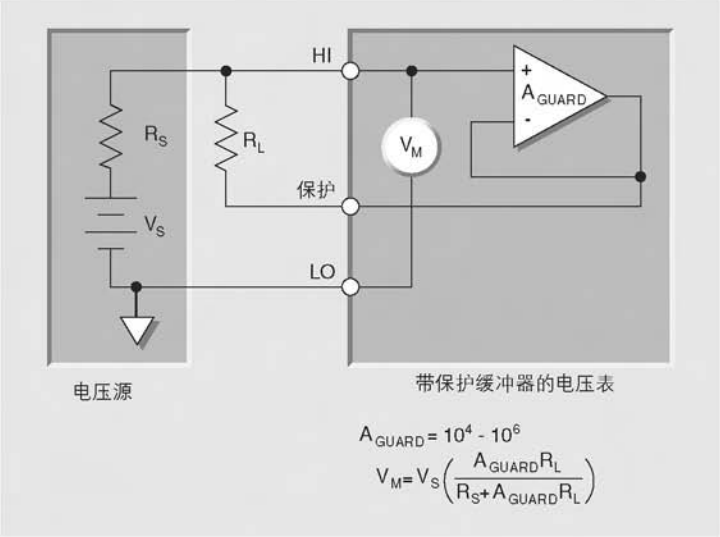
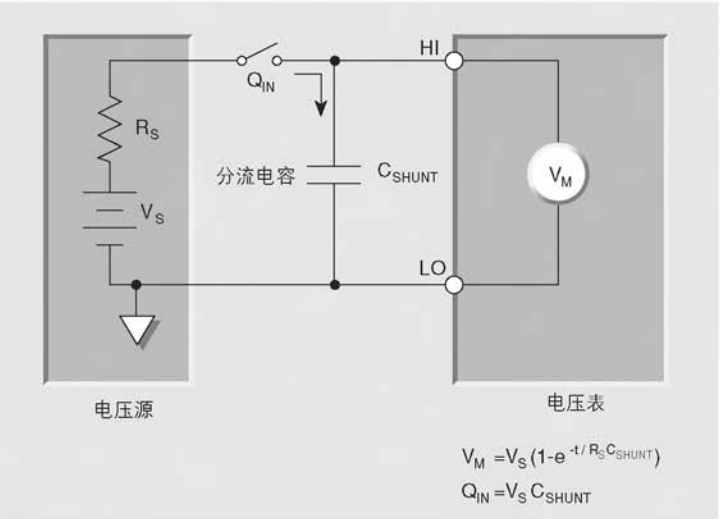


图 2-7: 分流电容负载



分流电容负载和保护

电压测量的建立时间决定于源等效电阻和电压表输入端的有效电容。此输入电容由表的输入电容与电缆的输入电容并联组成。如果源电阻很高的话，即使很小的分流电容也能引起很长的建立时间。例如，

分流电容为 100pF（包括输入电缆的电容），源电阻为 20GΩ，则产生的 RC 时间常数为 2 秒。要想使测量结果达到与最终值相差小于 1%，则需要 10 秒的建立时间。

图 2-7 说明分流电容对典型的高输入阻抗电压表输入端的影响。电压源由 V_s 和 R_s 来表示，分流电容为 C_{SHUNT} ，测量的电压为 V_M 。起初，开关断开， C_{SHUNT} 保持零电荷。

当开关闭合时，源电压 (V_s) 加到输入端，但是在 C_{SHUNT} 两端测量的电压并不立即上升到其最终值，而是按指数上升如下：

$$V_M = V_s(1 - e^{-t/R_s C_{SHUNT}})$$

传送给电容器的电荷 (Q_{IN}) 为：

$$Q_{IN} = V_s C_{SHUNT}$$

C_{SHUNT} 的充电产生了如图 2-8 所示的熟悉的指数曲线。经过一倍的时间常数 ($\tau = RC$) 之后，测量的电压上升到其最终值的 63%；经过不同时间常数以后，电压的数值见表 2-1。

图 2-8: 分流电容两端电压的指数响应曲线

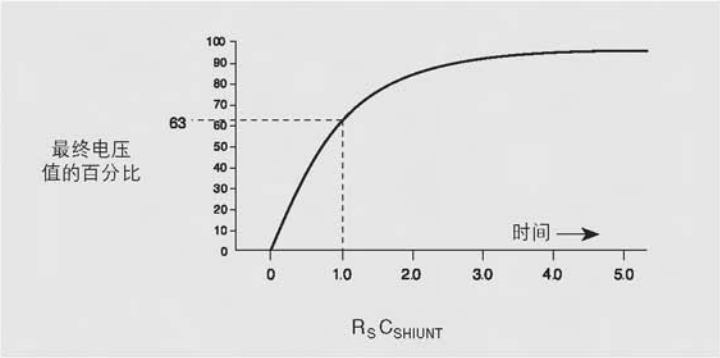


表 2-1 建立时间与最终数值百分数的关系

时间常数 (τ^*)	最终数值的百分数
1	63%
2	86%
3	95%
4	98%
5	99.3%

* $\tau=RC$ ，其中 R = 电阻（欧姆）， C = 电容（法拉）

举例：假定 $R_s = 10G\Omega$ ， $C_{SHUNT} = 100pF$ ，这样 RC 时间常数就为 1 秒。所以需要 5 秒的时间才能使电路稳定到与其最终电压值之差小于 1%。当 V_s 变化 10V 时，将会有 1nC 的电荷传送到 C_{SHUNT} 上。

保护技术的主要好处是减小分流电阻的影响，而其另一个重要的方面就是减少分流电容的影响。如图 2-9 所示，由于保护缓冲放大器具有典型值为 10^4 到 10^6 的开环增益，所以能够大大减少 C_{SHUNT} 的充电时间。

采用保护技术时，测量电压的上升时间变为：

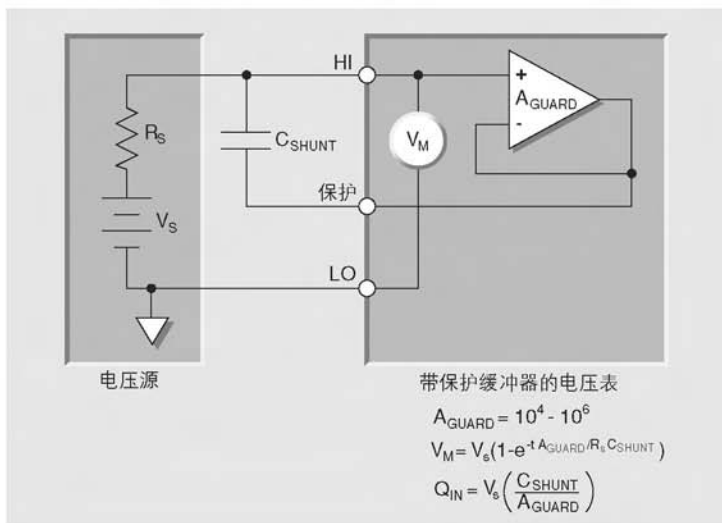
$$V_M = V_s (1 - e^{-tA_{GUARD}/R_s C_{SHUNT}})$$

传送给 C_{SHUNT} 的电荷为：

$$Q_{IN} = \left(\frac{V_s C_{SHUNT}}{A_{GUARD}} \right)$$

举例：和前面无保护的例子一样，假定 $R_s = 10G\Omega$ ， $C_{SHUNT} = 100pF$ 。对于 A_{GUARD} 标称值 10^5 ，可以看到，采用保护技术时， RC 建立时间大约降低到 $5s/10^5 = 50\mu s$ ，与仪器获取一个读数通常所需要的时间相比是很小的。注意，当 V_s 变化 10V 时，传送到 C_{SHUNT} 上的电荷 (Q_{IN}) 只有 10fC，减少的比率为 $10^5 : 1$ 。

图 2-9: 保护分流电容



2.2.2 绝缘电阻

静电计和一些SMU与电压表一样都具有高输入电阻的特性。在测试电路中，高绝缘电阻是成功地进行静电计测量的首要要求之一。所以，了解各种类型的绝缘材料以及如何恰当地使用它们是很重要的。要想准确地测量高阻源的电压，根据所需要的精度、分辨率和准确度的数量级，测试夹具（test fixture）、测试引线 and 测量用的电压表的绝缘泄漏电阻必须要比被测电路的戴文宁等效电阻高几个数量级。如果绝缘电阻不能高出几个数量级，那么，如前所述，绝缘电阻的分流效应将会使被测的源电压降低。

由于错误的读数有时候看起来可能很好、很稳定，所以在测试设置中发现劣等的绝缘情况有时是很困难的。因此谨慎的做法是定期地用静电计欧姆计来测量测试夹具和电缆的绝缘电阻，以保证其完整性。如果发现问题，则应当对有问题绝缘件进行清洁处理或者将其更换。

选择最好的绝缘件

在评估绝缘材料时，应当考虑其下述性质：

体电阻率：表示直接通过材料的泄漏电流。

表面电阻率：经过材料表面的泄漏，主要是表面污染的作用。

水吸收：由绝缘体吸收的水分所决定的泄漏。

压电或储存电荷效应：由于机械应力产生的电荷不平衡（从而产生了电流或电压偏置）。

摩擦电效应：当材料互相摩擦时，由于摩擦效应产生的电荷不平衡。

介电吸收：绝缘体在长时期内储存或释放电荷的趋向。

表 2-2 给出各种重要绝缘材料的特性，而图 2-10 则示出它们的电阻率范围。绝缘体的各种特性将在以下各段详细介绍。

特富龙（Teflon®）

特富龙是为了满足大于 10^{-14} A 的电流测量工作所遇到的电阻要求而使用的最满意、最常用的材料。它具有很高的体电阻率，其表面上不易形成水蒸气膜。所以，其绝缘性质不会由于潮湿的空

气而明显变坏。特富龙具有化学惰性，易于加工，并且很容易进行清洁处理。特富龙 PTFE 是电子学中最常用的特富龙材料。

表 2-2 各种绝缘材料的性质

材料	性质				
	体电阻率 (欧姆·厘米)	抗吸水 的能力	最小压电 效应 ¹	最小摩擦电 效应	最小介电 电吸收
蓝宝石	> 10 ¹⁸	+	+	0	+
特富龙 PTFE	> 10 ¹⁸	+	-	-	+
聚乙烯	> 10 ¹⁶	0	+	0	+
聚苯乙烯	> 10 ¹⁶	0	0	-	+
Kel-F®	> 10 ¹⁸	+	0	-	0
陶瓷	10 ¹⁴ ~10 ¹⁵	-	0	+	+
尼龙	10 ¹³ ~10 ¹⁴	-	0	-	-
玻璃环氧	10 ¹³	-	0	-	-
PVC	5 × 10 ¹³	+	0	0	-

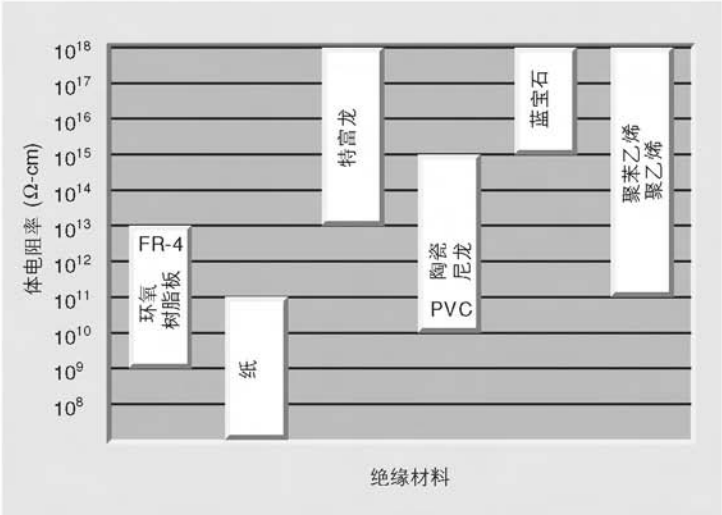
符号：+ 材料的这种性质很好

0 材料的这种性质中等

- 材料的这种性质较差

¹ 在非压电绝缘体中的储存电荷效应

图2-10: 各种绝缘材料的近似电阻率



特富龙的主要缺点是当发生变形时，内部会出现电荷，从而引起虚假的电压和电流。然而，按一般的处理方法，这种特性对大于 10^{-13}A 的电流来说，不是很严重的问题。

聚苯乙烯

聚苯乙烯比特富龙便宜得多，在特富龙出现之前是通用的绝缘材料。它易于加工，但是内部常常会出现裂纹。如果裂纹不达到表面，就不会损坏其绝缘特性。聚苯乙烯的体电阻率与特富龙类似。但是，当湿度变高时，其表面会形成水蒸气薄膜，大大降低其表面电阻。

Kel-F®

Kel-F® 的体电阻率和表面电阻率特性与特富龙接近，易于加工，且不会出现裂纹。

聚乙烯

聚乙烯具有与聚苯乙烯类似的、极好的体电阻率和表面电阻率。由于其柔软，所以广泛地用于同轴和三同轴 (Triax) 电缆的绝缘材料。这种电缆对于通用的静电计应用是极好的，因为在这种应用中表面泄漏是不太重要的。然而，聚乙烯在较低的温度下就会熔化，所以高温炉中使用的引线应当使用特富龙，而不能用聚乙烯。

玻璃和陶瓷

玻璃和陶瓷也具有很高的体电阻率，但是在高湿度下表面电阻率性质较差，并且其压电性常常也较差。用甲醇清洁处理、并浸以沸腾的石蜡以后，具有很好的绝缘表面，但是不能持久。也可以把各种硅清漆烘焙或者阴干到玻璃或陶瓷表面上，但即使这样处理以后，触摸也很容易损坏其绝缘性能。玻璃和陶瓷虽然可以铸模，但是难于加工。它们主要用在必须使用其机械性质的地方。

蓝宝石

蓝宝石是最好的绝缘材料之一。在受到压力时，其内部几乎不产生电荷。最常用于测量 10^{-18}A 到 10^{-15}A 范围电流的应用中。限制使用蓝宝石的因素主要是其价格以及这种材料难于加工和成形。

石英

石英具有类似于蓝宝石的性质，但是其压电输出相当高，所以很

少用于静电计电路中。

其它绝缘材料

实际上所有其它的绝缘材料都具有比较低的体电阻率和表面电阻率，因此对于静电计的应用是不可接受和不满意的。维尼纶、尼龙和合成树脂明显地比特富龙、聚苯乙烯、聚乙烯、蓝宝石或石英差。

保持绝缘体清洁

与任何高电阻器件一样，错误的拿取方法可以损坏绝缘体的整体绝缘特性。皮肤上的油脂和盐份能够降低绝缘体的性能，空气中的污染物可能沉积在绝缘体的表面，从而降低其电阻。所以，应当尽量减少拿取绝缘体。任何时候都不要用手或其它可能污染其表面的材料触摸绝缘体。

如果由于不小心触摸或沉积而使绝缘体受到污染，可以用浸了甲醇的泡沫签来清洗。清洗之后，应当使其在低湿度的条件下干燥几个小时后再使用，或者用干氮使其干燥。

2.3 弱电流测量

若干误差源会对弱电流测量的准确度产生严重的影响。例如，如果连接不当，安培计就可能引起测量误差（关于如何进行恰当的屏蔽连接，请详见第2.6.1和2.6.2节）。安培计的输入端压降和输入偏置电流也可能影响测量的准确度。被测设备的源电阻会影响反馈式安培计的噪声性能。外部的误差源可能包括电缆和测试夹具的泄漏电流，以及摩擦电和压电效应产生的电流。第2.3节详细阐述了弱电流测量要考虑的问题，并概述了尽量降低这些误差源的影响的各种方法，还介绍了使用静电计的库仑功能进行极低电流测量的有关信息。

2.3.1 泄漏电流和保护

泄漏电流是由测量电路和附近的电压源之间的寄生电阻通路产生的。这种电流能够大大降低弱电流测量的准确度。为了降低泄漏电流，应当使用高质量的绝缘材料，降低测试环境中的湿度，以及采用保护技术。保护技术还能降低测量电路中分流电容的影响。

在组建测试电路时，使用高质量的绝缘材料是降低泄漏电流的一种方法。特富龙、聚乙烯和蓝宝石是高质量绝缘材料的例子，但要避

免使用酚醛塑料和尼龙等材料。有关选择最好的绝缘材料的更详细的讨论，请见第 2.2.2 节。

湿度也能影响弱电流测量。不同类型的绝缘材料会从空气中吸收不同量的水分，所以最好选择水蒸气不容易在其上形成连续膜的绝缘材料。有的时候，由于被测的材料容易吸水，而无法避免这种情况的话，最好在环境控制室中来进行测量工作。在某些情况下，绝缘体上可能会有离子污染物，并会产生虚假的电流，在高湿度的环境下尤其明显。

保护技术是降低泄漏电流的非常有效的方法。保护是强制将电路中的一个低阻节点与高阻输入端节点近似等电位的一种技术。静电计安培计和皮安计的保护技术与 SMU 不同。保护的使用方法可以用以下的例子来很好的说明。

使用静电计安培计和皮安计时保护技术的运用

静电计安培计和皮安计的保护端为 LO 输入端。保护可以用来把安培计的高阻输入引线 and 由电压源引起的泄漏电流隔离开来。图 2-11 和 2-12 说明了这种保护的例子。

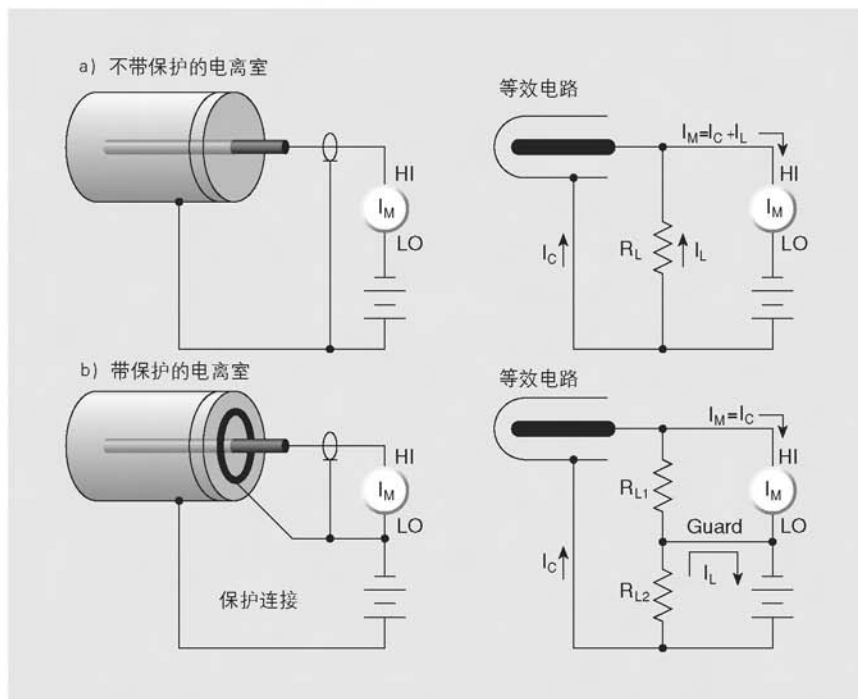
图 2-11 说明保护技术应用于测量电离室的离子电流。无保护的电离室及其相应的等效电路示于图 2-11a。等效电路表明，全部的偏置电压都出现在绝缘电阻 (R_L) 的两端。所以，泄漏电流 (I_L) 将加到被测离子电流中 ($I_M = I_C + I_L$)。泄漏电阻是由电离室和同轴电缆的绝缘体引起的。

在图 2-11b 中，电离室上加了一个金属保护环。这个保护电路把泄漏电阻分成两部分。 R_{L1} 上的电压为皮安计的输入端压降，通常小于 1mV，所以产生的电流是相当小的。全部的偏置电压出现在 R_{L2} 上。泄漏电流将在此回路中流动，但是不影响测量。

保护对避免由测试夹具产生的泄漏电流也是必要的。图 2-12 示出了测试夹具上由两个绝缘子支撑的高阻器 (R_{DUT})。

图 2-12a 是无保护的电路。流过绝缘子支脚 (stand-off insulator) 的泄漏电流 (I_L) 将加到被测电流 (I_M) 中。

图 2-11: 保护用于电离室测量



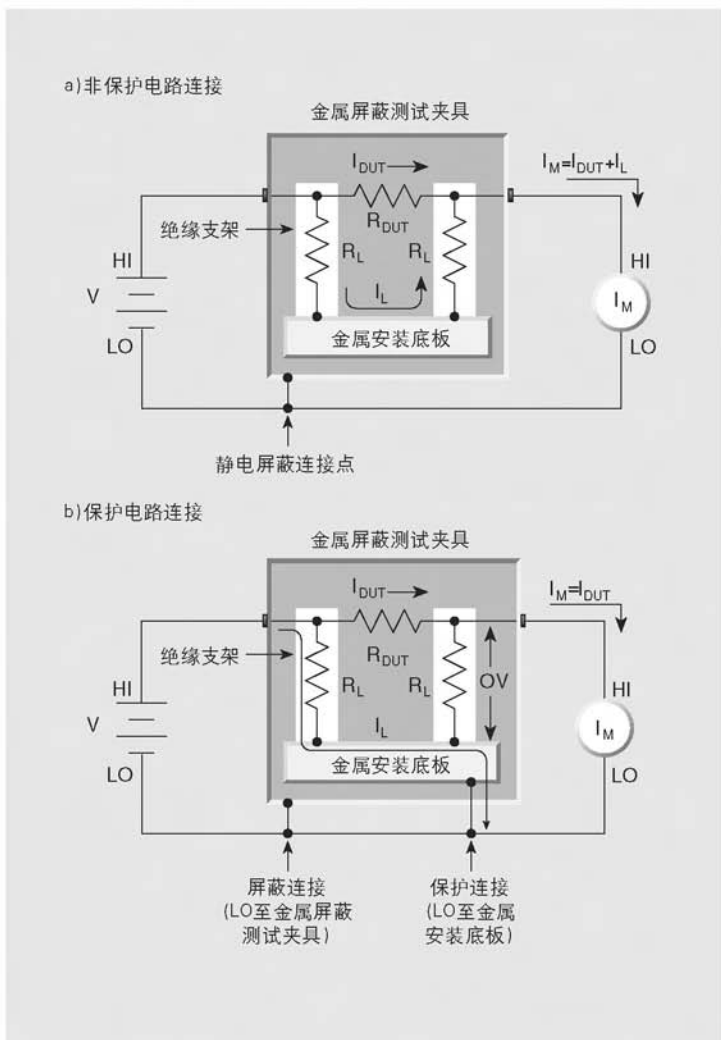
如图 2-12b 所示, 这个电路将皮安计的 LO 端连到金属安装板, 实现了保护作用。这就使得右边绝缘子的底部与其顶部几乎处于相同的电位。其电位差等于皮安计的输入端压降。该输入端压降很小, 小于 $200\mu\text{V}$ 。绝缘子的顶部和底部几乎为同电位, 所以没有很大的电流流过。几乎所有来自被测器件的电流都按我们希望的那样流过安培计。

SMU 的安培计中保护技术的运用

SMU 的保护端通常是三同轴连接器的内层屏蔽。该保护端由一个单位增益的低阻抗放大器驱动。根据定义, 保护端与该高阻端处在几乎相同的电位, 所以保护端就与电压源为相同电位。

图 2-13 示出保护驱动如何能够避免电缆的泄漏电阻影响弱电流测量。在图 2-13a 的无保护电路中, 同轴电缆的泄漏电阻与 DUT (R_{DUT}) 并联, 产生了不希望的泄漏电流 (I_L)。这个泄漏电流使得极低电流测量结果恶化。

图 2-12: 保护技术降低泄漏电流



在图 2-13b 所示的保护电路中，三同轴电缆的内层屏蔽连到 SMU 的保护端。这个屏蔽由一个单位增益的低阻抗放大器（保护）驱动。激励/输出（Force/Output）高端 HI 和保护端之间的电位差几乎为 0V，从而消除了泄漏电流（ I_L ）。

图 2-13: SMU采用保护技术降低电缆泄漏

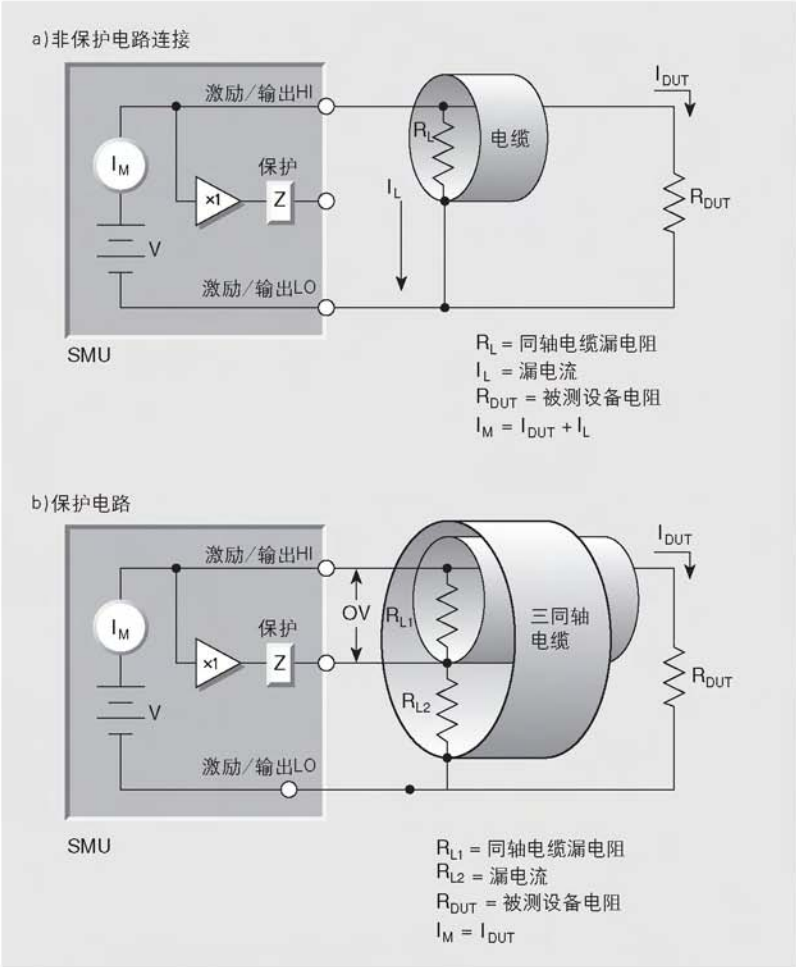
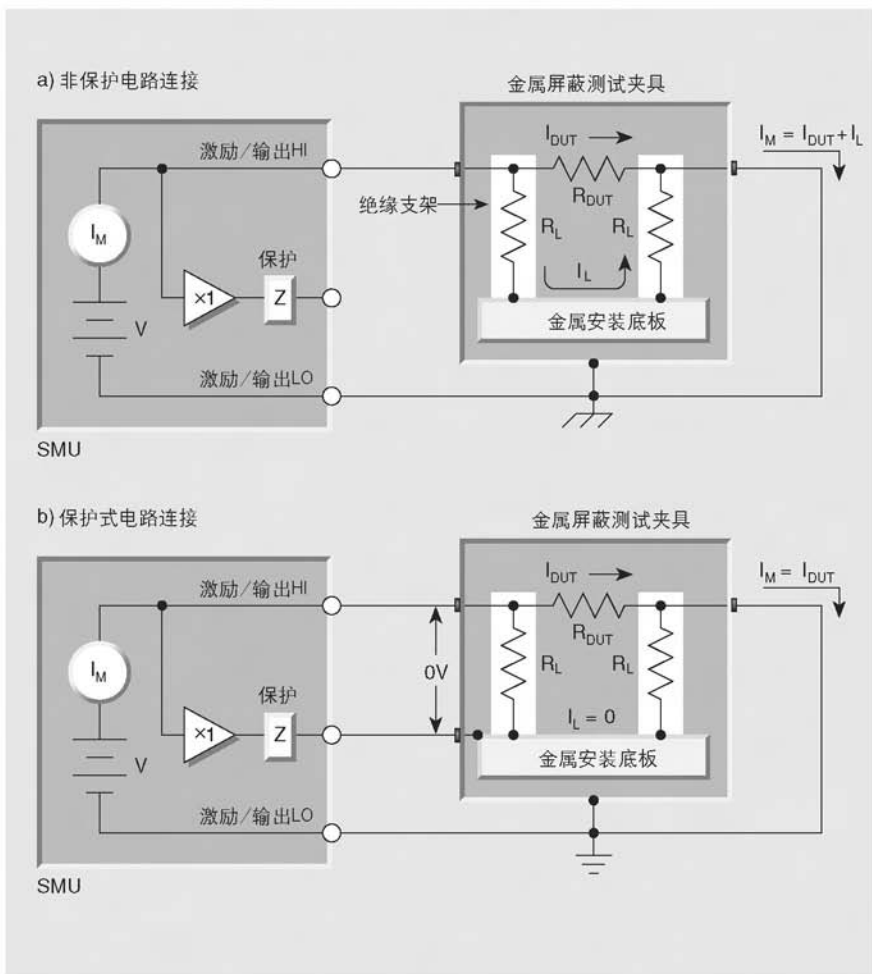


图2-14说明保护如何能够消除测试夹具中可能流过绝缘子支脚的泄漏电流。在图 2-14a 中，泄漏电流 (I_L) 流过绝缘子支脚 (R_L)。此泄漏电流加到由 DUT 来的电流 (I_{DUT}) 中，并为 SMU 所测量，从而影响了弱电流测量的准确度。

图 2-14：SMU 采用保护技术降低测试夹具漏电

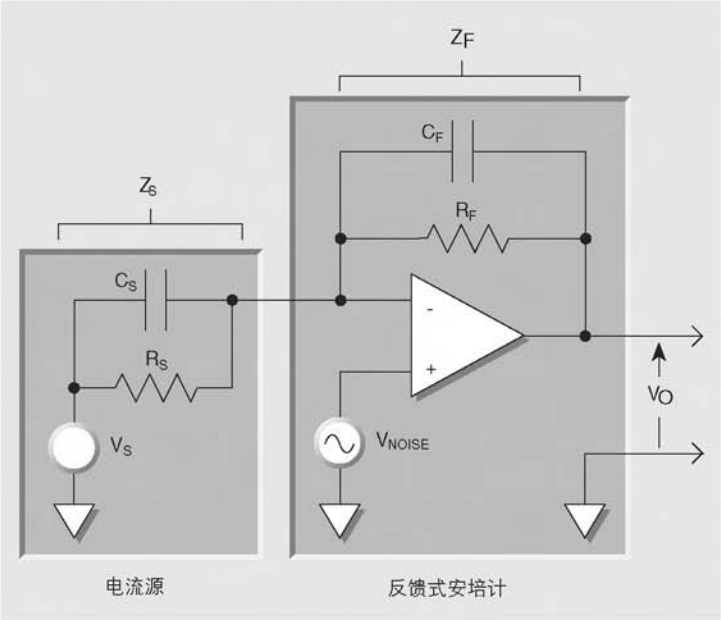


在图 2-14b 中，金属安装板连到 SMU 的保护端。绝缘子支脚的顶部和底部几乎为相同的电位（0V 电压降），因此没有泄漏电流流过绝缘子支脚而影响测量准确度。为了安全的目的，屏蔽盒的金属外壳必须连到大地，因为金属安装板将处在保护电位。

2.3.2 噪声和源阻抗

噪声能够严重地影响灵敏的电流测量工作。本节讨论源电阻和源电容如何影响噪声的性能。

图2-15: 反馈式安培计的简化模型



源电阻

DUT的源电阻会影响反馈安培计的噪声性能。源电阻降低，安培计的噪声增益就增加。

图 2-15 示出反馈安培计的简化模型。 R_S 和 C_S 代表源电阻和源电容， V_S 为源电压， V_{NOISE} 为安培计的噪声电压。最后， R_F 和 C_F 分别是反馈电阻和反馈电容。

电路的噪声增益由下式给出：

输出 $V_{NOISE} = \text{输入 } V_{NOISE} (1 + Z_F / Z_S)$

注意，当 R_S 的数值降低时，输出噪声增加。例如，当 $R_F = R_S$ 时，输出噪声为输入噪声的两倍。过低的源电阻对噪声性能有决定性的影响，所以根据测量的范围，通常有一个最小的源电阻推荐值。表 2-3 给出了典型的反馈安培计在各种测量范围内最小的源电阻推荐值。注意，最小的源电阻推荐值随着测量范围而变化，因为 R_F 也决定于测量范围。您所使用的仪器的恰当的最小源电阻推荐值请参阅其操作手册。

表 2-3 典型反馈安培计的最小源电阻推荐值

范围	最小源电阻推荐值
pA	1GΩ
nA	1MΩ
μA	1kΩ
mA	1Ω

源电容

DUT 的源电容也会影响反馈安培计的噪声性能。一般地说，源电容增加噪声增益也增加。

为了了解源电容如何影响噪声增益，再来看一下图 2-15 中的简化的安培计模型。这时，我们感兴趣的元件是源电容 (C_s) 和反馈电容 (C_F)。考虑这两个元件的容抗，前面的噪声增益公式变为：

$$\text{输出 } V_{\text{NOISE}} = \text{输入 } V_{\text{NOISE}} (1 + Z_F / Z_S)$$

在这里， Z_F 代表由 C_F 和 R_F 组成的反馈阻抗，而 Z_S 则是由 C_s 和 R_s 组成的源阻抗。而且：

$$Z_F = \frac{R_F}{\sqrt{(2\pi f R_F C_F)^2 + 1}}$$

$$Z_S = \frac{R_s}{\sqrt{(2\pi f R_s C_s)^2 + 1}}$$

注意，当 C_s 数值增加时， Z_s 数值减小，所以噪声增益增加。同样，当 $Z_s = Z_F$ 时，输入噪声被放大两倍。

大多数的皮安计都有最大的 C_s 推荐值。虽然，在安培计输入端串入一个电阻器可以在更高的源电容值下进行测量，但是，要记住串入电阻引起的输入端压降增加值为 $I_{\text{IN}} \cdot R_{\text{SERIES}}$ 。串入的电阻还增加了测量时的 RC 时间常数。串入一个二极管或两个反向并联的二极管可以作为一种有用的替代方法，起上述串联电阻的作用。这种二极管可以用小信号型的二极管，并且应当具有闭光的封装。关于使用串联二极管的详细讨论请见第 4.3.1 节。

2.3.3 零点漂移

零点漂移是在没有输入信号的情况下，仪器指示的零点偏置值的逐渐变化。如果不进行“调零”修正，所产生的偏置量就会叠加到输

入信号上产生误差。偏置通常都按与时间或温度的函数来表示。在一定时间和一定温度范围内的零点偏置应在规定的指标之内。由温度跳变引起的偏置在其达到稳定之前可能超过规定的指标。典型的室温变化速率（1℃/15 分钟）通常不会引起这种过冲。

大多数静电计都有修正零点漂移的方法。大多数静电计和皮安计都用一个零点检查（ZERO CHECK）开关来使该仪表显示其内部的电压偏置。这种功能能够快速地检查和调节放大器的零点。通常，当仪器的零点检查功能打开时，仪器就会修正零点。依据环境条件，可能需要定期地进行这种操作。按动按钮或者通过计算机的命令就可以使静电计进行这种操作。

注意，在皮安计或静电计安培计中，零点检查（ZERO CHECK）或零点修正（ZERO CORRECT）功能用来修正内部的电压偏置；而抑制（SUPPRESS）或相对（REL）功能则用来修正外部电流偏置。为了获得最好的准确度，应当在测量工作所使用的量程上对仪器进行调零。关于修正内部偏置电流的讨论请见第 2.3.4 节。

2.3.4 产生电流

测试系统中任何额外产生的电流都会加到被测电流中去而引起误差。这种电流可以在内部产生，如仪器的输入偏置电流；也可以从外部而来，如来自绝缘子和电缆。以下各段讨论各种类型的产生电流。

偏置电流

偏置电流可以在仪器内部产生（输入偏置电流），也可以由外部电路产生（外部偏置电流）。

① 输入偏置电流

当输入端开路时，理想安培计的读数应当为零。然而，实际的安培计在输入端开路时确实有一些小的电流。这种电流称为输入偏置电流，是由有源器件的偏置电流以及流过仪器内部的绝缘子的泄漏电流所引起的。皮安计、静电计和SMU中产生的偏置电流在仪器的技术指标中给出。如 2-17 所示，输入偏置电流叠加到被测电流上，所以仪表测量的是两个电流之和：

$$I_M = I_S + I_{\text{OFFSET}}$$

输入偏置电流可以通过盖上（capping）输入连接器并选择最低的

电流量程来决定。用大约5分钟的时间使仪器达到稳定，然后读取读数。该读数应当在仪器的技术指标之内。

图2-16: 典型的产生电流幅度

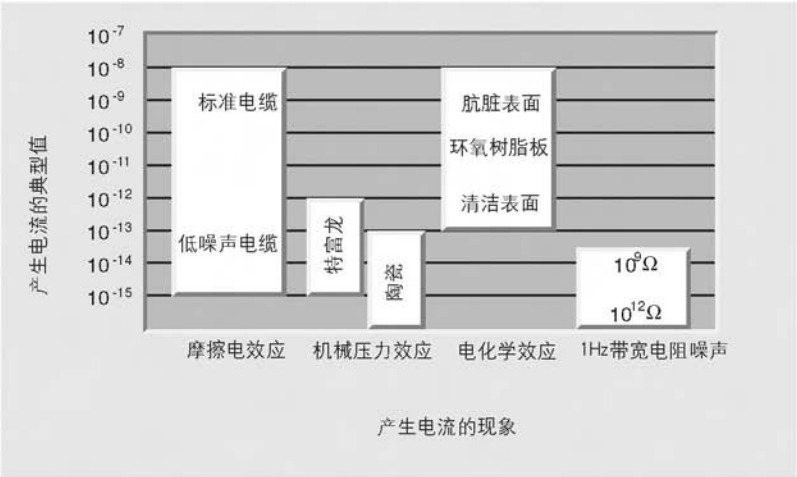
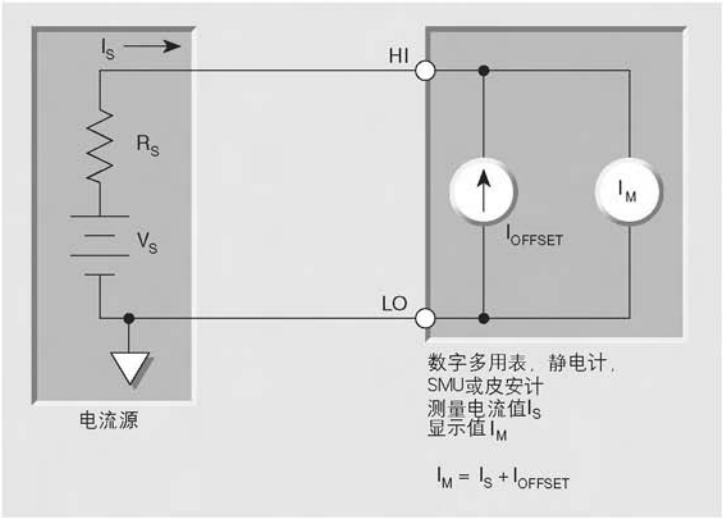


图2-17: 输入偏置电流对电流测量准确度的影响



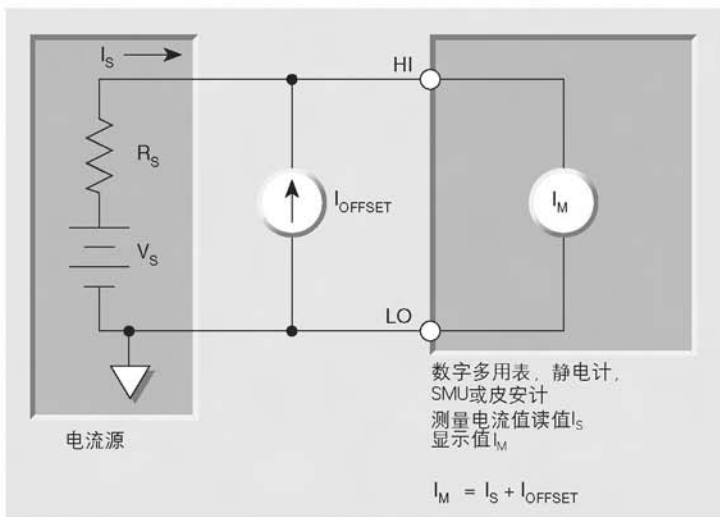
从测量结果中减去输入偏置电流的另一种方法是使用安培计的相对 (REL 或 ZERO) 功能。在开路的情况下使读数达到稳定，然后打开REL功能。建立REL值以后，以后的读数就都是实际输入值和该REL

值之差。

②外部偏置电流

外部偏置电流可以由与安培计相连的绝缘体上的离子沾污产生。这种偏置电流也可以由摩擦电效应和压电效应等原因在外部产生。如图2-18所示,外部偏置电流也加到源电流上,仪表显示的也是这两者之和。

图2-18: 外部编置电流对电流测量准确度的影响



外部偏置电流可以用仪器的电流抑制功能(如果有此功能的话)来消除,也可以用一个比较稳定、安静的外部电流源来消除,如图 2-19 所示。采用这种方法时,仪表测量的电流为:

$$I_M = I_S + I_{\text{OFFSET}} - I_{\text{SUPPRESS}}$$

如果 I_{OFFSET} 和 I_{SUPPRESS} 大小相等、极性相反, 则:

$$I_M = I_S$$

采用外部电流源的好处是 I_{OFFSET} 可以等于甚至大于仪器满量程之值, 只要 $I_{\text{OFFSET}} - I_{\text{SUPPRESS}}$ 比较小即可。

摩擦电效应

摩擦电电流是由导体和绝缘体之间摩擦产生的电荷生成的。这时，摩擦引起自由电子脱离导体，产生电荷不平衡，从而产生电流。典型

的例子是同轴电缆中的导体和绝缘体互相摩擦所产生的电流，如图 2-20 所示。

图2-19：使用外部电流源抑制偏置电流

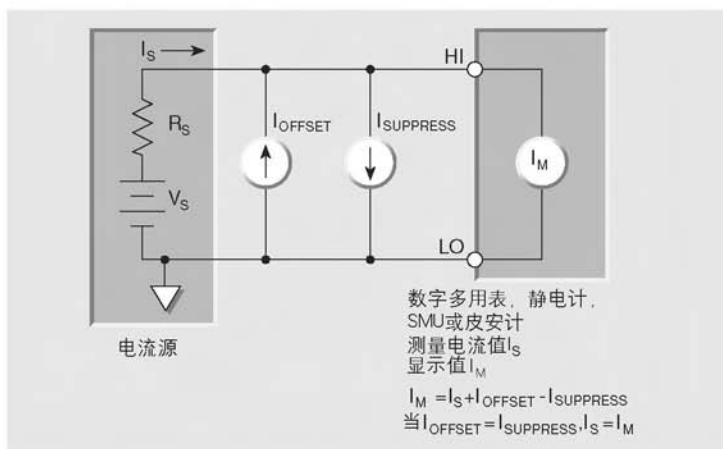
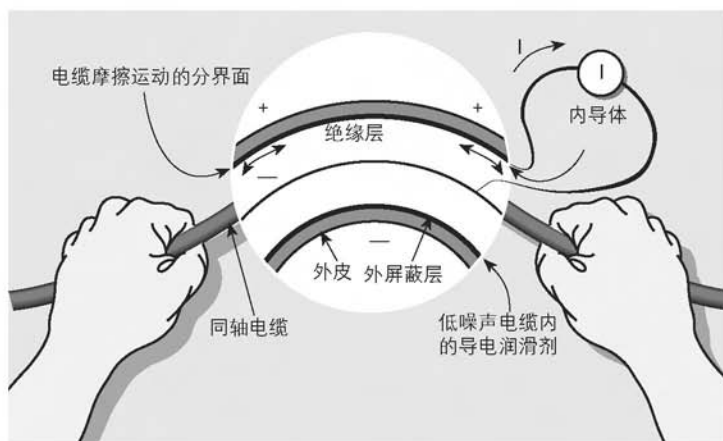


图2-20：磨擦电效应



“低噪声”电缆能大大降低这种效应。这种电缆通常使用聚乙烯的内层绝缘层，并在外层屏蔽的下面涂敷以石墨。石墨可以起润滑作用，并形成导电的等电位圆柱体，以使电荷平衡并尽量降低由电缆运动的摩擦效应所产生的电荷。然而，在受到振动或伸缩作用时，即使是低噪声电缆也会产生一些噪声。所以，所有的连接都要尽量地短，避免

温度变化的影响(温度变化会产生热膨胀力),并且最好将电缆固定在不振动的表面,如墙壁、桌面或其它牢固的结构上。

有多种方法可以解决运动和振动的问题:

- * 消除与振动源的机械耦合。马达、泵和其它的电机设备都是常见的振动源。

- * 使测试夹具稳定。牢靠地固定或绑扎电子元件、导线和电缆。屏蔽应当牢靠、完善。

摩擦电效应也可能在其它绝缘体和导体互相接触摩擦时发生。所以在构建测试夹具和进行弱电流及高阻抗连接时,尽量减少绝缘体之间及导体之间的接触也是很重要的。

第 2.2.2 节中的表 2-2 给出了各种绝缘材料摩擦电效应的情况。

压电效应和储存电荷效应

某些晶体材料用作绝缘端子和连结件时,若向其施加机械应力,就会产生压电电流。在某些塑料中,电荷的储存使该材料的性质类似于压电材料。压电绝缘体的端子示于图 2-21。

为了尽量减小这种效应产生的电流,重要之点在于消除绝缘子上的机械应力并使用压电效应和储存电荷效应最小的绝缘材料。第 2.2.2 节的表 2-2 给出了各种绝缘材料的压电性质。

这种效应和金属板与端子之间的电容变化无关。由于电荷的运动产生了电流。

在实际工作中,区分储存电荷效应(在绝缘体中)和压电效应可能是相当困难的。无论对哪种现象,选择很好的绝缘材料,并使连接结构尽可能地牢固都是很重要的。

污染和湿度

当离子化学物质在电路板上的两个导体之间生成弱的化学电池时,电化学效应就会产生误差电流。例如,常用的环氧树脂印制电路板,如果没有彻底地清洗掉腐蚀加工用的溶液、焊剂或其它的污染物,就能在两个导体之间产生几个纳安的电流(见图 2-22)。

图2-21: 压电效应

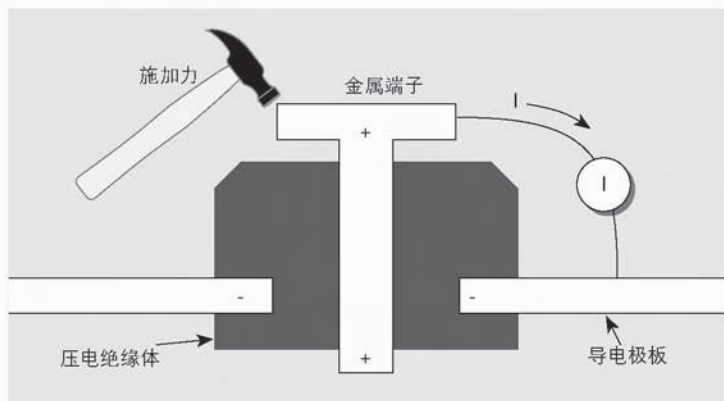
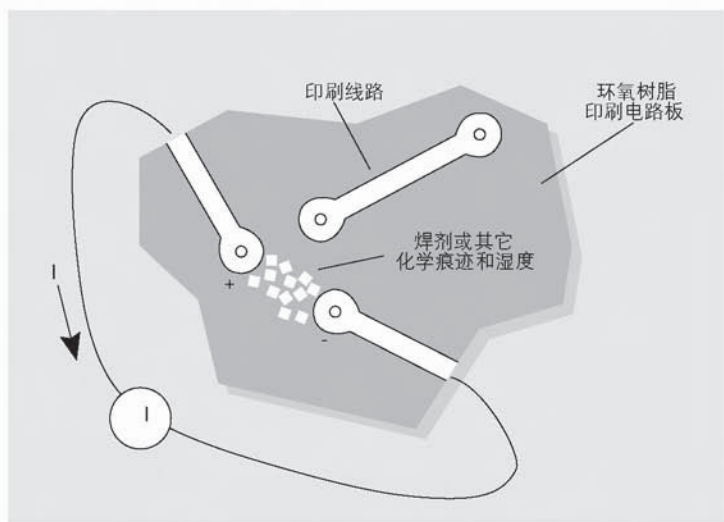


图2-22: 电化学效应



高湿度和离子污染能够大大降低绝缘电阻。在发生结露或水吸收的情况时，就会出现高湿度，而离子污染则可能由人体的油脂、盐分和焊剂等产生。

这些污染的主要结果是降低绝缘电阻。在高湿度和离子污染的双重作用下，还能形成导电通路，甚至可以形成具有高串联电阻的化学电池。这种情况下形成的电池能够在很长的时期内输出皮安或纳安级的电流。

为避免污染和湿度的影响,应当选择抗吸水的绝缘材料,并将湿度保持在适当的水平。而且,还要确保所有的绝缘体清洁、不受污染。

如果绝缘体受到污染,可使用清洁的溶剂,如甲醇来清洗所有的互连电路。重要之点是在污染物溶解到溶剂中以后,将其完全冲净,使之不再沉积下来。清洗时只能使用纯净的溶剂;低等级的溶剂可能含有污染物,清洗后会留下电化学薄膜。

介电吸收

在绝缘体上施加电压时,由于各种极性分子以不同的速率运动,使得绝缘体内部的正、负电荷发生极化,这时绝缘体内就会发生介电吸收现象。当撤去电压时,这些分离的电荷在重新组合时会在与绝缘体相连的电路中产生衰减的电流。

