



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

自动控制原理

谢援朝 朱用湖 文群英 合编
黄桂梅 雷鸣雳



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



自动控制原理

谢援朝 朱用湖 文群英 合编
黄桂梅 雷鸣雳
张早校 白成春 主审

中国电力出版社



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书介绍了经典控制理论的基本概念、基本原理和基本分析应用方法。主要内容有：自动控制系统的概念、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析法、根轨迹法、控制系统的频域分析法、自动控制系统的校正与设计、离散控制系统，还简要介绍了非线性特性和逻辑运算控制，以及 MATLAB 语言初步的使用操作方法等。各章中均配有本章小结、思考题和习题，教材附有部分思考题与习题的参考答案。

本书可供高职高专、成人高校、二级职业技术学院以及函授教育的生产过程自动化技术、热工检测与控制技术、计算机控制技术等自动控制类专业教学使用，也可作为集控运行、热动等相关专业、火电机组培训和自动化技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/谢援朝等合编. —北京：中国电力出版社，2007
教育部职业教育与成人教育司推荐教材
ISBN 978 - 7 - 5083 - 6024 - 9

I. 自… II. 谢… III. 自动控制理论—职业教育—教材
IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 130722 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 9 月第一版 2007 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.25 印张 436 千字

定价 28.80 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 所 有 翻 印 必 究

前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材,是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的,并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审,又列为全国电力职业教育规划教材,作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标;符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求;具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性;符合职业教育的特点和规律,具有明显的职业教育特色;符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书,也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

根据高职高专培养目标和生产过程中自动控制实际的要求,作者在本书编写中以应用为目的,以够用、必须为度,结合工程实际应用需要调整内容,注意理论联系实际,强调基本概念,注重基本原理,着重基本应用方法,努力做到深入浅出,循序渐进,由简到繁,内容精练,突出重点,便于自学。

编写本书的思路是以经典控制理论为主线。在第一章绪论中结合应用实例,叙述了自动控制的基本概念和技术指标,第二章讨论了数学模型的建立和应用,第三章到第七章围绕自动控制系统稳、准、快等性能指标要求,分别讨论了连续时间控制系统的时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法、校正与设计方法的应用、离散时间控制系统的分析方法,并在第八章对非线性特性的影响和作用以及逻辑运算控制进行简单介绍。各章均有小结、思考题与习题;教师可以根据具体情况对教材的内容进行取舍。

在本书的编写中注意到以下几点:

(1) 本书引入 MATLAB 语言及 Simulink 作为控制系统分析和设计的工具,使其成为辅助教学的手段,便于学生理解和巩固所学的自控原理的内容,为后续的控制系統、计算机控制等课程的学习奠定基础。附录中简要介绍了该软件初步的使用操作方法、常用的函数命令和模块,在各章中均有该软件的应用举例。

(2) 由于实际工程中存在各种非线性特性,因此,本书对非线性控制系统进行简单介绍。在第八章中,介绍典型非线性特性及其分析方法,并仿真验证非线性特性的影响和作用。

(3) 鉴于生产过程控制中连续控制与开关控制综合应用的实际,因此,本书尝试性地安排了开关量逻辑控制简介一节,介绍开关量控制基本作用和逻辑运算功能原理,并简要地补充可靠性技术基础知识。

参加本书编写的人员有西安电力高等专科学校谢援朝(第一章、第八章、第七章部分内容、附录 A、B)、雷鸣雳(第二章、第三章)、保定电力职业技术学院黄桂梅(第四章)、武汉电力职业技术学院文群英(第五章、第六章)、江西电力职业技术学院朱用潮(第七章)。全书由谢援朝统稿。

本书由西安交通大学博士生导师张早校教授和陕西电力科学研究院白成春高级工程师主审。他们认真仔细审阅全部书稿，提出许多宝贵的意见和建议，在此深表感谢。

在本书的编写过程中我们参考了有关的教材资料，巨林仓教授、王建国教授曾对编写提纲提出了宝贵建议；李娟、闵红利等协助检查和解答部分习题。在此，谨向所有为本书编写和出版给予帮助的同志表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中存在的缺点和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2007年7月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 自动控制技术及系统组成	1
第二节 自动控制系统分类	6
第三节 对自动控制系统性能的要求	11
第四节 自动控制原理内容和应用概要	15
本章小结	17
思考题与习题	18
第二章 控制系统的数学模型	20
第一节 系统数学模型的基本概念	20
第二节 控制系统的微分方程	21
第三节 控制系统的传递函数	24
第四节 典型环节的动态特性及其传递函数	30
第五节 系统方框图及其等效变换	40
第六节 热工对象的数学模型	49
第七节 控制设备的数学模型	53
第八节 MATLAB 在系统数学描述中的应用	58
本章小结	62
思考题与习题	62
第三章 控制系统的时域分析法	65
第一节 典型输入信号和时域性能指标	65
第二节 系统的稳定性分析	68
第三节 一阶系统的分析	74
第四节 二阶系统的分析	77
第五节 高阶系统的分析	82
第六节 系统稳态性能分析	85
第七节 MATLAB 在时域分析中的应用	92
本章小结	96
思考题与习题	97
第四章 根轨迹法	100
第一节 根轨迹的基本概念	100
第二节 绘制根轨迹的基本规则和方法	102
第三节 特殊根轨迹	108

