

普通高等教育“十二五”规划教材

机械电气控制 及自动化

重庆大学 江桂云 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

机械电气控制及自动化

主 编	江桂云	
副主编	王勇勤	
参 编	熊桂武	朱朝宽
	罗天洪	罗远新
主 审	严兴春	



机械工业出版社

机械电气控制及自动化课程是机械设计制造及其自动化专业的一门必修专业主干课程。本书对电气控制的基础知识、常用低压电器与检测元件、继电器接触器控制电路、电动机调速控制系统及调速方式、电气控制系统设计、电动机功率选择、PLC 控制系统及机械设备电气控制实例分析等内容进行了系统的介绍。

本书可作为本科院校、高职高专院校、成人高校等电气类、机械类专业的授课教材,也可供从事机械、电气方面设计的相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械电气控制及自动化/江桂云主编. —北京:机械工业出版社, 2014.5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-46513-3

I. ①机… II. ①江… III. ①机械设备-电气控制-自动控制-高等学校-教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 082910 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:余 皞 责任编辑:余 皞 韩 静 版式设计:赵颖喆

责任校对:杜雨霏 封面设计:陈 沛 责任印制:李 洋

中国农业出版社印刷厂印刷

2014 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184 mm × 260 mm · 11 印张 · 268 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-46513-3

定价:24.00 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/cmpl952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着科学技术的发展,现代机械设备越来越向着机电一体化相结合的方向发展,各种机械设备中广泛采用电气控制组成的自动控制系统,使机械设备控制更加稳定,加工精度更高,同时大大简化了机械结构和电气线路。学习电气控制方法在机械设备中的应用是培养机械工程技术人才的必需要求。

机械电气控制及自动化课程是机械设计制造及其自动化专业的一门主干专业课程,它有机地实现了机械、电气控制的结合。通过本课程的学习,可以系统地培养学生机电相结合的知识和技能。具体来讲,通过学习由常用低压电器元件(如按钮、开关、接触器、控制器)组成的自动控制电路来实现如电动机的正转、反转、顺序起制动、多地点起停控制、互锁控制、生产机械设备的行程往复控制、各种机械设备的运作控制;学习使用可编程序控制器(PLC)实现生产机械的各种控制、学习 PLC 的程序编制方法、外部接线等。学习电动机的调速控制方法及电路分析。上述内容以电气控制的方法实现机械设备的自动化,对于机械类学生来讲,一方面,扩展了知识,实现了机电一体化的有机结合;另一方面,为参加工作奠定了基础,使机械类专业学生的能力更全面。

全书共分八章。第一章主要介绍电力拖动及电气控制系统的发展过程、机械电气控制在现代生产中的地位和作用;第二章介绍自动控制基本概念、组成、工作原理、控制方法分类、电气自动控制的工程应用实例;第三章介绍常用低压电器及常用检测元件;第四章介绍机械电气原理图的画法规则,重点介绍异步电动机起动、正反转、制动电路,其他基本控制电路及常用电气控制的基本原则;第五章介绍电气调速系统(电气调速概述、晶闸管-直流电动机无级调速系统、交流调速系统);第六章介绍机械设备控制电路设计、电动机选型,重点介绍电动机功率的选择;第七章介绍可编程序控制器(PLC)的概念、结构、工作原理、技术性能及分类,PLC 的编程语言及指令系统,重点介绍 PLC 的八大编程元件、基本逻辑指令,机械设备 PLC 控制的常用编程环节实例分析;第八章介绍机械设备电气控制的应用实例。

本书由江桂云副教授担任主编,王勇勤教授担任副主编,严兴春副教授担任主审。其中第一章、第二章由王勇勤编写;第三章由熊桂武、罗天洪合作编写;第四章、第五章、第六章由江桂云编写;第七章由罗远新编写。第八章由江桂云、朱朝宽合作编写。全书由江桂云整理定稿。

由于编者水平有限,书中难免会有错漏之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 机械设备的组成与机械电气控制的特点	2
1.3 机械电力拖动与电气控制发展概况	2
第二章 自动控制的基本原理	6
2.1 自动控制的任務	6
2.2 自动控制系统的组成	6
2.3 自动控制的基本方式	8
2.4 自动控制系统示例	12
2.5 自动控制系统的衡量指标	15
第三章 常用低压电器与检测元件	17
3.1 概述	17
3.2 主令电器	17
3.3 开关电器	21
3.4 熔断器	24
3.5 接触器	24
3.6 继电器	27
3.7 自动开关	34
3.8 线位移传感器	36
3.9 角位移传感器	39
3.10 转速传感器	44
第四章 电气控制电路	46
4.1 概述	46
4.2 电气控制电路的绘制原则	46
4.3 电气控制电路基本控制规律	50
4.4 电气控制系统常用的保护环节	56
4.5 电动机常用控制电路	58
第五章 电动机无级调速系统	70
5.1 概述	70
5.2 直流调速方式	73
5.3 晶闸管直流调速系统	75
5.4 交流调速系统	85
第六章 电气控制系统设计	93
6.1 生产机械电气设备设计的基本原则和内容	93
6.2 电力拖动方案确定原则	93
6.3 电动机结构形式、类型及转速的选择	94
6.4 电动机功率的选择	95
6.5 继电器接触式控制系统的设计	105
6.6 机械设备电气元件的选择	110
第七章 可编程序控制器	118
7.1 PLC 概述	118
7.2 PLC 的编程语言及指令系统	123
7.3 梯形图程序设计的规则及方法	133
7.4 机床 PLC 的常用编程环节	135
7.5 梯形图的顺序控制设计法	139
7.6 PLC 在机械控制中的应用	141
第八章 机械设备电气控制实例	147
8.1 C650 车床电气控制与 PLC 控制分析	147
8.2 Z3040 摇臂钻床的电气控制和 PLC 控制	151
8.3 M1432A 万能外圆磨床电气控制与 PLC 控制分析	155
8.4 X62W 电气控制与 PLC 控制分析	159
8.5 机械手电气控制电路分析	164
8.6 钻孔动力头的控制分析	170
参考文献	172