为了尽量减小介电吸收对电流测量的影响,避免向进行灵敏电流测量时所使用的绝缘体施加大于几伏的电压。在实际工作无法避免这种情况时,可能需要经过几分钟、有时甚至几个小时,介电吸收引起的电流才会消散。

第 2.2.2 节中的表 2-2 给出了各种绝缘材料的相对介电吸收性能。

2.3.5 输入端压降

安培计可以用电阻为零的理想安培计 (I_M) 和电阻 (R_M) 相串联来表示,如图 2-23 所示。电流源的戴文宁等效电路为电压源 (V_S) 与源电阻 (R_S) 相串联。当电流源连到安培计的输入端时,其电流比使用理想安培计 ($R_M = 0\Omega$) 时有所降低。这种电流的降低是由安培计的内阻 (R_M) 引起的,此内阻产生了一个附加的电压降,称为输入端压降 (V_B)。

输入端压降按满度输入来规定。所以,给定电流时的输入端压降可以计算如下:

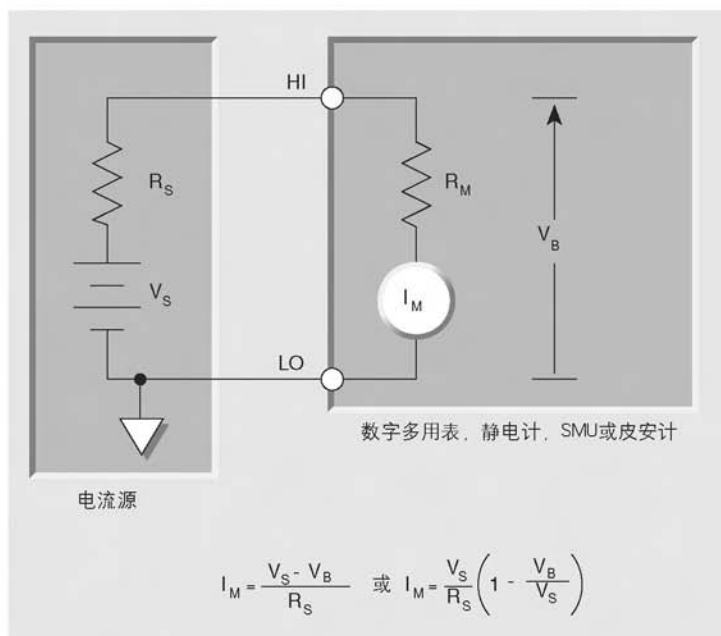
$$V_{B(I)} = V_B \left(\frac{I_S}{I_{FS}} \right)$$

其中: I_{FS} 为满度电流, I_S 为电流源的电流幅度。

考虑到输入端压降,测量误差可以计算如下:

$$I_M = \frac{V_S - V_B \left(\frac{I_S}{I_{FS}} \right)}{R_S}$$

图2-23：输入端压降对电流测量准确度的影响



由输入端压降引起的测量读数百分误差为：

$$\% \text{ 误差} = \frac{V_B \left(\frac{I_S}{I_{FS}} \right)}{V_S} \times 100\%$$

举例：在此电路中， $V_S = 0.7V$ ， $I_S = 100\mu A$ ， $I_{FS} = 200\mu A$ ，假定， $R_S = 10k\Omega$ ，满度时的输入端压降为 $200mV$ ：

$$I_M = \frac{0.7V - 0.2V \left(\frac{100\mu A}{200\mu A} \right)}{10k\Omega} = 60\mu A$$

与理想情况相比，

$$I_M = \frac{0.7V}{10k\Omega} = 70\mu A$$

所以，安培计的读数为 $60\mu\text{A}$ ，与理想情况的 $70\mu\text{A}$ 相比，误差为 14%。

如果使用皮安计，输入端压降为 $200\mu\text{V}$ ，对比起来：

$$I_M = \frac{0.7\text{V} - 0.0002\text{V} \left(\frac{100\mu\text{A}}{200\mu\text{A}} \right)}{10\text{k}\Omega} = 69.99\mu\text{A}$$

所以，安培计的读数为 $69.99\mu\text{A}$ ，与理想情况的 $70\mu\text{A}$ 相比，误差为 0.01%。

反馈皮安计或静电计安培计的输入电阻小于规定的输入端压降与满度电流之比：

$$\text{输入电阻} < \frac{\text{输入端压降}}{\text{满度电流}}$$

在确定 SMU 的输入端压降时，必须包括电压源所使用量程的偏置电压。所以，为了尽量降低误差，最好使用尽可能低的电压源量程。

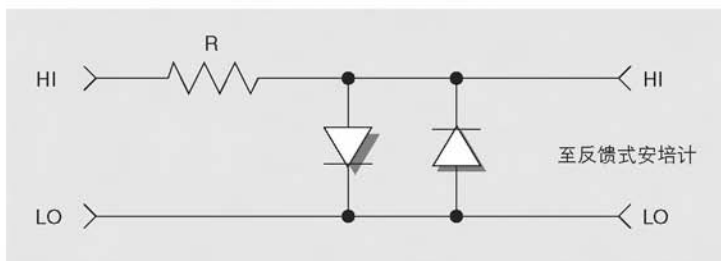
2.3.6 过载保护

如果输入端加入过高的电压，静电计、皮安计和 SMU 就可能损坏。大多数仪器都有最大允许输入电压的技术指标。在某些应用中，不可避免地会超过这个最大的电压。这类应用可能包括电容器的漏电流、二极管反向漏电、电缆或薄膜的绝缘电阻等。如果元件或材料发生击穿，全部电压都会加到安培计的输入端，从而可能将其损坏。在这种情况下，就需要附加的过载保护功能以避免损坏仪器的输入电路。

静电计或皮安计的过载保护

图 2-24 示出静电计或皮安计的过载保护电路，其中包括一个电阻器和两个二极管 (1N3595)。即使在 1mV 的正向偏置之下，1N3595 的漏电流一般会小于 1 皮安，此电路不会影响 10pA 或更大电流的测量。此二极管能够承受 225mA 的额定电流 (重复浪涌 450mA)。由于静电计、安培计或皮安计的输入端压降小于 1mV ，这两个二极管不会导通。由于两个二极管反向并联，所以此电路能够对任何极性的信号进行保护。

图2-24：静电计和皮安表的过载保护电路



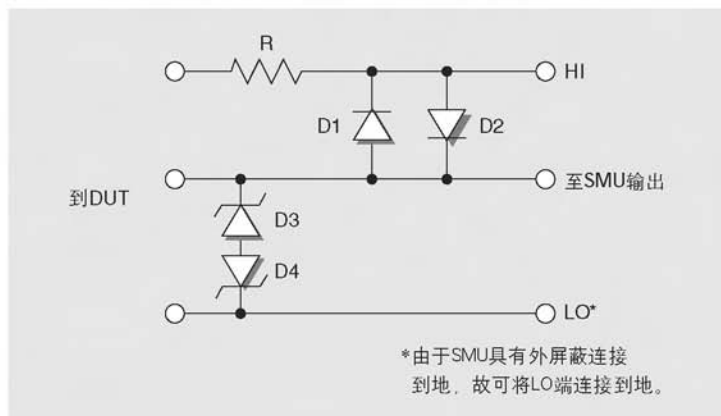
电阻器 (R) 必须足够大，以限制流过二极管的电流，使之不会损坏二极管。此电阻器又必须足够大，以承受电源电压。比较好的经验法则是在最大被测电流下，使得该电阻器上的电压降为 1V。

由于二极管具有光敏特性，所以保护电路应当装在闭光的屏蔽盒中。屏蔽盒则应连到安培计的低端。

SMU 的过载保护（在加电压、测电流模式下）

图2-25 说明工作在安培计模式下的 SMU 的过载保护电路。此保护电路由连在保护端和 LO 端（或公共端）之间的两个齐纳二极管 (D3 和 D4)、与 HI 端相串联的限流电阻器 (R) 以及在 HI 端和保护端之间的两个低漏电流的二极管 (D1 和 D2) 组成。

图2-25：工作在加电压、测电流模式下 SMU 的过载保护电路



用两个齐纳二极管在保护端与LO端（或公共端）之间进行钳位。其额定电压应当比SMU的最大可测量电压略高一些。由于流过齐纳二极管的泄漏电流会在电阻器上产生电压降，所以希望使用低漏电的齐纳二极管。

电阻器（R）用来限制流过二极管（D1和D2）的电流。其电阻值应当足够大，将流过二极管的电流限制在其正向额定电流的十分之一，以免二极管损坏。该电阻器还应当有足够高的额定功率，以满足齐纳管导通时的功率耗散要求。

如果发生过载，二极管（D1和D2）之一导通，避免电路的输入端损坏。二极管1N3595是完成此功能的很好的选择对象，因为其漏电流很低，即使在正向偏置电压为1mV时，漏电流典型值也小于1pA。

必须使用诸如聚四氟乙烯支架等高阻抗结构。保护电路应当装入一个闭光的金属屏蔽盒，而该屏蔽盒则连到SMU的LO端。

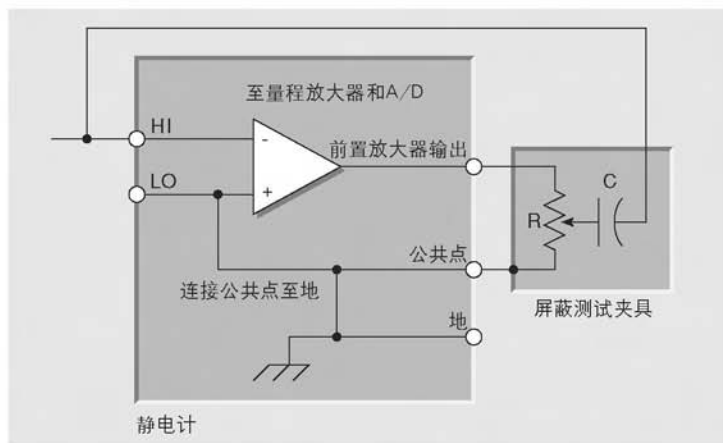
2.3.7 交流干扰和衰减

在测量弱电流时，静电屏蔽（如第2.6.2节所讨论）是降低交流干扰引起的噪声的最常用的方法。然而，在有些情况下，将被测设备或连接电缆屏蔽起来是不实际的。对于这些应用来说，采用一种可变的衰减电路足以降低交流干扰，以便进行有意义的测量工作。

该衰减电路是一种降低静电计交流响应的低通滤波器，使我们 can 准确地进行直流弱电流的测量。衰减电路可以装在静电计的内部，也可以是一个外部电路。关于特定静电计内部衰减电路的性能，请参阅该仪器的操作手册。然而有的时候，可能需要使用外部电路来增加衰减作用。

图2-26示出一个外部衰减电路的例子。电路由一个低漏电的聚苯乙烯或聚乙烯电容器（C）和一个电位器（R）组成。电位器连在前置放大器的输出端和安培计的公共端（或LO端）之间。电容器连在安培计的HI输入端和电位器的动臂之间。电容器的数值决定于安培计的电流范围。电流范围大的时候，需要使用更大的电容器。电容器的典型值在几百皮法的范围。电位器的数值应选择得比较高（大于50kΩ），以避免前置放大器的输出负载过重，而仍能有效地降低噪声。

图2-26：外部衰减电路



选择最合适的电容器和电阻数值需要一些经验。将示波器连到仪器的模拟输出，观察示波器上的交流波形。调节电位器使示波器上的交流信号尽可能地小。如果用该电位器还不能有效地抑制噪声，则使用更大的电容器。

衰减电路应当装在屏蔽的盒子中。

2.3.8 使用库仑计测量弱电流

在大多数情况下，使用安培计或皮安计来测量电流。然而，对于飞安级的电流来说，使用静电计的库仑功能测量电荷随时间的变化，然后根据电荷的测量来决定电流可能会更好。有关电荷测量的更进一步的讨论请参见第2.5节。

基本电荷测量方法

电荷难于直接测量，必须将其与一个易于测量的量联系起来。进行这类测量的一个常用的方法是测量已知容量电容器上的电压。电荷与电容器电压之间的关系如下：

$$Q = CV$$

其中：Q = 电容器电荷（库仑）

C = 电容器的容量（法拉）

V = 电容器上的电压（伏）

一旦电荷的变化率已知，就可以很容易地根据电荷测量来计算电流。瞬时电流 (i) 为：

$$i = \frac{dQ}{dt}$$

而长期平均电流为：

$$I_{\text{AVG}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

因此，通过一系列电压测量就可以测量电荷，并能简单地算出电流。

使用反馈库仑计测量电流

电荷可以用反馈库仑计来直接测量。图 2-27 示出反馈型库仑计的简化模型。电路的输入电流为 I_S ，输出电压为 V_{OUT} ，反馈电容器为 C_F 。

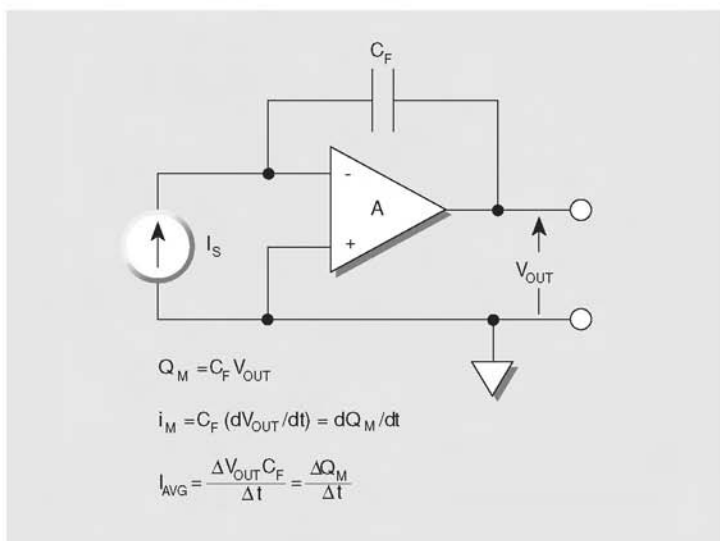
电流 (I_S) 加到反馈库仑计的输入端。此电路为一个积分器，电荷由电流的积分来决定：

$$Q_M = \int i dt$$

库仑计由输出电压和反馈电容器的容量来决定电荷：

$$Q_M = C_F V_{\text{OUT}}$$

图2-27：反馈式库仑计等效电路



根据测量出的电荷 (Q_M)，用户就能够计算出电流：

$$i_M = C_F (dV_{OUT} / dt) = dQ_M / dt$$

长期平均电流 (I_{AVG}) 可以从输出电压在规定时间期间的变化计算出来：

$$I_{AVG} = \frac{\Delta V_{OUT} C_F}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

为了计算方便，在单次触发模式下，设置测量时间间隔为1秒。可以用静电计的“REL”或清零功能来使读数复位。

固定积分时间方法

图2-28所示的固定积分时间法可以用来测量电流，并且是反馈库仑计技术的一种变形。在这种情况下，以规定的等长的时间间隔测量不断增加的电荷值。在给定时间内的平均电流 (I_{AVG}) 可以由该直线的斜率决定，并计算如下：

$$I_{AVG} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

这种方法给出该时间间隔内的平均电流，并且以积分时间决定的稳定的速率产生读数。通过用软件得到连续读数之间的差值，可以自动地实现这种方法。

固定阈值法

图2-28：由电荷决定电流的固定积分时间法

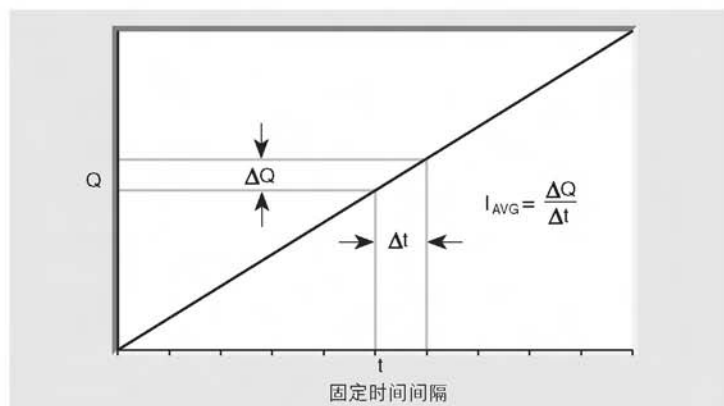


图2-29：由电荷决定电流的固定阈值法

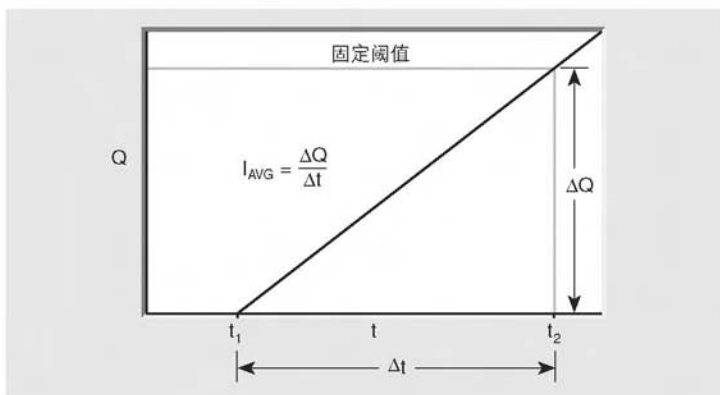


图2-29所示的固定阈值法与刚刚介绍的固定积分时间法有些类似。然而，在这种情况下，电荷测量从时间 t_1 开始，并继续到时间 t_2 时电荷值达到一个预定的阈值。于是电流可以计算如下：

$$I_{\text{AVG}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{其中 } \Delta t = t_2 - t_1$$

注意，库仑计电容器的电压系数对总电流测量的准确度没有影响。只要阈值点和时间间隔准确已知，电流测量的准确度就会很好。但是，当电流变化时，读数时间间隔是不等间距的；在给定时限内平均电流很小时，读数之间的时间间隔可能会很长。

使用库仑计测量电流的好处

在某些情况下，使用库仑计代替安培计测量电流有多种好处：

- 更低的电流噪声：安培计使用反馈电阻器，而该电阻器具有很大的约瑟夫逊噪声。在电荷测量时，此电阻器为电容器所代替，而电容器在理论上是没有约瑟夫逊噪声的。结果，用电荷法测量电流比直接用反馈安培计测量电流的噪声更低。所以，在需要电流噪声性能小于 1fA 峰峰值时，电荷法会更好。（参见第 2.6.5 节的图 2-52，并注意反馈电阻大于 $10^{12}\Omega$ 是不实际的。）

- 更快的建立时间：反馈安培计的速度受到其反馈电路时间常数 ($R_F C_F$) 的限制。例如，反馈电阻大于 $10\text{G}\Omega$ 时，寄生电容将响应时间限制在几十毫秒。相反，反馈电荷积分器能立即响应，并只受运算放

大器速度的限制。

- 能够积分随机脉冲: 单位时间传送的随机脉冲串的平均电荷可以通过在给定时间内对电流脉冲串进行积分来估计。平均电流的幅度可以由总电荷除以测量的时间来表示。在平均非常小的、不稳定的电流时, 这种技术特别有用。如果占空比已知, 还可以确定脉冲的幅度。

- 输入分流电容的噪声影响变得最小: 噪声增益主要由 C_N/C_F 决定, 而库仑计的 C_F 比安培计大得多, 所以可以容许大得多的输入电容值。在测量大电容的源或者使用长的连接电缆时, 这种特性极为有利。

2.4 高电阻测量

在必须测量大于 $1\text{G}\Omega$ 的电阻时, 通常需要使用静电计、SMU 或皮安计/电压源。静电计可以用恒压或恒流的方法测量高电阻。有些静电计可以让用户选择使用哪种方法。恒压法使用安培计和电压源, 而恒流法使用静电计电压表和电流源。下面对这些技术进行介绍。

2.4.1 恒压法

用恒压法测量高电阻, 需要使用一台能够测量弱电流的仪器和一台直流恒压源。有些静电计和皮安计具有内置的电压源, 能够自动地计算出未知电阻。

使用静电计和皮安计的恒压法的基本电路配置如图 2-30a 所示。而图 2-30b 则示出了使用 SMU, 采用恒压法进行高电阻测量的情况。

在此方法中, 恒压源 (V) 与未知电阻 (R) 和安培计 (I_M) 相串联。由于安培计上的电压降可以忽略, 所以所有的测试电压都出现在电阻 R 上。由安培计测量产生的电流, 再使用欧姆定律计算出电阻 ($R = V/I$)。

高电阻通常是所加电压的函数, 所以恒压法比恒流法要优越。在选定的电压下进行测量, 就可以得到电阻与电压的曲线, 并可以决定“电阻的电压系数”。

采用这种方法的应用工作包括测试两端高阻器件、测量绝缘电阻、确定绝缘材料的体电阻率和表面电阻率等。这些应用的介绍请见第四章。

恒压法需要测量弱电流, 所以第 2.3 节 (弱电流测量) 介绍的各种技术和误差来源都适用于这种方法。测量高电阻时两个最常见的误差

来源是静电干扰和泄漏电流。如第 2.6.2 节所介绍，将高阻抗电路屏蔽可以尽量降低静电干扰的影响。采用第 2.3.1 节介绍的保护技术可以控制泄漏电流的影响。

2.4.2 恒流法

采用恒流法，可以使用静电计电压表和电流源或者只使用静电计欧姆计来测量高电阻。也可以使用具有高输入阻抗的电压表和微电流源的 SMU 来进行测量。使用带有分立的电流源的静电计电压表或 SMU 时，用户能够进行四线测量并控制流过样品的电流。静电计欧姆计依据测量的量程，在规定的电流下，进行两线电阻测量。

图2-30：恒压法测量高阻值

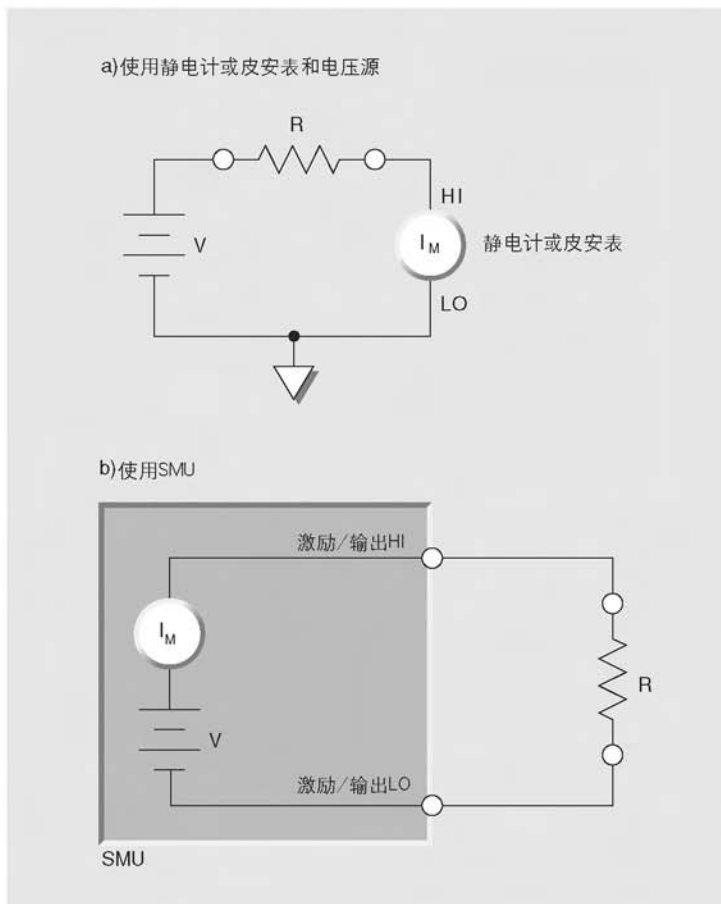
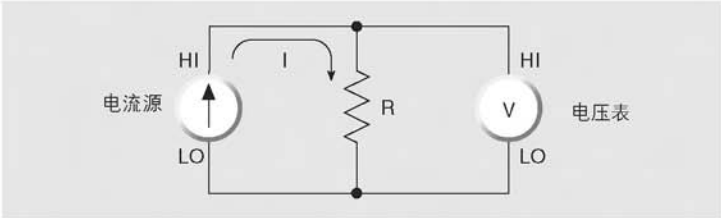


图2-31：使用分立的电流源和电压表的恒流法



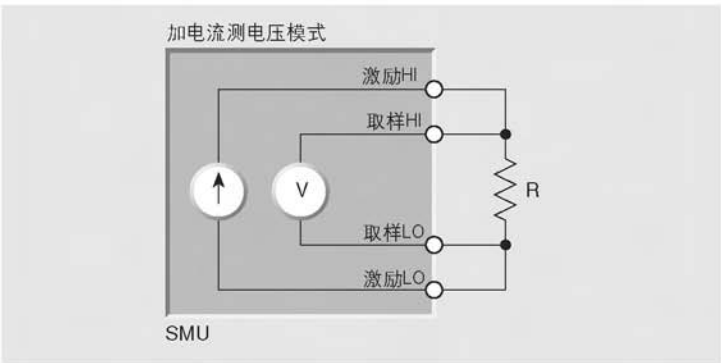
使用静电计电压表和外部电流源

恒流源法的基本电路配置如图 2-31 所示。电流源的电流 (I) 流过未知电阻 (R)，并由静电计电压表测量其电压降 (V)。用这种方法可以测量高达 $10^{12}\Omega$ 的电阻。虽然基本方法看起来非常简单，但是必须采取一些预防性的措施。电压表的输入阻抗与源电阻相比必须足够高，以便使负载误差保持在可以接受的水平。通常静电计电压表的输入阻抗大约为 $10^{14}\Omega$ 。而且，电流源的输出电阻必须比未知电阻大得多，才能使测量为线性。样品两端的电压决定于样品的电阻，因此在使用恒流法时，难于考虑电压系数的问题。如果关心电压系数，最好使用恒压法。在使用静电计电压表进行高阻测量时，第 2.2 节（高源内阻的电压测量）介绍的所有的技术和误差来源均可用于此项测量。静电计电压表和分离的电流源可以在采用四点探头法或 van der Pauw 法测量半导体材料的高电阻率时使用。这些确定半导体材料电阻率的方法在第 4.4.3 节详细介绍。

加电流测电压模式下使用 SMU

采用两线（本地取样）或四线（远地取样）的方法，工作在加电流测电压模式下的 SMU 可以测量高电阻。图 2-32 示出四线模式下 SMU 的情况。

图2-32：使用SMU在四线模式下测量高电阻



使用四线方法消除了接触电阻和引线电阻的影响，这对于测量半导体材料的电阻率是特别重要的。这些测量中通常会涉及到测量低电压。金属探头与半导体接触时的电阻可能相当高。

在采用远地取样时，通常将强制高端和取样高端之间以及强制低端和取样低端之间的电压差限制在规定的数值之内。电压差超过该数值将会产生错误的测量结果。有关此电压限制的更详细信息请参阅 SMU 的操作手册。

除了这个电压降限制之外，某些 SMU 在强制高端和取样高端之间以及强制低端和取样低端之间装有自动远地取样电阻器。这可能进一步限制了在某些应用（例如测量半导体的电阻率）中在远地模式下使用单台 SMU。在这种情况下，可以使用两线模式下的 SMU 作为电流源，而使用分离的电压表来测量电压差。详细情况请见第 4.4.3 节。

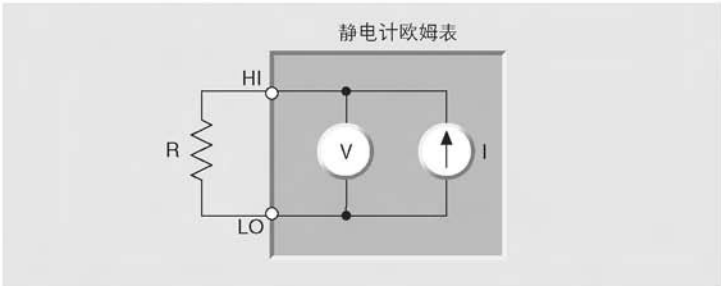
使用静电计欧姆计

使用静电计欧姆计时，测量准确度会受到各种因素的影响。以下各段讨论准确地进行高电阻测量时要考虑的最重要的问题。

基本电路配置

图 2-33 示出静电计欧姆计测量电阻 (R) 的情况。欧姆计使用内部的电流源和静电计电压表来进行测量。仪器自动地计算和显示出测量的电阻值。注意，这种测量方法是两线电阻测量，而使用静电计电压表和外部电流源则可以进行四线测量。这是因为电流源在仪器内部与电压表相连，不能分开使用。

图2-33：使用静电计欧姆表测量高电阻



保护

与高源内阻电压测量和电流测量时一样，在高电阻测试连接中使

用保护技术可以大大降低泄漏电阻的影响，并提高测量的准确度。

现在考虑图2-34a所示的无保护的电阻测量设置情况。静电计欧姆计的电流激励 (I_R) 流过未知电阻 (R_S)，然后测量DUT上的电压 (V_M)。如果我们假定电压表的输入电阻为无限大，则可以由欧姆定律计算出被测电阻：

$$R_M = \frac{V_M}{I_R}$$

然而，由于电缆泄漏电阻 (R_L) 与 R_S 并联，实际测量的电阻 (R_M) 有所降低，如图2-34b的并联等效电路所示。测量出的电阻现在变为：

$$R_M = R_S \left(\frac{R_L}{R_S + R_L} \right)$$

电缆电阻 (和其它泄漏电阻) 的负载响应可以通过用单位增益放大器驱动电缆屏蔽层的办法来消除，如图2-34c所示。由于 R_L 两端的电压实际上为零，现在所有的测试电流 (I_R) 都流过 R_S ，于是可以准确地确定未知电阻。流过电缆对地泄漏通道 (R_G) 的泄漏电流 (I_G) 可能相当大，但是该电流由单位增益放大器的低阻抗输出供给，而不是由电流源 (I_R) 供给。

建立时间

在进行高电阻测量时，电路的建立时间特别重要。测量的建立时间受并联电容的影响，而并联电容则是由连接电缆、测试夹具和DUT产生的。如图2-35所示，并联电容 (C_{SHUNT}) 必须由测试电流 (I_S) 充电到测试电压。电容器充电所需要的时间由RC时间常数决定 (一倍时间常数 $\tau = R_S C_{SHUNT}$)，并得到图2-36中大家熟悉的指数曲线。这样就需要等待4倍到5倍时间常数的时间才达到准确的读数。在测量很高阻值的电阻时，依据测试系统中并联电容的数值，建立时间可能会达到几分钟。例如，如果 C_{SHUNT} 仅为10pF，测量1TΩ的电阻时，时间常数为10秒。因此，为使读数稳定到与其最终值相差1%，就需要50秒的建立时间。

在测量高阻值电阻时，为了尽量减小建立时间，使连接电缆尽可能地短，以便使系统中的并联电容实际上达到可能的最小值。此外，使用保护技术可以大大降低建立时间。最后，由于减小了建立时间，所以采用加电压测电流的方法测量电阻一般比较快。

图2-34a: 电缆电阻对高阻测量的影响

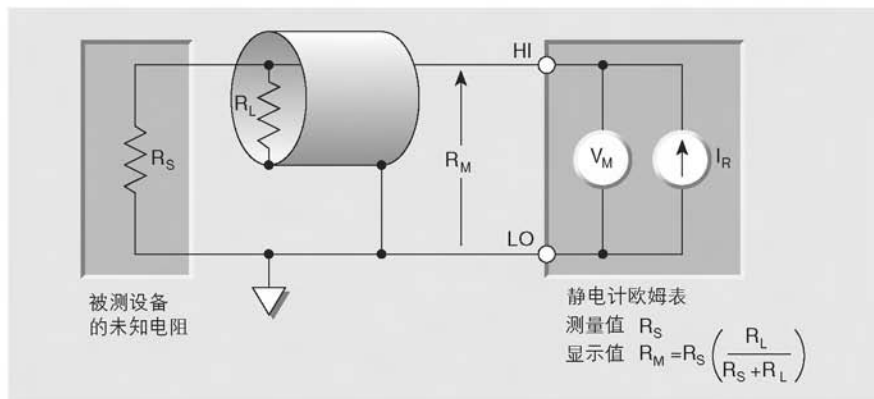


图2-34b: 图2-34a所示电缆电阻 R_L 对负载影响的等效电路

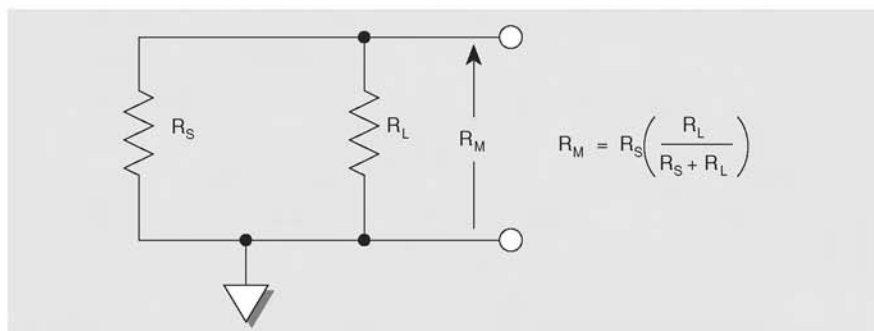


图2-34c: 对电缆屏蔽层使用保护技术以消除泄漏电阻

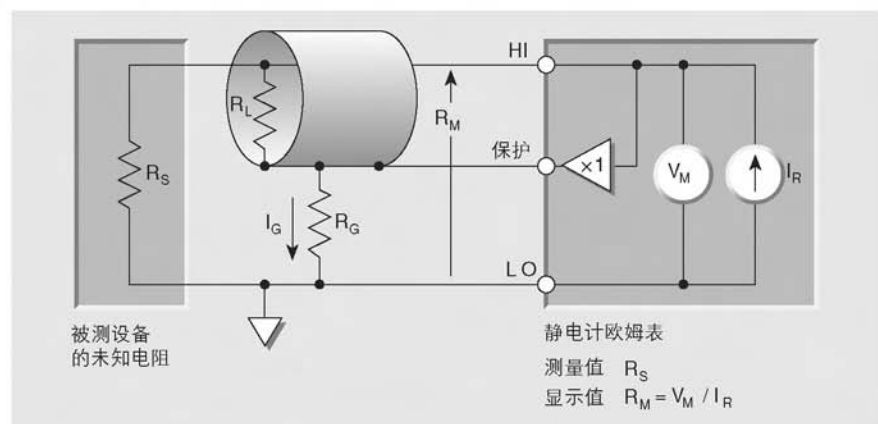


图2-35：建立时间取决于 $R_S C_{SUOUT}$ 时间常数

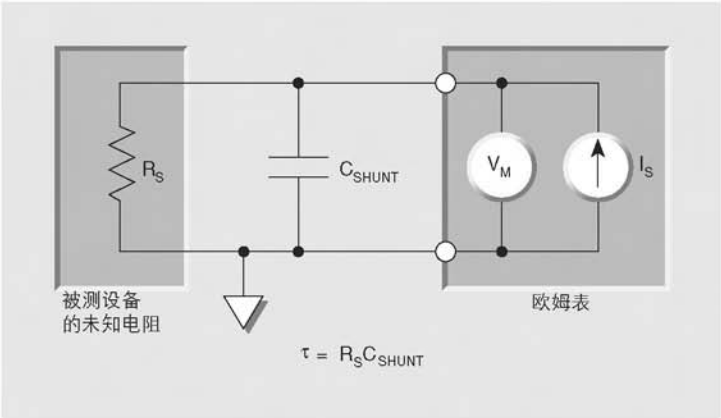
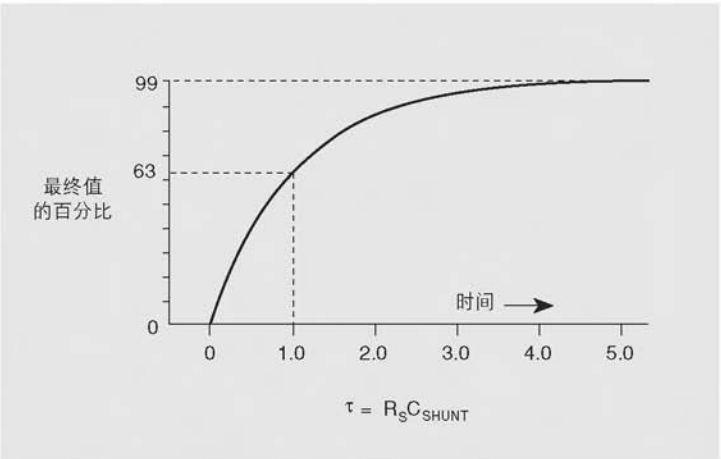


图2-36：由并联电容和源电阻构成的时间常数确定的指数式上升曲线



2.4.3 高欧姆值电阻器的特性

阻值为 $1G\Omega$ 或者更高的电阻器常常称为高兆欧电阻器。高电阻值使这些元件成为不寻常的器件。所以在对其进行测量时，要考虑以下几种因素：电压系数和温度系数、机械振动的影响及污染等。

广泛使用的高兆欧电阻器有两种：碳膜电阻器和金属氧化物电阻器。与普通电阻器相比，碳膜高兆欧电阻器噪声大、不稳定、温度系数高、电压系数大、并且非常脆。金属氧化物型电阻器近年来的发展使其

电压系数大为降低,温度系数和时间稳定性也得到改进。现代的器件可以达到电压系数小于5ppm/V,经过5年的测试以后没有明显的漂移。100M Ω 的温度系数在0.01%/°C,100G Ω 的温度系数在0.025%/°C。

处理这类电阻器要特别小心。由于机械振动引起导电材料的微粒移动,可能会大大改变电阻的数值。不要触摸电阻元件或其玻璃外壳也是非常重要的。这样做以后,由于产生了新的电流通路或者产生了小的电化学产生电流,从而可能会改变其电阻值。

电阻器经过表面涂敷,以避免在其表面形成水膜。所以,如果由于不当的处理或空气污染物的沉积而在其表面形成薄膜,则应使用浸了甲醇的泡沫签来清洗。清洗之后,应当使电阻器在低湿度的空气中干燥几个小时,以便使静电消散。

2.5 电荷测量

电荷是电流对时间的积分, $q = \int i dt$ 。电荷常常用一个表面上的带电粒子数,或一个元件(如电容器)上的粒子数来度量。有的时候,电荷按照连续的概念来测量,例如第2.3.8节讨论的用库仑计来测量非常弱的电流的情况。

静电计是一个理想的库仑计,因为它具有非常低的输入偏置电流和很高的输入电阻。静电计的库仑功能用对输入电流积分的方法来测量电荷。在其输入级的反馈回路中使用了一个积分电容器。关于静电计库仑计电路的更详细的讨论请参见第1.5.3节。

2.5.1 误差源

用静电计进行电荷测量时容易受到几种误差源的影响,其中包括输入偏置电流、输入端压降、产生电流和低的源阻抗等。

输入偏置电流

静电计的输入偏置电流是很低的。然而,在低电荷的情况下,即使这样小的电流也是很大的误差因素。在长时间内,仪器将对偏置电流进行积分,其结果就形成了电荷测量中的长期漂移。典型的偏置电流是4fA,在电荷测量中这将会引起每秒4fC的电荷变化。如果偏置电流为已知,只要从实际读数中减去由偏置电流引起的电荷漂移就能对其进行补偿。然而,确定整个系统的偏置电流可能很困难。

输入端压降

就象反馈皮安计一样，反馈库仑计的输入端压降一般也是很小的 ($< 100\mu\text{V}$)。然而，如果瞬时峰值电流大于 $10\mu\text{A}$ ，输入端压降可能在瞬间超过这个电压值。根据输入的不同，在过载的条件下，输入端压降可能达到若干伏。

如果源电压至少为 10mV ，那么工作在库仑模式的典型静电计能够准确地对电流进行积分。如果源电压低得多的话，输入端压降就可能成为问题，仪器输入级的噪声会被放得很大，于是就不可能进行准确的测量。

产生电流

由输入电缆引起的产生电流和由于屏蔽不够完善引起的感应电流能够在电荷测量中引起误差，特别是在电荷量为 100pC 或更低时尤为明显。为了尽量降低产生电流，使用低噪声电缆并对所有的连接和 DUT 进行静电屏蔽。

源阻抗

源阻抗的大小能够影响反馈库仑计的噪声性能。图 2-37 示出连至源阻抗的一般反馈电路。在库仑计中反馈电路为电容器。由此图看出，库仑计的噪声增益可以按下式计算：

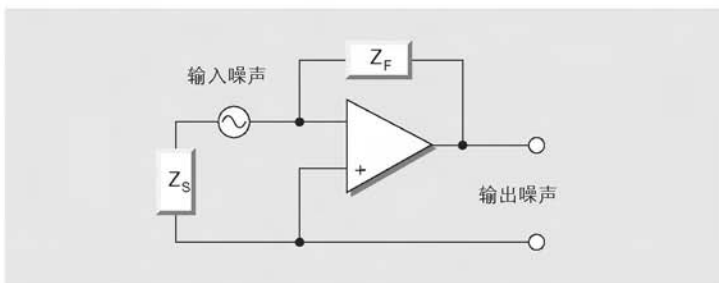
$$\text{输出噪声} = \text{输入噪声} \times (1 + Z_F / Z_S)$$

其中： Z_S 为源阻抗，

Z_F 为库仑计的反馈阻抗，

输入噪声是静电计输入级的噪声。

图2-37：一般的反馈电路



一般来说, Z_F 变大噪声增益也变大。特定仪器反馈阻抗的数值请参见该静电计的手册或技术指标。

2.5.2 零点检查

与电压测量不同, 电荷测量可能是破坏性测量, 换言之, 进行测量的过程可能会消除被测器件中储存的电荷。

在测量一个器件, 如电容器上的电荷时, 重要之点是要首先关闭静电计的零点检查功能, 然后再将电容器连到高阻抗输入端。否则, 一部分电荷就会通过零点检查阻抗损失, 而不能为静电计所测量。这是因为当零点检查功能打开时, 静电计的输入电阻大约为 $10\text{M}\Omega$ 。

打开零点检查开关将会引起电荷读数的突然变化, 称为“零跳”。为了消除零跳的影响, 在零点检查开关刚刚关闭之后读取一个读数, 然后, 将此读数从以后的所有测量读数中减去。为做到这一点, 简单的做法是, 在零点检查关闭之后打开 REL 功能, 这样就能把零跳的读数消除掉。

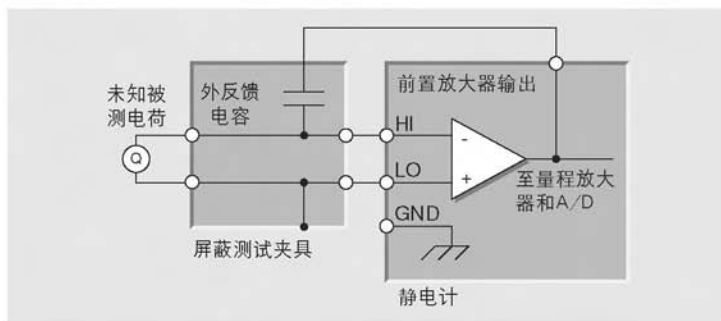
2.5.3 扩展静电计的电荷测量范围

大多数静电计的电荷测量范围可以用外部反馈来扩展。外部反馈模式允许使用外部器件来作静电计的反馈元件。将静电计置于电压模式, 然后打开外部反馈, 就把反馈电路从内部网络切换到连在前置放大器输出端的外部反馈网络上。

为了扩展库仑测量范围, 使用外部电容器作为反馈元件。

如图2-38所示, 外部反馈电容器连在前置放大器输出端和静电计的HI输入端之间。为避免静电干扰, 该电容器应放在一个屏蔽的测试夹具内。

图2-38: 使用外反馈电容器的连接方法



在外部反馈模式下，静电计显示反馈元件上的电压。未知电荷可以由下式计算：

$$Q = CV$$

其中：Q = 电荷（库仑）

C = 外部反馈电容器的电容（法拉）

V = 静电计上显示的电压（伏）

例如，使用10 μ F的外部反馈电容器，静电计显示的测量电压为5V，则计算出的电荷为50 μ C。

反馈元件的电容必须至少为10pF，以避免由于寄生电容和噪声增益引起的误差。

为了保证低泄漏电流和低介电吸收，反馈电容器应当由合适的介电材料（如聚苯乙烯、聚丙烯或聚四氟乙烯）制成。

有关测量方法的更详细的信息可以在静电计的操作手册中找到。

2.6 一般静电计要考虑的问题

至此，我们已经讨论了专门针对电压、电流、电阻和电荷测量所要考虑的问题。以下各段考察所有类型的静电计和SMU在测量高阻源时要考虑的问题。

2.6.1 恰当的连接

为了避免测量误差，关键之点在于将静电计、SMU或皮安计和被测装置进行适当的连接。总是要把仪表的高阻端和被测电路的最高电阻点相连。

图2-39所示为静电计和由电压源及电阻器串联组成的电流源相连接。交流供电的源通常具有很高电平的电源频率共模电压（常常有几伏）。如图2-40所示，这将会引起电流（i）流过静电计（ I_M ）的低端到地的电容。此电路连接恰当，该电流不流过静电计的测量电路，所以不产生任何测量误差。然而，如果静电计的HI端连到电源的低阻端，则该交流电流（i）就流过静电计（ I_M ），如图2-41所示。此电流就可能影响测量的准确度，在低信号电平时尤为显著。

图2-39：将安培计的HI端连接到高阻端

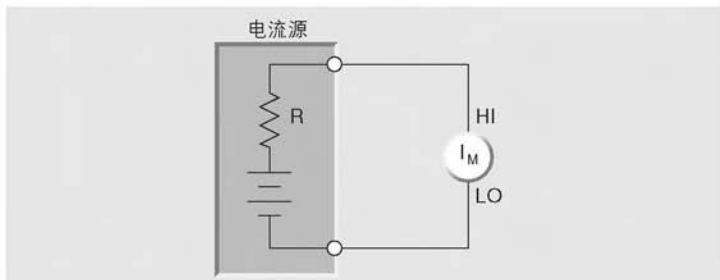


图2-40：恰当的连接

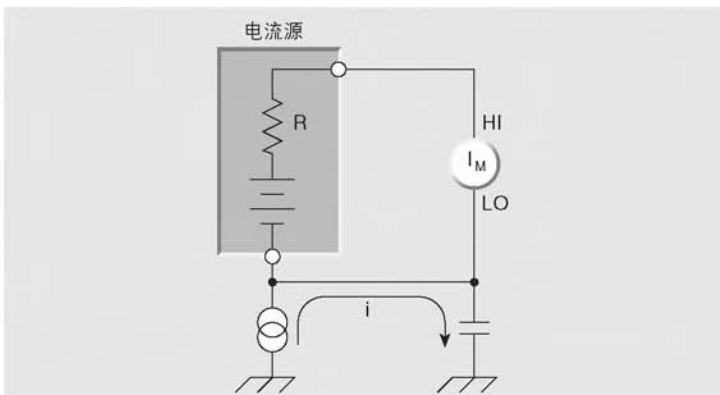
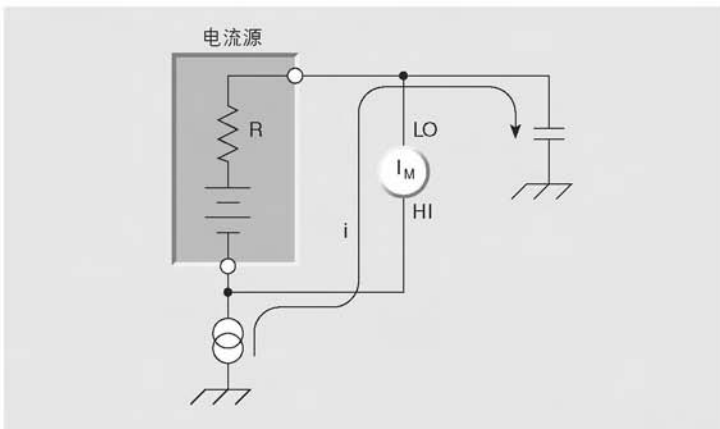


图2-41：不恰当的连接



有关静电计测量时恰当的电缆和连接器类型的详细情况，请见第2.6.6节。

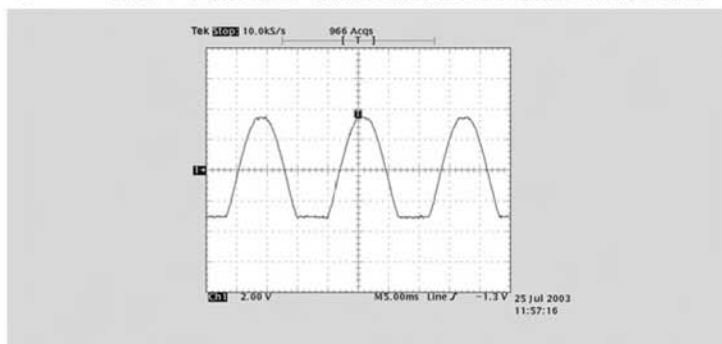
2.6.2 静电干扰和屏蔽

带电物体接近被测电路的输入端时,就会发生静电耦合和干扰。在低阻抗之下,由于电荷迅速消散,所以干扰的影响不明显。然而,高阻材料不允许电荷迅速衰减,就可能产生不稳定的测量结果。由于错误的读数可能由直流或交流静电场引起,所以静电屏蔽有助于尽量降低这种电场的影响。

直流电场可能产生有噪声的读数或无法探测的误差。实验电路附近的运动(例如,操作仪器人员的运动或者在临近区域里的其它运动等)引起静电计显示读数发生波动,就反映出这种场的存在。为了迅速检查干扰的存在,在电路附近放置一个带电的塑料物体,如梳子等。仪表的读数发生大的变化就说明屏蔽不够完善。