第四节 用根轨迹分析系统性能	112
第五节 控制系统结构参数变化对根轨迹的影响	114
第六节 根轨迹分析法应用举例	119
第七节 用 MATLAB 绘制控制系统的根轨迹	122
本章小结	123
思考题与习题	124
第五章 控制系统的频域分析法	126
第一节 频率特性的基本概念	126
第二节 频率特性的表示方法	128
第三节 典型环节的频率特性	130
第四节 系统开环频率特性绘制	139
第五节 用频域法分析系统的稳定性	147
第六节 闭环系统动态特性和开环系统频率特性的关系	156
第七节 利用 MATLAB 进行频率特性曲线绘图分析	160
本章小结	161
思考题与习题	165
第六章 自动控制系统的校正与设计	167
第一节 控制系统校正的基本概念	167
第二节 常用校正装置	170
第三节 串联校正	176
第四节 反馈校正	188
第五节 前馈—反馈复合校正	192
本章小结	193
思考题与习题	194
第七章 离散控制系统	195
第一节 离散控制系统的基本概念	195
第二节 信号的采样和复现	197
第三节 Z 变换法	201
第四节 离散系统的数学模型	208
第五节 离散控制系统的稳定性分析	220
第六节 离散控制系统的稳态误差	224
第七节 离散控制系统的动态性能	227
第八节 数字计算机控制系统中采样、量化和 PID 环节简介	230
第九节 MATLAB 用于离散时间系统分析	234
本章小结	240
思考题与习题	240
第八章 非线性控制系统简介	242
第一节 非线性系统基本概念	242
第二节 典型的非线性特性	244

第三节 非线性系统的分析方法简介	247
第四节 Simulink 在非线线性控制系统仿真中的应用	248
第五节 开关量控制及逻辑功能环节	252
本章小结	260
思考题与习题	260
附录 A MATLAB 语言应用基础简介	262
附录 B Simulink 仿真应用基础	268
附录 C 部分章节习题参考答案	273
参考文献	279

绪 论

在工业生产过程和科技领域之中,自动控制技术得到了广泛的应用,并且也随着科学技术的进步而发展。特别是在许多现代工业生产过程中,为了保证生产的安全、可靠和经济,提高产品的质量、产量和劳动生产率,降低成本,以及改善劳动条件和环保等预期目标的实现,对于诸如压力、温度、液位、流量等生产工艺操作过程来说,自动控制已成为必不可少的组成部分。自动控制利用控制装置自动操纵机器设备或生产过程,使其具有希望的状态或功能。自动控制原理是研究自动控制共同规律的科学,也是研究生产过程自动化的基础知识。掌握自动控制理论的基础知识,可以分析自动控制系统性能,可以找出自动控制系统不满足性能指标要求的问题所在,可以设计和改造自动控制系统。因此,自动控制原理的基础知识是从事生产过程自动化技术人员的必备知识。

本章主要介绍自动控制的基本概念、自动控制系统的分类和对自动控制系统性能指标的要求;概要介绍自动控制原理课程的学习内容和应用的基本问题。

第一节 自动控制技术及系统组成

在生产过程的自动控制中,一般都要综合应用以下技术及其作用:自动检测技术,其作用是检测反映生产过程运行情况的各种参数(温度、压力、流量、转速等)和设备的工作状况(启动、停止、掉闸等),用以监视生产运行工作状态;自动报警技术,其作用是当生产过程参数越限、设备异常时,以声、光等形式提醒运行人员注意并进行处理;自动保护技术,其作用是防止事故产生,避免事故扩大,确保人身和设备安全;自动控制技术,其作用是取代人的操作,使生产过程具有期望的状态或功能。按照自动控制信号(控制指令)的类型和控制运算的特点,可以分为顺序控制和自动调节两大类自动控制技术。

顺序控制的控制信号(控制指令)是两位控制状态的开关量控制信号(即打开或关闭、启动或停止、1/0、通/断、ON/OFF等),它的控制运算特点是按照工艺要求事先确定好的顺序、条件、时间、逻辑,对相关设备进行一系列的自动操作。顺序控制可以起到减少监视操作面,减少误操作,提高效率和效果等作用。顺序控制一般用于经常性的有规律性的操作或操作过程较复杂的设备组的启动、停止等控制项目或工艺系统上。如锅炉的点火顺序控制,制粉系统顺序控制,送、引风机顺序控制,吹灰顺序控制、汽轮机自启停顺序控制等。

自动调节的控制信号(控制指令)是随时间连续变化的模拟量控制信号(即开大及关小,增大及减小,工程信号范围一般为 $4\sim 20\text{mA}$, $0\sim 1$, $0\%\sim 100\%$ 等),它的控制运算特点是控制指令连续地在数量上或程度上对生产过程参数进行调整、控制和操纵,不使过程参数任意活动或超出规定的范围,使其达到生产工艺要求。自动调节是连续正常运行条件下最经常起作用的自动化职能,对生产的经济性和安全性有极大的影响。如火力发电厂中锅炉的水位调节、汽温调节、燃烧调节,汽轮机的转速调节、功率调节等。由此可见自动调节就是一种模拟量信号的自动控制。下面将通过一些自动调节的实例介绍自动控制的基本概念。

