

辽宁工程技术大学“十五”规划教材

# 机械工程测试技术

李晓豁 编著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 李晓豁 2005

图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程测试技术 / 李晓豁编著 .— 沈阳 : 东北大学出版社, 2005.8  
(辽宁工程技术大学“十五”规划教材)

ISBN 7-81102-146-3

I. 机... II. 李... III. 机械工程—测试技术 IV. TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 055078 号

---

出 版 者 : 东北大学出版社

地址 : 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编 : 110004

电话 : 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真 : 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail : neuph @ neupress.com

http : // www . neupress . com

印 刷 者 : 沈阳农业大学印刷厂

发 行 者 : 东北大学出版社

幅面尺寸 : 184mm × 260mm

印 张 : 17.625

字 数 : 440 千字

出版时间 : 2005 年 8 月第 1 版

印刷时间 : 2005 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑 : 孟 颖

责任校对 : 冬 雨

封面设计 : 唐敏智

责任出版 : 杨华宁

---

定 价 : 24.50 元

# 前 言

本书是按照全国高校机械工程测试技术研究会非电量电测分会 2001 年年会的精神，根据理工科各专业对测试技术课程的基本要求，结合科学技术和工业生产的最新进展而编写的。

本书以测试技术中构成信号流的基本理论、基本手段和基本技术为总的思路，以构成测试技术的完整概念。本书分三篇，共十三章。第一篇，第一～第五章，介绍测试系统的组成、原理与设计，包括传感部分，中间变换部分，显示、记录与存储部分，测试系统的特性分析，测试系统设计；第二篇，第六～第七章，介绍测试信号分析与数据处理，包括测试信号的描述和分析，测量误差与数据处理；第三篇，第八～第十三章，介绍常用参量的测量，包括加工精度与运动误差的测量，振动的测量，应变、力和扭矩的测量，声测量，温度的测量，流体参数的测量等，这些典型参数的测试方法可以看作基础知识的应用举例，不同的专业可根据其教学要求从中选择部分内容进行讲授。

本书参阅了国内外各类专业的有关教材和学术论文，并结合作者多年的教学经验和工作总结与体会编写而成。本书的编写注重体系的合理性、内容的完整性、技术的先进性和知识的新颖性，有利于学生创新能力的培养，便于教与学。本书具有以下特点：在体系上，采用先“硬”（测试的元件与系统）后“软”（测试信号的分析与数据处理），再“应用”（常用机械参量的测量）的顺序，有利于培养学生的学习兴趣；按照性质对各种传感器进行归类，内容比较紧凑；增加了测试系统常用的 D/A 转换与 A/D 转换、先进的数字显示和光盘记录以及测试系统设计的内容，使学生能全面地掌握各种测试元件、仪器仪表的原理和测试系统设计的知识和方法；补充了非常实用的测量误差与数据处理部分，使内容更加完整。

本书是辽宁工程技术大学“十五”规划教材，在编写过程中，参考了一些兄弟院校的讲义、教材及专业著作、论文，并得到了有关单位和同志的大力支持和帮助，在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中疏漏难免，恳请各位专家、读者批评指正。

李晓豁

2005 年 5 月

# 目 录

第 0 章 绪 言.....	1
一、测试技术的重要性 .....	1
二、测试过程和测试系统的组成 .....	1
<b>第一篇 测试系统的组成、原理与设计</b>	
第一章 传感部分.....	4
第一节 参量型传感器.....	6
一、电阻式传感器 .....	6
二、电容式传感器 .....	10
三、电感式传感器 .....	13
第二节 发电型传感器 .....	16
一、磁电式传感器 .....	16
二、涡流-磁电式传感器 .....	18
三、压电式传感器 .....	19
四、热电式传感器 .....	23
第三节 半导体式传感器 .....	27
一、磁敏式传感器 .....	27
二、光敏式传感器 .....	28
三、热敏式传感器 .....	30
四、气敏式传感器 .....	31
五、湿敏式传感器 .....	31
六、固态图像式传感器 .....	32
七、集成式传感器 .....	34
第四节 传感器的标定 .....	35
一、基本问题 .....	35
二、多维传感器的标定 .....	37
习题 .....	39
第二章 中间变换部分 .....	41
第一节 电桥 .....	41

