

An Introduction to
Electrical Instrumentation
and Measurement Systems

[美] B. A. 格雷戈里

王百锁 王鸿钰 译

宋丽川 李春宝 校

电工仪器及测量系统导论

人民交通出版社

内 容 简 介

本书叙述了各种仪器仪表(从传统的指针仪表到新近发展起来的智能仪器)及测量系统的工作原理和用途;讨论了与测量及仪器有关的各种课题:测量误差,传感器,信号调节,干扰和屏蔽,仪器规格和选择等。此外,还介绍了仪器和测量方面的新进展。

本书的内容相当丰富,取材比较新颖。

本书可作为高等学校测量和仪器专业的教科书或教学参考书,也可供从事测量和仪器工作的工程技术人员使用。

原著从1973年到1981年在英国共印刷了五次(两版),本书是按第二版译出的。王鸿钰译3、4两章,王百锁译其余各章并统稿。全书由宋丽川、李春宝校。责任编辑吴保宁。

An Introduction to Electrical Instrumentation and Measurement Systems

B.A. Gregory

Published by THE MACMILLAN PRESS LTD

London and Basingstoke

电工仪器及测量系统导论

[美]B.A.格雷戈里

王百锁 王鸿钰 译

宋丽川 李春宝 校

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本: 850×1168 1/32 印张: 15.5 字数: 376千

1987年1月 第1版

1987年1月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—2,700册 定价: 4.90 元

目 录

序.....	1
第一章 绪论.....	3
1.1 测量方法	4
1.2 显示方法	20
1.3 精度	26
1.4 输入特性	42
1.5 波形	47
1.6 干扰	55
1.7 选择	57
参考文献.....	58
第二章 模拟仪器.....	60
2.1 磁电系仪表	60
2.2 电动系仪表	109
2.3 其他指针式仪表	116
2.4 电度表	126
2.5 固体指示器	127
2.6 阴极射线示波器(CRO).....	128
2.7 仪用磁带记录器	149
参考文献.....	160
第三章 比较法.....	164
3.1 直流电位差计	164
3.2 交流电位差计	174
3.3 直流电桥	176
3.4 交流电桥	186
3.5 自动平衡电桥	204

参考文献	206
第四章 数字仪器	208
4.1 计数器	208
4.2 多功能数字电压表	228
4.3 “智能”仪器	241
4.4 混合式仪器	247
参考文献	259
第五章 传感器	263
5.1 变阻传感器	267
5.2 变抗传感器	286
5.3 半导体传感器	293
5.4 发电传感器	297
5.5 超声传感器	306
5.6 数字传感器	306
参考文献	308
第六章 信号调节	311
6.1 电压变换	311
6.2 电流互感器	322
6.3 衰减器	331
6.4 滤波器	336
6.5 探头	345
6.6 调制和取样	354
6.7 模拟处理	358
6.8 数一模转换	369
参考文献	369
第七章 干扰与屏蔽	372
7.1 环境影响	372
7.2 元件不纯	375
7.3 耦合干扰	383
7.4 噪声抑制指标	391

参考文献.....	402
第八章 仪器选择和规格分析.....	404
8.1 仪器选择	404
8.2 规格分析	407
参考文献.....	423
第九章 仪器系统.....	424
9.1 系统设计	424
9.2 模拟系统	425
9.3 数字系统	430
参考文献.....	445
第十章 习题和练习.....	447
10.1 原理	447
10.2 模拟仪器	449
10.3 零值或比较测量法	453
10.4 数字仪器	457
10.5 传感器	460
10.6 信号调节	462
10.7 干扰	463
10.8 选择	466
10.9 系统	473
10.10 答案	475
附录I 单位, 符号和换算系数	478
附录II 磁电系统的动态特性	482
附录III 确定“T”型电阻衰减器元件的方程.....	488

序

人们对某一量的认识取决于对该量的测量能力。鉴于在现代生活中，涉及电测量（或非电量的电测量）的行业有增无减，因此实践工程师必须全面掌握电工仪器和测量系统的知识。特别是因为除他自己需要外，可能还要指导没有电知识的人。