一、人工控制与自动控制

在工业生产过程中，为了保证生产的安全性、经济性和产品的质量等，生产工艺要求对生产设备或过程进行控制（或调节），以使生产设备或生产过程实现要求的功能或具有希望的状态，使某些物理量处于生产工艺要求的范围内。把这些被控制的设备或过程称为被控对象（被调对象或调节对象），把所要求保持的物理量称为被控量（或被调量），例如热力过程中的压力、温度、液位、流量、成分和转速、位移等物理量。这些被控量在生产运行中总会经常受到各种因素的影响而偏离工艺所要求的值。因此，运行操作人员就要对生产设备和生产过程随时加以监视、操作和控制，克服干扰的影响，使被控量达到要求值，这种由人按照一定的程序和技术要求的活动就称为人工操作或人工控制。按生产工艺要求被控量应该具有的参数值称为希望值（或期望值等）。凡是能影响被控量变化的因素称为扰动，而产生扰动因素的机构则称为扰动机构，其中能够有效按照操作指令改变被控量的物理量称为控制量（或调节量），能够改变控制量的手段称为控制手段，能够改变控制量的机构称为控制机构（或调节机构）。调节机构产生的扰动称为基本扰动，而其他的扰动则称为干扰。这些都是常用的基本术语。

（一）人工控制

这里以水箱水位的控制为例来讨论控制方式。水箱水位控制系统的任务是为保证用户正常用水和设备安全经济运行，要求水箱水位保持在一定的高度上（此要求的水位高度就是期望值）。该结构示意图如图 1-1 所示。在此，被控对象就是水箱，被调量就是水位高度，调节量就是水箱的流入量，调节机构就是流入侧调节阀门，扰动量就是水箱的流出量（即用水负荷），扰动机构就是流出侧阀门。在人工控制时，人用眼睛观察水位变化，用大脑分析判断，用手操作调节阀改变流入量，从而保证水位在要求的高度上。从物理学物质守恒知识可以知道，当水箱流入量与其流出量维持平衡时，水箱的水位不变化，保持在一定高度上，此时为静态。当客户用水量增大（即流出量增大）造成水位下降，此时，系统进入非平衡状态，即动态。操作人员观察到实际水位低于希望值时，应能判断出此时流入量小于流出量，同时要开大入水调节阀

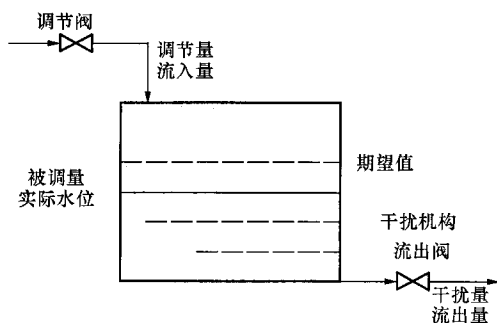


图 1-1 水箱水位控制结构示意图

增大流入量，使流入量与流出量达到新的平衡，以保证水位在要求的高度上。当然这个人工调节过程离不开人，调节效果也就因人而异了。因为人在操作的过程中，手去操作阀门的同时还在感觉（即“小反馈”）是否操作过头或不及，最终还是靠眼睛观察（即“大反馈”）实际水位是否达到要求的希望值高度。当流入量与流出量又达到平衡，维持实际水位在要求的水位期望值上（两者之偏差为零）时，阀门保持相应的开度，此时系统又进入了平衡状态，即静态，从而实现了水箱水位控制任务。

（二）自动控制

可以采用浮子—杠杆—阀控制装置取代人对水箱水位控制的操作，该结构示意图如图 1-2 所示。浮子起到测量水箱水位变化的作用，杠杆接收到浮子传递过来浮力并产生位移，通过杠杆系统（根据几何相似、力矩平衡）去操纵执行机构——调节阀。动态调节过程分析

与上述人工控制类同。由于杠杆支点居中，当用水量增大（即流出量增大）造成水位下降，浮子下降，而通过杠杆系统使杠杆另一边上升，开大调节阀，以增大流入量，使流入量与流出量达到新的平衡，就可以使水位保持在相应的高度上。这里被控量水位的变化通过杠杆改变调节量流入量，这就是反馈。流出量增大引起水位下降并通过杠杆使流入量增大，水位上升，两者方向相反，这就是一种负反馈，从而使流入量达到与流出量平衡。

