



世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材

自动控制原理 与CAI教程

李玉云 李绍勇 王秋庭 主编
吴怀宇 主审

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



免费电子课件

21 世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材

自动控制原理与 CAI 教程

主 编 李玉云 李绍勇 王秋庭
参 编 郭 凯
主 审 吴怀宇



机械工业出版社

本书是根据1999年“全国高等学校建筑环境与设备工程专业本科教育培养目标和培养方案及主干课程教学基本要求”编写的。

本书以建筑环境与设备工程、热工为对象,重点介绍了自动控制的基本概念、基本理论和基本分析方法等经典控制理论。全书共分8章,主要内容有控制系统的数学模型、控制系统的时域分析法、根轨迹分析法、频率特性分析法、自动控制系统的时域分析、离散系统的分析、MATLAB语言及其在HVAC控制系统仿真中的应用等。本书对基本理论的叙述深入浅出,实用性强,文字简练流畅。每章内容均有小结,除有一般性例题外,还附有一定数量的综合性例题分析,以及MATLAB在控制系统分析和计算方面的应用。

本书可作为建筑环境与设备工程、热工类,以及相关专业的“自动控制原理”课程的教材,也可作为从事自动化工作的科技人员的参考用书。

本书配有电子课件,免费提供给选用本书的授课教师,需要者请根据书末的“信息反馈表”索取。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理与CAI教程/李玉云,李绍勇,王秋庭主编. —北京:机械工业出版社,2010.5

(21世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材)

ISBN 978-7-111-30452-4

I. ①自… II. ①李…②李…③王… III. ①自动控制理论-高等学校-教材②多媒体-计算机辅助教学-软件工具-高等学校-教材
IV. ①TP13②G434

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第070884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:刘涛 责任编辑:刘涛 常建丽

版式设计:张世琴 责任校对:申春香

封面设计:王伟光 责任印制:乔宇

北京汇林印务有限公司印刷

2010年8月第1版第1次印刷

169mm×239mm·17.75印张·341千字

标准书号:ISBN 978-7-111-30452-4

定价:31.00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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

序

建筑环境与设备工程专业是1998年教育部新颁布的全国普通高等学校本科专业目录中的专业，它是将原来的供热通风与空调工程专业和城市燃气供应专业进行调整、拓宽而组建的新专业。专业的调整不是简单的名称的变化，而是学科科研与技术发展，以及随着经济的发展和人民生活水平的提高，赋予了这个专业新的内涵和新的元素。创造健康、舒适、安全、方便的人居环境是21世纪本专业的重要任务。同时，节约能源、保护环境是这个专业及相关产业可持续发展的基本条件，因而它们和建筑环境与设备工程专业的学科科研与技术发展总是密切相关、不可忽视的。

一个新专业的组建及其内涵的定位，首先是由社会需求所决定的，也是和社会经济状况及科学技术的发展水平相关的。我国经济的持续高速发展和大规模建设需要大批高素质的专业人才，专业的发展和重新定位必然导致培养目标的调整和整个课程体系的改革。培养“厚基础、宽口径、富有创新能力”、符合注册公用设备工程师执业资格、并能与国际接轨的多规格的专业人才，以满足需要，是本专业教学改革的目的。

机械工业出版社本着为教学服务、为国家建设事业培养专业技术人才、特别是为培养工程应用型和技术管理型人才作贡献的愿望，积极探索本专业调整和过渡期的教材建设，组织有关院校具有丰富教学经验的教授、副教授主编了这套建筑环境与设备工程专业系列教材。

这套系列教材的编写以“概念准确、基础扎实、突出应用、淡化过程”为基本原则，突出特点是既照顾学科体系的完整，保证学生有坚实的数理科学基础，又重视工程教育，加强工程实践的训练环节，培养学生正确判断和解决工程实际问题的能力，同时注重加强学生综合能力和素质的培养，以满足21世纪我国建设事业对专业人才的