交流电场同样会产生麻烦。交流电场常常由供电电源和 RF 场引起。如果输入端的交流电压很大,其一部分信号被整流,于是在被测的直流信号中产生了误差。用示波器观察静电计或皮安计的模拟输出,可以对此进行检查。限幅的波形表明需要改进静电屏蔽。图 2-42 示出在静电计的 2V 模拟输出端观察到的限幅波形。在这个例子中,限幅作用使直流读数降低大约 50%。

图 2-42: 在静电计模拟输出端观察到的由交流干扰引起的限幅波形



对于 SMU 来说,在其保护端和公共端之间连接示波器就可以观察交流干扰情况。

图 2-43 示出一个交流静电耦合的例子。在导体(例如电缆或印制电路板上的线)附近的静电电压源会产生正比于电荷变化率和耦合电容变化率的电流。该电流可以按下式来计算:

$$i = C \, dv / dt + V \, dC / dt$$

例如，两个面积为1厘米²，在空气中相距1厘米的导体，具有大约0.1pF的电容。若两个导体之间的电压差为100V，由于振动引起该电容的变化为0.01pF/秒（10%的电容变化量），这时就能产生1pA的交流电流。

为了降低电场的影响，可以制作屏蔽将被测电路包围起来。最容易制作的屏蔽形式为包围被测电路的简单的金属盒子或金属网。屏蔽盒也可以在市场上买到。

图2-43：静电耦合

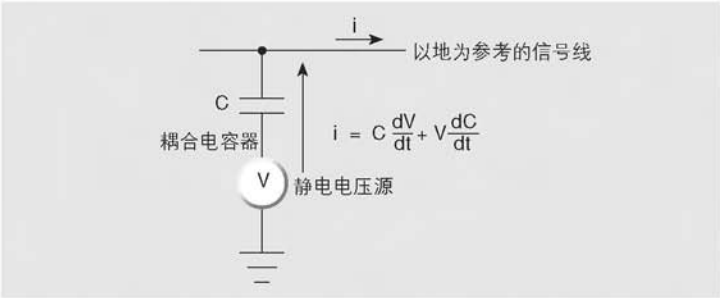
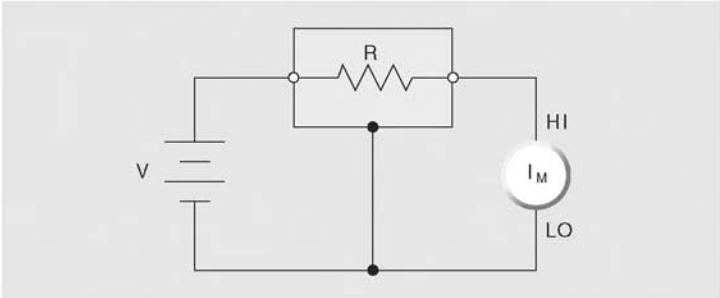


图2-44是一个屏蔽的例子。用导电材料制成的屏蔽总是连到静电计或皮安计的低阻抗输入端，或者连到SMU的LO输出端（或公共端）。如果电路LO端对地浮空，则应采取特别的安全措施，避免人员触及该屏蔽。这些安全措施将在第2.6.8节讨论。

仪表HI端和被测装置之间的电缆也需要屏蔽。用连接到LO端的金属屏蔽将信号导体包围起来，可以大大降低静电噪声源和信号导体或电缆之间的电容耦合，如图2-45所示。有了这种屏蔽，由静电电压源和耦合电容产生的噪声电流就经过屏蔽流到地，而不再流过信号线。

图2-44：屏蔽高阻器件



总的说来,遵守下列指导原则能够尽量降低静电耦合产生的电流

- * 使所有带电物体(包括人员)和导体远离测试电路的敏感区域。

- * 在测试区域附近避免运动和振动。

- * 当测量电流小于 1nA 时,将被测装置用金属闭合物包围屏蔽起来,并将该闭合物连到测试电路的公共端。

屏蔽和保护

屏蔽通常意味着使用金属的闭合物来避免静电干扰影响高阻抗电路。而保护意味着使用保持在与高阻抗电路相同电位的附加的低阻抗导体来阻止可能的干扰电压或电流。保护措施不一定提供屏蔽。有关电压表、安培计和欧姆计的保护技术将在第 2.2.1、2.3.2 和 2.4.2 节进一步介绍。

2.6.3 环境因素

稳定的测试环境是进行准确的低电平测量的基本条件。本节阐述可能影响低电平测量准确度的重要环境因素。

温度和温度稳定性

温度变化能在几个方面影响低电平测量工作,包括:引起绝缘体的热膨胀或收缩,产生噪声电流等。此外,温度上升还会引起仪表偏置电流的增加。一般规律是温度每上升 10°C , JFET 门极泄漏电流增加一倍。但是大多数静电计都进行了温度补偿,在很宽的温度范围内尽量降低了输入电流的变化。

为了尽量减小温度变化引起的误差,应当使整个系统在温度稳定的环境中工作。让灵敏的仪器远离热的位置(例如机架的顶部),并在进行测量之前使整个系统达到热稳定状态。系统达到热稳定状态之后,使用调零或零点抑制功能消除偏置量。每当环境温度变化时,都要重复消零操作。为了确保最佳的准确度,应当在要进行测量的量程上进行消零操作。

湿度

过高的湿度会降低印制电路板和测试连接绝缘子的绝缘电阻。当然,绝缘电阻的降低会严重影响高阻抗测量工作。此外,湿度或湿气还能够与存在的污染物结合起来,产生电化学反应,并产生偏置电流。

为了尽量降低湿气的影晌,应当降低工作环境中的湿度(理想情况为 $<50\%$)。确保测试系统中的所有元件和连接器清洁、无污染。进行清洁处理的时候,只使用纯净的溶剂来溶解油脂和它的污染物,

然后用新的甲醇或去离子水冲洗清洁过的区域。使清洁过的区域干燥几个小时后再使用。

光

某些元件，如二极管、三极管等都是很好的光探测器。所以这些元件都必须在闭光的环境中测试。为了确保测量的准确度，应当检查测试夹具的门、门铰链、管道进口点、连接器和连接器面板等处是否漏光。

电离干扰

极低电平 ($<100\text{fA}$) 的电流测量可能会受到诸如阿尔法粒子源等的电离干扰的影响。一个单个的阿尔法粒子能够产生每厘米 30000 到 70000 个正、负离子的踪迹，这些粒子可能受到周围电场的作用而极化或运动。另外，撞击电流敏感节点的粒子能够产生大约每个粒子 10fC 的“电荷跳变”。

有几种办法可以尽量降低测试系统中电离干扰引起的噪声。首先，尽量减少灵敏输入节点周围屏蔽装置内的空气体积。而且，要使灵敏的节点远离高强度电场。

RFI (射频干扰)

来自射频源的干扰能够影响各种灵敏的静电计的测量工作。这种类型的干扰表现为读数的突然变化而无明显的理由。

输入电路中的非线性器件或结能够将 RF 能量整流，并引起很大的误差。这类射频干扰源可能是附近的发射机、接触器、电磁阀门、甚至蜂窝电话和便携式对讲机。

一旦确定了干扰源，可以使用屏蔽和在适当的地点增加缓冲电路网络或滤波器等措施来降低或消除射频干扰。有关射频干扰的进一步讨论请参见第 3.2.1 节。

2.6.4 速度问题的考虑

时间和频率的关系

虽然本书的重点是直流测量，但是要分析噪声和仪器响应速度的问题，就需要简单地讨论一下电子电路中时间和频率的关系。

理解稳态直流信号加到电压表上的情况在概念上没有什么困难。然而，如果该信号具有时变的分量，例如在直流信号上叠加了交流信号，仪表就将跟随该变化的信号，并表示出该输入信号的瞬时幅度。当交流分量的频率增加时，直流仪表的响应就会变得不够快，直到在某一频率时，仪表只能显示出输入电压的平均值。电压表对交流信号的响应降低

到70%时的频率常常称为“3dB点”(f_{3dB})。数字多用表的带宽粗略地为其显示读数的变换速率(每秒钟的读数次数)的一半。除了将数字量重新变换为模拟信号的情况,仪表模拟输出的带宽一般要宽得多。

带宽说明了仪器在某一频率范围内响应时变信号的能力。仪器响应速度的另一种度量方法是其响应阶跃函数信号的能力。这种响应的典型度量是仪器的上升时间。带宽或上升时间可以用来说明仪器对时变信号的响应情况。

模拟仪器(或模拟输出)的上升时间一般定义为输入信号从零立即上升到某一固定值时,输出信号从最终值的10%上升到90%所需要的时间。此关系示于图2-46。图2-46a示出假定上升时间为零的阶跃函数,而图2-46b示出仪器的响应及相应的上升时间。单极点系统(1阶系统)的上升时间、频率响应和RC常数是有关联的。3dB点由下式给出:

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC}$$

上升时间(t_r)与RC时间常数的关系如下:

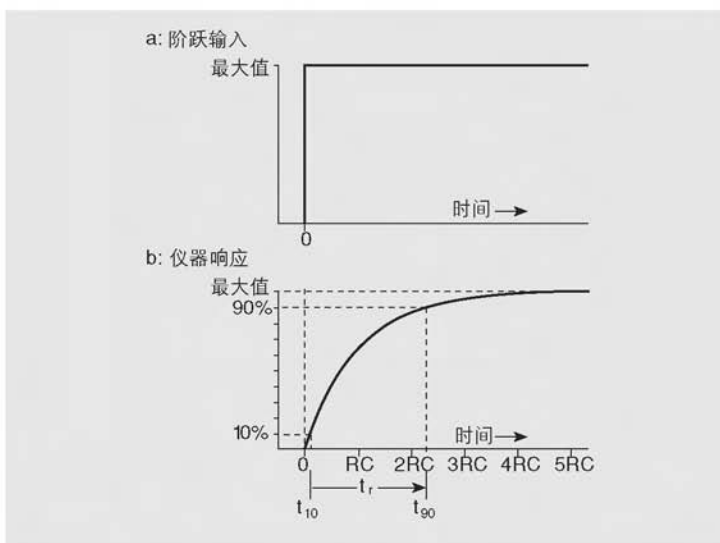
$$t_r = t_{90} - t_{10}$$

其中: $t_{90} = 2.3RC$

$$t_{10} = 0.1RC$$

所以, $t_r = 2.2RC$

图2-46: 仪器对阶跃输入的响应



例如，源电阻为 $1\text{T}\Omega$ 、电容为 100pF 的电路的上升时间大约为：

$$t_r = (2.2) (10^{12}) (100 \times 10^{-12}) = 220 \text{ 秒}$$

使用上述 RC 和 f3dB 的关系，可以看到：

$$t_r = \frac{2.2}{2\pi f_{3\text{dB}}}, \text{ 或者 } t_r = \frac{0.35}{f_{3\text{dB}}}$$

因此， $1\text{T}\Omega$ 的源电阻和 100pF 的电容将带宽限制在：

$$f_{3\text{dB}} = \frac{0.35}{t_r} = \frac{0.35}{220} = 0.0016\text{Hz}$$

当上升时间和测量周期的数量级相同时，就会影响测量的准确度。如果获取读数前允许的时间等于上升时间，将会产生大约10%的误差，因为信号只能上升到其最终值的90%。为了降低误差，必须等待更长的时间。为使误差降低到1%，必须等待大约两倍的上升时间。而为了使误差降低到0.1%，则必须等待大约三倍的上升时间（或者接近7倍时间常数的时间）。

在要求的误差优于0.1%（有的时候是1%）的情况下，二极点效应开始起作用。例如，由于绝缘体的介电吸收和它的二阶效应，为了达到最终值的0.01%，一般需要4倍以上上升时间的时间长度。

总的来说，由于频率响应和上升时间直接有关，模拟仪器（或者大多数数字仪器的模拟输出）对于变化的输入信号的响应是其带宽的函数。为了确保准确的测量结果，在加入输入信号之后，必须允许足够的建立时间，以便使源、仪器的连接以及仪器本身建立到其稳定的状态。

输入电容对上升时间和噪声的影响

电压测量

在对高阻抗源进行电压测量时（图2-47），电压表（ V_M ）两端的电容（ C_{IN} ）必须通过 R_S 充电。输出电压对时间的函数关系为：

$$V_M = V_S (1 - e^{-t/R_S C_{IN}})$$

其中： V_M = 在 t 秒时电压表的读数

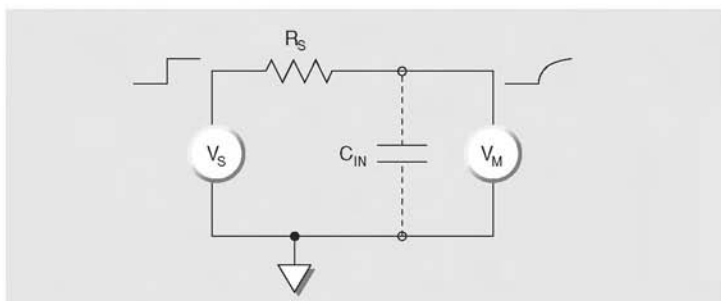
V_S = 阶跃函数电压源

t = 阶跃发生后的时间秒数

R_s = 以欧姆为单位的等效串联电阻

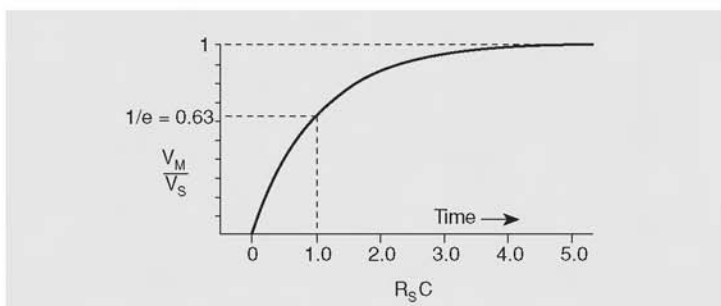
C_{IN} = 以法拉为单位的等效并联电容(仪器的电容加电缆的电容)

图2-47：并联电容对高阻电压测量的影响



这样就得到了图2-48所示的熟悉的指数曲线。要获得准确的读数就必须等待4到5倍时间常数的时间。在大数值电阻和电容的情况下，上升时间可能达到数分钟。加大并联电容虽然增加了上升时间，但是由于降低了电压表的有效带宽，所以就滤掉了由源和互连电缆产生的噪声。

图2-48：对阶跃输入的指数响应曲线



分流电流测量

使用分流型安培计(图2-49)时,输入电容对电流测量的影响与电压测量时类似。分流型安培计可以看成是在其输入端跨接了电阻器的电压表。电路表明,输入电容(C_{IN})必须以时间常数 $R_s C_{IN}$ 的指数速率,充电到 $I_s R_s$ 伏。注意, C_{IN} 是源、连接电缆和仪表电容之和。

反馈电流测量

输入电容对采用负反馈的电流表的影响与其对分流型安培计的影响不同。这种模式的电路示于图 2-50。

图2-49：分流式安培计

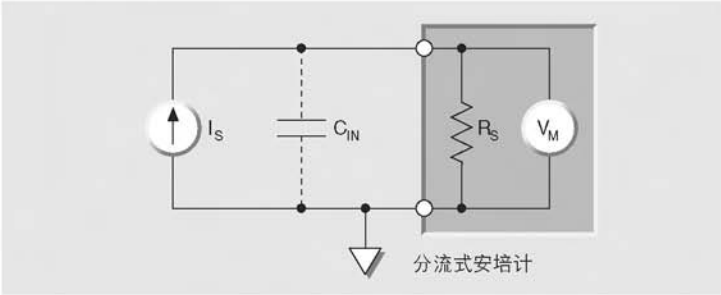
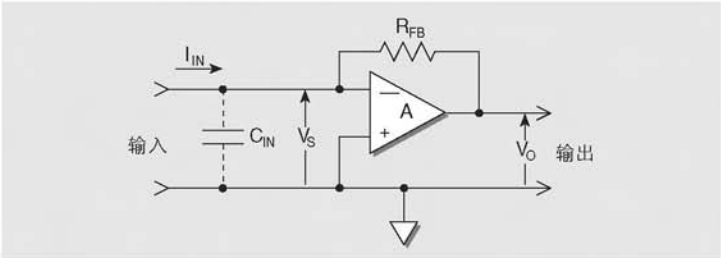


图2-50：反馈静电计安培计



如果放大器的增益 A 很大，则 $V_o = -I_{IN}R_{FB}$ 。在这种情况下， C_{IN} 不会对 R_{FB} 分流。其影响与分流皮安计的情况相比是很小的。速度提高的原因是由于负反馈的作用使皮安计的输入阻抗降低。换言之，在 C_{IN} 上产生的电压只有 $V_s = -V_o/A$ 伏，而分流皮安计时此电压却为 V_o 。所以，即使并联在输入端的电容很大，其对上升时间的影响也很小。

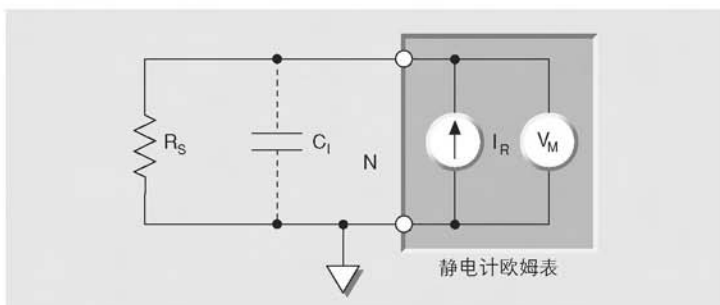
反馈型皮安计的上升时间是反馈电阻 (R_{FB}) 上并联的物理电容或寄生电容的函数。静电计、SMU 和皮安计等都可以使用比较大的源电容数值。应当认识到增大输入并联电容 (包括源、电缆和输入电容等的并联效果) 的数值将会使测量的信号-噪声比降低。关于噪声和源阻抗的更多的信息请参见第 2.3.2 和 4.3.1 节。

电阻测量（恒流法）

输入电容也会以同样的方式影响电阻测量 (图 2-51)。这时， C_{IN} 也

必须由电流 (I_R) 充电, 因此也适用同样的公式。(关于恒流法的更多的信息请参见第 2.4.2 节。)

图2-51: 恒流法测量电阻



静电计上升时间小结

对于大多数高阻源的测量来说, 考虑上升时间的时候, 需要尽量减小仪表输入端并联的电容。前面提到, 这样做同时也降低了噪声增益。广义地说, 与仪表的反馈阻抗相比, 源阻抗应当比较大。

减小输入电容最有效的方法是用尽可能短的屏蔽电缆将静电计、SMU或皮安计与信号源连接起来。在测量高阻源的电压或者测量高电阻的时候, 保护技术可以尽量降低输入电容的影响。因为这时用适当的电位驱动三同轴电缆的内层屏蔽或包围输入端的屏蔽盒, 从而尽量降低了有效电容, 如第 2.2.1 节所述。

2.6.5 约翰逊噪声

对测量的基本限制是源电阻中的约翰逊噪声。在任何电阻中, 热能都会产生带电粒子的运动。这种电荷的运动产生了噪声, 通常称为约翰逊噪声或热噪声。带电粒子运动的功率为:

$$P = 4kTB$$

其中: k = 波尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

T = 绝对温度, 单位为 K

B = 噪声带宽, 单位为 Hz

金属导体接近此理论的噪声极限, 而其它材料产生的噪声则更高一些。电阻器 (R) 上产生的约翰逊噪声电压 (E) 为:

$E = \sqrt{4kTRB}$ 伏，有效值

而电阻器 (R) 上产生的约翰逊噪声电流 (I) 为：

$$I = \frac{\sqrt{4kTRB}}{R} \text{ 安培，有效值}$$

统计分析表明，在99%以上的时间内噪声的峰-峰值都在5倍的噪声的有效值范围内。所以通常将有效值噪声电平乘以5变成峰-峰值噪声。在室温下 (300K)，上述公式变为：

$$E_{p-p} = 6.4 \times 10^{-10} \sqrt{RB}$$

$$I_{p-p} = 6.4 \times 10^{-10} \sqrt{\frac{B}{R}}$$

所有真实的电压源和电流源都具有内阻，所以它们都表现出约翰逊噪声。图2-52示出在室温下，对于不同的带宽（或上升时间），约翰逊噪声电压与源电阻的关系。

对于电流测量来说，图2-53示出在不同带宽下，不同电阻产生的电流噪声。注意，当电阻增加时，电流噪声减小，而电压噪声增大。

约翰逊噪声给出了可以达到的电压或电流测量分辨率的理论极限值。上述公式给出了降低约翰逊噪声的几种方法，即可以减小带宽、降低源的温度或者降低源电阻。

带宽

约翰逊噪声在很宽的频率范围内呈均匀分布，所以减小噪声带宽能够有效地降低测量中的噪声。注意，噪声带宽不必与信号带宽相同。高频噪声介质频率点大约等于以下各数值中的最小者：

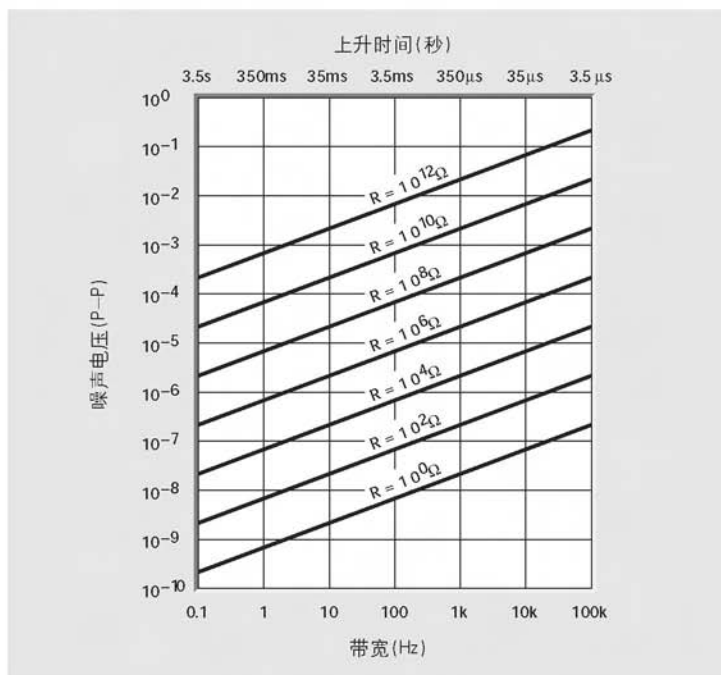
* $\pi/2$ 乘以模拟直流测量电路的 3dB 频率上限值。

* $0.35/t_r$ ，其中， t_r 为仪器的 10% 到 90% 上升时间。

* 1Hz，如果使用模拟面板表来读数则使用此值。

* $0.314/t_{INT}$ ，其中， t_{INT} 为数字仪器中 A/D 变换器的积分时间。

图2-52：在不同源电阻下噪声电压与带宽的关系

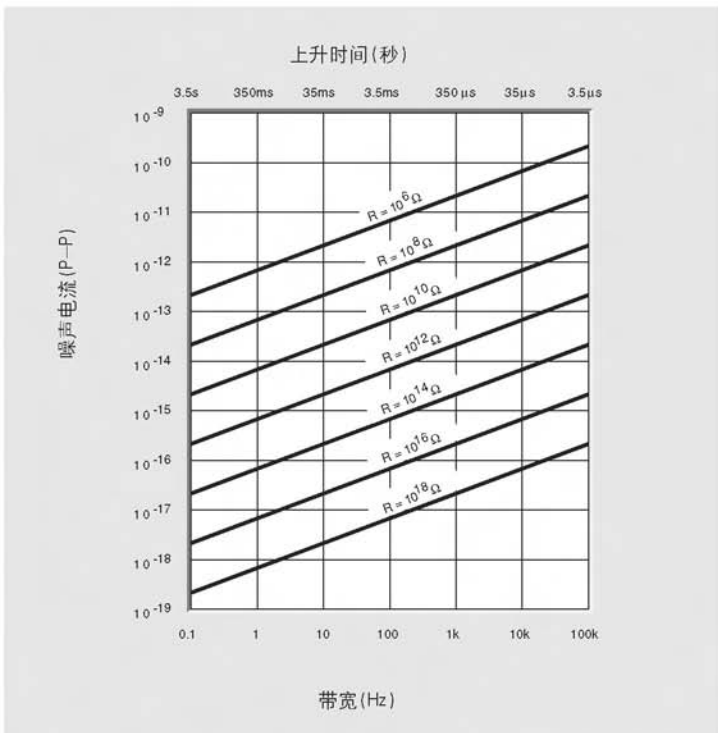


在高阻电路中，噪声带宽常常受到源电阻和输入电容的时间常数的限制。这个数值为上述各种噪声带宽计算结果中的最小者。在这种情况下，噪声带宽为：

$$\begin{aligned}
 B_{\text{NOISE}} &= \frac{\pi}{2} (f_{3\text{dB}}) \\
 &= \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{2\pi R_{\text{EFFECTIVE}} C_{\text{IN}}} \right) \\
 &= \frac{1}{4R_{\text{EFFECTIVE}} C_{\text{IN}}}
 \end{aligned}$$

其中， $R_{\text{EFFECTIVE}}$ 为源电阻与测量设备输入电阻的并联， C_{IN} 为与仪器输入端并联的所有电容（输入电容、电缆电容等）之和。注意，此分析假定，该电路为具有一个主导时间常数的简单一阶系统。

图2-53：在不同源电阻下噪声电流与带宽的关系



为了降低噪声，可以采用在很长的时间内用目测平均模拟仪表读数的方法，或者用计算机或内部数字滤波器平均多个数字读数的方法，来减小带宽(B)。在读出设备之前采用低通滤波器也可以减小带宽。减小带宽时有一个实际的限制，如果测量时间太长，测量就容易受到时间和温度漂移等其它误差的影响。

温度

将信号源的温度从室温降低到-270℃ (3K)，可以将噪声电压降低10倍。同样，将信号源的温度从室温降低到液氮的温度 (77K)，可以将噪声电压降低一半。在某些应用中，不方便的、昂贵的低温工作要求是正当的、可行的。但是，大多数的实验则是设计工作在一定的温度范围之内，这也决定了可以预期的源噪声水平。

源电阻

讨论了带宽和温度以后，决定系统噪声的另一个因素就是等效源

电阻。等效源电阻包括被测设备和测量仪器两个方面。为了降低噪声，改变源电阻通常是不实际的。然而，如果可以改变源电阻的话，公式表明，要降低电压噪声应当减小 R ，而要降低电流噪声应当加大 R 。

在电压测量中，电压源的电阻是与电压表的输入电阻并联的（见图2-1）。输入电阻通常要比源电阻大很多。所以源电阻的数值通常决定了约翰逊噪声电压的大小。

在电流测量中，源电阻和取样电路电阻都会产生噪声。有效电阻为源电阻和反馈（或分流）取样电阻的并联组合。反馈安培计反馈回路中的取样电阻阻值高，其约翰逊电流噪声就比较低，从而比分流电阻值低的安培计的灵敏度更高。

过量电流噪声

电阻器的约翰逊噪声只与电阻值、温度和带宽有关。当电流流过电阻器时，其噪声比计算出的约翰逊噪声还要高。这种增加的噪声常常称为“过量电流噪声（Excess Current Noise）”。线绕电阻器接近理想情况，其增加的噪声可以忽略。而金属膜电阻器的噪声就要大一些，碳合成电阻器的噪声则会更大。在所有这些情况下，此过量电流噪声都直接正比于流过电阻器的电流。

2.6.6 电缆、接头与夹具

在进行低电平测量时，仪器的准确度虽然很重要，设备连接的整体性也同样重要。从连接器，经过电缆，再进入测试夹具的整个信号通道中，被测信号的损失都必须尽可能地低。以下各段将讨论在进行低电平测量时对电缆和测试夹具的要求以及常用的连接器类型。

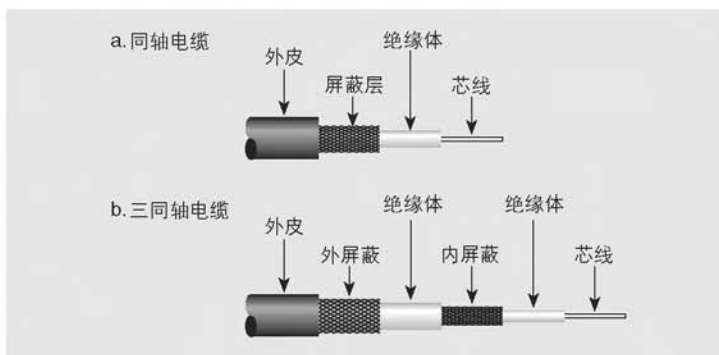
电缆要求

虽然数字多用表常常使用无屏蔽的测试引线，但是这种连接方式在使用皮安计、静电计和SMU等进行低电平测量时一般是不合适的。这些仪器通常使用同轴电缆或三同轴电缆。

同轴电缆由屏蔽包围的单芯导体组成（图2-54a），而三同轴电缆在第一层屏蔽之外又加入了第二层屏蔽（图2-54b）。使用三同轴电缆时，为了减少电缆泄漏并尽量降低电路的上升时间，可以将内层屏蔽驱动到保护电位。外层屏蔽通常连到机箱地，有的时候连到公共端。在这两种情况下，考虑到安全因素，外层屏蔽的电位不得比机箱地高出30V有效

值 (42.4V 峰值)。一定要使用编织紧密的屏蔽以避免静电干扰。

图2-54：同轴与三同轴电缆



同轴电缆和三同轴电缆都有低噪声的产品型号，在低电平测量中应当使用这种电缆。低噪声电缆的内部有石墨涂敷层，以尽量降低由摩擦电效应产生的电流（见第 2.3.4 节）。虽然普通同轴电缆的泄漏和噪声电流比低噪声电缆要高，但是在某些情况下，普通的同轴电缆，如 RG-58 可能还是适用的。

在测量高电阻时，电缆的绝缘电阻是很重要的。质量良好的三同轴电缆使用聚乙烯绝缘材料，其导体到屏蔽的典型绝缘电阻值大约为 $1\text{T}\Omega/\text{英尺}$ 。关于绝缘材料特性的详细信息请参见第 2.2.2 节。

当电缆的长度增加时，其电缆电阻、电容和泄漏电流等参数也会变化。所以重要之点是使所有的连接电缆尽可能地短。例如，电阻参数为 $1\text{T}\Omega/\text{英尺}$ 、电容参数为 $100\text{pF}/\text{英尺}$ 的电缆，当其长度为 10 英尺时，绝缘电阻为 $100\text{G}\Omega$ ，电容为 1000pF 。

连接器类型

静电计、皮安计和 SMU 的测量工作中使用两种通用类型的连接器。图 2-55 所示的 BNC 连接器是一种同轴连接器。它包括中心导体和外壳或屏蔽连接，而图 2-56 所示的三同轴连接器则包括中心导体、内屏蔽和外屏蔽。

图2-55: BNC连接器

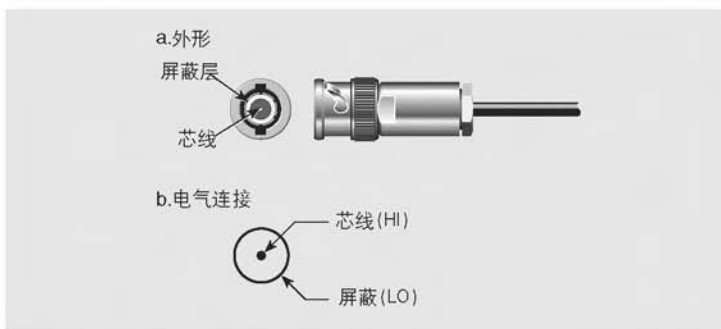
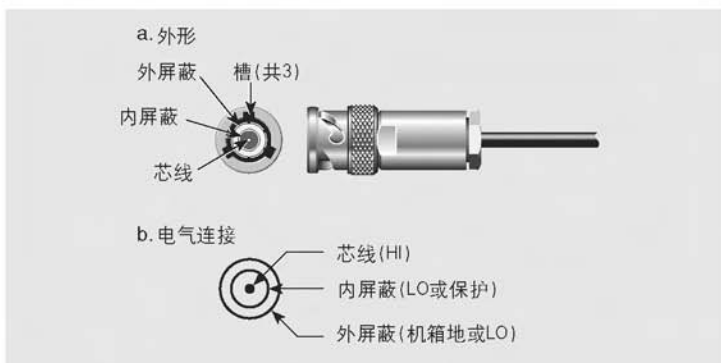


图2-56: 三槽三同轴连接器



BNC 连接器的中心导体连到输入 HI 端，而外壳连到输入 LO 端。注意，外壳可以直接在仪器上连到机箱地。

三同轴连接器的中心导体连到 HI 端。内层屏蔽连到 LO 端或保护端，而外层屏蔽通常连到机箱地。然而，对某些 SMU 来说，外层屏蔽连到 LO 端（公共端），并允许对地浮空。关于三同轴电缆和保护技术的更多的信息请见下面的讨论。

为了保持高绝缘电阻，在所有连接器的各个导体之间要使用合适的绝缘材料。为此，大多数高质量的 BNC 和三同轴连接器在导体之间都使用聚四氟乙烯来绝缘。

三同轴连接器有两槽和三槽两种结构。三槽连接器的设计是近年来出现的，其目的是避免在试图使 BNC 连接器 and 三同轴连接器配接时，引起连接器损坏。大多数新的设备都使用三槽连接器设计。此外

还有在这两种连接器之间进行变换的适配器。

三同轴电缆和保护连接

如前所述，当我们把保护电压连到同轴电缆的屏蔽时，如果该保护电压大于 30V 有效值，就可能出现安全风险。三同轴电缆用连至大地或 LO 端的外层屏蔽将保护屏蔽包围起来，从而避免了这种危险。

当静电计按无保护方式工作时，三同轴电缆的连接方法一般如下：

- * 中心导体：高阻抗引线 (HI)

- * 内层屏蔽：低阻抗引线 (LO)

- * 外层屏蔽：地 (GND)

这种电缆提供了安全载荷两个信号的能力，两个信号都不在地电位。将两个引线屏蔽起来，并在每个导体与地之间都保持高电阻，从而保持了高阻抗的完整性。

当静电计工作在保护模式之下或者使用 SMU 时，三同轴电缆按下述方法连接：

- * 中心导体：高端 (HI)

- * 内层屏蔽：保护 (GUARD)

- * 外层屏蔽：地或者 LO 端

对静电计来说，当测量高电阻或测量高阻源的电压时，保护连接是有用的。在测量弱电流时，由于静电计的反馈安培计电路中的保护端总是 LO 端，所以不需要连接保护端。比较新的静电计具有一个内部开关，能够在保护连接和无保护连接之间转换。

在使用 SMU 测量弱电流时，保护端用来降低电缆和测试夹具的泄漏电流。

测试夹具的要求

对于用于低电平测量的测试夹具有几个重要的要求：

- * 绝缘电阻：所有连接器、内部连线、端子和插座等的绝缘电阻都应当尽可能地高。一般地说，在高质量的测试夹具中，所有的连接器和插座都使用聚四氟乙烯绝缘材料。

* 屏蔽和保护: 测试夹具应当对敏感的电路进行适当的屏蔽。在高阻抗测量时, 应当采取措施将保护在离DUT尽可能近的地方连到测试夹具。

* 光: 在测量光敏元件时, 需要使用闭光的测试夹具。

* 特殊的测试夹具要求: 一些特殊的应用工作, 如高电阻或极低电流的测量, 常常需要使用绝缘特性极好的测试夹具。只有使用特殊的材料, 如蓝宝石才可能达到这种要求。

2.6.7 模拟输出

有些静电计具有两个模拟输出: 一个为2V的模拟输出, 另一个为前置放大器, 或单位增益输出。2V模拟输出用于连接记录仪, 而前置放大器用于缓冲、保护和外部反馈。本节讨论这些输出以及使用这些输出时可能出现的负载误差。关于使用带有浮动输入的模拟输出的详细情况, 请见2.6.8节。

2V 模拟输出

满度输入信号的典型模拟输出为2V。依据仪器设计与功能的不同, 该输出可能是反向的或同向的。输出电阻在 1Ω 到 $10k\Omega$ 的范围。连到此输出端的任何设备, 如波形记录仪或示波器都具有有限的输入电阻, 并会使模拟输出有所衰减。详细情况请参见“负载误差”一节。

前置放大器输出

前置放大器输出跟踪加到静电计输入端的信号幅度。前置放大器输出是电压和欧姆(仅限恒流法)测量功能的保护电压输出。此信号对于缓冲输入信号很有用。依据所选择的功能, 此信号可以是反向的或同向的。

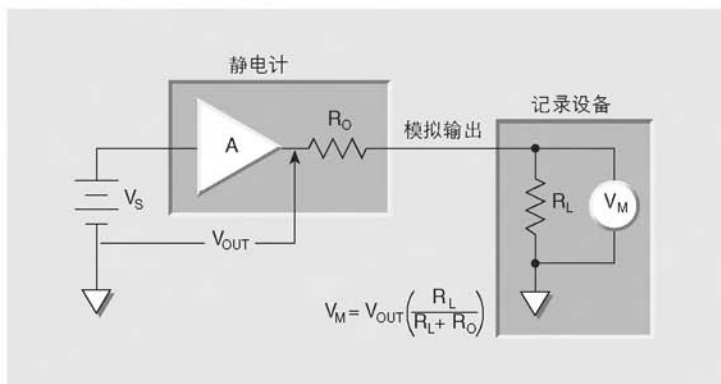
负载误差

虽然典型模拟输出的输出电阻很低, 但不是零。所以要考虑外部仪器可能的负载效应。原则上说, 模拟输出负载效应的概念和第2.2.1节讨论的源的负载效应是一样的。

图2-57说明负载如何影响模拟输出的准确度。被测电压(V_s)加到静电计的输入端。该信号经过输出电阻为 R_0 的放大器(A)放大, 然后接到记录设备上。记录设备的输入电阻(R_L)和模拟输出电阻(R_0)形成一个分压器, 并使输出信号衰减。在典型模拟输出电阻为 $1k\Omega$ 时, 记录设备的输入电阻至少必须为 $1M\Omega$ 才能使负载引起的误差小于0.1%。

此误差可以用图 2-57 中所示的公式计算。

图2-57：模拟输出的负载效应

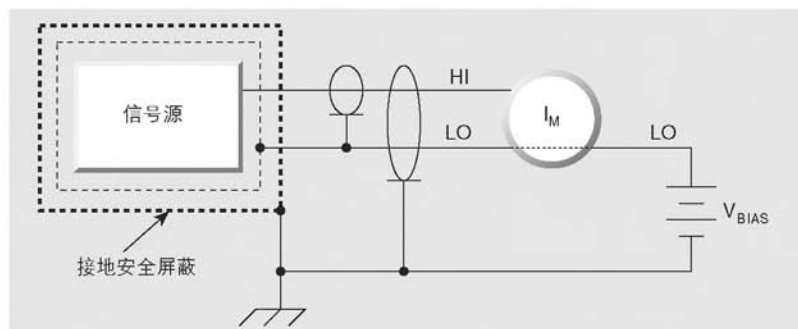


2.6.8 浮地输入

大多数静电计或皮安计应用所涉及的输入信号都是以大地为参考点的。然而，在有的应用中则需要使静电计或皮安计偏离地电位。这种应用的例子包括气相色谱中的火焰电离探测器和质谱仪中的法拉第杯。

在典型的低电平测试设置中，需要使用屏蔽来降低噪声，如图 2-58 所示。大多数情况下，此“噪声”屏蔽连到仪表的 LO 输入端。如果必须将 LO 端相对大地偏置 30V 以上时，该噪声屏蔽就处在危险的电压并可能产生电击的危险。为了避免浮置电路的电击危险，必须再增加第二层接地的安全屏蔽将噪声屏蔽完全包围起来。

图2-58：浮地电路的安全屏蔽



大多数皮安计和静电计都使用三同轴连接器，并将外层屏蔽连到大地以保证安全。在安全屏蔽处使用三同轴连接器，在测试设备和仪

器之间使用三同轴电缆，就构成了一个完全屏蔽的、安全的系统。注意，必须遵守最大额定浮地电压的要求，以避免内导体和外层接地屏蔽之间被击穿。

对于外层屏蔽连到 LO 端的 SMU 和使用同轴输入的皮安计来说，不当使其输入端对地的浮地电压超过 30V 有效值（42V 峰值）。

2.6.9 静电计的校验

所有的测量仪器都需要定期地重新校准，通常每年一次。对于仪器的功能我们希望能够更经常地检查。本节介绍验证静电计功能的简单测试方法。

电流功能

首先，打开电源，按照维修手册中规定的时间对仪表进行预热。然后，在输入连接器上安放一个屏蔽盖，并将低阻抗输入端连到地。应当将零点检查打开。接着将仪表设到其最灵敏的电流量程，进行消零操作，然后关闭零点检查开关。几秒钟之后，仪表的读数应当稳定到几个字之内。这时指示的电流就是输入偏置电流。如果其数值超过仪器的技术指标 25% 或者更高的话，使仪器整夜通电，并重复进行测试。如果该电流仍然超过技术指标，则仪器应当进行修理。

安培计的输入端绝对不应短路，因为这样将会没有负反馈。这虽然不会造成损坏，但其结果没有意义。

伏特功能

可以用一节手电筒电池或 9V 电池对电压功能进行粗略的检查。（并确认检查双极性）

欧姆功能

可以使用任何电阻器检查欧姆功能，但是最好使用阻值尽可能高的电阻器。

库仑功能

库仑功能可以用低漏电的电容器和电压源来检查。可以用手电筒电池将 100pF 到 1000pF 的已知容量电容器充电到已知电压。将静电计设置到库仑功能并关闭零点检查开关，然后将该电容器连到静电计的输入端。反之，也可以用这种方法来确定电容器的电容数值。

第 三 章

低 源 内 阻 的 测 量

3.1 引言

低电压和低电阻的测量通常是对低源内阻的设备和材料进行的。第一章介绍了用于测量低电压和低电阻的各种仪器，而第三章则介绍如何使用这些仪器来进行精密测量，其中也包括讨论各种误差的来源以及把这些误差源对测量整体性的影响减至最小的各种方法：

3.2 低电压测量：讨论各种潜在的误差来源以及如何尽量降低它们对低电压测量的准确度的影响。这些误差来源包括偏置电压、噪声和共模电流以及反向误差。

3.3 低电阻测量：要讨论的题目包括：引线电阻、热电动势 EMF、非欧姆接触、器件的加热效应、开路测试以及电感性器件的测量。

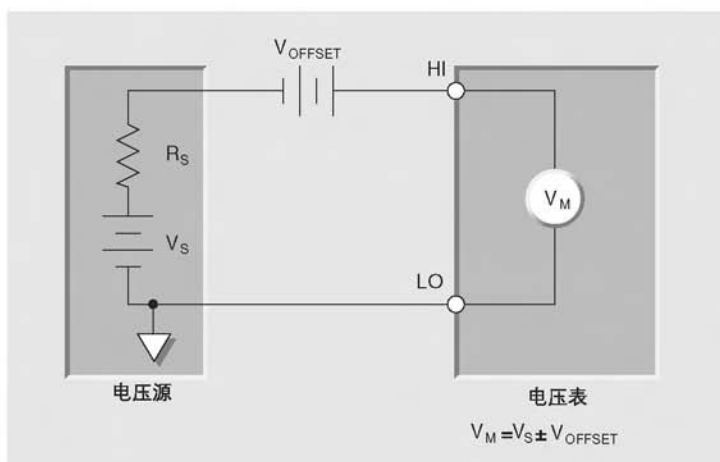
3.2 低电压的测量

在测量较高电压电平时，通常可以忽略的偏置电压和噪声源却可能在低电压测量工作中引入重大的误差。以下各段将要讨论能够影响低电压测量准确度的各种因素。

3.2.1 偏置电压

在理想的情况下，当把电压表连接到一个没有电压的、阻抗比较低的电路时，电压表的读数应当为零。然而，电路中的若干误差源可以引起非零的电压偏置量。

图3-1：偏置电压对电压测量准确度的影响



这些误差源包括热电动势、由射频干扰 (R_{FI}) 经过整流而产生的偏置量以及电压表输入电路中的偏置量。

如图 3-1 所示, 任何偏置电压 (V_{OFFSET}) 都会与源电压 (V_s) 相加或者相减, 这样电压表测量出的电压就变为:

$$V_M = V_s \pm V_{\text{OFFSET}}$$

这两个电压的相对极性决定了偏置电压是加到源电压上去还是从源电压中减去。

例如, 假设 $V_s = 5\mu\text{V}$, $V_{\text{OFFSET}} = 250\text{nV}$ 。如果这两个电压的极性相反, 那么电压表的读数就为:

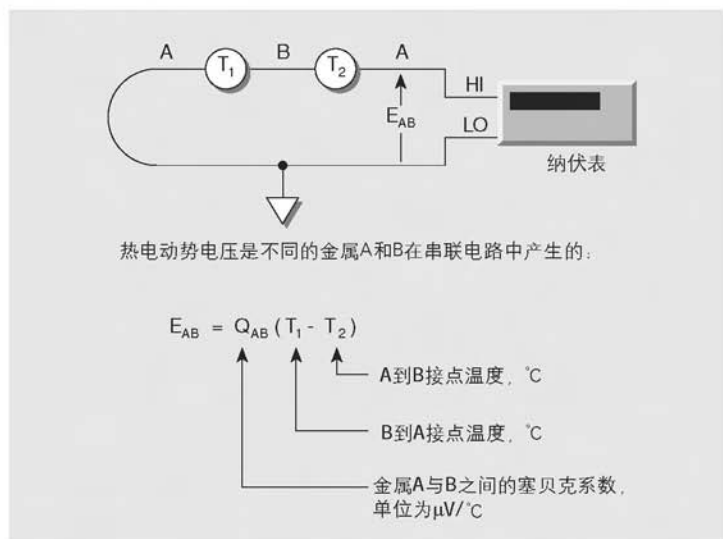
$$V_M = (5 \times 10^{-6}) - (250 \times 10^{-9})$$

$$V_M = 4.75 \times 10^{-6}$$

$$V_M = 4.75\mu\text{V} \quad (\text{误差为 } -5\%)$$

将电压表的测试引线端子短路, 然后打开仪器的消零 (REL 相对值) 功能, 通常可以消除稳定的偏置电压。但是, 请注意要想消除偏置量的漂移, 则需要经常地进行消零操作, 特别是在存在热电动势的情况下尤为如此。

图3-2: 热电动势



热电动势

热电电压（热电动势）是低电压测量中最常见的误差来源。当电路的不同部分处在不同的温度之下，或者当不同材料的导体互相接触时，通常就会产生这种热电电压，如图3-2所示。各种材料相对于铜的赛贝克（Seebeck）系数（ Q_{AB} ）列于表3-1。

表 3-1 赛贝克系数

成对的材料*	赛贝克系数 (Q_{AB})
Cu - Cu	$\leq 0.2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Ag	$0.3\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Au	$0.3\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Pb/Sn	$1\text{-}3\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Si	$400\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Kovar	$\sim 40\text{-}75\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - CuO	$\sim 1000\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

* Ag = 银 Au = 金 Cu = 铜 CuO = 氧化铜 Pb = 铅 Si = 硅 Sn = 锡

使用相同材料的导体来构建电路可以将产生的热电动势降至最低。例如，使用铜制套筒或接线片来连接铜导线，也就是形成铜 - 铜的连接，将会产生最小的热电动势。而且，连接处还必须保持清洁、没有氧化物。铜制套筒与铜压制在一起的连接（又称为“冷焊接”）不会出现氧化层，这时可达到 $\leq 0.2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 的赛贝克系数；而铜与氧化铜的连接则可能产生高达 $1\text{mV}/^\circ\text{C}$ 的赛贝克系数。

将电路中的温度梯度减至最小也可以降低热电动势。使温度梯度降至最小的一种方法是将相应的结点对放置在互相接近的地方，并与一个公共的、大的散热器实现很好的热接触。必须使用高导热系数的绝缘体，因为大多数绝缘体都不能很好地传导热量，所以必须使用硬质阳极化铝、氧化铍、特别填充的环氧树脂、蓝宝石或者金刚石等类的特殊绝缘材料来实现与散热器的接触。

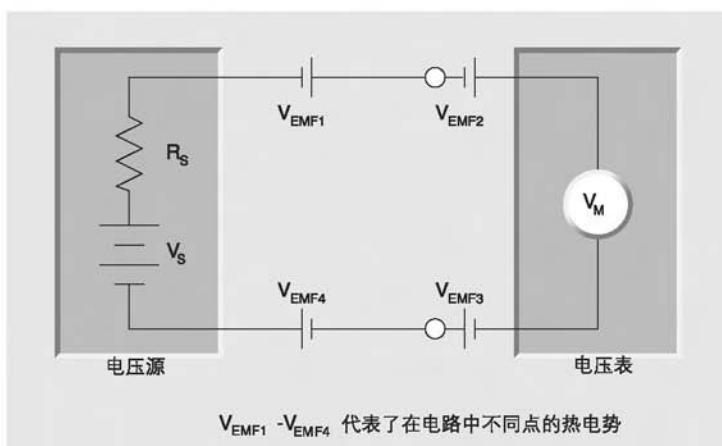
对测试设备进行预热并使其在恒定的环境温度下达到热平衡也能使热电动势效应达到最小。如果热电动势相对为恒定的话，使用仪器的消零功能也能够补偿任何剩余的热电动势。为了使环境温度保持恒定，应当使仪器设备避开阳光直射、排气扇以及其它类似的热流源或者气流。用绝缘泡沫（例如聚亚安酯）将连接点包裹起来，也能够使

由于空气流动引起的温度波动降至最小。

避免热电动势的连接方法

如图3-3所示,简单的低压电路通常由处在不同温度下的不同材料连接在一起而构成。这样就会产生若干热电动势源,所有这些热电动势源都与电压源和电压表相串联。而电压表的读数则是所有这些源的代数和。因此,不使信号源和测量仪器之间的连接电路影响测量读数是非常重要的。以下各段将介绍一些很好的电路连接方法,以便使热电动势的电压达到最小。