第一章 绪 论

1.1 概述

传统观点认为，生产机械由原动机、传动装置、工作机构三部分组成。但伴随着自动控制理论与技术的发展，各种电气控制元件与计算机广泛应用于机械领域，现代化的生产机械已包含着第四个组成部分——以电气控制为主的自动控制系统（当然还有气、液控制等）。它使得机器的性能特别是自动化程度不断提高，使传动装置、工作机构的结构大为简化。

现代化的生产机械绝大多数以电动机作为原动机。传动装置的速度调节、工作机构的动作控制及工作循环的控制与操作等都离不开电气、电子元件和由它们组成的系统，机械电气控制系统已成为现代生产机械的重要组成部分。纵观机械的发展过程，其结构不断改进，性能不断提高，在很大程度上取决于电力拖动和电气控制技术的发展和其系统的更新。

电力拖动在速度调节等许多方面具有其他传动方式无可比拟的优越性。采用直流或交流无级调速电动机驱动生产机械使结构复杂的变速箱变得十分简单。从电力拖动的发展趋势看，一些向来采用恒速传动的场合，从节能的角度或从运动控制的新工艺要求或配合生产过程自动化发展的需要出发，将逐步改用调速传动，而且将重点发展高性能的交流电动机调速系统来取代各种直流电动机调速系统。如占工业用电量约一半的恒速的风机、泵、压缩机等设备的流量调节将会更多地通过电动机调速的方式来取代挡板、闸阀、放空、回流等传统的耗能调节方式。一些恒速传动的轧机为了改善轧件的咬入条件以取得较佳的轧制效率，也会更多地采用调速传动。起重运输机械为了实现轻起轻放、准确到位，也会逐步增加调速控制方式。

电气控制技术在机械上的应用是许多先进科技成果综合应用的结果，这些技术包括：自动控制理论、电气技术、电子技术、计算机技术、现代检测技术等。特别是随着计算机技术的飞速发展，电子计算机在机械设备上得到广泛应用。从 20 世纪 40 年代末期产生的数控技术，到现在发展为主要由微机控制的数控机床与数显装置；由各种单片机、单板机、微型机及可编程控制器参加控制的冶金机械（如轧机）、工程机械（如高级程控电梯）、自动化生产线（如汽车总装线）、轻工机械（如饮料灌装线）、家用电器（如全自动洗衣机）等正越来越多地得到使用和推广。这些新技术的应用，使机械电气设备不断现代化，从而大大提高了机械设备的自动化程度和生产率，扩大了产品范围，提高了产品质量，降低了产品成本，改善了劳动条件。

总之，电力拖动和电气控制在机械设备中占有重要地位，构成了机械电气自动化的主要内容。

1.2 机械设备的组成与机械电气控制的特点

1.2.1 机械设备的组成

现在人们以为,机械设备不只是由原动机、传动装置和工作机构这三个部分组成,而是由以下四个部分组成,即主机部分、驱动部分、检测显示部分和控制部分,如图 1-1 所示。

主机部分——工作机械的本体。如金属切削机床、机械手、锻压机和起重机。

驱动部分——依照所完成功能不同,具体结构相差很大。但对一般的机械来讲,驱动部分通常包括原动机和传动机构等。

另外,原动机一般有电动机、液压装置和气动装置,但最主要的动力设备仍然是各种类型的电动机(如交流电动机和直流电动机等)。由电动机通过传动机构带动主机中的工作机构进行工作时,这种拖动方式称为电力拖动。驱动部分实际上是一个能量变换装置,在电力拖动中,它能将电能转变为机械能或是其他形式的能量。

检测显示部分——近代机械设备上才有的装置,主要由电气元件构成。

控制部分——使系统中的驱动、主机和检测显示部分按照给定的要求协调地工作的装置。例如,采用继电器接触式控制方式的装置,采用单板机、单片机和工业控制机、可编程序控制器 PLC 等组成的控制装置。



图 1-1 机械设备组成框图

1.2.2 机械电气控制的特点

机械设备控制系统所应有的控制方法很多,具体可归结为以下几类:电气控制方式、液压控制方式、气动控制方式、机械控制方式及综合配用。

电气控制方式与其他的控制方式相比有其独特的优点:

- 1) 控制功能多、灵活性强。它可借助各种电气元件,对液压、气动或者机械装置实行自动及远距离控制。
- 2) 设备制造周期短,易于维护,经济效益高。
- 3) 可直接利用电能工作,对环境污染少。
- 4) 控制装置结构紧凑,占用空间与工作面积小,操作方便。