本书的主要目的是帮助攻读电机工程和电子工程学位的大学生对测量问题采取切实可行的方法。本书亦可供工程师和技术人员使用，现在他们常常碰到伏特、安培、欧姆和瓦特等量的测量，且面对愈来愈多的仪器种类，从简单的指针式仪表到复杂的计算机控制系统。因此，本书的另一目的是帮助工程师和仪器使用者对每一用途选择合适的仪器类型，然后分析由各个厂家生产的同类型仪器在性能上的差异，以便在每一测量场合都能得到最佳的仪器性能。

回顾在某一企业研究室工作的那段时间里，我有时为一些大学毕业生在进行相当基本的测量时缺乏选择合适（更谈不上最好）仪器的能力而感到吃惊。及至进入高等教育领域讲授电工测量和仪器，我的教学思想是指导学生考虑每一测量设施的利弊，然后对具体的情况选择最有利的仪器。当然，这种方法不得不包含对仪器类型的说明，且应使学生懂得每种仪器的功能和局限，以便进行最佳选择。

我要感谢各方面对本书前一版所作的评论和批评。无疑，这一版也会得到指正的。考虑到六年来在仪器上所出现的许多变化，在这第二版中，我对1973年版的内容进行了更新。此外，还增添了一些教学习题（第一版所欠缺的）。

本版作了明显的改编，主要是为了适应由于集成电路（如微处理器）发展而引起的仪器变化，微处理器的应用使得在仪器中

采用可编程序设备和计算设备成为可能。本书的基本内容是论述制成现有各种类型仪器所使用的技术，并以制造厂家所给的规格为例加以说明。可惜，由于篇幅（和价格），一本书所能包含的内容总有个限度。因此，我舍去了一些专门课题，如医疗仪器，化学分析，射频测量，声学测量以及程序设计等。可能有人认为最后一个课题是应该包括的，其理由是愈来愈多的测量设施将采用可编程序装置：无论是微处理器控制的专用仪器系统，抑或是使用高级语言的计算机操作系统。然而，我认为编制程序的讲授最好是由这方面的专家而不是由我来完成。为了帮助读者克服这方面和其他方面的困难，每章末都列有参考文献，以供进一步查阅。

我要感谢所有那些热情帮助我完成本书而提供了使用说明、仪器规格和论文影印本的仪器厂家及其乐于助人的现场工程师们。我虽尽力注明所有图表和其他资料的出处，但难免疏忽，务请原谅。我还要感谢布赖顿工业大学电机电子工程系的同事们给予我的帮助和鼓励。尤其要感谢的是：阅读和评论了各部分手稿的R. Miller, R. Thomas 和 K. Woodcock 三位博士，以及耐心而尽力打印了手稿的 Brenda Foster。

B.A. 格雷戈里

第一章 绪 论

有的文献^①把科学和技术仪器定义为用于观察、测量、控制、计算或通信的设备。此外，同一文献还指出：“仪器和仪器系统改善、扩展或补充了人类的感覺、接受、传递、记忆、计算或推理器官和能力。”

本书主要论述仪器及其特性，使得能在任何测量场合中以最佳的方式来检测电量、机械量和其他量的大小及其变化。在详细讨论仪器之前，值得考虑如下一些在做任何测量之前都必须回答的问题：

- (a) 最合适的测量方法是什么？
- (b) 测量结果应如何显示？
- (c) 被测量所容许的测量误差是多少？
- (d) 仪器对信号有何影响？
- (e) 信号波形对仪器的性能有何影响？
- (f) 仪器在什么频段内能正常工作？
- (g) 外部干扰对所得结果是否有影响？

这些问题的前提是：人们可以不受任何限制来选择仪器。实际往往不是这样，譬如说，仪器不齐备，或准备购买新仪器，但又受到财务上的限制。因此，正象解决任何一个工程问题一样，只有在理想和实际之间寻求折衷才能得到解答。

虽然如此，为使上述问题能得到确切的回答，我们将在下面章节中讨论由此而引出的一系列问题。

^① 科学和技术百科全书 (McGraw-Hill, 伦敦, 1971)。

1.1 测量方法

在测量之前，必须详述或规定所使用的方法、仪器、内部连接和测量条件。在测量过程中，必须详细记录与这些条件有关的全部参数，以便在需要重测时，原始条件能够正确再现。

将仪器和所采用的测量方法分成模拟、比较和数字三大类型，有助于人们的理解。然而，必须认识到，电子技术的发展已导致这三种基本类型的不断混合，从而产生了对某一具体用途最令人满意的仪器。

