

T022
8

0.50

工程检测基础

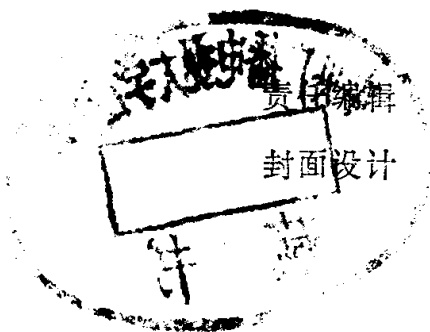
应闰兰 过大江 编译

同济大学出版社

内 容 提 要

本书以英国的《Engineering Instrumentation and Control》(1981年版)一书为蓝本,结合我国情况,增删编译。内容包括:测量系统、传感器、放大器、记录设备以及(位移、频率、应变、压力、振动、噪声和温度)测量技术等;在本书的最后,还对测量系统进行控制论的分析,使读者既能了解具体的检测技术,也从宏观上掌握了测量系统的内涵。每章之后附有习题和答案。内容紧密联系实际,叙述深入浅出。

本书可作为大学专科、电视大学和职工大学的教材,也可供工程技术人员的自学参考之用。



责任编辑

洪建华

封面设计

徐 繁

工 程 检 测 基 础

应闰兰 过大江 编译

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

大丰县印刷二厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.5 字数: 331 千字

1987年 8 月第 1 版 1987年 8 月第 1 次印刷

印数: 1—5500 科技新书目: 153—312

统一书号: 15335·044 定价: 2.40元

ISBN 7-5608-0013-0/TB·1

前 言

考虑到国内已出版的机械工程测试技术方面的书藉中，适合在职人员的读本甚少，而高等专科学校、职业大学、电视大学、职工大学机械类专业亟需测试技术方面的教材，为适应这类学校的教学和工程技术人员的自学之需，特编译本书，以供选用。

本书主要以英国斯托克波特技术学院（Stockport College of Technology）机械工程系J.A.Haslam, G.R.Summers, D.Williams三人编著的《Engineering Instrumentation and Control》（1981年版）为蓝本。编译时，删节了不符合我国实际的内容，并采用我国国家新的标准，增加了国产检测仪表以及部份最新成就的内容。

原书按英国技术教育委员会（TEC）规定的大纲编写，内容注重基本概念，叙述由浅入深，条理清晰。书中列有典型仪表的规格参数、实际工业测量和控制系统的实例，每章之后还附有习题和思考题，对培养读者从应用角度来分析和解决问题的能力大有裨益。编译过程中基本保持了上述特色。

原书由TEC推荐作为生产工程中技术级别较高人员的主要进修读本，也作为拟获得高等国家文凭（HND）的学生学习本课程的基础教材。

本书由应闰兰（第九章至第十五章及附录）、过大江（第一章至第八章）编译，全书由同济大学徐炳楠审校。本书内容涉及的面较广，由于编译者水平有限，仓促成稿，错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编译者

1986年8月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 检测仪表的定义和作用.....	1
1.2 标准和校准.....	2
1.3 测量系统.....	3
1.4 负载效应.....	4
1.5 使用检测仪表的一般规则.....	6
第二章 测量系统的特性	7
2.1 理想的测量系统.....	7
2.2 测量系统的静态特性.....	7
2.3 测量系统的动态特性.....	14
习题.....	31
第三章 传感器	34
3.1 定义.....	34
3.2 分类.....	34
3.3 传感器的组成环节.....	34
3.4 传感器的灵敏度.....	35
3.5 理想传感器的特性.....	36
3.6 电传感器.....	36
3.7 电阻式传感器.....	37
3.8 电容式传感器.....	47
3.9 电感式传感器.....	49
3.10 线性差动变压器式传感器.....	51
3.11 压电式传感器.....	53
3.12 电磁感应式传感器.....	55
3.13 热电偶式传感器.....	57

