

机械电子工程
学校
等高等

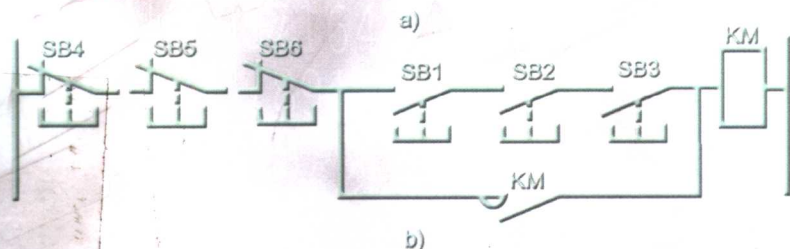
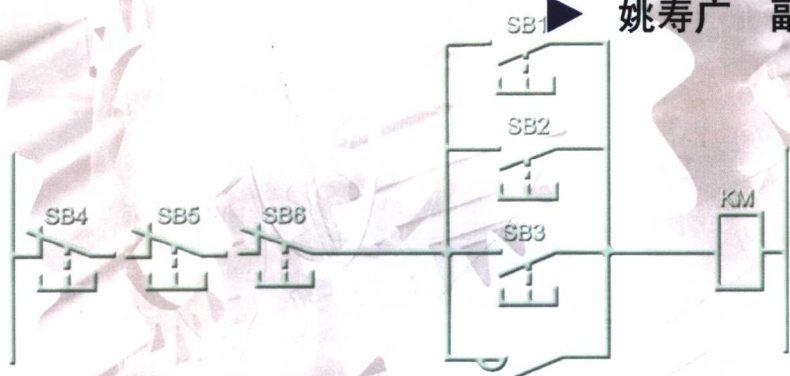
规划教材

机电

传动控制

▶ 芮延年 主编

▶ 姚寿广 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TM921.5

37

高等学校机械电子工程规划教材

机电传动控制

主 编 芮延年
副主编 姚寿广
参 编 张晓超 赵连生 徐汀荣
主 审 姜培刚

机械工业出版社

本书是根据机电类控制专业课程教学大纲要求而编写的,属于专业基础课。它从机电传动控制技术这一观点出发,先后介绍了“概述”、“机电传动的数学模型”、“传感器技术”、“继电器接触控制系统设计”、“新型驱动器及其控制”、“可编程序控制器原理”、“单片微型计算机原理”和“机电传动控制设计范例”等理论知识。

本书内容丰富、叙述深入浅出,不但可作为高等院校机械工程、电气工程、电子工程等相关专业教材或参考书,也可供从事机电传动的工程技术人员参考(全书约50万字、安排45~50个学时)。

图书在版编目(CIP)数据

机电传动控制/芮延年主编. —北京:机械工业出版社, 2006.6
高等学校机械电子工程规划教材
ISBN 7-111-19136-6

I. 机... II. 芮... III. 电力传动控制设备—高等学校—教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第047314号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:高文龙 版式设计:冉晓华 责任校对:李秋荣
封面设计:陈沛 责任印制:杨曦
北京机工印刷厂印刷
2006年7月第1版第1次印刷
184mm×260mm·18.75印张·460千字
定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
编辑热线电话(010)88379711
封面无防伪标均为盗版

高等学校机械电子工程规划教材编委会

主任：谢存禧

副主任：贾建援 熊诗波 孔祥东 高文龙

秘书：林颖

委员：谢存禧 贾建援 熊诗波 孔祥东 高文龙

芮延年 隋秀凜 孟宪颐 李强 张河新

赵学增 刘志峰 方庆涓

前 言

“机电传动控制”课程是机械工程专业的一门必修的专业基础课，它是机电一体化人才所需电知识结构的躯体。它以机械工程和电气工程以及控制工程等学科为支撑，是交叉学科的产物。这种多学科交叉的特点对新时期工科大学的学生提出了新的要求，即要求他们不但要懂机械又要懂控制，而且能将机和电有机的结合起来，去满足社会发展对从事机电一体化系统控制工作需要的人才。

在教材编写中我们注重了内容和体系的改革，以机电传动控制系统设计为主线，着重于机电结合、机电控制，把多门课程的内容用一种新的体系组织起来，在理论和实际应用之间架起一座桥梁。由浅入深地介绍了“机电传动的数学模型”、“传感器技术”、“新型驱动器及其控制”、“继电器接触控制系统设计”、“可编程序控制器原理”、“单片微型计算机原理”等理论知识，并通过机电传动控制设计范例使读者系统的、全面的了解和掌握“机电传动控制”基本原理与方法，为今后设计、开发新的机电控制系统或装备奠定好技术基础。

本书注重系统性，书中内容涵盖了整个机电系统所涉及的各个知识点，并通过大量实例分析，使读者能对相关知识融会贯通。本书同时吸收了近年来机电传动控制领域的最新研究成果，注重先进性与实用性。

