



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
中等职业学校教学用书(数控技术应用专业)

传感器与 PLC编程技术基础

◎ 蔡 崧 主编

◎ 葛金印 杜德昌 杨培生 主审

0100010101001010010100101001
010100101010101001
01001001010100100101010100101
01010010101001010101
010010010010101001
0100101010010100100100101
010010010010101001
0100100101010010010101
0100100101010010010101
01001001010100100101010101
01001001010100101010100101
010010010101001010101010101
0100100100101010101001

技能型紧缺人才培养



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

教育部职业教育与成人教育司推荐教材
中等职业学校教学用书（数控技术应用专业）

传感器与 PLC 编程技术基础

蔡 崧 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是教育部职业教育与成人教育司推荐教材。本教材针对数控技术应用专业,前三章介绍了常用传感器的基本概念、工作原理及其应用,重点阐述了数控机床中常用的传感器,并结合数控机床给出了两个综合实验。后三章介绍了可编程控制器(PLC)的基本概念、在数控机床中的应用,以及 PLC 基本编程指令、三菱 FXGP/WIN-C 软件的使用、编程方法和应用实例,并结合数控机床给出了四个综合实验。附表提供了传感器和 PLC 的部分参考资料。

本教材既可作为中等职业学校教学用书,也可作为中等工程技术人员学习传感器和 PLC 的参考读物。

本教材还配有电子教学参考资料包(包括电子教案、教学指南及习题答案),详见前言。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与 PLC 编程技术基础 / 蔡崧主编. —北京: 电子工业出版社, 2005.5

教育部职业教育与成人教育司推荐教材. 中等职业学校教学用书. 数控技术应用专业

ISBN 7-121-00816-5

I. 传… II. 蔡… III. ①传感器—专业学校—教材 ②可编程序控制器—程序设计—专业学校—教材

IV. ①TP212 ②TP332.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 025049 号

责任编辑: 朱怀永 徐 萍

印 刷: 北京天宇星印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 7.75 字数: 198.4 千字

印 次: 2005 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 10.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

中等职业学校教材工作领导小组

- 组 长:** 陈贤忠 安徽省教育厅厅长
- 副 组 长:** 李雅玲 信息产业部人事司技术干部处处长
尚志平 山东省教学研究室副主任
睦 平 江苏省教育厅职社处副处长
苏渭昌 教育部职业技术教育中心研究所主任
王传臣 电子工业出版社副社长
- 组 员:** (排名不分先后)
- 唐国庆 湖南省教科院
张志强 黑龙江省教育厅职成教处
李 刚 天津市教委职成教处
王润拽 内蒙古自治区教育厅职成教处
常晓宝 山西省教育厅职成教处
刘 晶 河北省教育厅职成教处
王学进 河南省职业技术教育教学研究室
刘宏恩 陕西省教育厅职成教处
吴 蕊 四川省教育厅职成教处
左其琨 安徽省教育厅职成教处
陈观诚 福建省职业技术教育中心
邓 弘 江西省教育厅职成教处
姜昭慧 湖北省职业技术教育研究中心
李栋学 广西自治区教育厅职成教处
杜德昌 山东省教学研究室职教室
谢宝善 辽宁省基础教育教研培训中心职教部
安尼瓦尔·吾斯曼 新疆自治区教育厅职成教处
- 秘 书 长:** 李 影 电子工业出版社
- 副秘书长:** 蔡 葵 电子工业出版社

前 言



为更好地贯彻教育部、劳动和社会保障部、国防科工委等部门关于“职业院校制造业和现代服务业技能型紧缺人才培养培训工程”通知的精神，我们编写了这本《传感器与 PLC 编程技术基础》教材。在取材和组稿上，我们把提高学生的职业能力放在突出的位置，加强了实践性的教学环节，为扩大学生的就业面和今后的继续深造打下良好的基础。

本教材前三章主要介绍常用传感器的基本概念、工作原理及其应用，重点介绍了数控机床中常用的传感器，其后引入了综合实验。后三章主要介绍可编程控制器（PLC）的基本概念、常用编程指令和编程方法，突出了 PLC 在数控机床中的作用，最后是综合实验。本书作为中等职业学校数控技术应用专业的必备教材，在编写内容上既有针对性又有综合性，充分体现了该专业的特点和要求。

全书在编写过程中，力求简洁实用，图文并茂，并且配备了一定数量的综合实验，注重读者实践动手能力的培养。因此，本教材既可作为中等职业学校教学用书，也可作为中等工程技术人员学习传感器和 PLC 的参考读物。