3.14	光电池	58
3.15	机械式传感器和敏感元件	59
	习题	62
第四章	信号调节器	65
4.1	概述	65
4.2	放大器	65
4.3	机械式放大机构	67
4.4	电子放大器	73
4.5	信号转换器	82
	习题	93
第五章	记录和显示装置	95
5.1	概述	95
5.2	机械式指示仪表	95
5.3	动圈机构	97
5.4	笔式记录仪	98
5.5	紫外线记录仪	100
5.6	伺服式记录仪	112
5.7	阴极射线示波器	116
5.8	磁带记录器	122
5.9	瞬态波形记录仪	127
5.10	各种记录和显示装置的比较	128
	习题	130
第六章	位移的测量	133
6.1	定义	133
6.2	单位	133
6.3	机械式位移测量装置	134
6.4	电气位移测量装置	136
6.5	完整的位移测量系统	147
6.6	位移传感器在其他测量中的应用	150
6.7	位移测量系统的校准	151

习题	152
第七章 频率和角速度的测量	154
7.1 定义	154
7.2 单位	154
7.3 线运动和角运动	155
7.4 频率的测量	156
7.5 角速度测量的模拟法	163
7.6 角速度测量的数字法	169
7.7 角速度测量系统的校准	174
7.8 完整的角速度测量系统	175
习题	176
第八章 应变的测量	178
8.1 概述	178
8.2 定义	179
8.3 电阻应变计	180
8.4 应变计灵敏系数	183
8.5 应变计轴线	184
8.6 粘贴工艺	185
8.7 信号调节	189
8.8 温度补偿	193
8.9 电桥平衡	197
8.10 各种接桥方法	198
8.11 应用实例	199
8.12 完整的应变测量系统	202
习题	203
第九章 力的测量	205
9.1 定义	205
9.2 单位	205
9.3 力的测量	206
9.4 杠杆式测量装置	206

9.5	弹簧式测量装置	209
9.6	弹性式力传感器	210
9.7	压电式力传感器	217
9.8	智能称重系统	219
9.9	完整的力测量系统	219
	习题	222
第十章	压力的测量	224
10.1	定义	224
10.2	单位	224
10.3	计示压力、绝对压力及压力差	225
10.4	压力测量的方法	226
10.5	流体压力计	226
10.6	弹性式压力传感器	231
10.7	压电式压力传感器	236
10.8	真空度的测量	237
10.9	压力传感器的定标	240
10.10	完整的压力测量系统	241
	习题	245
第十一章	振动和噪声的测量	247
11.1	振动	247
11.2	振动测量装置	252
11.3	完整的振动测量系统	258
11.4	噪声	260
11.5	噪声的特性	261
11.6	典型的噪声测量系统	265
11.7	传声器	266
11.8	振动和噪声的频率分析	268
	习题	269
第十二章	温度的测量	271
12.1	定义	271

12.2	单位	271
12.3	温度的测量	272
12.4	非电测量法	272
12.5	电测量法	274
12.6	辐射测量法	285
12.7	各种温度测量仪表的测量范围	288
12.8	校准的方法	289
12.9	完整的温度测量系统	290
	习题	292
第十三章	控制概论	294
13.1	概述	294
13.2	控制系统的方框图	294
13.3	控制系统的基本形式	296
13.4	各控制分支	300
13.5	控制系统需考虑的基本问题	303
	习题	306
第十四章	控制系统的元件	308
14.1	比较元件	308
14.2	控制元件	315
14.3	几种简单控制系统的分析	325
14.4	怎样设计一个控制系统	328
	习题	331
第十五章	系统的响应特性	333
15.1	概述	333
15.2	等效系统	333
15.3	一阶系统的响应特性	334
15.4	二阶系统的响应特性	340
15.5	控制系统的响应特性	347
	习题	348
附录A	一阶延迟响应	350

附录B	二阶延迟响应.....	352
附录C	分贝 (dB) 计数法	355
附录D	单位制和转换.....	357

第一章 绪论

1.1 检测仪表的定义和作用

要精确地为检测仪表下一个定义，并不容易，但通常人们称监测、信号传感以及测量用的仪表为检测仪表。检测仪表可用于

- a) 产品检验和质量控制；
- b) 对健康、安全以及各种耗费的监测；
- c) 控制系统的一个组成部分；
- d) 科学研究和产品开发。

在机械工程中，虽然仍普遍使用机械式仪表，但电子装置的使用正日益增长，这主要出于如下原因：

- i) 电子装置反应速度非常快；
- ii) 电信号易于远距离传输，并且它们的幅值容易放大。

对检测仪表的主要要求是在其工作范围内获得准确的测量结果。测量实际上是与一个标准量(即所谓“基准”)进行比较的过程。按照我国标准《常用计量名词术语及定义》(试行)JJG 1001-82 中的定义，为“确定被测对象的量值而进行的实验过程”。国际上还有“测量是以确定量值为目的的一组操作”之说。因为要与相对标准量进行比较，所以标准量的精确程度对测量结果起着重要作用。另外，对仪表进行定期的例行维修和校准也是准确测量的必要条件，否则使用长期失修、不校准的仪器，既浪费时间和人力，且记录的全是些毫无意义的结果。