要求。

我深信，这套系列教材的出版将对我国建筑环境与设备工程专业人才的培养产生积极的作用，会为我国建设事业作出一定的贡献。

陈在康

前 言

本书是为了满足高等院校建筑环境与设备工程专业、热工类专业的教学需要而编写的。

1998年教育部颁布的新专业“建筑环境与设备工程”，是在“供热通风与空调工程”和“城市燃气供应”专业的基础上调整的专业，其内涵有了新的意义，教学体系、课程设置与其前身相比，已有很多变化。其特征之一是：建筑环境与设备和信息与自动化技术有了紧密结合，信息与自动化技术课程在本专业培养方案中已经成为一个重要的教学模块。因此，自动控制原理课程是“建筑环境与设备工程”专业的重要理论基础之一。

本书作为一门技术基础课，从工程应用角度重点阐述了自动控制的基本概念、基本原理和基本方法，以负反馈为主线，让学生深刻理解反馈的概念，并认识到优化思想是控制科学的灵魂和核心。

经典控制理论以单输入单输出系统为研究对象，现代控制理论以多输入多输出为研究对象，经典控制理论是现代控制理论的基础，其理论与现代控制理论相通。考虑到本专业的特点和现代科学技术的发展，本书的内容以经典控制理论为主，但也适量地介绍了PID控制和智能控制的概念。如果学生对现代控制理论感兴趣，可参阅相关书籍。

本书的主要特点是：结合本专业的特点，尽可能地给出与“建筑环境与设备工程”相结合的实例——以传热学、工程热力学、流体传输、热工等为对象，使学生感受到这门课程与本专业的贴近程度，体现出一定的适用性和实用性，对提高本专业及相关专业学习者的兴趣和学习效果大有裨益。充分利用MATLAB工具分析、设计、仿真、解读许多理论、习题和工程实际问题，便于学生与教师摆脱繁琐的手工计算。同时，本书通过大量的仿真，使学生对基本原理和方法有了更

深刻的认识和更深入的理解。

本书的第 1、3 章由武汉科技大学李玉云教授编写，第 2 章由武汉科技大学李玉云教授和王秋庭教授共同编写，第 4、5、7 章由兰州理工大学李绍勇副教授编写，第 6、8 章由兰州理工大学李绍勇副教授和武汉大学郭凯共同编写。最后，本书由李玉云和王秋庭统稿，由武汉科技大学吴怀宇教授主审，他们为本书提出了许多宝贵意见，使本书增色不少。在本书的编写过程中，我们还得到了武汉科技大学朱文斌同学的协助，在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者提出宝贵意见。

作者

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 自动控制系统的初步概念	2
1.2 自动控制系统的分类	5
1.3 对控制系统的要求和分析设计	12
1.4 智能控制理论	14
小结	21
复习思考题	21
第 2 章 控制系统的数学模型	23
2.1 拉普拉斯变换	23
2.2 系统数学模型的描述	29
2.3 典型环节的数学模型	39
2.4 用框图表示的模型	47
2.5 信号流程图与梅逊公式	55
2.6 非线性系统	61
2.7 数学模型的 MATLAB 描述	66
小结	72
复习思考题	73
第 3 章 控制系统的时域分析法	75
3.1 控制系统的时间响应性能指标	75
3.2 一阶系统的暂态响应	81
3.3 二阶系统的暂态响应	84
3.4 高阶系统的暂态响应	94
3.5 用 MATLAB 求控制系统的暂态响应	97
3.6 控制系统的稳定性	102
小结	112
复习思考题	113
第 4 章 根轨迹分析法	116
4.1 根轨迹的基本知识	116