全书分为8章，主要涉及内容如下：

第一章“概论”。主要介绍机电传动控制系统基本概念及系统设计的基本方法。

第二章“机电传动的数学模型”。主要介绍机电传动控制系统设计中数学模型的概念、机械传动系统、电气传动系统以及机电系统相似模型系统的数学建模方法。

第三章“传感器技术”。主要介绍常用传感器工作原理及接口设计技术。

第四章“继电器接触控制系统设计”。主要介绍继电器接触控制系统的设计方法与技巧。

第五章“新型驱动器及其控制”。主要介绍步进电动机、伺服电动机、直线电动机的工作原理及基本控制方法。

第六章“可编程序控制器原理”。主要介绍可编程序控制器（PLC）的基本原理、指令系统和编程技术与方法。

第七章“单片微型计算机原理”。主要介绍单片机基本原理、单片机扩展与接口技术。

第八章“机电传动控制设计范例”。主要通过产品开发设计实例，介绍机电传动控制系统的设计方法。

本书的第一、二、四、八章由芮延年教授编写；第三、五章由张晓超老师、姚寿广教授编写；第六、七章由赵连生教授、徐汀荣教授编写。全书由芮延年教授统稿，姜培刚教授主审。

本书在编写过程中参阅了国内外同行的教材、参考书、手册和期刊文献，在此谨致谢意。蒋晓梅、董桂岩、朱如春、赵葵、陈冶湘、刘鑫培、袁曾燕、陈志强、陈欢等研究生为

本书的插图、整理做了大量工作，在此表示衷心的感谢！

由于时间仓促，加上作者水平有限，错漏及不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

《机电传动控制》

授课教师使用意见反馈表

学 校	姓 名	职 称	使 用 量
邮编及电话	地 址	E-mail	授课时间

对使用教材的意见

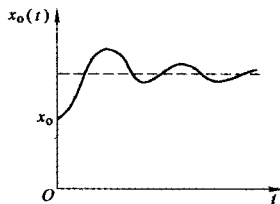
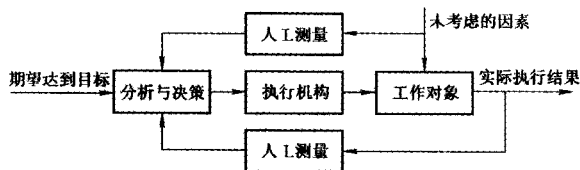
- (字数) 篇幅
- 体系安排
- 内容选材
- 对教材立体化建设、多媒体开发的意见
- 重要修改意见
- 总体评价

责任编辑：高文龙
机械工业出版社高教分社

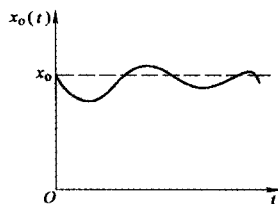
联系电话：010-88379730
地址：北京百万庄大街 22 号 (100037)

目 录

前言	
第一章 概述	1
第一节 机电传动控制的目的和任务	1
第二节 机电传动控制系统的发展	1
第三节 机电传动控制系统的基本要素和功能	3
第四节 控制系统的基本概念	5
第五节 机电传动控制系统的设计方法	12
习题与思考题	14
第二章 机电传动控制的数学模型	15
第一节 概述	15
第二节 机械传动系统数学模型	20
第三节 电气传动系统数学模型	24
第四节 机电系统相似模型	28
第五节 机电一体化系统模型	33
习题与思考题	38
第三章 传感器技术	39
第一节 概述	39
第二节 位移传感器	42
第三节 速度与加速度传感器	53
第四节 力、压力和扭矩传感器	55
第五节 位置传感器	59
第六节 红外与图像传感器	61
习题与思考题	69
第四章 继电接触控制系统设计	70
第一节 常用低压电器	70
第二节 电气控制线路设计的基本内容	92
第三节 电动机控制电路设计	105
第四节 常用控制电器的选用	131
思考题与习题	138
第五章 新型驱动器及其控制	139
第一节 步进电动机驱动与控制	139
第二节 伺服电动机与控制	148
第三节 直线电动机	159
思考题与习题	165
第六章 可编程序控制器原理	166
第一节 概述	166
第二节 PLC的基本构成	169
第三节 PLC的指令系统和编程	178
第四节 FX系列PLC梯形图中的编程元件	180
第五节 FX系列PLC的常用逻辑指令	184
第六节 可编程序控制器控制系统设计	197
第七节 开关量控制系统梯形图设计方法	200
第八节 顺序控制梯形图设计方法	209
习题与思考题	221
第七章 单片微型计算机原理	222
第一节 概述	222
第二节 单片机的应用和发展	223
第三节 MCS-51单片机的组成及工作原理	224
第四节 MCS-51单片机的指令系统	234
第五节 单片机的中断系统	238
第六节 单片机的外部存储器扩展	252
第七节 单片机输入输出存储器的扩展	256
习题与思考题	263
第八章 机电传动控制设计范例	264
第一节 概述	264
第二节 机械手自动控制的设计	267
第三节 变频恒压供水控制系统的设计	271
第四节 机械预缩量预缩量的控制设计	281
习题与思考题	288
参考文献	289



a)



b)