仪表学是一门多科性的综合学科，它利用了物理学、电子学、光学、力学、热力学、流体力学、化学等学科中的一些原理，所

以仪表学是非常有趣的，并且它不断促进各工程学科的发展。当然，对工程技术人员来说，要了解和应用检测仪表，就必须学习仪表学的有关基本知识。

1.2 标准和校准

测量必须要有一个基准，为此要有一套基本的标准和单位，通常测量就是要将被测的量与作为标准或单位的量，在数值上进行比较，从而得到被测量值。如果基本的标准或者说参考的基准是自然基准（在原子技术术语中有详细说明），则它们可以在世界任何地方，以高的精度复现，而不需保持在特殊条件下的特定实验室里。

我们把仪表同已知的标准作比较的过程，称之为“校准”或“定度”。如果保持其他所有参量不变，仅改变某一输入量，而后观测其输出结果的变化情况，来确定仪表的示值误差（必要时也确定仪表的其他性能），这项工作是“校准”；而在仪表的整个测量范围内，随着输入标准量的数值改变而相应标定出输出刻度，这项工作按计量学的术语称为“定度”，在工程测试技术中则习惯上称之为“标定”或“定标”。为了保证量值准确一致，在实际工作中人们利用作为“主基准”的计量器具去校准作为“副基准”或“工作基准”的计量器具，依次利用相应的标准，直至校准现场使用的测量器具。所以每个测量器具的精度和校准可追溯到基本的计量标准，并追溯到副基准，直至主基准。

国家计量行政部门负责建立各种主基准（国家基准），作为统一全国计量单位量值的最高依据，并严格依照国际上约定的维护规则保持主基准。各级计量行政部门根据需要建立相应的计量标准器具，要经上级计量行政部门主持考核合格后使用。各种计量器具、测试仪表应按相应的计量检定规程定期校准，参照有关规定由计量检定机构或使用单位进行。

1.3 测量系统

测量系统往往由许多功能不同的器件所组成，典型的系统可用图 1.1 所示的三框图来表示。三个方框代表如下三个功能器件：

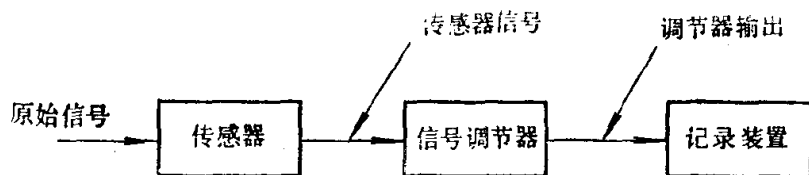


图 1.1 基本测量系统的方框图

- a) 传感器；
- b) 信号调节器；
- c) 记录与显示装置。

以上的方框还可再分为数个更细的框图，以充分表示各种更具体的功能。

1.3.1 传感器

图 1.1 中所示的传感器是一个能量变换器，它接收被测量（亦称其为被测物理量），并将其变换成便于测量的其他量，例如将流量变换成压力，将速度变换成电压，将应变变换成电阻等。无疑，传感器是测量链中最有影响的一环，具有“负载效应”，传感器的存在总会改变被测量的数值，为使这个“负载效应”达到最小，可借助于传感器的正确设计和精细安装，但只能小到某种程度，不可能是零。

1.3.2 信号调节器

图 1.1 中的信号调节器又称中间转换器、中间处理环节等，它将传感器输出信号进行再转换、放大（或衰减）、阻抗匹配等处理，使其转换成合乎需要、容易记录和显示的信号。

1.3.3 记录与显示装置

图 1.1 所示的第三个框图是记录器、显示器（包括指示仪表）。

许多记录器或显示装置本身附有一些信号变换器件，对其输入量有变换作用。例如电磁式电压表把输入电压变换成指针相对刻度表盘的位移。虽然如此，从电压表整体功能分析，它只能属于系统方框图中记录或显示装置部份。

