

高职高专机电类专业“十一五”规划教材



# 电气控制及PLC

DIAN-QI KONGZHI JI PLC

主编 仲崇生 主审 潘传九



郑州大学出版社

高职高专机电类专业“十一五”规划教材



# 电气控制及PLC

DIANQI KONGZHI JI PLC

主编 仲崇生 主审 潘传九



郑州大学出版社

## 内容简介

本书比较系统全面地介绍了电气控制的基本理论、应用方法及相关控制技术。内容包括:绪论、电气控制相关技术、继电接触器控制技术、电机控制技术、机电设备线路安装及故障检测与维修、可编程控制技术、西门子 S7-200 可编程控制器、三菱 FX 系列可编程控制器、人机界面、实训指导。

本书可作为高职高专机电类专业的教学用书,也可作为其他各层次及相关工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电气控制及 PLC/仲崇生主编. —郑州:郑州大学出版社,2008.8

高职高专机电类专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-81106-899-3

I. 电… II. 仲… III. ①电气控制-高等学校:技术学校-教材②可编程序控制器-高等学校:技术学校-教材 IV. TM921.5 TP332.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 127019 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:邓世平

全国新华书店经销

开封市精彩印务有限公司印制

开本:787 mm × 1 092 mm

印张:22.25

字数:530 千字

版次:2008 年 8 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

1/16

印次:2008 年 8 月第 1 次印刷

---

书号:ISBN 978-7-81106-899-3

定价:36.00 元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换

# 作者名单

主 编 仲崇生

副主编 史增芳

编 委 (以姓氏笔画为序)

史增芳 仲崇生 刘豫喜

杨 勇 杨英发 周 伟

高善坤



在工业生产过程中,电气控制技术占有十分重要的地位,它对提高机器设备的自动化水平、提高劳动生产率、改善工人的劳动强度起着十分重要的作用。

在工程应用中,机和电是结合在一起的,因此本书在着重介绍电气控制中的继电器控制和可编程控制器的同时,还介绍了与电气控制技术密切相关的机械传动技术、传感器技术。了解和掌握这些技术对机电类高职高专的学生来说是非常重要的,可对机电控制的原理有一个全面的了解。

在本书编写过程中,我们根据高职高专教材以培养技术应用型、务实型人才为目的,能力和知识相结合,从实际出发,大量分析了工业生产过程中应用的典型电路及工程应用事例,力图做到贴近实际和工程应用。

本书由仲崇生任主编,史增芳副教授任副主编,具体编写分工为:仲崇生,编写前言、第1章、第7章和第10.2节;杨英发,编写第2章;刘豫喜,编写第3章和第10.1节;周伟,编写第4章;史增芳,编写第5章;高善坤,编写第6章、第9章;杨勇,编写第8章和第10.3节。潘传九副教授担任本书主审。在本书的编写过程中,得到了童明波、郭亮等同志的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

本书在编写过程中参考了有关的教材和相关资料,一并在书后的参考文献中列出,在此我们对这些参考书的作者们表示衷心的感谢!