4.2 根轨迹的数学描述	118
4.3 根轨迹绘制的基本规则	121
4.4 根轨迹绘制的应用举例	127
4.5 参量根轨迹的绘制	133
4.6 根据根轨迹分析系统的性能指标	134
4.7 正反馈系统和非最小相位系统的根轨迹	136
小结	139
复习思考题	139
第 5 章 频率特性分析法	142
5.1 频率特性的基本知识	143
5.2 频率特性的基本图示方法	147
5.3 典型环节的频率特性	152
5.4 奈奎斯特稳定判据	161
5.5 基于频率特性的控制系统性能分析	167
小结	174
复习思考题	175
第 6 章 自动控制系统的的设计	178
6.1 控制系统的校正	178
6.2 PID 校正设计	180
6.3 串联校正装置的型式与特性	201
小结	219
复习思考题	220
第 7 章 离散系统的分析	222
7.1 采样过程和采样周期	222
7.2 z 变换	225
7.3 z 反变换	229
7.4 基于 z 变换的离散系统的分析	231
7.5 离散系统的稳定性分析	237
7.6 离散系统的频率特性	241
7.7 离散控制系统的稳态误差	243
小结	245
复习思考题	245
第 8 章 MATLAB 语言及其在 HVAC 控制系统仿真中的应用	247
8.1 MATLAB 的基本知识	247
8.2 Simulink 仿真	251

8.3 HVAC 控制系统	254
小结	264
复习思考题	264
附录	265
附录 A 常用命令	265
附录 B 图形函数	267
附录 C 控制系统的工具箱函数	269
参考文献	270

第 1 章

绪 论

随着科学技术的飞速发展,自动控制起着越来越重要的作用,无论是在人造卫星、宇宙飞船、导弹制导的尖端技术领域,还是在机械、电子、轻工等工业过程控制及建筑业,它所取得的成就都是非常惊人的。自动控制技术把人类的许多希望和梦想由神话变成了现实,自动控制理论和技术已经运用到电气、机械、航空、化工、建筑、生物工程等许多学科和工程领域。自动控制理论与实践的不断发展,为人们提供了设计最佳系统的方法,大大提高了生产率,节省了生产和生活的能源,同时促进了技术的进步。目前,越来越多的大学将控制论作为国内外许多学科普遍开设的课程,工程技术人员和科学工作者都十分重视自动控制理论的学习。

自动控制系统源于两千年前古埃及的水钟控制和我国汉代的指南针控制。自动控制原理主要讲述自动控制的基本理论和控制系统的分析与设计的基本方法。控制原理包括经典控制理论、现代控制理论和智能控制。经典控制理论主要以传递函数为工具和基础,以频域法和根轨迹法为核心,研究单变量控制系统的分析和设计。经典控制理论在 20 世纪 50 年代就已经发展成熟,至今在工程实践中仍得到广泛的应用。经典控制理论是本教材重点讨论的内容。现代控制理论从 1960 年开始得到迅速发展,它以状态空间方法作为标志和基础,研究多变量控制系统和复杂系统的分析和设计,以满足军事、空间技术和复杂的工业领域、建筑领域对精度、速度、重量、加速度、成本、节能等的严格要求。智能控制是控制理论发展的高级阶段,它主要用来解决那些用传统控制方法难以解决的复杂系统的控制问题。智能控制是一门交叉学科,著名美籍华人傅京逊教授 1971 年首先提出智能控制是人工智能与自动控制的交叉,即二元论。美国学者 G. N. Saridis 1977 年在此基础上引入运筹学,提出了三元论的智能控制概念。

1.1 自动控制系统的初步概念

1.1.1 人工控制

图 1-1 所示是一个简单的水箱液面人工控制系统。因生产和生活的需要,希望液面高度 h 维持恒定(在允许的偏差范围内)。当水位偏离期望值(设定值)时,人通过眼睛对液面高度的观测,及时做出决定,操作进水阀门,对进水量进行相应的修正,使液面恢复到期望的高度。这种人为强制性地改变进水量而使液面高度维持恒定的过程,即人工控制过程。人工控制在复杂、快速、精确的系统中是不能满足要求的,也不利于减轻劳动强度。于是,没有人直接参与的自动控制随着控制工程的发展而逐步发展起来了。

