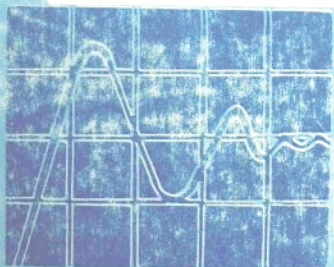


刘兆琦 编著



测试技术与传感器

西北工业大学出版社

测试技术与传感器

刘兆琦 编著

西北工业大学出版社

1993年6月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容提要】 本书是作者在自己长期科研和教学实践经验的基础上,并参考国内外有关资料编写而成的。主要内容包括测量的基本知识、测量误差和数据处理、常用传感器的工作原理、结构、特性、测量电路、标定方法及其应用。

本书在编写和选材上侧重于实用性和该领域中的最新成果,叙述简明、深入浅出。本书可作为高等院校师生及从事测试技术和自动化工作的工程技术人员的教材或参考书,亦可供有关专业的工程技术人员参考。

测试技术与传感器

编 著 者 刘兆琦

责任编辑 蒋相宗

责任校对 姚民洁

*

© 1993 西北工业大学出版社出版发行

(西安市友谊西路 127 邮编 710072)

全国各地新华书店经销

西安公路学院印刷厂印装

ISBN7-5612-0573-2/TM·6

850×1168 毫米 1/32 开本 8.625 印张 214 千字

1993 年 6 月第 1 版 1993 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—1000 定价: 7.50 元

前 言

当代工程测试及传感器技术在科学研究和生产领域中的地位和作用愈来愈显得重要，测试技术直接影响到各项科学研究的顺利进展和水平，关系到产品的质量和生产效率。于是，理工类各专业的学生和工程技术人员迫切需要加强这方面的知识。本书是作者集自己多年从事科研和教学的实践经验，参考国内外在测试领域方面的最新成果编写而成的，目的在于向广大读者提供一本较全面地介绍测试技能和传感器技术的书籍。

测试技术和传感器涉及的面很广泛，发展极为迅速。为了使读者获得比较系统和完整的概念，全书共分十二章，从测量的基本概念，测量误差及数据处理开始，以测试技术为主，以信息获得为重点，兼顾到信息转换与处理。叙述和分析了常用各类传感器的工作原理、结构、基本特性、测量电路、校准方法和应用实例。

本书内容新颖、丰富。叙述简明、深入浅出。可作为理工科院校各类专业测试技术课程的教材，并可供从事测试技术和自动化工作的工程技术人员参考。

书中部分内容选编了其它兄弟院校编写的有关教材，在此致以谢意。

限于作者水平，书中疏漏错误之处，在所难免，热诚希望读者批评指正。

刘兆琦
1993年1月

目 录

第一章 测量的基本知识	1
1.1 测量和计量	1
1.1.1 测量和测量的基本方法	1
1.1.2 计量的基本概念	3
1.2 传感器的定义及其在工程测量中的作用	5
1.3 一般测量系统	6
1.4 测量系统的静态特性	8
1.4.1 概述	8
1.4.2 静态特性的测定方法	9
1.4.3 静态特性的主要指标	10
1.5 测量系统的动态特性	19
1.5.1 概述	19
1.5.2 测量系统的数学模型	20
1.5.3 传递函数	20
1.5.4 频率响应	21
1.5.5 线性系统不失真条件	27
第二章 测量误差和数据处理	31
2.1 测量误差的基本概念	31
2.1.1 误差的来源	31
2.1.2 测量误差的表示方法	32
2.1.3 一次直接测量减小误差的方法	35
2.2 误差的性质和分类	38
2.3 系统误差的判断及其减小的方法	41
2.3.1 恒定系差的判断	41