鉴于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请同行专家和读者批评指正。

编者

2008年3月

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第1章 绪论 .....               | 1   |
| 1.1 电气控制技术的发展状况 .....      | 1   |
| 1.2 机电控制系统组成 .....         | 2   |
| 1.3 本课程研究的主要内容及要求 .....    | 3   |
| 第2章 电气控制相关技术 .....         | 5   |
| 2.1 用电常识 .....             | 5   |
| 2.2 传感器技术 .....            | 7   |
| 2.3 变压器技术 .....            | 29  |
| 2.4 驱动执行技术 .....           | 35  |
| 第3章 继电器接触器控制技术 .....       | 51  |
| 3.1 电气控制线路的图形、文字及绘制 .....  | 51  |
| 3.2 常用的低压电器 .....          | 55  |
| 3.3 基本控制电路 .....           | 70  |
| 3.4 三相异步电动机的制动控制电路 .....   | 82  |
| 3.5 典型机械设备的电气线路 .....      | 87  |
| 第4章 电机控制技术 .....           | 103 |
| 4.1 直流电动机的控制 .....         | 103 |
| 4.2 交流电动机的调速控制 .....       | 111 |
| 4.3 步进电动机的控制 .....         | 119 |
| 4.4 变频调速控制 .....           | 122 |
| 第5章 机电设备线路安装及故障检测与维修 ..... | 127 |
| 5.1 机电设备控制线路相关基础知识 .....   | 127 |
| 5.2 电气控制线路的故障检修 .....      | 131 |
| 第6章 可编程控制技术 .....          | 141 |
| 6.1 可编程控制概述 .....          | 141 |
| 6.2 常用的 PLC 简介 .....       | 147 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第 7 章 西门子 S7 - 200 可编程控制器 .....   | 158 |
| 7.1 概述 .....                      | 158 |
| 7.2 S7 - 200 系列 PLC 的基本硬件组成 ..... | 159 |
| 7.3 S7 - 200 系列 PLC 的主要技术性能 ..... | 161 |
| 7.4 系统内部资源 .....                  | 164 |
| 7.5 西门子 S7 - 200 的编程语言及程序结构 ..... | 169 |
| 7.6 西门子 S7 - 200 PLC 的指令系统 .....  | 173 |
| 7.7 典型的简单应用程序 .....               | 196 |
| 7.8 PLC 的程序设计方法及应用 .....          | 202 |
| 7.9 S7 - 200 PLC 编程软件的使用 .....    | 221 |
| 第 8 章 三菱 FX 系列可编程控制器 .....        | 240 |
| 8.1 三菱 FX 系列 PLC 的系统结构和编程元件 ..... | 240 |
| 8.2 三菱 FX 系列 PLC 的编程语言 .....      | 252 |
| 8.3 三菱 FX 系列 PLC 的指令系统 .....      | 257 |
| 8.4 PLC 典型基本程序 .....              | 282 |
| 8.5 可编程控制器程序设计方法及应用 .....         | 290 |
| 8.6 三菱 PLC 编程软件的使用 .....          | 309 |
| 第 9 章 人机界面 .....                  | 318 |
| 9.1 概述 .....                      | 318 |
| 9.2 GP 系列人机界面 .....               | 319 |
| 9.3 编程软件 .....                    | 320 |
| 第 10 章 实训指导 .....                 | 326 |
| 10.1 继电器控制实验 .....                | 326 |
| 10.2 S7 - 200 PLC 使用实验 .....      | 336 |
| 10.3 三菱 FX 系列 PLC 实验 .....        | 340 |
| 参考文献 .....                        | 346 |

# 第1章

## 绪 论

### 1.1 电气控制技术的发展状况

电气控制是随着科学技术的不断发展及生产工艺的不断完善而迅速发展的,现代化生产的自动化水平、产品的质量和企业的经济效益等各项指标,在很大程度上取决于生产设备的先进性和电气自动化程度。电气控制的发展经历了从最早的手动控制到自动控制,从简单的控制设备到复杂的控制系统,从有触点的硬件继电器控制发展到以计算机为中心的软件控制系统的发展过程,它是综合应用了计算机、自动控制、电子技术、精密测量等许多先进的技术而发展起来的综合技术。

传统的电气控制是继电接触器控制系统,它由继电器、接触器、按钮、行程开关等组成,实现对机器设备驱动电机的启动、停车、有极调速等控制。继电接触器控制系统的优点是结构简单、维护方便、抗干扰强、价格低,广泛应用于各类机床和机械设备。目前,在我国继电接触器控制仍然是机床和其他机械设备最基本的电气控制形式之一。

在实际生产中,由于大量存在用开关量控制的简单的程序控制过程,而实际生产工艺和流程又是经常变化的,因而传统的继电接触器控制系统常常不能满足这种要求,因此曾出现了继电接触控制和电子技术相结合的控制装置,称之为顺序控制器。它能够根据生产的需要改变控制程序,并能通过组合逻辑元件插接或编程来实现继电接触控制。这种控制价格低廉,但它的装置体积大,功能也受到一定限制。随着大规模集成电路和微处理机技术的发展及应用,上述控制技术也发生了根本性的变化。

从20世纪30年代开始,为了提高机械加工的生产效率,采用了机械化流水作业的生产方式,对于不同的零件分别组成自动化生产线。随着产品机型的更新换代,生产线承担的加工对象也随之改变,这就需要改变控制程序,使生产线的机械设备按新的工艺过程运行,而继电接触器控制系统是采用固定接线的,大型自动生产线的控制系统使用的继电器数量很多,这种有触头的电器工作频率较低,很难适应这个要求。为了解决这个问题,20世纪60年代初期,利用电子技术研制出矩阵式顺序控制器和晶体管逻辑控制系统来代替