1.1.2 自动控制的定义及基本职能元件

1. 自动控制的定义

自动控制就是在无人直接参与的情况下,利用控制器使被控对象(或过程)的某些物理量(或状态)自动地按给定的规律去运行。

对于液面的自动控制,可用图 1-2 所示的方式实现。液面的期望高度由自动控制设定。当出水与进水的平衡被破坏时,水箱水位下降(或上升),出现偏差。这个偏差由浮子检测出来,自动控制器在偏差的作用下控制气动阀门使阀门开大(或减小),对偏差进行修正,从而保持液面高度不变。

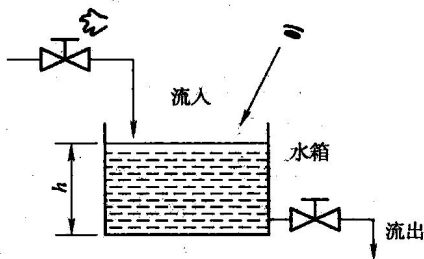


图 1-1 液面人工控制

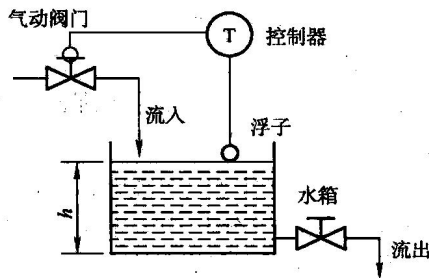


图 1-2 液面自动控制

2. 自动控制的基本职能元件

从人工控制与自动控制的例子比较可以看出,自动控制的实现实际上是由自动控制装置来代替人的基本功能,从而实现自动控制。将人工控制框图 1-3a 与自动控制框图 1-3b 进行比较,如图 1-3 所示。从图中可看出,自动控制实现人工控制的功能,存在必不可少的 3 种代替人的职能的基本元件:①测量元件

