

测试技术

陈光军 主编



免费获取习题答案
及PPT课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

测试技术

主 编 陈光军

副主编 薛 迪 李 明 张连军 周大帅

参 编 李西兵 葛宜元 初旭宏 王玉烁

主 审 龙泽明



机械工业出版社

本书系统地阐述了测试技术的基本理论、信号分析和处理基础知识和测试技术应用方法。

全书共分九章,内容包括绪论,传感器原理与测量电路,信号及其描述,测试系统的特性,信号调理、处理和记录,信号处理初步,计算机辅助测试系统,测试系统及其工程应用,信号分析与处理编程实验。本书理论阐述深入浅出,精选出来的测试技术应用实例典型详实、富有教益。同时配合章节内容,提供了信号处理 Matlab 编程实验、典型例题和习题,并配有详细的习题答案解析,以加深读者对知识的理解,锻炼学生动手解决问题的能力。授课老师可通过联系 296447532@qq.com 获取习题答案及 PPT 课件。

本书可作为高等学校本科机械类各专业的教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

测试技术/陈光军主编. —北京:机械工业出版社,2014.10
ISBN 978-7-111-47955-0

I. ①测… II. ①陈… III. ①测试技术 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 210678 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:周国萍 责任编辑:周国萍

版式设计:霍永明 责任校对:肖琳

封面设计:路恩中 责任印制:李洋

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18.5 印张·446 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-47955-0

定价:49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

策划编辑电话:(010)88379733

封面防伪标均为盗版

前 言

测试技术已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、环境保护和人民生活的各个方面，起着越来越重要的作用，成为国民经济发展和社会进步的一项必不可少的重要基础技术。因而，使用先进的测试技术也就成为经济高度发展和科技现代化的重要标志之一。

测试技术是一门综合性技术，涉及传感、微电子、控制、计算机、数理统计、精密机械等多个学科，要求测试工作者具有深厚的多学科知识。本书以培养学生从事实际测试工作的基本能力和基本技能为目的，将理论知识的讲解与实际应用相结合。在编写过程中既注意到知识的完整性与系统性，并将新理论、新方法、新手段融入本教材中，又尽量做到深入浅出，通俗易懂。精选出来的测试技术应用实例典型详实、富有教益。同时配合章节内容，提供了信号处理 **Matlab** 编程实验、典型例题和习题，以加深学生对知识的理解，锻炼学生动手解决问题的能力。通过本书的学习，学生能正确地选用测试装置并初步掌握进行测试所需要的基本知识和技能，为学生进一步学习、研究和处理工程问题打下基础。

本书系统地阐述了测试技术的基本理论、信号分析和处理基础知识和测试技术应用方法。全书共九章：第一章绪论，第二章传感器原理与测量电路，第三章信号及其描述，第四章测试系统的特性，第五章信号调理、处理和记录，第六章信号处理初步，第七章计算机辅助测试系统，第八章测试系统及其工程应用，第九章信号分析与处理编程实验。

本书的第一、六章由薛迪编写，第二、八章由陈光军编写，第三章由张连军编写，第四章由葛宜元编写，第五章的第一节、第四节、本章典型例题评解、习题部分由初旭宏编写第五章的第二节、第三节由周大帅、李西兵、王玉烁编写，第七、九章由李明编写。部分文字录入和校对工作由孔令国、王亮完成。全书由陈光军统稿，由龙泽明教授主审，龙泽明教授对此书的编写提出了许多宝贵建议，在此向他表示深切谢意。