本教材第 1、4 章由苏州市教育科学研究院孙蓆编写，第 2、3、5、6 章由苏州技师学院蔡崧编写。蔡崧任主编，负责全书的组织和定稿，孙蓆任副主编，江苏财经职业技术学院徐军参与了第 1、2 章的部分编写工作，本书由葛金印、杜德昌、杨培生主审，并通过教育部审批，列为教育部职业教育与成人教育司推荐教材。由于编者水平有限，因此书中难免存在欠缺之处，诚恳欢迎广大读者和同仁给予批评及指正。

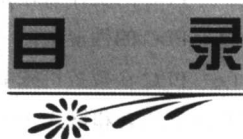
本教材计划教学时数为 60 学时，各章具体的教学时数分配可参考下表。

内 容	建议教学时数
第 1 章 传感器基础知识	10
第 2 章 数控机床中常用的传感器	12
第 3 章 传感器综合实验	6
第 4 章 PLC 基础知识	10
第 5 章 PLC 编程训练	8
第 6 章 PLC 综合实验	10
复习考查	4

为方便教学，本书还配有电子教案、教学指南及习题答案（电子教学参考资料包），请有此需要的教师登录华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）下载，或与电子工业出版社联系（E-mail: ve@phei.com.cn），我们将免费提供。

编 者
2004 年 11 月





第 1 章 传感器基础知识	1
1.1 传感器的概念和基本组成	1
1.1.1 传感器的概念	1
1.1.2 传感器的基本组成	1
1.2 传感器的分类及其特性参数	2
1.2.1 传感器的分类	2
1.2.2 传感器的特性参数	3
1.3 传感器的发展趋势及其在数控机床中的应用	5
1.3.1 传感器的发展方向	5
1.3.2 传感器在数控机床中的应用	6
1.4 工业控制中常用的传感器	7
1.4.1 电阻式传感器	7
1.4.2 电容式传感器	12
1.4.3 电感式传感器	17
习题 1	23
第 2 章 数控机床中常用的传感器	24
2.1 旋转编码器	24
2.1.1 接触式码盘	24
2.1.2 光电式编码器	25
2.1.3 电磁式编码器	27
2.2 霍尔传感器	27
2.3 旋转变压器	31
2.4 感应同步器	34
2.5 光栅位移传感器	37
2.6 磁栅位移传感器	41
习题 2	43
第 3 章 传感器综合实验	44
3.1 光电式旋转编码器实验	44
3.2 开关型霍尔传感器实验	45
第 4 章 PLC 基础知识	48
4.1 PLC 概述	48
4.1.1 PLC 的概念	48

4.1.2 PLC 基本单元的型号及其组成	49
4.1.3 PLC 的基本结构	52
4.1.4 PLC 的工作原理和工作方式	53
4.1.5 PLC 的性能指标	54
4.1.6 PLC 在数控机床中的作用	55
4.2 PLC 编程语言和格式	56
4.3 三菱 FX2N 系列 PLC 的重要软元件	57
4.4 常用的基本编程指令	58
4.5 三菱 FXGP/ WIN-C 编程软件的使用	65
4.5.1 程序输入	65
4.5.2 程序编辑	68
4.5.3 程序管理	69
4.5.4 运行监控	70
4.5.5 通信参数设置	70
习题 3	71
第 5 章 PLC 编程训练	72
5.1 编程基础知识	72
5.1.1 编程的步骤	72
5.1.2 编程的基本原则和技巧	72
5.2 数控机床中典型的 PLC 应用程序	74
5.3 编程举例	75
5.3.1 信号灯控制	76
5.3.2 Y- Δ 降压启动控制	77
5.3.3 运料小车控制	78
习题 4	80
第 6 章 PLC 综合实验	83
6.1 PLC 控制系统的建立与调试	83
6.2 双速电机 PLC 控制	86
6.3 步进电机 PLC 控制	88
6.4 数控机床液压尾座 PLC 控制	91
附表	94
附表 1 海得汉 (HEIDENHAIN) 长度测量封闭式光栅技术参数	94
附表 2 西门子旋转编码器主要技术参数一览表及其选择要点	95
附表 3 三菱 PLC 基本指令一览表	98
附表 4 三菱 PLC 应用指令一览表	100
附表 5 三菱 PLC 特殊元件种类及其功能	105
附表 6 三菱 PLC 出错代码	108
附表 7 PLC 专业名词解释	111
参考文献	115

第1章 传感器基础知识



1.1 传感器的概念和基本组成

1.1.1 传感器的概念

人的五官是用来感受外界刺激（信息）的感觉器官，它把感受到的刺激（信息）传递给大脑，大脑以接收到的信息为依据，立即做出相应的反应。在自动控制系统中，传感器相当于人体的感觉器官，它能把检测到的各种几何量、物理量、化学量、生物量和状态量等信息转换为电信号，并传送给控制器进行处理、存储和控制。

