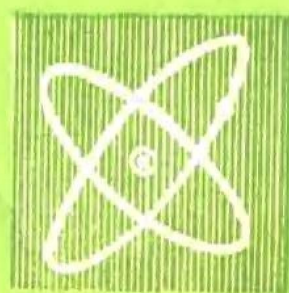
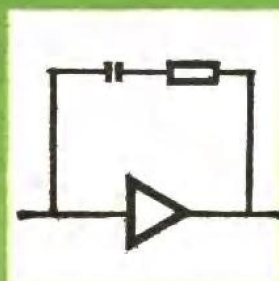
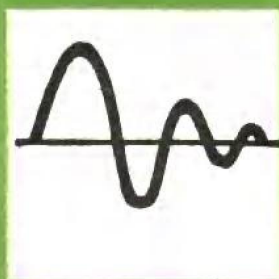
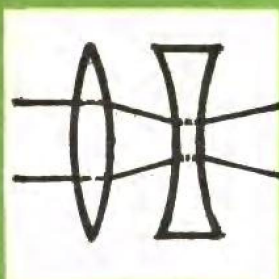


高等学校试用教材



机械量测量

天津大学蔡其恕 主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

机械量测量

天津大学蔡其恕 主编



机械工业出版社

机械量测量

天津大学蔡其恕 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 19 1/4·字数 468 千字

1982年6月重庆第一版·1982年6月重庆第一次印刷

印数 0.001—5.800·定价 2.00 元

*

统一书号: 15033·5130

前 言

本教材是根据1978年高等院校一机部对口专业座谈会的精神及同年10月召开的精密计量仪器专业教材会议拟订的教学大纲编写的。为了扩大精密仪器专业的教学内容，在几何量测量外增加了“机械量测量”的课程。使该专业的学习内容除长度、角度、表面光洁度等测量技术外，还增加了位移、速度、加速度、振动、力、应力、压力、流量、温度等测量技术，从而使该专业学生的服务对象除机械制造工业外，扩大到化工、冶金、交通、国防等工业。

全书共八章：第一章概论，第二章机械量测量用传感器，第三章速度和位移的测量，第四章机械振动测量技术，第五章力和力矩的测量，第六章压力和真空的测量，第七章流量的测量，第八章温度的测量。

本书可作为高等院校精密仪器专业试用教材，也可供从事机械量计量工作的工人和技术人员参考。

本书由天津大学蔡其恕教授主编。蔡其恕教授编写第一、第二、第三和第六章，上海交通大学林明邦同志编写第四章，哈尔滨工业大学蒋作民同志编写第五章，上海机械学院张奇生同志编写第七章和第八章。天津大学赵鸿林同志在本书编写中也作了不少工作。本书请中国计量科学研究院副院长蔡正平同志主审，参加审稿的还有中国计量科学研究院的其他同志，承蒙审阅的各位同志提供了很多宝贵意见，特在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限、时间仓促，书中肯定存在缺点和错误，希望读者批评指正。

1981,8

目 录

前 言

| | |
|--------------------|----|
| 第一章 概论 | 1 |
| § 1-1 机械量测量的对象和意义 | 1 |
| § 1-2 机械量的一般测量方法 | 2 |
| 一、按测量方法分类 | 2 |
| (一) 直接比较法 | 2 |
| (二) 间接比较法 | 2 |
| 二、按仪器操作方法分类 | 2 |
| (一) 直读法 | 2 |
| (二) 零位法 | 2 |
| (三) 微差法 | 3 |
| § 1-3 机械量测量系统的一般结构 | 3 |
| § 1-4 测量仪器的特性 | 4 |
| 一、静态特性 | 4 |
| (一) 仪器的质量指标 | 4 |
| (二) 静态校准 | 6 |
| (三) 负载作用 | 9 |
| 二、动态特性 | 14 |
| (一) 测量系统的一般数学模型 | 14 |
| (二) 零阶仪器 | 17 |
| (三) 一阶仪器 | 18 |
| (四) 二阶仪器 | 25 |
| (五) 一般仪器对周期函数的响应 | 32 |
| (六) 一般仪器对暂态输入的响应 | 34 |
| (七) 测量系统参数的实验测定法 | 37 |
| (八) 动态条件下的负载影响 | 39 |
| 第二章 机械量测量用传感器 | 43 |
| § 2-1 概述 | 43 |
| § 2-2 电阻电位计式传感器 | 44 |
| § 2-3 电阻应变丝式传感器 | 46 |
| § 2-4 电感式传感器 | 51 |
| § 2-5 电容式传感器 | 55 |
| § 2-6 压电式传感器 | 57 |
| § 2-7 磁电式传感器 | 60 |
| § 2-8 压阻式传感器 | 60 |
| § 2-9 霍尔式传感器 | 64 |
| § 2-10 振弦式传感器 | 66 |

| | |
|-----------------------|-----|
| § 2-11 陀螺式角位移和角速度传感器 | 69 |
| 第三章 速度和位移的测量 | 76 |
| § 3-1 概述 | 76 |
| § 3-2 速度的测量方法和测量装置 | 76 |
| 一、线速度的测量 | 76 |
| 二、角速度的测量 | 81 |
| (一) 转速表 | 81 |
| (二) 用陀螺仪测量角速度 | 88 |
| § 3-3 位移的测量方法和测量装置 | 91 |
| 一、线位移的测量 | 91 |
| (一) 浮子式油量表 | 91 |
| (二) 水压式计程仪 | 93 |
| 二、角位移的测量 | 98 |
| 第四章 机械振动测量技术 | 105 |
| § 4-1 概述 | 105 |
| 一、意义 | 105 |
| 二、机械振动的分类和表征参数 | 105 |
| (一) 简谐振动 | 106 |
| (二) 周期振动 | 108 |
| (三) 准周期振动 | 111 |
| (四) 瞬态振动和冲击 | 111 |
| (五) 随机振动 | 112 |
| 三、机械振动测量仪器的分类 | 117 |
| 四、测振仪的基本组成环节和主要技术性能指标 | 118 |
| § 4-2 测量的基本原理 | 119 |
| 一、相对式测振仪的原理 | 119 |
| (一) 直接式 | 119 |
| (二) 跟随式 | 120 |
| 二、惯性式(绝对式)测振仪的原理 | 121 |
| (一) 振幅计 | 122 |
| (二) 加速度计 | 123 |
| (三) 速度计 | 124 |
| § 4-3 机械式测振仪 | 125 |
| 一、相对式杠杆测振仪 | 125 |
| 二、绝对式惯性摆万能测振仪 | 126 |
| 三、共振式测振仪 | 128 |