本书在编写过程中参考了国内外相关领域专家、学者的论著，在此表示感谢。由于编者水平有限，书中错误与不妥之处，恳请各位专家、读者批评指正。

编 者

2014 年 8 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 测试技术的重要性	1
第二节 测试过程和测试系统的一般组成	1
第三节 测试技术的发展	2
第四节 本课程的学习要求	4
第二章 传感器原理与测量电路	5
第一节 传感器概述	5
一、传感器的分类	5
二、传感器的性能要求	7
三、传感器的选用原则	7
四、传感器的发展趋势	9
第二节 机械式传感器	9
第三节 电阻式传感器	10
一、变阻器式传感器	10
二、电阻应变式传感器	11
第四节 电感式传感器	15
一、自感型传感器	15
二、互感型（差动变压器式）传感器	17
三、压磁式传感器	19
第五节 电容式传感器	20
一、变换原理及类型	20
二、特点与应用	22
第六节 压电式传感器	24
一、压电效应	24
二、压电材料	25
三、压电式传感器及其等效电路	26
四、测量电路	27
第七节 磁电式传感器	28
一、动圈式	28
二、磁阻式	28
三、霍尔式传感器	29
第八节 光电式传感器	30
一、光电效应及光电器件	30
二、光电式传感器的形式	32
第九节 新型传感器	33
一、热敏电阻	33

二、气敏传感器	34
三、湿敏传感器	34
四、水分传感器	35
五、集成传感器	35
六、光纤传感器	36
本章典型例题详解	36
习题	40
第三章 信号及其描述	46
第一节 概述	46
一、信号的分类	46
二、信号的描述	47
第二节 周期信号	48
一、周期信号的时域描述和频域描述	48
二、周期信号的强度表述	52
第三节 非周期信号	53
一、非周期信号的特征	53
二、非周期信号的描述——傅里叶积分	54
三、傅里叶变换的主要性质	56
四、几种典型信号的频谱	57
第四节 随机信号	61
一、随机过程的一般关系	61
二、随机信号的分类	62
三、随机过程的主要统计参数	62
本章典型例题详解	66
习题	73
第四章 测试系统的特性	80
第一节 测试系统及其主要性质	80
一、线性系统	80
二、线性系统的性质	80
三、测试装置的特性	81
第二节 测试系统的静态特性	82
一、非线性度	82
二、灵敏度	83
三、分辨力	83
四、回程误差	83
五、漂移	83
六、信噪比	83
第三节 测试系统的动态特性	84
一、拉普拉斯变换（拉氏变换）	84
二、传递函数	84
三、频率响应函数	85
四、脉冲响应函数	86
五、环节的串联和并联	87

第四节 常见测试系统的动态特性	88
一、一阶系统	88
二、二阶系统	90
第五节 测试系统静态特性和动态特性的测定	93
一、测试系统静态特性的测定	94
二、测试系统动态特性的测定	95
第六节 实现不失真测试的条件	96
第七节 测量误差的基本概念	98
一、真值	98
二、误差	99
三、误差的分类	99
四、测量不确定度	100
本章典型例题详解	101
习题	106
第五章 信号调理、处理和记录	113
第一节 电桥	113
一、直流电桥	113
二、交流电桥	115
三、带感应耦合臂的电桥	117
第二节 调制与解调	117
一、调幅及其解调	118
二、调频及其解调	121
第三节 滤波器	123
一、滤波器的分类	124
二、理想滤波器	124
三、实际 RC 调谐式滤波器	127
四、恒带宽比滤波器和恒带宽滤波器	130
五、开关电容滤波器	133
第四节 信号的指示和记录装置	135
一、动圈式电磁指示机构	135
二、光线示波器	136
三、伺服式记录仪	136
四、采用阴极射线管的信号显示和记录装置	137
五、数字式波形存储记录仪	137
六、磁记录器	138
本章典型例题详解	143
习题	150
第六章 信号处理初步	161
第一节 数字信号处理的基本步骤	161
第二节 信号数字化出现的问题	162
一、概述	162
二、时域采样、混叠和采样定理	164
三、量化和量化误差	166