第一章

概 述

第一节 机电传动控制的目的和任务

机电传动控制又称电力传动控制或电力拖动控制，它的基本目的是将电能转化为机械能，并通过对其控制完成生产工艺过程的要求。

在现代工业中，为了实现生产过程自动化的要求，机电传动不仅包括拖动生产机械的电动机，而且还包含控制电动机的一整套控制系统，也就是说，现代机电传动控制是由各种传感与检测元件、信息处理元件和控制元件组成的自动控制系统。从现代化生产的要求来说，机电传动控制系统所要完成的任务，从广义上讲，就是要使生产机械设备、生产线、车间，甚至整个工厂都实现自动化。

随着科学技术的发展，对机电传动控制系统提出了愈来愈高的要求，例如，新一代 CNC 系统就是以“高速化、高精度、高效率、高可靠性”为满足生产急需而诞生的。它采用 32 位或者 64 位 CPU 结构，以多总线连接，高速数据传递。因而，在相当高的分辨力 ($0.1\mu\text{m}$) 情况下，系统仍有高速度 ($100\text{m}/\text{min}$)，可控铣削加工中心及联动坐标达 16 轴，并且有丰富的图形功能和自动程序设计功能。如瑞士米克朗五轴联动的主轴转速最高可达到 $45000\text{r}/\text{min}$ ，重复定位精度 $1\mu\text{m}$ 。用于电子元件贴装的高速贴片机的贴片速度可达到 $2000\text{片}/\text{min}$ 。又如法国 IBAG 公司的磁悬浮轴承支承的高速主轴最高转速可达 $15 \times 10^4\text{r}/\text{min}$ ；加工中心换刀速度快达 1.5s 等高性能都是依靠机电传动控制来实现的。

第二节 机电传动控制系统的发展

自从以电动机作为原动机以来，伴随着机电传动控制技术的发展，机电传动控制技术的

发展经历了以下几个阶段：

一、继电器接触器控制

最早的自动控制是 20 世纪 20~30 年代出现的传统继电器接触器控制，它可以实现对控制对象的启动、停车、调速、自动循环以及保护等控制。该方式优点是所使用的控制器件结构简单、价廉、控制方式直观、易掌握、工作可靠、易维护等特点，因此，在设备控制上得到了广泛的应用。但是，经过长期使用，人们发现这种控制方式存在不足之处，那就是体积大、功耗大、控制速度慢、改变控制程序困难。由于是有触点控制，在控制系统复杂时可靠性降低。所以，不适合对生产工艺及流程经常变化的控制要求。

二、顺序控制器控制

20 世纪 60 年代，随着半导体技术的发展，出现了顺序控制器。它是继电器和半导体元件综合应用的控制装置，具有程序改变容易、通用性好等优点，被广泛用于组合机床、自动生产线上。后来随着微电子技术和计算技术的发展，电气控制技术出现了两个分支：即可编程序控制器和数字控制技术，今天它们已成为典型的机电一体化技术和产品。

三、可编程序控制器（PLC）

可编程序控制器又简称为 PLC，是计算机技术与继电器接触器控制技术相结合的产物。它是以微处理器为核心，顺序控制为主的控制器，不仅具有顺序控制器的特点，而且具有微处理器的运算功能。PLC 的设计以工业控制为目标，因而具有功率级输出、接线简单、通用性好、编程容易、抗干扰能力强、工作可靠等一系列优点。它一问世就以强大的生命力，大面积地占领了传统的控制领域。PLC 的一个发展方向是微型、简易、价廉，以适应单机控制和机电一体化相结合的控制，使 PLC 更广泛地取代传统的继电器控制；而它的另一个发展方向是大容量、高速、高性能，实现 PLC 与管理计算机之间的通信网络，形成多层分布控制系统，对大规模复杂控制系统能进行综合控制。

四、数字控制技术（NC）

电气控制技术发展的另一个分支为数字控制技术，它是通过数控装置（专用或通用计算机）实现控制的一种技术，它最典型的产品就是数控机床。它集高效率、高柔性、高精度于一身，特别适合多品种、小批量的加工自动化。最初的数控装置实质上是一台专用计算机，由固定的逻辑电路来实现专门的控制运算功能，可以实现插补运算。