传感器检测到的各种信息中，大多数是非电量信号。非电量是指除了电量之外的一些其他参量，如压力、流量、尺寸、位移量、质量、力、速度、加速度、转速、温度、酸碱度等；而电量一般是指物理学中的电学量，如电压、电流、电阻、电容、电感等。在使用数控机床进行机械加工时，需要对工件、刀具的位置、位移等机械量进行测量，这些都属于非电量的检测。

非电量不能直接使用一般的电工仪表和电子仪器测量，因为一般的电工仪表和电子仪器只能检测电信号。例如在自动控制系统中，要求输入到控制系统的信号为电量信号，这就需要将被测量转化为电量，就要靠传感器来实现。因此，传感器的本质是一种以测量为目的，以一定的精度把被测量转换为与之有确定关系的、便于处理的另一种物理量的测量器件。目前，传感器的输出信号多为易于处理的电量，如电压、电流、频率等。

依照我国国标的规定，传感器的定义是：能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。其中敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号的部分。

从广义的角度出发，传感器指的是在电子检测控制设备输入部分中起检测信号作用的组件。

传感器实现非电量的检测具有以下优点：

- 可进行微量检测，精度高，反应速度快。
- 可实现远距离遥测及遥控。
- 可实现无损检测，测量的安全性、可靠性高。
- 能连续进行测量、记录及显示。
- 能采用计算机技术对测量数据进行运算、存储及信息处理。

1.1.2 传感器的基本组成

传感器一般由敏感元件、传感元件、测量转换电路等部分组成，如图 1.1 所示。控制系统中的传感器主要作用是将被测非电量转换成与其有一定关系的电量，为控制器提供信息，



作为其实施控制的依据。

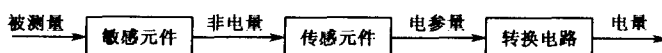


图 1.1 传感器的组成

转换电路又称为测量电路，主要用来将传感器输出的电信号进行处理和变换，如放大、运算、调制、数/模或模/数变换等，从而使这些输出信号便于显示和记录。从测量电路输出的信号通常输入到自动控制系统，以便对测量结果进行信息处理。

有些传感器还带有显示电路，主要用来将测量电路输出的电信号显示成被测非电量的数值。被测数值可以采用模拟显示，也可以采用数字显示。所测量的结果也可以由记录装置进行记录或由打印机打印出来。

图 1.2 是一个测量压力 p 的电位器传感器结构简图，其中：1—弹簧管（敏感元件），

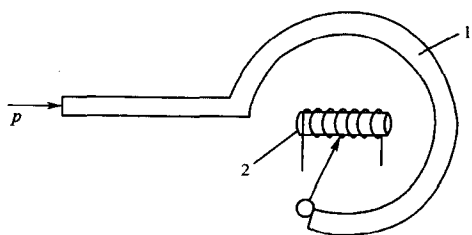


图 1.2 测量压力的电位器传感器结构简图

2—电位器（传感元件）。当被测压力 p 变化时弹簧管移动，从而带动电位器电刷产生位移。电位器电阻的变化量反映了被测压力 p 的变化。在这个传感器中，弹簧管为敏感元件，电位器为传感元件。在它的两端加上电源后，电位器电刷上输出的是与压力成一定关系的电压，只要测量出该电压值，经过换算也就求出了压力。同时还可以看到，在这个例子中电位器又属于转换电路。

1.2 传感器的分类及其特性参数

1.2.1 传感器的分类

传感器有许多分类方法，最常用的分类方法有两种：一种是按被测物理量来分；另一种是按传感器的工作原理来分。

按被测物理量划分的传感器，常见的有温度传感器、湿度传感器、压力传感器、位移传感器、流量传感器、液位传感器、力传感器、加速度传感器、转矩传感器等。

按工作原理划分的传感器主要有以下几种。

1. 电阻式传感器

电阻式传感器是根据利用电阻器将被测非电量转换为电信号的原理制成的。电阻式传感器一般又分为电位器式、触点变阻式、电阻应变片式及压阻式等。

2. 电容式传感器

电容式传感器是根据改变磁路的几何尺寸或改变介质的性质，从而使电容量发生变化的原理制成的。电容式传感器主要用于荷重、位移、液位、厚度、水分含量等参数的测量。

3. 电感式传感器

电感式传感器是根据改变磁路的几何尺寸或改变电感量或互感系数的电磁效应的原理制



成的。电感式传感器主要用于位移、压力、力、振动、加速度等参数的测量。电涡流式传感器是根据金属在磁场中做切割磁力线运动，从而在金属内形成涡流的原理制成的，它主要用于位移及厚度等参数的测量。