四、截断、泄漏和窗函数	167
五、频域采样、时域周期延拓和栅栏效应	167
六、频率分辨率、整周期截断	167
七、常用的窗函数	168
第三节 相关分析及其应用	170
一、两随机变量的相关系数	170
二、信号的自相关函数	171
三、信号的互相关函数	173
四、相关函数估计	176
第四节 功率谱分析及其应用	177
一、自功率谱密度函数	177
二、互谱密度函数	180
本章典型例题详解	183
习题	186
第七章 计算机辅助测试系统	193
第一节 数据采集装置	193
一、基本组成	193
二、多通道数据采集系统	196
第二节 计算机辅助测试技术中的总线	197
一、GPIB (IEEE-488) 总线	197
二、VXI 总线	198
三、PXI 总线	200
第三节 数字信号分析仪	200
一、数字信号分析仪的组成	200
二、数字信号分析的步骤	201
三、数字信号分析仪的类型	202
第四节 虚拟仪器	202
一、虚拟仪器的概念	202
二、VI 的构成	203
三、基于网络的 VI	204
四、VI 的应用与特点	205
五、LabVIEW 简介	206
六、LabVIEW 虚拟测试系统的应用举例	211
本章典型例题详解	213
习题	213
第八章 测试系统及其工程应用	216
第一节 应变、力和转矩的测量	216
一、应变、应力的测量	216
二、切削力的测量	218
三、转矩的测量	220
第二节 振动测试	222
一、振动基本知识	222
二、振动的激励	223

三、激振器	224
四、常用测振传感器	225
五、振动的测量	228
六、测振装置的校准	229
第三节 温度的测量	230
一、温度标准与测量方法	230
二、热电偶温度计	231
三、热电阻温度计	235
四、热辐射测温仪	238
第四节 湿度的测量	241
一、湿度	241
二、干湿球湿度计	242
三、电阻式湿度计	243
四、电容式湿度计	243
五、单片智能化湿度/温度传感器	244
第五节 位移的测量	245
一、常用位移传感器	245
二、厚度的测量	245
三、物位的测量	247
第六节 流体参量的测量	251
一、压力的测量	251
二、流量的测量	254
本章典型例题详解	259
习题	264
第九章 信号分析与处理编程实验	270
第一节 Matlab 使用简介	270
一、Matlab 的安装	270
二、Matlab 的基本用法	270
三、Matlab 编程简介	272
第二节 信号分析初步	275
一、信号序列的产生	275
二、序列的运算	276
三、周期信号的叠加与分解	277
第三节 测试系统动态特性仿真	278
第四节 信号时域分析	280
一、时域统计指标分析	280
二、相关函数及应用	281
第五节 信号的频谱分析	282
第六节 信号的调理	284
一、信号的提取	284
二、滤波器设计	284
参考文献	286

第一章 绪 论

第一节 测试技术的重要性

测试的基本任务是获取有用的信息。首先是检测出被测对象的有关信息，然后加以处理，最后将其结果提供给观察者或输入其他信息处理装置、控制系统。因此，测试技术属于信息科学范畴，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。

测量是以确定被测对象属性量值为目的的全部操作。测试是具有试验性质的测量，或者可理解为测量和试验的综合。人类在从事社会生产、经济交往和科学研究活动中都与测试技术息息相关。

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来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。可以认为精确的测试是科学的根基。

在工程技术领域，工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能试验等，都离不开测试技术。特别是近代工程技术广泛应用的自动控制技术已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。

总之，测试技术已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、环境保护和人民生活的各个方面，起着越来越重要的作用，成为国民经济发展和社会进步的一项必不可少的重要基础技术。因而，使用先进的测试技术成为经济高度发展和科技现代化的重要标志之一。

第二节 测试过程和测试系统的一般组成

信息总是蕴涵在某些物理量之中，并依靠它们传输，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、力信号等。其中，电信号在变换、处理、传输和运用等方面都有明显的优点，因而成为目前应用最广泛的信号。各种非电信号也往往被转换成电信号，而后传输、处理和运用，如图 1-1 所示。