| | | | |
|----------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| § 4-4 光学测振 | 129 | (四) 三等标准测力仪 | 171 |
| 一、量楔和量瓣 | 129 | 二、利用压磁效应测量力的方法 | 171 |
| 二、读数显微镜 | 130 | (一) 基本原理 | 171 |
| 三、光学杠杆放大 | 131 | (二) 压磁元件 | 172 |
| 四、频闪光在机械振动测量中的应用 | 132 | (三) 压磁式测力仪 | 174 |
| 五、光波干涉测振法 | 132 | 三、利用电阻应变效应测量力的方法 | 177 |
| § 4-5 电气测振仪 | 136 | (一) 应变式测力传感器弹性体的结 构和设计 | 177 |
| 一、磁电式速度传感器 | 136 | (二) 应变式测力传感器电路的补偿 | 190 |
| (一) 线圈-磁铁活动型 | 137 | (三) 应变式测力仪的标定和校准 | 191 |
| (二) 衔铁活动型 | 140 | 四、利用压电效应测量力的方法 | 193 |
| 二、电阻应变式和压阻式加速度传感器 | 142 | (一) 工作原理 | 193 |
| (一) 电阻应变丝或应变片式 | 142 | (二) 传感器的结构 | 196 |
| (二) 压阻式 | 143 | (三) 压电式测力仪的应用举例 | 197 |
| 三、压电式加速度传感器 | 144 | (四) 压电式测力仪的标定 | 198 |
| (一) 概述 | 144 | § 5-3 力矩的测量 | 200 |
| (二) 灵敏度和频率响应 | 145 | 一、利用杠杆-重量测量力矩的方法 | 200 |
| (三) 其它主要性能 | 150 | 二、利用弹性轴产生扭转变形测量力矩 的方法 | 200 |
| (四) 几种典型结构 | 151 | (一) 千分表式力矩仪 | 201 |
| (五) 电压放大器和电荷放大器 | 152 | (二) 振弦式扭矩仪 | 201 |
| 四、其它电气测振仪概述 | 155 | (三) 感应式扭矩仪 | 203 |
| § 4-6 各种机械振动参数的测试方法和 装置 | 155 | 三、应变电阻式扭矩仪 | 203 |
| 一、谐振动频率的测量 | 155 | 第六章 压力和真空的测量 | 207 |
| 二、相位差的测量 | 156 | § 6-1 概述 | 207 |
| (一) 直接法 | 157 | § 6-2 压力的测量方法及其装置 | 208 |
| (二) 示波器法 | 157 | 一、静重活塞压力计 | 208 |
| 三、阻尼的测量 | 157 | 二、液体压力计 | 209 |
| (一) 振动波形图法 | 158 | 三、弹性元件压力表 | 212 |
| (二) 共振频率法 | 158 | (一) 波登管式压力表 | 212 |
| (三) 共振曲线半功率点法 | 158 | (二) 膜片式压力表 | 216 |
| § 4-7 振动测量仪器的标定和校准 | 159 | (三) 膜盒式压力表 | 218 |
| 一、绝对标定法和我国振动计量基准 | 160 | (四) 波纹管式压力表 | 219 |
| 二、比较标定法 | 160 | 四、其它压力计 | 220 |
| 三、重力加速度法 | 161 | (一) 钟罩式压力计和钟罩式差压计 | 220 |
| 四、互易法 | 161 | (二) 应变片压力传感器 | 221 |
| 五、共振梁法 | 163 | (三) 超高压的测量 | 222 |
| 第五章 力和力矩的测量 | 164 | 五、压力测量系统的动态特性 | 222 |
| § 5-1 概述 | 164 | § 6-3 真空的测量方法及其装置 | 227 |
| § 5-2 力的测量 | 166 | 一、U形真空计 | 228 |
| 一、标准测力机和标准测力仪 | 166 | 二、波登管式真空计 | 229 |
| (一) 基准测力机 | 166 | 三、波纹管式真空计 | 229 |
| (二) 一等标准测力仪 | 167 | 四、用膜片压力传感器测量真空 | 229 |
| (三) 二等标准测力机 | 169 | | |

| | | | |
|-------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 五、麦氏真空计 | 229 | § 8-1 温度、温标及国际实用温标 | 271 |
| 六、热导真空计 | 232 | 一、温度的概念 | 271 |
| 七、电离真空计 | 235 | 二、温标的概念及国际实用温标 | 271 |
| (一) 热阴极电离真空计 | 235 | § 8-2 温度计的种类和选用 | 273 |
| (二) 冷阴极电离真空计 | 237 | 一、温度计的种类及其优缺点和使用范 | |
| (三) 放射性电离真空计 | 238 | 围 | 273 |
| 第七章 流量的测量 | 239 | 二、温度计的选用原则 | 274 |
| § 7-1 概述 | 239 | § 8-3 温度的测量方法及其装置 | 276 |
| 一、流量与计量单位 | 239 | 一、膨胀式温度计 | 276 |
| 二、流量计的分类 | 240 | 二、压力式温度计 | 278 |
| 三、流量计的选择 | 241 | 三、热电偶 | 280 |
| 四、管流和雷诺数 | 241 | (一) 热电偶测温原理 | 280 |
| § 7-2 流量的测量方法及其装置 | 243 | (二) 常用热电偶 | 282 |
| 一、容积式流量计 | 243 | (三) 热电偶冷端的温度补偿 | 284 |
| 二、涡轮流量计 | 247 | (四) 特殊热电偶 | 285 |
| 三、差压式流量计 | 250 | (五) 热电偶的校验 | 287 |
| (一) 概述 | 250 | (六) 热电偶测温的误差分析 | 288 |
| (二) 流量测量原理及其基本方程式 | 251 | 四、电阻温度计 | 288 |
| (三) 节流装置的结构 | 253 | (一) 基本概念 | 288 |
| (四) 差压式流量计的安装 | 255 | (二) 热电阻结构 | 289 |
| 四、面积式流量计 | 256 | (三) 热电阻的校验 | 291 |
| 五、电磁流量计 | 260 | 五、非接触式测温仪表 | 292 |
| 六、其它流量计 | 264 | (一) 辐射测温的物理基础 | 292 |
| (一) 流体振动型流量计 | 264 | (二) 全辐射高温计 | 293 |
| (二) 超声波流量计 | 267 | (三) 光学高温计 | 295 |
| (三) 热式流量计的作用原理 | 268 | (四) 比色高温计 | 299 |
| § 7-3 流量计的精度检验 | 269 | 六、温度检测器今后的主要问题 | 300 |
| 第八章 温度的测量 | 271 | | |