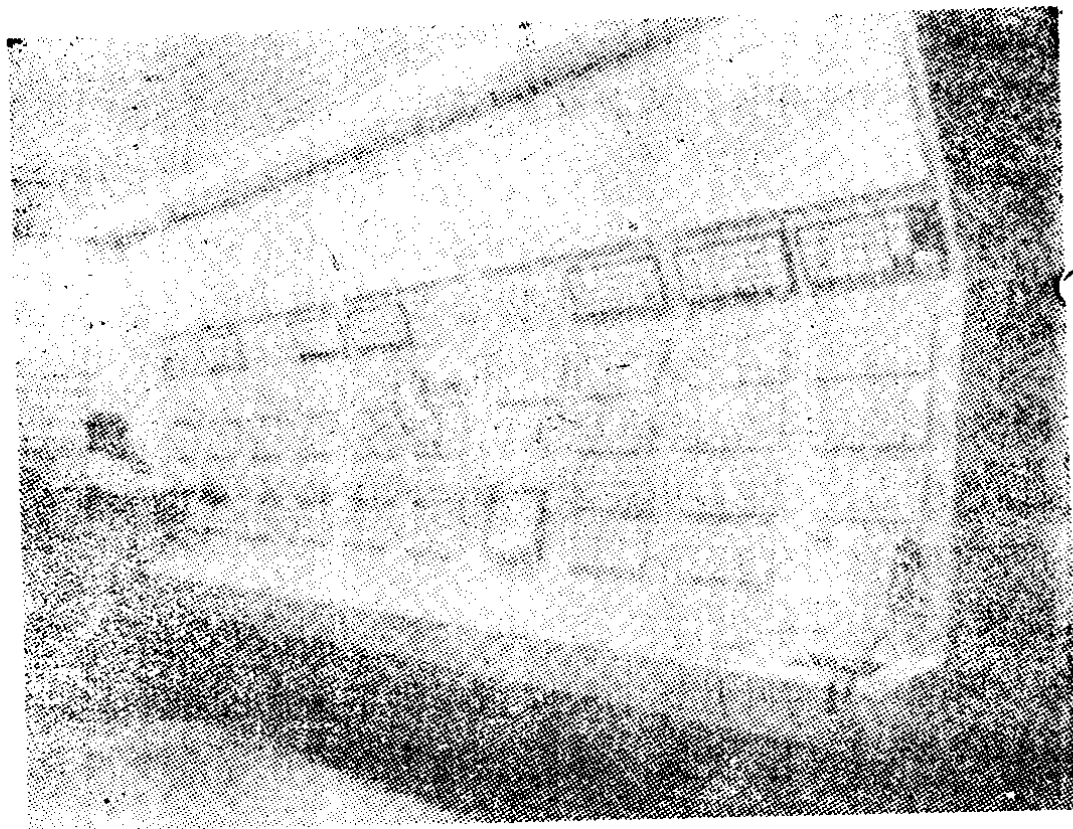
1.1.1 模拟技术

模拟测量是关于连续检测信号或待测量（被测量的量）大小的测量。

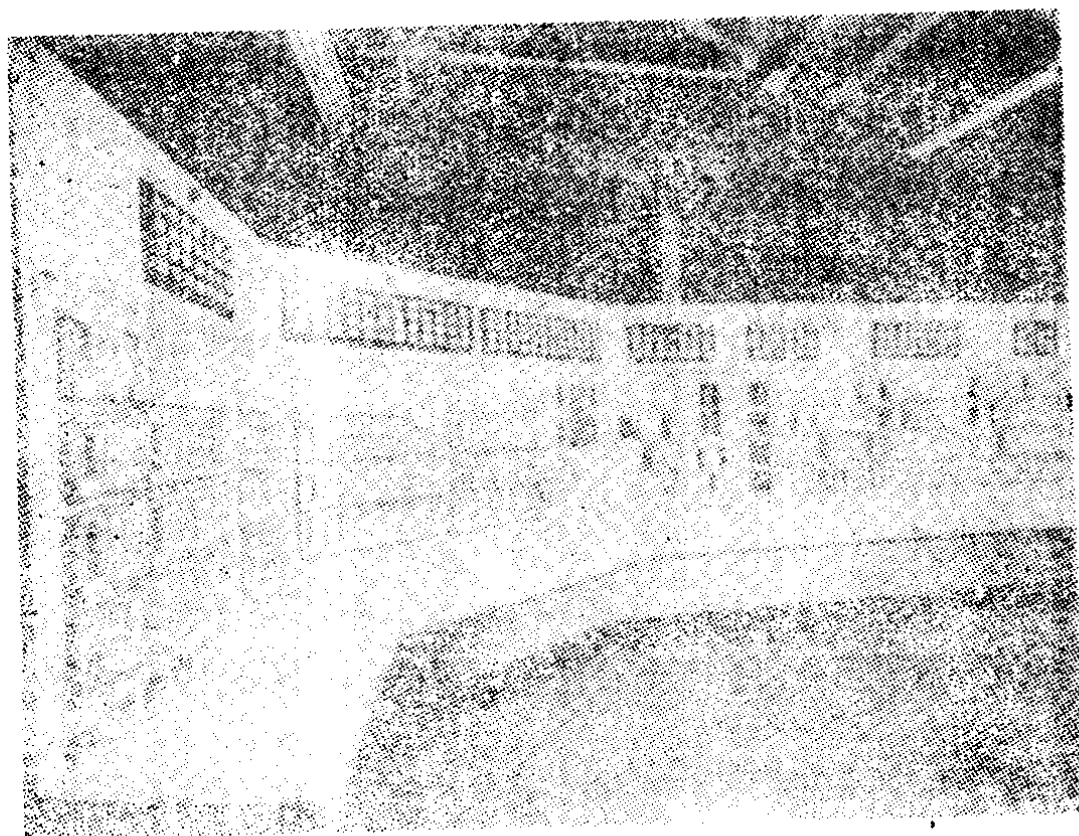
模拟仪表的使用是非常广泛的。虽然数字仪表的数量、多用途性和应用范围正在不断地增加，但是模拟仪表的使用很可能仍将持续许多年，而且对某些应用，看来也未必都能用数字仪表代替。例如，对同一信息来说，技术人员从多模拟显示（图1.1）中获得的信息量可能比从多数字显示中获得的多得多。然而，混合仪表数量的逐渐增多看来是非常可能的。

大多数模拟仪表都是机电式的。我们利用电流沿导体流动时，导体周围产生磁场，从而使指针偏转，这一事实，制成这种仪表。其方法是：(a)通过线圈磁场与永久磁铁的相互作用；(b)通过处在线圈磁场中的两个铁磁叶片间的相互作用；(c)通过几个线圈所产生的磁场间的相互作用。