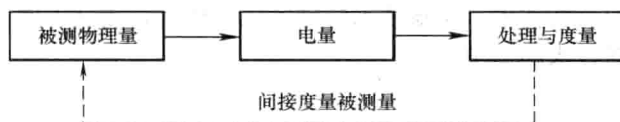


图 1-1 非电量测量

在测试工作的许多场合中，并不考虑信号的具体物理性质，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，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和处理技术。

一般说来，测试工作的全过程包含着许多环节：以适当的方式激励被测对象、信号的检测和转换，信号的调理、分析与处理、显示与记录，以及必要时以电量形式输出测量结果。因此，测试系统的大致框图可用图 1-2 表示。

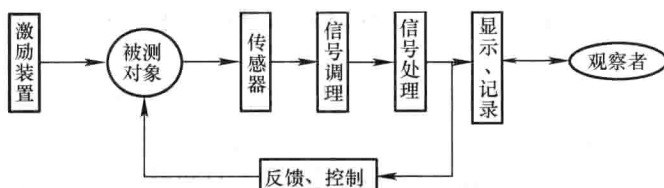


图 1-2 测试系统的组成

客观事物是多样的。测试工作所希望获取的信息，有可能已载于某种可检测的信号中，也有可能尚未载于可检测的信号中。对于后者，测试工作就包含着选用合适的方式激励被测对象，使其产生既能充分表征其有关信息又便于检测的信号。事实上，许多系统的特性参量在系统的某些状态下，可能充分地显示出来；而在另外一些状态下却可能没有显示出来，或者显示得很不明显，以致难以检测出来。因此，在后一种情况下，要测量这些特性参量时，就需要激励该系统，使其处于能够充分显示这些参量特性的状态中，以便有效地检测到载有这些信息的信号。

传感器直接作用于被测量，并能按一定规律将被测量转换成同种或别种量值输出。这种输出通常是电信号。

信号调理环节把来自传感器的信号转换成更适合于进一步传输和处理的形式。这时的信号转换，在多数情况下是电信号之间的转换。例如，将幅值放大，将阻抗的变化转换成电压的变化，或将阻抗的变化转换成频率的变化等。

信号处理环节接受来自调理环节的信号，并进行各种运算、滤波、分析，将结果输至显示、记录或控制系统。

信号显示、记录环节以观察者易于认识的形式来显示测量的结果，或者将测量结果存储，供必要时使用。

在所有这些环节中，必须遵循的基本原则是各环节的输出量与输入量之间应保持一一对应和尽量不失真的关系，并尽可能地减小或消除各种干扰。

应当指出，并非所有的测试系统都具备图 1-2 中的所有环节，尤其是反馈的环节和传输环节。实际上，环节与环节之间都存在着传输。图中的传输环节是专指较远距离的通信传输。

测试技术是一种综合性技术，对新技术特别敏感。要做好测试工作，需要综合运用多种学科的知识，并注意新技术的运用。

第三节 测试技术的发展

现代测试技术，既是促进科技发展的重要技术，又是科学技术发展的结果。现代科技的

发展不断地向测试技术提出新的要求,推动测试技术的发展。与此同时,测试技术迅速吸取和综合各个科技领域(如物理学、化学、生物学、材料科学、微电子学、计算机科学和工艺学等)的新成就,开发出新的方法和装置。

近年来,新技术的兴起促使测试技术蓬勃发展,尤其在以下几个方面最为突出:

1. 电路设计的改进

广泛采用运算放大器和各种集成电路,大大简化了测试系统,提高了系统特性,如有效地减小了负载效应、线性误差等。

2. 新型传感器层出不穷,可测量迅速增多

当今世界已拥有高水平的各种电子设备和信息技术。传感器是信息之源头,只有拥有良好而多样的传感器,才能在非电量的自然界中有效地使用这些设备和技术。有人认为支配了传感器技术,就能把握住新时代。能不能开发出上乘的测试装置,关键也在于传感器的开发和应用。