图3-3: 电压源到电压表的连接



如果所有的电路连接都用一种金属材料来实现,那么在测量工作中所引入的热电动势将是忽略的。然而这并非总是可以做到的。测试夹具常常采用弹簧触点的连接方法,这些触点可能由磷青铜、铍铜合金或者其它具有高赛贝克系数的材料制成。在这些情况下,很小的温度差别就可能产生相当大的热电动势,足以影响测量的准确度。

如果无法避免使用不同材料的话,则应当通过使用散热器或者将电路与热源隔离的方法,来减少测试电路内的温度梯度。

测量低温环境下的源时可能会出现一些特殊的问题,因为连接低温条件下的被测样品和电压表时常常要使用一些导热系数比铜低的金属,例如铁等。这样就会在电路中引入不同种类的金属材料。此外,由于源可能处在接近0K的温度之下,而电压表则处在300K的温度之下,

这就出现了很大的温度梯度。适当的选配低温容器和电压表之间连接导线的材料成分，并且保持所有不同金属材料结点对都处在相同的温度之下，就能够以很好的准确度来进行非常低电压的测量。

反向法来抵消热电动势

在测量小电压的时候，例如测量两个标准电池的电压差或者测量两个背对背连接的热电偶的电压差时，可以采用反向的方法来抵消寄生热电动势所产生的误差。其方法是先进行一次测量，然后小心地交换两个源的极性（如图 3-4），再进行第二次测量。这两个测量读数之差的平均值就是我们所希望的电压差。

在图 3-4 中，电压源 V_a 、 V_b 代表两个标准电池（或者两个热电偶）。在图 3-4a 中测量出的电压为：

$$V_1 = V_{emf} + V_a - V_b$$

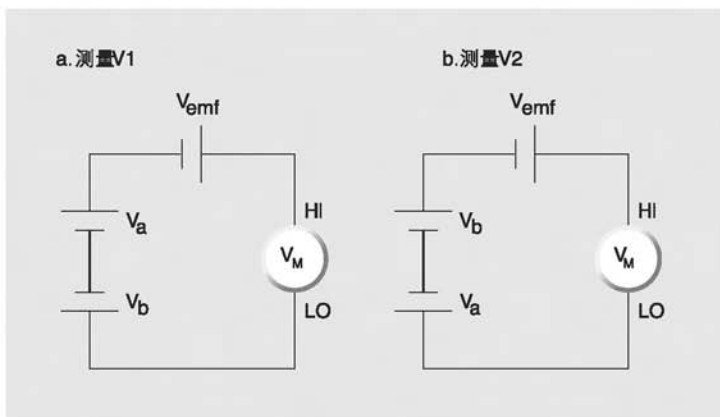
在图 3-4b 中将两个标准电池反向，测量出的电压为：

$$V_2 = V_{emf} + V_b - V_a$$

两次测量值之差的平均值为：

$$\frac{V_1 - V_2}{2} = \frac{V_{emf} + V_a - V_b - V_{emf} - V_b + V_a}{2} \quad \text{即：} V_a - V_b$$

图3-4：将源反向连接来消除热电动势

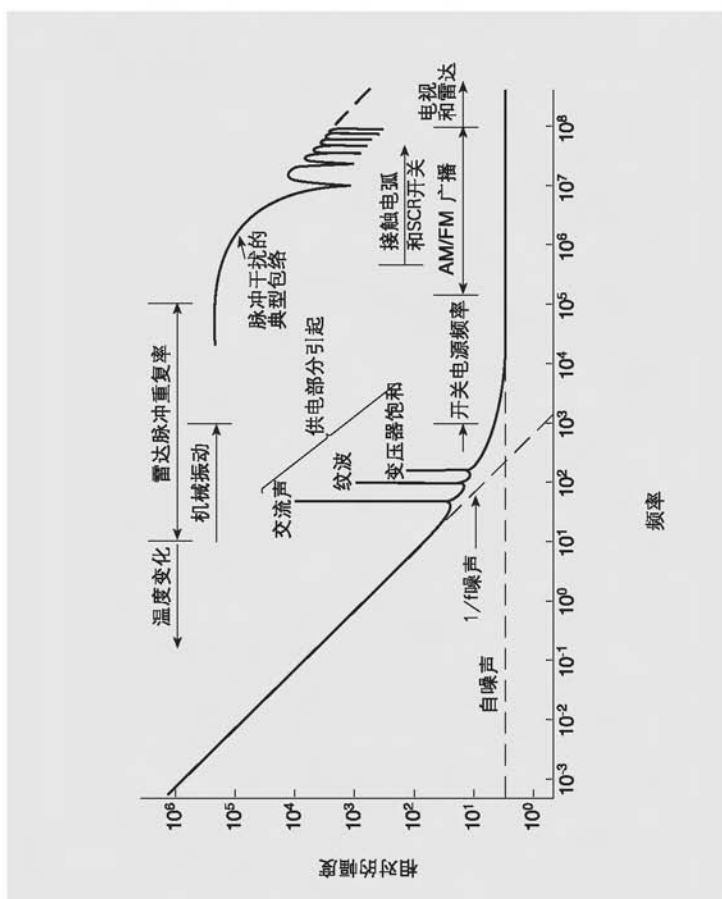


注意, 这种测量技术有效地抵消了电路中的热电动势项 (V_{emf})。这个热电动势项包括电路中所有热电动势的代数和, 但不包括 V_a 、 V_b 两个电压源之间的连接部位所产生的热电动势。如果被测电压是由电流流经一个未知电阻而产生的, 那么可以采用电流反向法或者偏置补偿欧姆法来消除热电动势的影响。这些方法在第 3.3.2 节介绍。

RFI/EMI

RFI (射频干扰) 和 EMI (电磁干扰) 是在很宽的频谱范围之内说明电磁干扰情况的通用术语。图 3-5 示出这些干扰源的一般频谱情况, 并与诸如 $1/f$ 噪声和热噪声等的噪声信号进行比较。

图3-5: 电压噪声频谱

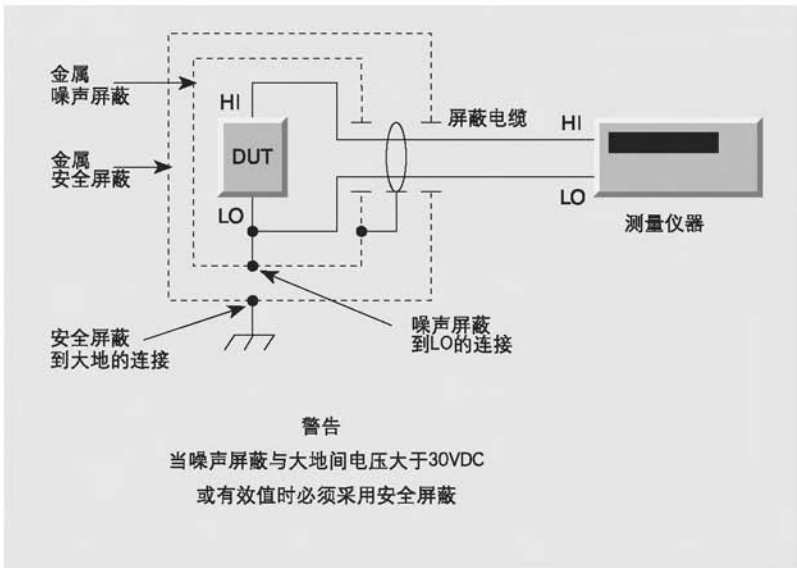


RFI 和 EMI 可能由诸如电视或无线电广播等信号源引起，也可能由脉冲信号源引起，就象高压电弧的情况那样（见图 3-5）。在这些情况下，如果出现足够强的不希望有的信号，对测量的影响是相当大的。

RFI/EMI 的干扰可能表现为稳定的读数偏置或者引起有噪声的或错误的读数。读数偏置可能由输入放大器过载或输入端的直流整流效应所引起。

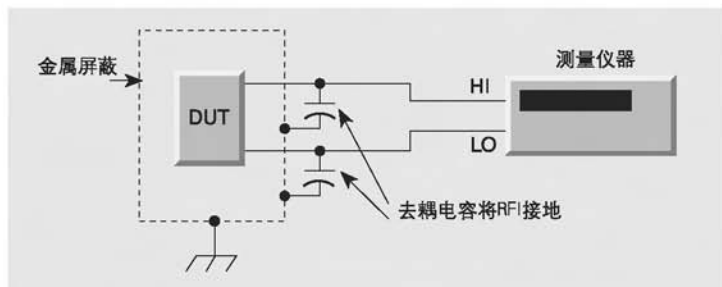
在进行高灵敏度的测量工作时，采取几种预防措施可以将 RFI 和 EMI 的影响降低到最小。最明显的预防措施是使所有的仪器、电缆和 DUT（被测设备）尽可能地远离干扰源。对测试引线和 DUT 进行屏蔽（图 3-6）常常能够将这种干扰的影响降低到可以接受的水平。噪声屏蔽应当连接到输入低端（LO）。在极端的情况下，可能需要使用一种专门建造的屏蔽室，以便对令人讨厌的干扰信号进行足够的衰减。

图3-6：采用屏蔽措施来衰减RFI/EMI干扰



如果所有的措施都不能避免RF干扰进入测试输入端，那么就可能需要设备的输入通路上进行外部滤波，如图3-7所示。在很多的情况下，简单的单极滤波器可能就足够了；而在更加困难的情况下，可能需要使用多极陷波器或者带阻滤波器。在特殊情况下，可以将多个不同数值的电容器并联，以便在很宽频率范围内提供低阻抗。然而，要记住这种滤波功能可能会带来其它有害的作用，诸如增加了测量的响应时间等。

图3-7：采用屏蔽连接降低RFI/EMI干扰



内部的偏置

当输入端没有施加电压时,纳伏表和纳伏前置放大器很少会指示零读数。这是因为在仪器的输入端不可避免地存在着电压偏置。仪器的输入端子之间用一个“短路头”连接,其输出到仪表的输入即为零,也可使用仪器前面板上的消零控制或者用计算机控制来置零。如果输入端的短路点具有很低的热电动势,用这种方法就可以验证输入噪声和零点随时间的漂移。输入端短路通常适合采用干净的、纯铜的导线来实现。然而,用这种方法得到的零点只能用于校验的目的,而不适合用在仪器的最终应用中。

如果用仪器来测量电流流过一个电阻器所产生的小电压降,那么采用下述的方法可以得到合适的零点。首先,将仪器按规定的时间进行预热,通常要预热1-2个小时。在此期间,应在被测设备和仪器之间进行连接,并不让电流流经被测的设备,以便使其温度梯度达到最小、稳定水平。接着应当进行消零操作。在有些仪器上,此项操作是通过按REL(相对)或者ZERO按键来完成的。现在仪器的读数应当为零。当施加测试电流时,仪器就会指示出产生的电压降。

在某些应用场合,被测电压总是存在的,所以不能使用上述的方法。例如,测量两个标准电池电压差的最好的方法是将仪器到标准电池的连接线反向再作一次测量,然后对两次测量的读数进行平均。在测量差动热电偶的输出时,也可以采用同样的方法来消除偏置电压。这种方法和标题为“反向法来抵消热电动势”一节中详细介绍的消除热电动势的方法是一样的,请参见图3-4。

零点漂移

零点漂移是在没有输入信号(在输入端短路时进行测量)的情况

下，电压表的读数随时间发生的变化。仪器的零点漂移几乎完全由其输入级来决定。大多数纳伏表都对输入信号进行某种形式的斩波或者调制来使仪器的零点漂移达到最小。

仪器的零点读数也会随着环境温度的变化而变化。这种效应通常称为电压偏置温度系数。

此外，仪器还可能呈现出瞬变的温度效应。在环境温度发生一个跳变之后，电压偏置的变化可能会比较大。其变化量可能会超过公布的仪器技术指标。然后该电压偏置逐渐减小，并且最终稳定到接近其原始值的数值。这是由于仪器中不同金属的结点具有不同的热时间常数所致。一个结点已经迅速地调整到新的环境温度，而另一个结点则变化较慢，这样就产生了瞬时的电压偏置变化。

要想使结点环境温度变化引起的电压偏置达到最小，应当在温度恒定的环境中进行测量工作，并对电路进行热屏蔽以使其温度变化的速度减慢。

3.2.2 噪声

噪声源能够产生很大的误差，噪声的来源包括约翰逊噪声、磁场和地回路等噪声。了解噪声源以及使其变得最小的方法对于进行有效的低电压测量是至关重要的。

约翰逊噪声

在电子测量中分辨率的最终极限是由约翰逊噪声或者热噪声来决定的。这种噪声是与在高于绝对零度的温度下由热能所引起的电子运动相关联的。所有的电压源都具有内阻，所以所有的电压源都会产生约翰逊噪声。

在290K的温度下，热噪声电压对电阻和带宽的关系示于图3-8。此噪声电压与温度、噪声带宽和源电阻有关。由金属电阻产生的噪声电压可以用下述公式来计算：

$$V = \sqrt{4KTBR}$$

其中：V = 在源电阻上产生的噪声电压有效值

k = 波尔兹曼常数， 1.38×10^{-23} 焦耳 / K

T = 以开尔文为单位的源的绝对温度

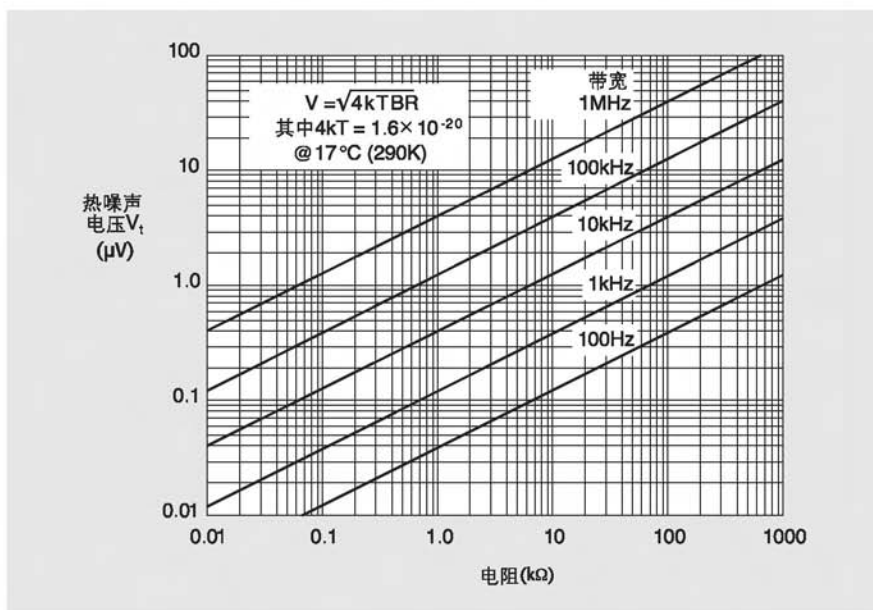
B = 以赫兹为单位的噪声带宽

R = 以欧姆为单位的源电阻

例如，在室温（290K）之下，源电阻为 $10\text{k}\Omega$ 、测量带宽为 5kHz 时，噪声电压大约为 $1\mu\text{V}$ 有效值。

降低源电阻的温度、减小测量的带宽可以降低约翰逊噪声。将样品从室温温度(290K)降低到液氮的温度(77K)，可以使得噪声电压减小大约一半。

图3-8：热噪声电压与电阻及带宽的函数关系



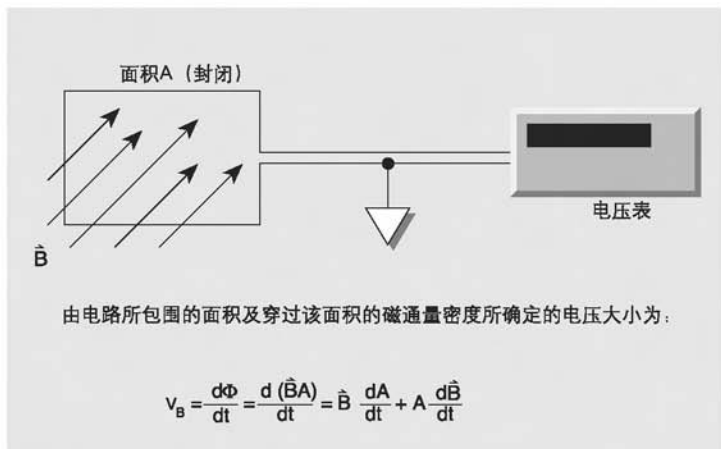
如果电压表的滤波特性和积分特性可调，那么增加滤波数量或在多个电源周期之内进行积分就可以降低带宽。降低测量带宽和增加仪器的响应时间是等效的，因此测量时间就要长得得多。然而，如果测量响应时间变长，则与电路中温度梯度有关的热电动势就会变得更加重要，如果测量电路的热时间常数和电路的响应时间为同一数量级，那么就有可能无法进行灵敏的测量工作。如果发生这种情况，就不可能区分出信号电压的变化和热电动势的变化。

在 2.6.5 节中对约翰逊噪声进行更详细的讨论。

磁场

在两种情况下磁场会产生误差电压：1) 磁场随时间变化。2) 在电路和磁场之间存在相对运动。导体在磁场中运动、测试系统中的元件引起的交流电流或者磁场的斜波上升（例如磁阻测量的情况）都会在导体中产生电压。甚至地球的比较弱的磁场也能够在摇动的引线中产生纳伏级的电压，所以必须使引线尽可能的短并且捆扎坚固。

图3-9： 磁场产生的低电压



基本物理学表明磁场在电路中感应出的电压大小正比于电路引线所包围的面积以及磁通量密度的变化率，如图3-9所示。感应电压 (V_B) 的计算方法如下：

其中： V_B = 感应电压

A = 回路面积

$\vec{B}$ = 磁通量密度

$\Phi = \vec{B}A$ = 磁通量

感应电压正比于 A 和 $\vec{B}$ 的大小以及 A 和 $\vec{B}$ 的变化率，所以有两种办法可以使感应电压变得最小：

- 在可能的情况下，通过减小回路的面积并避免磁场，使得 A 和 $\vec{B}$ 都为最小。

- 尽量减少电路的振动和运动、使电路远离交流和 RF 场，使得 A 和 $\bar{B}$ 都为常数。

为了尽量减小磁场感应的电压,电路引线的走线必需紧贴在一起,采用磁屏蔽,并且将其捆扎起来使其尽量不能移动。金属钼 (Mu-metal)——一种在低磁通密度和低频率之下具有高导磁率的特殊合金是常用的磁屏蔽材料。

图3-10: 将磁场干扰减至最小

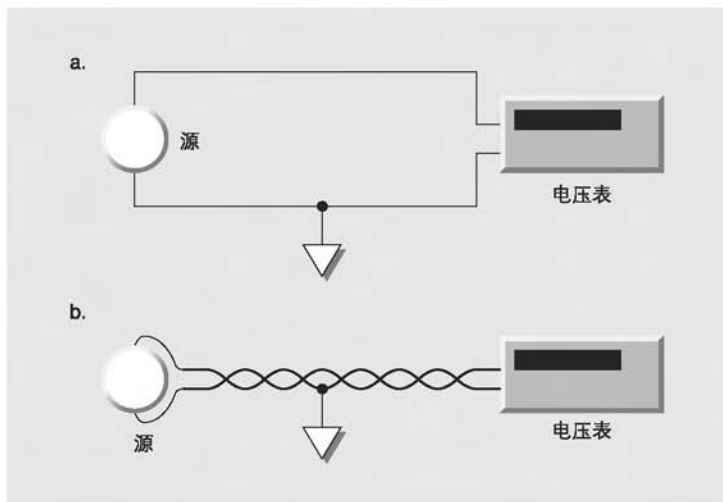


图 3-10 介绍了两种从源到电压表的走线方法。在图 3-10a 中走线包围了较大的面积,所以产生较大的感应电压。在图 3-10b 中,由于引线绞合在一起,走线包围的面积小得多,所以产生的感应电压大大减小。由于每个相邻的绞合都产生一个很小的、极性交替变化、而且相等的电压,所以双绞线也消除了由磁场感应出的电压。

对载荷大电流的导体也应当加以屏蔽或者采用双绞线走线,以避免产生磁场从而影响与其邻近的电路。除了这些技术之外,还可以在仪器的输入端进行滤波来消除由磁场引起的交流信号。如果可能的话,重新安排信号源和测量仪器的物理位置使之与干扰磁场离得更远。

地回路

噪声和误差电压还可能由地回路引起。当存在两个与地的连接点,

例如源和测量仪器都连到一个公共的地总线时,就形成了如图3-11a的回路。源和测量仪器的地之间电压 (V_G) 会引起电流 (I) 在回路中流动。这个电流将会产生与源电压相串联的不希望有的电压。根据欧姆定律:

$$V_G = IR$$

其中 V_G = 地回路的干扰电压, R = 地电流流过的信号通路的电阻, I = 地回路电流。当几台仪器插到不同仪器机架上的电源板时产生的地电流就是一个例子。在各个接地点之间常常会存在一个很小的电位差。这种电位差能够产生很大的电流并且生成不希望有的电压降。

图3-11a: 多个接地点 (地回路)

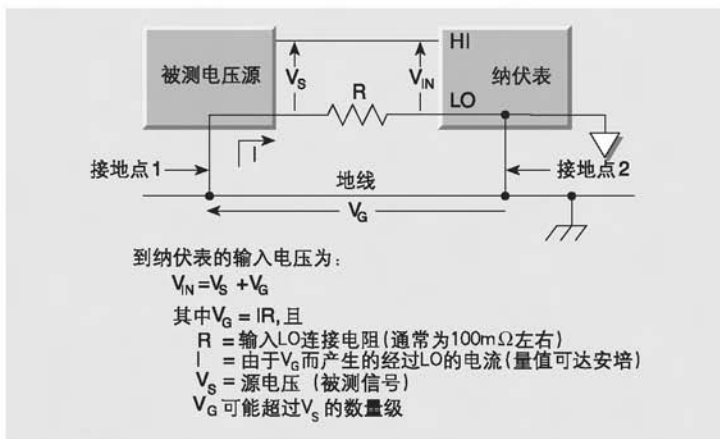
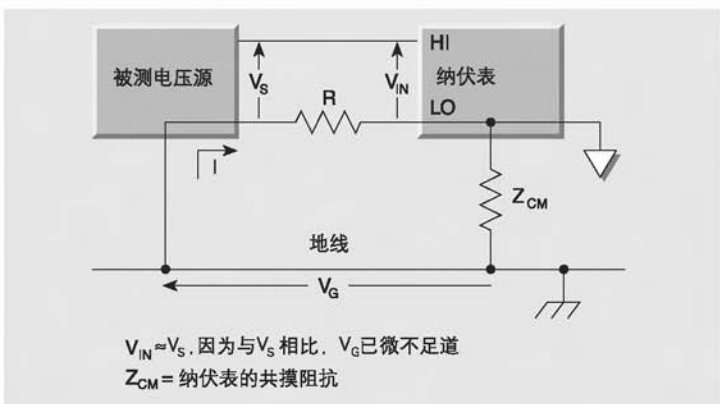


图3-11b: 减少地回路



解决这种地回路问题的方法是所有的设备在一个单点接地。实现这一点的最简单的办法是使用隔离的电源和仪器，然后为整个系统找出一个单独的、良好的大地接地点。不要把灵敏的仪器连接到其它仪器、机械、或者大功率设备使用的同一个地系统上去。使用具有高共模阻抗 (Z_{CM}) 的电压表 (又称为具有高共模隔离的电压表) 也可以降低地回路的影响, 如图 3-11b 所示。

3.2.3 共模电流和反向误差

过大的共模电流能够严重地影响低电平电压的测量。虽然共模电流常常与噪声问题有关, 但是在某些情况下共模电流也能引起很大的直流偏置电压。下面我们将简单地讨论共模电流引起误差的基本原因, 以及避免引线反向误差的方法。

共模电流

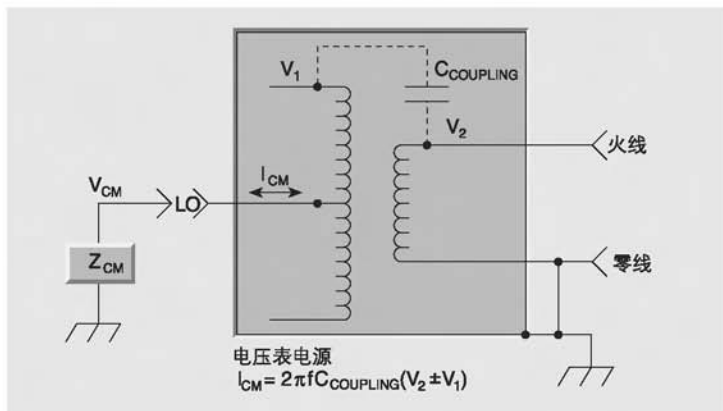
共模电流是在仪器的 LO (低) 端子和机箱或者大地接地点之间流动的电流。从图 3-12 可以看出, 共模电流 (I_{CM}) 是从电源线经过电源变压器通过电容耦合 ($C_{COUPLING}$) 而产生的。共模电流的幅度决定于:

$$I_{CM} = 2\pi f C_{COUPLING} (V_2 \pm V_1)$$

其中: f 为电源频率。

注意, 共模电流流过输入低端 (LO) 和机箱地之间呈现的阻抗 (Z_{CM})。所以共模电压 (V_{CM}) 的幅度决定与阻抗 Z_{CM} 的大小和共模电流 I_{CM} 的数值。

图3-12: 由电源耦合产生的共模电流



共模反向误差

将引线反向就会产生由共模电流引起的误差。如图 3-13 所示，很多的低电压源都有内部的电阻分压器，用来把内部的电压源衰减到希望的电平。例如，源的输出电压由下式决定：

$$V_{\text{OUTPUT}} = V_s \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

在图 3-13a 所示的正确连接方式之下，电压源的低端或者机箱端连到测量仪器的输入低端。可能出现的共模电流 (I_{CM}) 从电压表的输入低端流到仪器的机箱公共端，经过大地再流到电压源的地。注意，当采用这种连接方式时，没有共模电流流过电压源分压器的任何一个分压电阻器。

如果我们把电压表的输入引线反向，就得到了如图 3-13b 的情况。现在，共模电流 (I_{CM}) 流过 R_2 ，产生了一个电压降。这个电压降与被测的电压相加。这个相加的电压主要为电源频率的信号，其对于电压表读数的影响决定于电压表的串模抑制能力。电压表的读数可能变得像噪声那样起伏，也可能含有一个恒定的偏置量。在有些情况下，由于输入级过载，电压表的灵敏度可能会下降。

为了使共模反向误差降到最小，应选择共模电流尽可能低的仪器。如果可能的话，应当使被测的电压源与地隔离。

3.3 低电阻的测量

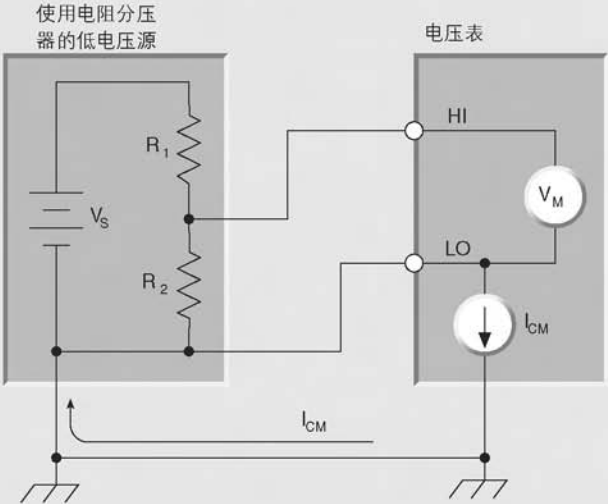
除了在第 3.2 节介绍的所有低电压测量中要考虑的问题之外，在低电阻的测量中更容易引进附加的误差源，其中包括引线电阻、非欧姆接触以及器件的加热问题。这一节将要介绍这些误差源以及将其消除或者降至最小的各种方法。此外还要介绍其它一些测量中要考虑的因素，包括干电路测试和电感性器件的测试等。

3.3.1 引线电阻和四线方法

电阻的测量常常使用图 3-14 所示的两线方法来进行。我们迫使测试电流流过测试引线和被测电阻 (R)。然后仪表通过同一套测试引线来测量电阻两端的电压，并计算出相应的电阻数值。

图3-13: 引线反向对共模误差的影响

a. 正常连接情况下， I_{CM} 不产生噪声或偏置



b. 将测试线反接， I_{CM} 产生噪声和偏置

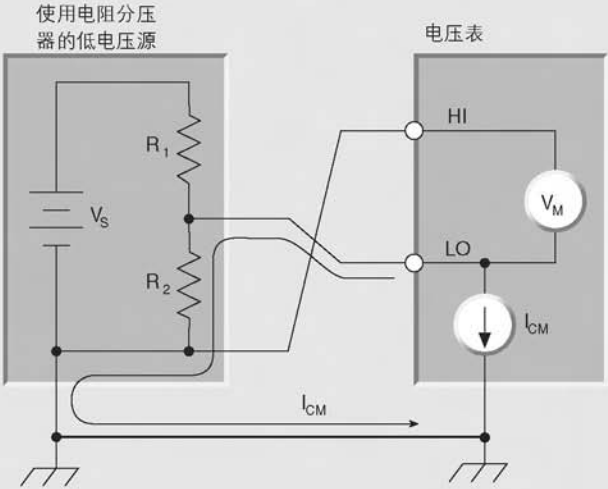


图3-14: 两线电阻测量

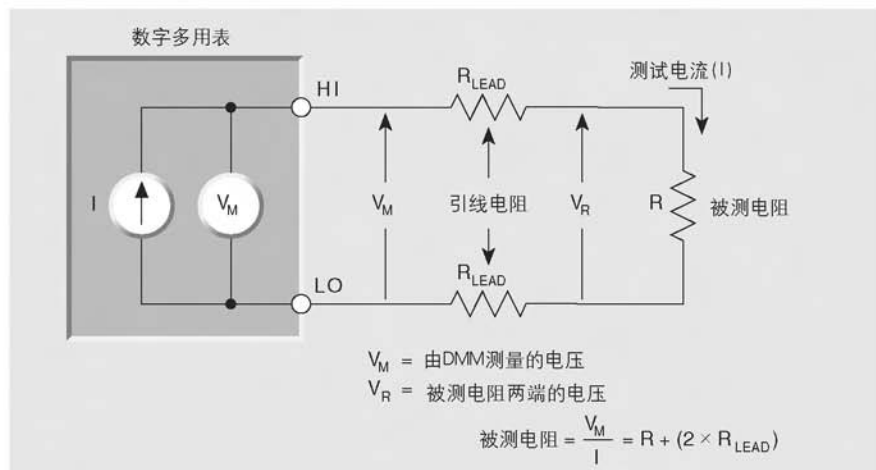
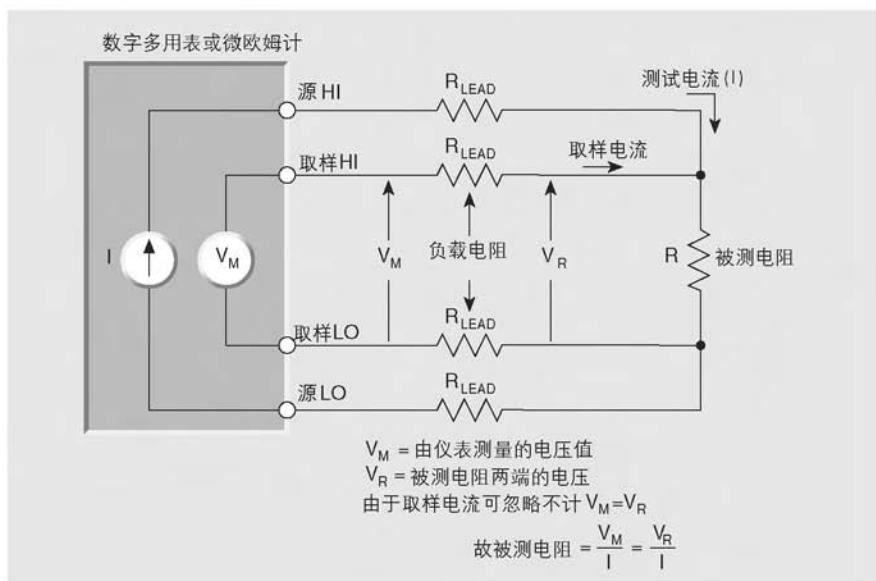


图3-15: 四线电阻测量



两线测量方法用于低阻测试时的主要问题是测量结果中增加了引线的总电阻 (R_{LEAD})。由于测试电流 (I) 在引线电阻上产生了一个小的、但是很重要的电压降, 所以仪表测量的电压 (V_M) 就不会和被测电阻 (R) 上的电压完全相同, 于是产生了相当的误差。典型的引线电阻在

1mΩ 到 10 mΩ 的范围内，所以当被测电阻小于 10Ω 到 100Ω 时，就很难用两线测量方法来获得准确的测量结果（取决于引线电阻的数值）。

由于两线方法的局限性，所以对低阻测量来说，人们一般都喜欢采用如图 3-15 所示的四线连接方法（开尔文法）。这种测量工作可以使用数字多用表、微欧姆计或者分离的电流源和电压表来进行。在这种配置下，迫使测试电流（I）经过一套测试引线流过被测电阻（R）；而被测电阻上的电压（ V_M ）则是通过称为取样（Sense）引线的第二套引线来测量的。虽然在取样引线中有小的电流流过，但是这些电流在所有实际测量工作中都是可以忽略的。由于取样引线上的电压降是可以忽略的，所以仪表测量出的电压（ V_M ）和电阻（R）上的电压实际上是相同的。这样，就能以比两线方法高得多的准确度来确定电阻的数值。注意，应当把电压取样引线连到尽可能接近被测电阻的地方，以避免在测量中计入测试引线的电阻。

3.3.2 热电动势和偏置补偿的方法

如第 3.2.1 节所述，热电动势电压能够严重地影响低电阻测量的准确度。电流反向法、Delta（德尔塔）法和偏置补偿欧姆法是消除这些不希望的偏置量的三种最常用的方法。

电流反向法

使用极性相反的电流进行两次测量能够抵消热电动势，如图 3-16 所示。在该图中，使用了一个电压表和一个分离的双极性电流源。如图 3-16a 所示加入正极性电流时，测得的电压为：

$$V_{M+} = V_{EMF} + IR$$

如图 3-16b 所示，将电流的极性反向，则测量出的电压如下：

$$V_{M-} = V_{EMF} - IR$$

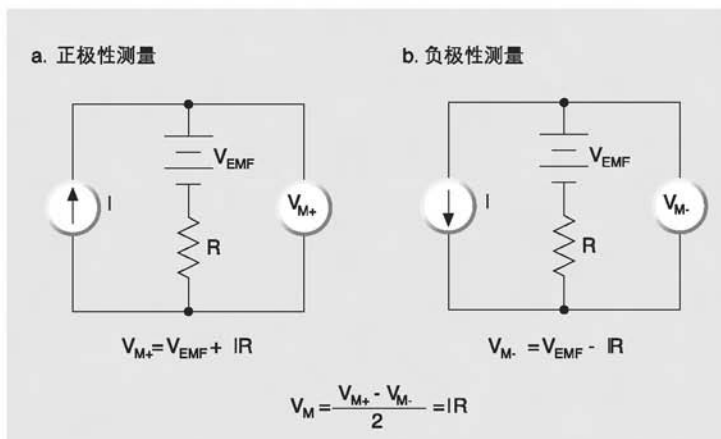
将两次测量结合起来就能够抵消热电动势：

$$V_M = \frac{V_{M+} - V_{M-}}{2} = \frac{(V_{EMF} + IR) - (V_{EMF} - IR)}{2} = IR$$

用通常的方法计算出被测电阻：

$$V_M = \frac{V_M}{I}$$

图3-16：用电流反向法抵消热电动势



注意，用这种方法计算电阻时，完全抵消了热电动势电压 (V_{EMF})。

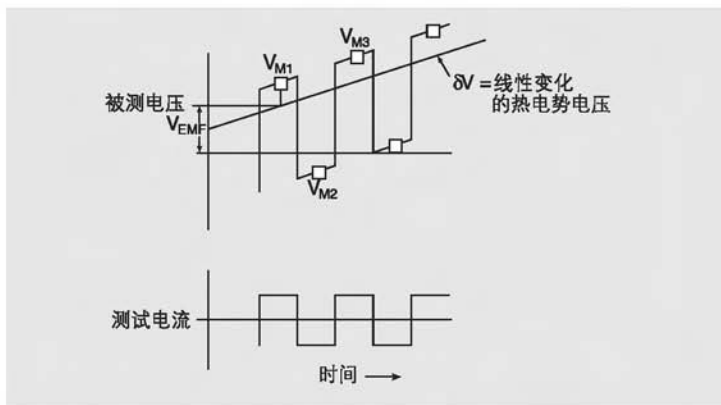
为了使这种电流反向法有效，很重要一点是要使用响应速度比被测电路的热时间常数更快的低噪声电压表。如果电压表的响应速度太慢的话，那么测量期间被测电路温度的变化将会引起热电动势发生变化。这样就不能完全抵消热电动势，从而产生某些误差。

Delta 法

当热电动势电压在测量期间为常数时，电流反向法能够成功地补偿这种热电动势引起的偏置。然而，当变化的热电动势电压引起不准确的测量结果时，就应当使用Delta法。在变换电流源的极性方面，Delta法类似于电流反向法；而其区别是这种方法使用三次电压测量来完成每个电阻的计算。用一个图和数学计算可以很好地解释这种方法。

图 3-17 表明在加入极性交替的电流时，被测元件 (DUT) 上的电压降与时间的函数关系。在每次电流的极性改变时，都进行一次电压测量 (V_{M1} 、 V_{M2} 、 V_{M3} 等)。每次的电压测的结果都包括热电压偏置 (V_{EMF}) 和线性变化的电压偏置 (δV)。在短时间内，可以近似地将热电压漂移看作线性函数，所以，电压对时间的函数的变化率 (δV) 也可以作为常数来处理。前三次电压测量得到下列的电压：

图3-17: 用Delta法抵消热电动势



$$V_{M1} = V_1 + V_{EMF}$$

$$V_{M2} = V_2 + V_{EMF} + \delta V$$

$$V_{M3} = V_3 + V_{EMF} + 2\delta V$$

其中: V_{M1} 、 V_{M2} 、 V_{M3} 为电压测量结果。

假定 V_{M1} 为在时间 = 0 时测量的电压。

V_1 、 V_2 、 V_3 为所加电流在被测元件上的电压降。

V_{EMF} 为在进行 V_{M1} 测量时的恒定的热电动势电压偏置量。

V 为热电动势的变化量。

使用三次测量, 通过数学计算就可能消去热电动势电压偏置项 (V_{EMF}) 和热电动势电压变化项 (δV)。首先, 求出前两次电压测量值之差的一半, 并将其称为 V_A :

$$V_A = \frac{V_{M1} - V_{M2}}{2} = \frac{(V_1 + V_{EMF}) - (V_2 + V_{EMF} + \delta V)}{2} = \frac{V_1 - V_2}{2} - \frac{\delta V}{2}$$

然后, 求出第二次 (V_{M2}) 和第三次 (V_{M3}) 电压测量值之差的一半, 并将此项称为 V_B :

$$V_B = \frac{V_{M3} - V_{M2}}{2} = \frac{(V_3 + V_{EMF} + 2\delta V) - (V_2 + V_{EMF} + \delta V)}{2} = \frac{(V_3 - V_2)}{2} - \frac{\delta V}{2}$$

V_A 和 V_B 都受到热电动势漂移的影响, 但是其对于 V_A 和 V_B 的影响是相等、相反的。最后的电压读数是 V_A 和 V_B 的平均值, 并计算如下:

$$V_{final} = \frac{V_A - V_B}{2} = \frac{(V_1 + V_3 - 2V_2)}{2}$$

注意，在最后的电压计算结果中， V_{EMF} 和 δV 这两项都被抵消了。

在Delta法中，每个数据点都是三个电压读数的移动平均值。这种对电压测量值求平均的算法意味着采用Delta法所得到的测量结果比使用电流反向法测量出的结果具有更低的噪声，即使两种方法的数据是在相同的时间内进行的也是这样。

Delta法的成功与否决定于热漂移的线性近似情况，所以必须在较短的时间期间内进行。要想成功地补偿变化的热电动势电压，测量的周期必须比被测设备的热时间常数要小。所以要使Delta法成功，必须使用比较快的电流源和电压表。有关特定测试设备的信息请参见第4.7.2节。

偏置补偿欧姆法

微欧姆计和很多数字多用表使用的另一种消除偏置的方法是偏置补偿欧姆法。这种方法和电流反向法类似，只是这种方法在固定的源电流和零电流之间交替进行测量。

如图3-18a所示，只在测量周期的一部分时间里将源电流加到被测电阻上。当源电流接通时，仪器测量出的总电压包括电阻器上的电压降和热电动势（图3-18b），并可以表示为：

$$V_{M1} = V_{EMF} + IR$$

在测量周期的后半一半时间内，将源电流关闭。这时仪表测量出的总电压就只是电路中出现的热电动势（图3-18c）：

$$V_{M2} = V_{EMF}$$

若在测量周期的后半一半时间内，我们将 V_{EMF} 准确地测出。就可以从测量周期前半一半所测量出的电压中将其减去。这样偏置补偿电压测量结果就成为：

$$V_M = V_{M1} - V_{M2}$$

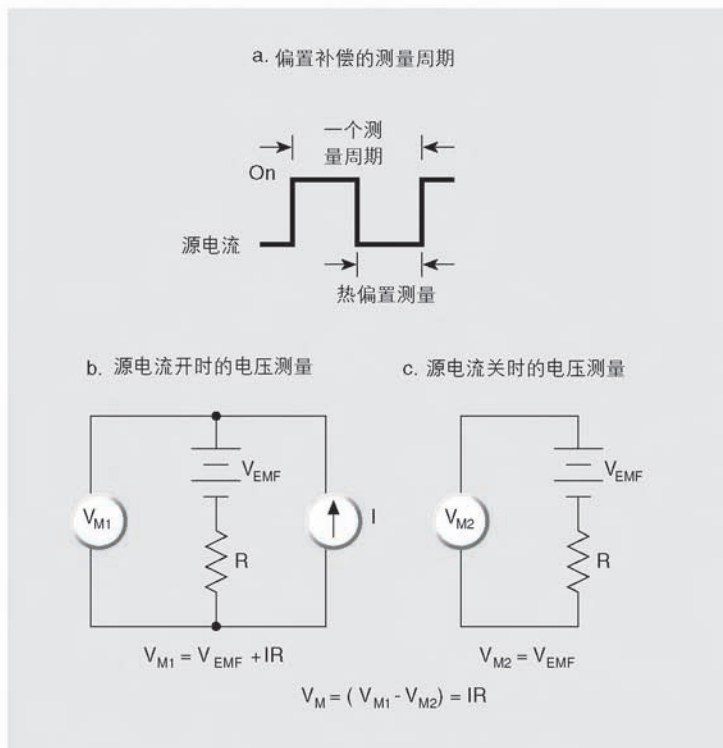
$$V_M = (V_{EMF} + IR) - V_{EMF}$$

$$V_M = IR$$

$$\text{于是, } R = \frac{V_M}{I}$$

同样，我们注意到，该测量过程消除了热电动势项（ V_{EMF} ）。

图3-18：偏置补偿欧姆测量



3.3.3 非欧姆接触

非欧姆接触出现在接点两端的电位差与流过接点的电流不是线性的比例关系的情况下。非欧姆接触可能发生在由氧化膜形成的低压电路或其它非线性连接中。非欧姆连接能够对出现的任何射频能量 (RFI) 进行整流, 从而使电路中出现偏置电压。(关于射频干扰的更进一步的讨论请见第3.2.1节。) 有若干方法可以检查非欧姆接触的存在, 还有一些方法可以将其降低。

如果使用微欧姆计或数字多用表来进行低电阻的测量, 可以改变测量量程来检查非欧姆接触。改变测量量程通常也就改变了测试电流。在一般情况下, 测量的读数是相同的。只是依据仪器量程的升降, 读数的分辨率变低或变高。如果测量的读数有很大的差别, 那么就表示可能存在着非欧姆接触。

如果使用分离的电流源和电压表来进行低电阻测量，则必须检查每台仪器的非欧姆接触情况。如果电流源接点有非欧姆接触特性，那么当源的极性反向时，其输入端压降就可能会有很大的不同。如果电压表接点有非欧姆接触特性，那么它就可能对出现的任何交流干扰进行整流并引起直流偏置误差。在这种情况下，最好使用偏置补偿欧姆法而不使用电流反向法来消除偏置。

为了避免非欧姆接触现象，应当选用适当的接点材料，例如钨或者金。要确保输入端钳位电压足够的高，以避免由于源接点的非线性而产生的问题。为了降低电压表的非欧姆接触所产生的误差，采用屏蔽和适当的接地措施来降低交流干扰。

3.3.4 器件的加热

在对温度敏感的器件，如热敏电阻，进行温度测量时，要考虑器件的加热问题。进行低电阻测量时所使用的电流常常要比进行高电阻测量时所使用的电流大的多。如果测试电流足够高，而使器件的电阻值发生变化时，就要考虑器件的功率耗散问题。

我们知道，电阻器的功率耗散由下式决定：

$$P = I^2 R$$

由此关系式可以看出，当电流增加一倍时，器件的功率耗散会增加到4倍。所以将器件的加热效应降到最低的一种方法是使用尽可能低的电流，而在被测器件上仍然保持希望的电压。如果不能降低电流的话，使用窄的电流脉冲和快速响应的电压表。

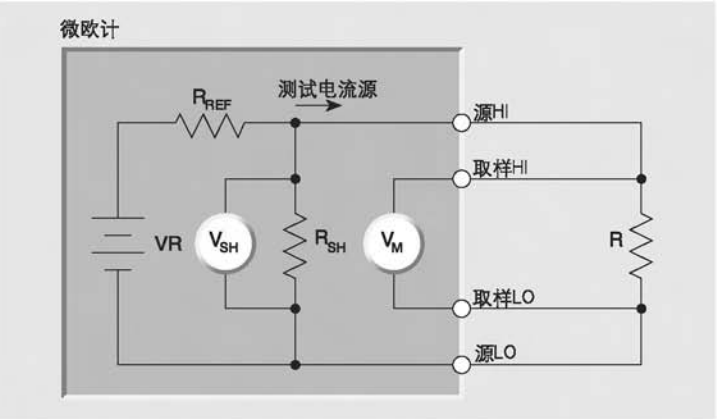
大多数的微欧姆计和数字多用表都不能设置测试电流。测试电流通常由量程决定。在这种情况下，必须找到另一种替代的方法将器件加热效应降到最低。一个简单但是有效的方法是在测量时使用仪器的单脉冲触发功能。在这种模式下，在测量周期中，仪器只向被测器件施加单个的、简短的电流脉冲，这样就将器件加热引起的误差降低到最小。

3.3.5 干电路测试

很多低电阻测量是在诸如开关、连接器和继电器接点等器件上进行的。如果这些器件在“干电路”的条件下使用，也就是说其开路电压小于20mV、短路电流小于100mA时，则应当采用一种不会击穿触点上可能形成的氧化膜的方法来测试这种器件。如果该氧化膜被击穿，则测量出的触点电阻就会比氧化膜保持原状时的电阻要低，从而破坏了测试结果的有效性。

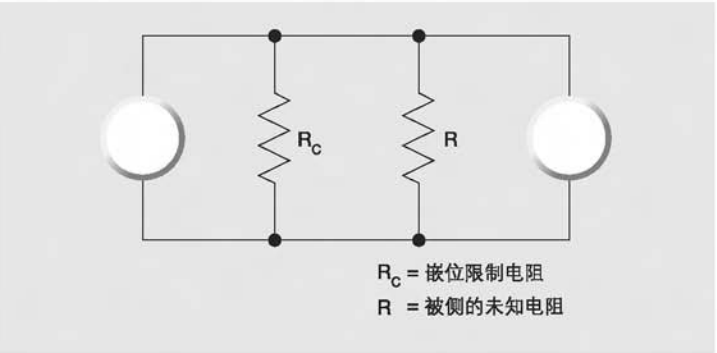
为了避免击穿氧化层，这种测量通常使用干电路测试法，一般要把被测器件上的电压限制在 20mV 或者更低。某些微欧姆计和数字多用表具备这种能力，如图 3-19 所示。在这种微欧姆计中，把一个精密的分流器电阻 (R_{SH}) 跨接到源的两端，以便将被测器件上的电压钳位或者限制到小于 20mV。电路的其它方面和普通的四线测量方法非常类似： V 和 R_{REF} 构成电流源，并强制电流流过未知电阻 (R)。该电流应当不大于 100mA。未知电阻的数值可以由取样电压 (V_M)、钳位电阻器上的电压 (V_{SH})、已知电阻值 (R_{SH}) 和源电流计算出来。有关电路的更详细的信息请参见 1.5.4 节。

图3-19：干电路测试



如果使用分离的电流源和电压表来进行干电路测试，则必须将电流源上的输入端压降限制在 20mV 或者更小。如果不能将输入端压降限制到这个电平，则必须使用一个限制负荷电阻器，如图 3-20 所示。在这个电路中， R_C 是用来把电压限制到 20mV 的电阻器， R 是未知电阻。