继电器控制系统,对复杂的自动控制系统则采用电子计算机控制,由于这些控制装置本身存在某些不足,所以均未能获得广泛的应用。1968年美国最大的汽车制造厂商通用汽车公司(GM)为适应汽车型号不断更新的要求,提出把计算机的完备功能以及灵活性、通用性好等优点和继电接触器控制系统的简单易懂、操作方便、价格便宜等优点结合起来,制成一种能适应工业环境的通用控制装置,并把编程方法和程序输入方式加以简化,使得不熟悉计算机的人员也能很快地掌握它的使用技术。根据这一设想,美国数字设备公司(DEC)于1969年率先研制出第一台可编程序控制器(简称PLC),在通用汽车公司的自动装配线上试用获得成功,从此以后,许多国家的著名厂商竞相研制,各自形成系列,品种更新很快,功能不断增强,从最初的逻辑控制为主发展到能进行模拟量控制,具有数据运算、数据处理和通信联网等多种功能。它兼备了计算机控制和继电器控制系统两方面的优点,与人机界面联合使用,实现人机对话,大大提高了机电产品的自动化程度和设备操作调试的灵活性。目前在世界各国已作为一种标准化通用装置普遍应用于工业控制。由于PLC成功应用到工业控制系统,机床或机电产品的可靠性不断提高,电气控制电路明显简化,自动化水平不断提高。

在工业控制系统中,很多机械设备的运转需要实现无级变速。变频器可使交流异步电动机实现无级调速,现已在电气传动中占据越来越重要的地位,并且已获得巨大的节能效果,可应用于工业自动化实现风机、水泵流量等控制,也可应用于空调器中,具有舒适、节能等优点。

随着计算机网络技术的发展以及设备自动化水平的提高,自动控制从传统的集中式控制向多元化分布式方向发展,现场总线控制系统(Fieldbus Control System)是目前研究的热点之一。它是把具有数字计算和通信能力的现场仪表和执行器件连接成网络系统,按公开、规范的通信协议,在现场使上位机与网络之间实现数据传输和信息交换,并能实现远程控制和监控。

## 1.2 机电控制系统组成

电气控制是和机电一体化产品联系在一起的,电气控制系统的控制目的是为了机械产品按一定的要求执行一定的功能,提高自动化水平,我们把这种产品称为机电一体化产品,它是在与传统机械产品高度结合的基础上,综合运用微电子、自动控制、信息、传感测试、电力电子、接口、信号变换以及软件编程等技术的综合技术。

随着社会生产和科学技术的发展与进步,机电一体化技术正在不断地深入到各个领域,并得到了迅猛发展。近几年来随着机械的产品升级换代,机械的自动化水平、可靠性不断得到提高。机械产品再也不是单机自动化,而是要求能实现一条生产线、一个车间、一个工厂甚至更大规模的自动化,它是机、电、液的集成,是多门技术的复合。我们学习电气控制技术,更重要的是学习机电产品的控制原理及控制方式,了解机电产品的结构,懂得机电产品的工作原理,从而最大限度地发挥机电一体化产品的功能。

一个较完整的机电一体化控制系统,包括以下几个基本要素:机械本体、动力源、传感装置、控制器、驱动执行机构,各要素和环节之间通过接口相联系。



(1) 机械本体 机械本体是系统所有功能元素的机械支承结构,包括机架、机身、机械连接等部件,它是机器各组成部分的连接载体。例如数控磨床的机械本体部分就是磨床的机械结构部分(床身、头架、尾架等)。

(2) 动力源 按照系统的控制要求,为系统提供所需的能量和动力,使系统能按一定的要求正常运行。动力源通常有电机、液压源、气压源等。如压力机的主动力主要来自于液压泵提供的液压油的液压能。

(3) 传感装置 对系统运行中本身和外界环境的各种参数及状态进行检测,变成可识别电信号,传输到信息处理单元,经过分析、处理并产生相应的控制信息,其功能一般由专门的传感器和仪表完成。在自动化的生产设备中,产品性能的控制、自动化的实现都是由传感器来检测传递信号的。例如,机械设备中控制运动的初、终点的位置的接近开关,控制检测运动速度的传感器等。

(4) 控制器 控制器是机电一体化控制系统的核心,它将来自各传感器的检测信息和外部输入命令(按钮、开关控制的操作信号)进行集中、存储、分析、加工,根据信息处理结果,按照一定的程序和节奏发出相应的指令,控制整个系统有目的地运行。控制器一般由计算机、可编程控制器(PLC)等构成。例如,龙门刨床的运动是由电气控制箱内的 PLC 和继电器动作联合控制的。