2.3.2	剩余误差观察法	41
2.3.3	公式判别法	42
2.3.4	减小系统误差的方法	43
2.4	随机误差的统计处理	46
2.4.1	测量值的数学期望与标准差	46
2.4.2	贝塞尔公式的应用	48
2.4.3	随机误差的概率分布	50
2.5	粗大误差及其判断准则	51
2.5.1	测量结果的置信问题	51
2.5.2	不确定度与坏值的剔除准则	54
2.6	测量数据的处理	56
第三章 应变和应力测量		61
3.1	电阻应变计的工作原理	61
3.1.1	金属丝的应变电阻效应	61
3.1.2	应变计的测试原理	64
3.1.3	应变计的横向效应	65
3.1.4	应变计的温度特性	67
3.2	电阻应变计的典型结构	69
3.3	应变片和应变粘结剂的选用	72
3.4	电阻应变计的测量电路	75
3.5	测量电桥参数的调整	77
3.5.1	测量电桥的电阻和电容平衡装置	77
3.5.2	温度补偿	79
3.6	电阻应变仪	81
第四章 磁电式传感器		84
4.1	磁电式传感器的工作原理	84
4.2	动圈式磁电传感器	86
4.3	磁阻式传感器	88

4.4	磁电式传感器的误差	91
4.4.1	温度误差	91
4.4.2	永久磁铁的不稳定性误差	93
4.4.3	磁电式传感器的非线性误差	94
4.5	磁电式传感器的频率响应特性	95
第五章	· 涡流式传感器	97
5.1	涡流式传感器的的工作原理	97
5.1.1	工作原理	97
5.1.2	灵敏度与非线性	99
5.2	涡流式传感器的结构和使用	100
5.2.1	涡流式传感器的结构	100
5.2.2	涡流式传感器的使用	101
5.3	测量电路	103
5.4	涡流式传感器的应用	106
第六章	压电式传感器	111
6.1	压电式传感器的工作原理	111
6.1.1	压电效应	111
6.1.2	压电常数和表面电荷的计算	114
6.2	压电材料	118
6.2.1	压电晶体	118
6.2.2	压电陶瓷	119
6.3	压电式传感器的等效电路	123
6.4	压电式传感器的信号调节电路	126
6.4.1	电压放大器(阻抗变换器)	127
6.4.2	电荷放大器	132
6.5	压电式加速度传感器	135
6.5.1	工作原理	135
6.5.2	灵敏度	136

6.5.3	频率特性	137
6.5.4	压电式加速度传感器的结构	140
6.6	压电式测力传感器	143
6.7	压电式传感器的误差	145
6.7.1	横向灵敏度和它引起的误差	145
6.7.2	环境影响	146
6.7.3	电缆噪声	146
6.7.4	接地回路噪声	147
第七章	光电式传感器	148
7.1	光电效应	148
7.2	光电管	149
7.3	光电倍增管	150
7.4	光敏电阻	152
7.4.1	光敏电阻的工作原理	152
7.4.2	光敏电阻的结构	152
7.4.3	光敏电阻的主要参数及特性	153
7.5	光敏二极管和光敏晶体管	157
7.5.1	工作原理	157
7.5.2	基本特性	158
7.6	光电耦合器件	162
7.6.1	结构特点	162
7.6.2	主要参数	162
7.7	光电池	163
7.7.1	工作原理	163
7.7.2	基本特性	164
7.8	光电式传感器的应用	167
第八章	电磁效应	170
8.1	磁阻效应及强磁性磁敏电阻	170

8.2	霍尔效应与霍尔元件	177
8.2.1	霍尔效应	177
8.2.2	霍尔元件的基本电路	179
8.2.3	霍尔元件的性能参数	180
8.2.4	霍尔元件的使用	181
8.2.5	霍尔元件的温度补偿	183
8.2.6	不等位电势的补偿	185
8.2.7	霍尔元件的应用	186
第九章	压力和流量测量	189
9.1	压力测量	189
9.1.1	应变式压力传感器	189
9.1.2	压电式压力传感器	194
9.1.3	测压系统的标定	197
9.2	流量测量	200
9.2.1	涡轮流量计	201
9.2.2	椭圆齿轮流量计	203
9.2.3	靶式流量计	205
9.2.4	转子流量计	208
9.2.5	流量计的标定	210
第十章	温度测量	215
10.1	温度计的种类和特点	216
10.2	热电偶	217
10.2.1	热电偶测温的工作原理	217
10.2.2	热电偶的结构	221
10.2.3	热电偶使用中的误差及补偿方法	224
10.3	电阻温度计	227
10.3.1	概述	227
10.3.2	热电阻温度计	227