1.3 机械电力拖动与电气控制发展概况

1.3.1 电力拖动的发展过程

电力拖动系统的发展经历了一个比较长的过程。20 世纪初期,由于电动机的发明,使得拖动系统发生了巨大变化,用电动机代替了蒸汽机和水力拖动,当时由于电动机刚刚发明,价格很贵、数量少,所以电动机拖动生产机械的方式是通过“天轴”实现的,称为“成组拖动”。

(1) 成组拖动(见图 1-2) 即由一台电动机拖动一组生产机械,从电动机控制到各个生产机械的能量传递以及各生产机械之间的能量分配完全采用机械方法,一台电动机经过一根天轴由带传动带动若干台生产机械工作。这种拖动方式由于传动路线长,故能量传递损耗

大,效率低,可靠性差。特别是,如果电动机发生故障,则成组的生产机械将停车,甚至整个生产可能停顿,这是一种陈旧落后的生产方式。另外,从电气控制上看,由于一台电动机拖动一组生产机械,对电动机的控制电路比较单一,只考虑起动、停止、保护等少数几种功能。

(2) 单独拖动 单电动机拖动系统——单独拖动:即这一系统中,一台生产机械用一台单独的电动机拖动。这样一来,电动机与生产机械在结构上配合密切,可以用电气方法调节每台生产机械的转速,从而进一步简化了机械结构,而且易于实现生产机械运转的全部自动化。

(3) 多电动机拖动(分离拖动) 多电动机拖动系统:即每个工作机构用单独的电动机拖动,这样生产机械的结构可大为简化。如具有三个主轴的龙门铣床用三台电动机拖动。又如轧钢设备中的钳式吊具有五个运动,每个运动均由一台单独的电动机拖动等。

值得注意的是,在只有一个工作机构的生产机械上有时也采用多电动机拖动系统,并非是有多个工作机构才能采用多电动机拖动,这样做的主要原因是:

1) 传动性能的需要(如为减少传动系统飞轮力矩,采用两个小电动机代替一个大电动机)(见图 1-3)。

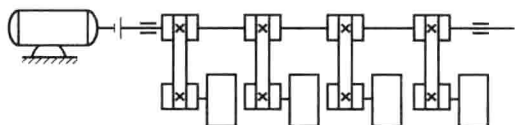


图 1-2 成组拖动示意图

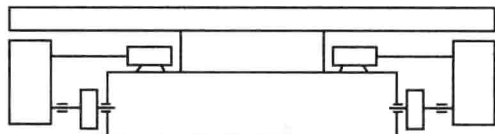


图 1-3 均热炉揭盖机行走机构

2) 安装调整的需要(如轧机压下装置,采用两个电动机能分别进行调整,又能一起工作,如图 1-4 所示)。

3) 受力状况的需要(如轧钢车间的链式拖运机、拔钢机、移送机等,如图 1-5 所示。采用两个电动机两边驱动,这样轴上的转矩要小一半,如图 1-6 所示)。

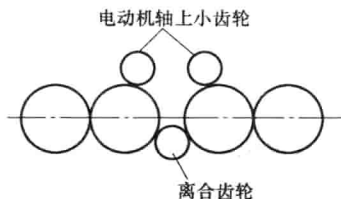


图 1-4 立式电动机的
初轧机压下俯视图

(4) 自动化电力拖动系统 随着工业生产的不断发展,无论对单电动机拖动系统还是对多电动机拖动系统都提出了更高的要求,具体要求是:

- 1) 提高加工精度与工作速度。
- 2) 快速起动、制动及反转。

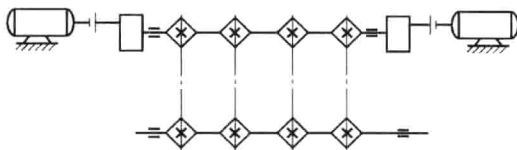


图 1-5 链式拖运机传动简图

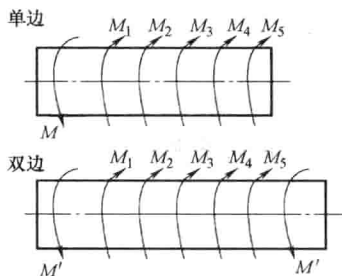


图 1-6 单、双电动机驱动分析

3) 实现很宽范围内的调速。

4) 生产过程的自动化。

因此, 为完成这些任务, 除了电动机外, 还必须有自动控制设备, 以组成自动化电力拖动系统。自动化电力拖动系统的含义是: 能对生产机械进行自动控制, 如实现自动控制起动、制动、调速、同步, 自动维持转速、转矩或功率为恒定值, 按给定的程序或事先不知道的规律改变转速、转向和工作机构的位置, 使工作循环自动化。

1.3.2 电力拖动控制系统的发展过程

(1) 最初: 继电器-接触器型断续控制 (有触头、断续控制) 这种控制系统的控制电路由各种有触头的接触器、继电器、按钮、行程开关等组成。如电动机的起动、制动控制电路等。

(2) 30 年代初: 发电机-直流电动机连续控制 这使得调速性能优异的直流电动机得到了广泛应用。但其缺点是体积大、噪声大、效率低。

(3) 交磁放大机-直流电动机连续控制 交磁放大机实质上是一种放大倍数很高的发电机, 用它来控制直流电动机的电枢电压, 能使电动机的转速随交磁放大机的输入信号变化而变化。