4. 光电式传感器

光电式传感器在非电量测量及自动控制技术中占有重要的地位。它是根据光电器件的光效应和光学原理制成的，主要用于光强、光通量、位移、浓度等参数的测量。

5. 压电式传感器

压电式传感器是根据压电效应原理制成的，主要用于力和加速度的测量。

6. 光栅传感器

光栅传感器是根据莫尔条纹原理制成的一种脉冲输出数字式传感器，它广泛应用于数控机床中，能够形成闭环控制系统，测量精度可达微米级。

7. 磁栅传感器

磁栅传感器是根据电磁感应原理制成的，它在大型机床数字检测等方面得到了广泛的应用。

8. 电化学式传感器

电化学式传感器是以离子导电为基础制成的，根据其特性的不同，电化学式传感器可分为电位式传感器、电导式传感器、电量式传感器、极谱式传感器和电解式传感器等。电化学式传感器主要用于气体、液体的酸碱度、电导率及氧化还原电位等参数的测量。

另外，根据传感器对信号的检测转换过程，传感器还可划分为直接转换型和间接转换型两大类。直接转换型传感器可以把输入给传感器的非电量一次性转换为电信号输出，如光敏电阻受光照射时，电阻值会发生变化，直接把光信号转换为电信号输出，因此光敏感元件制成的压力传感器就属于这一类。

1.2.2 传感器的特性参数

在科学试验和生产过程中，我们需要对各种各样的参数进行实时的检测和控制。这就要求传感器能感受被测非电量并将其转换成与被测量有一定函数关系的电量。传感器所测量的非电量处在不断的变动之中，传感器能否将这些非电量的变化不失真地变换成相应的电量，取决于传感器的输入—输出特性。传感器的这一基本特性可以用它的静态特性和动态特性来描述。传感器动态特性的研究方法可在有关控制理论中学习，有兴趣的读者可以自行学习。

传感器的静态特性是指传感器转换的被测量数值处在稳定状态时，传感器的输出与输入的关系。传感器静态特性的主要技术指标有：灵敏度、线性度、迟滞、重复性等，下面分别加以介绍。

1. 灵敏度

传感器的灵敏度是指传感器在稳定标准的条件下，输出变化量与输入变化量的比值，用



K 来表示, 如下所示:

$$K = \frac{dy}{dx} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-1)$$

式中 x ——输入量;

y ——输出量。

对线性传感器而言, 灵敏度是一个常数; 对非线性传感器而言, 灵敏度随输入量的变化而变化。从输出曲线看, 曲线越陡, 灵敏度越高, 如图 1.3 所示。

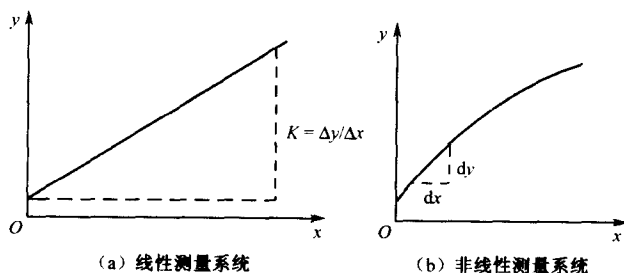


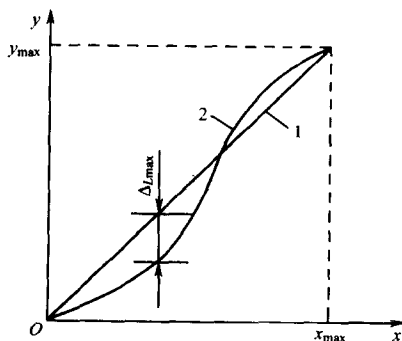
图 1.3 灵敏度示意图

2. 线性度

传感器的线性度是指传感器实际输出—输入特性曲线与拟合直线之间的最大偏差和传感器满量程输出的满度值之比。通常总是希望输出—输入特性曲线成为直线, 即我们所说的呈线性。但实际上理想线性关系的传感器较少, 实际应用中传感器的输出—输入特性曲线只能接近直线, 实际曲线与理论直线之间存在的偏差 Δ_{Lmax} 就是传感器的非线性误差, 如图 1.4 所示。