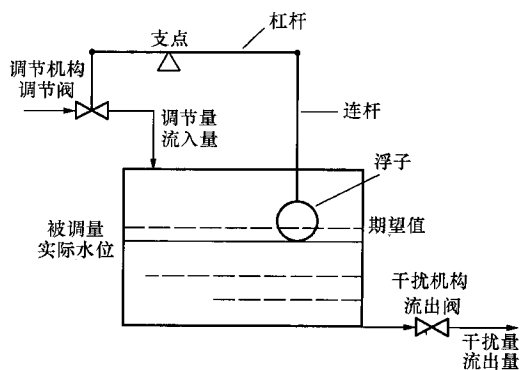


图 1-2 水箱水位简单机械自动控制示意图

由于只有维持流入量与流出量相等，水位才能保持不变。而杠杆系统是个刚性系统，在一定的流出量负荷扰动下，必须使流入阀改变相应的阀门开度，以保持流入量与流出量的相应变化，达到流入流出平衡，从而维持水位在与流出量负荷对应的新的位置上。如流出量增大一定量的扰动，经浮子—杠杆—调节阀，水位则维持在比原先流出量负荷下的水位低的位置上，即调节后新平衡状态与原平衡状态时维持的水位高度不同。这说明这种刚性控制可以达到平衡状态，但是，被控量水位在平衡时的实际高度值是随流出量负荷大小而不同的，并且杠杆支点在杠杆两个节点间的位置不同，也影响被控量水位在平衡时的实际高度值。

这种采用机械、电气、电子等控制装置取代人的直接操作，以使生产设备或工艺过程按照某种预定的规律运行，或使某个或某些物理量保持恒定或者按照要求变化，就称为自动控制（或自动调节）。这就要求自动控制装置实现人工操作中人体相应器官的功能，从而使具有眼、脑、手等相应功能的检测变送器、控制器（计算判断）、操作执行器等元器件设备成为了自动控制装置的三大功能组成，也是自动控制技术的 3 个基本内容：传感、计算和执行。

下面定性讨论火力发电厂汽轮机调速系统的工作过程。

汽轮机调速系统的示意图如图 1-3 所示。其被调对象是汽轮机，被调量是汽轮机实际转速，调节量是蒸汽流量，调节机构是进汽阀门，扰动量主要是汽轮机所带的负荷。自动调节装置是由离心式测速器、定值弹簧、杠杆系统和进汽阀门等组成。代表转速希望值的给定值是由调整定值弹簧产生的一个力作用在杠杆系统上而实现的。根据能量守恒定理，当蒸汽带入

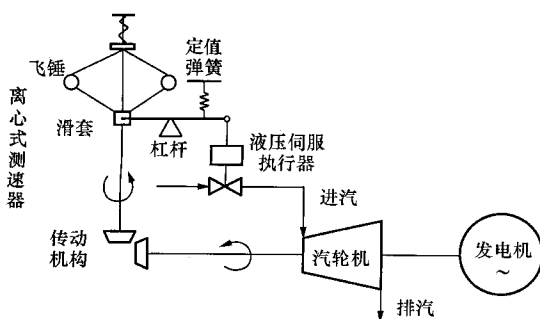


图 1-3 汽轮机调速系统的示意图

的能量与负荷的需求平衡时，汽轮机的转速保持不变。此时自动调节装置中的力或力矩平衡。当负荷增大时，实际转速降低到希望的转速值以下，测速器的离心力下降，飞锤通过连杆带动滑套下降，通过杠杆系统使另一边的液压伺服执行器将进汽阀门开大，增加进汽量并使汽轮机的转速上升，测速器的离心力逐渐恢复，直到蒸汽带入的能量与负荷的需求平衡时，自动调节装置中的力或力矩也平衡，进汽阀门保持在与负荷要求相应

的开度上, 实际转速又恢复到希望转速的给定值, 从而实现自动调节。反之, 当负荷减小时, 亦可类同分析。

可见, 该汽轮机调速系统可以实现克服负荷扰动的影响, 自动调节进汽阀门的开度, 从而改变进汽量, 保证汽轮机转速在工艺要求的转速希望值上。在此调节过程中, 并不需要人的直接干预或人工操作阀门。

二、自动控制系统

所谓系统一般是指事物按一定的关系组成的整体或集合。自动控制系统由自动控制装置和被控对象组成, 通过其相关信号有机联系及相互作用, 能自动地使被控对象的工作状态或其被控量得以控制并具有预定的性能。自动控制系统的任务是自动操纵被控对象, 克服干扰的影响, 使生产设备和工艺过程按照某种规律运行, 并且使被控量相应于 (或等于) 希望值。若被控量和希望值分别用 $c(t)$ 和 $r(t)$ 表示, 则可以表达为 $c(t) \Rightarrow r(t)$ 。

为了方便对自动控制系统的描述, 可以用方框图 (方块图) 表示自动控制系统的组成、各部分功能以及它们之间信号 (信息) 的传递变换关系。因此, 方框图也是一种自动控制的“技术语言”。

(一) 自动控制系统方框图

方框图是控制系统结构和信号关系的一种直观的图解表示, 是对具体控制系统的一种抽象描述。它可以定性地表示系统结构组成、元件功能、信号处理流程等, 这类方框图称为原则性功能方框图; 它也可以用数学模型来定量的描述组成元件的特性、信号的传递变换关系等, 这类方框图称为动态函数方框图。无论哪种方框图一般都包括 4 个要素, 如图 1-4 所示。