当今传感器的开发中,以下列三方面的发展最引人注目:

(1) 物性型传感器大量涌现 物性型传感器是依靠敏感材料本身的物性随被测量的变化来实现信号的转换的,因此,这类传感器的开发实质上是新材料的开发。目前发展最迅速的新材料是半导体、陶瓷、光导纤维、磁性材料,以及所谓的“智能材料”(如形状记忆合金、具有自增殖功能的生物体材料等)。这些材料的开发,不仅使可测量大量增多,使力、热、光、磁、湿度、气体、离子等方面的一些参量的测量成为现实,而且使集成化、小型化和高性能传感器的出现成为可能。此外,当前控制材料性能的技术已取得长足的进步,这种技术一旦实现,将会完全改变原有敏感元件设计的概念:从根据材料特性来设计敏感元件,转变成按照传感要求来合成所需的材料。

总之,传感器正经历着从以结构型为主转向以物性型为主的过程。

(2) 集成、智能化传感器的开发 微电子学、微细加工技术和集成化工艺等方面的进展,出现了多种集成化传感器。这类传感器,或是同一功能的多个敏感元件排列成线型、面型的传感器;或是多种不同功能的敏感元件集成一体,成为可同时进行多种参量测量的传感器;或是传感器与放大、运算、温度补偿等电路集成一体的器件。近年来,更有把部分信号处理电路和传感器集成一体,使传感器具有部分智能,成为智能化传感器。

(3) 化学传感器的开发 近20年来,工农业生产、环境监测、医疗卫生和日常生活等领域,广泛应用化学传感器。化学传感器把化学量转换成电量。大部分化学传感器是在被测气体或溶液分子与敏感元件接触或被其吸附之后才开始感知的,而后产生相应的电流和电位。目前市场上供应的化学传感器以气体传感器、湿度传感器、离子传感器和生物化学传感器为主。预计在未来一段时间内,化学传感器将会蓬勃发展,并将出现一些智能化学传感器。

3. 广泛应用信息技术

信息技术,特别是计算机技术和信息处理技术,使测试技术产生了巨大变化,大幅度地提高测试系统的精确度、测量能力和工作效率。引进许多新的分析手段和方法,使测试系统具有实时分析、记忆、逻辑决断、自校、自适应控制和某些补偿能力,向着智能化方向发展。

4. 多参量测量系统的开发

由于出现各种廉价传感器和实时处理装置,为开发多传感器和多种参量测试系统提供了

可能性。这种测量系统可实现多自变量函数的测量,是自动控制系统必不可少的装置,广泛应用于设备的监测和组成线型或面型传感器阵列进行图像或场量的测试。

第四节 本课程的学习要求

对高等学校机械类的各有关专业而言,测试技术是一门技术基础课。本课程所研究的对象是机械工程动态测试中常用的传感器、信号调理电路及记录仪器的工作原理、测量装置基本特性的评价方法、测试信号的分析 and 处理,以及常见物理量的测量方法。

通过本课程的学习,使学生能正确地选用测试装置并初步掌握进行测试所需要的基本知识和技能,为学生进一步学习、研究和处理工程问题打下基础。

从进行动态测试工作所必备的基本条件出发,学生在学完本课程后应具有下列几方面的知识:

- 1) 掌握信号的时域和频域的描述方法,建立明确的信号的频谱结构概念;掌握频谱分析和相关分析的基本原理和方法,掌握数字信号分析中的一些基本概念。
- 2) 掌握测试装置基本特性的评价方法和不失真测试条件,并能正确地运用于测试装置的分析 and 选择。掌握一阶、二阶线性系统动态特性及其测定方法。
- 3) 掌握常用传感器、常用信号调理电路和记录仪器的工作原理 and 性能,并能较合理地选用。
- 4) 对动态测试工作的基本问题有一个比较完整的概念,并能初步运用于工程中某些参数的测试。