在数字控制的基础上，又出现了以下几种高级的电气控制方式。

五、计算机数字控制技术（CNC）

CNC 又称微机数字控制技术，它是将数控装置的运算功能采用小型通用计算机来实现，运算功能更强，加工中心机床就是采用这种控制技术。

六、加工中心机床（MC）

加工中心机床是采用计算机数字控制技术，集铣床、镗床、钻床三种功能于一体的加工机床。它配有刀库和自动换刀装置，大大地提高了加工效率，是多工序自动换刀数控机床。

七、自适应数控机床（AC）

自适应数控机床可针对加工过程中，加工条件的变化（材料变化、刀具磨损、切削温度变化等），做自动适应调整，使加工过程处于合理的最佳状态。自适应数控机床是基于最优控制及自适应控制理论，可在扰动条件下实现最优。

八、柔性制造系统（FMS）

柔性制造系统将一群数控机床与工件、刀具、夹具以及自动传输线、机器人、运输装置相配合，并由一台中心计算机（上位机）统一管理，使生产多样化，生产机械赋予柔性，可实现多级控制。FMS 是适应中小批量生产的自动化加工系统，有些较大的 FMS 是由一些很小的 FMS 组成，而这些较小的 FMS 系统就称为柔性加工单元。

九、计算机集成制造系统 (CIMS)

柔性制造系统虽具有柔性，但不能保证“及时生产”（边设计边生产），因为缺少计算机辅助设计等环节。在柔性制造系统基础上，再加上计算机辅助环节，使设计与制造一体化，便形成了集成制造系统。它是用计算机对产品的初始构思设计、加工、装配和检验的全过程实行管理，从而保证生产既多样化，又能“及时生产”，从而使整个生产过程完全自动化。CIMS 是根据系统工程的观点将整个车间或工厂作为一个系统，用计算机对产品的设计、制造、装配和检验的全过程实行管理和控制。因此，只要对 CIMS 系统输入所需产品的有关信息和原始材料，就可以自动地输出经过检验合格的产品。可以说 CIMS 是机电传动控制发展的方向。

综上所述，可以看到当今的机电传动控制技术是微电子、电力电子、计算机、信息处理、通信、检测、过程控制、伺服传动、精密机械及自动控制等多种技术相互交叉、相互渗透、有机结合而成的一种机电一体化综合性技术。

第三节 机电传动控制系统的基本要素和功能

虽然随着机电传动系统的要求不同，其控制系统也不同。但是归纳起来，它们通常是由五大要素与功能组成的，即由机械装置（结构功能）、执行装置（驱动功能和能量转换功能）、传感与检测装置（检测功能）、动力源（运转功能）、信息处理与控制装置（控制功能）五部分组成，如图 1-1 所示。

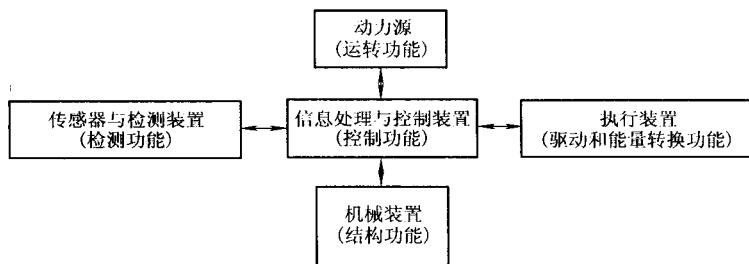


图 1-1 控制系统五大要素与功能

一、机械装置（结构功能）

机械是由机械零件组成的、能够传递运动并完成某些有效工作的装置。机械由输入部分、转换部分、传动部分、输出部分及安装固定部分组成。通用的传递运动的机械零件有齿轮、齿条、链条、链轮、蜗杆、蜗轮、带、带轮、曲柄及凸轮等。两个零件互相接触并相对运动就形成了运动副。由若干运动副组成的具有确定运动的装置称为机构。就传动而言，机构就是传动链。

为了实现机电传动控制系统整体最佳的目标，从系统动力学方面来考虑，传动链越短越

好。因为在传动副中存在“间隙非线性”，根据控制理论的分析，这种间隙非线性会影响系统的动态性能和稳定性。另外，传动件本身的转动惯量也会影响系统的响应速度及系统的稳定性。在数控机床中之所以存在“半闭环控制”，其原因就在于此。

据此，提出了“轴对轴传动（d-d 传动）”，如电动机直接传动机床的主轴，轴就是电动机的转子，从而出现了各种电主轴。这对执行装置提出了更高的要求：如机械装置、执行装置及驱动装置之间的协调与匹配问题。必须保留一定的传动件时，应在满足强度和刚度的前提下，力求传动装置细、小、巧，这就要求采用特种材料和特种加工工艺。

二、执行装置（驱动功能和能量转换功能）

执行装置包括以电、气压和液压等作为动力源的各种元器件及装置。例如，以电作为动力源的直流电动机、直流伺服电动机、三相交流异步电动机、变频三相交流电动机、三相交流永磁伺服电动机、步进电动机、比例电磁铁、电磁粉末离合器/制动器、电动调节阀及电磁泵等；以气压作为动力源的气动马达和气缸；以油压作为动力源的液压马达和液压缸等。