一、直流电桥 .....	41
二、交流电桥 .....	43
三、带感应耦合臂的电桥 .....	45
第二节 调制与解调 .....	46
一、调幅与解调 .....	46
二、调频与解调 .....	49
第三节 滤波器 .....	52
一、滤波器的种类 .....	52
二、滤波器的性能分析 .....	53
第四节 D/A 与 A/D 转换 .....	57
一、D/A 转换 .....	57
二、A/D 转换 .....	59
习题 .....	62
<b>第三章 显示、记录与存储部分 .....</b>	<b>64</b>
第一节 模拟显示 .....	64
一、动圈式显示仪表 .....	64
二、自平衡式显示仪表 .....	65
第二节 数字显示 .....	65
一、荧光数码管 .....	66
二、发光二极管 (LED) .....	66
三、液晶显示 .....	68
第三节 数字式波形存储记录仪 .....	70
第四节 磁记录 .....	70
一、磁记录的基本原理 .....	70
二、磁记录设备 .....	72
第五节 光盘式记录 .....	73
一、光记录原理 .....	73
二、光盘机 .....	74
习题 .....	75
<b>第四章 测试系统的特性分析 .....</b>	<b>77</b>
第一节 概述 .....	77
一、对测试系统的基本要求 .....	77
二、线性系统及其主要性质 .....	77
三、测量装置的特性 .....	79
第二节 测试系统的静态特性 .....	79
一、线性误差 .....	79
二、灵敏度、鉴别力阈、分辨力 .....	80
三、回程误差 .....	80

四、稳定度和漂移 .....	81
第三节 测试系统的动态特性 .....	81
一、动态特性的数学描述 .....	81
二、一阶、二阶系统的特性 .....	84
第四节 测试系统对任意输入的响应 .....	89
一、系统对任意输入的响应 .....	89
二、系统对单位阶跃输入的响应 .....	89
第五节 实现不失真测量的条件 .....	90
第六节 测量装置动态特性的测量 .....	92
一、频率响应法 .....	92
二、阶跃响应法 .....	93
第七节 负载效应 .....	95
一、负载效应 .....	95
二、减轻负载效应的措施 .....	96
习题 .....	96
<b>第五章 测试系统设计 .....</b>	<b>98</b>
第一节 系统设计的主要问题 .....	98
第二节 测试系统的选择原则 .....	100
一、灵敏度 .....	100
二、精确度 .....	100
三、响应特性 .....	101
四、线性范围 .....	101
五、稳定性 .....	101
六、测量方式 .....	101
七、各特性参数之间的配合 .....	101
八、其他 .....	102
第三节 测试系统的抗干扰技术 .....	102
一、干扰及其防护 .....	102
二、噪声源和噪声耦合方式 .....	103
三、抗干扰技术 .....	104
第四节 测试系统设计举例 .....	106
一、温度计 .....	106
二、高分辨率生理代谢秤 .....	110
三、微机转速测试系统 .....	112
四、扭转疲劳的计算机辅助实验系统 .....	120
习题 .....	122