第一章 概 论

§ 1-1 机械量测量的对象和意义

机械量狭义的范围应包括有关运动和力的物理量，如位移、速度、加速度、力、力矩、功率、压力、流量等等。但在一般文献中往往把温度也包括在内，在运动与力的领域内还可包括硬度、密度、湿度、比重、粘度等各种概念，因此机械量测量的对象是非常广泛的。在本课程中只能选择生产和科研中最常用的机械量，了解其测量方法和测量装置。在生产和科研中测量这些机械量的主要目的可归纳为四类：

1. 监视或控制生产过程中的运行条件；
2. 检定产品的质量；
3. 对设计提供实验结果和有效的经验数据；
4. 为其它科学研究服务。

(一) 为了使生产过程正常运行，必须使与运行条件有关的机械量保持在一定的范围内。因此必须在生产过程中随时测定这些量，并指示出来以便监视。一般说来，这些被测量大都是在变动的，所以还往往涉及到动态测量。例如在发电厂的锅炉操作中对进水量、蒸汽耗用量、压力、温度等都必须随时监视。又如飞机在飞行时，对飞行的高度、飞行的速度、升降速度、转弯方向、侧滑、发动机的转速、排气温度、以及储油量等都必须随时监视。为此必须有正确的测量方法和合适的测量仪表。在自动化生产的过程中，一些过去用人工调节的物理量，已都设法自动控制。在自动控制系统中首先需要测出被控制的物理量。例如在发电厂的锅炉操作过程中有关物理量已都能自动控制。在火箭、导弹和无人驾驶的飞机中，所有飞行过程中有关物理量的变化也都必须自动控制。

(二) 为了使产品质量达到预定的规格，必须严格进行检定。例如对生产出来的许多材料必须检查其性能是否达到预定的规格。而这些性能大都属于机械量范围。又如生产出来的机器、仪器等亦必须检验其机械性能。如内燃机的转速、功率、耗油量等。对生产出来的机械量测量装置是否准确，亦必须经过检定。

(三) 在机械设计中，若仅凭已有的理论公式或经验公式计算，往往是不够准确的，而且对许多复杂的结构和特殊条件往往还没有理论公式或经验公式可依据。所谓经验公式本来也是从测试数据处理得来的。在现代的设计工作中往往从模拟模型经过实验来找寻或判断最佳条件，在这种实验中大都涉及到机械量测量。

(四) 在许多科学研究项目中，机械量测量占有很重要的地位，气象预报几乎全凭机械量测量，地震预报也需根据各种机械量测量，海洋学中需要测量的机械量也很多，此外如宇航和宇宙探索中涉及到机械量测量的也很多。

总之，机械量的服务范围非常广泛，在不同的领域中需要测量的对象，对测量结果的要求和测量的环境条件差别很大，所以测量方法和测量装置很多，本课程中只能择要讲解其基本知识。

§ 1-2 机械量的一般测量方法

一、按测量方法分类

测量的基本概念是把一个未知的被测量和一个已知的标准量相比较，比较的方法可分为两类，即直接比较法和间接比较法。

(一) 直接比较法：一个量具或仪器上的标准量是经过校准的，故其量值是已知的，如果被测量与这种标准量属于相同的物理量，则可把二者直接比较。例如把一个工件的未知长度与线纹尺或量块相比较，或把一个未知重量在天平上与砝码相比较等。这样的比较方法称为直接比较法。但用弹簧秤来称重时就不是直接比较法了，因为在弹簧秤上是从标尺的位移量，即弹簧的伸长长度来得出重量的。虽然标尺上的刻度是经过已知的标准量校准过的，所以可以代表标准重量，但它本身究竟是长度而不是重量，所以不能称为直接比较法。某些物理量很难获得性质相同的标准量。例如温度的标准量是用物质的相平衡点来规定的。在国际温标中规定水的三相点为 0.01°C ，水的沸点为 100°C 。锌的凝固点为 419.78°C 等，但是这些温度点之间的温度就找不出标准温度。水银温度计上的 0°C 和 100°C 是用标准温度来校准的，而其它温度则只能从刻度上读出，这些刻度无法用标准温度校准，因为什么是 50°C 或 150°C 的标准温度很难想像。同样一个电阻温度表的 100°C 和 419.78°C 等点可以用标准温度校准，但其它温度只能由电阻值决定，而无法直接校准。

(二) 间接比较法：由于某些被测的物理量无法直接比较，因此设法使被测量转变为另一种能与已知标准量直接比较的物理量。当然这种转变必须服从一定的单值函数关系。例如一个弹簧的力与变形之间的关系，一种物质的温度与体积膨胀之间的关系，或温度与电阻之间的关系，只要知道了这种关系，就可使一种物理量转变为另一种物理量，有时甚至要经过几次转换。例如在应变式测力仪中，先由弹性体把力转变为变形，再由应变仪把变形转变为电阻值的变化而与标准电阻相比较，并应经基准或标准测力机进行定度。有些物理量虽然可用直接比较法，但往往由于测量手续的方便或测量范围的扩大，也采用间接测量法。因此在机械量测量中大多数采用间接比较法，尤其在动态测量中几乎非用间接比较法不可。间接比较法是以物理量之间的函数关系为依据的，这种关系或由理论推导的物理公式来表达，或由实验结果的经验公式来表达，有的甚至只有实验数据或关系曲线来表达。而这种公式与数据难免有误差的，故一般说来间接比较法的误差要比直接比较法大，当然无法直接比较的物理量也就无法避免这种误差。

二、按仪器操作方法分类

从测量仪器或测量系统的操作方法来说，还可分为直读法、零位法和微差法三种。

(一) 直读法：图 1-1 中示出一个用直读法测量压力的仪器。由被测压力施加在活塞上的作用力使活塞上升而指针偏转。当活塞上升时弹簧被压缩而产生一个反作用力，这个反作用力与压力产生的作用力相平衡时指针停止偏转。这时可由刻度上的指示值直接读出被测压力，故称直读法。