我们可用图 1.2 所示的框图来说明波登管压力计（结构见第十章图 10.6），波登管把输入压力变换成它的封闭端的位移，杠杆机构和齿轮传动系统把波登管末端的位移转换为指针相对于刻度盘的移动。



图 1.2 波登管压力计的方框图

同样，也可用方框图方法来分析体温计：温度“变换”成水银球的体膨胀，毛细管“调节”膨胀的水银，而刻度使温度测量能折合为长度的测量。

1.4 负载效应

任何测量装置或仪表都需要一定的能量才能工作，所以它们总要从信号源中吸取一些能量，这将改变被测信号的真实数值。例如把测速发电机接入回转机构后，回转系统的摩擦和惯量相应增加，致使回转速度降低了。

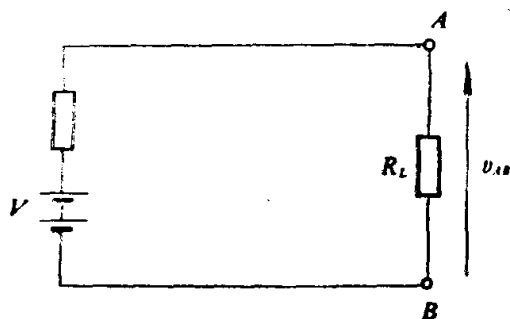


图 1.3 电子负载效应(图中未注字的电阻为 R_i)

图 1.3 所示为负载效应的一个实例，图中有一个内阻为 R_i 的电压源 V ，还有输出端 A 和 B 。当 A 、 B 两端开路，

即没有负载的情况下

端电压 $v_{AB} = V$ (伏)

而用一具有阻值 R_L 的测量仪表跨接 A 、 B 两端时, 则有电流 I 流过, 于是:

端电压 $v_{AB} = V - IR_i$

而

$$I = \frac{V}{R_L + R_i}$$

所以

$$v_{AB} = V \left(\frac{R_L}{R_L + R_i} \right)$$

由上式可见, 当 R_L 比 R_i 大得很多时, R_i 可忽略不计, 则有

$$v_{AB} \approx V$$

因此, 欲使负载效应减到最小, 必须满足的条件为:

a) 电压源内阻应该很小;

b) 所跨接的测量仪表的阻抗必须很高。

推广到一般的情况可见, 为获得准确的测量结果, 测量装置的“阻抗”应大大高于被测信号源的“阻抗”。在这里, 我们可以将广义阻抗 (对流动的阻碍作用) 定义为

$$\text{阻抗} = \frac{\text{势变量}}{\text{流变量}}$$

无疑, 一个器件从前面一个器件吸取能量的瞬时速率是一种功率, 而任何一种形式的功率都可以用“势变量”和“流变量”的乘积来表示。例如电功率等于电压和电流的乘积, 其中电压是势变量, 而电流是流变量; 液压功率等于压力和流量的乘积, 其中压力是势变量, 流量是流变量; 机械功率等于力 (或扭矩) 和速度 (或角速度) 的乘积, 其中力 (或扭矩) 是势变量, 而速度 (或角速度) 是流变量等等。于是相应可得到电阻抗、液压阻抗和机械阻抗等等。实际上广义阻抗的概念是电阻抗概念的推广。

必须注意, 所有系统的测量装置都有一定的负载效应, 负载效应从来不能完全消除, 而只能考虑如何减少到最低程度。

1.5 使用检测仪表的一般规则

使用检测仪表前，应该非常熟悉所用仪表的使用说明书，清楚了解仪表性能和使用方法。使用说明书通常详细叙述了仪表的性能、安装方法、校准以及操作过程等，花费时间读说明书是值得的，不然会造成测量结果不准确，或完全错误，甚至还可能损坏仪表。

另外，尽可能把仪表调整在低灵敏度状态，再开始测量。如不能满足需要，可再调整放大器件，逐渐增加灵敏度直至达到所需要的灵敏度为止。测量开始时还要尽量使用小负载，以避免仪表过载。还有，对仪表应该检查、再检查，无论在测量前或测量后，我们都不能假设检测仪表是在制造厂给出的性能范围内，而要经常检查其校准状态。