本课程涉及的知识范围较广,需要高等数学、控制工程、电工、计算机以及机械工程专业的基本知识。

本课程具有很强的实践性。只有在学习中密切联系实际,加强实验,注意物理概念,才能真正掌握有关理论。学生只有通过足够和必要的实验才能受到应有的实验能力的训练,才能获得有关动态测试工作的比较完整的概念,也只有这样,才能初步具有处理实际测试工作的能力。

第二章 传感器原理与测量电路

工程上通常把直接作用于被测量，能按一定规律将其转换成同种或其他种量值输出的器件，称为传感器。

传感器的作用类似于人的感觉器官。它把被测量，如力、位移、温度等，转换为易测信号，传送给测量系统的信号调理环节。

也可以认为传感器是人类感官的延伸，借助传感器可以去探索那些人们无法用感官直接测量的事物。例如，用热电偶可以测量炽热物体的温度，用超声波探测器可以测量海水的深度，用红外遥感器可从高空探测地面上的植被和污染情况等。因此，可以说传感器是人们认识自然界的有力工具，是测量仪器与被测事物之间的接口。

在工程上也把能提供与输入量有给定关系的输出量的器件称为测量变换器。传感器就是输入量为被测量的测量变换器。

传感器处于测试装置的输入端，其性能将直接影响整个测试系统的工作质量。

近年来，随着测量、控制及信息技术的发展，传感器作为这些领域里的一个重要构成因素，被视为 20 世纪末的关键技术之一而受到了普遍重视。深入研究传感器的原理和应用，研制新型传感器，对于社会生产、经济贸易、科学技术和日常生活中自动测量和自动控制的发展，以及人类观测研究自然界的深度和广度都具有重要的实际意义。

第一节 传感器概述

一、传感器的分类

工程中应用的传感器种类繁多，往往一种被测量可应用多种类型的传感器来检测。

传感器的分类方法很多。按被测量的种类分类，可分为位移传感器、力传感器、温度传感器等；按传感器的工作原理分类，可分为机械式、电气式、光学式、流体式等；按信号变换特征可分为物性型和结构型；根据敏感元件与被测对象之间的能量关系分类，可分为能量转换型与能量控制型；按输出信号分类，可分为模拟式和数字式等。其中，物性型传感器是依靠敏感元件材料本身物理化学性质的变化来实现信号的变换的，如用水银温度计测量是利用水银的热胀冷缩现象，用压电测力计测量是利用石英晶体的压电效应等；结构型传感器则是依靠传感器结构参量的变化而实现信号转换的，如电容式传感器依靠极板间距离变化引起电容量的变化，电感式传感器依靠衔铁位移引起自感或互感的变化等。

能量转换型传感器也称无源传感器，是直接由被测对象输入能量使其工作的，如热电偶温度计、弹性压力计等。在这种情况下，传感器由被测对象吸取能量，产生负载效应，导致被测对象状态的变化和测量误差。