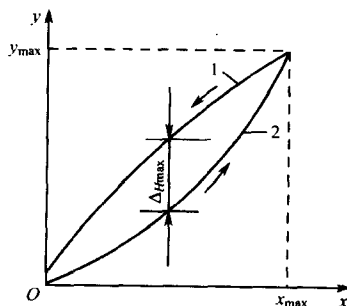
3. 迟滞

对应于同样大小的输入量, 传感器的迟滞是指传感器输入量增大行程期间和输入量减小行程期间, 输出—输入特性曲线不重合的程度, 如图 1.5 所示。



1—拟合直线 $y = ax$; 2—实际特性曲线

图 1.4 线性度示意图



1—反向特性; 2—正向特性

图 1.5 迟滞特性曲线

产生迟滞现象的主要原因是传感器的机械结构和制造工艺上的缺陷, 如轴承摩擦、间隙、螺钉松动和元件腐蚀等。在实际应用中, 迟滞现象会引起测量误差, 因此, 要尽量选用迟滞现象小的传感器。



4. 重复性

重复性是指在同一工作条件下,输入量按同一方向在全测量范围内连续变动多次所得特性曲线的不一致性。重复性所反映的是测量结果偶然误差的大小,而不是表示与真值之间的差别,有时重复性虽然很好,但可能远离真值。重复性示意图如图 1.6 所示。

周围环境中,对传感器影响最大的是温度。目前,很多传感器材料采用灵敏度高、信号易处理的半导体,但是,半导体材料对温度很敏感,因此,在实际应用时应特别注意。另外,大气压、湿度、振动、电源电压及频率都会影响传感器的特性。

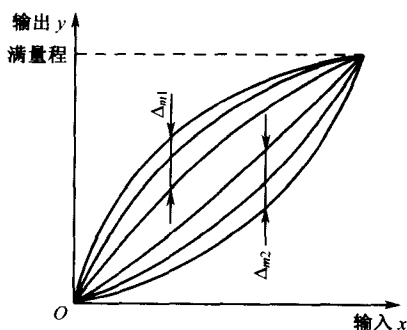


图 1.6 重复性示意图

1.3 传感器的发展趋势及其在数控机床中的应用

传感器是自动检测控制系统中的重要组成部分,是生产高精度、高速度、高效率数控机床的关键之一,发达国家都把传感器技术视为现代高新技术发展的重要领域。

1.3.1 传感器的发展方向

随着实际生产中对传感器要求的不断提高以及科学技术的不断发展,今后传感器的发展方向主要体现在以下几个方面。

1. 采用新材料和探究新理论来发展传感器

由于传感器都是利用材料的各种效应、特性等来实现非电量转换成电量的,所以应采用新材料并探究新理论来发展传感器。

2. 发展数字式 and 智能型传感器

为适应计算机对信息的处理功能,需要发展数字式传感器,这样可以省去模/数转换电路而直接与计算机连接,形成传感器和计算机的微处理器结合的一体化结构。同时还可以利用计算机网络技术实现自动检测和控制的网络化。

3. 采用新技术、新工艺

为适应工业和实验中的非接触式检测的需要,应该更广泛地使用激光、微波、红外等新技术来发展传感器。

4. 向小型化、集成化方向发展

由于科学技术的发展和测量领域的需要,传感器必须向小型化方向发展,以便减轻体积和质量。而小型化的基础是集成化,即利用现有的微电子加工技术,将敏感元件与测量电路集成在单个芯片上,实现传感器测量的一体化。



5. 发展“仿生传感器”

生物体充满着大量有传感作用的细胞,如视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉、冷热感觉细胞等,这些感觉细胞,将非电量转换成“生物电流”,由神经系统传送到大脑里进行处理,再由大脑发出各种控制命令。人们应用“仿生学”等科学技术,为“仿生传感器”的开发研制展示了广阔的空间。

6. 开发研制高性能的敏感元件

传感器属于敏感技术范畴,而敏感元件是基础元件,有了优良的敏感元件,才能有高性能的传感器。

1.3.2 传感器在数控机床中的应用

在机械加工领域,数控机床得到了广泛的使用。数控机床可以根据预先编制好的加工程序自动完成机械零件的加工工作,因此,在数控机床的内部,广泛使用了各种传感器及自动检测装置来监视加工中的各个环节,从而实现加工过程的自动检测和控制。

1. 环境量的测量

在数控机床中,环境量的测量主要是指检测机床的轴温、压力油温、润滑油温、冷却空气的温度和电动机绕组温度等参数。多数测温点采用铂热电阻、热敏电阻,少数采用热电偶,对于一部分需要较高精度的温度测量,可以通过 PN 结测温集成电路来实现。

2. 位置量的测量

位置传感器广泛应用于数控机床中,它通过测量机床工作台、刀架等运动部件的位置,实现伺服控制。位置传感器主要有电阻式、电感式、电涡流式、霍尔式、光电式、超声波式等。

3. 力和加速度的测量

在刀具加工工件的过程中,当工件加工状态超出了设定的允许条件时,例如油压小于设定值导致夹紧力不足时,工件可能会松动,这时数控系统将发出报警信号。因此,力和加速度的测量是数控机床的一个重要环节。