(4) 磁放大器-直流电动机连续控制 磁放大器也是一种功率放大元件, 但它无旋转部分, 工作可靠性高, 制造工艺简单, 维修也方便。但其缺点是构成可逆系统电路复杂, 故采用得不多。

(5) 晶闸管整流器-直流电动机连续控制 综合来看, 电力拖动系统的发展过程如图 1-7 所示。



图 1-7 电力拖动系统的发展过程

直流电动机因具有良好的起动、制动特性及很宽范围的平滑调速等优点, 一直被认为是工业调速的原动机, 但是交流电动机尤其是笼型异步电动机与直流电动机相比有以下一些明显的特点:

①成本低; ②重量轻; ③惯性小; ④效率高; ⑤坚固耐用; ⑥维护方便; ⑦没有换向器; ⑧可用于多尘、易爆等场合; ⑨单机容量大 (直流 14000kW, 交流远大于此值); ⑩工作电压高 (直流 1000V (因换向限制)、交流 10000V 以上); ⑪最高转速高 (直流 3000r/min, 交流几万 ~ 几十万 r/min)。

但是由于交流电动机调速系统的经济技术指标较低, 控制系统复杂, 故交流调速方案在以前只能作为直流调速的一个补充。

1.3.3 电气控制系统的发展与分类

1. 发展

电气控制系统的发展可以用下面几句话来概括:

- 1) 从控制方法上看, 手动→自动。
- 2) 从控制功能上看, 简单→复杂。

3) 从操作上看,笨重→轻巧。

2. 分类

(1) 断续控制系统 断续控制系统又称开关量控制系统、开环控制系统、逻辑控制系统等。它是采用两个稳定工作状态的各种电气和电子元件构成的开环控制系统。按自动化程度不同分为以下几种:

1) 手动控制。大都采用电气开关对电动机制动、起动、停止、反转进行手动控制。如砂轮机、台式钻床等。

2) 自动控制。按其控制原理与采用电气元件的不同分为下列三种:

① 继电接触器自动控制系统。由继电器、接触器、按钮等电气元件组成的自动控制系统。它具有直观、易掌握、易维修等优点,但功耗大、体积大,工作循环的改变较为困难。

② 顺序控制。由集成电路组成的顺序控制器具有程序变更容易、程序存储量大、通用性强等优点,广泛用于组合机床、自动线。20 世纪 60 年代末又出现了具有运算和大功率输出能力的可编程序控制器 (Programmable Controller, PC)。它是由大规模集成电路、电子开关、晶闸管等组成的专用微型计算机,用它可代替大量的继电器,且功耗小、重量轻。

③ 数字控制。由电子计算机按照预先编好的程序 (以数字和符号表示),对机床、机械手或机器人等实行自动数字控制。数控机床既有专用机床生产率高的优点,又兼有通用机床工艺范围广、使用灵活的特点,并且还具有能自动加工复杂的成形表面、精度高等优点,因而它具有强大的生命力,发展前景广阔。

数控机床的控制系统,最初是由硬件逻辑电路构成的专用数控装置 NC (Numerical Control),其成本昂贵、工作可靠性差、逻辑功能固定。随着计算机技术的发展,又出现了 CNC (Computer Numerical Control)、MNC (Microcomputer Numerical Control),以及 DNC (Direct Numerical Control)、AC (Adaptive Control)。

为实现机械加工和生产的全面自动化,具有与数控机床控制系统相类似的工业机器人诞生。机器人在机械制造业中担负焊接、喷、搬运、装配、装卸工件等工作,以代替人去从事繁重的劳动,它能在有毒、有污染、有危险的地方工作,能长期从事频繁而简单的劳动,效率高,工作可靠,不需休息。在发达工业国家,工业机器人正以很快的速度增长。

由数控机床、工业机器人、自动搬运车等组成的统一由中央计算机控制的机械加工自动化生产线称为柔性制造系统 FMS,它是自动化车间和自动化工厂的重要组成部分和基础。较之专用自动线、它具有能同时加工多种工件、能适应产品多变、使用灵活等优点。

(2) 连续控制系统 这类系统一般是具有负反馈的闭环控制系统,又称模拟控制系统,它能对很多参量 (如电压、位移、转速等) 进行连续自动控制,具有控制精度高、功率大、抗干扰能力强等优点。

(3) 混合控制系统 同时采用数字控制和模拟控制的系统称为混合控制系统。连轧机、数控机床、机器人的控制驱动系统多属于这种类型。如在高速板带热连轧机控制系统中,由机架出口端的射线测厚仪与速度传感器分别检测出成品板的厚度和出口速度。该检测信号一般为数字量,通过 D-A 转换器和功率放大器等装置输入中央控制微机进行计算、比较、判断和分配,再由中央微机通过下位机分别控制各个机架的轧辊的转速和压下量。

第二章 自动控制的基本原理

工业生产设备的自动化，特别是生产机械的电气自动化，可以改善劳动条件，增加产量，提高质量，提高企业的设备水平和经济效益。本章将从自动控制的任务、方式及过程等方面介绍一般自动控制系统的基本特点。

2.1 自动控制的任务

任何机械和生产过程，都必须按照预定的要求运行。例如，要使发电机正常供电，就必须保持其输出电压恒定，尽量不受负荷变化和原动机转速波动的影响；要使数控机床加工出高精度零件，就必须保证其工作台或刀架的位置，准确地跟随给定指令进给；要使载人自动电梯安全准确，平稳舒适，就必须严格控制其每层停止的准确位置及起动、制动过程中的加速度。