图3-20：使用电流源和电压表的干电路测试



必须选择 R_C 的数值，以便在给定的测试电流之下来限制电压。例如，如果电压限制值为 20mV ，测试电流为 $200\mu\text{A}$ ，则可以计算出 R_C 为：

$$R_C = 20\text{mV} / 200\mu\text{A} = 100\Omega$$

如果未知电阻 (R) 为 $250\text{m}\Omega$ ，那么 R_C 将会引起 0.25% 的被测电阻误差。

被测电阻的准确值可以由下列公式来计算：

$$R = \frac{(R_{\text{MEASURED}} \times R_C)}{(R_C - R_{\text{MEASURED}})}$$

其中， R_{MEASURED} 是从测量的电压 (V_M) 和源电流 (I) 计算出的电阻测量值。

3.3.6 电感性器件的测试

电感性器件通常除了其电感之外还有一个很小的电阻。这个小的电阻值通常用数字多用表或者微欧姆计来测量。然而，由于电感和测量仪器的相互作用，这种测量通常比较困难。在 L/R 的比值比较高的时候，这种情况尤为明显。

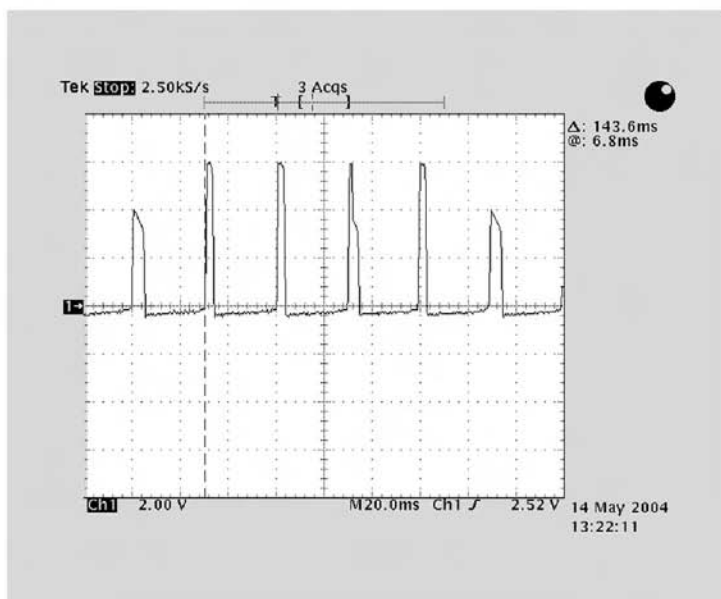
这时可能产生的问题包括：振荡、负读数以及通常不稳定读数。测量 200H 的电感器时不稳定情况的示波器图形如图 3-21 所示。

当发生上述问题时，尝试在多个量程上进行测量，并检查其读数是否互相对应。

如果可能的话，不要使用偏置补偿（脉冲电流）。因为对脉冲电流的感抗可能会使测量不稳定，或者使自动量程功能难于工作。在可能的时候，尝试使用较高的电阻量程。

将示波器并联到器件和电压表上，检查振荡情况。有的时候，在电感器上跨接一个二极管，能够降低感性冲击，从而消除可能的振荡。

图 3-21:



第 四 章

应 用

4.1 引言

当今低电平测量仪器的应用范围已经不再限于校准部门或者研究开发 (R&D) 实验室。已经证明低电平仪器的价值在很多其它的领域, 包括产品设计、器件特性分析、质量保证和生产测试等方面都是非常珍贵的。本章将要考察其各种不断增长的应用领域以及各种最适合的仪器和测试技术, 以解决各种特定的、具有挑战性的测试和测量任务。

第四章内容包括了各种各样的低电平测量应用情况:

4.2 各种高阻源电压测量的应用: 电容器的介电吸收和电化学测量等。

4.3 各种弱电流测量的应用: 电容器漏电测量、弱电流半导体测量、光电倍增管的光测量以及离子束测量等。

4.4 各种高阻测量的应用: 印制电路板的表面绝缘电阻测量、绝缘材料的电阻率测量、半导体的电阻率测量以及高阻值电阻器的电压系数测试等。

4.5 各种电荷测量的应用: 电容测量、使用法拉第杯的静电电荷测量等。

4.6 各种低电压测量的应用: 标准电池的比较、高分辨率的温度测量以及微热量测量等。

4.7 各种低阻测量的应用: 接点电阻测量、超导体电阻测量以及导电材料的电阻率测量等。

4.2 各种高源内阻电压测量的应用

第一章和第二章已经分别对静电计电压表和高阻源电压测量的问题进行了介绍。特别是在第2.2节讨论了各种误差源以及将其影响降低至最小的方法。高源内阻的电压测量包括诸如电容器的介电吸收和许多电化学实验, 例如 pH 值的测量和其它离子选择电极等。

4.2.1 电容器的介电吸收

概述

当介电材料中随机指向的永久分子偶极子在外电场的作用下排列整齐时, 就发生了介电吸收现象。电容器从放电电路断开以后, 电容

器中保持剩余的电荷，从而在电容器的端子之间重新建立起电压。

对于定时和积分等应用来说，介电吸收（或电容器上的剩余电压）能够大大降低电路的准确度。所以，我们必须了解电容器的介电吸收效应，并且在可能影响准确度的电路中对其进行补偿。

电容器的介电吸收效应可以用剩余电压和充电电压的百分比来表示。确定这个百分比的方法是：在一个规定的时间间隔内将电容器充电至某一额定电压，然后在第二个时间间隔内使电容器放电。最后将电容器开路，并且在第三个时间间隔之后测量电容器上的剩余电压。

使用源-测量单元确定介电吸收性能

电容器上的剩余电压可以用一台源-测量单元（SMU）来测量。此设备必须能够输出电压，然后再以高输入阻抗来测量电压。按照前一节介绍的方法，从剩余电压的数值就能计算出介电吸收。图4-1说明基本电路的配置情况。这里使用6430型亚飞安（fA）源表仪器或其它高阻抗SMU以及一台电压波形记录仪。

在需要的浸润（soak）时间（ t_1 ）内，在电容器上施加“浸润”电压。然后，在规定的放电时间（ t_2 ）内程控SMU以100mA的钳位输出0V。最后，程控SMU在尽可能低的电流量程上输出零电流，并同时测量电压。电流源的量程越低，SMU电压表的输入阻抗就越高。在规定的期间（ t_3 ）之后，测量剩余电压。然后，由剩余电压确定介电吸收：

$$\text{介电吸收} = \frac{\text{剩余电压}}{\text{浸润电压}} \times 100\%$$

使用静电计确定介电吸收

静电计电压表对于测量介电吸收特别有用，因为和SMU一样，在测量的时候它实际上不从电容器上吸取电荷，也不对被测电容器充电。

图4-2说明使用静电计确定介电吸收的基本电路。这种应用情况使用了一台6517A型静电计，它能够供给测试电压并测量剩余电压。

首先，在要求的浸润时间（一般为1到2分钟）内通过R1对电容器（ C_x ）充电。然后，关闭电压源； S_1 打开， S_2 闭合，在要求的放电时间内使电容器通过R2放电。接着， S_2 打开，并且必须使电容器在规

定的恢复时间内不被干扰。在该时间之后用静电计电压表测量剩余电压。最后，使用前面给出的公式计算介电吸收。

图4-1:使用SMU测量剩余电压

a. 连接



b. 等效电路



c. 电压波形

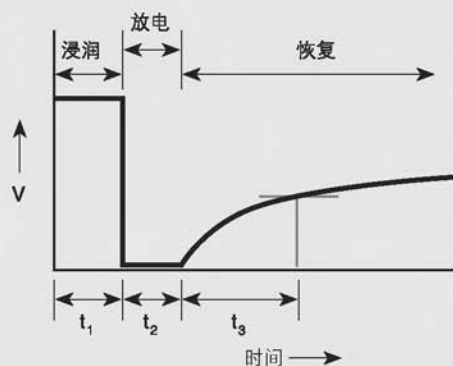
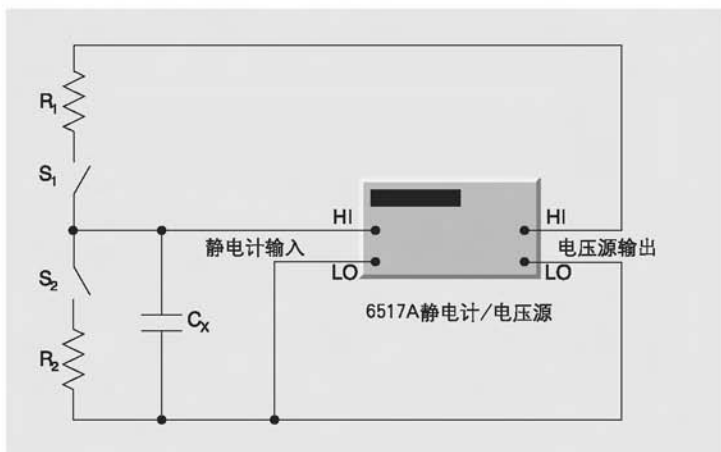


图4-2:使用静电计测量介电吸收



4.2.2 电化学测量

概述

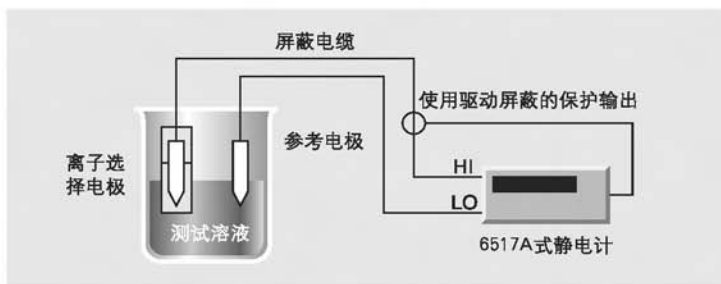
当确定电化学电极或电池的电势的时候,为了保证测量的准确度,测量必须在不从电池吸取任何可察觉电流的情况下进行。否则,从电池电极吸取的电流将会在电极的内阻上产生电压降并可能使电池极化。所以需要使用具有高输入电阻的电压表,例如静电计。

通常使用静电计来进行pH值的测量和其它离子选择电极的工作以确定特定离子的浓度。静电计还常常用来测量液体的电导率。本章将讨论与这些应用有关的一些基本测量原理。要记住,这些测量工作通常需要严格的恒温控制。

用离子选择电极测量

在需要连续测量离子的活性时,这种测量特别有用。这种监测工作对于避免珍贵材料的损失或者检测工业过程的污水中可能存在的污染物质都是很重要的。

图4-3: 离子选择电极的测量

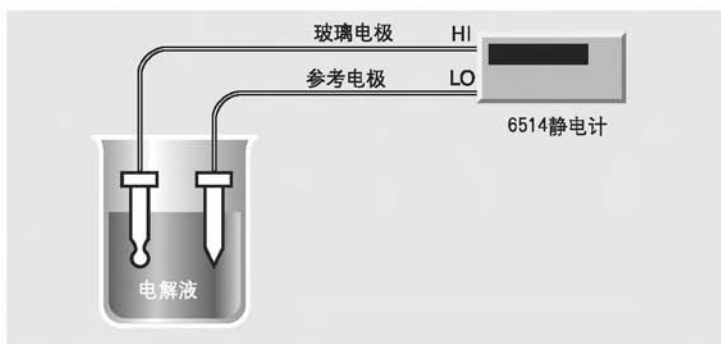


离子选择电极的电池电位直接随着离子活性的对数而变化。在室温之下，当等效离子的活性改变10倍时，大多数离子选择电极的电位改变57mV。这种对数响应在高达8个数量级的离子活性动态范围内保持恒定的精度。图4-3示出其典型电路。注意，离子选择电极的阻抗通常比参考电极要高，因此应当用屏蔽电缆将其连到静电计的输入高端HI。可以用保护（前置放大器）输出驱动屏蔽端，以提高响应速度。使用6517A或6514型静电计时，可以采用在外部连接到前置放大器的输出（如图所示）或者使用前面板上的电压保护功能来实现。

PH 值测量

任何pH电极系统（图4-4）都可以看成是一个高值的电阻器（从1MΩ到1GΩ）与一个电压源相串联。这个电阻是离子选择电极壁（通常为玻璃）和电解液（具有低活性）的电阻之和。这个系统中的电位不能用普通数字多用表来测量。

图4-4: pH电极系统

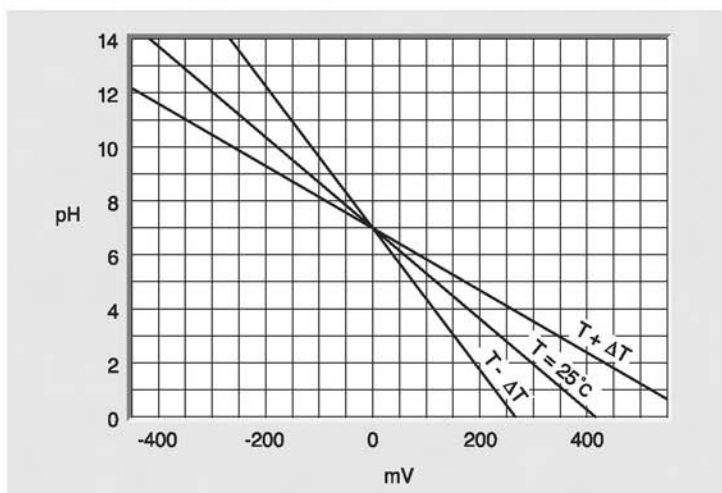


如果有电流流过，电极就会被极化。所以必须使用静电计来测量电极的电位，这时静电计从电极吸取的电流可以忽略。在与玻璃电极相连时，不应静电计进行零点检查。因为在进行零点检查时，仪器通常接近无穷大的输入电阻会降至 $10\text{M}\Omega$ ，这时产生的电流会使电极发生极化。

如果已知被测 pH 值的近似值，那么应当对电极进行标准化处理。使用两种缓冲溶液对系统进行定标。为了获得最好的准确度，这一步是必要的。例如，为了测量 6.5pH（在 25°C 时 29.6mV）到 1pH（在 25°C 时 355mV）之间的 pH 值，最好用一个 pH 值为 6、另一个 pH 值为 1 的两种缓冲溶液来进行校准。

电极放在缓冲溶液中时，静电计的电压读数可能和理论值相差几百微伏。此电压还与温度密切相关。在给定电池、给定温度的情况下，pH 值和电压的关系是线性的。例如，使用氯化亚汞电池作为参考电极，pH 值为 4.0 的理论电压在 25°C 时为 177.5mV。其它的参考电极，例如银氯化银电池，将会给出略有不同的电压。参考电极不随 pH 值改变，所以可以采用测量已知缓冲溶液的方法来对其测量结果进行修正。使用适当的变换数据可以将测量到的电极电压变换为 pH 值。图 4-5 是典型的毫伏电压差与 pH 值的关系曲线。

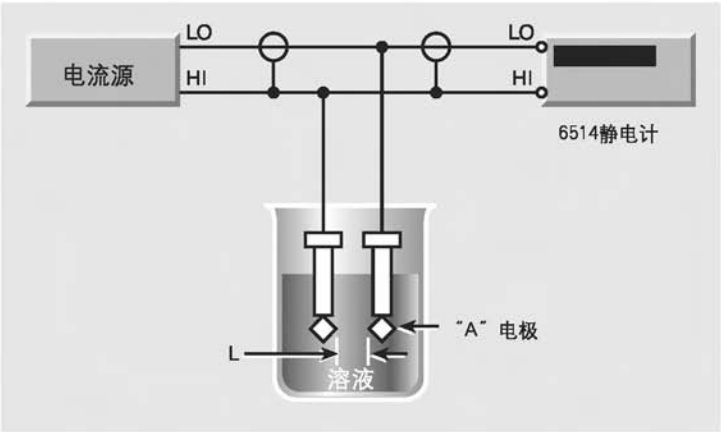
图4-5:不同pH值下的电极输出电压



电导率单元 (Conductivity cell)

如果离子浓度非常低,测量许多化学溶液的电导率是很困难的。在这种情况下,可以使用静电计电压表和电流源来进行测量。图4-6示出了典型的配置情况。

图4-6: 电导率单元的测量



溶液的电导率对杂质的存在是很敏感的。这就意味着电导率的数值随存在杂质的不同而异,而不只是一个特征常数。所以不需要高的准确度,测试设备也不需要很精细。

与pH值测量的情况一样,应当使电流尽可能地低。还可以交替变化其极性以避免电极的极化。

必须牢固地安装单元的电极,以避免其振动和移动而产生噪声和干扰。此外,将引线屏蔽也有助于降低干扰。

每个单元都有其特定的常数,该常数是电极之间导电溶液的体积的函数。当电极面积非常小而溶液的导电率非常低时,静电计是非常有用的。要进行可靠的测量,温度控制是非常重要的。

电导率可以由已知的电流值 (I)、电压读数 (V)、电极的面积及其之间的距离计算出来:

$$\sigma = \frac{I}{V} \cdot \frac{L}{A}$$

其中： σ = 电导率（西门子/厘米）

A = 电极的表面积（厘米²）

L = 电极间的距离（厘米）

4.3 各种弱电流测量的应用

第一章和第二章已经分别对静电计和皮安表以及弱电流测量的方法等问题进行了介绍。特别是，在第2.3节讨论了各种严重影响测量准确度的误差源。弱电流测量的各种应用包括电容器的漏电、弱电流半导体、光和离子束测量等。

4.3.1 电容器漏电的测量

概述

电容器是各种电子设备中的基本元件，广泛地应用于对电子电路进行旁路、耦合、滤波和调谐等。然而，要使用电容器就必须明白其特性：包括电容值、额定电压值、温度系数以及泄漏电阻等。电容器制造厂家对这些参数进行测试；最终用户也进行这类测试。

这里讨论的应用实例是使用6487型皮安计源或6517A型静电计测量电容器的泄漏电阻。此泄漏电阻可以用“IR”（绝缘电阻）来代表，并用兆欧-微法来表示（电阻值可以用“IR”值除以电容来计算）。在另一些情况下，漏电可以用给定电压（通常为工作电压）下的泄漏电流来表示。

测试方法介绍

测量电容器漏电的方法是向被测的电容器施加一个固定的电压，然后测量所产生的电流。泄漏电流随时间呈指数衰减，所以通常需要在已知的时间期间内施加电压（浸润时间），然后再测量电流。

图4-7是测试电容器漏电的一般电路。其中，在浸润时间内将电压加到电容器（ C_x ）的两端，该时间过去之后再用电流表测量其电流。在这个测试系统中，与电容器相串联的电阻器（ R ）是一个重要的元件。这个电阻器有两个作用：

- 1 在电容器短路的情况下，电阻器限制电流的大小。
- 2 如第2.3.2节所述，电容器的容抗随着频率的增加而降低，这就

会增加反馈电流表的增益。此电阻器则将增益限制到一个有限的数值。该电阻器的合理数值是使得 RC 的乘积为 0.5 到 2 秒。

在电路中加入一个正向偏置的二极管会得到更好的效果，如图 4-8 所示。该二极管象一个可变的电阻。当电容器的充电电流很大时，其阻值很低；而电流随时间变小时，其阻值增大。这时串联的电阻器可以小得多，因为其作用只是防止电压源过载以及电容器短路时损坏二极管。该二极管应采用小信号二极管，如 1N914 或者 1N3595，并且必须具有闭光的封装。当进行双极性测量时，应当使用两个二极管，并将其反向并联。

图4-7:简单的电容器漏电测试电路

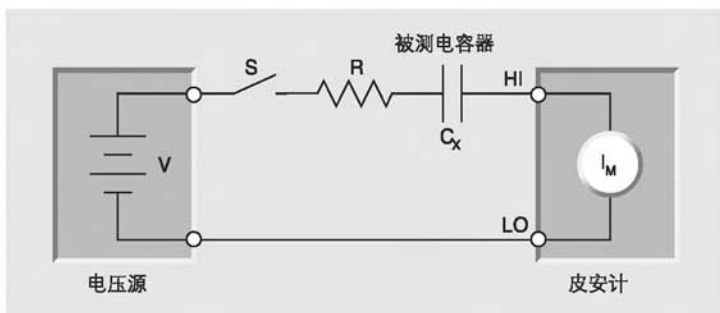
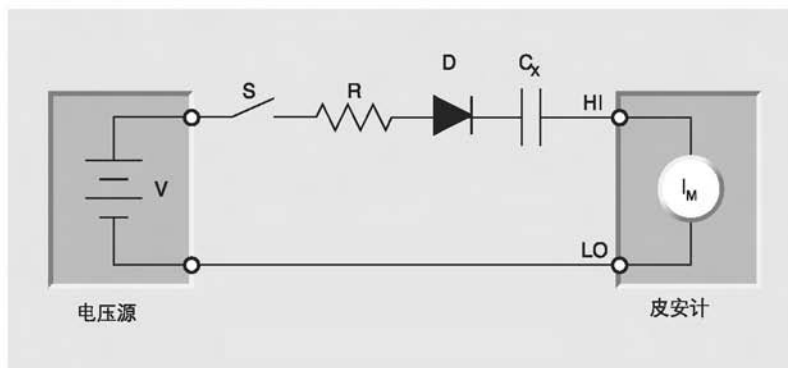


图4-8:使用二极管的电容器漏电测试电路



测试电路

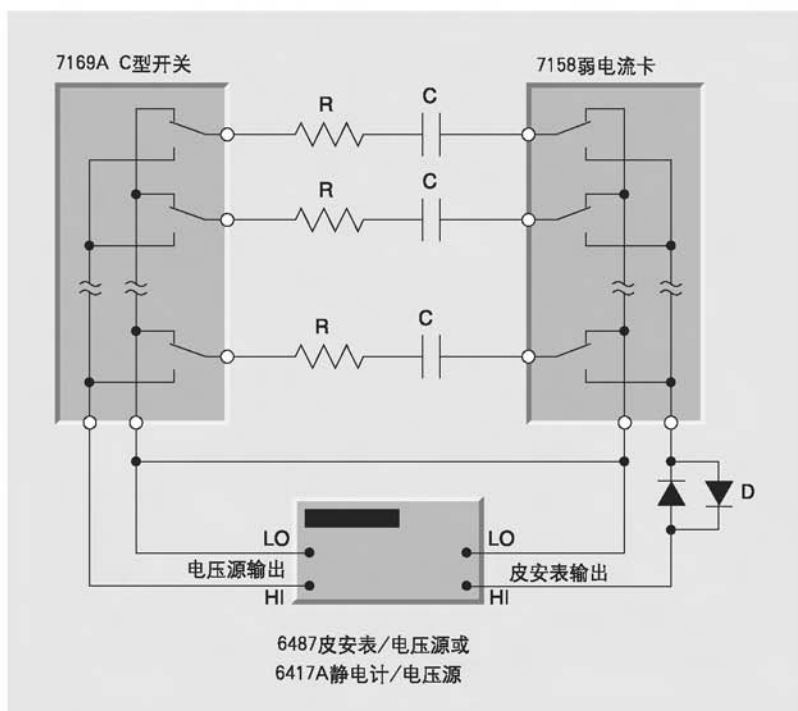
从统计的角度来看，常常需要测试大量的电容器以获得有用的数据。显然，用手动的方法进行这些测试是不实际的，所以需要某种类

型的自动测试系统。图 4-9 示出这样一种系统。该系统采用 6487 型皮安计电压源、7158 型弱电流扫描器卡和 7169A 型 C 类开关卡。这些板卡安装在一个程控开关主机（如 7002 型）内。用一台计算机控制各种仪器自动进行测试。

在这个测试系统中，用一台仪器——6487 型皮安计电压源来提供电压源和弱电流测量的功能。这台仪器对于这种应用工作特别有用，因为它可以显示电阻或漏电电流并且能输出高达 500V 的直流电压。在测量更低电流时，这个系统也可以使用 6517A。

根据电压源的极性，互相并联的两个二极管（D）中的一个用来减小噪声，而另一个二极管则提供放电通路。在测量完成以后，7169A 型的常闭接点使电容器放电。由于 7169A 卡的限制，电压源的输出电压不能超过 500V。如果最大测试电压只有 110V，则可以用 7111 型的 C 类开关卡来代替 7169A 卡。

图 4-9: 电容器漏电测试系统



一套开关用来轮流向每一个电容器施加测试电压，另一套开关在适当的浸润时间之后将每个电容器连接到皮安计。

4.3.2 弱电流半导体测量

概述

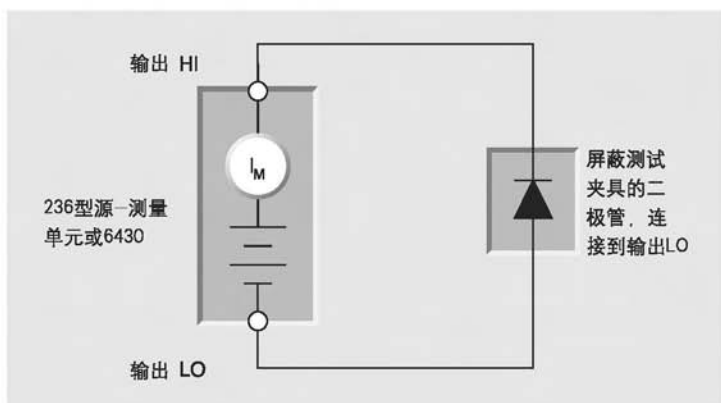
测试半导体器件和晶圆片 (Wafer) 常常要涉及到测量小电流。其中有些测试工作包括各种泄漏电流的测量。另一些对于晶圆片级半导体的弱电流测量则通常与介电材料 (氧化物或化合物) 的质量有关。这些弱电流测量工作常常使用静电计或源-测量单元来进行。本章将介绍使用源-测量单元测量二极管的泄漏电流以及 MOSFET 的亚阈值电流 (sub-threshold current)。

二极管的泄漏电流

在理想的情况下，二极管的反向电流应当为零。然而，实际上确实存在着反向电流。衡量二极管质量的一个方面就是在规定的反向偏置电压下的泄漏电流。

图 4-10 示出如何使用 236 型或 6430 型 SMU 来测量二极管的泄漏电流。236 型 SMU 能够以 10fA 的分辨率测量电流，并且输出需要的偏置电压。6430 型 SMU 的分辨率为 10aA。源-测量单元还可以测量其它的二极管参数，包括正向电压降和击穿电压。

图4-10:源-测量单元与二极管的连接



为了避免静电干扰引起的误差，应当将二极管放在屏蔽的测试夹具（test fixture）内。该装置还能提供对光的遮蔽。由于二极管的结光敏感，这一点也是很重要的。

MOSFET 的亚阈值电流

各种 MOSFET 测试都要求进行弱电流的测量。这些测试包括栅极漏电、泄漏电流与温度的关系、衬底对漏极的漏电和亚阈值电流等。

亚阈值电流测试常常在晶圆片级进行。它是表示器件打开和关闭的快慢程度的参数。图4-11示出测量亚阈值电流的典型测试设置情况。在此配置中，4200型半导体特性分析系统配备了2个SMU和前置放大器。使用一个SMU来提供恒定的漏-源电压(V_{DS})，并测量产生的漏极电流 (I_{DS})。另一个SMU用来扫描栅-源电压 (V_{GS})。对这个SMU来说，应当将钳位电流或测量电流值设置为固定测量量程上的最高期望的栅极电流。

图4-11:使用二台SMU来测量亚阈值电流

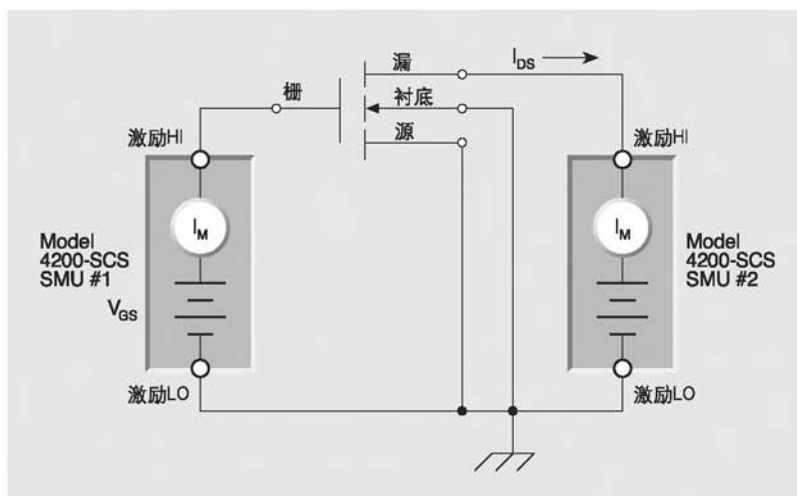
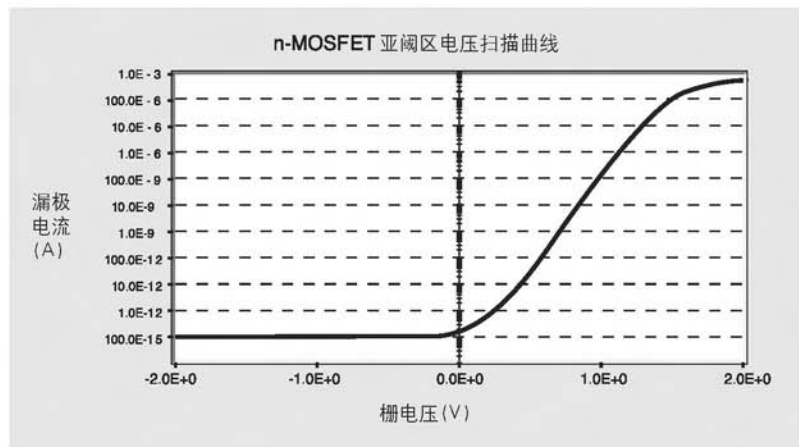


图4-12 是一个增强型MOSFET的 I_{DS} 对 V_{GS} 曲线。该曲线是在4200-SCS型半导体特性测试系统上得到的。

图4-12:增强型MOSFET的 I_{DS} - V_{GS} 曲线



4.3.3 用光电倍增管进行光测量

概述

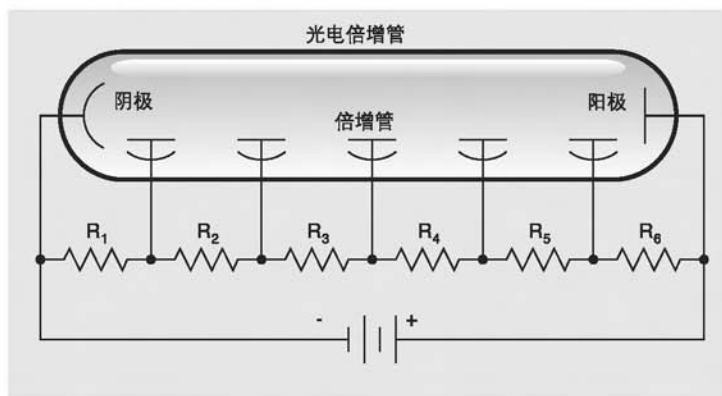
由于要测量的电流非常弱，所以用光电倍增管测量光的应用工作通常需要使用皮安计。

光电倍增管 (PMT) 是一种把光变成电流的装置。光电倍增管有一个对光敏感的阴极，它发射的电子数目与撞击到其上面的光子数量成正比。这些电子被加速运行后撞击到下一级，并引起3到6个二次电子的发射。根据管子型号的不同，这个过程继续进行6至14级（称为倍增管电极(dynode)）。通常可以达到100万倍或者更高的总增益。

详细工作情况

使每个连续的光电倍增管电极的电压都比它前面一个电极的电压更高，这样电子就得到加速。做到这一点最容易的方法是给整个光电倍增管的两端加上一个电压，然后从一个分压器的各个抽头取得供给各个倍增管电极的电压，如图4-13所示。

图4-13:光电倍增管的电压源



加到每个光电倍增管电极上的电压决定于PMT的设计，并由每个管子的型号来确定。

光电倍增管电极电阻器的总电阻应当使得流过这一系列电阻器的电流至少比待测的光电倍增管阳极电流大 100 倍：

$$R_T = \frac{\text{阳极到阴极的电压}}{100 \times \text{阳极电流}}$$

大多数光电倍增管都要求其阳极到阴极的电位在 1000V 到 3000V 之间。由于阳极是读出点，所以通常工作在接近地的电位，而阴极则处于负的高电位。吉时利公司的 248 型高压电源可以为这种应用工作提供高达 5000V 的电压。

大多数光电倍增管的阳极电流范围从皮安到 100μA。由于皮安计具有很高的灵敏度，所以通常用作阳极电流的读出装置。皮安计具有很低的输入电压降（输入端压降），这就使得阳极实际上处于地电位。图 4-14 示出使用 6485 型皮安计的典型配置情况。如果 PMT 要求的电压不超过 1000V，6517A 型静电计电压源可以提供很方便的解决方案。因为它能测量电流又能供出高达 ± 1000V 的电压。

图4-14: 光电倍增管的基本连接

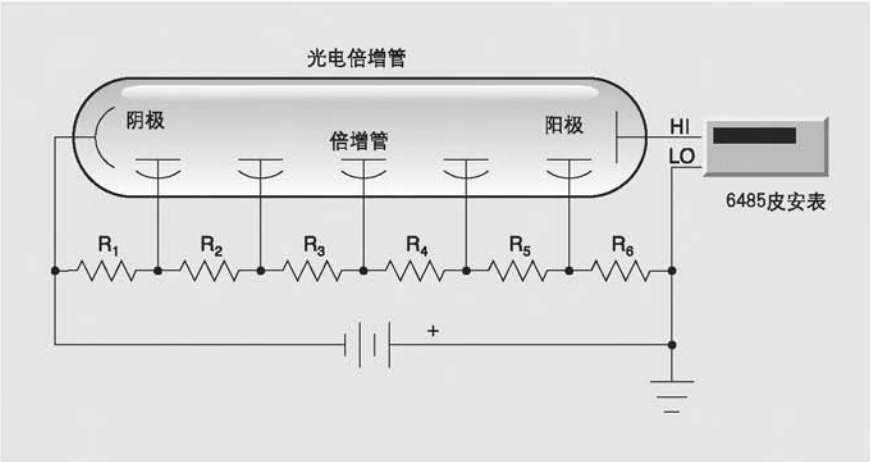
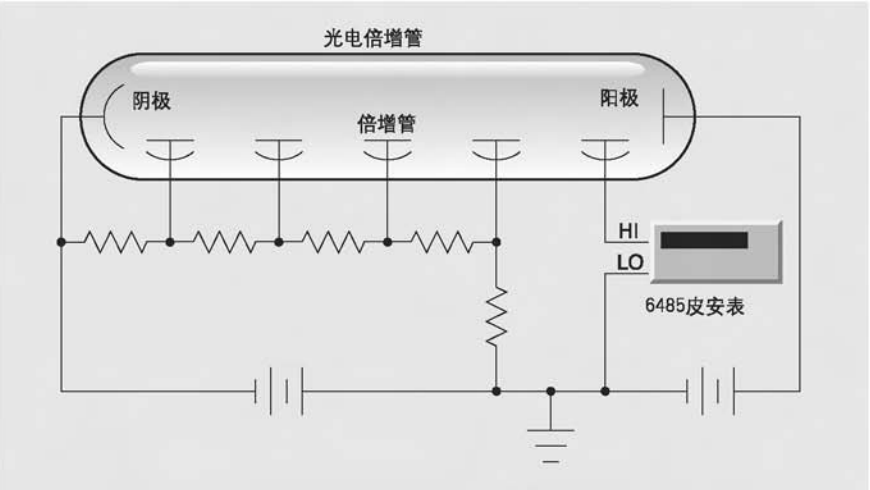


图4-15: 读取正极性PMT电流



采用这种连接方法时，皮安计读出的电流为负值。有的时候，要求测量出的电流必须为正值。在这种情况下，简单地重新安排电路，并使用一个附加的电源就能获得正电流。测量正PMT电流的电路配置示于图 4-15。皮安计在最后一个倍增管电极处读取电流，此电流等于阳

极电流减去流过前一个倍增管电极的电流。实际上，进行这种测量时略微牺牲了PMT的增益。

即使在阴极未照亮时，PMT中通常也会流过一个小的电流。这种现象称为“暗电流”，并且在大多数的应用中是无关紧要的。在另一些情况下，则可以使用REL（零点）功能将其从读数中减去，或者简单地使用内置的零点抑制功能（如果仪器具有此功能的话）将其消除。

4.3.4 离子束的测量

概述

离子束用于各种应用场合，诸如，质谱仪和离子注入机等。离子束电流通常非常小（ μA ），所以需要使用静电计或皮安表来进行测量。本节介绍如何使用6485型皮安表和6487型皮安表/电压源来进行这种测量工作。在电流灵敏度更高时，可以改用静电计来进行测量。

测量方法

如果离子源偏离地电位，那么离子收集电极多半处在地电位。在这种情况下，可以使用简单的真空同轴接头来进行从收集电极到皮安表的连接。图4-16示出6485型皮安计从离子收集电极测量电流的情况，这时仪器工作在地电位。

然而，如果离子源处在地电位，那么离子收集电极必须偏离地电位。6485型皮安计只能偏离地电位大约42V，所以必须使用能够浮地电位达500V的6487型皮安计。图4-17是6487型皮安计浮地测量离子束的一个例子。皮安计的高端通过三同轴的真空接头连到离子收集电极。皮安计的低端由电压源偏离地电位。出于安全的考虑，当偏置电压大于42V时，应当使用三同轴的真空接头。6487型皮安计能够浮地高达500V。

如果无法找到三同轴的真空接头，那么可以在绝缘的BNC连接处构建金属安全屏蔽（图4-18）。将该金属安全屏蔽接地。浮地信号的问题在第2.6.8节详细讨论。

图4-16:带接地BNC插座的离子收集极

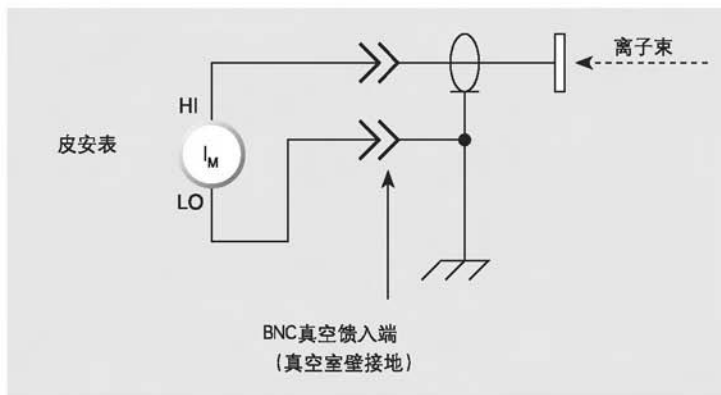
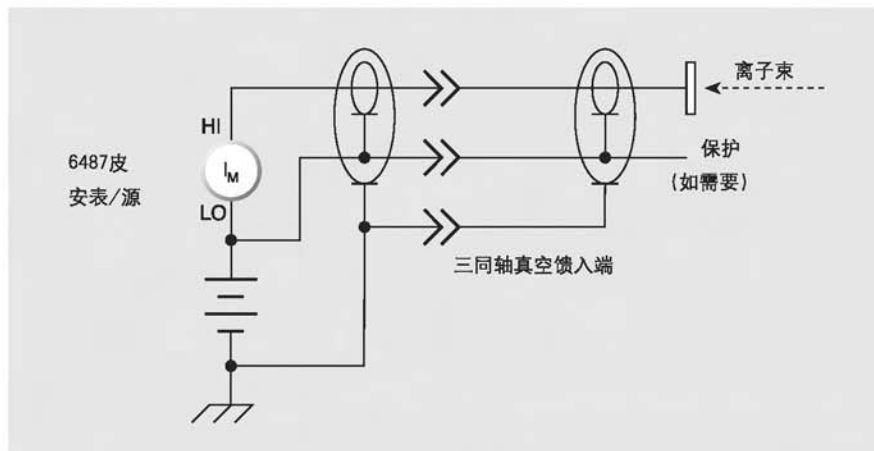


图4-17:带三同轴插座的离子收集电极



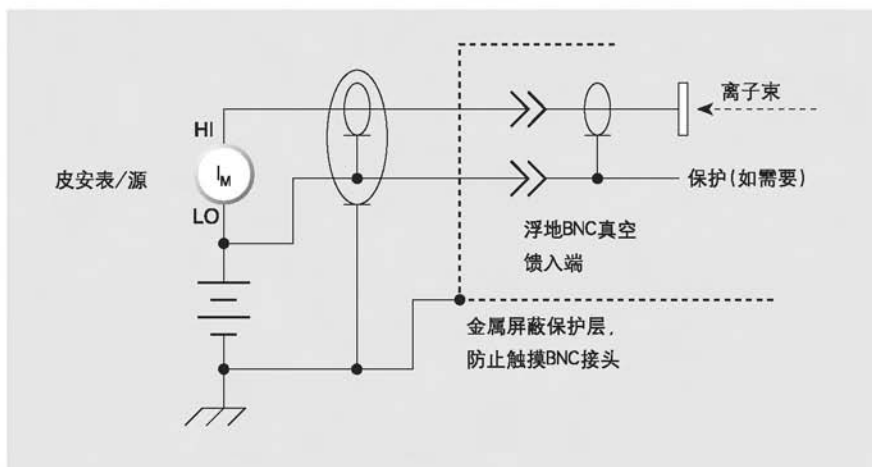
如果对地的浮地电压小于42V，那么绝缘的BNC接头就不需要安全屏蔽。

完成电路连接之后，接通偏置电压，在没有离子束电流的情况下进行电流测量，以验证系统能够正常工作。如果这时的电流比要测量的电流大得多，那么系统中一定存在着寄生泄漏通路，必须将其纠正。

我们常常需要把离子束电流与时间的函数关系画成曲线。此项工作可以使用皮安计的模拟输出功能来完成或者使用IEEE-488总线或RS-232接口来采集读数，再用绘图编程软件包（例如ExceLINX）或

图表软件将其画成曲线。

图4-18: 带BNC插座的离子收集极



4.3.5 雪崩光电二极管反向电流的测量

概述

雪崩光电二极管 (APD) 是一种高灵敏度、高速度的光电二极管。施加反向电压时，能启动其内部的增益机构。APD 的增益可以由反向偏置电压的幅度来控制。反向偏置电压越大增益就越高。APD 在电场强度的作用下工作，光电流的雪崩倍增类似于链式反应。APD 应用于对光信号需要高灵敏度的各种应用场合，例如光纤通讯、闪烁 (scintillation) 探测等。

对 APD 的测量一般包括击穿电压、响应度和反向偏置电流等。典型 APD 的最大额定电流为 10^{-4} 到 10^{-2} A，而其暗电流则可低至 10^{-12} 到 10^{-13} A 的范围。最大反向偏置电压随 APD 的材料而变化，铟砷化镓 (InGaAs) 材料的器件可达 100V，硅材料的器件则可高达 500V。

测试介绍

测量 APD 的反向偏置电流需要一种能够在很宽范围内测量电流并且能输出扫描电压的仪器。由于这种要求，6487 型皮安计电压源或者 6430 型亚飞安 (Sub-Femtoamp) 源 - 表等仪器对于这类测量工作是非常理想的。

图 4-19 所示为 6430 型亚飞安源-表连接到一个光电二极管上。该光电二极管安放在一个电屏蔽的暗箱中。为了对敏感的电测量进行屏蔽，使其不受静电干扰的影响，将此暗箱与 6430 型亚飞安源表的低端相连。

图4-19: APD与6430型数字源表的连接

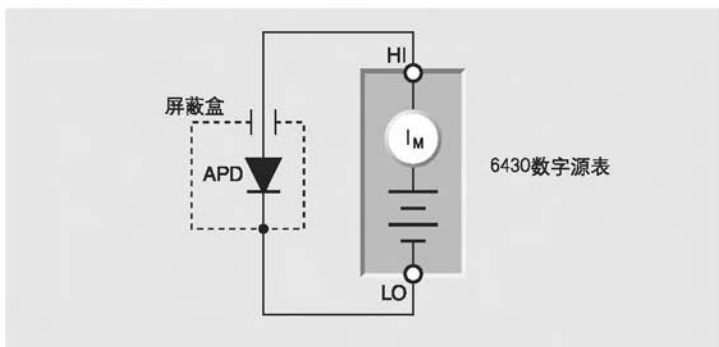
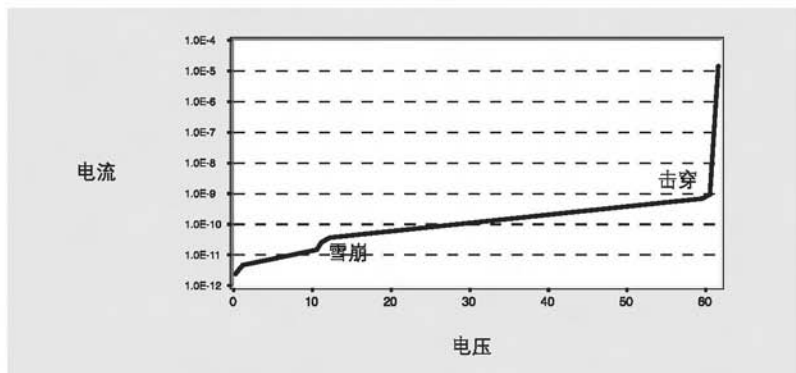


图 4-20 示出使用 6430 型数字源表测量得到的镓砷化镓 (InGaAs) 材料 APD 的电流与反向扫描电压的关系曲线，注意其电流测量的范围很宽。随着光的增强，雪崩区域变得更加明显。击穿电压将引起电流自由流动，因为这时会形成电子空穴对，而不再需要光照射二极管来产生电流。

图4-20: 镓砷化镓(InGaAs)材料APD的电流与反向扫描电压的关系曲线



4.4 各种高阻测量的应用

静电计能够测量高值电阻，其方法可以采用加电流测电压，也可以采用加电压测电流。这些方法曾经在第2.4节中讨论过。带有电压源的皮安计也可以测量高阻。高阻测量的各种应用包括：表面绝缘电阻测试、绝缘材料和半导体的电阻率测量以及高阻值电阻器的电压系数测试等。

4.4.1 印制电路板的表面绝缘电阻测试

概述

印制电路板的表面绝缘电阻 (SIR) 低会大大降低电路板的电路性能。影响电路板表面绝缘电阻的因素包括：电路板的材料、板的涂敷情况（如阻焊剂、涂敷层）、板的清洁程度和相对湿度等。

要测量的绝缘电阻数值的典型范围在 $10^7\Omega$ 到 $10^{16}\Omega$ ，所以必须使用静电计或皮安计来进行测量工作。本节介绍使用 6517A 静电计电压源测量表面绝缘电阻的情况。在某些测量工作中，可以使用 6487 皮安计电压源代替 6517A 静电计进行测量。

基本测试方法

绝缘电阻测试的步骤包括样品准备、条件控制和测量样品等。根据特定的测试方法，具体的步骤可能会有所变化。

在准备阶段，先对样品进行视觉检查以寻找缺陷。然后，把采用聚四氟乙烯材料绝缘的引线连到样品上。另一种方法是使用带有板卡边缘连接器的测试板，以方便和测试系统的连接。最后，根据测试方法的要求，对样品进行清洁和干燥处理。准备工作完成以后，通常将样品放在具有温度和湿度控制的环境中。在放入此环境之前、之中和之后都要对样品进行绝缘电阻测量。

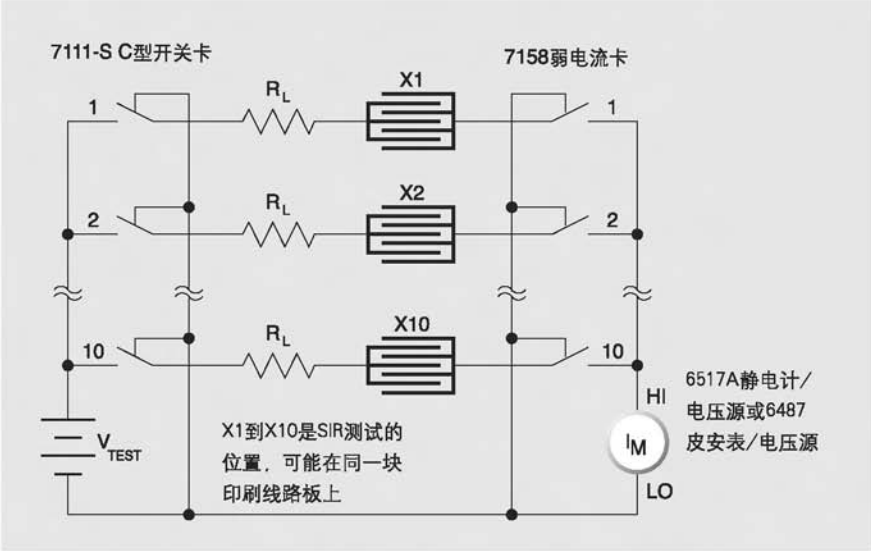
为了进行测量，在预定的时间（通常为 60 秒钟）内，给样品施加恒定的电压。然后，用皮安计或静电计测量产生的电流。

测试配置情况

图4-21 介绍一个10个测试点的绝缘电阻测量系统。可以认为每个测试点都是一个绝缘的电阻器。6517A型静电计施加偏置电压(V_{TEST})，并测量漏电流，然后计算出每个电阻器的电阻值。7001 型开关系统将

静电计和电压源切换到每个对象，X1到X10。电压通道由7111-S型40通道C类开关卡来切换，而电流通道则由7158型弱电流扫描器卡来切换。注意，当使用7111-S型卡时，最大的工作电压限制在110V。

图4-21:测量10个测试点的表面绝缘电阻测试系统



为了测量X1样品，7111-S型卡上的通道1和7158型卡上的通道1闭合。这将为X1电阻器施加偏置电压，经过规定的“浸润”时间以后，测量所产生的电流。为了测量X2电阻器，7111-S型卡和7158型卡上的通道1都断开，而这两个卡上的通道2都闭合。同样，在希望的浸润时间之后测量电流。