选择执行装置时，要考虑执行装置与机械装置之间的协调与匹配，如在需要低速、大推力或大扭矩的场合下，可考虑选用液压缸或液压马达。

为了实现机电控制系统整体最佳的目标，实现各个要素之间的最佳匹配，已经研制出将电动机与专用控制芯片、传感器或减速器等合为一体的装置，如德国西门子公司的变频器与电动机一体化的高频电机，日本东芝公司的电动机和传感器一体化的永磁电动机等。

近年来，出现了许多新型执行装置，如压电执行器、超声波执行器、静电执行器、机械化学执行器、光热执行器、光化学执行器、磁致伸缩执行器、磁性流体执行器、形状记忆合金执行器等。特别是一些微型执行器的出现，如直径为 0.1mm 的静电执行器，这些新的机电传动技术的出现大大促进了微电子机械的发展。

三、传感器与检测装置（检测功能）

传感器是从被测对象中提取信息的器件，用于检测机电控制系统工作时所要监视和控制的物理量、化学量和生物量。大多数传感器是将被测的非电量转换为电信号，用于显示和构成闭环控制系统。

传感器的发展趋势是数字化、集成化和智能化。为了实现机电传动控制系统的整体优化，在选用或研制传感器时，要考虑传感器与其他要素之间的协调与匹配。例如，集传感检测、变送、信息处理及通信等功能为一体的智能化传感器，已广泛用于现场总线控制系统。

四、动力源（运转功能）

动力或能源是指驱动电动机的“电源”、驱动液压系统的液压源和驱动气压系统的气压源。驱动电动机常用的“电源”包括直流调速器、变频器、交流伺服驱动器及步进电动机驱动器等。液压源通常称为液压站，气压源通常称为空压站。使用时应注意动力与执行器、机械部分的匹配。

五、信息处理与控制装置（控制功能）

机电传动控制系统的核心是信息处理与控制。机电传动控制系统的各个部分必须以控制论为指导，由控制器（继电器、可编程控制器、微处理器、单片机、计算机等）实现协调与匹配，使整体处于最优工况，实现相应的功能。在现代机电一体化产品中，机电传动系统中控制部分的成本已占总成本的 50%。特别是近年来微电子技术、计算机技术的迅速发展，目前，越来越多的控制器使用具有微处理器、计算机的控制系统，输入/输出、通信功能也

越来越强大。

第四节 控制系统的基本概念

一、控制系统的基本工作原理

控制系统通常由控制装置（控制器）和被控对象两大部分组成。其中被控对象是指系统中需要加以控制的机器、设备或生产过程；控制器是指能够对被控对象产生控制作用的设备总体。控制系统的任务就是使被控制的物理量按照预先给定的控制规律变化。控制系统的控制有人工控制和自动控制。

如果控制的任务是直接由人工来完成的话，那么就称为人工控制，如图 1-2 所示。

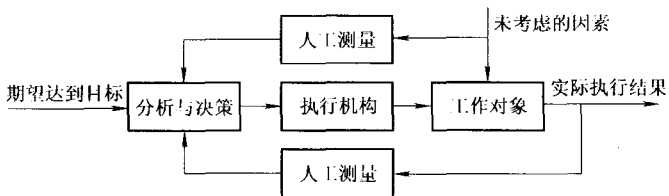


图 1-2 人工控制系统框图

如果控制的任务是在没有人直接参与的情况下由一些自动控制装置来完成的话，那么就称为自动控制。用技术装置和工程描述语言对图 1-2 进行替换，就得到如图 1-3 所示的自动控制系统框图。

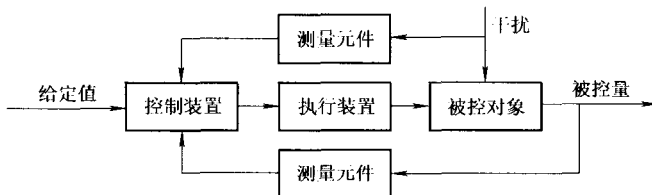


图 1-3 自动控制系统框图

通常工作对象对应被控对象；实际执行结果对应被控量；期望达到目标对应给定量；分析与决策对应实现比较/计算功能的控制器或计算机系统；调整机构对应测量元件或传感器及变速装置；执行机构对应操纵改变被控对象物理参量的执行器。

从图 1-2 和 1-3 中可以看出：控制装置应具备的三种基本功能是：测量、计算、执行，分别由相应的元器件来完成；系统控制的来源有三个，即给定量、干扰、被控量，是完成控制的主要依据。通过以上的分析，可以得出了自动控制的三种基本方式：按给定量进行操纵、测量元件将误差反馈给控制装置，控制装置按干扰造成的偏差进行补偿控制。其中无反馈补偿控制装置的系统为开环控制方式，有反馈补偿控制装置的系统属于闭环控制方式。下面以实例来分别介绍这两种控制方式以及特点。