迫使这些作用力形成转动，就能产生偏转力矩 $= Gf(i)$ 牛·米 ($\text{N}\cdot\text{m}$)。偏转力矩是流过仪表线圈的电流、线圈系统的几何结构和式样的函数。为了得到稳定指示，须使偏转力矩与一反作用力矩或控制力矩相等。控制力矩的大小必须随指针偏转角的增大而增大。由于采用游丝或带状悬丝结构，因此控制力矩 $= C\theta$ $\text{N}\cdot\text{m}$ 。



(a)



(b)

图1.1 多模拟显示台

(a) Mobil 芳香厂，南非，Durban市；(b) 为Das 岛液化天然气厂制造的显示台 (Kent过程控制有限公司)

式中 θ 是偏转角，以弧度计； C 是控制常数，以牛米/弧度计，其值将依赖于控制元件的材料和几何形状〔1〕。

仪表的运动部分具有转动惯量(J)，当偏转量变化时，就会产生加速力矩($Jd^2\theta/dt^2$ N·m)。因为可动部分是连接在控制弹簧上的，所以它们组成了质量—弹簧系统。为了防止输入电量变化时产生过度振荡，必须提供阻尼力矩($Dd\theta/dt$ N·m)，该力矩仅在可动部分运动时才起阻尼作用。提供阻尼力矩的方法有：