电阻器 (R_L) 是电流限制电阻器，用来保护开关和静电计不受大电流的损害。这些电阻器的阻值应当使其在最大测试电流时的电压降不会影响测量的准确度。

注意，当某一个通道断开时，其相应的电阻器端子连到电路的LO端。这样，在不测量该电阻器时，该电阻两端存在的电荷就会通过电路的LO端放电。

虽然这里介绍的系统只能测量10个测试点，但是只要增加扫描器卡并将7001型开关主机更换为7002型开关主机（它可以控制多达10个扫描开关卡），就可以很容易地将其扩展到测试更多的点。

4.4.2 绝缘材料电阻率的测量

概述

电阻率的测量方法是测量电阻，然后再考虑几何因素将其变换成表面电阻率或体积电阻率。测量绝缘材料电阻的理想方法是向样品施加一个已知的电压，再使用静电计或皮安计测量产生的电流。为了考虑样品的几何因素，应当使用尺寸方便的电极，例如吉时利公司的8009型电阻率测试盒。其电极满足 ASTM 标准 D257 “绝缘材料的直流电阻或电导”的要求。本节详细介绍如何使用这些测试夹具来进行表面电阻率和体电阻率的测量，以及测量电阻率时使用的变换极性和变换电压的技术。

体电阻率的测量

体电阻率是材料直接通过泄漏电流的能力的度量。体电阻率定义为边长1厘米的立方体绝缘材料的电阻，并表示为欧姆-厘米。测量体电阻率时，将样品放在两个电极之间，并在两个电极之间施加一个电位差。产生的电流将分布在测试样品的体内，并由皮安计或静电计来测量。电阻率则由电极的几何尺寸和样品的厚度计算出来：

$$\rho = \frac{K_v}{t} \cdot \frac{V}{I}$$

其中： ρ = 体电阻率（欧姆-厘米）

K_v = 由测试盒的几何尺寸决定的体电阻率测试盒的常数
（厘米²）

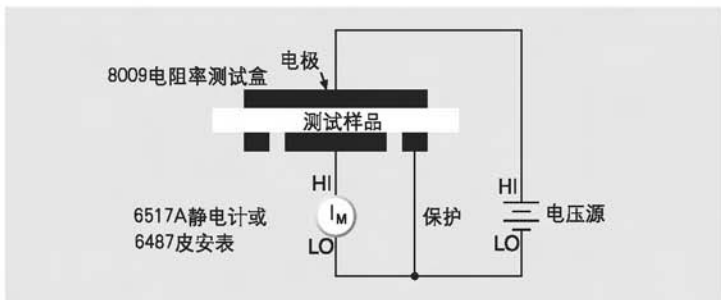
V = 施加的电压（伏特）

I = 测得的电流（安培）

t = 样品的厚度（厘米）

图4-22 介绍一种符合 ASTM D257 标准的测量体电阻率的配置情况。在此电路中，安培计的 HI 端连在底部的电极上，电压源的 HI 端连在顶部的电极上。安培计的 LO 端和电压源的 LO 端连在一起。底部的外电极连到保护端（安培计的 LO 端）以避免在测量中计入表面泄漏电流。

图4-22：体电阻率



表面电阻率的测量

表面电阻率定义为材料表面的电阻，并表示为欧姆（通常称为方块电阻）。其测量方法是将两个电极放在测试样品的表面，在电极之间施加一个电位差，并测量产生的电流。表面电阻率计算如下：

$$\sigma = K_s \cdot \frac{V}{I}$$

其中： σ = 表面电阻率（欧姆）

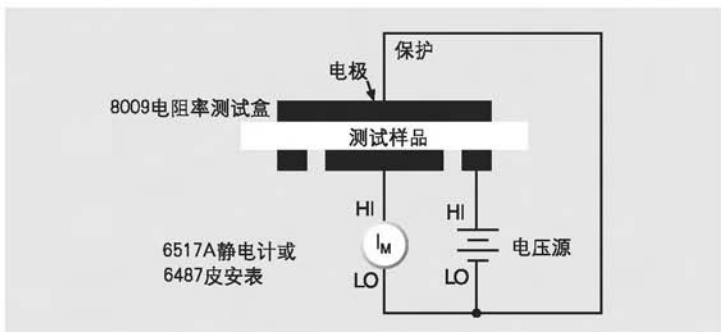
K_s = 由测试盒的几何尺寸决定的表面电阻率测试盒的常数

V = 施加的电压（伏特）

I = 测得的电流（安培）

图4-23 是测量表面电阻率的配置情况。这个配置类似于进行体电阻率测量的电路，只是现在电阻是在底部的两个电极之间测量的。注意，顶部的电极接保护，所以只有流经绝缘体表面的电流才被皮安计所测量。

图4-23：表面电阻率



测试参数

体电阻率和表面电阻率的测量决定于几个因素。首先，它们是所加电压的函数。有的时候，我们有意地改变电压，以确定绝缘体电阻率对电压的依赖关系。电阻率还随着充电时间的长度而变化。由于材料按指数形式不断充电，所以施加电压的时间越长，测量出的电流就变得越低。

湿度对表面电阻率测量有重大的影响，对体电阻率的测量也有影响，只是其程度要小一些。湿度将使表面电阻率的测量结果比正常情况低一些。

为了对特定的测试工作进行准确的比较，在一次测试和另一次测试之间，施加的电压、充电时间和环境条件都应当保持恒定。

使用 8009 型电阻率测试盒

使用 8009 型电阻率测试盒时不需要进行样品准备工作。这个测试夹具提供标准化的电极配置，不需要在样品上喷涂电极或使用水银填充的环。使用这个测试夹具时，推荐的样品尺寸为直径 2.5 到 4 英寸，厚度可达 0.125 英寸。

某些特别硬的样品，如玻璃、环氧树脂和陶瓷等需要在不锈钢电极和样品表面之间有一个接触面。8009 型备有顶部和底部电极的导电橡胶，以增强样品和测试夹具之间的表面接触。由于电极的面积变成了接触介质的面积，所以需要特别注意。如果与电极的配置和尺寸不同，系统提供的变换常数可能无效。

8009 型采用了一种安全互锁机构，在测试夹具的盖子关闭之前，高电压不能施加到电极上。此装置还对样品进行屏蔽，使其不受静电干扰的影响。

偏置修正技术

在测量电阻率非常高的材料时，背景电流可能会引起测量误差。背景电流可能是由材料中储存的电荷（介电吸收）、静电或摩擦电的电荷或压电效应引起的。背景电流可能等于或大于所加电压源激励出的电流。如果背景电流和测量的电流同极性，那么测量出的电流值将会比

真值大得多。如果背景电流是反极性的，那么这种不希望有的电流可能会引起反极性的电流读数。这就是说，电流的极性和所加电压的极性相反，于是计算出的电阻将为负值。为了解决这个问题，采用变换极性和变换电压的方法实际上可以消除背景电流对样品的影响。

变换极性法

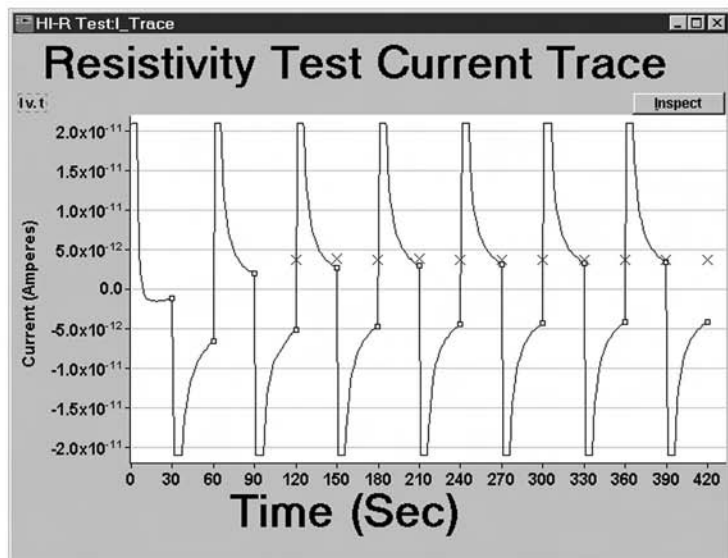
变换极性法施加一个正极性的偏置电压，然后在规定的延迟时间后测量电流。接着将极性反向，经过同样的延迟时间再测量电流。这种极性反转过程可以重复任意的次数。根据最近的电流测量结果，按照加权平均可以计算出电阻值。

6517A 型静电计与变换极性法已被做成一个现成的测试程序。使用这个方法，用户输入测试电压、测量时间和重复次数。仪器就计算出最后的电阻值并将其存入存储器。

6524型高阻测试软件使用户能够观察由施加变换极性测试电压所产生的实际电流波形。典型的波形示于图 4-24。注意在使用正、负测试电压时电流的指数衰减情况。图中标记出的 X 表示根据最后几次测量结果的加权平均计算出的电流。

除了高阻测试之外，该软件还包括其它三种程序。高阻步进响应程序 (HI-R Step Response Program) 分析加上一个电压激励后产生的电流瞬变过程，并能用来确定对给定样品的合适的测量时间。高阻扫描测试 (HI-RSweep Test) 程序能够在扫描下列参数之一的同时测量电流或电阻。可以扫描的参数有：变换极性的电压、偏置电压或测量时间。高阻、温度和相对湿度 (HI-R, T and RH) 程序可以画出电阻对时间的曲线，使用适当的探头还可以画出电阻对温度或相对湿度的曲线。

图 4-24 由施加变换极性电压产生的实际电流波形



变换电压法

6487 型皮安计电压源具有内置的变换电压极性欧姆模式。这种模式将进行两次电流测量，一次在用户规定的测试电压下进行测量，另一次在 0V 下进行测量。这种模式通过确定由每个电压产生的 2 个电流差，可以消除掉背景电流的影响。

4.4.3 半导体电阻率的测量

概述

依据掺杂水平的不同，半导体材料可能有很高的电阻率。有几种因素可能会使测量这些材料电阻率的工作复杂化，其中包括与材料实现良好接触的问题。已经设计出专门的探头来测量半导体晶圆片和半导体棒的电阻率。这些探头通常使用硬金属，如钨来制作，并将其磨成一个探针。在这种情况下接触电阻非常高，所以应当使用四点同线 (collinear) 探针或者四线隔离探针。其中两个探针提供恒定的电流，而另外两个探针测量一部分样品上的电压降。利用被测电阻的几何尺寸因素，就可以计算出电阻率。

看起来这种测量可能是直截了当的,但还是有一些问题需要加以注意。对探针和测量引线进行良好的屏蔽是非常重要的,其理由有三点:

1 电路涉及高阻抗,所以容易受到静电干扰。

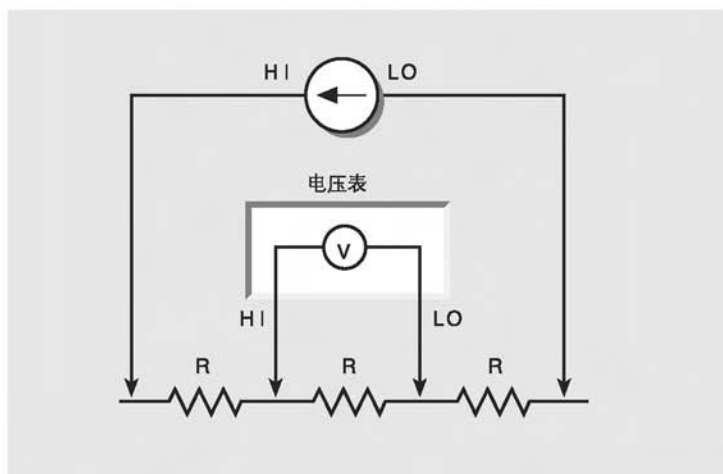
2 半导体材料上的接触点能够产生二极管效应,从而对吸收的信号进行整流,并将其作为直流偏置显示出来。

3 材料通常对光敏感。

四探针技术

四点同线探针电阻率测量技术用四个等距离的探针和未知电阻的材料接触。此探针阵列放在材料的中央。图 4-25 是这种技术的图示。

图4-25：四点同线探针法测量电阻率



已知的电流流过两个外部的探针,而用两个内部的探针测量电压。
电阻率计算如下:

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \times t \times k$$

其中: V = 测量出的电压 (伏特)

I = 所加的电流 (安培)

t = 晶圆片的厚度（厘米）

k = 由探头与晶圆片直径之比和晶圆片厚度与探头分开距离之比决定的修正因数。

如图 4-26 所示，更实际的电路还包括每个探针的接触电阻和分布电阻（ r_1 到 r_4 ）、电流源和电压表从其 LO 端到大地的有限的电阻（ R_c 和 R_v ）和电压表的输入电阻（ R_{IN} ）。依据材料的不同，接触电阻（ r ）可能会比被测电阻（ R_2 ）高 300 倍或更高。这就要求电流源具有比通常期望数值高得多的钳位电压，而电压表则必须具有高得多的输入电阻。

电流源不是与大地完全隔离的，所以当样品的电阻增加时，就更需要使用差分式静电计。存在问题的原因是样品可能具有非常高的电阻（ $10^8\Omega$ 或更高），此数值和静电计电压表的绝缘电阻（输入 LO 端到壳地， R_v ）具有相同的数量级。如图 4-26 所示，这样就会有交流电流从电流源的 LO 端，经过样品，流到电压表的 LO 端，再流回地。当电压表测量探头 2 和探头 3 之间的电压降时，该交流电流在 r_3 上产生的电压降就会引起错误的结果。

图4-26：四点同线探针法的实际电路

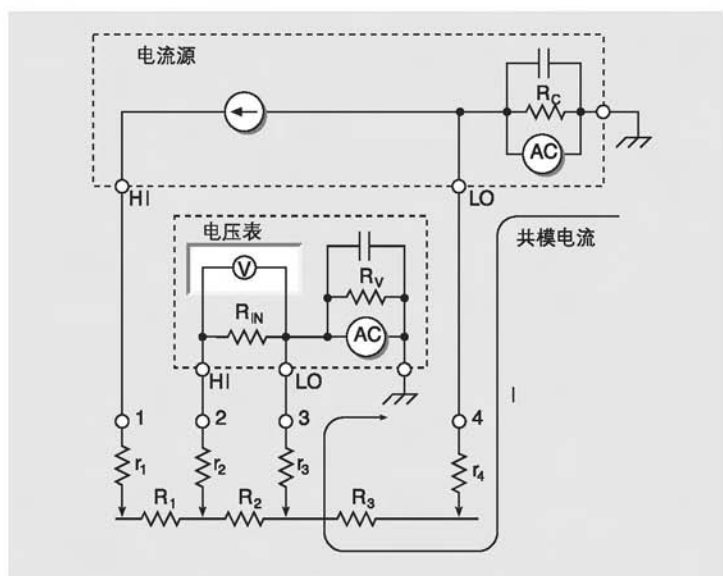
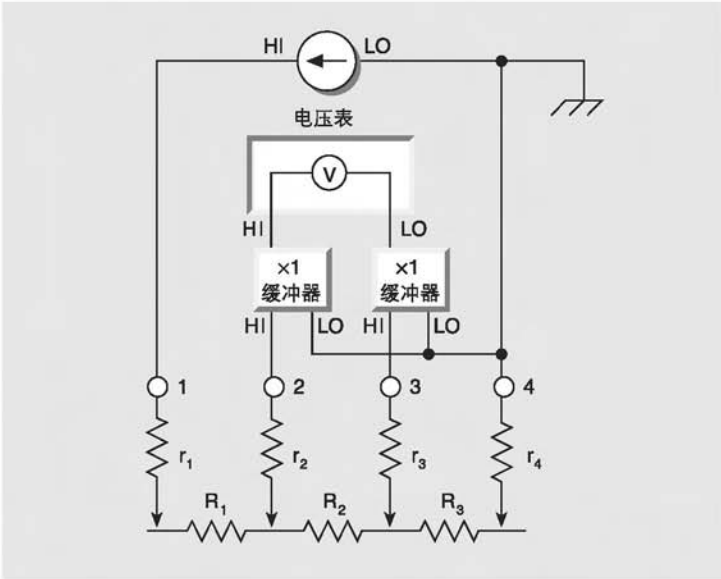


图4-27：差分式四探针测量



使用两台静电计就解决了这个问题，如图 4-27 所示。电压表将读出两个静电计的缓冲输出之间的差值，该值等于 R_2 上的电压。数值 r_1 、 r_2 、 r_3 和 r_4 代表探头与样品材料接触的电阻。单位增益缓冲器具有很高的输入阻抗，所以几乎没有共模电流流过 r_3 ，于是可以很容易地计算出 R_2 的数值。该缓冲器可以是一对 JFET 运算放大器或者是两个具有单位增益输出的静电计。

为了避免泄漏电流，使用隔离的或者带保护的探头与样品接触。电流源应当处于保护模式。有关保护问题更详细的讨论请参见第 2.2.1 节。

范德堡（van der Pauw）技术

测量电阻率的范德堡（van der Pauw）技术也采用恒流的方法。这种方法在测量非常小的样品时特别有用，因为这时样品的尺寸和接触点的距离并不重要。这种技术采用在扁平的、任意形状的样品上放置四个隔离的接触点。围绕样品进行八次测量。如图 4-28 所示。

然后计算两个电阻率值 ρ_A 、 ρ_B 如下：

$$\rho_A = \frac{\pi}{\ln 2} f_A t_s \frac{(V_2 + V_4 - V_1 - V_3)}{4I}$$

$$\rho_B = \frac{\pi}{\ln 2} f_B t_s \frac{(V_6 + V_8 - V_5 - V_7)}{4I}$$

其中: ρ_A 和 ρ_B 是以欧姆为单位的电阻率

t_s 是以厘米为单位的样品的厚度

$V_1 - V_8$ 代表电压表测量出的电压

I 是以安培为单位的流过样品的电流

f_A 和 f_B 是基于样品对称性的几何因数, 并与以下方程式所示的两个电压比 Q_A 和 Q_B 有关 (对于完美对称性的情况, $f_A = f_B = 1$)。

Q_A 和 Q_B 可以由测量出的电压计算如下:

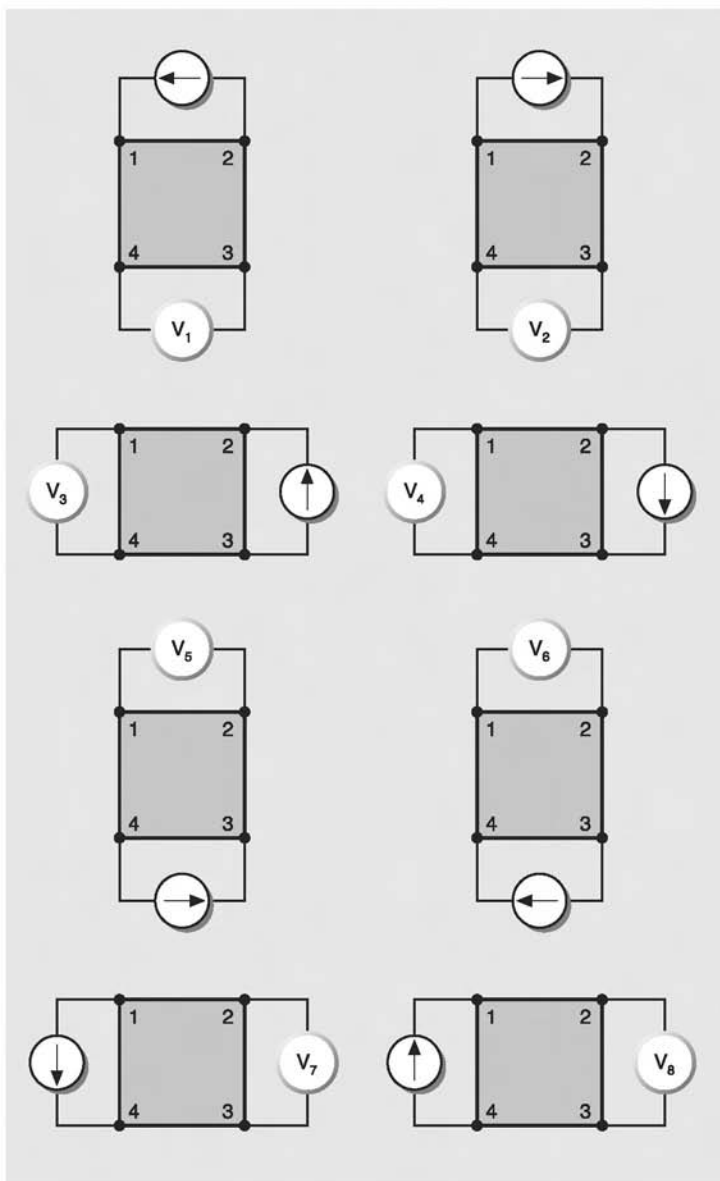
$$Q_A = \frac{V_2 - V_1}{V_4 - V_3}$$

$$Q_B = \frac{V_6 - V_5}{V_8 - V_7}$$

并且, Q 和 f 的相互关系如下:

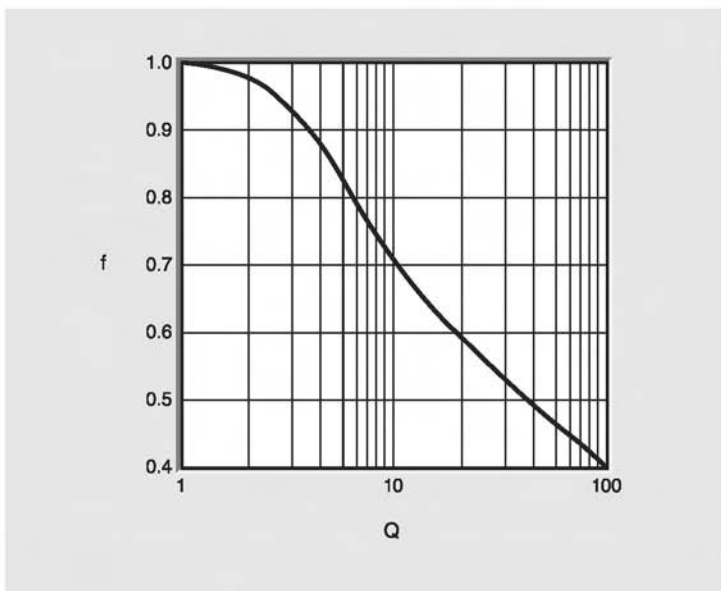
$$\frac{Q-1}{Q+1} = \frac{f}{0.693} \operatorname{arccos} h\left(\frac{e^{0.693/f}}{2}\right)$$

图4-28：van der Pauw电阻率测量



此函数的曲线示于图4-29。一旦决定了 Q ，就可以从这个曲线图中找出 f 的数值。

图4-29: f-Q曲线



注意, 如果 ρ_A 和 ρ_B 相互之间不在10%之内, 那么该样品就不够均匀, 不能准确地确定电阻率, 应当放弃使用这种方法。

一旦知道了 ρ_A 和 ρ_B , 则平均电阻率(ρ_{AVG})就可以计算如下:

$$\rho_{AVG} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2}$$

与四点同线探针法一样, 如果样品电阻和电压表的绝缘电阻(电压表的公共端到地)是同一数量级的, 就可能需要使用差分测量。如图4-30a所示, 共模电流可能流过样品的4和3端子之间。图4-30b说明使用单位增益缓冲器和差分测量如何能够解决这个问题。现在, 在4和3端子之间流过的共模电流非常小。

图4-31所示的系统使用吉时利公司的7065型霍尔效应卡进行van der Pauw测量。该系统包括下列仪器: 7065型霍尔卡、2000型数字多用表、6220型电流源、6485型皮安计和7001型开系统。使用霍尔效应卡将电流源和电压表自动切换到样品的所有各边。这样就不再需要进行4次连接和断开测试引线的工作。此外, 该卡还具有内置的单位增益缓冲器, 很容易对高电阻率样品进行差分测量。如果再加上一

个受控的磁场，还能用这个系统来确定样品的霍尔系数。

图4-30a：由共模问题引起的误差测量

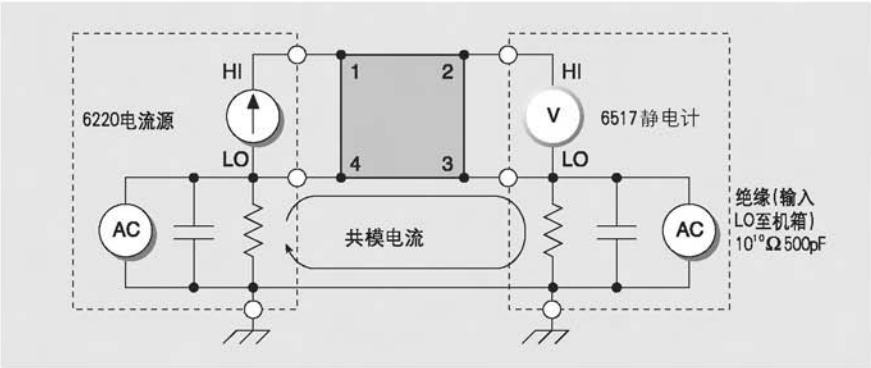
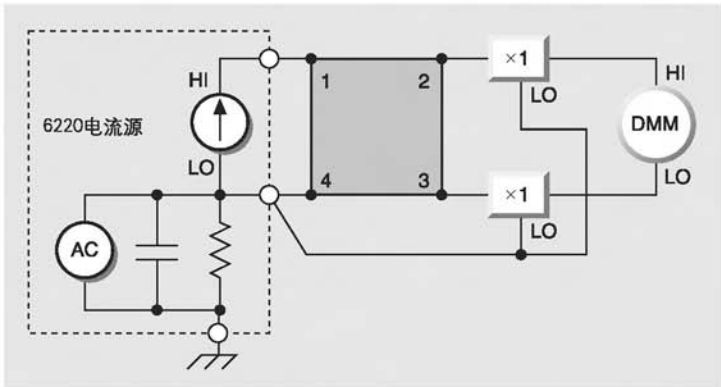


图4-30b：利用差分测量消除共模误差



4200-SCS 型半导体特性测试系统能够使用四点同线探针法或 van der Pauw 法测量电阻率。测量高电阻样品需要使用输入阻抗非常高 ($>10^{14}\Omega$) 的电压表和能够输出非常小电流 ($<1\text{nA}$) 并具有高输出阻抗的电流源。4200-SCS 能配置成具有多个 SMU，每个 SMU 都具有高输入阻抗 ($>10^{16}\Omega$)、并能准确地输出弱电流，所以非常适合这种应用工作。

可以用配置四个 SMU 和四个前置放大器的 4200-SCS 来进行 van der Pauw 法的电阻率测量。每个 SMU 连到样品的一边，如图 4-32 所示。交互测试软件模块 (ITM) 用来控制各个 SMU 的功能。

图4-31：van der Pauw法测量系统

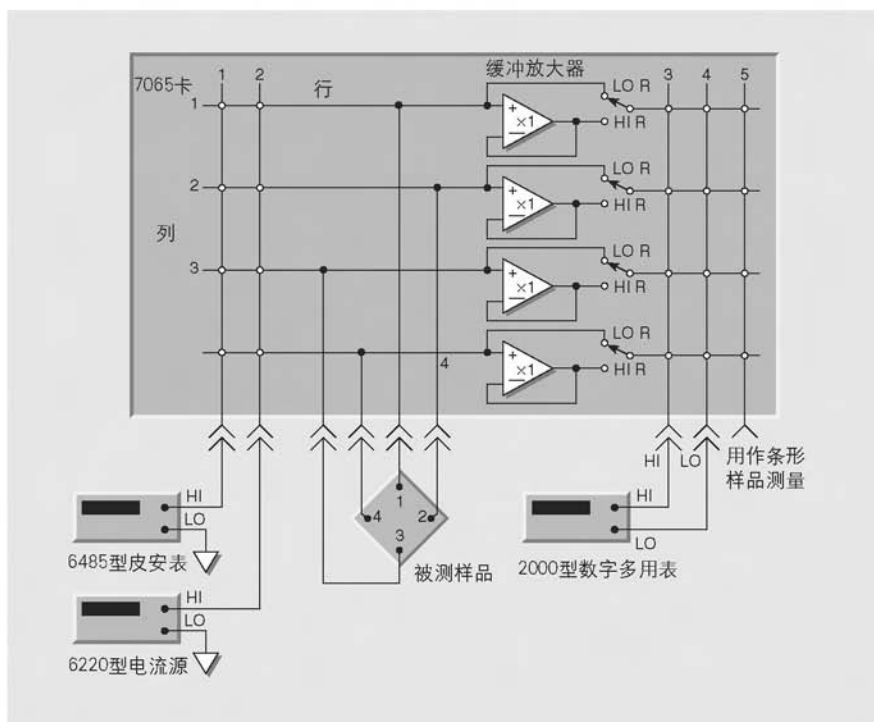
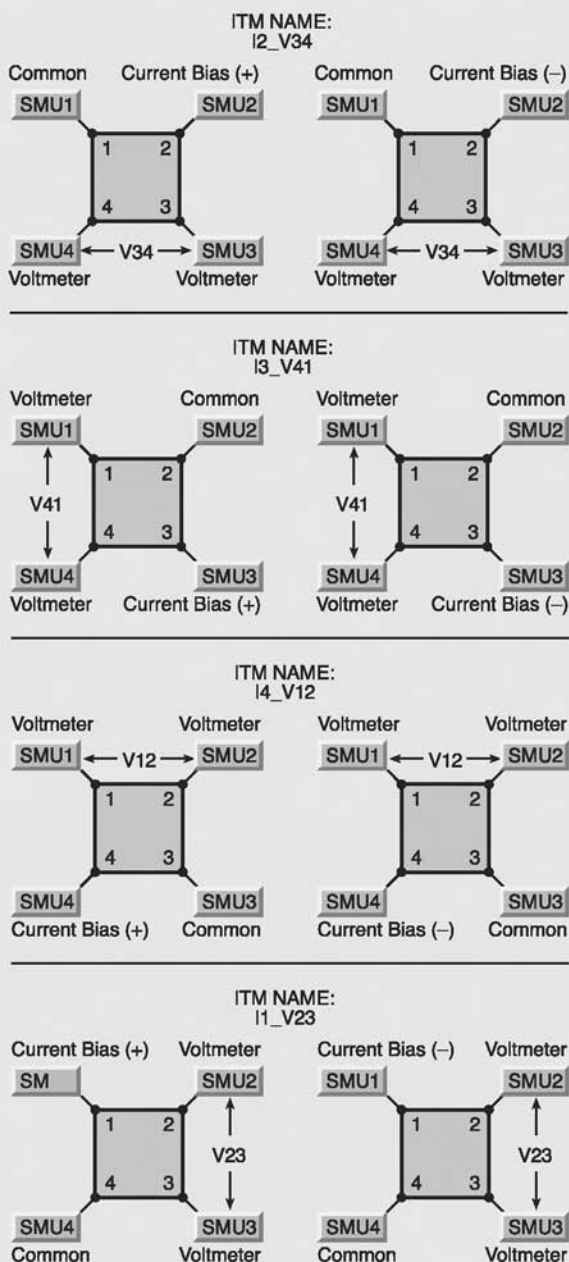


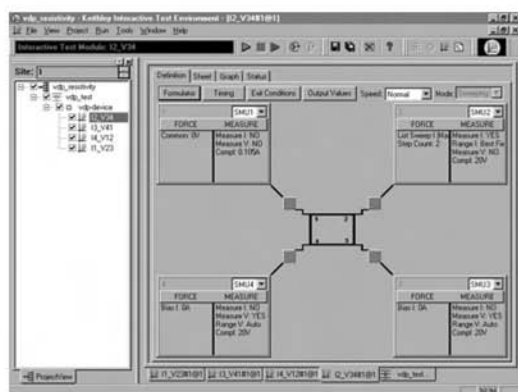
图4-32：用于van der Pauw法测量的4200-SCS 型SMU配置情况



通过交互式编程，每个SMU的功能都能自动地改变为电流源、电压表或者公共端，以便在样品的各个边上输出电流和测量电压。交互地改变每个SMU的功能就不需要使用外部的开关将电流源和电压表切换到样品的各个端子上。

吉时利公司 4200-SCS 测量 van der Pauw 电阻率的“方案”可以从吉时利公司获得。图 4-33 显示出该方案的屏幕显示情况。在这个例子中，SMU1 配置为公共端，SMU2 为电流偏置，SMU3 和 SMU4 则配置为电压表。

图 4-33： 4200-SCS 在 van der Pauw 电阻率测量应用中的屏幕显示



还可以用一个电磁铁与 4200-SCS 配合来确定霍尔系数。

4.4.4 高值电阻器电压系数的测量

概述

当施加的电压变化时，非常高值电阻器的阻值可能会发生很大的变化。这种现象称为电阻器的电压系数。电压系数就是每单位电压变化所引起的电阻值的百分变化量，并定义为：

$$\text{电压系数 } (\% / V) = \frac{(R_2 - R_1)}{R_1} \times \frac{1}{(V_2 - V_1)} \times 100\%$$

另外，电压系数也可以用 ppm 为单位来表示如下：

$$\text{电压系数 } (\text{ppm}/V) = \frac{(R_2 - R_1)}{R_1} \times \frac{1}{(V_2 - V_1)} \times 10^6$$

其中： R_1 = 施加第一个电压 (V_1) 时计算出的电阻值。

R_2 = 施加第二个电压 (V_2) 时计算出的电阻值。

$$V_2 > V_1$$

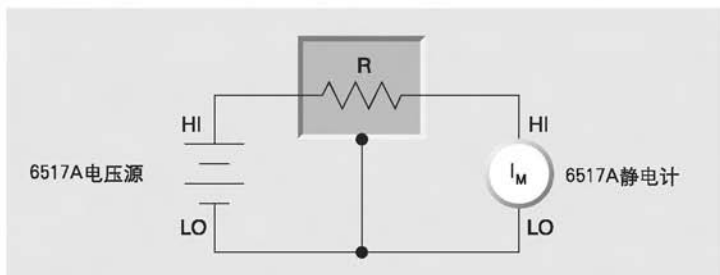
一个 $10\text{G}\Omega$ 电阻器电压系数的典型值大约为 $-0.008\%/V$ 或者 $-80\text{ppm}/V$ 。所以，如果一个测量电路需要使用高阻值电阻器的话，在进行误差分析的时候，除了考虑所有其它的时间和温度等误差因素之外，还必须考虑由电阻器电压系数所引起的误差。

使用 6517A 确定电压系数

测量高电阻的电压系数需要输出电压并测量小电流。这时需要使用诸如 6517A 这样的静电计来进行此项测量工作。6517A 具有内置的测试程序来决定电压系数。该测试在两个不同的电压之下进行电阻测量，然后计算出电压系数。电压系数显示为每伏的电阻值百分比变化量。

图 4-34 是使用 6517A 进行电压系数测量的典型配置。为了尽量降低噪声和泄漏电阻的影响，应当将电阻器放在一个屏蔽、保护的测试夹具中。将测试夹具的屏蔽端连到静电计的 LO 端，再将静电计的 LO 端连到源的 LO 端。将静电计的 HI 端连到电阻器的一端，将电压源的 HI 端连到电阻器的另一端。

图4-34：6517A静电计测量电压系数



首先在测试电压 V_1 之下测量电阻器，得到 R_1 。接着在测试电压 V_2 之下 (V_2 大于 V_1) 测量电阻器，得到 R_2 。接着利用概述中给出的公式计算电压系数。

4.5 各种电荷测量的应用

第一章和第二章中已经分别介绍了库仑计和用于进行电荷测量的各种技术。电荷测量的应用包括测量电容和测量物体上的静电荷

等。正如第2.3.7节所述，也可以用电荷测量技术来测量很小的电流(10fA)。

4.5.1 电容的测量

概述

可以使用静电计的库仑功能和步进电压源来测量电容。这种技术对于测量电缆和连接器特别有用，因为其电容测量范围可以从10pF到几百纳法。将未知电容与静电计输入和步进电压源相串联。根据下述公式进行电容计算：

$$C = \frac{Q}{V}$$

测试方法

使用6517A型静电计进行电容测量的基本配置如图4-35所示。使用仪器的电荷（库仑）模式，其内部电压源提供步进电压。在电压源即将打开之前，关闭仪器的零点检查功能并使用REL功能抑制电荷读数，使显示为零。然后，打开电压源并立即记录电荷读数。电容计算公式如下：

$$C = \frac{Q_2 - Q_1}{V_2 - V_1}$$

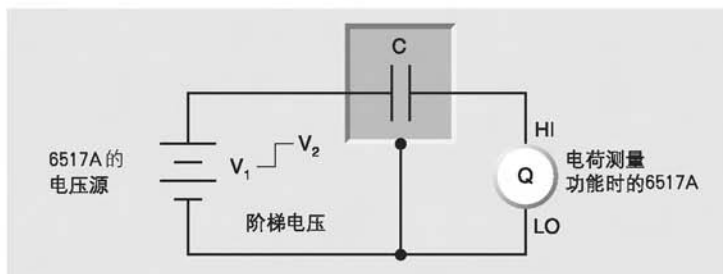
其中： Q_2 = 最后的电荷

Q_1 = 初始电荷，假定为零

V_2 = 步进电压

V_1 = 初始电压，假定为零

图4-35：使用6517A型静电计测量电容



记录完读数以后，将电压源复位到0V，使器件的电荷泄放掉。在触摸器件之前，确认该器件已经放电到安全的电平。

应当将未知电容放在屏蔽的测试夹具中。将屏蔽连到静电计的输入LO端，其输入高端HI应当连到未知电容的最高阻抗端。例如，在测量一段同轴电缆的电容时，将静电计的输入HI端连到电缆的内导体，利用电缆的屏蔽将静电干扰对测量的影响减到最小。

如果电荷上升速率特别快，由于输入级瞬间时间变得饱和，测量的结果可能会出错。为了限制静电计输入端的电荷传输速率，在电压源和电容之间串联一个电阻器。在电容值大于1nF时，情况尤为如此。典型串联电阻器的阻值应为10k Ω 到1M Ω 。

4.5.2 使用法拉第杯测量物体上的静电荷

概述

绝缘体只允许电子作轻微的运动，所以静电荷可以在绝缘材料上积累起来并产生高压。问题通常不在于物体上的静电本身，而是在于物体放电时所产生的电火花。因此，为了理解和控制这种问题，必须对物体上的静电进行测量。可以把物体放在法拉第杯中，用静电计测量其电荷。法拉第杯的方法可以用来测量各种物质和物体（诸如，塑料、薄膜、液体、气体和电子元件等）上的电荷。

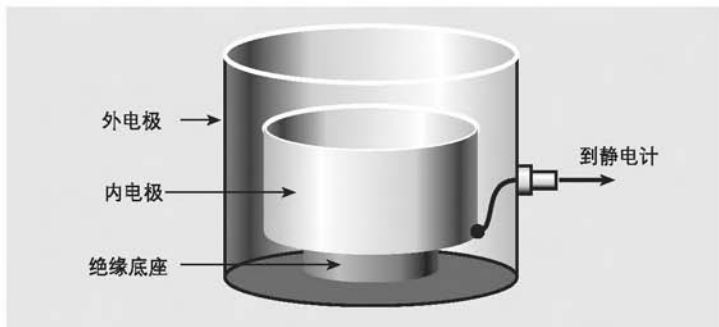
法拉第杯（有时又称为法拉第笼或法拉第桶）是用金属板或金属网制成的封闭体。由于闭合、中空导体中的电场为零，所以，使用法拉第杯就把放在其内部的物体屏蔽起来，不受大气的或任何寄生的电场的影响。这样就能准确地测量物体上的电荷。

法拉第杯介绍

图4-36示出一个法拉第杯。它由两个电极组成，一个在另一个的内部，由绝缘体分开。内电极连到静电计的HI端，外电极连到静电计的LO端。当带电物体放到内电极里面的时候，就有感生电荷流过静电计。

法拉第杯的形状可以各式各样，决定于被测物体的尺寸和形状。圆柱形和球形是最方便的选择——常常可以使用诸如咖啡罐或油漆罐等。电极可以由任何导电材料制作。支撑用的绝缘体应当用电阻非常高的材料，如聚四氟乙烯或陶瓷来制作。

图4-36：法拉第杯



为了连接方便，在外电极上安装一个BNC连接器。将BNC的外壳或屏蔽连到外电极，然后把BNC连接器的内导体连到内电极。用一个适配器把BNC连接器连到静电计的三同轴输入端。

测试方法

为了进行测试，用屏蔽电缆将静电计和法拉第杯连接起来。打开静电计，选择库仑功能，然后关闭“零点检查”。按“Rel”使显示为零。将被测的带电物体放入法拉第杯。立刻记录静电计上的电荷读数。不要等待读数稳定，因为静电计的输入偏置电流会连续地对仪表的输入端充电。这一点在未知电荷为皮库仑级时特别重要。如果物体为导体，那么只要它与电极接触就立即会放电。为了准备进行下一次测量，打开“零点检查”重新将仪器置零。

4.6 各种低电压测量的应用

第一章和第三章已经分别介绍了纳伏表和进行低电压测量的各种技术。特别是第3.2节讨论了能够严重影响精密测量的各种误差源。低电压测量的应用包括标准电池的比对、高分辨率的温度测量以及微量热计等。

4.6.1 标准电池的比对

概述

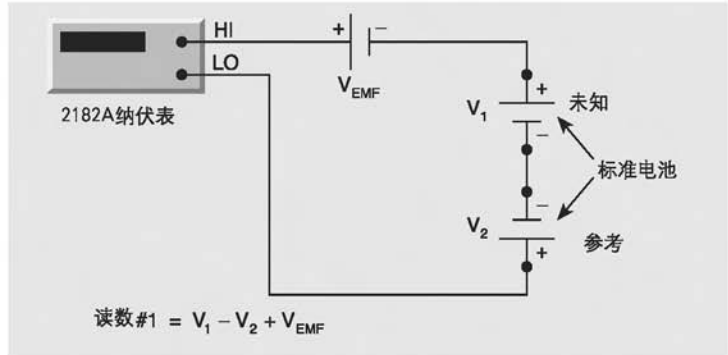
标准电池是很多电学标准实验室用作电压参考标准的电化学电池。如果处理得当，标准电池是非常稳定的。单个电池电压的当前值是与一个已知的参考标准进行比对，从一系列测得的电压差中计算出来的。

由于单个电池之间的电压差可能只有几个微伏，所以进行精密测量就需要使用纳伏表和低电压测量技术。下面的应用实例说明比较两个标准电池以及将标准电池和精密电压参考标准进行比较的情况。

比较两个标准电池

标准电池的相互比对需要测量参考标准电池和未知标准电池之间的电位差。各个电池的电位差由一系列反向配置连接来确定。如图 4-37 所示，标准电池 V_1 和 V_2 的负端连在一起。用铜导体将两个电池和电压表相连，以便使热电动势 (V_{EMF}) 引起的误差减到最小。

图4-37：比较标准电池时的连接方法，读数#1

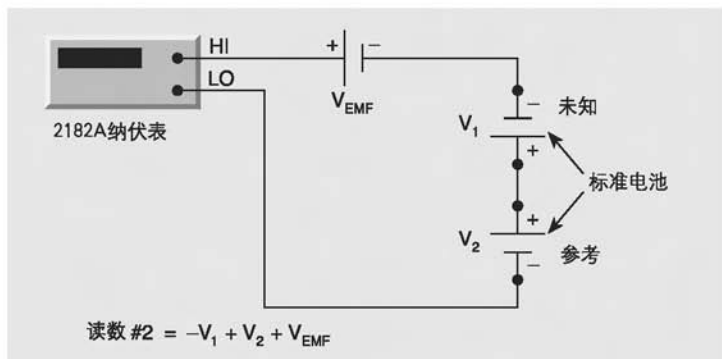


连好电路以后，特别注意避免由热电动势引起的误差。为了尽量减小热电动势的影响，将电池反向，再进行第二次测量，如图 4-38 所示。将两个读数的绝对值进行平均，计算得出一个非常小的电压差，如第 3.2.1 节的讨论所述。

在整个比对过程中，我们希望得到被测电池电压差的稳定性指标。方法是从几个冗余的读数计算出其标准偏差。

得到稳定性指标以后，就可以根据组平均值计算出每个电池的电压。每次比对通常要对几个读数进行平均。根据标准实验室建立的时间间隔定期重复这种相互比对过程。测量的结果可以画成图表，并按时间进行比较。这个过程对于保持 6 个以下电池的电压数值是非常有用的。如果要保持更多的电池，则可以使用由计算机控制的自动扫描器，以便更加有效地进行管理。

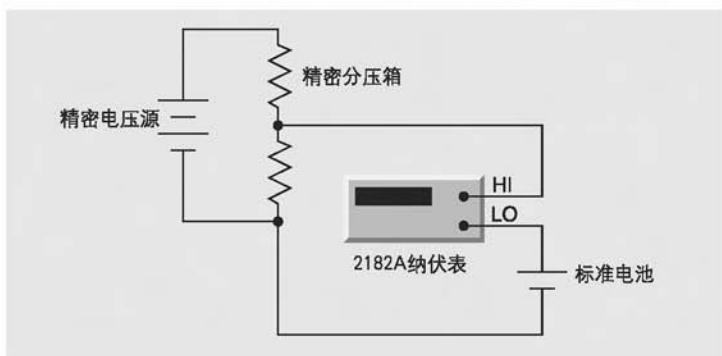
图4-38:比较标准电池时的连接方法，读数#2



精密电压源和标准电池进行比较

可以用标准电池来决定精密直流电压源的电压数值，如图4-39所示。用精密分压箱将电压源的电压粗略地分压至标准电池的电压。用纳伏表作为检零计来决定分压器输出和标准电池之间的电压差。只要分压比和标准电池的电压值为已知，就可以决定精密直流源的电压数值。注意不要从标准电池中吸取任何电流，因为这将会引起标准电池的电压漂移。

图4-39：精密直流电压源和标准电池进行比较的连接方法



分压器的输出阻抗一般可能比标准电池的阻抗要高，所以纳伏表的HI端必需接到分压器的输出，如图4-39所示，以避免共模电流在分压器电阻上产生附加的电压降。

4.6.2 高分辨率温度测量和微热量测量

概述

微热量测量用来决定各种能量关系。在进行小尺寸样品或者慢加热速率的量热学实验时,常常需要使用微热量测量技术。根据具体的应用情况,微量热计的设计可能有很大的变化,并且很多都是用户自己设计制造的。在进行测试时,各种热量测量技术使用户能够测量小的温度变化。微热量测量实验可能要求测量低达 $100\mu\text{C}$ 的温度变化。本章介绍两种温度传感器和采用热偶及 2182A 型纳伏表的微热量测量系统。

温度传感器

热敏电阻和热偶是各种测温学中常用的传感器类型。传感器的选择依赖于特定的微热量测量应用。

热敏电阻是对温度敏感的电阻器,具有很好的线性度和准确度特性。这些器件需要激励信号,所以会以热的形式耗散功率,从而可能导致测量的误差。

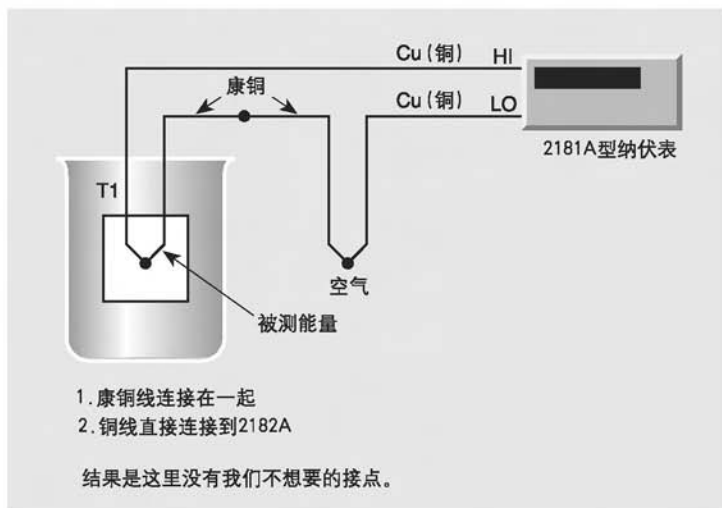
热偶是最广泛使用的温度传感器类型。这种坚固而经济的器件是由两种不同的金属结合而成。热偶有几种不同的类型,覆盖宽广的温度范围。根据热偶的类型和温度范围,热偶的线性度有所变化。

介绍

根据要进行的实验的情况,微热量计的设计可能有很大的不同。这里介绍的应用工作使用一个简单的量热计来进行微热量测量。用差分热偶温度计测量温度。在差分测温配置中,一个热偶放在量热计的內部,另一个热偶则放在其外部。两个热偶的电压差正比于其温度差。测量的灵敏度大约为 $25\text{mC}/\mu\text{V}$ (取决于热偶的类型)。图 4-40 示出一个典型微量热计的设置情况,使用 2182A 纳伏表进行所需要的电压测量。

量热计内部的温度只需要以适中的准确度测出即可;然而,为了测量出实验期间发生的小的变化,最高的精度和分辨率是基本的要求。测量差分热偶的信号到毫度以下的分辨率,需要使用非常灵敏的电压表。依据所使用的热偶类型,2182A 能够检测出大约 $100\mu\text{C}$ 的温度变化。对于一种给定类型的热偶来说,其温度变化对应的电位变化量是一定的。

图4-40：采用温差热偶测量的微量热计



热偶可以作为一个单独的设备来校准，或者也可以作为量热计的一个组成元件就地校准。可以使用一个标准温度计在近似于测试温度的温度范围内进行热偶的校准；也可以用一个固定点的参考标准（例如氧的沸点）来进行校准。

在进行测试之前，必须确定量热计的热容量。确定热容量的方法可以采用向其加入已知的热量，然后直接测量所引起的温度增加量。精确确定热量的方法采用向已知的电阻送入一个准确的电流，还可以用标准的化学反应进行加热来确定热量。