能量控制型传感器也称有源传感器，是从外部供给辅助能量使传感器工作的（图 2-1），并且由被

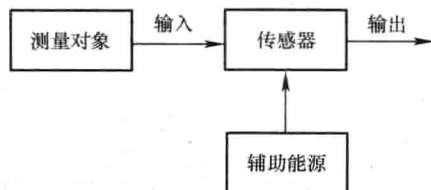


图 2-1 能量控制型传感器工作方式

测量来控制外部供给能量的变化。例如，电阻应变计中电阻接于电桥上，电桥工作能源由外部供给，而由被测量变化所引起的电阻变化去控制电桥输出。

表 2-1 汇总了常用传感器的基本类型。

表 2-1 常用传感器的基本类型

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 10 ~ 10 ⁵ N 示值误差 ± (0.3 ~ 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 ~ 1000MPa
	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℃
	微型开关	力-位移	物体尺寸、位置		位置精密度可达数微米
电磁及光电子式	电位计	位移-电阻	位移	直线电位计	分辨力 0.025 ~ 0.05mm 线形误差 0.05% ~ 0.1%
	电阻应变片	形变-电阻	力、应变	应变仪	最小应变 1 ~ 2μ ϵ 最小测力 0.1 ~ 1N
	半导体应变片	形变-电阻	力、加速度	应变仪	
	电容	位移-电容	位移、力、声	电容测微仪	分辨力 0.025μm
	电涡流	位移-电感	位移、测厚	涡流式测微仪	测量范围 0 ~ 15mm 分辨力 1μm
	电感	位移-自感	位移、力	电感测微仪	分辨力 0.5μm
	差动变压器	位移-互感	位移、力	电感比较仪	分辨力 0.5μm
	压电元件	力-电荷	力 加速度	测力计 加速度计	分辨力 0.01N 频率 0.1 ~ 20kHz
	压磁元件	力-磁导率	力、扭矩	测力计	测量范围 10 ⁻² ~ 10 ⁻⁵ m/s ²
	热电偶	温度-电势	温度	热电温度计	测量范围 0 ~ 1600℃
	霍尔元件	位移-电势	位移	位移传感器	线形误差 1% 测量范围 0 ~ 2mm
	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	气体浓度、温度	可燃气体	气敏检测仪	
	光敏电阻	光-电阻	开、关量		
	光电池	光-电压		硒光电池	灵敏度 500μA/1m
	光敏晶体管	光-电流	转速、位移	光电转速仪	最大截止频率 50kHz
辐射式	红外	热-电	温度、物体有无	红外测温仪	测量范围 -10 ~ 1300℃ 分辨力 0.1℃
	X 射线	散射、干涉	测厚、探伤、应力	X 射线应力仪	
	γ 射线	对物质穿透	测厚、探伤	γ 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 0.2μm
	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 测量精密度 ± 0.25mm
	β 射线	穿透作用	厚度、成分分析		

(续)

类型	名称	变换量	被测量	应用举例	性能指标 (一般参考)
流体式	气动	尺寸-压力	尺寸、物体大小	气动量仪	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
	液体	流量-压力差	流量	节流式流量计	
	液体	流量-转子平衡位置	流量	转子式流量计	

需要指出的是，在不同的情况下，传感器可能只有一个，也可能有几个换能元件，还可能是一个小型装置。例如，电容式位移传感器是位移→电容变化的能量控制型传感器，可以直接测量位移；而电容式压力传感器，则经过压力→膜片弹性变形（位移）→电容变化的转换过程。此时膜片是一个由机械量→机械量的换能件，由它实现第一次变换；它同时与另一极板构成电容器，用来完成第二次转换。再如电容型伺服式加速度计（也称为力反馈式加速度计），实际上是一个具有闭环回路的小型测量系统，如图 2-2 所示。这种传感器较一般开环式传感器具有更高的精确度和稳定性。

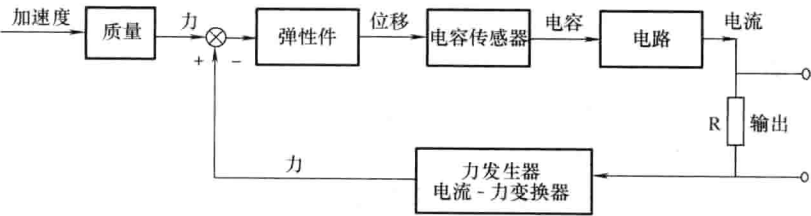


图 2-2 伺服式加速度计框图

二、传感器的性能要求

尽管传感器的原理、结构不同，使用环境、条件、目的不同，其技术指标也不尽相同，但其基本要求却是相同的。这就是：

- 1) 灵敏度高，输入和输出之间应具有较好的线性关系。
- 2) 噪声小，具有抗外部噪声的性能。
- 3) 滞后，漂移误差小。
- 4) 动态特性良好。
- 5) 接入测量系统时对被测量产生影响小。
- 6) 功耗小，复现性好，有互换性。
- 7) 防水及抗腐蚀等性能好，能长期使用。
- 8) 结构简单，容易维修和校正。
- 9) 低成本，通用性强。