(a) 涡流阻尼——在这种方法中，附着在仪表可动部分的导体片因切割磁力线而感应出涡流。涡流产生的磁场与原磁场相互作用，阻碍位置的任何变化。

(b) 空气阻尼——在这种方法中，将一叶片附着在仪表的运动部分，周围空气对叶片运动的阻力提供了所需的阻尼。液体阻尼是这个原理的扩展，此时一小叶片被迫在一个充满适当粘液的容器中运动（见2.1.4节）。

(c) 电磁阻尼——线圈在磁场中运动时，会在其中产生感应电流。感应电流是反抗偏转电流的，因而它减慢了仪表的响应速度。感应电流的大小与仪表所连接的电路中的电阻有关。

在上述力矩的联合作用下，指针仪表的运动方程为

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + C\theta = Gf(i) \quad (1.1)$$

它有一个稳态解

$$C\theta = Gf(i) \quad (1.2)$$

和一个形式为

$$\theta = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} \quad (1.3)$$

的动态解或瞬态解（见附录 II）。式中 A 和 B 是任意常数，而

$$\lambda_1 = \frac{-D}{2J} + \left(\frac{D^2}{4J^2} - \frac{C}{J} \right)^{1/2} \quad (1.4)$$

$$\lambda_2 = \frac{-D}{2J} - \left(\frac{D^2}{4J^2} - \frac{C}{J} \right)^{1/2} \quad (1.5)$$

对于某一具体仪表， C 和 J 的值在制造时便已固定，但 D （阻尼量）是可以改变的，这将导致三种可能的瞬态响应模式：

(a) 当 $D^2/4J^2 > C/J$ 时，根 λ_1 和 λ_2 是两个不等的实数，这种情况称为过阻尼，见图1.2中的曲线(a)。

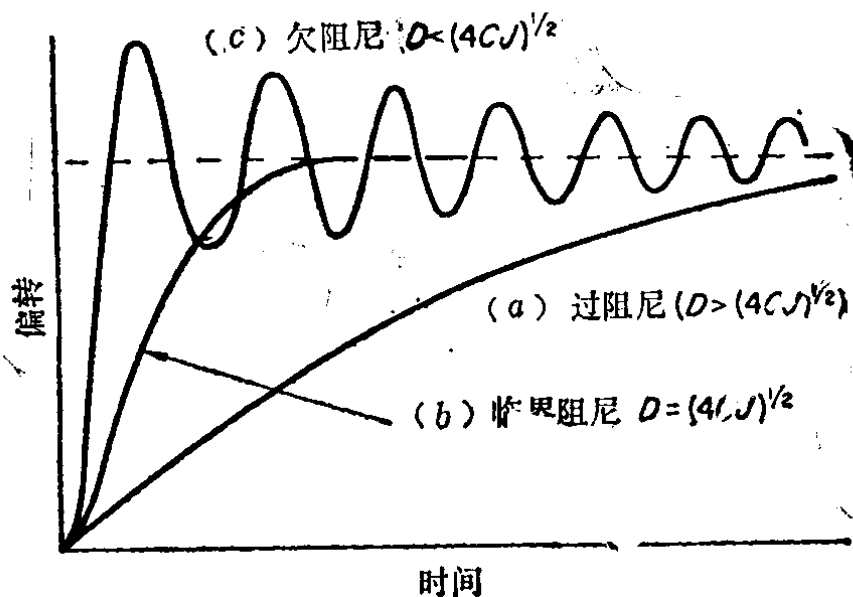


图1.2 阻尼量对运动响应的影响

(b) 当 $D^2/4J^2 = C/J$ 时，有两个相等的实根，此时的 D 值称为临界阻尼常数，见图1.2中的曲线(b)。

(c) 当 $D^2/4J^2 < C/J$ 时，二根是共轭复数，系统处于欠阻尼状态，见图1.2中的曲线(c)。衰减振荡频率为

$$\omega = \left(\frac{C}{J} - \frac{D^2}{4J^2} \right)^{1/2} \quad (1.6)$$

由此可见，给运动所施加的阻尼量对仪表的动态特性或响应速度有着重要影响。在大多数情况下，指针仪表的阻尼稍小于临界阻尼，以保证阻尼时间减至最小，使指针能迅速地从一个位置转到另一个位置。