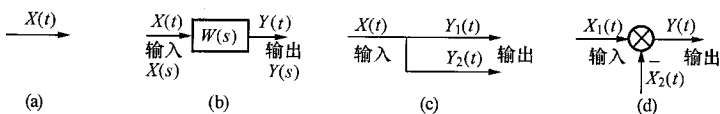


图 1-4 方框图 4 要素示意图

(a) 信号线; (b) 方框; (c) 引出点; (d) 综合点

(1) 信号线: 它以带箭头的线段表示信号及其流向, 具有单向性。一般一个信号用一根信号线表示, 并在信号线旁边标注字符以表示其所代表的信号 (即某种信息), 见图 1-4 (a)。

(2) 方框 (也称为环节): 方框可以代表一个元件、器件、部件、设备或者一个过程等, 也可以代表它们的组合或系统。方框中应表示其功能名称或其数学模型特性等, 以反映环节在系统中的功能作用和信号变换特性。指向方框输入端的信号线为方框的输入信号 (即激励), 从方框输出端指出的信号线为方框的输出信号 (即响应)。对于确定的环节来说, 输入信号与输出信号之间是因果关系, 该关系可以通过方框的功能名称或数学模型来反映。这里所谓数学模型是指这个环节输入信号与输出信号之间因果关系的数学描述。例如环节的一种数学模型为传递函数 $W(s) = Y(s)/X(s)$, 这样当知道环节确定的传递函数和输入信号, 便可得到其输出响应, 即 $Y(s) = W(s)X(s)$, 见图 1-4 (b)。

(3) 综合点 (也称为求和点): 称指向自综合点的信号线为其输入信号, 称自综合点指出的信号线为其输出信号。输入信号的代数和作为综合点的输出信号, 由于求代数和, 其量纲必须相同。一般在输入信号线箭头旁以“+”或“-”符号表示正、负, 通常“+”省略

表示。图中综合点输出为 $Y = X_1 - X_2$ ，对应这种关系的元件也称为比较元件，见图 1-4 (d)。

(4) 引出点 (也称为分支点)：在一根信号线上的引出点可引出另一根信号线。由于信号反映的是信息，而不是指能量流或物质流等，因而信息等量引出。图中引出点关系为 $Y_1 = Y_2 = X$ ，见图 1-4 (c)。

在这里以一个简单的小型锅炉汽包水位调节系统来讨论一般调节系统的构成和原则性功能方框图的表示。汽包水位调节系统的任务是为保证机组运行的安全性、经济性，要求进水量和出汽量平衡，必须保持汽包水位在工艺要求的数值范围内。该系统的结构原理图如图 1-5 所示。其被调对象是汽包，被调量是水位，调节量是给水量，调节机构是给水调节门，干扰量是蒸汽流量 (外扰) 和给水母管压力变化 (内扰)。一般外扰指的是由负荷侧等引起被控量变化的外部扰动；而内扰是指由控制 (调节) 侧产生被控量变化的扰动。需要说明的是：这里的流入量/流出量和输入信号/输出信号两者概念是不同的，流入量/流出量是反映物质 (或能量) 对某点的流动方向，存在物质 (或能量) 守恒关系；而输入信号/输出信号反映的是确定环节的因果关系。虽然蒸汽流量是流出汽包的，但是它是引起水位变化的原因，所以，对于汽包水位对象环节来说是个输入信号。在明确了被控对象并分析后，就要配备控制装置以构成控制系统。

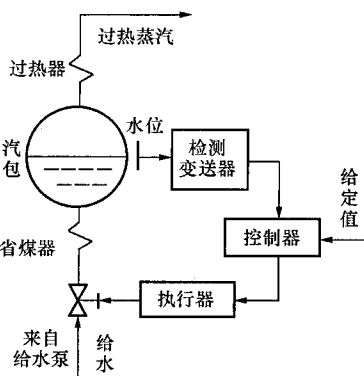


图 1-5 小型锅炉汽包水位调节系统结构原理图

(二) 自动控制装置

自动控制装置一般由检测变送器、控制器 (调节器)、执行器 3 个功能部分组成，从而取代人的操作，共同完成对被控对象或被控过程的自动控制。

(1) 检测变送器 (测量变送单元/检测变送元件) 功能是用来检测被控量等物理量 (如水位、压力、流量等)。它将被控量作为检测变送器的输入信号，并将其转换为电压、电流、气压或液压等检测信号后，作为输出信号送到控制器、指示仪表或计算机等，起到检测和监视作用。

(2) 控制器 (调节器/调节单元) 具有比较运算功能。它接收输入的检测信号 (即代表被控量的反馈信号)，并在比较元件中将检测信号与代表控制要求的给定值信号 (即对应的期望值) 比较，形成偏差信号；当被控量偏离给定值时，控制器将根据偏差信号的大小和正负按照一定的规律运算 [例如，比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) 等运算] 后，输出控制信号给执行器。给定值信号可以由控制器内部设定，也可以从外部给定单元取得。由于计算机是功能强大的信息处理机，现在常用它作为控制器，可以实行复杂运算，实现更多的控制算法或逻辑关系运算等功能，从而可以实现模拟量控制、开关量控制或综合控制。