(或测量元件和变送器)代替人的眼睛→检测水位; ②自动控制器代替人的大脑→检测偏差, 发出指令; ③执行器代替人的肌肉和手→操作阀门。

这些基本元件与被控对象相连接, 一起构成一个自动控制系统。典型的自动控制系统框图如图 1-4 所示。

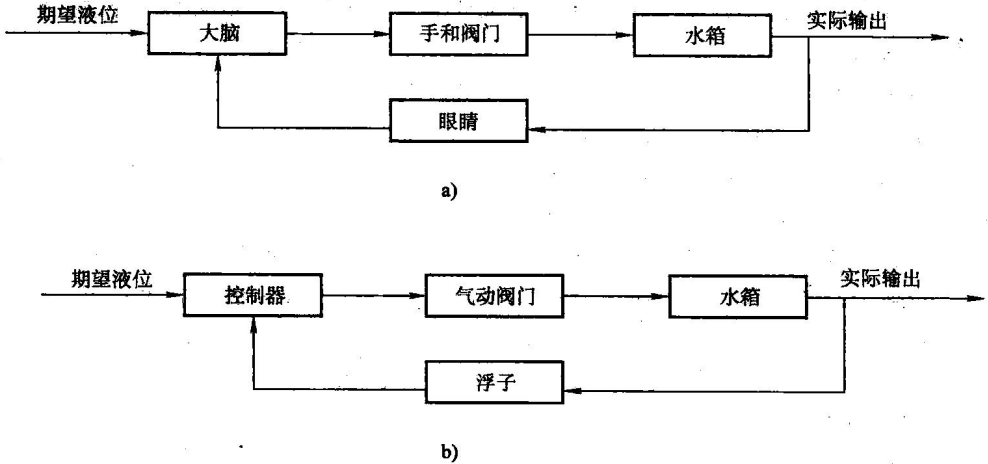


图 1-3 控制功能框图
a) 人工控制 b) 自动控制

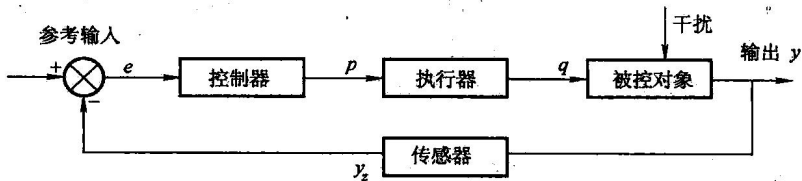


图 1-4 典型的自动控制系统框图

1.1.3 自动控制中的一些术语和组成

1. 常用术语

控制对象: 与被控量相关的被控设备、物体或者工艺系统。

控制器: 使被控对象具有所要求的性能或状态的控制设备。它接受输入信号或偏差信号, 按控制规律给出调节量 (或控制量), 送到执行器。

自动控制系统: 自动控制系统是指被控对象和控制装置的总体。自动控制系统作为一个整体, 是一些部件的组合。这些部件组合在一起, 完成一定的任务。

操作量: 执行器输出的量值或状态。

输入信号: 由外部加入到系统中的变量称为输入信号, 它不受系统中其他变

量的影响和控制。

参考输入：是人为给定的，使系统具有预定性能或预定输出的激发信号，它代表输出的希望值，也称之为期望值、设定值、给定值，是系统输入信号之一。

扰动：干扰和破坏系统具有预定性能和预定输出的干扰信号。如果扰动来自内部，称为内部扰动；如果扰动来自系统外部时，则称为外部扰动，外部扰动是系统输入量。

系统输出：就是被控制的量。它表征过程的状态和性能。

偏差：指参考输入与主反馈之差。

特性：指系统的输入与输出之间的关系，可分为静态特性和动态特性。可以用特性曲线来直观地描述和观察系统。

静态特性：在系统稳定以后表现出来的输入与输出之间的关系。在控制系统中，静态是指各参数或信号的变化率为零。静态特性表现为静态放大系数。

动态特性：输入和输出处在变化过程中所表现出来的特性。动态特性表现为过渡过程，即从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态。

2. 自动控制系统框图

控制系统的框图又称动态结构图，简称框图，它们是以图形表示的数学模型。框图是系统各部分用方框表示并注上文字或代号，根据各方框之间的信号传递关系，用有向线段把它们依次连接起来，并标明相应的信息。框图能够非常清楚地表示输入信号在系统各元件之间的传递过程，利用框图还可以方便地求出复杂系统的传递函数。框图是分析控制系统的—个简明而有效的工具。图 1-3 和图 1-4 已经应用框图来阐述系统各元件的功能、相互之间的连接和信息传递。

3. 自动控制设备

给定器：给定器是给出与系统期望相对应的系统输入值，是一类产生输入指令的装置。

比较器：比较器把测量元件检测到的实际输出值与期望值比较，求出它们之间的偏差。常用的电量比较器有差动放大器和电桥电路等，如图 1-5 所示。

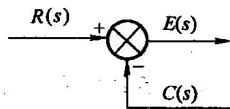


图 1-5 比较器

执行器：执行器是直接推动被控对象，使其被控量发生变化。例如，阀门和伺服电动机等。

传感器和变送器：传感器是将一种物理量检测出来，并且按着某种规律转换成容易处理和使用的另一种物理量输出。变送器是将传感器的输出信号放大和转换成标准信号。

控制器：由上述 3 大类元件与控制对象组成的系统往往不能满足技术要求。为了保证系统能正常工作（稳定）并提高系统的性能，控制系统中还另外补充一些元件，这些元件统称为补偿元件，又称为校正元件，工程上统称为控制器。

1.2 自动控制系统的分类

自动控制系统的形式是多种多样的,对于某一个具体的系统,采取什么样的控制手段,要视具体的用途和目的而定。

1.2.1 按控制系统的结构分类

1. 开环控制

开环控制是最简单的一种控制方式,按照控制信息传递的路径,它具有的特点是,控制量与被控制量之间只有前向通路而没有反向通路。也就是说,控制作用的传递路径不是闭合的,故称为开环。

(1) 按给定控制 控制作用直接由系统的输入量(设定值)产生。给定一个输入量,就有一个输出量与之相应。控制精度完全取决于信息传递过程中所用元件性能的优劣及校准的精度。图1-6所示为直流电动机转速开环控制(按给定控制)框图。图中的电动机是电枢控制的直流电动机,要求它带动负载以一定的转速转动。其电枢电压通常由功率放大器提供,但调节电位器滑臂位置时,可以改变功率放大器的输入电压,从而改变电动机的电枢电压,最终改变电动机的转速。