1.1.2 比较技术

比较测量法能够提供具有最小不确定性的结果。然而，这种方法却要求技术人员具有较多的技巧和经验。此外，完成测量所需的时间可能相当长。这些因素加上技术人员费用的不断增长，

促使人们采用自动仪器或程序仪器来代替由技术人员操作的比较测量。这样做的好处是缩短了测量时间，并且有可能让低级技术人员来完成一致性测量，而使高级技术人员得以去完成其他工作。

以后将会看到，实现这种功能的一些现代仪器在其工作中采用了比较技术，所以懂得有关这方面的原理是重要的。

替代法

顾名思义，这种方法需要用已知量来替代未知量。适当地选择已知量的大小，使得原来的测量状态能被恢复。例如，考虑图1.3所示的情况。恒压源产生的电流 I 流过由安培表和待测电阻 R_x 串联而成的简单电路。转动开关 S 将待测电阻从电路中断开，而接入高质量的十进电阻箱 R_s 。逐渐调节电阻箱的阻值，直到电流恢复成 R_x 接在电路中时的指示值。此时，电阻箱的阻值就等于 R_x 的值。这种处理方法，仅在偶然场合才用来测量电阻。但是，在 Q 表（见2.3.4节）中，常常采用替代法来测量小电容的值。在测量时，初始状态的恢复是通过减小已知电容的电容量，其减少量等于待测电容量。

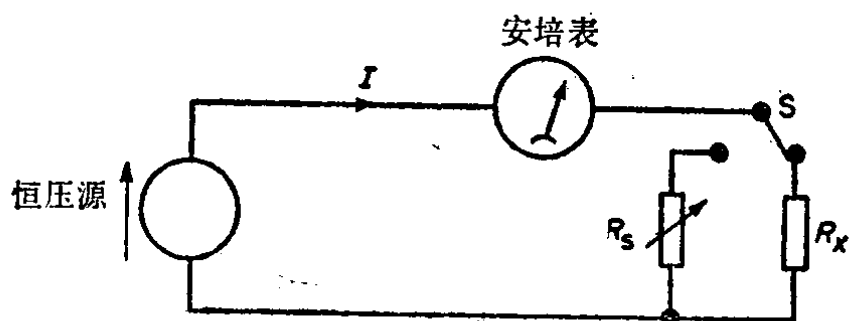


图1.3 用替代法测量电阻的一种可能电路

零值法

替代法的合理改进，是设计一种电路来检测未知量和已知量之间的差，并通过平衡方法使差值变为零，这就是零值检测法。

电位差计

直流电位差计是以极小的不确定性来测量电压的第一台设备。许多年来，高质量的直流电位差计一直是任何一个电工标准

实验室中必不可缺的设备。然而，数字电子伏特表的发展则意味着电位差计在标准实验室和其他应用中的地位将被取代。虽然如此，直流电位差计所涉及的工作原理却是十分重要的，因为这些原理也常常用在其他的仪器中。

考虑图1.4中的简单电路。电压源 E 在闭合回路 $ABCD$ 中激励了电流 I 。假如连线 BC 是具有某一电阻率和某一横断面积的1m长电阻线，其电阻为 20.0Ω ，流过的电流 I 为 50mA ，那么沿 BC 的压降将是 1V 或 0.001V/mm 。通过调节滑动触头的位置，使检流计 G 的偏转为零，并测量滑动触头与 C 端之间的电阻线长度，则任何小于 1V 的直流电压都可以确定到三位有效数字。