(5) 驱动执行机构 根据控制信息和指令,驱动各种执行机构完成要求的动作和功能。目前广泛使用的执行机构有电动式、液压式、气动式三种。数控车床刀具的走刀运动就是利用伺服电机驱动滚珠丝杠来完成的,磨床工作台的往返运动是由液压缸驱动的。

(6) 接口 实现系统中各单元和环节之间进行物质、能量和信息的交换,使各组成要素连接成为一个有机的整体。接口包括人机接口和机电接口。数控车床中的 CRT 显示器、键盘、打印机,机电设备产品的人机界面等,构成了人机接口部分。

## 1.3 本课程研究的主要内容及要求

电气控制的载体是机电一体化产品,其涉及范围包括机电设备、自动化生产线、家用电器、办公自动化等。学习电气控制系统的基本原理,我们重点是要学习传统的电气控制方式——继电器控制技术和近年来在机电产品中广泛应用的 PLC 控制技术,学习传感检测技术、驱动执行机构、精密机械技术等电气控制系统的相关技术及机电产品的工作原理,在实际工作中,结合机电产品的工作原理和控制要求,应用好电气控制技术,更好地实现机电产品的功能。

由于 PLC 的生产厂家多,型号多,在这本教材中我们仅对目前广泛使用的西门子 S7-200 PLC 和三菱 F 系列 PLC 的结构和编程方法进行介绍。PLC 目前还没有统一的编程语言,但不管哪一种 PLC,其编程方法都是类似的,学习时可根据情况而定。

本课程是一门实用性很强的专业课,其目的是让学生掌握一门非常实用的工业控制技术,以及培养和提高学生的实际应用和动手能力。具体要求是:

(1) 了解电气产品的发展过程及发展方向,熟悉控制系统的组成及作用。

(2) 掌握检测传感技术、驱动执行机构、精密机械技术等电气控制系统相关技术的工



作原理、特点,并了解其在工业产品中的应用过程。

(3)掌握电气控制线路的电机控制的基本电路,掌握典型生产设备的继电器接触器控制系统的工作原理。

(4)熟悉各类可编程控制器的基本概况和工作原理。

(5)熟练掌握可编程控制器的基本指令系统和典型实例的编程,掌握可编程控制器的程序设计方法,熟练掌握顺序控制功能图的编程方法,熟悉和掌握可编程控制器基本功能指令的使用。

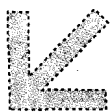
(6)掌握与 PLC 配合应用的人机界面的工作原理,并懂得应用方法。



### 思考与练习

1. 阐述电气产品的发展过程及发展方向。
2. 什么是机电一体化,你知道的有哪些机电一体化产品?
3. 机电一体化控制系统的基本构成要素是什么?
4. 电气控制在机电一体化产品中的作用如何? 与机电一体化产品是如何接口的?

## 第2章



## 电气控制相关技术

### 2.1 用电常识

电能作为一种最基本的能源,是国民经济及人们日常生活中不可缺少的。由于电本身看不见、摸不着,它具有潜在的危险性,但只要懂得了用电的基本常识,掌握了用电的基本规律,并按操作规程办事,电就能很好地为人民服务,否则会造成意想不到的事故,轻则导致电气故障,使人触电受伤,重则导致电气设备损坏,致人死亡,甚至引起重大火灾事故。所以,掌握安全用电常识关系到人们的生命财产安全,必须高度重视。

#### 2.1.1 电压等级与安全电压

根据欧姆定律,电阻一定时,电压越高电流也就越大。通常情况下,皮肤干燥(空气不潮湿,人体不出汗)时,人体电阻大约在 $6 \sim 10 \text{ k}\Omega$ 之间,甚至高达 $100 \text{ k}\Omega$ 。人体电阻主要是皮肤电阻,表皮 $0.05 \sim 0.2 \text{ mm}$ 厚的角质层的电阻很大,但角质层容易被破坏,去掉角质层的皮肤电阻约为 $800 \sim 1200 \Omega$ ,内部组织的电阻约为 $500 \sim 800 \Omega$ 。若把可能加在人身上的电压限制在某一范围内,使得在这种电压下通过人体的电流不超过允许值(小于 $6 \text{ mA}$ ),这一电压就叫做安全电压。