(二) 零位法：图 1-2 为一个天平秤的示意图。被测重量 W 悬挂在 B 点上，秤重的砝码悬挂在 A 点上。由于 A 、 B 两个臂长相等，故必须使所加砝码的重量与被测重量完全相等，才能使指针指在刻度尺的零位上。在天平秤上称重时，如果要求指针必须严格指零而直接从

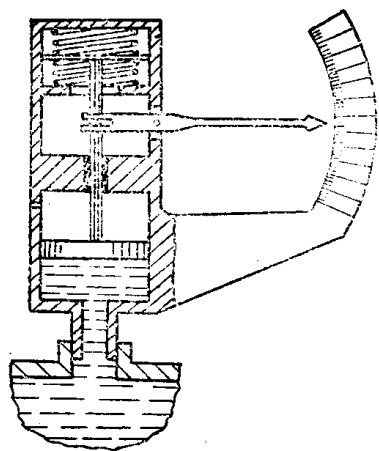


图1-1 压力计

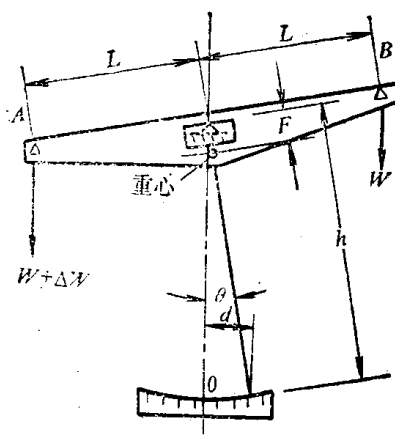


图1-2 天平秤示意图

砝码的重量得出被测重量的方法称为零位法。

在各种测量系统的平衡电桥中常以检流计指示零位，即无电流时表示平衡。故亦称零位法。从误差分析的观点来看，零位法的误差比直读法小，故其准确度高。从测量手续的观点来看，用人工调节到平衡状态要比直读法仪器达到平衡状态要麻烦得多。而且用人工调节平衡不能用于动态测量。但若用伺服机构来自动平衡就能克服这些缺点。

(三) 微差法：微差法是零位法的一种特殊情况，即没有补偿到完全平衡，而把剩余的不平衡量用刻度尺来指示。例如图 1-2 中的天平秤上，当砝码的重量为 $W + \Delta W$ 时，指针即不会指零而偏转一个角度。剩余不平衡量 ΔW 可从刻度上读出。不平衡电桥亦即采用这种方法。这种微差法的准确度虽比零位法要差些，但操作手续简便多了。

§ 1-3 机械量测量系统的一般结构

一个测量系统的总作用可以不考虑其具体结构而一般地用作用环节来说明，这样则任何测量系统都可分成若干作用环节而把它们联接起来。这种分解可有各种不同方式，其中最简单的分法是把一个仪器或一个系统分三个阶段：①探测，传感阶段；②中间转变阶段；③最后指示阶段。

第一个阶段的作用是探测或感受被测量，即整个系统的输入信号。第二阶段的主要任务是把第一阶段的输出信号转变为适合于最后阶段的输入信号。最后阶段是要提供一个对人身感官容易了解的信号，或者对一个控制器能被接受的信号。

较详细的分析可如图 1-3 中所示。对任何仪器来说，图中已包括全部必要的基本作用，其中第一个原始感受环节和第二个变量转换环节是把原始感受环节的输出物理量转变成更适

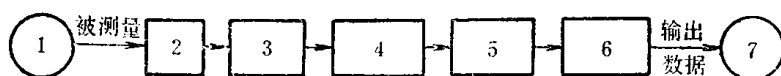


图 1-3 仪器或系统的作用环节

1—被测对象 2—原始感受环节 3—变量转换环节 4—量值处理环节
5—数据传输环节 6—数据指示环节 7—观察者

用的物理量。但仍保持原始信号的信息容量，亦即上述的第一阶段。最后的数据显示环节即上述的最后阶段，把上述的中间转换阶段再分为量值处理和数据传输

两个环节。量值处理环节是把信息的量值改变，但仍保持原有的物理性质。例如一个放大器把输入电压放大几倍，但输出的仍是电压。数据传输环节是把数据从一个位置传输到另一个位置中，它可以是简单的一个连杆、轴和轴承、一根管子、一套导线，但也可能复杂到象遥控系统中的无线电装置。

必须指出，不是每个仪器的中间阶段都必须有这许多环节，也不是这些环节前后排列都必须如图中所示，而且一种环节也可能出现几次。更须指出所谓“环节”不是指仪器结构中的具体元件或部件，有时一个元件可起几个“环节”的作用。现举图 1-1 中的具体例子来说明各个环节的作用。原始感受环节是活塞，它同时起变量转换环节的作用，把液体压力转换成活塞面上的合力，这个力由活塞杆传输到弹簧上，弹簧又把力转换成位移。活塞杆的位移又被连杆放大使指针端点获得更大的位移，起了量值处理的作用。指针和标尺是数据显示环节。

§ 1-4 测量仪器的特性

测量仪器的一般性能可分为两种特性，即静态特性和动态特性。有些仪器用来测量不变的或变化很慢的量，在这种情况下，只需规定一套静态特性的准则来表达仪器的质量。静态特性一般可处理非线性或统计性的影响。另外一些仪器要测量变化很快的量，这就必须考虑仪器输入与输出之间的动态关系。这种关系一般用线性微分方程式来研究，根据动态关系得出的准则称为动态特性。事实上，在动态情况下，静态特性也影响仪器的质量，但在动态特性中若再考虑非线性和统计性的影响，将使微分方程无法处理，所以通常把这一问题的两个方面分别处理。

一、静态特性

(一) 仪器的质量指标

一个仪器的质量指标首先涉及到下列各种概念。

1. 误差：误差是仪器指示值和被测量真值的代数差，故误差有正有负，误差的定义可用下式表示：

$$\text{误差} = \text{指示值} - \text{真值}$$

什么是真值呢？从理论上讲，一个没有误差的仪器所给出的指示值就是真值。但任何仪器都不可避免地有些误差，故量的真值一般是不知道的。在通常测量中，把高一级的标准计量仪器所测得的量值称为实际值而即以实际值来代替真值。

测量误差有两种不同的类型。在同一条件下，多次测量同一量值时，误差的绝对值和符号保持恒定，或在条件改变时按某一确定规律变化的误差称为系统误差。在实际相同条件下，多次测量同一量值时，绝对值和符号以不可预定方式变化着的误差称为随机误差或偶然误差。