用热偶进行低温测量意味着要测量低电平电压，所以这时要特别注意考虑热电动势及磁场对测量准确度的影响。有关这方面的详细情况请参阅第3.2节。

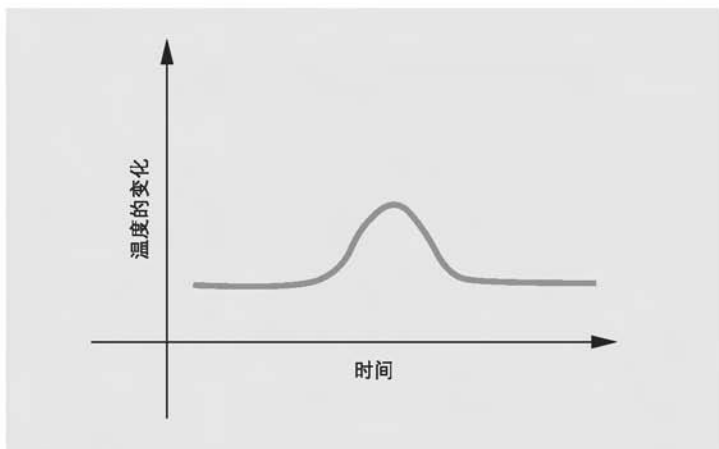
运行测试

为了获得最好的结果，在2182A上选择10mV量程，并选择整数电源周期积分（INPLC）以获得最大的电源频率噪声抑制能力。打开滤波器可以进一步降低噪声。特别注意不要使滤波器的响应时间在热曲线的峰值点引起误差。慢速响应的滤波器能够对数据的峰值点起平滑的作用，从而可能会丢失重要的温度信息。2182A具有选择滤波器设置的能力，可以使系统的噪声抑制能力达到最优化，并保证合适的峰值检测能力。

在实验开始之前，量热计内、外的温度必须相同。其温度差为 0°C 相当于差分热偶的输出电压为 0V 。这时，如果发生温度变化，则认为是由实验现象所引起的。

测试完成后，可以使用校准曲线将数据转换成温度并进行分析。图4-41为一个化学反应的典型热曲线。最后的结果通常表达为热量（卡路里）或者能量（焦耳）。

图4-41：典型的热反应曲线



4.7 各种低阻测量的应用

各种低阻测量的应用包括：接触电阻、超导体电阻和导体电阻率的测量等。这些测量工作可以采用微欧姆计或者纳伏表与电流源来进行。有关精密低电阻测量方法的讨论请参见第3.3节。

4.7.1 接触电阻

概述

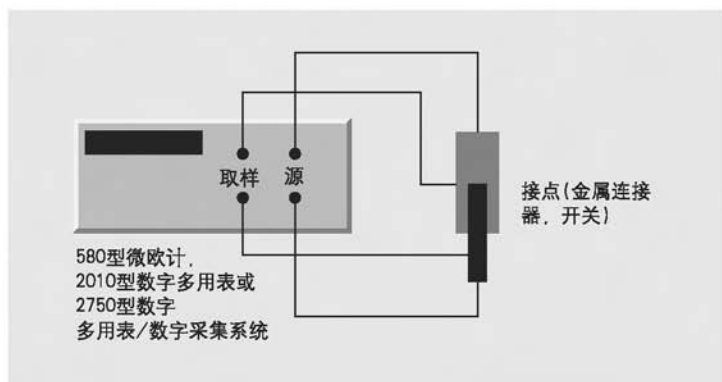
接触电阻就是电流流过闭合的接触点对时的电阻。这类测量是在诸如连接器、继电器和开关等元件上进行的。接触电阻一般非常小其范围在微欧姆到几个欧姆之间。根据器件的类型和应用的情况，测量的方法可能会有所不同。ASTM的方法B539“测量电气连接的接触电阻”和MIL-STD-1344的方法3002“低信号电平接触电阻”是通常用于测量接触电阻的两种方法。一般地说，一些基本的原则都采用开尔

文四线法进行接触电阻的测量。

测量方法

图4-42 说明用来测试一个接点的接触电阻的基本配置。使用具有四端测量能力的欧姆计，以避免在测量结果中计入引线电阻。将电流源的端子接到该接点对的两端。取样（Sense）端子则要连到距离该接点两端电压降最近的地方。其目的是避免在测量结果中计入测试引线和体积电阻（bulk resistance）产生的电压降。体积电阻就是假定该接点为一块具有相同几何尺寸的金属实体，而使其实际接触区域的电阻为零时，整个接点所具有的电阻，

图4-42：使用微欧姆计或数字多用表测量接点两端的四线电阻



设计成只有两条引线的器件有的时候很难进行四线连接。器件的形式决定如何对其进行连接。一般地说，应当尽可能按照其正常使用的状态来进行测试。在样品上放置电压探头时不应当使其对样品的机械连接产生影响。例如，焊接探头可能会使接点发生不希望的变化。然而，在某些情况下，焊接可能是不可避免的。被测接点上的每个连接点都可能产生热电动势。然而，这种热电动势可以用电流反向或偏置补偿的方法来补偿。其具体方法请参见第3.3.2节。

干电路（Dry Circuit）测试

通常，测试接点电阻的目的是确定接触点氧化或其它表面薄膜积累是否增加了被测器件的电阻。即使在极短的时间内器件两端的电压过高，也会破坏这种氧化层或薄膜，从而破坏测试的有效性。击穿薄

膜所需要的电压电平通常在 30mV 到 100mV 的范围内。

在测试时流过接点的电流过大也能使接触区域发生细微的物理变化。电流产生的热量能够使接触点及其周围区域变软或熔解。结果，接点面积增大，并导致其电阻降低。

为了避免这类问题，通常采用干电路的方法来进行接点电阻测试。干电路就是将其电压和电流限制到不能引起接触结点的物理和电学状态发生变化电平的电路。一般地说，这就意味着其开路电压为 20mV 或更低，短路电流为 100mA 或更低。

由于所使用的测试电流很低，所以需要非常灵敏的电压表来测量这种通常在微伏范围的电压降。由于其它的测试方法可能会引起接点发生物理或电学的变化，所以对器件的干电路测量应当在进行其它的电学测试之前进行。

有关干电路测试的更详细的信息请参见第 3.3.5 节。

使用微欧姆计或数字多用表

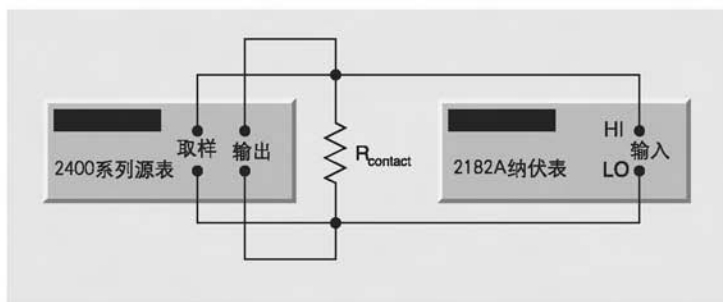
图 4-42 示出使用 580 型微欧姆计、2010 型数字多用表或 2750 型数字多用表数据采集系统进行四线接触电阻测量的基本配置情况。这些仪器能够采用偏置补偿模式自动补偿取样电路中的热电势偏置，并且还具有内置的干电路测量能力。对于大多数的应用来说，微欧姆计或数字多用表足以用来进行接触电阻的测量工作。如果短路电流或者被测电阻值比微欧姆计或数字多用表的技术指标小得很多，则必须使用纳伏表加精密电流源的组合来进行。

使用纳伏表和电流源

图 4-43 示出使用 2182A 型纳伏表和 2400 系列数字源表仪器进行接触电阻测量的测试配置情况。2400 系列仪器强制电流流过接点，而纳伏表则测量接点两端产生的电压降。为了进行干电路测试，设置数字源表的钳位电压为 20mV，这样就把电路的开路电压钳位到 20mV。为了保证钳位电压只出现在接点两端，而不是出现在测试引线的两端，该数字源表采用四线模式。在使用较大的电流时，这一点特别重要。因为和接点两端的电压降相比，测试引线两端的电压降可能会比较大。

为了避免发生瞬变现象，一定要先将电流源关闭，然后再把接点接入测试夹具或将其断开。将一个 100Ω 的电阻器直接跨接在电流源的输出端，能够进一步降低瞬变现象。

图4-43：使用纳伏表和电流源测量接触电阻



可以使用电流反向法将热电势偏置降至最小。2182A的Delta模式与数字源表仪器配合可以自动地实现这种技术。在这种模式下，2182A自动地触发电流源改变极性，然后对每一种极性触发测量一个读数。接着，2182A显示“经过补偿”的电压值：

$$\Delta V = \frac{V_1 - V_2}{2}$$

接点电阻则可计算如下：

$$R_{\text{CONTACT}} = \frac{\Delta V}{I}$$

其中：I = 测试电流的绝对值。

4.7.2 超导体的电阻测量

概述

在极低的温度下，某些金属和合金失去其对电流的电阻变成超导体。超导体的转变温度和临界电流密度是两个经常要测量的参数。超导体的转变温度是材料的电阻从有限数值变为零的温度。临界电流密度则是在特定的温度和磁场条件下，材料变成电阻性之前所能载荷的最大电流密度。这两个参数越高，超导体就越好。确定这两个参数需

要测量很小的电阻，所以纳伏表和可程控的电流源对于进行精密的测量工作是非常重要的。

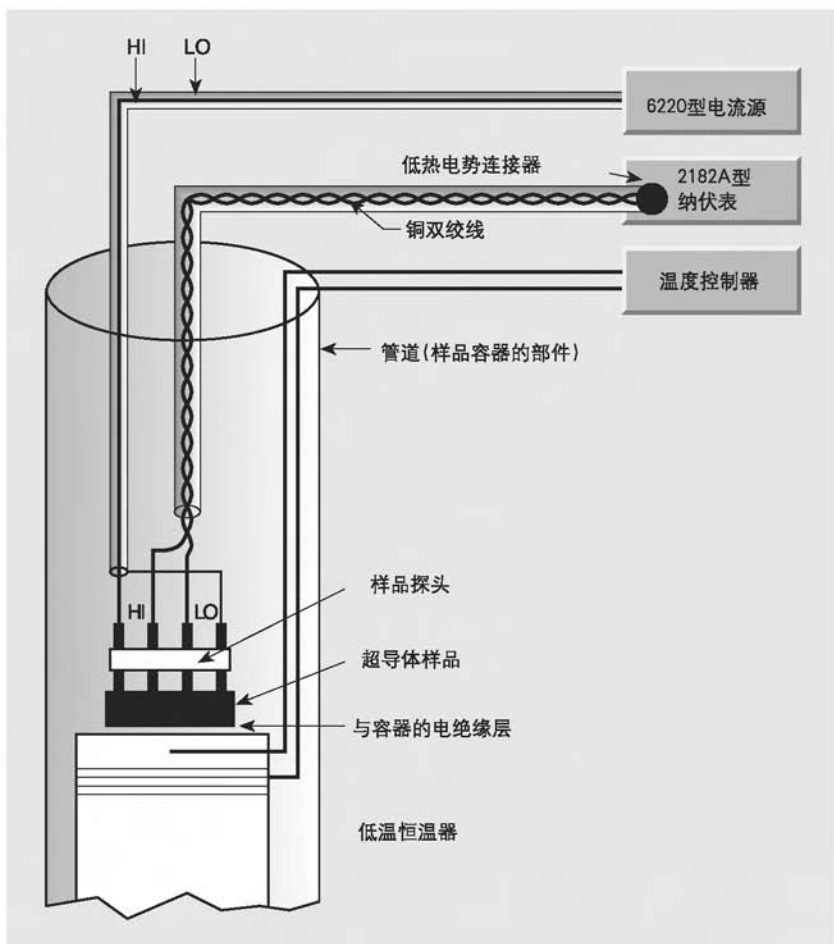
测试介绍

图4-44示出一个基本的测量超导体电阻的测试系统。该系统使用2182A型纳伏表和6220型电流源来测量电阻。电压引线应当用塞贝克(Seebeck)系数很低的材料制成。2182A型纳伏表的灵敏度对于获得精密的测量结果是很关键的，因为这种测量工作需要测量极低电压的能力。如果测量工作需要更低($\text{pV} = 10^{-12}\text{V}$)的分辨率，可以使用1801型纳伏前置放大器与2001/2002型高性能数字多用表的组合，以获得更高的灵敏度。

测量转变温度时，应当使电流源的电流低于样品的临界电流。如果电流变得过高，其损耗的功率可能会损坏样品和低温容器。然而，在测量临界电流时，电流源的输出必须能够超过样品的临界电流。如果为此需要输出超过100mA（这是6220型电流源能够给出的电流）电流的话，2440型5A电流源可能是合适的解决办法。电流源应当具有极性可编程的能力，这样就可以使用电流反向法来进行测试。

可以使用第3.2和3.3节所介绍的低电压和低电阻测量工作中使用的技术来测量电阻。采用四线测量技术是其要点。这种技术强制电流通过一对引线流过样品，而用另一对引线测量其电压降从而消除引线电阻的影响。此外，Delta法对于消除变化热电动势的影响也是很重要的，这种热电动势会影响测量的准确度。

图4-44：超导体电阻测试系统



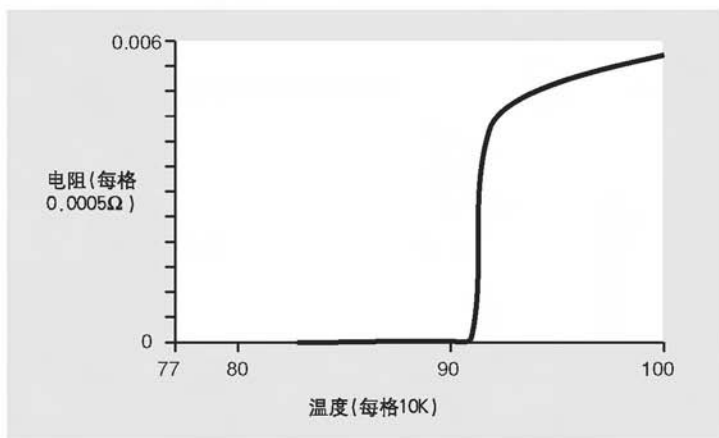
Delta 法的具体做法是在电流为一个方向时测量材料上的电压降，然后改变电流源的极性再进行第二次电压测量，接着再改变电流方向测量第三次，用三次电压测量来计算每个电阻值。第 3.3.2 节对 Delta 法作更详细的讨论。在出现明显的滞后、非线性和不对称的情况下，还可以在同一极性之下，将电流从一个数值改变到另一个数值。这样就能得出这两个电流之间的平均电阻值。

2182A 型纳伏表和 6220 型电流源一起使用，可以自动实现 Delta 法。在这种情况下，6220 自动改变极性，然后触发纳伏表在每种极性之下

获得一个读数。接着，6220 显示出“经过补偿的”电阻值。

如图 4-45 所示，可以画出样品温度变化时，其电阻和温度的关系曲线。

图4-45：超导体电阻和温度的关系



为了确定临界电流，可以将 2182A 和 6220 电流源一起使用，在一个电流范围内获得精确的 I-V 曲线。

4.7.3 导电材料电阻率的测量

概述

测量导体电阻率的方法是通过一对引线强制电流流过样品，用另一对引线测量其电压降来决定已知几何尺寸的样品的电阻。虽然，测量电阻率使用的具体方法决定于样品的大小和形状。但是所有的方法都需要使用灵敏的电压表和电流源或微欧姆计来进行测量，因为要测量的电阻一般都非常小。

整块材料 (Bulk Material) 的电阻率

图 4-46 示出测试整块材料，如金属棒或金属条电阻率的系统。将电流源连到样品的两端。电压表的引线则按已知的距离放置。根据样品的横截面积和电压表引线之间的距离计算出电阻率：

$$\rho = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{L} \right)$$

其中： ρ = 以厘米 - 欧姆为单位的电阻率

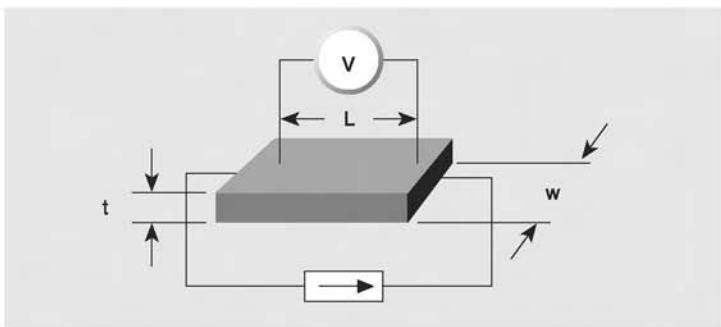
V = 电压表测量的电压

I = 电流源电流

A = 以厘米²为单位的样品的横截面积 ($w \times t$)

L = 以厘米为单位的电压表引线之间的距离

图4-46: 测量金属棒的电阻率



为了补偿热电动势的影响，在正向测试电流之下得到一个电压读数，再在负向测试电流之下得到另一个电压读数。将这两个电压读数的绝对值进行平均，并将其用在公式的 VI 中。大多数材料都具有很大的温度系数，所以一定要将样品保持在已知的温度之下。

使用四探针法

四探针法用在非常薄的样品，例如外延晶圆片和导电涂层上。图 4-47 是四点同线探针用于电阻率测量的配置图。电流从两个外部的探针加入，而电压降则在两个内部的探针之间测量。表面电阻率的计算公式为：

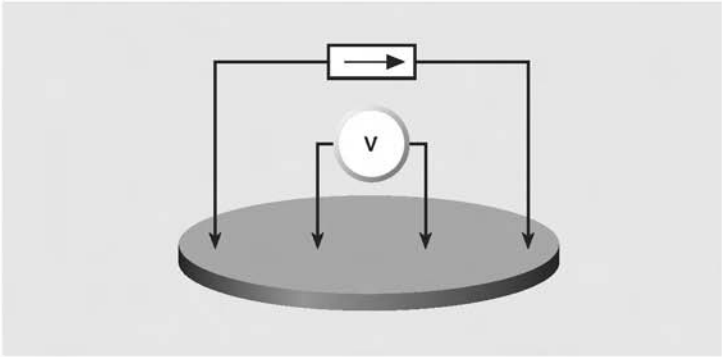
$$\sigma = \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{V}{I} \right)$$

其中： σ = 以欧姆/□为单位的表面电阻率

V = 电压表测得的电压

I = 电流源电流

图4-47：在晶圆片上使用四点同线探针



注意，表面电阻率的单位表达为欧姆/□，以区别于测量出的电阻 (V/I)。对于极薄或极厚的样品，可能需要使用修正因数对电阻率的计算进行修正。

如果样品的厚度已知，那么体电阻率可以计算如下：

$$\rho = \left(\frac{\pi}{\ln 2}\right) \left(\frac{V}{I}\right) t$$

其中：ρ = 以欧姆·厘米为单位的体电阻率

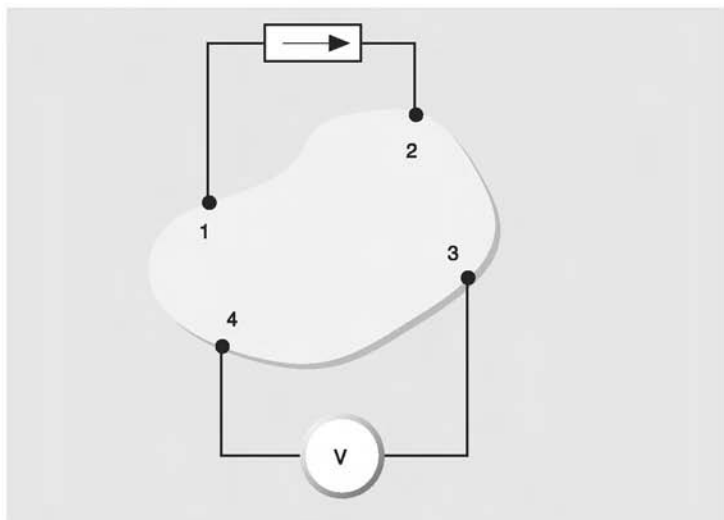
t = 以厘米为单位的厚度

有关四点探头测量更详细的信息可以在 ASTM 标准 F84 中找到。

范德堡 van der Pauw 法

虽然范德堡 van der Pauw 电阻率测量法主要用于半导体工业，但是也可用于其它一些应用工作，例如用来确定超导体或其它薄片材料的电阻率。van der Pauw 法用于扁平、厚度均匀、任意形状，而不含有任何隔离的孔的样品材料。如图 4-48 所示，接触点应当很小，并且安放在样品的外围。

图4-48: van der Pauw法的连接



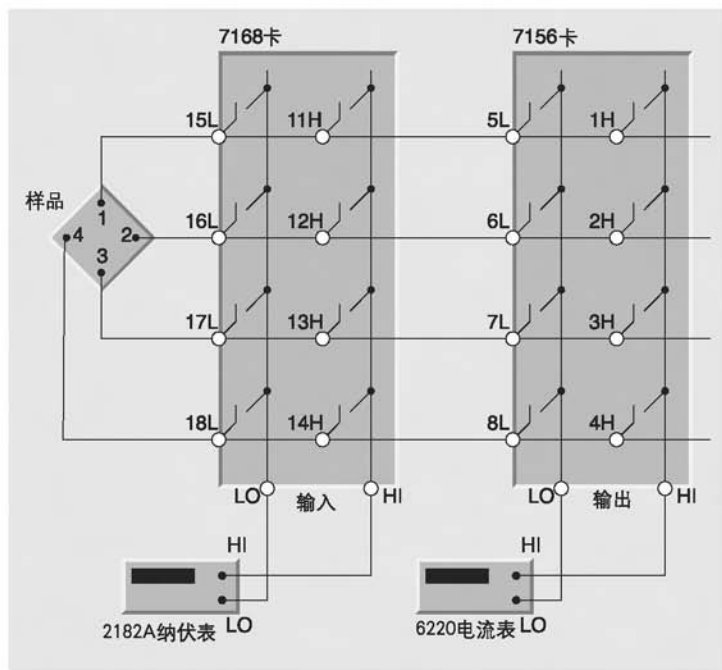
围绕样品进行8次测量。对这些读数进行数学组合来决定样品的平均电阻率。决定电阻率的公式在第4.4.3节给出。有关 van der Pauw 法的更进一步的信息可以在 ASTM 标准 F76 中找到。

图4-49示出使用 van der Pauw 法决定导电样品电阻率的完整系统。该系统包括用来提供流过样品的电流的6220型电流源和用来测量产生的电压降的 2182A 型纳伏表。由 7168 型纳伏卡和 7156 型通用卡组成的开关矩阵在四个样品端子上切换电压表和电流源。这些开关卡必须按照图中所示进行连接。从 7168 卡到样品的连接必须使用不镀锡的铜线以便将热电动势降到最低。然后，必须将这些从 7168 卡的连接延伸到 7156 卡。7001 型扫描器主机控制这些开关卡。

为了向端子 3 和 4 送入电流，应当闭合通道 7L 和 4H。而测量端子 1 和 2 之间的电压降则应当闭合通道 15L 和 12H。

如果被测样品的电阻率范围很宽，可以用 7065 型霍尔效应卡来代替 7168 和 7156 扫描器卡。有关 7065 卡的详细内容在第 4.4.3 节以及 7065 的手册中讨论。

图4-49 :使用7168卡和2182A纳伏表时van der Pauw法的连接



第 五 章

低 电 平 仪 器 选 择 指 南

5.1 引言

针对具体的测量应用工作，选择一款特定的合适的低电平测量仪器取决于很多的因素，包括：

- 测量功能（电压、电流、电阻、电荷等）
- 量程和灵敏度
- 需要的特殊功能（电池供电、浮地工作等）
- 方便的功能（IEEE-488 接口能力、自动量程、数据存储等）
- 价格
- 与测试系统中其它设备的兼容能力（模拟输出、过载保护、外部触发等）

本章给出吉时利公司能够提供的各种低电平仪器的概览。有关本书所提到的任何产品（以及很多其它未列出的产品）的更详细的信息，请参阅吉时利测试和测量仪器产品目录。

5.2 仪器和附件选择指南

图5-1 是吉时利公司各种低电平仪器的功能/量程比较图表。表5-1到表5-9概要给出这些仪器以及设计用于与其配套使用的各种附件的性能。

图 5-1 低电平仪器的功能 / 量程选择图表

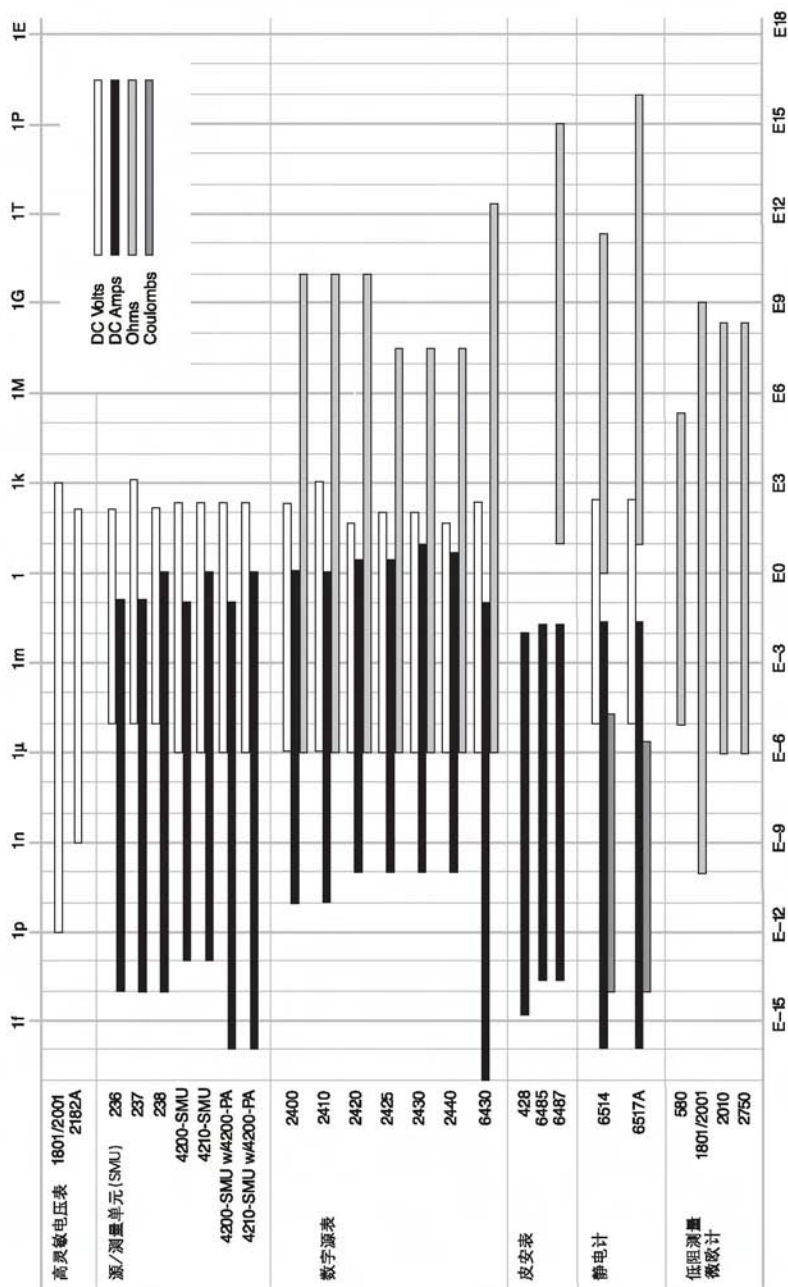


表 5-1a 弱电流 / 高阻测量仪器

电流放大器		电 流 源		皮安表	
型号	428	6220	6221	6485	6487
电 流					
从	1.2fA ¹	100fA DC	100fA DC (1pA AC)	20fA ¹	20fA ¹
到	10mA	100mA DC	100mA DC (100mA AC)	20mA	20mA
电阻 ⁴					
从 ⁵					10Ω
到 ⁶					1PΩ
输入连接	BNC	输出连接: 3 槽三同轴连接器	输出连接: 3 槽三同轴连接器	BNC	3 槽三同轴连接器
特点	2μs 上升时间 10 ¹¹ V/A 增益	10 ¹⁴ Ω 输出阻抗。 65000 点源存储器。 RS-232、GPIB、 触发连接和数字 I/O 接口。	10 ¹⁴ Ω 输出阻抗。 65000 点源存储器。 RS-232、GPIB、 触发连接、 以太网和数字 I/O 接口。	5 1/2 位、自动量程、 1000 读数 / 秒 源、用于 HI-R 测量的 交替电压极性法。	5 1/2 位、内置 500V
CE	是	—	—	是	是

1 包括噪声。

2 数字分辨率极限。可能要加入噪声。

3 P Ω (拍[它]欧姆) =10¹⁵ Ω 。

4 电阻是使用 236、237 和 238 源 - 测量单元, 采用加电压 / 测电流或者加电流 / 测电压的方法来测量的, 但是不直接显示。

5 能以优于 1% 的准确度测量的最低电阻。

6 能以优于 10% 的准确度测量的最高电阻。

表 5-1b 源 - 测量仪器

2400									
型号	2400-C	2410	2420	2425	2430	2440			
说明	2400-LV	2410-C	2420-C	2425-C	2430-C	2440-C	6430	4200	4500
说明	通用	高压	3A	大功率	脉冲	5A	超低电流	多通道 I-V 特性	多通道 I-V 产品测试
电流 Source/Sink	•	•	•	•	•	•	•	•	•
电压 Source/Sink	•	•	•	•	•	•	•	•	•
功率输出	22W	22W	66W	110W	1100W*	55W	2W	20W(4210) 或 2W(4200)	每通道 达 6W****
电流范围	最小 ±10pA	±10pA	±100pA	±100pA	±100pA	±100pA	±10aA**	±0.1fA 用前置放大器	±0.1nA
最大 ±1.05A	±1.05A	±1.05A	±3.15A	±3.15A	±10.5A*	±5.25A	±105mA	±1A 用 4210-SMU	±1A
电压范围	最小 ±1μV	±1μV	±1μV	±1μV	±1μV	±1μV	±1μV	±1μV	±10mV
最大 21V/210V	1100V	1100V	63V	105V	105V	42V	210V	210V	10V
欧姆范围	<0.2Ω 到 >200MΩ	<0.2Ω 到 >200MΩ	<0.2Ω 到 >200MΩ	<0.2Ω 到 >200MΩ	<0.2Ω 到 >200MΩ	<2.0Ω 到 >200MΩ	<2.0Ω 到 >20TΩ	-	-
基本准确度	I 0.035%	0.035%	0.035%	0.035%	0.035%	0.035%	0.035%	0.05% ***	0.065%
V 0.015%	0.015%	0.015%	0.015%	0.015%	0.015%	0.015%	0.015%	0.012% ***	0.06%
Ω 0.06%	0.07%	0.06%	0.06%	0.06%	0.06%	0.06%	0.06%	-	-

* 在脉冲模式下 ** I_{AA}=1 × 10⁻¹⁵A *** 近似平均值 **** 可以在 4 到 36 个通道之间选择配置，每 4 个通道为一组。最多 32 个大功率通道或者 36 个中功率通道。

表 5-1c 低电压、低电阻测量仪器

型号	580	1801 与 2001 或 2002	2182A	2002	2010	2750
电压						
从	-	1pV	InV	InV	10nV	100nV
到	-	2mV	100V	1000V	1000V	1000V
输入电压噪声	-	0.12nV 有效值	1.2 nV 有效值	150 nV 有效值	100 nV 有效值	<1.5 μ V 有效值
电阻						
从 ¹	200 $\mu\Omega$	20 $\mu\Omega$	10m Ω^3	1.2m Ω	0.9m Ω	0.4m Ω
到 ²	200k Ω	200 Ω (1G Ω) ⁵	100M Ω^3	1G Ω	100M Ω	100M Ω
热电偶温度						
从	-	-200 $^{\circ}$ C	-200 $^{\circ}$ C	-200 $^{\circ}$ C	-200 $^{\circ}$ C	-200 $^{\circ}$ C
到	-	1820 $^{\circ}$ C	1820 $^{\circ}$ C	1820 $^{\circ}$ C	1372 $^{\circ}$ C	1820 $^{\circ}$ C
输入连接	香蕉插头(4) 只有前面板输入	铜接线柱	特殊的低热电势 带有铜插片	香蕉插头(4)	香蕉插头(4)	香蕉插头(4)
特殊性能						
干电路	干电路	多功能	Delta 法	8 位半	干电路	干电路
偏置补偿	偏置补偿	温度	模拟输出	数字万用表	偏置补偿	偏置补偿
电池 (选件)	电池 (选件)	IEEE-488	IEEE-488	IEEE-488	数字万用表	数字万用表
		数字万用表	RS-232	扫描卡选件	IEEE-488, RS-232	IEEE-488, RS-232
				扫描卡选件	扫描卡选件	数字 I/O
						插入模块
CE	是 ⁴	-	是	是	是	是

1 能以 10% 的准确度测量的最低电阻。

2 能以 1% 的准确度测量的最高电阻。

3 Delta 法, 用外部电流源的偏置电压补偿。如果与 2440 型的 5A 测试电流一起使用, 则为 10 n Ω 。

4 不包括 IEEE-488 选件。

5 如果使用 2002 型不用 1801, 则为 1G Ω 。如果使用 2001 型不用 1801, 则为 100M Ω 。

表 5-2 高速响应电源

型号	2302	2303	2303-PJ	2304A	2306	2306 - PJ	2306 - VS	248
通道数	1	1	1	1	2	2	2	1
输出功率	与 V 有关, 最适合低电压下大电流应用的情况	45W	45W	100W	与 V 及别的通道耗散的功率有关, 最适合低电压下大电流应用的情况	与 V 及别的通道耗散的功率有关, 最适合低电压下大电流应用的情况	与 V 及别的通道耗散的功率有关, 最适合低电压下大电流应用的情况	25W
电压输出	0~15V	0~15V	0~15V	0~20V	0~15V	0~15V	0~15V	0~ $\pm 5000V$
最大连续电流输出	4V 时 5A	9V 时 5A	9V 时 5A	20V 时 5A	4V 时 5A	4V 时 5A	4V 时 5A	5mA
可变源电阻输出	0~1 Ω 10m Ω 步进							
电流吸收能力	3A	2A	2A	3A	3A	3A	3A	1 μA
直流电流测量灵敏度	100nA	100nA	10 μA	100nA	100nA	10 μA (通道 1) 100nA (通道 2)	100nA	
动态电流测量	5A 量程 33 μs -833ms 积分时间	5A 量程 33 μs -833ms 积分时间	500mA 和 5A 量程, 33 μs -833ms 积分时间	5A 量程 33 μs -833ms 积分时间	5A 量程 33 μs -833ms 积分时间	500mA 和 5A 量程, 33 μs -833ms 积分时间	5A 量程 33 μs -833ms 积分时间	
电压输出和电流测量的外部触发	无	无	无	无	无	无	有	无

表 5-2 高速电源 (续)

型号	2302	2303	2303-PJ	2304A	2306	2306 - PJ	2306 - VS	248
准确度								
V	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.01%
I	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.01%
特点								
程控接口	IEEE-488	IEEE-488	IEEE-488	IEEE-488	IEEE-488	IEEE-488	IEEE-488	IEEE-488
引线	有	-	-	-	有	有	有	无
开路探测								
DVM	有	有	有	有	有,每通道 1 个	有,每通道 1 个	有,每通道 1 个	无
继电器控制口	4	1	1	2	4	4	无	无
远地显示模块	有	有	有	有	有	有	无	无
CE	有	有	有	有	有	有	有	有

表 5-3 连接器、适配器和工具

型号	名称	用于
213-CON	模拟输出连接器	213
237-BAN-3A	三同轴到香蕉插头	7072, 7072-HV, 2001, DMM
237-BNC-TRX	3 线阴三同轴到 BNC 连接器, 保护断开	237, 6517A, 7078-TRX 电缆
237-TRX-BAR	3 线三同轴到阴 (梯形) 适配器	三同轴的互连
237-TRX-NG	三同轴阳 - 阴适配器, 保护断开	236, 237, 238, 7072, 7072-HV
237-TRX-T	3 槽阳到双 3 线阴三同轴 T 形适配器	7072, 7072-HV, 7078-TRX 电缆
237-TRX-TBC	3 槽阴三同轴面板 (bulkhead) 连接器	7072, 7072-HV, 7078-TRX 电缆
2182-325A	和 2182-KIT 一起使用的银焊剂	2182
2182-KIT	带应力释放的低热电势连接器 (LEMO)	2182, SC-93
2188	低热电势校准短路插头	2182
2499-DIGIO	数字 I/O 扩展模块	源表仪器
2500INT-SMA	SMA 控制器	2500INT 积分球 (Integrating Sphere)
2500INT-PC/PC	FP/PC 连接器	2500INT 积分球
2500INT-FC/APC	FP/APC 连接器	2500INT 积分球
4851	BNC 短路插头	230-1, 7077
5904	20nF/20mS 适配器	590
5951	远地输入耦合器	82-WIN 型
7001-PNL	金属挡板	7001
7011-KIT-R	阴 96 针连接器套件	7011-C, 7012-C, 7013-C, 7015-C, 7018-C
7011-MTR	面板安装 96 针阳连接器	7011-KIT-R, 7011-C, 7012-C, 7013-C, 7015-C, 7018-C
7011-ST	额外螺钉端子板	7011-S
7012-ST	额外螺钉端子板	7012-S
7013-ST	额外螺钉端子板	7013-S
7014-ST	额外螺钉端子板	7014
7015-ST	额外螺钉端子板	7015-S
7018-ST	额外螺钉端子板	7018-S
7074-CIT	接点取出工具	7074-KIT, 7074-MTR, 7152-KIT, 7152-MTR
7074-HCT	手压工具	7074-KIT, 7074-MTR, 7152-KIT, 7152-MTR
7074-KIT	75 针排线插头, 带接头	7074-D, 7074-MTR
7074-MTR	75 针排线插座, 带接头	7074-D, 7074-KIT, 7074-MTC
7074-RTC	继电器测试用短路连接器	7074-D
7078-CIT	接点插 / 拔工具	7078-KIT, 7078-MTR, 7152-KIT, 7152-MTR, 7169-KIT, 7169-MTR,
7078-HCT	7078KIT/7169KIT 用的手压工具	7078-KIT, 7169-KIT
7078-KIT	连接器套件	7071, 7071-4, 7074-D, 7078-MTR
7078-MTR	排线插座, 面板安装	7078-KIT, 7078-MTC,
7078-TRX-BNC	3 槽阳三同轴到 BNC 适配器	486, 487, 4801, 6514, 6517A, 7072, 7072-HV
7078-TRX-GND	3 槽阳三同轴到 BNC 适配器, (保护断开)	236, 237, 238, 4801, 6517A, 7051, 7072, 7072-HV

表 5-3 连接器、适配器和工具 (续)

型号	名称	用于
7078-TRX-TBC	3 线阴三同轴面板安装连接器, 带盖	7078-TRX 电缆
7152-HCT	7152-KIT, 7152-MTR 用的手压工具	7152-KIT, 7152-MTR
7152-KIT	6 位 M 系列插头, 带接头	7152, 7152-MTR
7152-MTR	6 位 M 系列插座, 带插座	7152, 7152-KIT, 7152-MTC-2, 7152-MTC-10
7164-KIT	50 针排线连接器	7164-D, 7164-M, 7164-MTR
7164-MTR	50 针排线面板安装插座	7164-D, 7164-M, 7164-MTC-10
7169-KIT	20 针排线连接器	7169A
7169-MTR	排线面板安装插座	7169A, 7169-MTC-3
7703-306A	DB50 阳连接器套件	7701, 7703, 7705, 7709
7709-308A	DB25 阳连接器套件	7701, 7707, 7709
7712-SMA-N	阴 SMA 到阴 N 型适配器	7711, 7712
7755	50Ω 馈入 (Feed-Through) 终端器	RG58 电缆, 776
7788	50 针 D 型连接器 (Subconnector) 套件	7703, 7705, 77XX, 带 D 型子连接器的附件
7789	50 针阳和 25 针阳 D 型连接器套件	7701, 7709
7790	50 针阳、50 针阴和 25 针阳 IDC D 型连接器套件	7701, 7703, 7705, 7707, 7709
8610	低热电动势短接头	2000, 2001, 2002, 2010
8680	RTD 探头适配器	2001, 2002, 2010
BG-18	双香蕉头到 BNC 同轴适配器	230, 20XX 系列, 24XX 系列, 2700, 2750
CAP-18	保护屏蔽 / 盖	BNC, 2 线三同轴连接器
CAP-31	保护屏蔽 / 盖	3 线三同轴连接器
CS-400	DB25 阳可焊插头	CA-126-1 电缆, 213
CS-458	互锁连接器套件	6517-ILC-3
CS-565	BNC 桶形 (Barrel) 连接器	BNC 互连
CS-631	3 槽阴三同轴电缆安装连接器	SC-22 电缆
CS-680	3 槽阴面板安装连接器	测试夹具, 6487, 6517A 等
CS-846	螺钉终端测试引线连接器	230X, 2510, 2510AT
CS-970	高压面板安装连接器	248, 248SHV 电缆

表 5-4 电缆

型号	说明	类型	端子从	到	长度 米	英尺	用于
236-ILC-3	安全互锁	屏蔽双绞线	3 针圆形	3 针圆形	3	10	236, 237, 238, 8007, 8008
237-ALG-2	低噪声输入	三同轴	3 槽阳三同轴	鳄鱼夹(3)	2	6.6	236, 237, 238, 6514, 6517A
248-MHV	高压	同轴	SHV 阴	MHV 阴	3	10	248
248-SHV	高压	同轴	SHV 阴	SHV 阴	3	10	248, CS-970
2000-MTC-2	电缆组件	屏蔽双绞线	DB44 阴	无终端	2	6.6	2000-20
2000-MTCD-2	电缆组件	屏蔽多导体	DB44 阴	DB50 阳	2	6.6	2000-SCAN-20
2107-4	输入电缆	屏蔽双绞线	LEMO	铜接线片(4)	1.2	4	2182
2107-30	输入电缆	屏蔽双绞线	LEMO	铜接线片(4)	9.1	30	2182
4801	低噪声输入	同轴	阳 BNC	阳 BNC	1.2	4	82, 590, 595, 6485, 7158
4802-10	低噪声输入	同轴	阳 BNC	无终端	3	10	82, 590, 595, 6485, 7158
4803	低噪声电缆组件	同轴	阳 BNC (10)	阴 BNC (5)	15.2	50	82, 590, 595, 6485, 7158
6011	输入引线	三同轴	2 槽三同轴	鳄鱼夹(3)	1.5	5	263, 7058
6011-10	输入引线	三同轴	2 槽三同轴	鳄鱼夹(3)	3	10	263, 7058
6517-ILC-3	4 芯互锁电缆	屏蔽	4 针 DIN	4 针 DIN	1	3.3	6517A, 8009
7009-5	屏蔽的 RS-232	屏蔽	阳 DB9	阴 DB9	1.5	5	所有具有 RS-232 能力的仪器
7011-MTC-1	多终端组件	双绞线(45)	96 针阴	96 针阴	1	3.3	7011C, 7012C, 7013C, 7015C, 7018C, 7021, 7037
7011-MTC-2	多终端组件	双绞线(45)	96 针阴	96 针阴	2	6.6	7011C, 7012C, 7013C, 7015C, 7018C, 7021, 7037
7019C-MTC-1	Kelvin 扩展电缆	屏蔽双绞线	卡式连接器	DUT 电缆(6)	2	6.6	7019C
7019C-MTC-2	Kelvin 仪器电缆	屏蔽双绞线	卡式连接器	屏蔽香蕉插头电缆(6)	2	6.6	7019C, 2400 系列
7020-MTC-2	多终端组件	双绞线(45)	96 针阴	96 针阴	2	6.6	7020
7024-3	低噪声	三同轴	2 槽三同轴	2 槽三同轴	0.9	3	263, 7058
7024-10	低噪声	三同轴	2 槽三同轴	2 槽三同轴	3	10	263, 7058
7025-10	低噪声输入	三同轴	2 槽三同轴	无终端	3	10	263, 7058
7035-MTC-2	多终端组件	双绞线(45)	96 针阴	96 针阴	2	6.6	7035
7036-MTC-2	多终端组件	双绞线(45)	96 针阴	96 针阴	2	6.6	7036
7051-*	BNC 互连	同轴	BNC	BNC	2	6.6	590, 776, 2015, 2016, 3321, 3322, 7062
7074-MTC-20	多终端组件	双绞线(24)	75 针连接器	75 针连接器	6.1	20	7074-D
7075-MTC	多终端组件	同轴带状电缆	25 针 D 型连接器	25 针 D 型连接器	3	10	7075 组 / 列, 7076 行 / 列
7076-CMTC	多终端组件	屏蔽	25 针 D 型连接器	25 针 D 型连接器	3	10	7075 组, 7076 列
7076-RMTC	多终端组件	屏蔽	25 针 D 型连接器	25 针 D 型连接器	3	10	7075 行, 7076 行
7078-CSHP	8 电缆组, (包括 4 个 BNC 到三轴适配器)	同轴(4)	3 槽三同轴(4)	3 槽三同轴(4)	3	10	7072 到 HP-4145
7078-DIN	707 主 / 从	双绞线(9)	8 针 DIN	8 针 DIN	1.8	6	707A
7078-MTC-5	多终端组件	双绞线(12)	38 针连接器	38 针连接器	1.5	5	7071, 7071-4, 7074-D

表 5.4 电缆 (续)

型号	说明	类型	端子		长度		用于
			从	到	米	英尺	
7078-MTC-20	多终端组件	双绞线(12)	38 针连接器	38 针连接器	6.1	20	7071, 7071-4, 7074-D
7078-TRX-1	低噪声	三同轴	3 槽三同轴	3 槽三同轴	0.3	1	236,237,238,6487,6514,6517A,7072
7078-TRX-3	低噪声	三同轴	3 槽三同轴	3 槽三同轴	0.9	3	236,237,238,6487,6514,6517A,7072
7078-TRX-5	低噪声	三同轴	3 槽三同轴	3 槽三同轴	1.5	5	236,237,238,6487,6514,6517A,7072
7078-TRX-10	低噪声	三同轴	3 槽三同轴	3 槽三同轴	3	10	236,237,238,6487,6514,6517A,7072
7078-TRX-12	低噪声	三同轴	3 槽三同轴	3 槽三同轴	4	12	236,237,238,6487,6514,6517A,7072
7078-TRX-20	低噪声	三同轴	3 槽三同轴	3 槽三同轴	6.1	20	236,237,238,6487,6514,6517A,7072
7078-TRX-6IN	低噪声	三同轴	3 槽三同轴	3 槽三同轴	0.15	0.5	6430
7152-MTC-2	低噪声矩阵扩展	三同轴(5)	6 针 M 系列同轴	6 针 M 系列同轴	0.6	2	7152
7152-MTC-10	低噪声矩阵扩展	三同轴(5)	6 针 M 系列同轴	6 针 M 系列同轴	3	10	7152, 8006
7152-TRX-10	低噪声 M 系列	三同轴(5)	三同轴(5)	M 系列连接器	3 槽三同轴(5)	3	10
7153-TRX	低噪声 M 系列	三同轴(5)	三同轴(5)	M 系列连接器	3 槽三同轴(5)	2	6
7156-MTC-10	带状电缆	带状电缆	37 针连接器	37 针连接器	3	10	7156-D, 7156-M
7164-MTC-10	多终端组件	带状电缆	50 针连接器	50 针连接器	3	10	7164-D, 7164-M, 7164-MTR
7169-MTC-3	多终端组件	双绞线	20 针连接器	20 针连接器	3	10	7169A
7173-50-CSEP	4 电缆组	同轴	SMB 阴	BNC 阴	0.6	2	7173-50
7705-MTC-2	多终端组件	双绞线(25)	DSUB 阳	DSUB 阴	2	6.6	7703, 7705, 7707, 7709
7711-BNC-SMA	5 SMA 到 BNC 电缆	同轴	SMA 阳	BNC 阴	0.15	0.5	7711
7754-3	BNC	同轴	BNC	鳄鱼夹	0.9	3	776
8007-GND-3	安全地线	单线	压片	压片	3	10	8007
8007-MTC-3	多终端组件	三同轴	M 系列连接器	3 槽三同轴(12)	3	10	8007, 7072
8542-301	LIV 电缆	多导体	DB9 阴	2 双香蕉插头 (2400XX)	1.8	6	2500, 24XX, LIV
				GND 线			
8607	1kV 测试电缆	单线(2)	安全香蕉头	安全香蕉头	1	3.3	2410, 6430, 6514, 6517A
CA-18-1	屏蔽	同轴	双香蕉插头	双香蕉插头	1.2	4	接线柱输入
CA-126-1	数字 I/O	屏蔽	DB25 阴	DB25 阴	1.5	5	213
CA-321-1	温度控制电缆	多导体	DB15 阴	8 位 Phoenix (等同 CS-846)	1.8	6	2510, 8542, 8544
CA-322-1	双温度控制电缆	多导体	DB15 阴	Y 电缆到两个 8 位 Phoenix (CS-846)	1.8	6	2510, 8542, 8544
S46-SMA-0.5	SMA 电缆	同轴	SMA 阳	SMA 阳	0.15	0.5	7711, 7712, S46
S46-SMA-1	SMA 电缆	同轴	SMA 阳	SMA 阳	0.3	1.0	7711, 7712, S46
SC-9	低噪声	同轴	无端子	无端子			4803
SC-22	低噪声	三同轴	无端子	无端子			CS-631
SC-93	低热电压	屏蔽	无端子	无端子			1801, 2182-KIT
SC-182	低电感	同轴	无端子	无端子			2302,2303,2303B,2303-P1,2304A,2306,2306-P1