我国规定:带电体对地电压以 $250 \text{ V}$ 为界, $250 \text{ V}$ 以上为高压, $250 \text{ V}$ 以下为低压;适用于不同场所的直流或交流工频有效值的安全电压等级有 $42 \text{ V}$ 、 $36 \text{ V}$ 、 $24 \text{ V}$ 、 $12 \text{ V}$ 和 $6 \text{ V}$ 。通常情况下,不高于 $36 \text{ V}$ 的电压对人是安全的,所以我国通用的安全电压标准为 $36 \text{ V}$ 。对特别容易导电、潮湿、狭窄的场所,如金属容器内、隧道内、矿井内以及周围有大面积接地导体的环境,以 $12 \text{ V}$ 为安全电压。一般情况下, $36 \text{ V}$ 、 $24 \text{ V}$ 、 $12 \text{ V}$ 是常用的三个安全电压级别。

#### 2.1.2 触电与预防

人体是导体,当人体上加有电压时,就会有电流通过人体。当通过人体的电流很小





时,人没有感知;当人体流过工频交流 1 mA 或直流 5 mA 左右的电流时,人体就会有麻、刺、痛的感觉。一般来说,10 mA 以下工频交流电流和 50 mA 以下直流电流流过人体时,人能摆脱电源,故危险性不太大。

当人体流过工频交流 20 ~ 50 mA 或直流 80 mA 电流时,人就会产生麻痹、痉挛、强烈刺痛等感觉,出现血压升高、呼吸困难等症状,自己不能摆脱电源,有生命危险。

当人体流过 100 mA 以上电流时,在很短时间内就会使人窒息、心跳停止。

流过人体的电流越大、触电时间越长,后果就越严重。我国规定  $50 \text{ mA} \cdot \text{s}$  为安全值。超过这个数值,就会对人体造成伤害。另外,触电部位对触电后果也有很大的影响,触电电流流过呼吸器官和神经中枢时,危害程度较大;触电电流流过心脏时,危害程度更大;触电电流流过大脑时,会使人立即昏迷。心脏病、内分泌失调、肺病、精神病患者,在同等情况,危险程度更大些。

在三相四线制的输电网络中,工厂动力用电的火线与火线之间的电压是 380 V,家庭照明用电的火线与零线之间的电压是 220 V。绝不能同时接触两根火线或同时接触火线与零线。零线是接地的,所以火线与大地之间的电压也是 220 V,一定不能在与大地连通的情况下接触火线。

#### 2.1.2.1 几种触电类型

(1) 人接触了火线与火线、火线与零线或火线与大地而触电。

单相触电:人体接触一根火线的同时又与零线或大地接触所造成的触电。单相触电形式最为常见。

两相触电:人体同时接触两根火线所造成的触电。当人体同时接触两相火线时,380 V 线电压直接作用于人体,这种触电非常危险,自然更不用说 10 kV、35 kV、110 kV、220 kV 等高压输电线路的两相触电了。

(2) 跨步电压触电。三相输电线路中若有一相断落触地时,电流通过落地点流入大地,这时,以地面上电流入地点为圆心,大约在 20 m 范围不同圆周上具有不同的电位,距离落地点越近电位越高,距离落地点越远电位越低。人行走时,两脚跨在地面上电位不同的两点所承受的电压称为跨步电压,由此引起的触电事故称为跨步电压触电。实际上跨步电压对人体比较危险的影响范围大约在距电流入地点 10 m 左右的圆形区域。为避免这类触电事故发生,要求人们不要走近电力系统的接地装置附近及电网断线触地点 10 m 以内的地面。如必须通过可能存在跨步电压的区域时,可采用单脚站立或双脚并拢蹦跳的方式行进。

(3) 雷击触电。雷击触电是雷雨云对地面上的突出物产生放电造成的触电,它是一种特殊的触电方式。雷击感应电压高达几十万至几百万伏,其能量可以把建筑物摧毁,使可燃物燃烧,把用电设备击穿、烧毁,造成人身伤亡,危害性极大。目前,一般通过避雷设施将强大的电流引入地下以避免雷电的危害。

#### 2.1.2.2 触电急救及触电预防

触电急救的基本原则是动作迅速、方法正确。当发现有人触电时,除应及时呼救、报警、求援外,还应当使触电者迅速脱离电源,就近断开电源开关。若触电场所距离电源开关较远,可用有绝缘柄的电工钳或木柄干燥的斧头切断电线,断开电源;或用干木板等绝