1. 开环控制系统

如果系统的输出量和输入量之间没有反馈作用，输出量对系统的控制过程不发生影响时，这样的系统称为开环控制系统。图 1-4 是数控线切割机的进给系统，由输入装置产生的

输入电信号 x_i 经控制器的处理、计算发出脉冲信号控制步进电动机的转角，再经过齿轮传动及丝杠螺母驱动工作台作直线运动。该系统中对工作台的实际位移没有测量，更没有把输出量反馈到控制器中去，系统只是单方向的依一定的程序或规律实现控制，对应于每一个输入量有一个输出量，因而该系统是一个开环控制系统。这个系统工作台的位移精度取决于输入信号和组成系统的各环节的工作精度，而各种干扰因素也将对其有明显的影

响。开环控制系统的职能框图如图 1-5 所示。开环控制系统具有一些优点，如系统结构比较简单、成本低、响应速度快、工作稳定。但是，当系统输出量有了误差时系统无法自动调整。因此，如果系统的干扰因素和元件特性变化不大，或可预先估计其变化范围并可预先加以补偿时，采用开环控制系统具有一定的优越性，并能达到相当高的精度。

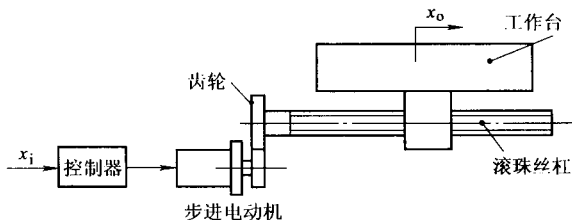


图 1-4 数控线切割机的进给系统图



图 1-5 开环控制系统的职能框图

2. 闭环（反馈）控制

如果系统的输出量与输入量之间具有反馈联系，即输出量对系统的控制过程有直接影响，这样的系统称为闭环控制系统。

反馈是指对系统的被控制量进行测量，并加以处理（取其一部分或全部信息等）后，再返回输入端与系统给定量进行比较的过程。如果反馈量对给定量起增强作用，则称为正反馈；反之，如果反馈量对给定量起减弱作用，则称为负反馈。通常，控制系统采用负反馈。基于负反馈基础上的“检测偏差并用以消除偏差”的控制原理，称为反馈控制原理。这种系统的信号传递路线构成闭合回路（闭环），利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。下面我们通过几个例子来说明闭环（反馈）控制方式。

(1) 炉温闭环（反馈）控制系统 炉温闭环（反馈）控制系统的工作原理如图 1-6 所示。其控制任务是使炉温保持恒定。

该系统的控制原理如下：假设系统在开始工作时，经过事先设定，这时炉温正好等于设定温度，此时与炉温相应的电压 U_i 与设定温度相应的电压 U_r 相等，即 $U_i = U_r$ ，故 $\Delta U = 0$ ，电动机、阀门都静止不动，燃油流量保持不变，燃油炉处于恒温状态，保持设定温度。

如果这时负载（工件的数目）突然增大或燃油流量减小，则炉温开始下降，经过热电偶转换得到的与炉温相应的电压 U_i 变化会减小，故 $\Delta U > 0$ （ ΔU 是个很小的量，不

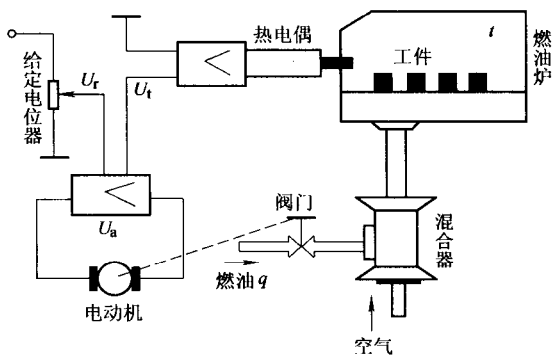


图 1-6 炉温闭环（反馈）控制系统的工作原理图

足以启动电动机。因此经过放大器放大为 U_a 启动电动机正转，使阀门开度增大，从而增加燃油流量，炉温渐渐回升，直至重新等于设定温度（此时 $U_i = U_r$, $\Delta U = 0$ ）。可见该系统在负载增大的情况下仍能保持设定温度。

再来看看相反的情况。如果负载（工件的数目）突然减小或燃油流量增大，则炉温开始上升，经过热电偶转换得到与炉温相对应电压 U_i 的变化也会随之增大，故 $\Delta U < 0$ ，电动机反转，使阀门开度减小，从而减小燃油流量，炉温渐渐下降，直至重新等于设定温度（此时， $U_i = U_r$, $\Delta U = 0$ ）。可见系统在此情况下也能保持设定温度。