## 第二篇 测试信号分析与数据处理

第六章 测试信号的描述和分析.....	123
第一节 测试信号的分类和描述.....	123
一、信号的分类 .....	123
二、信号的描述方法 .....	126
第二节 测试信号的时域分析.....	127
一、时域信号的特征参数 .....	127
二、信号的相关分析 .....	129
第三节 测试信号的幅值域分析.....	136
一、概率密度函数 .....	137
二、概率密度函数在工程中的应用 .....	138
第四节 测试信号的频率域分析.....	139
一、信号的频率分析 .....	139
二、信号的功率谱分析 .....	152
三、相干函数(凝聚函数) .....	157
第五节 数字信号处理.....	159
一、数字信号处理的基本步骤 .....	159
二、采样、混叠和采样定理 .....	159
三、量化和量化误差 .....	161
四、截断、泄漏和窗函数 .....	162
五、离散傅立叶变换及其快速算法 .....	163
六、离散的谱密度估算 .....	164
习题.....	164
第七章 测量误差与数据处理.....	167
第一节 测量误差的基本概念.....	167
一、真值 .....	167
二、误差 .....	167
三、误差来源 .....	168
四、误差分类 .....	168
五、精度 .....	169
六、不确定度 .....	169
第二节 随机误差理论.....	170
一、统计直方图 .....	170
二、随机误差的特性 .....	171
三、标准偏差与概率积分 .....	171

第三节 标准偏差的计算方法.....	172
一、标准法——贝塞尔 (Bessel) 公式 .....	173
二、绝对差法——佩特斯 (Peters) 公式 .....	175
三、极差法 .....	176
四、最大误差法 .....	176
五、算术平均值的标准偏差 .....	177
第四节 间接误差的传递.....	178
一、误差传递的一般表达式 .....	179
二、用标准偏差表示的传递公式 .....	179
三、误差传递公式的应用 .....	180
第五节 系统误差.....	182
一、系统误差的分类 .....	182
二、系统误差对测量结果的影响 .....	183
三、系统误差的发现 .....	184
四、系统误差的消除 .....	186
五、系统误差已消除的准则 .....	188
第六节 误差的合成.....	189
一、随机误差的合成与随机不确定度 .....	189
二、已定系统误差的合成 .....	191
三、未定系统误差的合成 .....	191
四、总不确定度 .....	192
第七节 测量数据处理方法.....	192
一、表格法 .....	193
二、图示法 .....	193
三、经验公式法 .....	194
第八节 一元线性与非线性回归.....	195
一、直线拟合——一元线性回归 .....	195
二、曲线拟合——一元非线性回归 .....	200
习题.....	201

## 第三篇 常用参量的测量

第八章 加工精度与运动误差的测量.....	203
第一节 表面粗糙度的测量.....	203
一、光切法 .....	203
二、比较法 .....	203
三、干涉法 .....	204
四、针描法 .....	204

第二节 形位误差的测量.....	204
一、给定平面内的直线度误差的测量 .....	204
二、圆度误差的测量 .....	205
第三节 回转轴径向运动误差的测量.....	206
<b>第九章 振动的测量.....</b>	<b>207</b>
第一节 振动测量的传感器.....	207
一、涡流位移传感器 .....	208
二、磁电式速度计 .....	209
三、压电式加速度计 .....	210
四、伺服式加速度计 .....	213
五、压阻式加速度计 .....	213
六、阻抗头 .....	214
第二节 振动测量系统及其标定.....	214
一、振动测量系统的组成 .....	214
二、测振系统的标定 .....	215
第三节 基本振动参量的测量.....	217
一、振动量的峰值、有效值和平均值 .....	217
二、总振级的测量与频谱分析 .....	217
习题.....	218
<b>第十章 应变、力和扭矩的测量.....</b>	<b>220</b>
第一节 应变、应力的测量.....	220
一、应变仪的电桥特性 .....	220
二、应变片的布置和接桥方法 .....	221
三、在平面应力状态下主应力的测定 .....	222
四、提高应变测量精确度的措施 .....	223
五、测点的选择 .....	224
第二节 力的测量.....	225
一、常用的测力方法 .....	225
二、弹性变形形式的力传感器 .....	225
三、空间力系测量装置 .....	228
第三节 扭矩的测量.....	231
一、通过转轴应变或应力来测量扭矩 .....	231
二、利用转轴的扭转变形来测量扭矩 .....	232
<b>第十一章 声测量.....</b>	<b>234</b>
第一节 测量常用仪器.....	234
一、传声器 .....	234
二、声级计 .....	236