其中，发电机、机床、电梯就是工作的生产机械；电压、刀架位置、停止位置和加速度是表征这些机器装备工作状态的物理参量；而额定电压、进给指令、规定位置等，就是在运行过程中对这些状态参量的要求。按照要求来操纵状态参量，这就是生产机械工作的实质。如果将工作机器、装备称作受控对象，将表征其工作状态的物理参量（或状态参量）称作被控量，而将要求这些物理量应保持的数值称作给定值（或参考输入），则操纵的任务又可概括为：使受控对象的被控量等于给定值。

这个任务如果不是由人直接完成，而是靠自动装置承担，即在没有人的直接参与下，利用控制装置操纵受控对象，使被控量等于给定值，则称为自动控制或自动化。给定值以时间函数 $r(t)$ 表示，被控量以 $c(t)$ 表示，则使受控对象满足 $c(t) = r(t)$ 就是自动控制的任务的数学表示。

各种控制装置的具体任务虽不同，但究其性质不外乎是对受控对象的某些物理参量进行控制，自动保持其应有的规律性。

2.2 自动控制系统的组成

2.2.1 引例

为了更好地理解后面所讲的问题，下面先列举一个简单的例子。这是一个水池水位控制系统，如图 2-1 所示。

水经由进水阀门源源不断地流入水池，而由出水管道流出供用户使用。要求：在出水量随意改变的情况下，保持水池中水池高度不变。

我们先看一下，如果用人工操作来实现水位控制，需要经历一些什么过程。首先操作人员要通过标尺观察实际水位，这是第一步。把实际水位与要求水位相比较，得到偏差，这是第二步。根据偏差的大小转动阀门，如水位低了要开大阀门，高了要关小阀门，这是第三

步,以后重复上述步骤,循环往复,便可实施对水位的控制。

2.2.2 人工职能图与自动控制框图

水池水位控制是一个实际的具体的例子,如果将其抽象、提升,从特殊性中寻求普遍性,便可以得到一些普遍的规律,比如一个人要完成某一件事情,通常要经历如图 2-2 所示的过程。

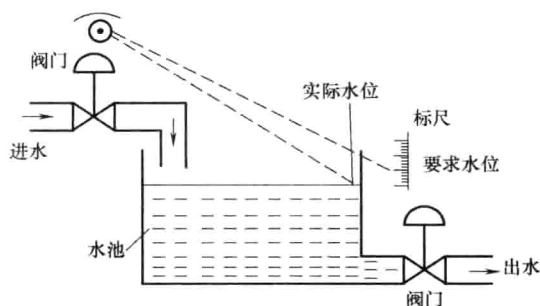


图 2-1 水池水位控制

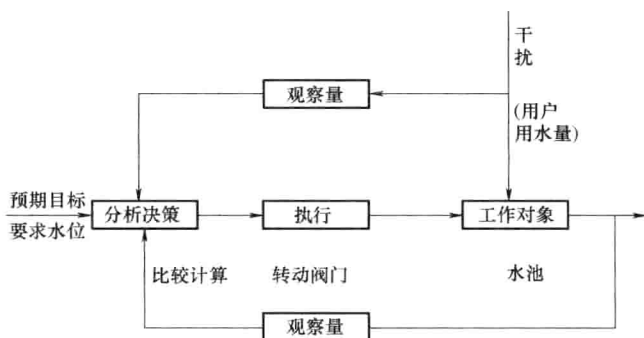


图 2-2 水池水位人工职能图

对于某一件事情（工作对象），总有一个具体目标，然后通过调查研究，分析决策，制订一个计划，计划制订好以后，下一步就要实施（执行），实施以后观察实际结果，看看与预期目标有无偏差，若有再分析决策，制订新的计划或修改方案再实施，这样反复下去。另一方面，外界的一些因素可能会对工作对象产生一些影响，因此，也有必要对其进行观察，并作为分析决策时一个影响因素加以考虑。

为了进一步说明上述问题，下面仍然以水池水位控制为例进行说明，采用图 2-3 所示的自动控制图。

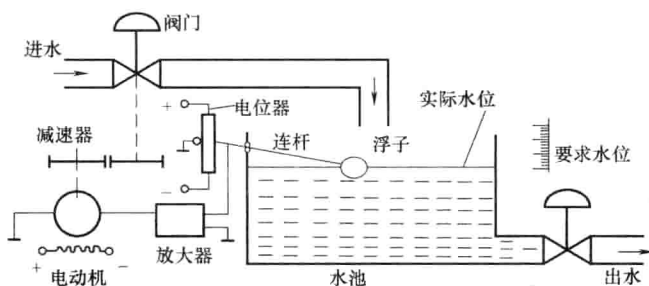


图 2-3 水池水位自动控制图

用浮子测量水位的高低，连杆作为比较元件与浮子相连。连杆水平表示实际水位等于要求水位，电位器无输出；连杆偏斜表示实际水位不符合要求水位，此时电位器有输出。电位器输出信号经放大器放大，然后去控制伺服电动机，通过减速装置旋转阀门开度，直至实际水位达到要求位置。