通过以上对该系统控制原理的分析不难得出以下结论：该系统是通过测量炉温与给定温度的偏差值来进行控制工作的，故称为按偏差调节的控制系统。同时也能明确：该系统的被控对象是燃油炉；被控量是炉温；设定装置是给定电位器；测量变送装置是热电偶；干扰是负载大小、环境温度、燃油压力等；执行装置是电动机、阀门。由此可得到如图 1-7 所示的炉温控制系统原理框图。

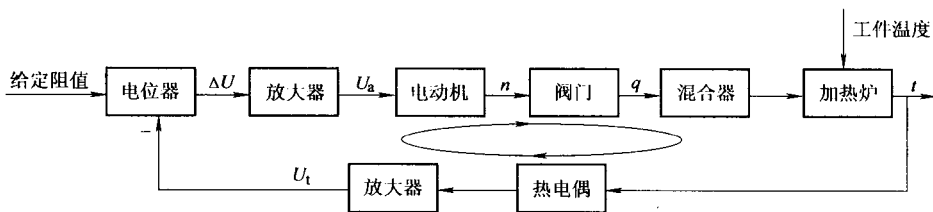


图 1-7 炉温控制系统原理框图

在图 1-7 中，系统所传递的信号存在一个如图所示的闭合回路，而且反馈信号经过变换后与给定信号相减以便得到偏差信号，所以这类反馈（将检测出来的输出量送回到系统的输入端，并与输入信号比较的过程称为反馈）又称为负反馈。

(2) 液位控制系统 液位控制系统的工作原理如图 1-8 所示。其控制任务是使水池的液位保持恒定。先进行系统控制原理分析：假设经过事先设定，系统在工作开始时液位 h 正好等于设定高度 H , $\Delta h = 0$, 浮子带动连杆位于电位器 0 电位，故电动机、阀门 L_1 都静止不动，进水量保持不变，液面高度 h 保持在设定高度 H 。

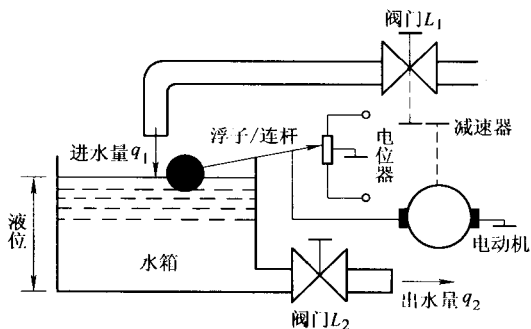


图 1-8 液位控制系统工作原理图

如果这时由于阀门 L_2 突然开大，出水量增大，则液位开始下降， $\Delta h > 0$ ，经过浮子测量，此时连杆上移，电动机正转，使阀门 L_1 开度增大，从而增加进水量，液位渐渐上升，直至重新等于设定高度。如果这时由于阀门 L_2 突然关小，出水量减小，则液位开始上升， $\Delta h < 0$ ，经过浮子测量，此时连杆下移，电动机反转，使阀门开度减小，从而减少进水量，液位渐渐下降，直至重新等于设定高度。可见系统在此两种情况下都能保持设定高度。

通过以上分析可以得出：此系统是通过测量液面实际高度与设定液面高度的偏差值来进行控制工作的，也是按偏差调节的控制系统。同时也能明确：该系统的被控对象是水箱；被

量是液面高度；设定装置是电位器；测量变送装置是浮子/连杆；干扰是出水量；执行装置是电动机、减速器、阀门 L_1 。这样就得到了图 1-9 所示的液位控制系统的原理框图。从图 1-9 可以看出液位控制系统也存在负反馈环节。

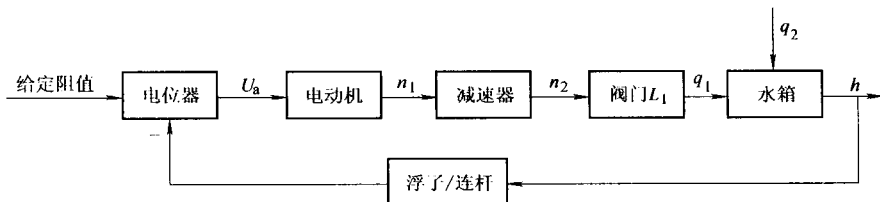


图 1-9 液位控制系统原理框图

3. 复合控制系统

如果在输出和输入之间同时存在开环控制和闭环控制的系统，称为复合控制系统。它实质上是在闭环控制系统的基础上，用开环通路提供一个补偿的输入作用，如图 1-10 所示。这种系统兼有开环和闭环两种系统的优点，因而可大大提高系统的性能。

复合控制系统图 1-10a 为按输入作用补偿的复合控制系统，图 1-10b 为按扰动作用补偿的复合控制系统。这两种系统通过开环补偿通道将输入信号或扰动量的变化及时地直接地传递给控制系统，可使系统有更高的控制精度和快速性，并可改善系统其他动态性能指标。有时称上面两种复合控制系统为前馈（顺馈）控制系统。