缘物插入触电者身下,以隔断电流通路。当电线搭落在触电者身上或被压在触电者身下时,可用干燥的衣服、手套、绳索及木棒等绝缘物作工具,拉开触电者或拉开电线,使触电者迅速脱离电源。

触电者脱离电源后,应立即将其抬到空气流通良好的地方静卧休息。若触电者呼吸困难,有痉挛现象,甚至呼吸、心跳停止,要马上实施人工呼吸等心肺复苏抢救措施,并请医生及时诊治。注意千万不要给触电者打强心剂、拼命摇动触电者、强行扶触电者行走,这样会使触电者的情况恶化。

触电事故的发生,大多数是由于不重视安全用电、违反操作规程而引起的。因此要预防触电须做好以下工作:

(1)合理使用安全工具,遵守操作规程。专业人员在安装检修电气设备时,应先切断电源,切勿带电操作。必须使用试电笔等验电工具检测设备或导线等是否带电,切不可用手触摸测试。

操作电气设备时,应穿绝缘良好的胶底鞋、塑料鞋。在配电屏等电气设备周围的地面上,应放置干燥木踏板或橡胶垫。

(2)正确使用和安装电气设备或器材。各种电气设备和器材都有其规定的适用范围,导线和保险丝等都有一定的规格,必须合理选择和正确使用。电气设备都应装设必要的保护装置,如熔断器、自动开关、漏电保护器等。当设备发生短路、漏电或人身触电时,要能及时自动切断电源。电气设备的金属外壳一定要确保良好接地或保护接零。照明线路的开关应装在火线上,不应装在零线上。

(3)定期检修电气设备,防止绝缘部分破损或受潮。对于正常情况下带电的导体,应保持其绝缘良好,并定期检查。对家用电器以及移动式电器如手提灯、手电钻等,其电源线有破损老化时要及时更换。外露的电线接头处要用黑胶布、塑料胶带等绝缘材料包扎牢固。为防止电线受损,严禁在导线上挂东西或将导线挂在铁钉上等。

(4)对于有操作人员经常接触的电气设备,应使用 36 V 以下的安全电压。

(5)不靠近高压带电体。

## 2.2 传感器技术

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重要构成元件,被视为当今科学技术发展的关键性技术之一,越来越受到人们的高度重视。学习传感器的类型、原理及应用,对于生产工程中的自动化控制、自动测试、控制和智能化发展,以及人类观测和研究自然界事物的深度和广度,都有重要的实际意义。

### 2.2.1 传感器的基本概念及组成

#### 2.2.1.1 传感器的定义

一般来说,传感器是把被测物理量按一定规律转换成便于处理和传输的另一种物理量(通常为电量)的装置,是信息检测的必要工具,也是生产自动化、科学测试、计量核算、监测诊断等系统中不可缺少的基础环节,在工程实际中俗称测量头、检测器等,也被称作一次仪表。

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,其性能直接影响着整个测量系统,对测量精度起着决定性的作用。

工程中常用的传感器种类繁多,往往一种物理量可用多种类型的传感器来测量,而同一种传感器也可以用于测量多种物理量。本节将介绍位移传感器、速度检测传感器、加速度传感器、力和压力传感器及其常用显示仪器仪表。

### 2.2.1.2 传感器的基本组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成,如图 2.1 所示。

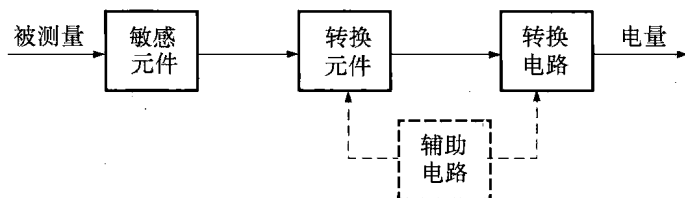


图 2.1 传感器组成框图

(1)敏感元件(预变换器) 直接感受被测量(一般为非电量)并将其转换为与被测量有确定关系、易变成电量的其他量(包括电量)的元件,如机械类传感器中的弹性敏感元件。

(2)转换元件(变换器) 能将某些物理量直接转换为与之有确定关系的电量的元件,如压电晶体、热电偶等。

(3)转换电路 将电路参数量转换成便于测量的电量,如电压、电流、频率等。常用的转换电路有电桥、放大器、变阻器、振荡器等。

辅助电路通常包括电源,多用于无源传感器,并非所有传感器都有。

实际的传感器,有的很简单,有的则较复杂。有些传感器(如热电偶)只有敏感元件,感受被测量时直接输出电动势;有些传感器由敏感元件和转换元件组成,无需基本转换电路,如压电式加速度传感器;有些传感器由敏感元件和基本转换电路组成,如电容式位移传感器;有些传感器的转换元件不止一个,要经过若干次转换才能输出电量。大多数传感器是开环系统,但也有个别是带反馈的闭环系统。