2. 精密度：精密度是表达测量结果的随机分散的特性，是指在多次测量中所得到的数值重复一致的程度。在同一条件下进行重复测量时，随机误差的大小反映了精密度的程度，随机误差小则精密度高，但精密不一定正确。系统误差的大小反映正确的程度，但正确不一定精密。

3. 准确度：准确度是指示值与真值符合的程度，它包括系统误差和偶然误差。如果系统误差得到了修正，则准确度即接近于精密度。由于在不同操作条件中误差的因素不同，故准

准确度的概念一般指标准操作条件下的准确度。仪器的准确度有几种不同的表达方式。有的用最大误差的数值来表达，如对一个温度表来说，准确度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，就是说在任何读数值上的最大误差不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。更常用的是以百分比来表达准确度，有的用满刻度的百分比来表达，例如一个测量范围为 $0\sim 20$ 标准大气压的压力计，设其准确度为1%满刻度，那就是说任何读数上，其误差不超过0.2标准大气压。有的用读数百分比来表达，例如一个测量范围为 $0\sim 100$ 伏的电压表，设其准确度为0.2%读数，则在读数为50伏时误差不超过0.1伏，而在读数为100伏时误差不超过0.2伏。

4. 静态灵敏度：静态灵敏度也是仪器质量的重要指标，灵敏度的定义是输出变量与输入变量之间的比率。这里输入量的变化必须是很慢而不致引起输出量的动态响应，如果有动态响应则必须到达稳态后的输出量。

5. 线性：如果仪器的灵敏度是一个常数，则在校准工作中所得的校准线是一条直线，如图1-4a中所示。有的仪器的灵敏度不是常数，而是随着输入的增加改变的。这种仪器的校准线是曲线，如图1-4b中所示。它的灵敏度可用曲线上各点的切线来表达，或按校准曲线方程式计算，在一般仪器中大都希望有直线的性能，但是有正确校准曲线的仪器并不表示它的准确度差。我们这里所说的线性是指理论上校准线应为直线的仪器，但在实际校准中数据点偏离了直线如图1-4a中所示。

线性有各种不同的名称和定义。最理想的是“独立线性”，它的校准直线是用最小二乘法求得的，这条直线的求法将在下文中用一个实例来说明。由于这种求法的数据处理很费时，故“独立线性”还有另一种定义，它用图解的方法来表达非线性。在静态校准时取每个校准点上增载和卸载读数的平均值标绘出数据点，然后把这些数据点连成特性曲线如图1-5a中所示。现在可选取一直线，使特性曲线偏离此直线的最大正偏差与最大负偏差相等而且应最小。则此最大偏差值即可表达非线性。

更简单的方法是采用“端点线性”的定义，如图1-5b中所示。这里画出特性曲线后把曲线的两个端点连接成直线。特性曲线偏离此直线的最大偏差即可表达非线性。

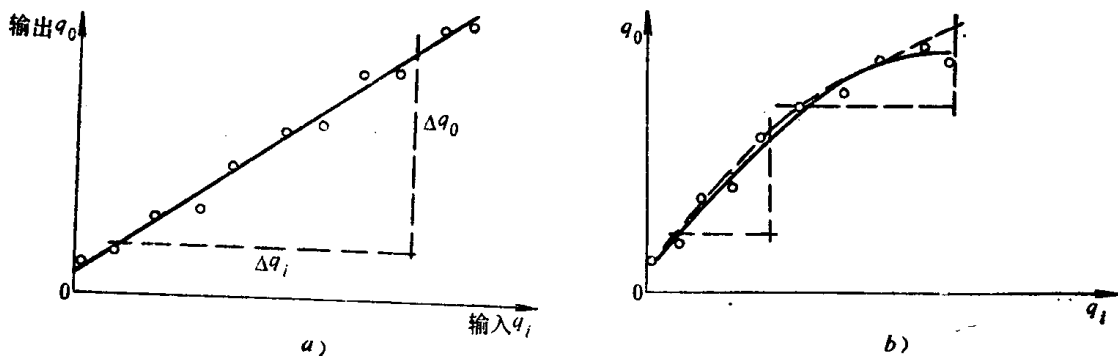


图1-4 灵敏度与线性

线性的另一种定义称为“零-基线性”，如图1-5c中所示。这里从特性曲线的下端点出发选取一直线，使特性曲线偏离此直线的最大正偏差与最大负偏差相等，则此最大偏差即可表达非线性。