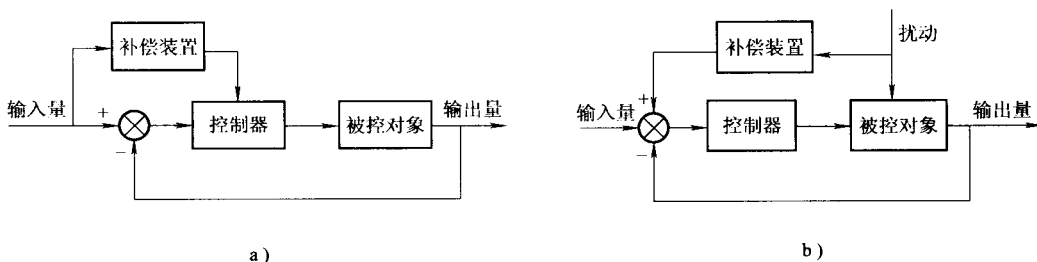


图 1-10 复合控制系统图

a) 按输入作用补偿 b) 按干扰作用补偿

二、闭环控制系统的基本组成

对于各种用于自动控制的闭环控制系统，尽管功能、结构的复杂程度不同，采用的元件和能量形式有各种类型，但它们都采用了负反馈工作原理。相同的工作原理，决定它们必然有类似组成形式。就其大体结构和组成而言，可分为“控制装置”和“被控对象”两个部分。它们各有其相对的独立性，但二者必须紧密结合，才能获得完善的控制性能。一般说来，一个典型的闭环控制系统的基本组成、元件类型和功用及其相互关系可用图 1-11 所示的职能框图来表示。

现将典型闭环控制系统的组成元件及功用说明如下：

1. 给定元件

用来产生输入信号（输入量） $x_i(t)$ 的元件。例如数控机床进给系统的输入装置、恒温箱控制系统的给定电位器就是给定元件。

2. 反馈元件

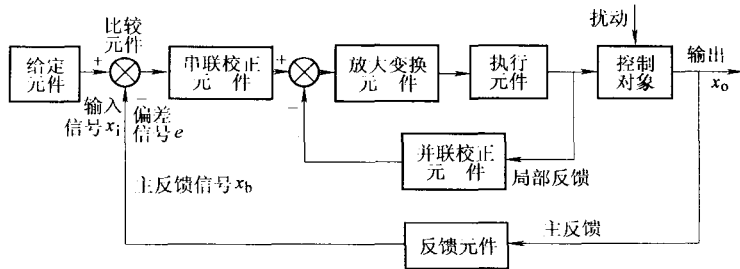


图 1-11 典型闭环控制系统的职能框图

用来测量被控制量（输出量）的实际值，并经过处理，转换为与输出量有一定函数关系的反馈量的元件。这种反馈量可以是输出量本身，或是与输出量成比例，或是输出量的其他函数。反馈量与输入量应是相同的物理量，才能进行比较。前述例子中的离心调速器、热电偶、光栅、测速发电机、电位器等均为此类元件。检测元件大多是将非电量转换为电量的元件。

3. 比较元件

它是用来对输入信号和反馈信号进行比较，得出偏差信号的元件。比较元件实际上是信号综合环节（可以相减或相加），它往往不是一个专门的物理元件，如前述例子中的离心调速器的套筒比较机构、恒温箱自动控制系统中的比较电路等。而自整角机、旋转变压器等则是专门的物理比较元件。

4. 放大变换元件

它是对偏差信号进行信号放大和功率放大的元件。如电压、电流整流调压装置和电液伺服阀等。

5. 执行元件

它接收放大变换元件发出的控制信号，直接驱动被控对象工作运行。如调压器、直流电动机等均为此类元件。

6. 被控对象

它是控制系统需要进行控制的装置、设备或过程等。被控对象中要进行控制的物理量称为被控制量（输出量）。例如前述例子中的加热炉、水箱等。

7. 校正元件

它是为改善系统的性能而加入系统中的辅助元件，而不是闭环控制系统必须具有的元件。串联在系统前向通道内的校正元件称为串联校正装置；接成反馈形式的校正元件称为并联校正装置。常用的电子调节器、测速发电机等均可作为此类元件。

除了被控对象以外，上述的给定元件、反馈元件、比较元件、放大变换元件、执行元件、校正元件等一起组成了控制系统的控制部分。因此，可以说控制系统一般是由控制部分和被控对象两大部分组成。

三、控制系统的基本类型

随着自动化技术的飞速发展和控制理论的日趋完善，自动控制系统在广泛应用的同时也日趋复杂，出现了各式各样的系统。为了研究方便，下面从不同的角度对系统进行分类。而分类的目的是为了在对系统分析、设计之前，从不同的角度来认识系统，以便于选择恰当的