三、声测量系统的标定 .....	238
第二节 噪声测量中的若干问题.....	240
一、一般现场测量 .....	240
二、声功率测量 .....	241
习题.....	242
<b>第十二章 温度的测量.....</b>	<b>243</b>
第一节 温度测量方法.....	243
第二节 常用测温仪器.....	244
一、热膨胀式温度计 .....	244
二、电阻温度计 .....	245
三、热电偶温度计 .....	247
四、测温方法的应用 .....	249
<b>第十三章 流体参数的测量.....</b>	<b>251</b>
第一节 压力的测量.....	251
一、弹性式压力敏感元件 .....	251
二、常用压力传感器 .....	253
三、压力变送器 .....	256
四、压力测量系统的动态特性 .....	257
五、压力测量装置的标定 .....	259
第二节 流量的测量.....	262
一、常用的流量计 .....	262
二、流量计的标定 .....	266
<b>参考文献.....</b>	<b>268</b>

# 第0章 绪言

## 一、测试技术的重要性

测试是具有试验性质的测量，是测量与试验的综合。测试的基本任务是获取有用的信息，即检测出被测对象的有用信息，并加以处理，然后将其结果提供给观察者或其他信息处理装置、控制系统。因此，测试技术属于科学范畴，是信息技术三大支柱(测试控制技术、计算技术和通信技术)之一。

测试是人类认识客观世界的手段，是科学研究的基本方法。科学的基本目的在于客观地描述自然界，科学定律是定量的定律。科学探索需要测试技术，用准确而简明的定量关系和数学语言表述科学规律和理论也需要测试技术，检验科学理论和规律的正确性同样需要测试技术。因此，精确的测试是科学的根基。

在工程技术领域中，工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能实验等，都离不开测试技术。特别是在近代工程技术中广泛应用的自动控制技术已经越来越多地运用测试技术，测试装置已成为控制系统的重要组成部分。甚至在日常生活用具，如汽车、家用电器等方面也离不开测试技术。可见，人类在从事社会生产、经济、交往和科学研究活动中，与测试技术息息相关。

测试技术已被广泛地应用于工农业生产、科学研究、国内外贸易、国防建设、交通运输、医疗卫生和人民生活的各个方面，发挥着越来越重要的作用，已经成为国民经济发展和社会进步中一项必不可少的重要基础技术。因此，使用先进的测试技术已成为经济高度发展和科技现代化的重要标志之一。

机械工业担负着装备国民经济各个部门的任务，是国家工业的根基。产品的更新、生产技术的革新、经营管理的改善、产品质量的提高、经济效益的提高、产品竞争能力的提高，都离不开测试技术。所以，测试技术是推动机械工业发展和进步的重要保证。

## 二、测试过程和测试系统的组成

信息总是蕴涵在某些物理量之中，并依靠它们来传递的。这些物理量就是信号。就具体物理性质而言，信号有电信号、光信号和力信号等。其中，电信号在变换、处理、传输和运用等方面具有明显的优点，因而成为目前使用最广泛的信号。各种非电信号(如各种被测的机械量)也往往被转换成电信号，以便于传输、处理和运用。

在测试工作的许多场合中，并不考虑信号的物理性质，而是将其抽象为变量之间的函数关系，特别是时间函数或空间函数，从数学上加以分析研究，从中得出一些具有普遍意义的理论。这些理论极大地发展了测试技术，并成为测试技术的重要组成部分。这些理论就是信号的分析 and 处理技术。

测试工作一般是由具有一个或多个不同功能的环节的测试系统来完成的。这些环节保

证从获取信号到提供观测的最必要的信号流程功能. 图 0-1 给出的是一个测试系统最基本的组成框图.

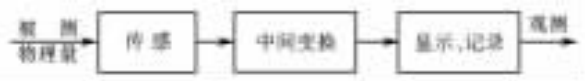


图 0-1 测试系统组成原理

传感部分(传感器)是测试系统的信号获取部分, 它将被测物理量转换成以电量为主要形式的信号. 例如将机械位移量转换为电阻、电感或电容参数的变化; 又如, 把一振动或声音转换成电压或电流的变化信号.