从这个例子可以看出，组成本控制装置的元件有：

测量元件——浮子

比较元件——连杆（电位器起物理量能量转换作用）

调节元件——放大器

执行元件——伺服电动机、减速装置

可以看出，水池水位自动控制系统是一个比较完整的控制系统，它包含了一个自动控制系统的的所有元件，或者说它具备了一个自动控制系统的的所有功能。

如果用自动控制中的一些术语代替人工职能图，则得到图 2-4。

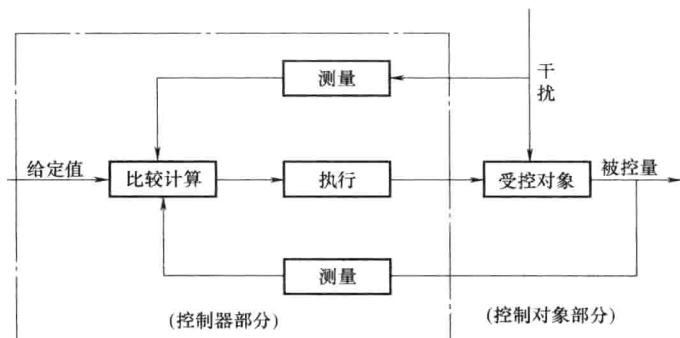


图 2-4 应用自动控制的水池水位框图

2.2.3 自动控制装置的组成与自动控制系统的定义

(1) 自动控制装置的组成 控制器部分主要完成三种功能：即测量功能、比较计算功能和调节执行功能，也就是说，一个自动控制装置按职能划分应该由以下几个部分组成。

测量元件——完成测量功能（即各种传感器、测量装置）

比较元件——完成比较计算功能（即比较器、计算机）

调节元件、执行元件——完成调节、执行功能

(2) 自动控制系统的定义 由图 2-4 可以看出：控制器和控制对象构成了一个完整的自动控制系统。换句话说，一个自动控制系统就是由被控对象与自动控制装置按一定方式联结起来完成一定自动控制任务的总体。

2.3 自动控制的基本方式

以上是我们对自动控制系统应具备的功能的分析，下面分析一个自动控制系统中参与控制的信号来自哪些通道，通过分析便可以得到自动控制系统的基本方式。

根据自动控制框图（见图 2-5），一个控制系统参与控制的信号来自三个通道：给定值、干扰、被控量（经测量后回送到前端）。对应这三种参与控制的信号就形成了自动控制的三种基本方式，即按给定值操纵、按干扰补偿控制和按偏差调节。



图 2-5 自动控制框图

2.3.1 开环控制之一：按给定值操纵

图 2-6 为直流电动机调速系统开环控制原理图。

U_0 是直流电源输出电压，通过电位器分压后，得到给定电压 U_g ，输入到功率放大器的输入端，经过功率放大器放大以后作为直流电动机的电枢电压 U_a 。

直流电动机的励磁线圈电压由单独的直流电源供电。当励磁电压恒定时，改变电位器上滑动触头的位置，可以得到不同的给定电压 U_g ，从而得到不同的电枢电压 U_a ，最终得到不同的电动机转速 n ，即 U_g 与 n 间具有一一对应关系，如 $U_g = U_{g1}$ ，则 $n = n_1$ 。

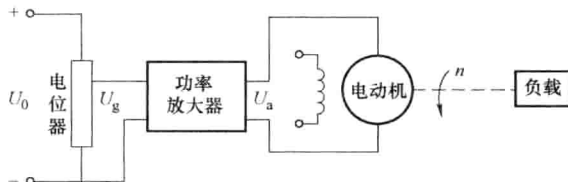


图 2-6 直流电动机调速系统开环控制原理图

如果把电动机转速 n 视为被控量，给定电压 U_g 为给定值，则对于不同的给定值 U_g ，可以得到相应不同的被控量 n ，因此，本例是一个典型的“按给定值操纵”的例子。

通过对本例的分析，可以得出按给定值操纵这种控制方式的几点结论：

- 1) 工作原理：由给定值控制被控量。
- 2) 系统原理框图：如图 2-7 所示。
- 3) 信号由给定值到被控量单向传递，属于开环控制。
- 4) 优点：控制方式简单。缺点：控制精度低（因为它不考虑干扰及工作过程中其他参数的变化对被控量的影响）
- 5) 通常适合于系统结构参数比较稳定、干扰很小和精度要求不高的场合。

这种控制较简单，但有较大的缺陷。当对象或控制装置受到干扰，或工作过程中特性参数发生变化时，会直接波及被控量，而无法自动补偿。因此系统的控制精度难于保证，但是如果系统结构参数稳定，干扰很弱，控制精度要求不高，是可用的。

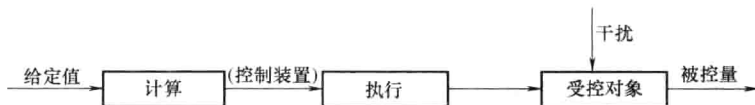


图 2-7 按给定值操纵的系统原理框图

2.3.2 开环控制之二：按干扰补偿

再回过头来看上面的例子：当负载变化时，转速要发生变化，而这种控制系统，不能进行补偿，即不能自动地将由于负载变化引起的转速变化纠正。

为了解决这一问题，将图 2-7 中的控制电路稍加改动，得到图 2-8。

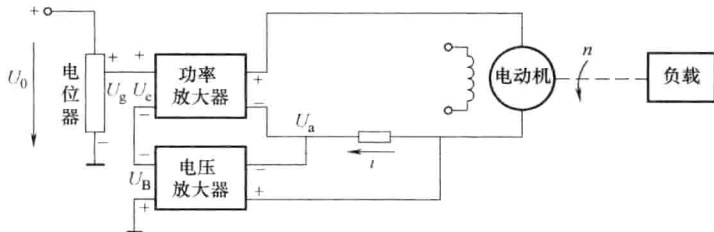


图 2-8 电动机按干扰补偿控制原理图

由图 2-8 知:

$$M = C_M \Phi I_a \quad (2-1)$$

式中 I_a ——电枢绕组总电流;