与仪器质量有关的概念还有分辨率、灵敏限、滞后和盲区等术语。

6. 分辨率和灵敏限 分辨率是可测出的最小输入变化，也就是能使在输出中给出一个

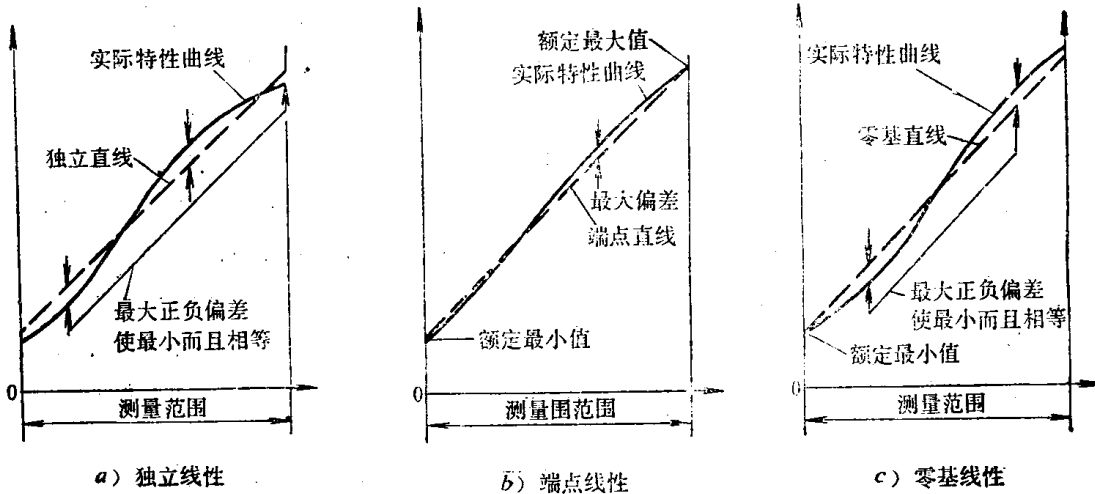


图1-5 线性的不同名称和定义

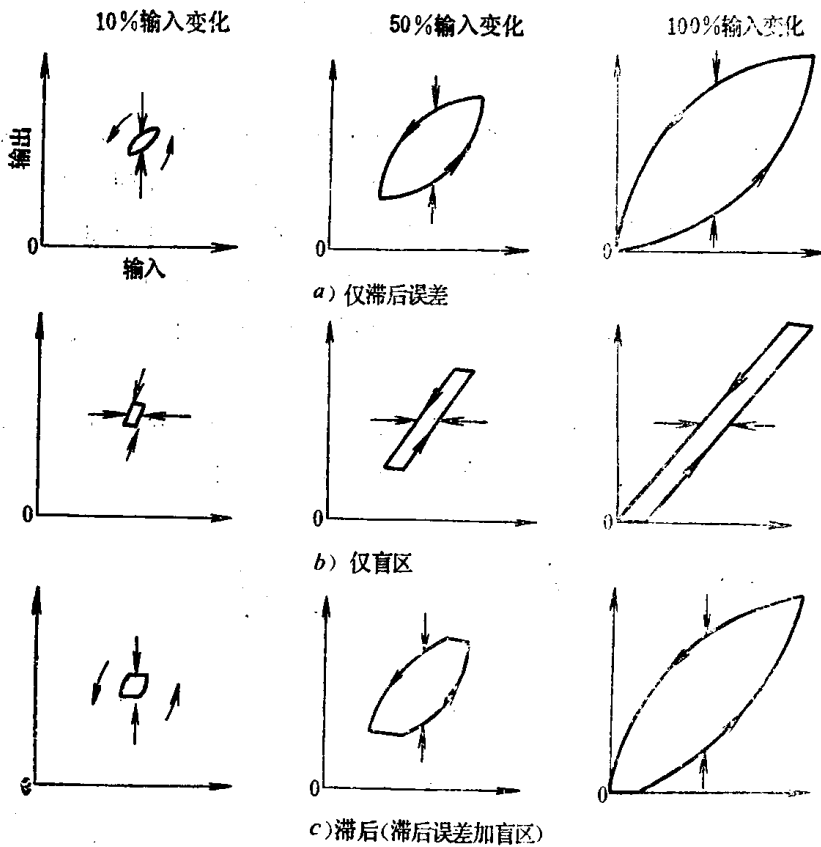


图1-6 滞后误差, 盲区 and 滞后

很小但有明确数值的输入增量。

灵敏限: 如果仪器的输入从零起很慢增加, 将有一个最小限值, 比此再小时在输出中将看不出变化, 这个最小限值叫作灵敏限。灵敏限的定义与分辨率定义很接近, 但有些含糊。区别看得出和看不出的界限是不明确的, 故很难明确测定。灵敏限和分辨率都可用绝对值读数百分比或满刻度百分比来表达。

7. 滞后与盲区 有些仪器当输入量从小增大时得出的读数与当输入量从大减小时得出的读数不不符合如图 1-6 所示。这种现象有两种原因。一种原因是由于在测量仪器中有吸收能量的元件,

例如弹性元件、磁化元件、分子间的内摩擦, 这种现象称为滞后。另一种是由于机械结构中有间隙所引起的, 这种现象称为盲区。滞后误差一般与输入量量程的大小有关, 而盲区引起的误差在整个测量范围内几乎不变。

(二) 静态校准

许多静态特征都是从静态校准的方法中得出的, 所以我们用一个静态校准的例子来说明

某些静态特征的意义。假设校准一个如图 1-1 中所示的压力计，先用一个 10 标准大气压的标准压力（表压力）在压力计上测试 20 次，得出 20 个读数如表 1-1 所示。

表 1-1 压力计校准值

单位：标准大气压

| 次 序 | 读 数 | 次 序 | 读 数 | 次 序 | 读 数 | 次 序 | 读 数 |
|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| 1 | 10.01 | 6 | 10.07 | 11 | 10.02 | 16 | 10.05 |
| 2 | 10.10 | 7 | 9.91 | 12 | 10.08 | 17 | 9.98 |
| 3 | 10.13 | 8 | 10.06 | 13 | 10.01 | 18 | 10.04 |
| 4 | 10.10 | 9 | 10.03 | 14 | 10.11 | 19 | 10.02 |
| 5 | 10.07 | 10 | 9.98 | 15 | 10.12 | 20 | 9.97 |

按下式求出平均读数：

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (1-1)$$

式中 N 为测试次数； x_i 为各次读数。把表 1-1 中数值代入后得出 $\bar{x} = 10.043$ 。

假设各次读数的分布是符合正态分布的，则其标准偏差可按下式计算：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (1-2)$$

用各次读数和平均读数代入后，可得出 $\sigma = 0.057$ 。平均读数的标准偏差可按下式计算：

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N-1}} \quad (1-3)$$

以 σ 、 N 代入后可得出 $\sigma_{\bar{x}} = 0.0131$ 。

现在我们对压力计进行静态校准。在压力计上先输入从小到大的各种标准压力，在压力计上读出指示值，再输入从大到小的标准压力，读出指示值。把这些指示值列成表 1-2。再把这些数值标绘如图 1-7 所示。这种压力计的输入与输出之间的校准曲线应该是一条直线可用(1-4)式表示：

表 1-2

| 真 值 标准大气压 | 指 示 值 | |
|--------------|-------|-------|
| | 增 大 | 减 小 |
| 0.000 | -0.20 | -0.15 |
| 1.000 | 0.80 | 0.94 |
| 2.000 | 1.78 | 1.81 |
| 3.000 | 2.70 | 2.79 |
| 4.000 | 3.93 | 3.91 |
| 5.000 | 4.90 | 4.93 |
| 6.000 | 5.86 | 5.89 |
| 7.000 | 6.89 | 6.90 |
| 8.000 | 7.73 | 7.92 |
| 9.000 | 8.78 | 9.08 |
| 10.000 | 9.90 | 10.10 |