表 5-5 测试引线和探头

型号	名称	用于
1600A	高压探头	DMM
1651	50A 分流器	DMM
1681	夹子测试引线组	DMM
1751	安全测试引线	所有 DMM, 2400 系列
1754	安全万用测试引线套件	所有 DMM, 2400 系列
5804	通用 4 端测试引线组	580, 2400 系列, 2750, DMM
5805	Kelvin 探头, 0.9 米 (3 英尺)	580, 2400 系列, 2750, DMM
5805-12	Kelvin 探头, 3.6 米 (12 英尺)	580, 2400 系列, 2750, DMM
5806	Kelvin 夹子引线	580, 2400 系列, 2750, DMM
5807-7	螺旋弹簧点测试引线, 2.1 米 (7 英尺)	580, 2400 系列, 2750, DMM
6517-RH	带延长电缆的湿度探头	6517A
6517-TP	热偶珠探头	6517A
7401	热偶线套件 30 米 (100 英尺), K 型	2001-TCSAN, 7057A, 7700, 7706, 7708
8605	高性能测试引线	所有 DMM, 2400 系列
8606	高性能探头套件	所有 DMM, 2400 系列
8681	低价 RTD	2001, 2002, 2010 DMM, (配 8680)
8693	Pt RTD 通用探头	2001, 2002, 2010 DMM, (配 8680)
8695	Pt RTD 表面探头	2001, 2002, 2010 DMM, (配 8680)
8696	Pt RTD 空气/气体探头	2001, 2002, 2010 DMM, (配 8680)
CA-109	输出连接用测试引线组	2000-SCAN, 2001-SCAN, 2001-TCSAN

表 5-6 7001 和 7002 型开关主机用的开关卡

高密度	通道数	卡配置	接点配置	最大电压	最大电流	最大功率	接点电位	最大偏置电流	推荐频率	连接类型	CE	说明
7011-C	40	多路器	2 个 A 类	110V	1A	60VA	<1 μ V	<100pA	2MHz	连接器	是	4 个独立的 1 $\times$ 10 多路器, 连接到背板。
7011-S	40	多路器	2 个 A 类	110V	1A	60VA	<50mV	<100pA	2MHz	螺钉端子	是	4 个独立的 1 $\times$ 10 多路器, 连接到背板。
7012-C	4 $\times$ 10	矩阵	2 个 A 类	110V	1A	60VA	<1 μ V	<100pA	2MHz	连接器	是	行连接到模拟背板
7012-S	4 $\times$ 10	矩阵	2 个 A 类	110V	1A	60VA	<50mV	<100pA	2MHz	螺钉端子	是	行连接到模拟背板
7013-C	20	隔离开关	2 个 A 类	110V	1A	60VA	<1 μ V	<100pA	10MHz	连接器	是	是
7013-S	20	隔离开关	2 个 A 类	110V	1A	60VA	<50mV	<100pA	10MHz	螺钉端子	是	是
7015-C	40	多路器	2 个 A 类	175V	34mA	0.3VA	<5 μ V	<1nA	500kHz	连接器	是	高可靠性固体开关
7015-S	40	多路器	2 个 A 类	175V	34mA	0.3VA	<5 μ V	<1nA	500kHz	螺钉端子	是	高可靠性固体开关
7018-C	28	多路器	3 个 A 类	110V	1A	60VA	<5 μ V	<100pA	2MHz	连接器	是	3 刀开关
7018-S	28	多路器	3 个 A 类	110V	1A	60VA	<5 μ V	<100pA	2MHz	螺钉端子	是	3 刀开关
7035	36	多路器	2 个 A 类	60V	1A	30VA	<1 μ V	<100pA	10MHz	连接器	是	9 个独立的 1 $\times$ 4 多路器。
7036	40	隔离开关	1 个 A 类	60V	1A	30VA	<4 μ V	<100pA	10MHz	连接器	是	40 个独立的 1 刀开关通道。
7111-S	40	多路器	1 个 C 类	110V	1A	60VA	<50mV	<100pA	2MHz	螺钉端子	是	4 个独立的 1 $\times$ 10 多路器, 连接到背板。
控制												
7019-C	双 3 $\times$ 6	矩阵	1 个 A 类	200V	1A	10VA	<25V	<100pA	2MHz	连接器	是	6 线电阻测量
7020	80	数字 I/O								连接器	是	40 输入/40 输出
7020-D**												
7021	30/20	多路/数字 I/O	2 个 A 类	110V	1A	30VA	<37V	<100pA	10MHz	连接器	是	双多路器, 达 30 个通道, 10 数字输入, 10 数字输出。
7037												
7037-D**	30/20	隔离/数字 I/O	1 个 A 类	110V	1A	30VA	<4 μ V	<100pA	10MHz	连接器	是	30 个独立的 1 刀开关通道, 10 数字输入, 10 数字输出。
7076												霍尔效应测量缓冲器卡

表 5-6 7001 和 7002 型开关主机用的开关卡 (续)

RF	通道数	卡配置	接点配置	最大电压	最大电流	最大功率	接点电位	最大偏置电流		
								推荐频率	连接类型	CE 说明
7062	双 1 × 5	2 隔离开关	1 刀 5 掷	24V	50mA	0.5VA	<20 μ V	500MHz	BNC	是 50 Ω 无终端
7063	双 1 × 5	2 隔离开关	1 刀 5 掷	5V	50mA	0.5VA	<20 μ V	500MHz	BNC	是 50 Ω 终端
7016-A	双 1 × 5	2 隔离开关	1 刀 4 掷	30V	500mA	10VA	<6 μ V	2GHz	SMA	是 可选的 50 Ω 终端
7017	双 1 × 5	2 隔离开关	1 刀 4 掷	30V	1A	10VA	<25 μ V	800MHz	SMA	是 10 ⁸ 接点闭合寿命
7038	12	3 个 1 × 4 多路器	1 刀 4 树形结构	24V	10mA	1.2GHz, 10W	<15 μ V	2GHz	75 Ω SMB 插座	是 75 Ω 无终端
光开关	通道数	光纤类型	波长 (nm)	连接器						
7090-4-1	1 × 4	单模光纤 (SMF-28)	9/125	FC/APC						
7090-4-2BH	1 × 4	单模光纤 (SMF-28)	9/125	FC/SPC						
7090-8-3	1 × 8	单模光纤 (SMF-28)	9/125	FC/APC						
7090-8-4	1 × 8	多模光纤 62.5/125		FC/SPC						

表 5-6 7001 和 7002 型开关主机用的开关卡 (续)

通道数		卡配置	接点配置	最大电压	最大电流	最大功率	接点电位	最大偏置电流	推荐频率	连接类型	CE	说明
大电流												
7053	10	多路器	2 个 A 类	300V	5A	100VA	< 1mV		1MHz	螺钉终端		
高电压												
7054	10	多路器	1 个 A 类	1000V	500mA	10VA			1MHz	螺钉终端	是	
7154	10	多路器	2 个 A 类	1100V	500mA	10VA	< 35 μ V		1MHz	螺钉终端	是	
7169A	20	隔离开关	1 个 C 类	500V	500mA	10VA	< 30 μ V		2MHz	连接器	是	对位置敏感, 只能用于 7002。
弱电流												
7058	10	多路器	1 个 C 类	200V	100mA		< 250 μ V	< 1pA	3MHz	2 线三同轴	是	也可用作电压开关
7152	4 × 5	矩阵	2 个 A 类	200V	500mA	10VA	< 20 μ V	< 1pA	60MHz	连接器	是	
7153	4 × 5	矩阵	2 个 A 类	1300V	500mA	10VA	< 50 μ V	< 1pA	60MHz	连接器	是	高压
7158	10	多路器	1 个 C 类	30V	100mA		< 200 μ V	< 1pA	1MHz	BNC	是	
低电压												
7059	10	多路器	2 个 A 类	200V	100mA	2VA	< 1 μ V		3MHz	螺钉终端	是	
7064	20*	多路器	2 个 A 类	40V	100mA	2VA	< 1 μ V		10MHz	螺钉终端	是	
7067	10	多路器	4 个 A 类	150V	350mA	10VA	< 1 μ V		1MHz	螺钉终端	是	4 线电阻测量
7168	8	多路器	2 个 A 类	10V	50mA		< 30nV		1kHz	螺钉终端	是	

表 5-6 7001 和 7002 型开关主机用的开关卡 (续)

热偶	通道数	卡配置	接点配置	最大电压	最大电流	最大功率	接点电位	最大偏 移电流	推荐频率	连接类型	CE	说明
7014	39	多路器	2 个 A 类	110V	1A	60VA	<1 μ V	<100pA	2MHz	螺钉终端	是	内置冷参考结
7057A	9	多路器	2 个 A 类	42V	100mA	2VA	<1 μ V			螺钉终端	是	内置冷参考结, -1mV/°C (在 +30°C 为 0mV)
通路, 也可用于 705 和 706												
7052	4 $\times$ 5	矩阵	3 个 A 类	200V	200mA	10VA	<5 μ V	<100pA	3MHz	螺钉终端	是	高、低、保护切换
7056	10/20*	多路器	2 个 A 类	150V	250mA	10VA	<100 μ V		10MHz	螺钉终端	是	10 通道 2 刀, 20 通道 1 刀
7066	10	隔离开关	2 个 A 类	350V	2A	125VA	<30 μ V		3MHz	螺钉终端	是	
7156-D	10/20*	多路器	2 个 A 类	150V	500mA	10VA	<100 μ V		3MHz	连接器	是	
7164-D	20*	多路器	2 个 A 类	100V	500mA	10VA	<50 μ V		3MHz	连接器	是	
7166	10	隔离开关	2 个 A 类	300V	750mA	30VA	75 μ V 典型值		3MHz	连接器	是	未湿接点
实验卡和适配器卡, 也可用于 705 和 706												
7061	10											实验卡

* 配置为 20 通道模式时, 只用作 20 通道选择器开关之一。

** 带 D 后缀的卡为 D-子连接器。

表 5-7 7001 和 7002 型开关主机用的开关卡附件

电缆		连接器		适配器	工具
7011-C	7011-MTC-1	7011-MTC-2	7011-KIT-R		
7011-S			7011-ST		
7111-S			7011-KIT-R	7011-MTR	
7012-C	7011-MTC-1	7011-MTC-2	7012-ST		
7013-C	7011-MTC-1	7011-MTC-2	7011-KIT-R	7011-MTR	
7013-S			7013-ST		
7014	7401		7014-ST		
7015-C	7011-MTC-1	7011-MTC-2	7011-KIT-R	7011-MTR	
7015-S			7015-ST		
7018-C	7011-MTC-1	7011-MTC-2	7011-KIT-R	7011-MTR	
7018-S			7018-ST		
7019	7019-C-MTCT-1	7019-C-MTC-2	7011-KIT-R	7011-MTR	
7020	7020-MTC-2		7011-KIT-R (包括)	7011-MTR	
7020-D			7020-DT		
7021	7011-MTC-1	7011-MTC-2	7011-KIT-R (包括)	7011-MTR	
7022	7011-MTC-1	7011-MTC-2	7011-KIT-R (包括)	7011-MTR	
7035	7035-MTC-2		7011-KIT-R (包括)	7011-MTR	
7036	7036-MTC-2		7011-KIT-R (包括)	7011-MTR	
7037	7011-MTC-1	7011-MTC-2	7011-KIT-R (包括)	7011-MTR	
7037-D			7037-DT		
7057-A	7401				
7058	7024-3 (包括)	7024-10 7025-10	7023	6146,6147 6172	
7062	7051-2, -5, -10				
7063	7051-2, -5, -10				
7152	7152-MTC-2, -10	7152-TRX-10	7152-KIT	7152-MTR	7152-HCT 7074-CIT
7074-HCT					
7153	7153-TRX				
7156-D	7156-MTC-10		7156-KIT	7156-MTR	
7158	4801	4802-10 4803		4804	
7164-D	7164-MTC-10		7164-KIT	7164-MTR (包括)	
7169-A	7169-MTC-10		7169-KIT	7169-MTR	7078-CIT 7078-HCT

表 5-8 707A 和 708A 型开关主机用的开关卡

弱电流	通道数	卡配置	接口配置	最大电压	最大电流	最大功率	接点电位	最大偏置电流		
								推荐频率	连接类型	CE 说明
7072	8 × 12	矩阵	2 个 A 类	200V	1A	10VA	<20μV	<1pA	3 线三同轴	是 对于半导体应用最佳
7072-HV	8 × 12	矩阵	2 个 A 类	1300V	1A	10VA	<20μV	<1pA	3 线三同轴	是 对于半导体应用最佳
7174A	8 × 12	矩阵	2 个 A 类	200V	2A			<100fA	3 线三同轴	是 对于半导体应用最佳
通用										
7071	8 × 12	矩阵	3 个 A 类	200V	500mA	10VA	<5μV	<100pA	连接器	是 也提供螺钉终端连接
7071-4	双 4 × 12	矩阵	3 个 A 类	200V	500mA	10VA	<5μV	<100pA	连接器	是 行连接可用螺钉终端
7074-D	8 1 × 12	多路器	3 个 A 类	200V	500mA	10VA	<5μV	<100pA	连接器	是
7075	8 1 × 12	多路器	2 个 A 类	110V	1A	30VA	<5μV	<100pA	连接器	是
7076	双 4 × 12	矩阵	2 个 A 类	110V	1A	30VA	<5μV	<100pA	连接器	是
7077	双 8 × 12	矩阵	2 个 A 类	42V	1A	30VA	<5μV	<100pA	BNC	是 隔离 BNC 供差分系统使用
高频										
7073	8 × 12	矩阵	1 刀 A 类	200V	1A	30VA	<2μV	<200pA	BNC	是
7173-50	4 × 12	矩阵	2 个 C 类	30V	0.5A	10VA	<15μV	<200pA	200MHz BNC	是
实验卡										
7070	96									是 7070 还包括带状电缆将背板扩展到主机外
7070-PCA	96									

表 5-9 707A 和 708A 型开关主机用的开关卡附件

	电缆			连接器		适配器	工具
	7071, 7071-4	7078-MTC-5	7078-MTC-20	7078-KIT	7078-MTR		
7072		7078-TRX-3	7078-TRX-10			237-TRX-T 7078-TRX-BNC	7078-CIT 7078-HCT
7174A		7078-3	7078-10			237-TRX-T 7078-TRX-BNC	
7072-HV		7078-TRX-3	7078-TRX-10			7078-TRX-BNC 237-TRX-T	
7073		7051-2, -5, -10	7754-3			7078-TRX-GND, 237-TRX-TBC	
7074-D		7074-MTC-20 (行) 7078-MTC-20 (行) 7074-MTR (列)	7078-MTC-5 (行) 7074-MTR (列)	7074-RTC 7074-KIT (列)	7074-CIT	7755	
7078-CIT		7078-MTR (行) 7078-HCT	7078-KIT (行) 7074-HCT				
7075		7075-MTC 7076-CMTC	7076-RMTC				
7076		7075-MTC 7076-CMTC	7076-RMTC				
7173-50		7173-50-CSEP					

附录 A

低电平测量 故障诊断指南

测量类型和典型应用		误差现象	可能的原因	如何避免
低电压	标准电池比对	偏置电压	热电动势	使用铜-铜连接
	约瑟夫逊结阵列电压	读数噪声偏大	热电动势	使所有的连接保持在同一温度
	量热计		磁场干扰	同上
	热电动势			使用双绞线连接
低电流	继电器/连接器接点电压			去除或屏蔽磁场
	磁电动势		地回路	单点接地
	离子束/电子束电流	偏置电流	绝缘体漏电	保护/选择好的绝缘体/很好的清洁处理
	隧道电流		仪表的偏置电流	选择皮安表/静电计
	元器件漏电		暗电流	用REL功能消去或减去
	光探测器电流	读数噪声偏大	静电耦合	屏蔽、避免高压及在附近移动
	绝缘体漏电/击穿		振动/变形	隔离房间的振动。使用低噪声电缆。使用
	MOS电荷泵电流		高输入电容	分流安培计或者增加串联电阻。使DUT、
	准静态电容		偏置电流漂移	仪表与温度都保持稳定。
	摩擦电、压电电流	低电压时的增益误差	输入端压降	使用反馈式安培计。使用较高的量程。

测量类型和典型应用	误差现象	可能的原因	如何避免
低电阻	超导体电阻	引线电阻	四线方法(Kelvin 连接)
	金属电阻	热电动势	脉冲式激励信号(Delta 模式 / 偏置补偿法)
	裂纹增长 / 疲劳 搭接(Bonding)电阻 继电器 / 连接器接点电阻	磁场干扰	去除 / 屏蔽磁场 使用双绞线
高电阻	绝缘电阻	与 DUT 并联的夹具电阻	使用绝缘电阻更高的夹具和电缆
	PCB 板、衬底或封装材料的表面绝缘电阻		防护技术能有效地增加并联电阻
	材料的电阻率	电压表输入电阻低	使用静电计或使用加电压测电流的方法
	聚合物的电导率	偏置电流	在测试电压关闭时, 抑制或用 REL 功能消去偏置电流。
	表面 / 体电阻率	静电耦合	使用交替电压极性的方法。
高源内阻 测电压	四探针测量		屏蔽、避免附近物体的移动或电压的变化。
	分布电阻	共模电流	使用交替电压极性的方法。
	pH 或离子选择电极	分流电阻	将 DUT 的一端接地。使用模拟滤波器
	介电吸收	偏置电流	使用绝缘电阻更高的夹具和电缆。
	FET 栅极电压	静电耦合	防护技术能有效地增加并联电阻
	霍尔效应电压	仪器产生的波动电流	使用静电计

附录 B

电缆和连接器 组件

合适的电缆和连接器组件对于保持低电平测量工作的完整性是一个很重要的因素。一般地说，低电平测量工作使用三种类型的电缆：同轴电缆、三同轴电缆（triaxial）和屏蔽的双绞线。此外，电缆还常常按照低噪声或者低热电动势的要求来设计。在将低噪声的同轴电缆或三同轴电缆直接连到源或者连接到连接器组件之前，应当进行适当的准备工作，此时应当遵照如图 B-1 所说明的步骤：

1 轻轻地切去电缆的外层绝缘材料，但不得切到屏蔽层。

2 使用尖的针拆开屏蔽编织层。

3 将编织层绞合起来，并且用甲醇彻底清除所有的石墨痕迹。对于三同轴电缆来说，对内层屏蔽重复上述的步骤。

4 将中心导体剪成适当的长度，剥去中心导体上的绝缘材料，并且将导体端部“镀锡”。

5 在准备将要插入连接器的电缆时，按照所使用的特定连接器的装配说明，将电缆的编织层向后剪去。

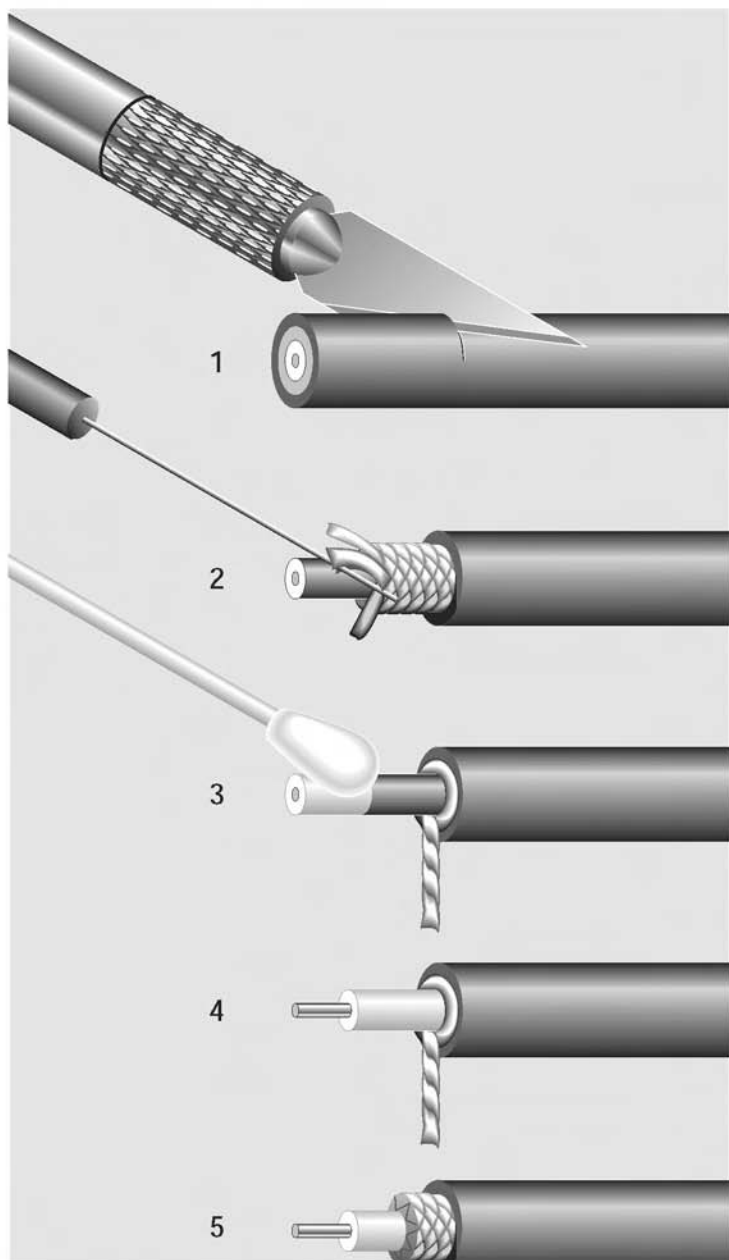
连接器应当具有很高的绝缘电阻。通常人们愿意使用聚四氟乙烯，因为这种材料能够抵御表面污染。同轴的或三同轴的电缆都有使用聚四氟乙烯作为绝缘材料的产品。

注意，BNC 连接器和双槽的三同轴连接器很类似，要特别注意只使用互相匹配的连接器的。如果将 BNC 连接器和双槽的三同轴连接器配合使用，其结果将会损坏插头和插座。在适当的情况下，使用三槽的三同轴连接器就可以解决这个问题。

虽然有些低电平仪器使用同轴连接器，但是大多数仪器都使用三同轴连接器。三同轴电缆具有高共模测量中所需要的接地屏蔽。一般来说，外层屏蔽连至电源地，而内层屏蔽则连至信号 LO 端。而且，三同轴方式的连接容易使用保护技术。在这种配置中，内层屏蔽连至保护电位，而外层屏蔽连至地。当暴露的金属处于保护电位，而保护电压大于 30V 有效值时，使用这种方案会存在不安全的危险。

和任何绝缘器件一样，连接器的绝缘部分必须保持清洁，以免降低其泄漏电阻。避免触摸其绝缘材料。如果连接器受到污染，可以用甲醇或者蒸馏水来清洗。清洗时只能使用最纯的清洁剂，将污染物从污染区域彻底冲掉。除去所有的污染物之后，将连接器在低湿度的环

境中干燥几个小时，然后再使用。



附录 C

技术术语

Absolute Accuracy (绝对准确度): 仪器的读数和对于公认的标准机构认可的标准具有绝对溯源性的一级标准的读数之间接近程度的度量。

A/D (Analog-To-Digital) Converter (模数变换器): 用来把模拟输入信号变换成数字信息的电路。所有的数字仪表都使用 A/D 变换器将输入信号变换为数字信息。

Analog Output (模拟输出): 直接正比于输入信号的输出。

Assembler (分子组装器): 一种能够通过放置分子来指导化学反应的分子制造设备。通过对其编程实际上能够从比较简单的化学组件制造出任何分子结构或器件。

Auto-Ranging (自动量程): 仪器自动地在各个量程之间切换, 以确定给出最高分辨率的量程的能力。各个量程通常是按十进值步进的。

Auto-Ranging Time (自动量程时间): 对于具有自动量程能力的仪器来说, 自动量程时间是从向仪器加入步进输入信号到仪器显示出结果之间的时间间隔, 其中包括确定并改变到正确量程的时间。

Bandwidth (带宽): 在一定的限度内能够通过或者放大的频率范围。带宽通常按 -3dB (半功率) 点来规定。

Bias Voltage (偏置电压): 在测试时, 加到电路或器件上用来建立器件的参考电平或者工作点的电压。

Capacitance (电容): 在电容器或者由导体和介电材料组成的系统中, 当导体之间存在电位差时, 能够储存电气上分离的电荷的性质。电容与电荷及电压的关系为: $C=Q/V$, 其中 C 为以法拉为单位的电容, Q 为以库仑为单位的电荷, V 为以伏特为单位的电压。

Carbon Nanotube (碳纳米管): 由单层碳原子形成的、具有新的电学和张力性质的管状纳米器件。这种纤维可能表现出象铜那样高的导电性, 象金刚石那样的导热性, 其强度比钢高 100 倍, 而重量却只有钢的六分之一, 能够承受很高的应变而不会损坏。这种材料可以是超导体、绝缘体、半导体或者导体 (金属)。非碳的纳米管通常称为纳米线, 通常由氮化硼或者硅生成。

Channel (switching) (通道与开关): 开关卡上若干个信号通道之一。对于扫描器或多路选通卡来说, 在测量电路中通道用作开关输入, 在源电路中通道用作开关输出。在开关卡上, 每个通道与其它的通

道独立。在矩阵卡上，通道则由行列交叉点上的继电器的动作而形成。

Coaxial Cable (同轴电缆)：由两个或者多个互相绝缘的同轴柱形导体形成的电缆。最外层导体通常为大地端。

Common-Mode Rejection Ratio (CMRR) (共模抑制比)：仪器对于其输入端对地的公共电压干扰的抑制能力。通常用给定频率下的分贝数来表示。

Common-Mode Current (共模电流)：在仪器的输入低端和机箱地之间流过的电流。

Common-Mode Voltage (共模电压)：在仪器的输入低端和仪器大地之间的电压。

Contact Resistance (接触电阻)：当继电器或者连接器的接点闭合或接触时，其接点之间以欧姆为单位的电阻。

Contamination (沾污)：通常用来说明不希望的物质对半导体或绝缘体的物理、化学、或电学性质的不良的影响。

D/A (Digital-To-Analog) Converter (数模变换器)：用来把数字信息转换成模拟信号的电路。在很多的仪器中都使用数模变换器来提供隔离的模拟输出。

Dielectric Absorption (介电吸收)：以前充电的电容器在瞬时放电以后，剩余储存电荷的效应。

Digital Multimeter (DMM) (数字多用表)：将模拟信号转换成数字信息并进行显示，测量电压、电流、电阻、或其它电参数的电子仪器。

Drift (漂移)：输入信号或者工作条件不变时，读数的逐渐变化。

Dry Circuit Testing (干电路测试)：为了不影响被测器件的氧化层或者使其发生其它性能下降，保持器件两端的电压为一定电平（例如 $< 20\text{mV}$ ）的测量过程。

Electrochemical Effect (电化学效应)：由沾污和湿度引起的原电池效应而产生电流的现象。

Electrometer (静电计)：专门精制的直流多用表。与数字多用表相比，静电计的特点是更高的输入阻抗和更高的电流灵敏度。它还可

能具有一般数字多用表所没有的功能(例如,测量电荷、输出电压等)。

EMF (电动势): 电动势或者热电势。EMF通常用于由电磁、电化学或者热电效应产生的电压差的情况。

Electrostatic Coupling (静电耦合): 由导体附近变化或运动的电压源产生电流的现象。

Error (误差): 测量结果与其真值的偏差(差值或者比率)。真值由其本质决定是不可能确定的。参见 Random Error 和 Systematic Error。

Fall Time (下降时间): 信号从其峰-峰值的一个大的百分比(通常为90%)变到其峰-峰值的一个小的百分比(通常为10%)所需要的时间。参见 Rise Time。

Faraday Cup (法拉第杯): 法拉第杯(有时又称为法拉第笼或法拉第桶)是用金属板或者金属网制成的封闭设备。它由两个电极组成,一个在另一个的内部,由绝缘体分开。内电极连到静电计,外电极连到地。当带电物体放到内电极里面的时候,所有的电荷就将流到测量仪器。由于闭合、中空的导体中的电场为零,所以,法拉第杯就把放在其内部的物体屏蔽起来,不受大气的或者任何寄生的电场的影响。这样就能准确地测量物体上的电荷。

Feedback Picoammeter (反馈式皮安计): 使用运算放大器反馈结构把输入电流变换成电压进行测量的灵敏的安培计。

Floating (浮地): 在大地和感兴趣的仪器或电路之间存在共模电压的电路状态。(电路低端不连到地电位)

Four-Point Probe (四探针): 四点同线探针电阻率测量技术用四个等距离的探针和未知电阻率的材料接触。此探针阵列放在材料的中央。使已知的电流流过两个外部的探针,而在两个内部的探针进行电压取样。电阻率计算如下:

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \times t \times k$$

其中: V = 测量出的电压(伏特)

I = 所加的电流(安培)

t = 晶圆片的厚度(厘米)

k = 由探针与晶圆片直径之比和晶圆片厚度与探针分开距离之比决定的修正因数。

Four-Terminal Resistance Measurement (四端电阻测量): 用两条引线向未知电阻供给电流, 用另外两条引线测量未知电阻两端的电压降的测量方法。在测量低电阻时, 四端测量方法具有最大的好处。

Fullerene (富勒): 又称为 C60, 是一个近似球形的、中空的碳分子, 它包含 60 个排列成互锁的六角形和五角形的碳原子, 令人回忆起建筑学家 R. Buckminster Fuller 创造的测地线形的园屋顶。有时又称为 buckminsterfullerene 或者 buckyball。

Ground Loop (地回路): 两台或者多台仪器连到地线的不同点和大地或电源地时出现的情况。地回路能够产生不希望的偏置电压或者噪声。

Guarding (保护): 一种降低泄漏误差、减小响应时间的技术。保护的做法是用一个由低阻抗源驱动的导体包围高阻抗信号的引线。保护电压保持在或者接近该信号电压的电位。

Hall Effect (霍尔效应): 当导体放在磁场中时, 测量跨越该导体的横向电压。通过这种测量, 可以确定硅中的载流子的类型、浓度和移动性。

High Impedance Terminal (高阻抗端子): 源阻抗乘以期望的寄生电流 (例如: $1\mu\text{A}$) 超过需要的电压测量灵敏度的端子。

Input Bias Current (输入偏置电流): 由于仪器内部的电流和偏置电压而在仪器输入端流动的电流。

Input Impedance (输入阻抗): 在输入端测量出的并联的电阻和电容 (或者电感), 不包括输入偏置或者偏置电流的影响。

Input Offset Current (输入偏置电流): 为了使输出指示值为零, 而在差动仪器的输入测量端加入的两个电流之差 (输入电压和偏置电压均为零)。有时非正式地用来代表输入偏置电流。

Input Offset Voltage (输入偏置电压): 在经过电阻通路加入偏置电流的情况下, 为了使输出指示值为零而在输入测量端之间必须直接加入的电压。

Input Resistance (输入电阻): 输入阻抗的电阻分量。

Insulation Resistance (绝缘电阻): 绝缘材料的欧姆电阻。绝缘电阻随着湿度的上升而迅速下降。

Johnson Noise (约翰逊噪声): 电阻器中由于电荷载体的热运动而引起的噪声。它具有白噪声频谱, 并且由温度、带宽和电阻值决定。

Leakage Current (泄漏电流): 当施加电压时, 流过(漏过)绝缘电阻的误差电流。即使在弱电流导体与附近的电压源之间的高电阻通路中也能产生很大的泄漏电流。

Long-Term Accuracy (长期准确度): 在 90 天或者更长的时间期间内, 误差不能超过的极限值。它的表达方式为在规定的温度范围内, 读数(或者输出值)的百分数加上字数。

Maximum Allowable Input (最大允许输入): 在高、低输入测量端之间可以加入的、不致损坏仪器的最大直流加交流峰值数值(电压或者电流)。

MEMS (Microelectromechanical system) (微机电系统): 能够响应激励或者产生物理力(传感器和执行器), 并具有微米级尺寸的系统。通常采用与制造硅基 IC 相同的平面技术来制造。

Micro-ohmmeter (微欧姆计): 专门针对低阻测量的欧姆计。典型的微欧姆计采用四端测量方法, 并且具有专门的特点以获得最好的低阻测量准确度。

Molecular Electronics (分子电子学): 由纳米尺寸的原子级精密电子器件, 特别是由离散的原子元件, 而不是当今半导体器件中所使用的连续材料制成的器件组成的系统。

Molecular Manipulator (分子操纵器): 将邻近探头机构和顶端的分子粘合点组合起来, 用于原子级精密定位的装置。可以作为用位置综合建造复杂机构的基础。

Molecular Manufacturing (分子制造业): 使用分子机械, 通过定位化学合成对产品和副产品的分子进行逐个控制的制造业。

Molecular Nanotechnology (分子纳米工艺): 按照对产品和副产品进行逐个分子控制的方法, 彻底地、经济地控制物质结构; 产品和分子制造工艺包括分子机械。

MOSFET (金属氧化物场效应晶体管): 具有极高输入电阻特性的单极性器件。

Nano- (纳): 前缀, 其意义为十亿分之一。

Nanoelectronics (纳米电子学): 纳米尺度上的电子学。包括分子电子学和类似于当今半导体器件的纳米尺寸器件。

Nanotechnology (纳米技术): 制作具有原子或分子尺寸精密度的器件。一般认为最小尺寸小于 100 纳米的器件为纳米技术产品。纳米 (十亿分之一米, 即 10^{-9} 米) 是通常最适合描述单个分子的尺寸的单位。

Nanovoltmeter (纳伏表): 最适合提供纳伏灵敏度的电压表 (一般都采用低热电动势的连接器、偏置补偿等)。

Noise (噪声): 叠加在有用信号上的任何不希望有的信号。

Normal-Mode Rejection Ratio (NMRR) (串模抑制比): 仪器抑制跨越其输入端的干扰的能力。通常用一定频率下的分贝数来表示, 例如交流电源频率下的分贝数。

Normal-Mode Voltage (串模电压): 在仪器高、低输入端之间所加的电压。

Offset Current (偏置电流): 在没有加入信号的情况下电路产生的电流。偏置电流是在电路中存在摩擦电、压电、或者电化学效应的情况下产生的。

Overload Protection (过载保护): 保护仪器不受其输入端的过高电流或电压影响的电路。

Picoammeter (皮安计): 最适合精密测量小电流的安培计。一般为反馈安培计。**Piezoelectric Effect (压电效应):** 用来说明向某种类型的绝缘体施加应力的时候产生电流的术语。

Precision (精度): 代表测量中的不确定的程度。常常用在可重复性或者可复制性等场合, 但不应当用于准确度的场合。参见 Uncertainty。

Quantum Dot (量子点): 能够束缚一个或几个电子的纳米级尺寸的物体 (通常为一个半导体岛), 其中电子占据离散的能量状态, 就

象在原子一样。量子点曾被称为“人造原子”。

Random Error (随机误差): 受随机误差方式影响的大量测量结果的平均值与真值的偏差。参见 Systematic Error。

Range (量程): 能够测量或者输出的信号数值的连续带。在双极性仪器中, 量程包括正值和负值。

Reading (读数): 代表输入信号特性的显示数字。

Reading Rate (读数速率): 读数更新的速率。读数速率是读数之间的时间间隔的倒数。

Relative Accuracy (相对准确度): 测量仪器相对于第二个标准的准确度。参见 Absolute Accuracy。

Repeatability (重复性): 在相同条件下, 连续进行的测量之间的一致性。

Reproducibility (复现性): 按照给定的变化条件, 对同一个量所进行的测量之间的一致性。

Resolution (分辨率): 可以测量(或输出)和显示的输入(或输出)信号的最小的部分。

Response Time (响应时间): 对测量仪器来说, 是指从加入阶跃输入信号到按照额定的准确度指示出其幅度值的时间; 对源仪器来说, 是指从程控仪器进行改变到在其输出端得到该数值的时间。参见 Settling Time。

Rise Time (上升时间): 信号从其峰-峰值的一个小的百分比(通常为 10%) 变到其峰-峰值的一个大的百分比(通常为 90%) 所需要的时间。参见 Fall Time。

Sensitivity (灵敏度): 可以测量或显示的最小的量。

Settling Time (建立时间): 对测量仪器来说, 是指从加入阶跃输入信号到按照额定的准确度指示出其幅度值的时间; 对源仪器来说, 是指从程控仪器进行改变到在其输出端得到该数值的时间。参见 Response Time。

Shielding (屏蔽): 围绕着被测量电路的金属闭合体或者围绕着

导线（同轴电缆或者三同轴电缆）的金属套，用来接收干扰、交互作用和泄漏。屏蔽通常接地或者连到输入低端。

Shunt Ammeter（分流安培计）：采用分流电阻将输入电流转换成电压来测量电流的安培计。分流安培计比反馈安培计的输入端压降更高、灵敏度更低。

Shunt Capacitance Loading（并联电容负载）：输入端子之间的电容（如电缆或设备）对测量的影响。并联电容会增加上升时间和建立时间。

Short-Term Accuracy（短期准确度）：在连续工作一个短的、规定的时间期间（例如 24 小时），误差不得超过的极限值。除非另有规定，不允许进行任何类型的调零和调节。它的表达方式为在规定的温度范围内，读数（或者输出值）的百分数加上字数。

Single Electron Transistor（单电子晶体管）：采用受控的电子隧道来放大电流的开关器件。单电子晶体管由共用一个公共电极的两个隧道结构成。隧道结则是由以一片极薄（约为 1 纳米）的绝缘体分开的两片金属组成的。电子从一个金属电极行进到另一个电极的唯一方法是隧道穿越该绝缘体。隧道穿越是一种离散的过程，流过隧道结的电荷是以单个电子的电荷 e 的倍数来流动的。

Source Impedance（源阻抗）：源对于测量仪器输入端呈现的电阻和容抗或感抗的组合。

Source-Measure Unit（SMU）（源-测量单元）：能够输出和测量直流电压和电流的电子仪器。一般的说，SMU 具有两种工作模式：电压源、电流测量，或者电流源、电压测量。又称为源-监视单元或者激励-测量单元。

SourceMeter（数字源表）：数字源表仪器在很多方面类似于源-测量单元，这包括输出和测量电流和电压以及进行扫描的能力。此外，数字源表仪器能够直接以电阻、电压和电流的形式显示测量结果。它是为通用的、高速生产测试应用而设计的。它也可以在中-低电平测量中作为源来使用，或者用于研究工作中。

Source Resistance（源电阻）：源阻抗的电阻分量。参见 Thevenin Equivalent Circuit。

Spintronics (旋转电子学): 以某种方式利用电子旋转, 而不只考虑其电荷的电子学。

Standard Cell (标准电池): 在实验室中用作电压参考标准的电化学电池。

Superconductor (超导体): 具有零电阻的导体。这种材料通常只在很低的温度下才变成超导体。

Switch Card (开关卡): 具有独立或者绝缘的继电器, 来切换每个通道的输入和输出的一类电路卡。

Switching Mainframe (开关主机): 用来连接源、测量仪器和被测设备的信号的一种开关仪器。这种主机又称为扫描器、多路器、矩阵或者程控开关。

Systematic Error (系统误差): 受系统误差方式影响的大量测量结果的平均值与真值的偏差。参见 Random Error。

Temperature Coefficient (温度系数): 对读数(或者输出值)随温度的变化而变化的一种度量。表示为每度温度变化时的读数(或者输出值)的百分数加上字数。

Temperature Coefficient of Resistance (电阻温度系数): 每度温度变化时, 材料或器件的电阻变化量, 通常表示为 ppm/°C。

Thermoelectric EMFs (热电动势): 在电路中, 或者当不同材料的导体结合在一起时, 由于温度差而产生的电压。

Thevenin Equivalent Circuit (戴文宁等效电路): 用来对复杂的两端线性网络进行简化分析的电路。戴文宁等效电压为开路电压, 戴文宁等效电阻等于开路电压除以短路电流。

Transfer Accuracy (传递准确度): 在有限温度范围和时间期间内, 两个接近相等的测量的比较, 表达为 ppm。参见 Relative Accuracy、Short-Term Accuracy。

Triboelectric Effect (摩擦电效应): 由导体和绝缘体之间摩擦生成的电荷而产生电流的现象。

Trigger (触发): 启动一个或多个仪器功能的外部激励。触发激励包括: 输入信号、前面板操作、外部触发脉冲、IEEE-488

总线 X、讲和 GET 触发。

Two-Terminal Resistance Measurement (两端电阻测量): 通过同一套测试引线加入源电流并进行电压取样的测量方法。

Uncertainty (不确定度): 对测量中可能的误差的估计, 换言之, 估计的与实际值可能的偏差。

van der Pauw Measurement (范德堡测量): 用来测量任意形状样品的电阻率的测量技术。

Voltage Burden (输入端压降): 安培计输入端上的电压降。

Voltage Coefficient (电压系数): 电阻值随所加电压的不同而变化。通常表示为百分数/V 或者 ppm/V。

Warm-Up Time (预热时间): 从接通电源到仪器达到参考条件下的额定准确度所需要的时间。

Zero Offset (零点偏置): 测量仪器的输入端短路(电压表)或者开路(电流表)时, 发生的读数。

附录 D

安全性考虑

测试系统的安全性

很多电学测试系统或仪器都能测量或输出危险的电压和功率电平。这样就有可能在某种故障条件下（例如：程序错误、或仪器故障），输出危险的电平，而系统并不指示出危险的存在。

由于高电压和功率电平的存在，保护操作人员在任何时候都不会遭受这种危险就非常重要。

保护的方法包括：

- 设计测试设备使操作人员避免接触任何危险的电路。
- 确保被测设备完全封闭，避免操作人员被任何飞出的碎片击中。
- 将操作人员可能接触到的所有电路连接进行双重绝缘。双重绝缘能够保证即使在一个绝缘层损坏时，第二层绝缘还可以保护操作人员。
- 当测试设备的盖子打开时，使用高可靠性的，在故障时也安全的，互锁开关切断电源。
- 在可能的时候，使用自动的手柄，使操作人员不需要接触测试设备的内部，或者打开保护装置。
- 对所有的系统使用者进行培训，使他们了解所有潜在的危险，并知道如何保护自己不受伤害。

注意：开机上电时，在其软件和硬件的初始化完成之前，电路板的状态是不受控制的。使用者必须确认他们的设计方案能够承受这种状况，或者提供适当的互锁能力，以避免危险的电压或危险的动作触及使用者。

一般安全性考虑

测试系统的设计者、集成商和安装人员有责任确保对操作人员和维护人员的保护措施到位并有效。

在使用任何吉时利公司的产品和相关的仪器时必须遵守下列安全预防措施。虽然一些仪器和附件通常都是在没有危险电压的情况下使用的，但是也存在着可能出现危险电压的情况。吉时利公司的产品是供有资质的人员使用的，这些人员应当认识到电击的危险，并且熟悉

避免出现可能的伤害所需要的安全预防措施。在使用任何吉时利公司的产品之前，应当仔细地阅读每种产品的手册中所提供的操作信息。

产品使用者的类型如下：

责任实体是对设备的使用和维护、保证设备在其技术指标和工作范围内工作、保证操作人员受到恰当的培训等工作负责的个人或者团体。

操作人员为了预定的目的使用该产品的人员。必须对他们进行关于电气安全预防措施和正确使用仪器等方面的培训。必须保护他们不会受到电击，不会接触到危险的带电电路。

维护人员对产品进行日常的维护工作，以保证其正常工作，例如设置电源电压或者替换消耗性材料等。维护工作的步骤在手册中说明。应当明确地说明操作人员是否可以执行这些步骤。否则，该工作步骤只能由维修人员进行。

维修人员是经过培训面向带电电路工作，并对产品进行安全安装和修理工作的人员。只有经过恰当培训的维修人员才可以进行安装和维修工作。

当存在电击危险时应当极为小心。在电缆连接器的插座或者测试设备上可能会出现致命的电压。美国国家标准委员会（ANSI）指出，当出现超过30V有效值、42.4V峰值、或者60V直流的电压电平时，就存在着电击的危险。在测量之前就考虑到任何未知的电路上可能存在着危险的电压是一个很好的安全性实践经验。

必须随时保护这些产品的使用者使其不受电击的危害。责任实体必须确保使用者无法接触到每个连接点和/或将使用者与这些连接点绝缘隔离。有的时候，必须暴露某些连接点，从而可能会被人接触到。在这种情况下，必须对使用者进行培训，以避免他们受到电击的危险。如果电路能够工作在1000V或者更高的电压，则不应暴露电路的任何导电部分。

按照国际电工委员会（IEC）标准 IEC664 所述，这些仪器属于安装第 I 类别，其信号线必须不得直接连到 AC 电源。

对于不能直接触及电源线的机架安装设备来说，在发生火灾或者其他灾难性故障的情况下，必须为使用者提供一个分离的电源切断开关。

不要将开关卡直接连到没有受到限制的电源电路。这些板卡是用于阻抗有限的源的。绝对不能将开关卡直接连到AC电源。在把源连到开关卡时，应当安装保护器件以限制送往该卡的故障电流和电压。

在操作仪器之前，确认电源线已经插入良好接地的电源插座中。在每次使用之前，均应检查连接电缆、测试引线和跳线等有无可能的磨损、破裂或折断。

为了最大限度地保证安全，在被测电路已经加电的情况下，不要触摸产品、测试电缆、或任何其它的仪器。务必首先撤去整个测试系统的电源、并将有关电容器放电，然后再连接或拆除电缆或跳线，安装或拆除开关卡，或者进行其内部的变动，例如安装或拆除跳线等工作。

不要接触任何能够向被测电路公共端或者电源的（大地）地线提供电流通路的物体。总是要站在干燥的、能够承受被测电压的绝缘表面上，用干燥的手来进行测量工作。

必须按照有关的技术规范和操作指南来使用仪器和附件，否则会削弱设备的安全性。

不要超过在其技术指标和操作信息中给出或者在仪器或测试设备面板上或开关卡上标示出的仪器和附件的最大信号电平。

产品中使用保险丝时，应当用相同型号和容量的保险丝来替换，以便连续地预防火灾的危险。

机箱的连接点只能用作测量电路的屏蔽连接，不能用于安全性的大地接地连接。

如果使用测试设备，在被测器件加电时，应当使设备的盖子关闭。为了安全的操作，要求使用盖子互锁装置。

如果出现带⊕符号的螺钉，应当使用用户文件中推荐的导线将其连接到安全大地接地点。

仪器上的⚡符号表明使用者应当参阅仪器手册中的操作指南。

仪器上的⚡符号表明能够输出或者测量1000V或更高的电压，其中包括常模或共模电压的组合影响。采用标准的安全防护措施以避免人员接触这种电压。

手册中以警告开头的段落说明可能引起人员伤亡或死亡的危险情

况。在进行指出的操作之前，一定要非常仔细地阅读有关的信息。

手册中以注意开头的段落说明可能损坏仪器的危险情况。这种损坏可能会破坏仪器的保修条件。

不应当将仪器和附件与人连接。

在进行维护之前，切断电源线和所有的测试电缆。

为了保持对电击和火灾的防护能力，必须从吉时利公司购买电源电路的替换元件，包括电源变压器、测试引线和输入插座。如果容量和型号相同，可以使用经过国家安全认证的标准保险丝。只要与原来的元件等同，其它与安全无关的元件可以向其它的供应商购买。（注意，经过挑选的元件只能从吉时利公司购买，以保持产品的准确度和功能）如果不能肯定替换元件的可用性，请致电吉时利公司咨询。

对仪器进行清洁处理时，应使用潮湿的布或者柔软的水质清洁剂。只能清洗仪器的外部。不要直接向仪器施用清洁剂或者使液体进入或溅入仪器内部。如果按照说明的要求来操作和使用的話，不带外壳或机箱的电路板产品（例如安装到计算机里的数据采集板）无须清洁处理。如果此种电路板受到污染并影响其工作的話，应当将该板送回工厂进行适当的清洁处理和维修。

Specifications are subject to change without notice.

All Keithley trademarks and trade names are property of Keithley Instruments, Inc.

All other trademarks and trade names are the property of their respective companies.

KEITHLEY

A GREATER MEASURE OF CONFIDENCE

美国吉时利仪器公司

北京市海淀区北太平庄路 18 号 ■ 城建大厦 A1301 ■ 邮编: 100088 ■ 800-810-1334

电邮: china@keithley.com ■ 网址: www.keithley.com.cn

北京办事处

北京市海淀区北太平庄路 18 号

城建大厦 A1301

邮编: 100088

电话: 010-82255010, 82255011

传真: 010-82255018

email: china@keithley.com

上海代表处

上海市延安中路 841 号

东方海外大厦 1206 室

邮编: 200040

电话: 021-62898246, 62894910

传真: 021-62899335

email: shanghai@keithley.com

深圳代表处

深圳市深南中路 2 号

新闻大厦 11 楼 14 室

邮编: 518027

电话: 0755-82090093, 82090095

传真: 0755-82090087

email: shenzhen@keithley.com

比利时: Sint-Pieters-Leeuw A • 02-363 00 40 • Fax: 02-363 0064 • www.keithley.nl

芬兰: Helsinki • 09-5306-6560 • Fax: 09-5306-6565 • www.keithley.com

法国: Saint-Aubin • 01-64 53 20 20 • Fax: 01-60 11 77 26 • www.keithley.fr

德国: Getmering • 089/84 93 07 40 • Fax: 089/84 93 07 34 • www.keithley.de

英国: Theale • 0118 929 7500 • Fax: 0118 929 7519 • www.keithley.co.uk

意大利: Milano • 02-48 39 16 01 • Fax: 02-48 39 16 28 • www.keithley.it

日本: Tokyo • 81-3-5733-7555 • Fax: 81-3-5733-7556 • www.keithley.jp

韩国: Seoul • 82-2-574-7778 • Fax: 82-2-574-7838 • www.keithley.com

荷兰: Gorinchem • 0183-635333 • Fax: 0183-630821 • www.keithley.nl

新加坡: Singapore • 65-6747-9077 • Fax: 65-6747-2991 • www.keithley.com

瑞典: Solna • 08-509 04 600 • Fax: 08-655 26 10 • www.keithley.com

台湾: Hsinchu • 886-3-572-9077 • Fax: 886-3-572-9031 • www.keithley.com.tw