C_M ——转矩常数, 与电动机结构尺寸有关。

当负载变化时, 该系统中电动机调速工作过程如下:

负载 $T \downarrow \rightarrow n \uparrow \rightarrow i \downarrow \rightarrow U_B \downarrow \rightarrow U_e \downarrow \rightarrow U_a \downarrow \rightarrow n \downarrow$

负载 $T \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow i \uparrow \rightarrow U_B \uparrow \rightarrow U_e \uparrow \rightarrow U_a \uparrow \rightarrow n \uparrow$

因此, 本系统可完全自动补偿由于负载变化而引起的转速变化。

如果将负载视为干扰, 转速视为被控量。实际上本系统就成为一个按干扰补偿的控制系统。那么, 通过本例, 可以得出“按干扰补偿”控制的下述结论:

- 1) 工作原理: 只测干扰, 并弥补干扰对被控量的影响。
- 2) 系统原理框图: 如图 2-9 所示。
- 3) 因为只测量干扰, 由干扰产生控制信号到被控量仍属单向传递, 故也为开环控制。
- 4) 优点: 对可测干扰, 能进行抗干扰补偿。缺点: 控制精度仍然较低 (因为对不可测干扰及系统内部参数变化对被控量影响未考虑, 这是开环控制的共同问题)。
- 5) 适用于干扰可测、控制精度要求不高的场合, 如稳压电源、工作机械恒速控制等。

这种控制方式需要控制的是受控对象的被控量, 而测量的是破坏系统正常运行的干扰, 利用干扰信号产生控制作用, 以补偿干扰对被控量的影响, 故称抗干扰补偿。

由于测量的是干扰, 故只能对可测干扰进行补偿, 不可测干扰以及对对象、各功能部件内部参数变化给被控量造成的影响, 系统自身无法控制。因此, 控制精度仍然较低。工作机械的恒速控制 (如稳定刀具转速) 以及电源系统的稳压、稳频控制常用这种补偿方式。

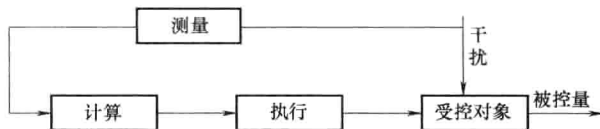


图 2-9 抗干扰补偿的系统原理框图

2.3.3 闭环 (反馈) 控制: 按偏差调节

按给定值和按干扰补偿的共同缺点是对系统内部结构参数变化引起被控量的变化均不能进行补偿, 这就是开环控制的共同缺点。

为了克服开环控制这一缺点, 在自动控制领域广泛采用了一种所谓闭环反馈控制-即按偏差调节。下面介绍这种控制方式的原理特点及应用范围, 仍以直流电动机转速控制为例, 如图 2-10 所示。

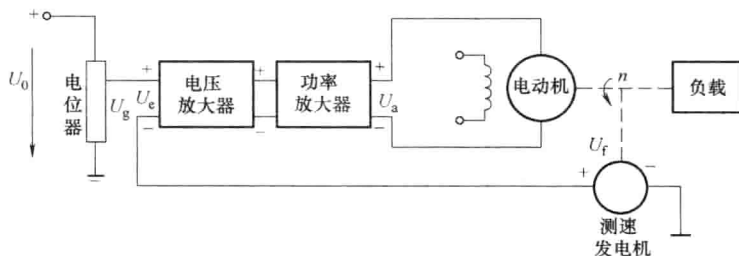


图 2-10 按偏差调节的电动机调速

$$\text{偏差电压: } U_e = U_g - U_f \quad (2-2)$$

不论什么原因使电动机转速发生变化时, 控制系统均能按以下方式工作:

$$n \uparrow \rightarrow U_f \uparrow \rightarrow U_e \downarrow \rightarrow U_a \downarrow \rightarrow n \downarrow$$

即不管由于什么因素引起转速变化, 系统均能进行自动补偿。

如果把转速视为被控量, 对应额定转速时电压视为给定值, 那么当实际转速偏离额定转速时, 系统都能自动纠偏, 实行控制。结合本例, 便可得出按偏差调节这种控制方式的以下结论:

- 1) 工作原理: 测量被控量, 按被控量与给定值的偏差控制被控量。
- 2) 控制信号由被控量与给定值的偏差产生, 沿前向通道和反馈通道闭合传递, 故属闭环 (反馈) 控制。
- 3) 优点: 对于无论是干扰还是系统内部参数变化引起被控量与给定值的偏差能自行纠偏 (消除偏差和减小偏差)。
- 4) 缺点: 控制电路比较复杂, 系统存在稳定性问题。