中间变换部分是对传感部分输出的信号进行加工. 例如, 将电阻抗变为电压或电流; 又如, 把信号放大、调制与解调、阻抗变换、线性化, 以及转换成数字编码信号等. 经过这样的加工使之变为一些合乎需要、便于输送、显示或记录, 以及可作进一步后续处理的信号. 从广义上看, 这也是传感部分与信号处理之间的一种“接口”.

显示、记录与储存部分是将所测信号变为一种能被人们感觉所理解的形式, 以供人们观测和分析.

上述所列测试系统的组成部分都是“功能块”意义上的, 在实际工作中, 这些功能块所表述的具体装置或仪器的伸缩性很大. 例如, 中间变换部分可以是由很多仪器组成的一个完成特定功能的复杂系统, 也可能简单到仅有一个变换电路, 甚至可能仅是一根导线.

由于信号分析和处理理论、信号处理技术的迅速发展, 特别是计算机技术在信号处理中的广泛应用, 近年来已将信号的后续处理部分引入到测试系统中, 成为测试系统的有机组成部分, 形成如图 0-2 所示的较为复杂的测试系统. 对这些信号处理部分无论是运用模拟信号处理, 或是基于数字计算机技术的数字信号处理技术, 都是将所测信号作进一步变换、运算等, 从原始的测试信号中提取表征被测对象某一方面本质信息的特征量, 以利于人们对客观事物动态过程的更深入的认识.



图 0-2 包含信号处理功能的测试系统

测试系统是要测出被测对象中人们需要的某些特征性参数信号, 不管中间经过多少环节的变换, 在这些过程中必须忠实地从信号源点把所需的信息通过其载体信号传输到输出端. 整个过程要求既不失真, 又不受干扰. 这就要求系统本身既有不失真传输信号的能力, 还要有在外界各种干扰情况下能够提取和辨识信号中所包含的有用信息的能力.

测试系统在一定程度上是人类感官的某种延伸, 但与人的感官相比, 它能获得更客观、更准确的量值以及更为宽广的量限, 作出更为迅速的反应. 不仅如此, 测试系统经过

对所测结果的处理和分析，把最能反映研究对象运动本质的特征量提取出来，并加以诊断，这就不仅是单纯的感官延伸了，而是具有了选择、加工、处理以及判断的能力，也可以认为是一种智能的复制和延伸。

### 三、课程的研究对象和性质

作为一门技术基础课，本课程研究机械工程领域中常用物理量、几何量的测量方法及其性能、品质的试验理论，属于非电量电测技术。书中系统地阐述了测试技术的基本理论、测试原理及机械工程中常见物理量的测试方法，以及后续信号处理和分析的基本理论和手段。

学习本门课程，应掌握基本传感技术、信号变换及显示、记录装置的工作原理和性能，并能正确地选用和组合这些环节；要学会测试系统静态特性和动态特性的分析与评价方法；掌握对信号和测试系统的时域、频域的描述方法，建立频谱分析和相关分析的基本理论和概念，并能掌握对所测信号的基本处理、基本分析的理论和方法；注意掌握测试技术的基本理论、基本知识、基本能力和技能。

本课程具有很强的理论性和实践性，需要努力做到理论与实际的结合。需要重视它与生产实际的联系以及实验研究工作。

测试技术是一门新兴的边缘学科，是随着各种科学技术、各学科的进步而发展的。由于它涉及的学科范围较广，所以应注意其与相关学科的联系。

测试技术发展极为迅速。新型的传感技术，功能更为完善的信号变换电路、新型显示、记录仪器，以及新的测试方法、测试手段和技术，新的信号处理和分析理论、分析方法不断出现。本书叙及此学科中主要的、有代表性的方面，形成了系统的内容，目的在于为学生学习更广泛和更新的内容培养一种开拓能力。