4. 机械位移、角位移的测量

在数控机床中还使用了大量的数字式位移传感器,数字量的输出为数控系统控制提供了很大的方便。用于测量位移的传感器很多,因测量范围的不同而有所区别。常见的有感应同步器、光栅、磁栅、容栅、编码器等传感器,它们的特点是易实现数字化、精度高、抗干扰能力强、安装方便、使用可靠。这些传感器既可以测量线位移,也可以测量角位移,还可以用来测量长度等。

传感器在数控机床中的应用见表 1.1 所列。



表 1.1 传感器在数控机床中的主要应用

在数控机床中的应用	使用的传感器类型
监视重要点的温度, 如轴温度、压力油温度、润滑油温度、冷却空气的温度、电动机绕组温度等	热电阻、热电偶、PN 结测温集成电路等
测量位置, 如刀具、工件的位置等	电阻式、电感式、电涡流式、霍尔式、光电式、超声式波传感器等
测量力和加速度, 如工件的夹紧力	电阻应变式、压电式等
测量机械位移、角位移, 如转轴转角、工件和刀具的位移等	编码器、光栅、磁栅、感应同步器等

1.4 工业控制中常用的传感器

在石油、化工、电力、钢铁、机械加工等行业中, 广泛使用了各种传感器及自动检测装置来监视生产的各个环节, 传感器起到了相当于人体感觉器官的作用, 它们每时每刻按要求完成对各种信息的检测, 再把测得的结果经过各种各样的控制器进行处理, 实现工业生产过程、质量、工艺管理的控制。

工业控制中使用的传感器种类很多, 常见的有电阻式、电容式、电感式 3 种。本章主要介绍这 3 种传感器, 通过它们使大家了解传感器的组成、结构、工作原理和应用。

1.4.1 电阻式传感器

首先了解一下什么是电阻式传感器, 一般来说, 能将被测的非电量(如位移、应变、温度、湿度等)的变化转换成导电材料电阻的变化, 这种装置称为电阻式传感器。

导电材料的电阻不仅与材料的类型、几何尺寸有关, 还与温度、湿度和变形等因素有关。物理学中指出: 不同的导电材料对同一非电物理量的敏感程度是不同的, 甚至差别很大。因而, 利用某种导电材料的电阻对某一非电物理量具有较强的敏感性这一特点, 就可以制成测量该物理量的电阻式传感器。

电阻式传感器的种类很多, 常用的有电阻应变式传感器、电位器传感器、热敏电阻传感器、气敏电阻传感器、光敏电阻传感器、磁敏电阻传感器等。本节主要介绍在机电控制系统中应用较多的电阻应变式传感器及热电阻和热敏电阻传感器, 这两种传感器主要用于力和温度的检测。

1. 电阻应变式传感器

电阻应变片是一种将被测试件上因受力而产生的应变转化为电阻值变化的敏感元件, 它是应变式传感器的主要组成部分。将应变片粘贴在试件的某个部位, 就与弹性元件制成了专用的力学传感器。它可以检测机械装置各部分的受力状态, 用途十分广泛。

(1) 应变效应和电阻应变式传感器的工作原理。这里仅以金属应变片为例, 介绍应变片的应变效应。假设金属应变片金属丝的长度为 L , 截面积为 A , 半径为 r , 电阻率为 ρ , 则金属丝的初始电阻 R 可表示为:

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{\pi r^2} \quad (1-2)$$



式中 ρ ——电阻率;
 A ——截面积;
 L ——金属丝的长度。

当沿金属丝的长度方向作用均匀的力时, 上式中 ρ 、 r 、 L 都将发生变化, 从而导致电阻 R 发生变化。金属丝受外力作用伸长时, 长度增加, 截面积减小, 电阻值增加; 金属丝受外力作用缩短时, 长度减小, 截面积增加, 电阻值减小。

由理论推导可知电阻变化率和应变的关系为:

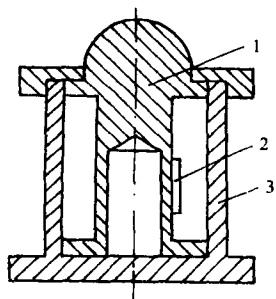
$$\Delta R/R = K_0 \varepsilon \quad (1-3)$$

式中 $\Delta R/R$ ——电阻的变化率;
 ε ——金属丝的应变;
 K_0 ——金属丝的灵敏度系数。

因此, 根据电阻变化率就可以计算出金属丝的应变, 这就是应变效应。材料力学又告诉

我们, 金属丝的应变大小与金属丝所受的外力存在特定的数学关系, 所以电阻变化率与金属丝所受的外力也存在一定的数学关系, 通过测量电阻的变化就能间接测量出外力的大小。