(3) 执行器 (执行单元) 接收输入的控制信号，经功率放大后转换为机械力或位移等输出信号以操作调节阀或调节机构的开度等，从而改变控制量或调节量。常见的调节执行机构按照其动力源可以分为电动、气动和液动的三种。

在明确了被控对象和自动控制装置后，就可以利用方框图描述该自动控制系统，并分析其调节过程。

(三) 负反馈控制系统及其原则性功能方框图

根据图 1-5 锅炉汽包水位调节系统结构原理图，可以从对象的被调量水位信号出发，按照“眼、脑、手”顺序，通过调节机构作用到对象的信号关系，并考虑到有关扰动，依照方框图的规定，将各组成环节的信号连接便构成其原则性功能方框图，如图 1-6 所示。该系统的输出信号只有一个即被调量水位，系统的输入信号有 3 个，即水位给定值、给水流量或压力（内扰）和蒸汽流量（外扰）。

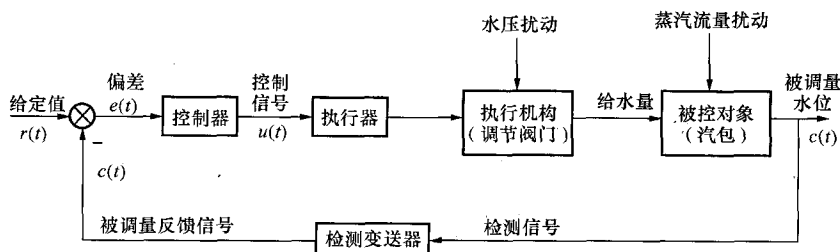


图 1-6 锅炉汽包水位调节系统原则性功能方框图

锅炉汽包水位调节系统的调节过程分析：当给水流入量与蒸汽流出量平衡，水位测量值保持在设定值时，给定值与测量值的偏差为零，给水调节阀门保持在相应的开度，此时系统处于静态（或稳态）。其原因是系统处于动态平衡状态。其现象是系统中各物理量（如流量、开度、高度等）的数值不随时间变化。当蒸汽流量增大使得流入量小于流出量而不平衡时，引起实际水位下降，造成了比较元件送出水位给定值与水位测量值产生不为零的偏差信号，控制器依据这个偏差信号在经过方向性（+/-）判断和控制运算后，产生控制信号送到执行器，给水调节阀门开大以增加给水流量，使得流入量与流出量之差减少，从而减少水位设定值与水位测量值的偏差，在合适的控制下，最终使得测量值回到给定值，系统重新达到平衡状态。

从上述的对控制过程分析中可以看出：系统处于平衡状态（静态 1）时，由于扰动（干扰或给定）的作用破坏了平衡状态，产生偏差，控制器依据偏差进行控制，去减小偏差，克服扰动的影响，使被调量相应于给定值，从而使系统达到新的平衡状态（静态 2）。这两个平衡状态之间的变动过程称为动态过程、过渡过程或调节过程。其原因是系统处于非平衡状态。其现象是系统中各物理量的数值随时间变化。它反映了控制系统的控制调节作用克服扰动影响，使系统重新达到平衡状态的工作过程。其中偏差起了很重要的作用，它是控制的依据，偏差的减小和消除又是控制的目的，而偏差的产生则依靠负反馈。负反馈控制的工作机理是找出偏差，依据偏差，减小和消除偏差。而偏差是源自于自动控制的任务之数学表达式 $c(t) \Rightarrow r(t)$ ，从而得到偏差 $e(t) = r(t) - c(t) \Rightarrow 0$ 。因此，负反馈控制方式可以保证自动控制任务的完成，是实现生产过程自动化的基本结构形式之一。因此，图 1-6 也可以视为典型负反馈控制系统的原则性功能方框图。

第二节 自动控制系统分类

生产过程中的自动控制系统是多种多样的。而对于自动控制系统的类型，从不同角度出发有不同的分类。

一、按控制系统信号回路结构分类

(一) 按照系统输出信号对系统控制作用的影响分类

1. 开环（前馈）控制系统

开环控制系统控制器与被控对象之间的信号只有顺向作用，而没有反馈联系的过程，即被控量的变化情况不参与系统的控制作用。一般说来开环控制系统的结构较为简单，控制直接快速，但是开环控制不能保证控制精度。开环控制可以根据系统输入信号的特点分为按给定值操作和按干扰值补偿两种方式，两者区别在于按哪种输入去控制被控量。