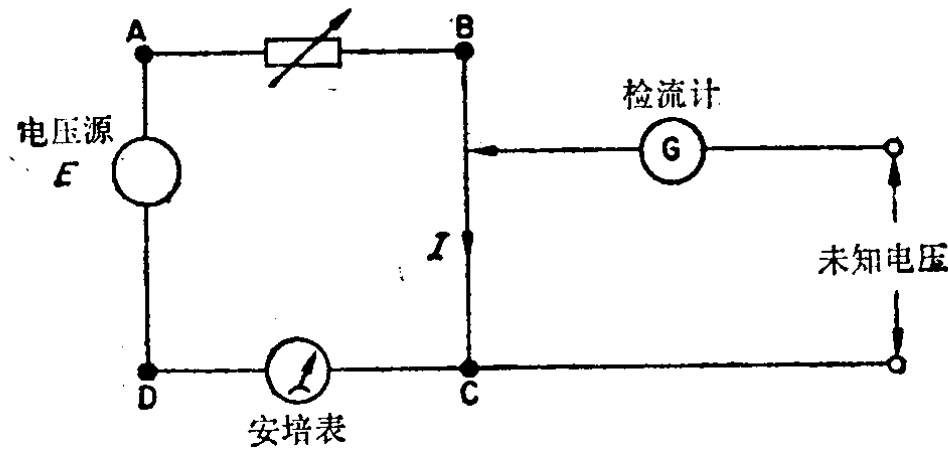


图1.4 滑线电位差计

上述的测量误差主要取决于安培表的质量。为了排除这种限制，可将滑线上的电压与参考电压（例如由标准电池提供的电压）进行比较。

电桥

既然能用比较法测量电压，那么就可以设计一种适当的电路。在这种电路中，人们可以将已知电阻和未知电阻两端的电压降进行比较并使其相等。

图1.5的电桥线路由一个电压源，一个零值检测器和四个电阻组成， Q 和 P 是两个具有固定值的电阻器， S 是一个可变十进电阻器，而 X 是待测电阻。

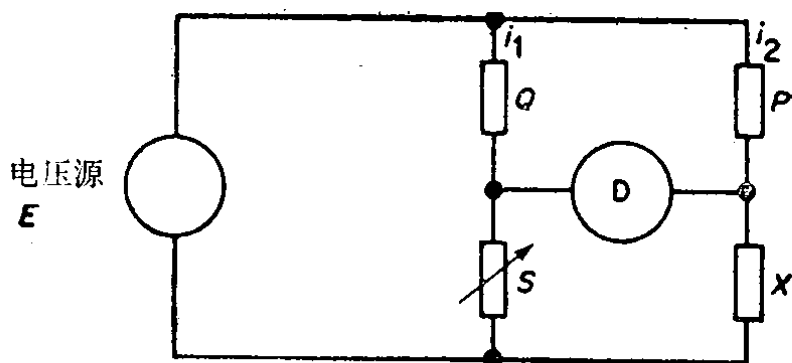


图1.5 基本的电桥线路

电压源 E 产生的电流 i_1 流过 Q 和 S ，电流 i_2 流过 P 和 X 。
当平衡，即零值检测器的指示为零时

$$i_1 S = i_2 X$$

$$i_1 Q = i_2 P$$

因此

$$\frac{i_2 X}{i_2 P} = \frac{i_1 S}{i_1 Q}$$

或者

$$X = S \frac{P}{Q} \quad (1.7)$$

在最简单的 $P = Q$ 情况下，未知量 X 就等于十进电阻箱的调定阻值。一般来说，这种电路比前面所说的替代法电路要好得多，这是因为电源电压的任何变动都不会影响平衡条件和测得的未知量的值。如果使用替代法，这种情况是不能保证的。

这种电桥称为惠斯登电桥，在仪器中是极为重要的，我们将在3.3节中详细讨论。

1.1.3 数字技术

大多数数字仪表是以离散的数字来显示被测值的，因而消除了视差，减少了模拟指示仪表中的人为误差。一般来说，数字仪表比模拟指示仪表具有更高的精度，而且许多数字仪表都装有自动极性显示和自动量程转换，这样就降低了对技术人员的培训，

减少了测量误差以及可能由于过载而引起的仪表损坏。除了这些特点之外，许多数字仪表还具有能自动把测量结果永久记录下来的输出装置。

然而，数字仪表通常比模拟仪表贵。此外，数字仪表是取样设备，即被显示的值是采用数字电子技术在某一瞬间或某一时间间隔内测得的离散值。

数据取样

每当用取样方法来测量一个连续信号时，必须注意，为使被测量的全部变化都能恢复，取样速率应当足够快。如果取样速率太慢，连续波的起伏波形就会部分丢失，而取样速率太快，则会收集和处理一些不必要的数据。取样频率的极限条件是：为使被测信号可以恢复到它原来的形状，取样频率至少应为被取样信号中最高频率分量的两倍〔2〕。