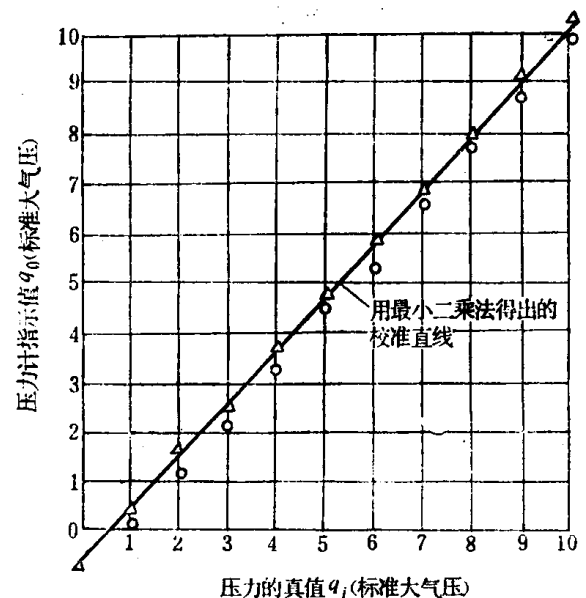


图 1-7 压力计的校准

$$q_0 = mq_i + b \quad (1-4)$$

式中 q_i —— 输入量;

q_0 —— 输出量;

m —— 直线倾斜度;

b —— 直线与纵坐标轴的交点坐标值。

参考直线用最小二乘法求出, 参考直线的 m 和 b 可按下式求得:

$$m = \frac{N \sum q_{0i} q_{0i} - (\sum q_{0i})(\sum q_{0i})}{N \sum q_{0i}^2 - (\sum q_{0i})^2} \quad (1-5)$$

$$b = \frac{(\sum q_{0i})(\sum q_{0i}^2) - (\sum q_{0i} q_{0i})(\sum q_{0i})}{N \sum q_{0i}^2 - (\sum q_{0i})^2} \quad (1-6)$$

式中 N —— 数据点的总数;

q_{0i} —— 各次输入量;

q_{0i} —— 各次输出量。

应用到上例中数据可算出 $m=1.01$ 和 $b=-0.19$ 由于这二个数值是由分布数据中求出来的, 所以还应该用概率理论来计算它的可能变化, 也就是求出 m 和 b 的标准偏差。

$$\sigma_m^2 = \frac{N \sigma_{q_0}^2}{N \sum q_{0i}^2 - (\sum q_{0i})^2} \quad (1-7)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{\sigma_{q_0}^2 \sum q_{0i}^2}{N \sum q_{0i}^2 - (\sum q_{0i})^2} \quad (1-8)$$

$$\text{式中 } \sigma_{q_0} = \frac{1}{N} \sum (mq_{0i} + b - q_{0i})^2 \quad (1-9)$$

这里 σ_{q_0} 为 q_0 的标准偏差, 也就是说如果对一个给定的 q_i 进行多次测量时, 得出的 q_0 值也不见得完全相同的。 σ_{q_0} 可以表达 q_0 的分散范围。对于我们的例子来说, 可算出 $\sigma_{q_0}=0.08$, 于是 $\sigma_m=0.01$, 而 $\sigma_b=0.033$, 若按正态分布以 $\pm 3\sigma$ 为极限, 则应得出 $m=1.01 \pm 0.03$, $b=-0.19 \pm 0.1$ 。

从式(1-4)可以写成。

$$q_i = \frac{q_0 - b}{m}$$

所以 q_i 的标准偏差 σ_{q_i} 可从下式算出

$$\sigma_{q_i}^2 = \frac{1}{N} \sum \left(\frac{q_{0i} - b}{m} - q_{0i} \right)^2 = \frac{\sigma_{q_0}^2}{m^2} \quad (1-10)$$

在我们的例子里可得出

$$q_i = \frac{q_0 + 0.19}{1.01} \text{ 和 } \sigma_{q_i} = 0.08$$

因此, 如果用这个压力计测量一个未知压力而读出数 q_0 为 4.32 标准大气压时, 可以算出未知压力 q_i 应为

$$q_i = \frac{4.32 + 0.19}{1.01} = 4.47 \text{ 标准大气压。}$$

如果要考虑它的准确度, 则应写成

$$q_i \pm 3\sigma_{q_i} = 4.47 \pm 0.24 \text{ 标准大气压}$$

也就是说被测未知压力的真值将在4.23到4.71标准大气压范围之内。

(三) 负载作用

对一个系统的特性来说，还涉及到广义的阻抗、导纳和广义的刚度和柔度。

把任何一个测量仪器引入一个被测装置中，往往会从被测装置中抽取一些能量，这样就会使被测量改变其数值而不能完全达到理想的测量状态。仪器设计者必须考虑这种“负载”作用。广义的阻抗、导纳、刚度和柔度的概念就是为了研究这种作用的。

这些术语既可用于静态也可用于动态。现在先讲静态的概念。在图 1-3 的方框图中，作用元件之间用一条线连起来，这可理解为所传输信息的功率。功率的传输需要两种变量，在测量系统中每个部件的输入端中除一个与被测量有关的变量 q_{i1} 外，还有一个联带的变量 q_{i2} ，它们的乘积 $q_{i1} \cdot q_{i2}$ 具有功率的量纲，并表达从前面元件中抽取能量的瞬时速度。如果输入信号中这两种变量已经辨明 q_{i1} 是一个“作用变量”，即可把广义的输入阻抗 z_{g_i} 定义为：

$$z_{g_i} = \frac{q_{i1}}{q_{i2}} \tag{1-11}$$

一般说来， q_{i1} 可以是“作用变量”，也可以是“流通变量”，“作用变量”的概念是一个内涵变量，即它的大小与参与能量交换的系统大小无关，而“流通变量”的概念是一个外延变量，即它的大小与系统的大小有关。如果 q_{i1} 是流通变量，则将不采用阻抗的概念。从式(1-11)中可以看出抽取的功率 $P = q_{i1}^2 / Z_{g_i}$ ，因此要使抽取的功率小，应使输入阻抗尽量大。

广义阻抗的概念是从电的阻抗推广出来的。所以我们先讲一个电的例子。在图 1-8 中表示用一个电压表来测量电路中的未知电压 E 。当表接到端点 a 、 b 上时，电路改变了， E 值与未接表时不同了，对一个电压表来说输入变量 q_{i1} 是端点电压 E_m ，要使 $q_{i1} \cdot q_{i2}$ 表达抽取的功率，则 q_{i2} 应为电流 I_m ，所以在这个例子中 $Z_{g_i} = \frac{q_{i1}}{q_{i2}} = \frac{E_m}{I_m} = R_m$ ，它是电压表的电阻。