10.3.3	半导体电阻温度计	230
10.3.4	测量电路	232
第十一章	振动的测量	235
11.1	机械振动的描述	235
11.1.1	简谐振动	235
11.1.2	周期振动	237
11.1.3	非周期振动	240
11.1.4	随机振动	244
11.2	机械振动和冲击测量仪器的主要 特性参数	245
11.3	“质量-弹簧”型测振仪(传感器) 特性分析	248
11.4	机械阻抗的测量	253
11.4.1	机械阻抗头	254
11.4.2	机械阻抗测量系统	255
第十二章	传感器和测量系统的标定	257
12.1	静态特性标定	257
12.2	动态特性标定	258
12.3	测振传感器的标定	261
12.4	提高标定精度的方法	262

主要参考文献

第一章 测量的基本知识

1.1 测量和计量

1.1.1 测量和测量的基本方法

测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程，从根本上说，测量是用一个预定的标准与一个未知量进行比较的过程和结果。假如要使该结果具有普遍意义，则测量必须满足两个要求：(a) 用来进行比较的标准必须准确并得到公认；(b) 进行比较所用的方法和仪器必须是经过验证的。

第一个要求是要有一个通用的作比较的标准。比较是必不可少的。因为如果不与公认的标准进行比较，那测量的意义是有限的。这对于我们希望进行的任何测量都适用。事实上，比较的是一个数值，且必须有量的结果。

测量是揭示客观世界规律，用数字语言描述周围世界，进而改造世界的重要手段。广义地说，任何科学实验的结论，都是对实验数据统计推断的结果。而数据的取得，就要靠测量。许多重大科学成果的获得，首先因为有了新的实验手段和测量方法。同时，很多实验数据还成为发现新问题、提出新理论的线索和依据。著名科学家门捷列夫用一句话概括了测量对科学的作用，“没有测量，就没有科学”。

现代科学技术、生产和国防的重要特点之一，就是要进行大量的观测和统计。现代工业大生产，用到测量上的工时和费用约占整个生产费用的 20%~30%。提高测量水平，降低测量成本，减少测量误差，提高测量效率，对国民经济各个领域都是至关重要的。因此，测量手段的现代化，已被公认为是科学和生产

现代化的重要条件和明显的标志。

测量有两种基本的方法：(a) 直接与原始标准或次级标准相比较；(b) 借助于一个标准系统间接地与一个标准比较。

1、直接比较

你怎样测量一根轴的长度呢？你大概会用一根钢卷尺将轴的长度与钢卷尺（即标准）相比较。因为卷尺上若干刻度单元与轴一样长，所以轴的长度是若干米。通过直接比较你已经知道了轴的长度。虽然你没有确定刻度单元的原始标准，你却熟练地使用了次级标准。毫无疑问，你使用的标准只要追溯三到四代，就可追溯到它的原始标准。

虽然直接比较法是解决测量问题最基本的方法。但它不总是最准确或真正最好的方法。人们的对各种参数的直接比较的敏感性是不同的。在许多情况下，这种感觉不够敏感。我们能利用一支精确度为 0.001m 的钢尺直接进行长度比较。通常我们还希望获得更高的精度，为此，必须另外借助于某种已校准的系统。

尽管我们能通过直接比较长度进行长度测量。但是我们怎样来比较质量呢？利用我们的感觉可以粗略的比较。我们可以用手“掂一掂”一公斤牛肉和一末知量，然后将所得的印象进行比较。假如我们感到两者的重量大致相等，则可以说未知量比我们的“标准”稍重或不完全一样重，但决不能肯定两者的重量相差几克。

因此，在进行大多数工程测量时，我们需要借助某种形式的测量系统。而直接比较测量的应用范围通常不如间接测量的广泛。

2、应用一个校准系统

间接比较是应用某种形式的传感器。它是与连接各种仪器的电路匹配的，我们统称为测量系统。测量系统是将基本形式的输入转换为模拟的形式，然后对它进行加工，并作为一个输入的已

知函数从输出端输出。为了获取所需要的信息，这种转换通常是必要的。例如人们的感官不能直接检测机器构件的变形。需要借助系统的帮助，该系统可进行检测、转换并且最终将模拟输出在刻度盘上或记录纸上以位移的形式显示出来。