系统能否“自行纠偏”, 即能否完全纠正偏差, 取决于控制系统本身, 对有些控制系统可以完全纠正, 有些则只能部分纠偏。这种系统在电路调速系统中, 称为有差调速 (即静差的调速), 产生静差的根本原因在于, 转速的维持和调节是基于偏差电压 U_e 。

假设 $U_e = U_g - U_f = 0$, 则转速不能维持, 更说不上调节。若将本系统的电路加以修改, 使偏差电压 $U_e = U_g - U_f = 0$ 时, 电动机转速为要求转速, 因此, 当干扰变化时, 转速变化 $U_e \neq 0$, 系统能自动调节使 $U_e = 0$, 则可实现无差调速, 使转速变化得到完全补偿。

- 5) 适用于较高精度控制场合, 但在系统有强干扰作用的情况下, 被控量可能波动很大, 此时采用复合控制系统, 即按干扰补偿和按偏差调节的开、闭环控制系统比较适宜。

以下仍以直流电动机转速控制为例说明, 将按干扰补偿的开环控制与按偏差调节的闭环控制进行组合, 如图 2-11 所示。

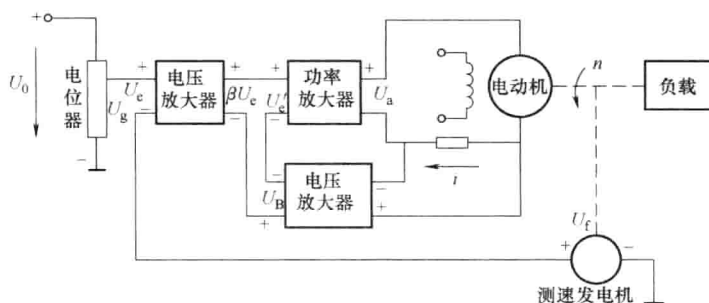


图 2-11 按干扰补偿和按偏差调节的电动机调速

当系统受强干扰作用, 即负载转矩增加很多, 电动机转速下降很大, 此时用二者联合作用产生足够大的控制信号, 进行补偿。在这种情况下, 如果仅是按偏差调节, 由于前述原因, 不能完全补偿干扰, 即转速不能回到原来值, 而且转速波动太大。

6) 系统原理框图: 如图 2-12 所示, 系统中控制信号往复循环, 沿前向通道和反馈通道闭路传递, 故又称闭环控制和反馈控制, 反馈控制是自动控制系统中最基本的控制方式, 在工程中获得广泛的应用。

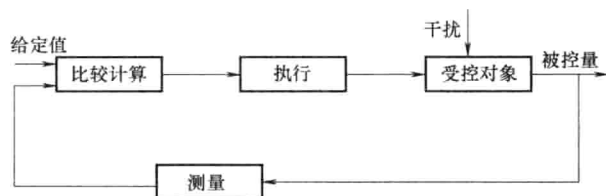


图 2-12 按偏差调节的系统原理框图

2.4 自动控制系统示例

分析自动控制系统时，首先明确如下问题：

- 1) 受控对象是什么？哪些状态量需要控制（被控量是什么）？作用在对象上的主要干扰有哪些？
- 2) 依靠操纵哪个机构来改变被控量？
- 3) 有哪些测量元件？测量的是被控量还是干扰？
- 4) 给定值或参考输入或指令由哪个装置提供？
- 5) 如何实现各信号的综合计算和判断偏差？
- 6) 控制作用通过什么部件去执行？

2.4.1 恒值控制系统

在自动控制系统方法中，按照输入作用的变化情况可将反馈控制系统分为恒值控制系统和随动系统两大类。

在恒值控制系统中，给定值是不变的，但由于干扰的存在，将使被控量偏离给定值，控制系统能根据偏差产生控制作用，使被控量回复到给定值，以克服扰动的影响。例如：水池水位自动控制系统和按偏差调节的直流电动机转速控制系统都是恒值控制系统。

图 2-13 是烘烤炉温度控制系统原理图。

控制的任务是保持炉温恒定，而炉温既受工件数量以及环境温度的影响，又受由混合器与输出的煤气流量的控制，故调整煤气流量便可控制炉温。

首先确定下列问题：

- 1) 受控对象——烘炉。
- 2) 被控量——炉温 T 。
- 3) 干扰——工件、环境温度、煤气压力等。
- 4) 依靠调节煤气管道上的阀门，改变炉温。
- 5) 测量元件——热电偶，它将炉温转变成相应的电压 u_T 。

6) 给定装置——即给定电位计。其输入电压 u_r 相当于要求的炉温。

7) 计算—— u_T 、 u_r 两电压反接，即完成了减法运算。输出电压 $\Delta u = u_r - u_T$ ，相当于炉温的偏差量。

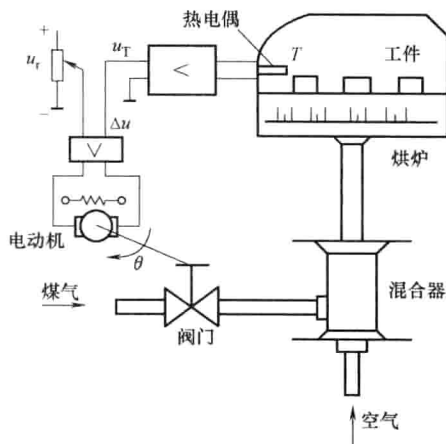


图 2-13 烘烤炉温度控制系统原理图