为了进一步说明输入阻抗的意义，可用等效发生器法则来判断当仪表接入电路后会起多大的误差。假设图1-9a中端点 A 、 B 的方框表示一个线性双向网络，一个有阻抗 Z_L 的负载可以接到 A 、 B 上。当负载未接入时， AB 之间一般也有电压，称为网络的开路输出电压 E_0 ，

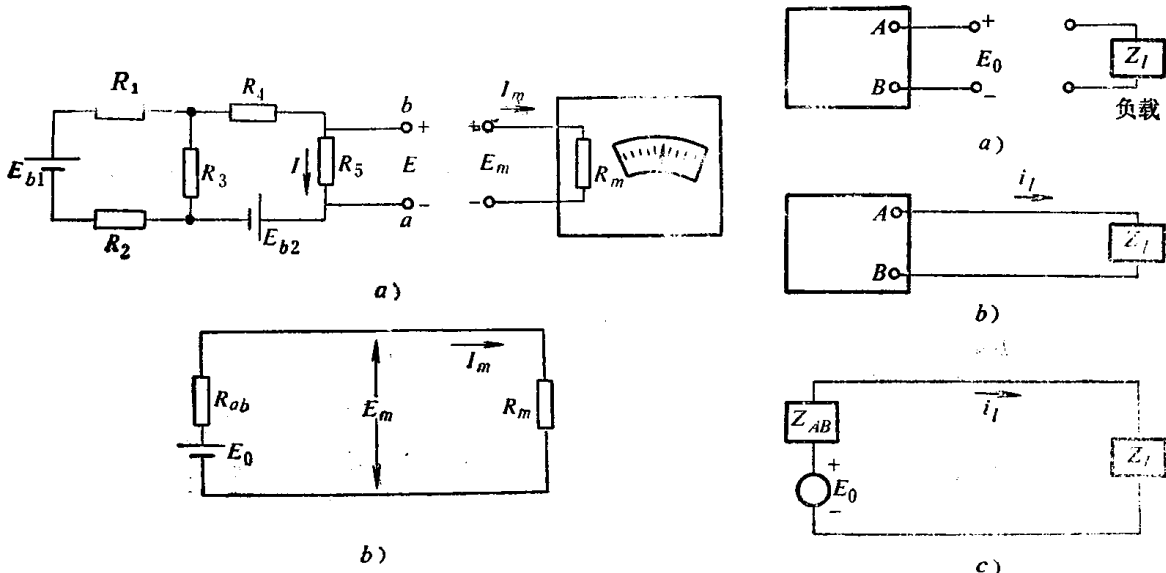


图 1-8 电压表负载影响

图 1-9 网络定理

而且不接入 Z_i 也能决定 AB 之间的阻抗 Z_{AB} 。为此须把网络中的电池或发电机用它们的内阻抗来代替。如果它们的内阻抗可能设想为零,则就可以短路来代替。根据网络定理。如果 Z_i 接入网络如图1-9b所示,则将流过电流 i_i 。这个电流和图1-9c中等效电路中的电流相同,因此不管网络如何复杂,都可用一个输出阻抗 Z_{AB} 和一个串联的电源 E_o 来代替。把这个定理应用到图1-8a,就可得到图1-8b的等效电路,可以看到这里电压表中指示的 E_m 值将不是 E 的真值,而是

$$E_m = \frac{R_m}{R_{ob} + R_m} E \quad (1-12)$$

上式中

$$R_{ob} = \frac{\left[\frac{(R_1 + R_2)R_3}{R_1 + R_2 + R_3} + R_4 \right] R_5}{\left[\frac{(R_1 + R_2)R_3}{R_1 + R_2 + R_3} + R_4 \right] + R_5}$$

如果要使 E_m 接近 E ,必须使 $R_m \gg R_{ob}$ 。因此,输入阻抗相对于被接入负载的系统输出阻抗必须大得多。这个概念对非电量系统同样有用,故可规定广义的输入和输出阻抗为

$$q_{im} = \frac{Z_{oi}}{Z_{oo} + Z_{oi}} q_{iu} = \frac{1}{Z_{oo}/Z_{oi} + 1} q_{iu} \quad (1-13)$$

这里 q_{im} 为作用变量的测定值, q_{iu} 为作用变量的真值亦即未被干扰时的数值。 Z_{oo} 为输出阻抗。

如果已知 Z_{oi} 和 Z_{oo} ,则可按照式(1-13)对测定值进行修正。但是这样作很不方便,尤其在非电量系统中 Z_{oo} 往往不知道,因此无法修正。所以需要用的大的 Z_{oi} ,这样就可无需修正,并且无需知道 Z_{oi} 和 Z_{oo} 的准确数值。

如果 q_{i1} 是一个流通变量,应用输入阻抗的概念就有些困难,此时采用广义输入导纳的概念将更为合适。输入导纳 Y_{oi} 的定义为

$$Y_{oi} = \frac{\text{流通变量}}{\text{作用变量}} = \frac{q_{i1}}{q_{i2}} \quad (1-14)$$

这样就可把抽取的功率 P 写成

$$P = q_{i1} q_{i2} = \frac{q_{i1}^2}{Y_{oi}} \quad (1-15)$$

从式(1-15)中可以看到,要使抽取功率减小,需要大的输入导纳 Y_{oi} ,这可用图1-10中所示安培表的例子来说明。

对于安培表来说, q_{i1} 是电流 I_m ,利用网络定理可把图1-10a简化为图1-10b中的等效电

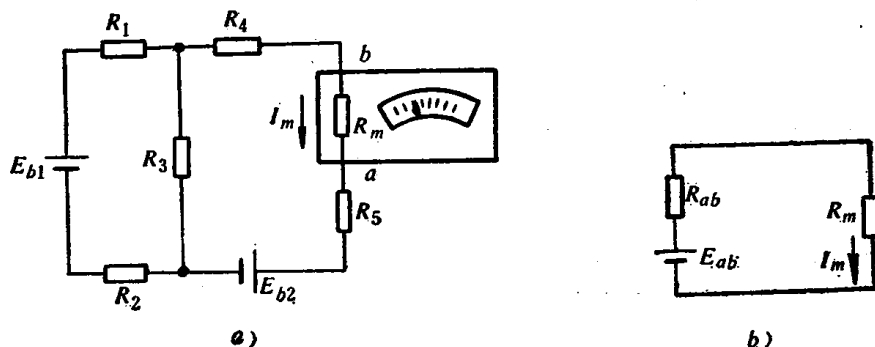


图 1-10 安培表负载影响