模拟信号的处理方式有很多种，通常需要经过某种类型的放大来增大幅值或功率，或者从大量需要滤波的外来输入中选择所要求的信息。此外，还需要一个遥测读数或记录仪。例如在地面记录井下的温度和压力，这样肯定要求将温度信号和压力信号变成电信号才能传送到地面。

在许多需要放大、滤波或远距离记录的情况下，电测方法能满足要求。实际上目前使用的大多数传感器，特别是用来进行动态机械测量的传感器，都是将机械输入信号转换成模拟电信号作进一步处理。

1.1.2 计量的基本概念

随着生产发展，商品交换和国内外的交往，客观上要求对同一量在不同的地方，用不同的测量手段测量时，所得的结果应该一致。因而出现了大家公认的统一单位，体现单位的基准、标准和用这些基准和标准来校准的测量器具，还用法律形式将上述内容固定下来，从而形成了与测量有联系而又有别于测量的新概念，这就是计量的概念。也可以说计量是为了保证量值的统一和准确一致的一种测量，它的三个主要特征是统一性、准确性和法制性。计量工作主要是把未知量与经过准确确定的，并经国家计量部门认可的基准或标准相比较来加以测定，也就是通过建立基准、标准，进行量值传递。但是它也包含了为达到统一和准确一致所进行的全部活动，如单位的统一、基准和标准的建立、计量监督管理、测量方法及其手段的研究等等。

凡能用以直接或间接测出被测对象量值的量具、计量仪器和

计量装置都统称为计量器具，计量器具按用途可分为计量基准、计量标准和工作用计量器具三类。

计量基准一般又分为国家基准、副基准和工作基准。国家基准又叫主基准。它是用来复现和保存计量单位，具有现代化科学技术所能达到的最高准确度，经国家鉴定并批准，作为统一全国计量单位量值的最高依据的计量器具。通过直接或间接与国家基准对比来确定其量值，并经国家鉴定批准的计量器具称为副基准。建立副基准的主要目的是代替国家基准的日常使用，也可用于验证国家基准的变化。经与国家基准或副基准校准或对比，并经国家鉴定，实际用以检定计量标准的计量器具称为工作基准。工作基准主要用于一般量值传递，以防国家基准和副基准由于使用频繁而丧失其应有的准确度或遭到破坏。

计量标准是按国家规定的准确度等级，作为检测依据用的计量器具或物质。它的量值是由工作基准传递来的，并将基准所复现的单位量值通过检定逐级传递到工作用计量器具，以保证后者量值的准确和一致。计量标准有两类：一类是标准器具，一类是标准物质。标准物质是指在规定条件下，具有高稳定的物理、化学或计量学特性，并经正式批准作为标准使用的物质或材料。在鉴定、评价和考核仪器、测量方法和测量结果方面，标准物质的使用都是一种重要手段。

不用于检定而只用于日常测量的计量器具称为工作用计量器具。但是工作用计量器具要定期用计量标准来检定，即由计量标准来评定它的计量性能（准确度、稳定度、灵敏度等）是否合格。

计量工作保证了全国量值的统一，是生产、科研和人民生活的正常秩序和各项活动安全可靠的重要保证。计量工作是国民经济的一项带基础性的重要工作，需要一定的法制管理。

计量的出现是测量发展的客观需要，测量还是计量联系生产

实际的重要途径，可以说没有测量就谈不上计量。但测量数据的准确可靠，要求计量予以保证，没有计量，测量也将失去价值。测量和计量相互配合，在国民经济各个领域都发挥着重要作用。

1.2 传感器的定义及其在工程测量中的作用

能够把被测量的非电量转换或与之有确定对应关系的电量输出的装置称为传感器。传感器也叫变换器、换能器或探测器。不同的传感器输出的信号有不同形式，如电压、电流、频率、脉冲等，以满足信息的传输、处理、记录、显示和控制等要求。

传感器是测量装置和控制系统的首要环节。如果没有传感器对原始参数的精确可靠的测量，那么，无论是信号转换或信息处理，或者最佳数据的显示和控制，都将成为一句空话。可以说，没有精确可靠的传感器就没有精确可靠的自动检测和控制系统，现代电子技术和电子计算机为信息转换与处理提供了极其完善的手段，使检测与控制技术发展到了崭新阶段，但是如果各种精确可靠的传感器去检测各种原始数据并提供真实的信息，那么电子计算机也无法发挥其应有的作用。如果把计算机比喻为人的大脑，则传感器为人的五官。