### 2.2.2 传感器的分类

用于测控技术的传感器种类繁多,一种被测参量可以用不同类型的传感器来测量,而同一原理的传感器通常又可以测量多种非电量,因此传感器分类方法各不相同。根据传感器的输入和输出功能可以有以下两类分类法。

#### 2.2.2.1 按输入量分类

按输入量可以将传感器分为温度、压力、位移、速度、湿度等传感器,这样可以很方便地根据测量对象来选择所需要的传感器。

#### 2.2.2.2 按输出量分类

按输出量的不同,我们可以很直观地将传感器分为参数式传感器和发电式传感器两类。将输入的工程参数变化对应地转变为电参数变化的传感器称为参数式传感器,常用

的有电阻式、电感式和电容式三种类型。这种传感器由于在工作时其本身没有内在能量的转换而不能产生电信号输出,故常常也被称为无源传感器。将输入的工程参数信号直接转变为电信号输出的传感器称为发电式传感器,常用的有压电式、磁电式、光电式、霍尔式以及热电式等基本类型。与参数式传感器的工作原理相反,发电式传感器在工作时其本身就有内在能量的转换,且能够产生电信号输出,故它常常也被称为有源传感器。

### 2.2.3 位移传感器

机械位移的测量是一种最基本的测量工作,它的特性是用来测量空间距离的大小。位移按特征可分为线位移和角位移,线位移是指机构沿着某一条直线移动的距离,角位移是指机构沿着某一定点转动的角度。

常用的位移传感器有电阻式位移传感器、电容式位移传感器、电感式位移传感器、光电式位移传感器、感应同步器、光栅以及磁栅、激光位移传感器等。

电容式位移传感器、差动电感式位移传感器和电阻应变式传感器一般用于小位移的测量(几微米到几毫米);差动变压器式传感器适用于中等位移的测量,这种传感器在工业测量中应用得最多;电阻电位器式传感器适用于较大范围位移的测量,但精度不高;感应同步器、光栅、磁栅、激光位移传感器等适用于精密检测系统的位移测量,测量精度高,量程可达到几米。

#### 2.2.3.1 电容式位移传感器

电容式位移传感器是以电容器为敏感元件,将机械位移量转换为电容器电容量变化的一种传感器。其特点是结构简单、分辨率高、工作可靠、动态响应好,可实现非接触测量,能在恶劣环境条件下工作,主要用于位移、液位等方面的测量。

电容式传感器可由任何类型的电容器作为传感器,但最常用的是由平行极板构成的以空气为介质的电容器,有时也采用由两同轴圆筒或其他形状平行面组成的电容器。因此,电容式传感器的工作原理可用平行板电容传感器来说明,如图 2.2 所示。当不考虑边缘电场影响时,其电容  $C$  为

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta} \quad (2.1)$$

式中,  $S$  为极板的遮盖面积,单位为  $\text{m}^2$ ;  $\epsilon$  为极板间介质的介电常数;  $\delta$  为两平行极板间的距离,单位为  $\text{m}$ 。

由式(2.1)可知,平行板电容器的电容量  $C$  与电容器的  $S$ 、 $\epsilon$ 、 $\delta$  三个结构参数有关,只要改变这三个参数中的任何一个,就可以改变电容器的电容量。因此,电容式传感器可分为变间距型( $\delta$  变化)、变面积型( $S$  变化)、变介电系数型( $\epsilon$  变化)三种。

当被测量的变化使电容器中任何一个参数产生变化而引起电容变化时,只要通过一定的测量电路将电容变化转变成电压、电流、频率等信号输出,根据该信号的大小,就可以测定运动物体位移的大小。通过改变电容器的不同参数,可以制成三种不同类型的电容式传感器。