# 第一篇 测试系统的组成、原理与设计

## 第一章 传感部分

传感器是直接作用于被测量,按照一定的规律将被测量转换成同种或别种量值输出的器件。受被测量直接作用的传感器的敏感部分,称为敏感元件。

传感器可看作人类感官的延伸,借助传感器可以探测那些人们无法用感官直接识别的事物。因此,可以说传感器是人们认识自然界事物的有力工具。

传感器是测量仪器与被测量之间的接口,处于测量装置的输入端,其性能直接影响整个测量系统,对测量精确度起着决定性的作用。

自20世纪70年代以来,随着测量、控制与信息技术的发展,传感器作为这些领域里的一个要素,被视为当今科学技术发展的关键性因素之一,而受到了普遍重视。深入研究传感器类型、原理和应用,研制开发新型传感器,对于科学技术和生产工程中的自动控制和智能化发展,以及人类观测、研究自然界事物的深度和广度都有重要的实际意义。

工程中常用传感器的种类繁多,一种物理量往往可用多种类型的传感器测量,而同一种传感器也可用于测量多种物理量。

表1-1为机械工程中常用传感器的基本类型及其名称、被测量和性能指标等。

表 1-1 机械工程中常用传感器

类型	名称	变换量	被测量	应用举例	性能指标(一般参考)
机械式	测力环	力-位移	力	三等标准测力仪	测量范围 10N 至数万 N 示值误差 $\pm(0.3\sim 0.5)\%$
	弹簧	力-位移	力	弹簧秤	
	波纹管	压力-位移	压力	压力表	测量范围 500Pa~0.5MPa
	波登管	压力-位移	压力	压力表	测量范围 0.5Pa~300MPa
	波纹膜片	压力-位移	压力	压力表	测量范围 <500Pa
	双金属片	温度-位移	温度	温度计	测量范围 0~300℃
电磁及光电子式	微型开关	力-位移	物体尺寸、位置、有无		位置精密度可达数微米
	电位计	位移-电阻	位移	直线电位计	分辨力 0.025~0.05mm 直线性 0.05%~0.1%
	电阻丝应变片	形变-电阻	力、位移、应变	应变仪	最小应变 1~2 $\mu\epsilon$
	半导体应变片	形变-电阻	加速度		最小测力 0.1~1N
	电容	位移-电容	位移、力、声	电容测微仪	分辨力 0.025 $\mu\text{m}$
	电涡流	位移-自感	位移、测厚	涡流式测振仪	测量范围 0~15mm 分辨力 1 $\mu\text{m}$
	磁电	速度-电势	速度	磁电式速度计	频率 2~500Hz 振幅 $\pm 1\text{mm}$
	电感	位移-自感	位移、力	电感测微仪	分辨力 0.5 $\mu\text{m}$