在各种航天器上，装备着多种检测与控制系统，传感器测量出航天器的飞行参数、姿态和发动机工作状态的各个物理量，输送给各种自动控制系统，并进行自动调节，使航天器按人们预先设计的轨道正常运行。

在生产中，尤其是自动化生产过程中，用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数，以便使设备工作在最佳状态，产品达到最好的质量。

在机器制造业中，对于机床，以前只是测量一些静态下的性能参数，而现在要进行动态特性测量。如切削状态下的动态稳

定性、自激现象、加工精度等，因此要利用有关的传感器测量刀架、床身等有关部位的振动、机械阻抗等参数来检验其动态特性。在超精加工中，要求对零件尺寸精度进行“在线”检测与控制，只有具有“耳、目”作用的传感器才能提供出有关的信息。

1.3 一般测量系统

一般的测量系统应包括下述三部分：

- (1) 信息的获得——输入传感级（包括敏感元件和变换器，统称为传感器）；
- (2) 信息的转换——中间级（包括信息放大、转换、调节和处理等环节）；
- (3) 信息显示和处理——终端级（包括指示器、记录仪、数据分析仪和微处理器）。

首先要获得信息，把它变换成电量，然后通过信息转换，把获得的信息变换，放大，再用指示仪或记录仪器将信息显示出来。有时还需要把信息加以处理。因此，一个完整的电测系统可用图 1-1 的框图来表示。

传感器是一个把被测量的非电量变换成电量的装置。因此是一种获得信息手段的装置。因而它在电测系统中占有十分重要的地位。它获得信息的正确与否，关系到整个测量系统的精度。如果传感器的误差很大，后面的测量电路、放大器、指示仪表等的精度再高，也将难以提高测量系统的精度。

测量电路的作用是把传感器的输出变量变成电压、电流、频率或脉冲等电信号，使之能在指示仪表上指示或在记录仪中记录。例如电阻应变传感器需要采用电桥电路把电阻应变计电阻值的变化变换为电压或电流值输出。所以它属于信号转换部分。由于测量电路的输出信号一般比较小，为了能使指示仪表工作或记

录机构运动常常要将信号加以放大，所以在测量电路中一般还带有放大器。此外，在必要时还可以完成一个或几个基本操作。例如选择性滤波、积分、微分和遥测等，这都属于信息的转换。

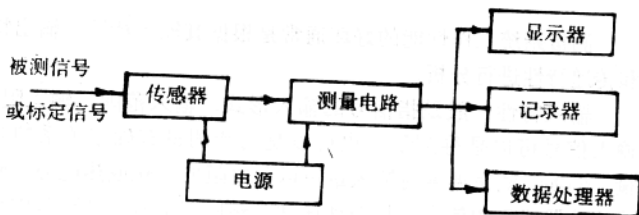


图 1-1 一般电测系统的组成

测量的目的是使人们了解要测的数值。所以必须有显示装置，这就是信息的显示。显示的方式，目前常用有三类：模拟显示、数字显示和图像显示。模拟显示就是利用指针对标尺的相对位置来表示读数，常用的有电压表、电流表、频率计等指示仪器。数字显示是用数字的形式来显示读数。实际上是一只专用数字电压表、数字电流表或数字频率计。图像显示是用屏幕显示读数或者被测参数变化的曲线。在测量过程中，有时不仅要读出被测参数的数值而且还要了解它的变化过程。特别是动态过程的变化，根本无法用显示仪表指示，那么就要把信号送到记录仪自动记录下来，现在常用自动记录仪器有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪、电传打字机等。记录仪起记录信号的作用，在信息流过程中，它仍然属于信息的显示。

对于动态信号的测量过程，有时还必须对测得的信号数值加以分析和数据处理。例如，对复杂的波形要进行频谱分析，有时还要进行运算。属于这方面的仪器有频谱分析仪、实时信号分析仪、快速傅里叶变换等，这一部分属于信息的处理。