(1) 按给定值操作的开环控制方式。它是按照系统的给定值来控制系统的输出量，而系统输出量的变化对系统的控制过程无影响的控制方式。其原则性功能方框图如图 1-7 所示。其特点是输入对应输出，信号单向传递，无反馈回路，其自身无法纠正干扰的影响，控制精度无法保证，结构简单，易于实现，多用于对给定值及时跟踪而对精度要求不高、干扰影响比较小的场合。例如，在生活中，一般的洗衣机、烘烤箱的控制就是按给定值操作的开环控制，它们的被控量（衣服的干净程度、烘烤食品的生熟程度）对控制过程无影响，控制过程主要取决于控制计时器的设置，控制效果还取决于洗衣粉量、环境温度、工作方式的选择和设置计时器参数的经验等。在火电厂锅炉控制中，为了保证安全，防止炉膛内可燃混合物积聚而爆炸，要求停炉后和点火前，必须对炉膛进行吹扫。炉膛安全自动吹扫系统一般也是一个按给定值操作的开环控制，只要条件具备，它就按照事先给定的时间，保持一定风量的吹扫，过程无异常且时间到，则认为炉膛已吹扫干净。

(2) 按干扰值补偿的开环控制方式（前馈方式）。它是通过测量系统外部的干扰信号及时产生控制作用，以补偿或抵消该干扰对被控量的影响的控制方式。其原则性功能方框图如图 1-8 所示。将控制量对被控量的关系称为对象的控制通道，而将干扰对被控量的关系称为对象的干扰通道。按干扰值补偿的开环控制方式的特点是：将可测量的干扰信号输送至控制器计算后产生一个补偿信号作用于对象的控制通道，以及时克服或减小对象的干扰通道引入的该干扰对被调量的影响。这种控制方式常用于干扰影响比较大且经常出现的场合。例如，上述的锅炉汽包水位调节系统中，锅炉的任务是给汽轮机提供参数合格满足负荷能量需求的蒸汽量，所以蒸汽量的大小是由汽机侧决定的。因此，尽管蒸汽量的变化可以影响汽包水位，但不能作为水位的调节手段，只是该系统的负荷扰动。在工程上，一般将蒸汽流量信号作为按干扰值补偿的前馈补偿信号，用于改变给水量，以及时克服蒸汽流量变化对汽包水位控制过程的影响。因此，在这种控制方式中，也将控制器称为补偿器。

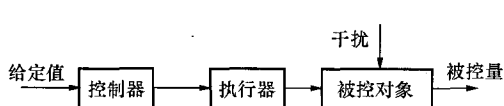


图 1-7 按给定值操作的开环控制原则性功能方框图

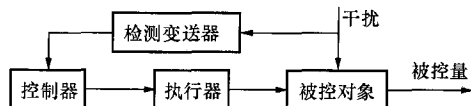


图 1-8 按干扰值补偿的开环控制原则性功能方框图

2. 闭环控制系统

闭环控制系统就是按偏差控制方式工作的负反馈控制系统。其工作机理是：通过测量输出量的实际值并反馈到输入端与给定值比较，找出偏差，依据偏差，修正控制，以减小和消除偏差。其原则性功能方框图如图 1-9 所示。其特点是由从输入到输出的前向信号通道和从输出到输入的反向信号通道构成闭合回路，形成信号的闭环回路；为了找出偏差，采用负反馈；由于

是按偏差控制，可以克服干扰对输出被调量的影响，能以较高的精度实现自动控制系统“使被控量相应于给定值”的任务。例如，生活中的空调、冰箱的温度控制，都采用了闭环负反馈按偏差控制的方式；上述的汽轮机闭环负反馈调速系统就可以在汽轮机给负荷提供能量的同时，保持汽轮机一定的转速；上述小型锅炉汽包水位闭环负反馈控制系统在保证给汽轮机提供足够蒸汽量的同时，保证汽包水位在给定值允许的范围内。正是因为这种闭环负反馈是按偏差控制的系统，所以有偏差才动作，相比开环控制一般要慢一些，系统结构要复杂一些，但是可以保证控制精度。负反馈控制系统是最常见的基本控制系统，也是本课程介绍的重点内容。

需要说明的是有两个常见的说法，一个是偏差信号，在系统输入端，即比较元件后输出的给定信号（参考量、设定值）与反馈信号（被控量的测量值或检测信号）之差，其量纲常见的是电流、电压单位或数值等；另一个是系统误差，在系统输出端，指工艺要求的希望值（期望值）与系统实际输出值（被控量、对象或系统输出）之差，其量纲常见的是物理量纲，如压力、温度、高度等。虽然，两种误差的量纲一般是不同的，但是给定值与希望值之间，反馈测量值与实际被控量值之间都有对应关系（一般为简单的比例关系）。一般着重研究偏差信号，这是因为一方面它反映了系统误差，另一方面它还是减少系统误差直接的控制依据。书中以后“误差”均指偏差。

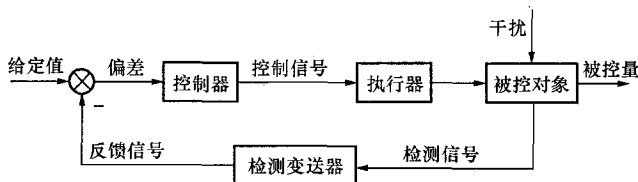


图 1-9 闭环负反馈控制系统原则性功能方框图

由此可知，自动控制系统的基本控制方式可以分为开环控制和闭环控制，开环控制还可以分为按给定值操作的开环控制方式和按干扰值补偿的开环控制方式两种。

3. 复合控制系统

复合控制系统结合了开环—闭环（前馈—反馈）两种控制系统的优点，既能及时克服干扰的影响或及时跟踪给定值的变化，同时又能保证系统的控制精度，可以构成实现较高性能指标的系统。其原则性功能方框图如图 1-10 所示。例如在实际工程应用中的锅炉汽包水位调节系统就是采用了按蒸汽流量干扰值补偿的前馈—反馈控制方式，见图 1-10 (a)。