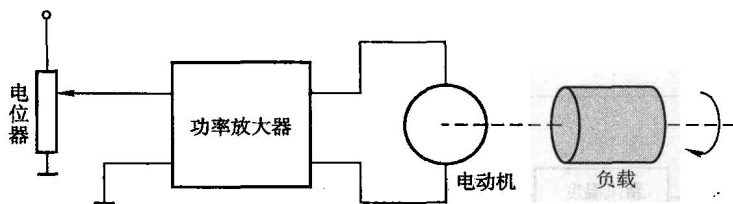


图 1-6 直流电动机转速开环控制框图

以上控制过程可用图1-7所示的框图简单直观地表示控制系统。从框图可明显地看出控制信息的传递过程是由输入端沿箭头方向逐级传向输出端。控制作用直接由系统的输入产生,给定一个输入量,就有一个输出量与之相应,控制精度完全取决于信息传递过程中所用元件性能的优劣及校准的精度。这种控制方式的特点是控制作用的传递具有单向性,作用路径不是闭合的,属于典型的开环控制方式。开环控制的特点是,系统简单,调试容易,成本低,在国民经济各部门均有采用。例如,自动售货机、自动洗衣机,以及交通指挥红绿灯。但是,当工作环境和系统本身的元件性能参数发生变化时,例如,电动机的负载变大,若电位器的位置按控制指令不变,输出转速就要跟着下降。这说明开环系统的被控变量准确性较差,即抗干扰能力差,控制的准确性低。

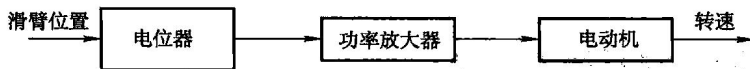


图 1-7 直流电动机转速控制框图

(2) 按扰动控制 为了克服开环控制的缺点,提高控制精度,在一些扰动可以预计的场合,可根据测得扰动量的大小,对系统产生一种补偿和修正,从而减少或抵消扰动对输出量的影响。这种控制方式是把外界扰动看作系统的一种输入,针对它将对系统输出产生的影响,及时地施加一种相应的控制,在干扰刚刚出现之初,就立即给以相应的调节,其作用是抵消扰动对输出的影响。图 1-8 所示为新风温度自动控制系统。新风温度自动控制是根据室外新风温度调节预热器的加热量,控制预热器后的新风温度。图 1-9 所示为新风温度开环控制系统框图,从图中可看出,控制量与被控制量之间只有前向通路而没有反向通路,而且,输出量对输入量产生的控制作用没有影响。