图 1.7 是电阻应变式传感器测力的简单结构图, 用以说明电阻应变式传感器的工作原理。



1—弹性元件; 2—应变片; 3—壳体

图 1.7 电阻应变式传感器的结构图

电阻应变式传感器主要由弹性元件（或称敏感元件）、粘贴在弹性元件上的应变片和壳体所组成。当外力作用于弹性元件上时, 弹性元件被压缩, 应变片随之发生压缩应变, 由此引起应变片的电阻也发生相应的变化。如果将该电阻应变片接入到电桥电路中, 就可以把电阻的变化

转变成电桥输出电压或电流的变化, 由于其输出信号较小, 需要经放大器放大, 于是就实现了被测力通过传感器转换成为电量的测量, 这就是电阻应变式传感器的工作原理。

(2) 应变片的结构与分类。应变片根据所使用的材料不同, 可以分为金属应变片和半导体应变片两大类。金属应变片又可分为金属丝应变片、金属箔应变片和金属薄膜应变片; 而半导体应变片又可分为两类, 一类是将半导体应变片粘贴在弹性元件上制成传感器的, 称为粘贴型半导体应变片, 另一类是在半导体基片上用集成电路工艺制成的扩散型半导体应变片, 这种应变片与硅衬底形成一个整体的传感器。

在所有这些应变片中, 最常用的是金属丝应变片和金属箔应变片。应变片的结构形状如图 1.8 所示。

金属电阻应变片的基本结构如图 1.8 (a) 所示, 主要由 1—引线、2—保护片、3—敏感栅、4—基底 4 部分组成。敏感栅可由金属丝、金属箔制成, 它被粘贴在绝缘基底上, 在其上面粘贴了一层绝缘保护片, 敏感栅的两个引出端焊有引出线。一般来说, 金属电阻应变片受力后, 其几何形状的变化引起的电阻相对变化是主要因素, 灵敏度系数则较小。

(3) 电阻应变式传感器的测量电路。电阻应变式传感器的测量精度不仅由应变片的材料决定, 而且同应变片的粘贴工艺等有关。常用应变片的灵敏度 K 值较小, 所以电阻的变化范围很小, 一般在 0.5Ω 以下。如何能测量出这样小的电阻变化, 选择测量电路很重要。通常我们采用电桥电路。

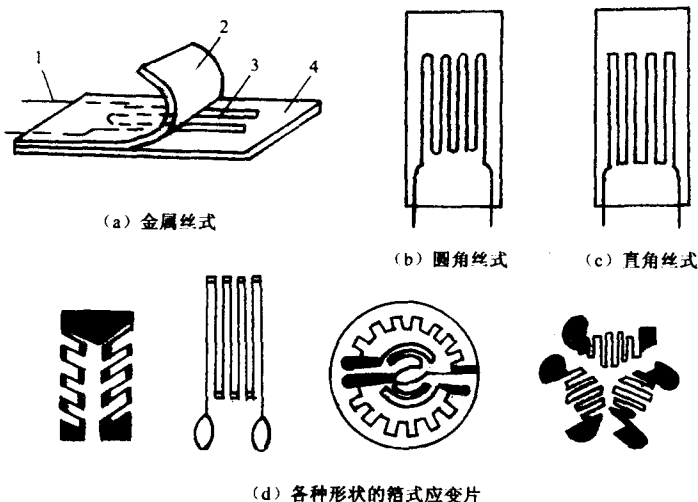


图 1.8 电阻应变片的结构形状

图 1.9 是直流电桥电路。为了使电桥在测量前的输出电压为零, 应该选择电桥四个臂上的电阻, 使 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 或 $R_1/R_2 = R_3/R_4$ 。

电桥的一个对角线接入电源电压 U_i , 另一个对角线为输出电压 U_o 。当每个桥臂的电阻变化值 $\Delta R_i \ll R_i$, 电桥负载电阻为无限大时, 电桥电压可近似地用下式表示:

$$U_o = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) U_i \quad (1-4)$$

通常采用全等臂形式工作, 即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ (初始值)。这样表达式 (1-4) 可变为:

$$U_o = \frac{U_i}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (1-5)$$

当每个桥臂上的应变片灵敏度 K 都相同时, 将式 (1-3) 代入式 (1-5) 得到:

$$U_o = \frac{U_i}{4} K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (1-6)$$