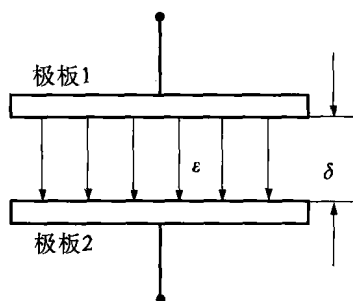


图 2.2 平行板电容传感器

(1) 变极板间距型 一般用于测量微小的线位移(可小至  $0.01 \mu\text{m}$ ), 其灵敏度较高, 易于实现非接触测量, 因而应用较为普遍。

由式(2.1)可知, 若平行极板的间距  $\delta$  发生变化(如增大), 由初始距离  $\delta_0$  变化到  $\delta_0 + \Delta\delta$ , 电容量也发生相应的变化(变小), 如图 2.3 所示, 由式(2.1)对  $\delta$  求导得

$$\frac{\Delta C}{\Delta\delta} = \frac{dC}{d\delta} = -\frac{\epsilon S}{\delta^2} \quad (2.2)$$

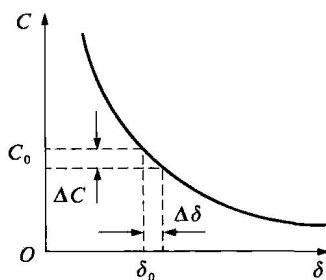


图 2.3 C- $\delta$  特性曲线

通常我们也将  $k = \frac{\Delta C}{\Delta\delta}$  称作电容传感器的灵敏度, 可以

看出, 灵敏度  $k$  与  $\delta^2$  成反比, 极距越小灵敏度越高。显然,  $\delta^2$  将引起非线性误差, 为了减小这一误差, 通常规定传感器只能在较小的极距变化范围内工作(即测量范围小), 以便获得近似的线性关系, 一般取极距的变化范围为  $\Delta\delta/\delta_0 \approx 0.1$ , 在实际使用变间距电容式传感器时, 为了提高其灵敏度及线性工作范围, 减小各种外界干扰, 在结构上常采用差动配置方式, 其结构如图 2.4 所示, 中间一片极板为动片, 两边的极板是定片。当动片受被测量作用发生移动距离  $\Delta\delta$  后, 上下两对极板间距离分别为  $\delta_0 + \Delta\delta$  和  $\delta_0 - \Delta\delta$ , 这样造成差动平行极板电容器的电容量变化为

$$\Delta C = \frac{\epsilon S}{\delta_0 - \Delta\delta} - \frac{\epsilon S}{\delta_0 + \Delta\delta} = \frac{2\epsilon S \Delta\delta}{\delta_0^2 - \Delta\delta^2} \quad (2.3)$$

当极板间距  $\Delta\delta$  变化很小时, 可以近似地认为该传感器的灵敏度为  $k = \frac{\Delta C}{\Delta\delta} = \frac{2\epsilon S}{\delta_0^2}$ 。可见, 这种差动电容器与适当的测量电路配合不仅可以改善系统输出的非线性, 提高线性范围, 而且灵敏度也比简单的电容器提高了一倍。

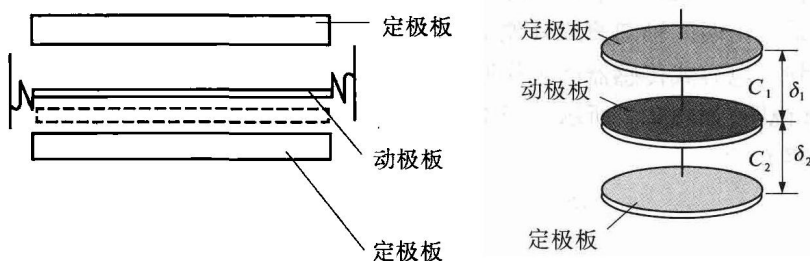


图 2.4 差动变极板间距电容式传感器

(2) 变极板工作面积型 变极板工作面积型电容传感器可用于测量线位移及角位移(适用于较大的直线位移及角位移)。图 2.5 所示为两种变面积型传感器的测量原理图。当平行板受被测量作用发生移动时, 两极板间面积发生变化, 相应电容量也会发生变化, 其灵敏度为

$$k = \frac{\Delta C}{\Delta S} = \frac{dC}{dS} = \frac{\epsilon}{\delta} \quad (2.4)$$

由式(2.4)可知, 变面积型的电容传感器的输出特性是线性的。