特别重要的是，检测人员要养成良好的卫生和安全操作的习惯，要按照安全操作规程使用检测仪表。对可能发生的危险，例如电击、化学和气体污染、人体损伤以及直接受X射线、紫外线或其他射线的辐射而引起的灼伤等要高度重视，防止发生事故。

第二章

测量系统的特性

2.1 理想的测量系统

理想的测量系统应是这样的一种系统：系统输出量和被测量间具有线性关系；系统没有诸如静摩擦等影响所引起的误差；不管系统输入量如何变化，输出量都能如实反映输入量。我们通常用误差的概念来表示实际测量系统或检测仪表不足以反映上述理想系统的情况。在这里，人们把误差定义为仪表的示值与“真值”的差值（指的是示值绝对误差）。

至于“真值”的意思，在实际测量中可以认为是从检测人员所确信的测量系统或检测仪表中获得的量值，用它作比较或校准，可赋予测量结果有合格的精度。例如用静重试验仪来校准压力计时，从静重试验仪所得读数，可认为是“真值”。

检查测量系统或控制系统的特性有如下两种途径：

- a) 用稳定或恒定的量输入系统，所得稳定的输出量同理想情况比较，确定系统的静态特性；
- b) 用变化的量输入系统，所得变化的输出量同理想情况比较，确定系统的动态特性。

2.2 测量系统的静态的特性

2.2.1 静态灵敏度

静态灵敏度是测量系统对被测量(输入量)变化的反应能力，可定义为：在静态或稳态的情况下，测量系统输出变化对输入变

化的比值,用 K 值来表示,即

$$K = \frac{\Delta\theta_o}{\Delta\theta_i} \quad (2.1)$$

式中 $\Delta\theta_o$ ——输出量的变化量;
 $\Delta\theta_i$ ——输入量的变化量。

灵敏度有各种各样的单位,它取决于所应用的测量系统或检测仪表。例如铂电阻温度计的电阻随被测温度的增加而增加,因此它的灵敏度单位是 $\Omega/^{\circ}\text{C}$ 。

在静态测量中,测量系统输出与输入间的关系曲线称为定度曲线(又称定标曲线)。图2.1(a)表示输出与输入成线性关系,此时的定度曲线是一直线,其灵敏度就等于这直线的斜率。如输出与输入间关系不是线性的,则其灵敏度随输出的大小而变化,如图2.1(b)所示。

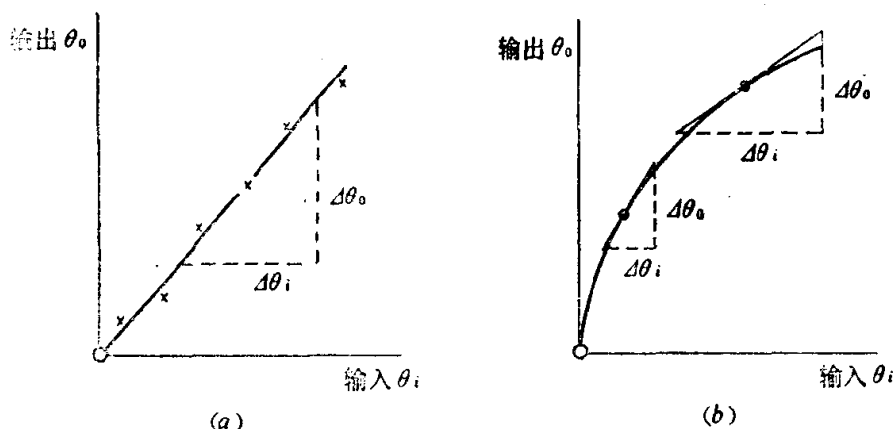


图2.1 静态灵敏度

记录与显示装置的制造厂所提供的产品灵敏度常常是上述定义所给出的灵敏度的倒数。举例说,制造厂所提供的示波器灵敏度,其单位是 (V/cm) ,而不是按前述定义所表达的 (cm/V) 。

如果测量系统由多个环节所组成,各环节的静态灵敏度分别为 K_1 、 K_2 、 K_3 、 $\dots$,各环节按照图2.2所示的那样以连续亦即串联的方式连接起来,则所组成的整个系统的灵敏度 K 可用下式确