三、传感器的选用原则

1. 灵敏度

一般来讲，传感器的灵敏度越高越好。因为灵敏度越高，意味着传感器所能感知的变化量越小，当被测量稍有微小变化时，传感器就有较大的输出。

当然也应考虑到，当灵敏度越高时，与测量信号无关的外界干扰也更容易混入，并被放

大装置放大。这时必须考虑既要检测微小量值，又要干扰小。为此，往往要求信噪比越大越好，即要求传感器本身噪声小，且不易从外界引入干扰。

当被测量是个向量时，要求传感器在该方向灵敏度越高越好，而横向灵敏度越小越好。在测量多维向量时，还应要求传感器的交叉灵敏度越小越好。

此外，和灵敏度紧密相关的是测量范围。除非有专门的非线性校正措施，最大输入量不应使传感器进入非线性区域，更不能进入饱和区域。某些测试工作要在较强的噪声干扰下进行，这时对传感器来讲，其输入量不仅包括被测量，而且包括干扰量，两者之和不能进入非线性区，过高的灵敏度会缩小其适用的测量范围。

2. 响应特性

在所测频率范围内，传感器的响应特性必须满足不失真的测量条件。此外，实际传感器的响应总有一定迟延，但总希望迟延时间越短越好。

一般来讲，利用光电效应、压电效应等物性型传感器，响应较快，工作频率范围宽；而结构型传感器，如电感、电容、磁电式传感器等，往往由于结构中机械系统惯性的限制，其固有频率低，工作频率较低。

在动态测量中，传感器的响应特性对测试结果有直接影响，在选用时，应充分考虑到被测物理量的变化特点，如稳态、瞬变、随机等。

3. 线性范围

任何传感器都有一定的线性范围，在线性范围内输出与输入成比例关系。线性范围越宽，则表明传感器的工作量程越大。

传感器工作在线性区域内，是保证测量精确度的基本条件。例如，机械式传感器中的测力弹性元件，其材料的弹性限是决定测力量程的基本因素。当超过弹性限时，将产生线性误差。

然而任何传感器都不容易保证其绝对线性，在许可限度内，可以在其近似线性区域应用，例如，变间隙型的电容、电感传感器，均采用在初始间隙附近的近似线性区内工作。选用时必须考虑被测物理量的变化范围，令其线性误差在允许范围以内。

4. 可靠性

可靠性是指仪器、装置等产品在规定的条件下，在规定的时间内可完成规定功能的能力。只有产品的性能参数（特别是主要性能参数）均处于规定的误差范围内，方能视为可完成规定的功能。

为了保证传感器应用中具有高的可靠性，事前须选用设计、制造良好，使用条件适宜的传感器；使用过程中，应严格保持规定的使用条件，尽量减轻使用条件的不良影响。

5. 精确度

传感器的精确度表示传感器的输出与被测量真值一致的程度。传感器处于测试系统的输入端，因此传感器能否真实地反映被测量值，对整个测试系统具有直接影响。

然而，也并非传感器的精确度越高越好，因为还要考虑到经济性。传感器精确度越高，价格越昂贵。因此，应从实际出发尤其应从测试目的出发来选择。

6. 工作方式

传感器在实际条件下的工作方式，例如，接触与非接触测量、在线与非在线测量等，也是选用传感器时应考虑的重要因素。工作方式不同，对传感器的要求亦不同。

在线测试是与实际情况更接近一致的测试方式，特别是自动化过程的控制与检测系统，