续表 1-1

类型	名称	变换量	被测量	应用举例	性能指标(一般参考)
电磁及光电子式	差动变压器	位移-互感	位移、力	电感比较仪	分辨力 0.5 $\mu$ m
	压电元件	力-电荷	力、加速度	测力仪	分辨力 0.01N
	压电元件	力-电荷	力、加速度	加速度计	频率 0.1~20kHz 测量范围 10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>5</sup> m·s <sup>-2</sup>
	压磁元件	力-磁导率	力、扭矩	测力计	
	热电偶	温度-电势	温度	热电温度计 (铂铑-铂)	测量范围 0~1 600℃
	霍耳元件	位移-电势	位移、探伤	位移传感器	测量范围 0~2mm 直线性 1%
	热敏电阻	温度-电阻	温度	半导体温度计	测量范围 -10~300℃
	气敏电阻	气体-温度	可燃气体	气敏检测仪	
	光敏电阻	光-电阻	开量、关量		
	光电池	光-电压		硒光电池	灵敏度 500 $\mu$ A/lm
	光敏晶体管	光-电流	转速、位移	光电转速仪	最大截止频率 50kHz
	光纤	声-光相位调制	声压	水听器	检测最小声压 1 $\mu$ Pa
	光纤	传光型	温度	光纤辐射温度计	测量范围 700~1 100℃ 测量误差 <5℃
	光学	光电、数显	长度	光学测长仪	测量范围 0~500mm 最小划分值 0.1 $\mu$ m
光栅	光-电	长度	长光栅	测程 3m 分辨力 0.05 $\mu$ m	
			圆光栅	分辨力 0.1"	
		角度			
不 辐 射 线	红外线	热-电	温度、物体有无	红外测温仪	测量范围 -10~1 300℃ 分辨力 0.1℃
	X射线	散射、干涉	测厚、探伤、应力	X射线应力仪	
	$\gamma$ 射线	对物质穿透	测厚、探伤	$\gamma$ 射线测厚仪	
激光	光波干涉	长度、位移转角	激光测长仪	测距 2m 分辨力 0.2 $\mu$ m	
辐 射 线	激光	光波干涉	加速度	激光干涉测振仪	振幅 ( $\pm 5 \sim \pm 3$ ) $\times 10^{-4}$ mm 频率 3~5kHz
	超声	超声波反射、穿透	厚度、探伤	超声波测厚仪	测量范围 4~40mm 测量精密密度 $\pm 0.25$ mm
	$\beta$ 射线	穿透作用	厚度、成分分析		
流 体 式	气动	尺寸-压力	尺寸、物体大小	气动量仪	可测最小直径 0.05~0.076mm
	气动	间隙-压力	距离	气动量仪	测量间隙 6mm 分辨力 0.025mm
	气动	压力-尺寸	尺寸、间隙	浮标式气动量仪	放大倍率 1 000~10 000 测量间隙 0.05~0.2mm
	液体	压力平衡	压力	活塞压力计	测量精密密度 0.02%~0.2%
	液体	液体静压变化	流量	节流式流量计	
	液体	流体阻力变化	流量	转子式流量计	

## 第一节 参量型传感器

### 一、电阻式传感器

电阻式传感器是一种把被测量转换为电阻变化的传感器。按其工作原理可分为变阻器式和电阻应变式两类。

#### (一) 变阻器式传感器

变阻器式传感器也称为电位差计式传感器，它通过改变电位器触头位置，把位移转换为电阻的变化。根据

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (1-1)$$

式中  $R$ ——电阻值,  $\Omega$ ;

$\rho$ ——电阻率;

$l$ ——电阻丝长度;

$A$ ——电阻丝截面积。

如果电阻丝直径和材质一定，则电阻值随导线长度而变化。

常用变阻器式传感器有直线位移型、角位移型和非线性型等，如图 1-1 所示。

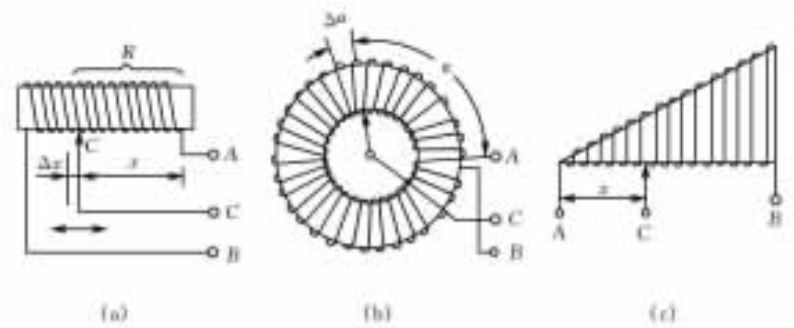


图 1-1 变阻器式传感器

(a) 直线位移型; (b) 角位移型; (c) 非线性型

图 1-1(a)为直线位移型。当被测位移变动时，触点  $C$  沿变阻器移动。若移动  $x$ ，则  $C$  点与  $A$  点之间的电阻值为

$$R = k_1 x.$$

传感器灵敏度为

$$S = \frac{dR}{dx} = k_1, \quad (1-2)$$

式中  $k_1$ ——单位长度内的电阻值。

当导线分布均匀时， $k_1$  为一常数。这时传感器的输出(电阻)与输入(位移)呈线性关系。

图 1-1(b)为角位移型，其电阻值随转角而变化。其灵敏度为

$$S = \frac{dR}{d\alpha} = k_a,$$

式中  $\alpha$ ——转角, rad;

$k_a$ ——单位弧度对应的电阻值.