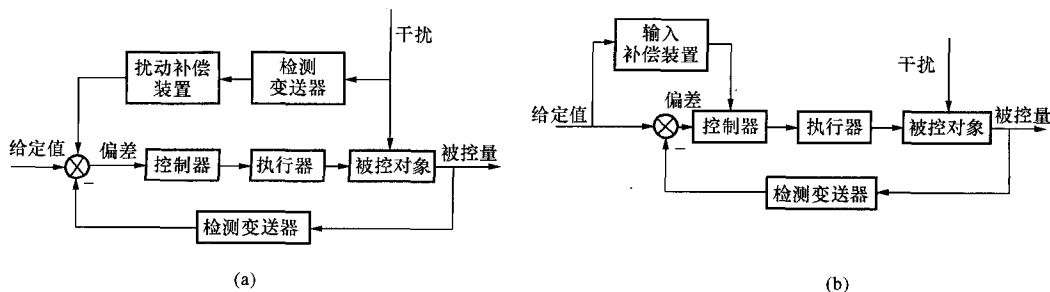


图 1-10 复合控制系统原则性功能方框图

(a) 按干扰值补偿的闭环控制；(b) 按给定值补偿的闭环控制

（二）按照控制系统中闭合回路数目分类

这里所谓的回路是指信号流程形成的闭环。按照控制系统中闭合回路数目可以有单回路、双回路或多回路控制系统之分。例如在汽包水位控制系统中，给水压力变化也是一种干扰。当调节阀在同样开度下时，给水压差变化带来流量的变化，从而引起水位变化。为此，或是另建立一个给水压力控制系统，保证给水压力不变来克服扰动；或是将给水流量变化反馈给控制器调整给水阀门开度，以减少给水压力扰动对水位影响。这样在水位作为主反馈信号形成外回路控制时，又引入给水量信号作为副反馈信号形成内回路控制反馈，从而使原先的单回路控制系统成为双回路控制系统。一般将单回路控制系统称为简单控制系统，而将多回路控制系统称为复杂控制系统。这里需要说明的是：一些单回路或多回路控制器所指的“回路”是指控制器能够连接的单个或多个执行器，而不是这里所指的信号闭环回路。

（三）按照系统中控制器串联结构的个数分类

按照系统中控制器串联结构的个数可以有单级、串级、多级控制系统之分。对于简单控制系统一般采用一个控制器的单级控制系统。而当由于对象的控制难度很大，仅靠上述一个控制器构成一个闭环负反馈的控制方式达不到生产工艺要求的控制效果时，可以考虑选择用两个控制器串行连接构成双回路串级反馈控制系统，以提高系统的控制品质。这是热工控制系统中常见的控制方式。图 1-11 所示为锅炉主汽温控制系统结构示意图。此系统中有两个测量信号，两个控制器，形成两个回路。辅助信号（或导前信号）和副控制器等构成内回路，主要及时克服内扰（如减温水压力的变化）的影响，起粗调作用；被控量信号和主控制器构成外回路，主要及时克服各种干扰的影响，保证被调量在给定值上，起细调作用。

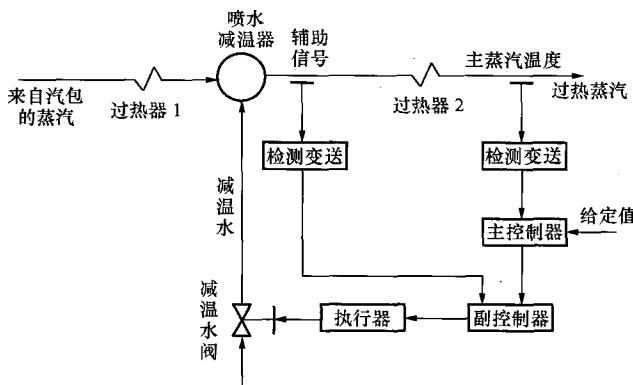


图 1-11 锅炉主汽温控制系统结构示意图

二、按控制系统给定值特点分类

1. 定值控制系统

定值控制系统给定值在控制过程中是一个保持不变的常量。这说明该控制系统的任务主要是克服各种扰动的影响，使输出被调量保持恒定，也称为恒值调节系统或镇定系统。例如恒温室的温度控制，火电厂汽包锅炉水位控制、蒸汽温度控制等，都是一些典型的定值控制系统。它们的生产工艺一般要求控制系统被调量保持在某一恒定值，因而常称这种定值控制系统为调节系统。

2. 随动控制系统

随动控制系统给定值在控制过程中是无法准确预知的一个变量。这说明该控制系统的任务