在好多情况下，被测量的幅度可以认为是常数，例如直流电压的值。此时取样速率可以放慢到只要能够确认被测量具有常数值的速率。

数据传输

被测量取样之后，必须将信息从系统中的某一部分传送到另一部分。实现数字数据传输，既可采用并行方式，也可采用串行方式。

考虑图1.6中的装置。在滑动触头和地线（或零电位线）之间加有定值直流电压。当触头从某一固定节移动到另一固定节时，电压就出现在相应的连线和地线之间。因此，通过观察各线上的信号状态，就可以确定滑动触头与哪一个固定节接触，以及滑动触头相对于某一端的位置。

电压V的大小相对来说是不重要的(只要它比干扰电压大)，因为确定滑动触头的位置只需要检测线上有无电压。有电压通常用代码“1”表示，无电压用代码“0”表示，这就是二进制位的有、无两种状态。对于图1.6中的八节系统，表1.1给出了滑动触头在各个位置时各线上的电压状态。表中的每一行表示了一个

八位“二进制字”，也就是说，字中包含了每根线上的信号电平（0或1）状态。这种安排称为并行传输。

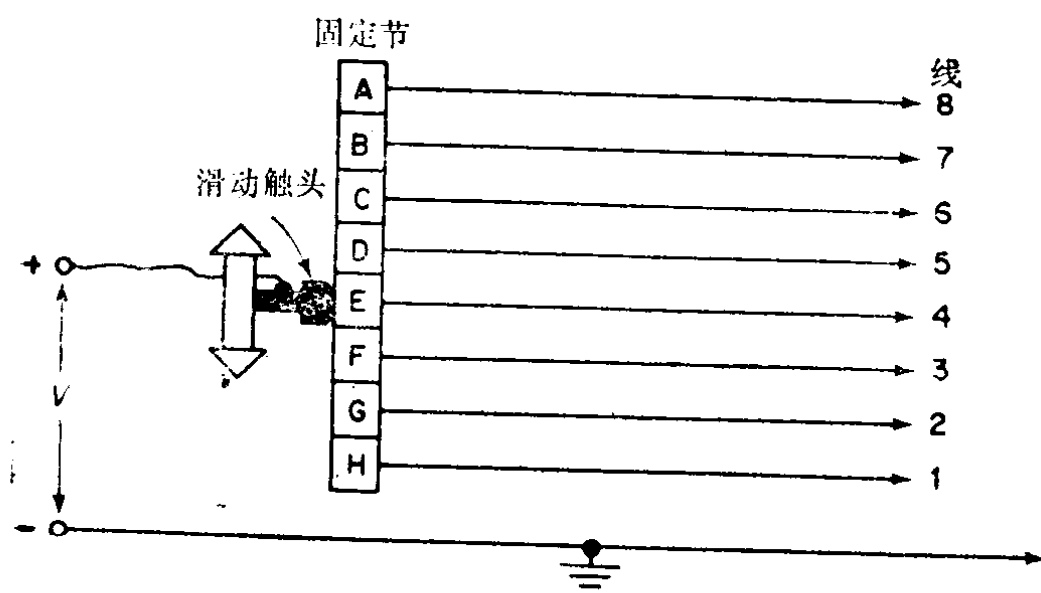


图1.6 并行数据传输

线的状态和滑动触头位置之间的关系 表1.1

滑动触头 接触的节	1 线	2 线	3 线	4 线	5 线	6 线	7 线	8 线
A	0	0	0	0	0	0	0	1
B	0	0	0	0	0	0	1	0
C	0	0	0	0	0	1	0	0
D	0	0	0	0	1	0	0	0
E	0	0	0	1	0	0	0	0
F	0	0	1	0	0	0	0	0
G	0	1	0	0	0	0	0	0
H	1	0	0	0	0	0	0	0

考虑图1.7，这里已把各固定节连接到一个由电机带动的旋转开关上。旋转开关的动触片旋转一周就会取出每一个定触片（标了字母的）的电压样值来，并将这种信息通过单一的信号线按顺序传送，于是产生了串行数据传输。串行字的波形与滑动触头在标有字母的定触片上的位置相对应（如图1.8所示）。必须懂得，“字”和“位”的持续时间将依赖于旋转开关动触片的旋