图 1-1(c) 为非线性型, 其骨架形状需根据所要求的输出  $f(x)$  确定. 例如, 输出为  $f(x) = kx^2$ , 其中  $x$  为输入位移, 为使输出电阻值  $R(x)$  与  $f(x)$  呈线性关系, 变阻器骨架应做成直角三角形; 如果输出为  $f(x) = kx^3$ , 则应采用抛物线形骨架.

变阻器式传感器的后接电路, 一般采用电阻分压电路, 如图 1-2 所示. 在直流激励电压  $u_0$  作用下, 这种传感器将位移变成输出电压的变化. 当电刷移动距离  $x$  后, 传感器的输出电压为

$$u_y = \frac{u_0}{\frac{x_p}{x} + \left(\frac{R_p}{R_L}\right)\left(1 - \frac{x}{x_p}\right)}, \quad (1-3)$$

式中  $R_p$ ——变阻器的总电阻;

$x_p$ ——变阻器的总长度;

$R_L$ ——后接电路的输入电阻.

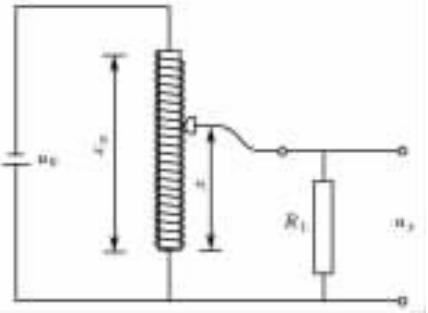


图 1-2 电阻分压电路

式(1-3) 表明, 为减小后接电路的影响, 应使  $R_L \gg R_p$ .

变阻器式传感器的优点是结构简单, 性能稳定, 使用方便. 缺点是因为受到电阻丝直径的限制, 分辨力不高. 提高分辨力需使用更细的电阻丝, 其绕制较困难, 所以变阻器式传感器的分辨力很难优于  $20\mu\text{m}$ .

由于结构上的特点, 这种传感器还有较大的噪声. 电刷和电阻元件之间接触面的变动和磨损、尘埃附着等, 都会使电刷在滑动中的接触电阻发生不规则的变化, 从而产生噪声.

变阻器式传感器被用于线位移、角位移测量, 在测量仪器中用于伺服记录仪器或电子电位差计等.

## (二) 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器可以用于测量应变、力、位移、加速度和扭矩等参数. 具有体积小、动态响应快、测量精确度高、使用简便等优点, 在航空、船舶、机械和建筑等行业中得到广泛应用.

电阻应变式传感器可分为金属电阻应变片式与半导体应变片式两类.

### 1. 金属电阻应变片

常用的金属电阻应变片有丝式和箔式两种. 其工作原理都是基于应变片发生机械变形时, 电阻值发生变化.

金属丝电阻应变片(又称电阻丝应变片)出现得较早, 现仍在广泛采用. 其典型结构如图 1-3 所示. 把一根具有高电阻率的金属丝(康铜或镍铬合金等, 直径为  $0.025\text{mm}$  左右)绕成栅形, 粘贴在绝缘的基片和覆盖层之间, 由引出导线接于电路

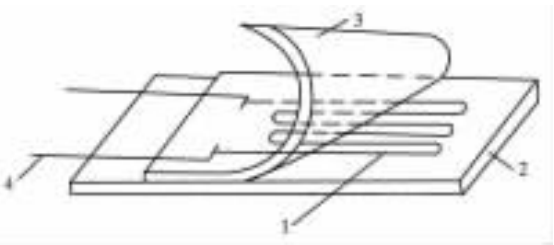


图 1-3 电阻丝应变片

1—电阻丝; 2—基片; 3—覆盖层; 4—引出线