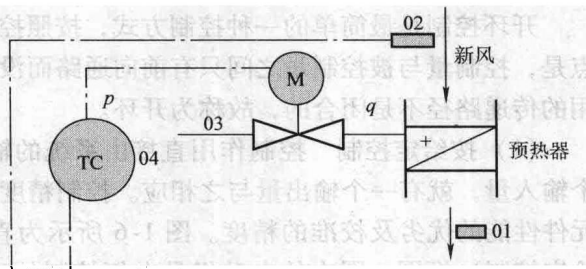


图 1-8 新风温度开环控制系统

01—预热新风温度传感器 02—新风温度传感器
03—执行器 04—温度控制器

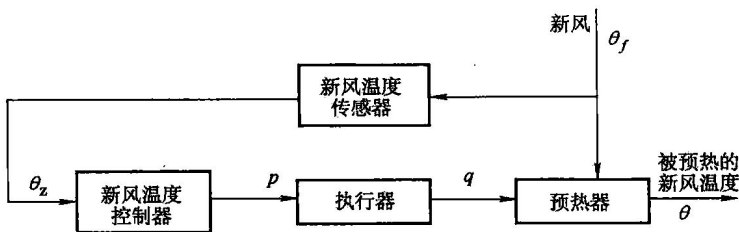


图 1-9 新风温度开环控制系统框图

2. 闭环控制

如果在控制器和被控对象之间不仅存在正向作用,而且存在反向作用,即系统的输出量对控制量具有直接的影响,那么这类控制称为闭环控制。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,称为反馈。因此,闭环控制又称为反馈控制。图 1-10 所示是直流电动机转速闭环控制系统。该系统在原来开环控制的基础上增加了一个由测速发电机构成的反馈回路,用来检测输出的转速,并给出电动机转速成正比的反馈电压。将这个代表实际输出转速的反馈电压与代表希望输出转速的给定电压进行比较,所得出的偏差信号作为产生控制作用的基础。通过功率放大器(控制器)来控制电动机的转速,也称为按偏差控制。

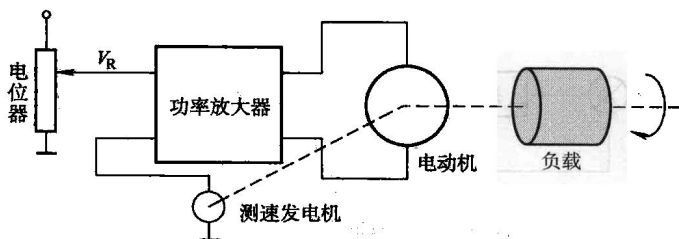


图 1-10 直流电动机转速闭环控制系统

可以看出，在控制过程中只要偏差存在，控制作用总是存在的。控制的最终目的是减小偏差，提高控制精度。

图 1-11 所示是直流电动机转速闭环控制系统框图。当系统受到扰动影响时，例如负载增大，则电动机的转速降低，测速发电机的端电压减小。在给定电压不变时，偏差电压则会增大，功率放大器输入电压增加，电动机的电枢电压上升，使得电动机转速增加。如果负载减小，则电动机转速的过程与上述过程变化相反。闭环控制抑制了负载扰动对电动机转速的影响，如果其他扰动因素只要影响到输出转速的变化，上述控制过程就会自动进行，从而保证了系统的控制精度，提高了抗干扰能力。但闭环系统结构复杂，设计和调试技术也复杂，闭环系统还会产生一种失控现象——不稳定。

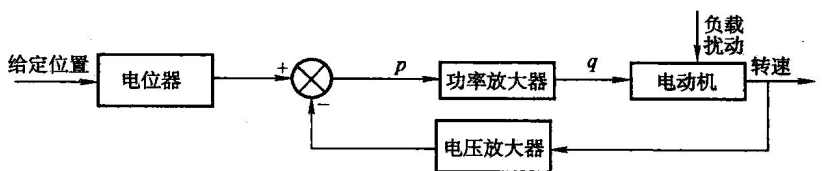


图 1-11 直流电动机转速闭环控制系统框图

通过以上讨论，反馈控制实质上是将被控量反送到系统的输入量与给定值进行比较，利用偏差引起控制器产生控制量，以减小或消除偏差。

图 1-12 所示是室内温度自动控制系统。图 1-13 所示是室内温度自动控制系统框图。控制系统的作用是保持室内温度达到期望值。当室内温度降低时，室内温度传感器将检测的温度信号送到

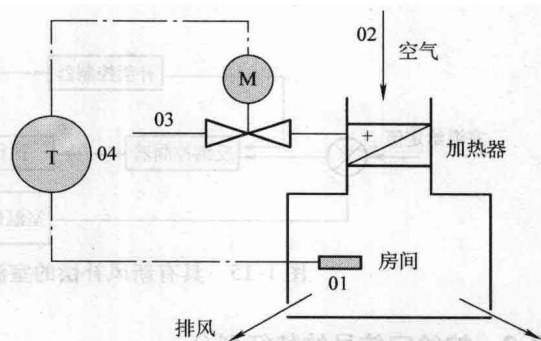


图 1-12 室内温度自动控制系统

01—室内温度传感器 02—加热器
03—执行器 04—温度控制器