由上式可以看出, 应变片受力的作用产生应变, 应变使电桥输出电压 U_o 变化, 于是可以通过测量 U_o 实现作用力的检测。

(4) 应变片的使用。应变片的使用分为应变片的选择和粘贴, 分别如下所述。

① 应变片的选择。应变片的选择主要考虑应变片的种类、结构尺寸、初始电阻、绝缘电阻及允许工作电流等因素。

通常根据实际使用的灵敏度和稳定性要求来选择金属应变片或半导体应变片。半导体应变片与金属应变片相比, 其灵敏度系数是金属应变片的几十倍, 但它在温度稳定性和重复性方面不如金属应变片好。

一般根据应变片的使用场合来选择应变片的几何尺寸和形状大小, 即敏感栅长、宽或圆角丝栅曲率半径等。应变片的初始电阻是指没有应变时的原始电阻, 绝缘电阻是指敏感栅与

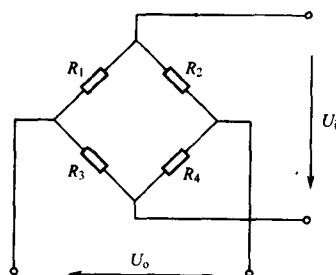


图 1.9 桥式转换电路



基底间的电阻。需要注意的是,应防止应变片与试件间的漏电而造成误差,而且实际使用时,应变片工作电流应在允许的最大工作电流范围内。

② 应变片的粘贴。应变片的粘贴主要注意以下几个问题。

首先是应变片的检查与筛选,主要是检查应变片的质量是否满足要求;应变片的外观是否整齐、均匀;敏感栅有无短路、断路、折弯现象;基底与保护层间是否均匀无气泡等。

其次是试件贴片处的表面处理,包括将试件贴片处的表面用锉刀等工具打平、进行化学清洗、去油污等。

再次是贴片的定位与固化。为保证应变片粘贴的位置准确,可以用划针在试件上画出定位中心线,以便与应变片中心线对位。然后选择合适的黏合剂,根据粘合剂的粘贴要求,仔细把应变片粘贴到试件上,并进行固化处理。

最后是粘贴质量的检查,主要是外观检查和应变片电阻及绝缘电阻的检查,以及检查粘贴的位置是否正确,黏合层是否有气泡和漏贴,敏感栅是否有短路或断路现象,敏感栅的绝缘性能等。

(5) 电阻应变式传感器的应用。根据电阻应变原理制成的传感器可以用来测量诸如力、位移、加速度等参数。

① 电阻应变式力传感器。图 1.10 是电阻应变式力传感器应用示意图,图中只画出了传感器的弹性元件和粘贴在弹性元件上的应变片,以表明传感器的工作原理。

弹性元件把被测力的变化转变为应变量的变化,粘贴在上面的应变片也感受到同样大小的应变,因而应变片把应变量的变化转换成电阻的变化。只要把所贴应变片两端的引出线接入电桥电路中,电桥的输出变化就正比于被测力的变化。力传感器的弹性元件有多种结构形式,如图 1.10 中所示,图(a)是柱形,图(b)是弹性环,图(c)是等强度悬臂梁,图(d)是两端固定支梁。

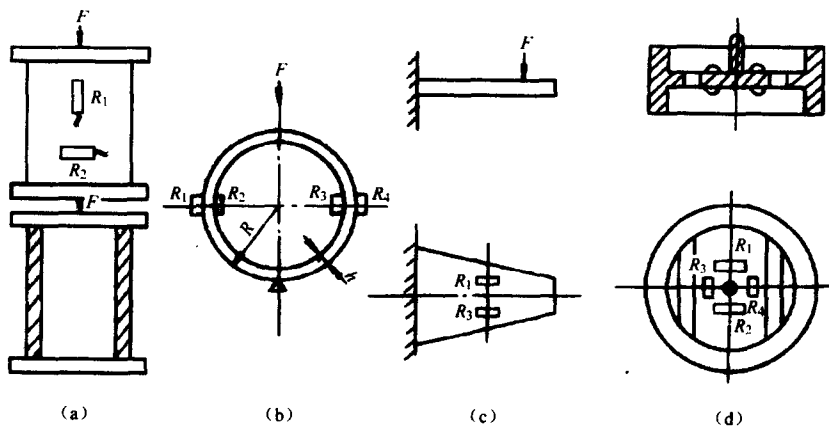


图 1.10 力传感器弹性元件的多种结构形式

② 电阻应变式加速度传感器。图 1.11 是应变式加速度传感器的原理图,由图可见,传感器由质量块、悬臂梁和底座组成,应变片贴在悬臂梁根部的两侧。如果将底座固定在被测物体上,物体以加速度 a 运动时,则质量块受到与加速度方向相反的惯性力 $F=ma$ 。该力致使悬臂梁发生变形,从而引起应变片的应变和电阻变化。