



普通高等教育“十二五”规划教材



自动控制原理与仿真 (Scilab应用)

谢援朝 主编

★ 本书配课件



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

自动控制原理与仿真 (Scilab应用)

主编 谢援朝

编写 杨 萍

主审 张早校



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。全书共十章，主要包括经典控制原理与仿真概述，经典控制系统数学模型，线性连续系统的时域分析、根轨迹分析、频域分析、系统校正，PID控制参数整定及其系统仿真，线性离散时间控制系统分析，非线性控制系统的仿真分析，开关量逻辑控制基础知识。各章有小结、思考题与习题，以及相应的Scilab/Xcos应用举例，并在附录提供科学计算自由软件Scilab/Xcos/CACSD应用基础、常用指令函数表及其自由软件许可协议参考译文。本书配有电子课件，编者电子邮箱xyc5132@163.com。

本书可作为本科能源动力类和高职高专电力技术类自动控制原理课程的教材，也可作为生产过程自动化培训教材。

图书在版编目（CIP）数据

自动控制原理与仿真：Scilab应用 / 谢援朝主编. —北京：
中国电力出版社，2012.6

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-3170-9

I. ①自… II. ①谢… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 ②自动控制系统—仿真系统—高等学校—教材
IV. ①TP13②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 128830 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.5 印张 525 千字

定价 38.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书为普通高等教育“十二五”规划教材,是根据高等教育自动化专业应用技术型和技术技能型培养目标及非自动化专业的控制工程基础等课程对教学内容的要求进行编写的。

本书的编写以自动控制原理应用为目的,结合工程实际需要,注重基本概念和基本分析方法的工程技术应用,注意数学方法应用与基本物理概念的结合,采用科学计算自由软件 Scilab/Xcos 作为控制系统分析和设计的仿真工具,综合理论分析、实验研究和科学计算及其数据可视化仿真技术实现一体化教学。

本书以经典控制原理为主。重点是关于线性定常连续时间和离散时间控制系统的分析及其仿真;在用时域分析方法、复域根轨迹分析方法、频域分析方法对系统的稳定性能、动态性能和稳态性能的分析中,强调对时域响应性能的分析及仿真;在具体论述中简化部分推导计算和绘制图表的过程,应用仿真分析以探讨规律,着重分析方法和结论的应用;加强 PID 控制技术应用的时域仿真及典型非线性特性对系统控制性能影响的研究。

本书应用的科学计算自由软件 Scilab 可以在其主页网站自由下载。Scilab 的便携移动应用特点便于实现计算机辅助教学、学生上机实验和实训,以及完成电子作业或综合考核等教学环节。应用自由软件的实践过程,可以培养尊重知识产权的意识和开源、自由、共享、共创的科学精神,并且该软件的应用也是高中数学新课程标准中所选用的算法教学平台在高等教育教育中的继续和深入。

本书应用的科学计算自由软件相关网站如下:

Scilab 主页 <http://www.scilab.org>

Scilab 中文网站 <http://www.scilab.org.cn>

Scicos 主页 <http://www.scicos.org>

ADE 中文 Scilab <http://science.openfoundry.org/ade/scilab>

本书第一章概述,结合应用实例,阐述自动控制技术的基本概念和性能指标,以及计算机辅助控制系统设计、数值计算和仿真的基础知识。

第二章阐述经典控制系统的数学模型的基本数学描述方法及其物理概念,重点讨论传递函数、被控过程对象特性和控制器的控制规律,以及 Scilab/Xcos 在经典控制系统描述中的应用。

第三~第七章围绕自动控制系统稳定、准确、快速等性能指标要求,阐述线性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、校正的基本方法、PID 的整定方法以及相应的 Scilab/Xcos 应用。

第八章阐述线性离散时间控制系统的基本概念、数学描述方法及其系统稳定性能、动态性能和稳态性能的分析方法;讨论采样周期的影响、数字 PID 算法及相应的 Scilab/Xcos 仿真应用举例。

第九章介绍非线性控制系统概念和基本分析方法,采用 Xcos 仿真分析方法讨论典型非线性环节特性对系统控制性能的影响。

第十章介绍自动控制工程应用中的开关量逻辑控制技术和可靠性技术基础知识。

为了便于教学和自学，各章都有小结、思考题与习题及相应的 Scilab/Xcos 应用举例，本书部分习题的参考答案和作者编制的相关应用程序和仿真模型结构图可以在中国电力出版社的网站 <http://jc.cepp.sgcc.com.cn> 获得。

为了方便读者对科学计算数字仿真工具的学习和应用，本书附录 Scilab 科学计算自由软件应用基础，包括 Scilab 应用基础、Xcos 应用基础、CACSD 应用基础、Scilab 常用指令函数表及该自由软件许可协议的参考译文，并附有学习方法的介绍和典型应用的举例以及相关习题，便于教学或自学。

本书内容按照讲授课时为 80 课时的计划编写。为便于使用者根据培养目标、实验条件等具体情况，对教材内容的讲授进行调整舍取，本书的编写保持了自动控制原理与控制系统仿真技术内容的基本体系，并分段对应融合，各章节内容相对独立，基本的概念和结论在各章节适度复述，有利于按需施教，也便于自学和上机实训。

本书由西安电力高等专科学校谢援朝主编。陕西科技大学杨萍编写第三章～第五章；其余章节及书中所有关于 Scilab/Xcos 的应用部分由谢援朝编写和编制；附录中 Scilab 的 CeCILL 自由软件许可协议（中文译本）由西安交通大学城市学院谢皖吉翻译。

本书由西安交通大学博士生导师张早校教授主审，他提出了宝贵的意见和建议，编者在此深表感谢。

由于首次尝试应用 Scilab/Xcos 科学计算自由软件编写专业教材，并鉴于编者水平能力和条件时间的限制，对于其中存在的不足或不妥之处，恳请读者不吝赐教，编者电子邮箱 xyc5132@163.com。

编 者

2012 年 4 月

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 自动控制技术与系统组成	1
第二节 自动控制系统分类	7
第三节 控制系统性能要求	12
第四节 自动控制原理的基本内容及应用	15
第五节 计算机辅助设计与仿真应用知识	17
本章小结	21
思考题与习题	22
第二章 经典控制系统数学模型	24
第一节 经典控制中的数学模型	24
第二节 微分方程与传递函数	31
第三节 典型环节数学模型描述	36
第四节 方框图及其等效变换	45
第五节 简单控制系统的数学模型	54
第六节 控制器的数学模型	64
第七节 Scilab 在系统数学描述中的应用	70
本章小结	73
思考题与习题	74
第三章 线性连续控制系统的时域分析	79
第一节 典型输入信号与时域响应性能指标	79
第二节 系统稳定性分析	83
第三节 系统动态性能分析	89
第四节 高阶系统动态性能分析	99
第五节 系统稳态性能分析	102
第六节 Scilab 在时域分析中的应用	109
本章小结	116
思考题与习题	117
第四章 线性连续系统的根轨迹分析	121
第一节 根轨迹分析法的基本概念	121
第二节 绘制根轨迹的基本规则和方法	124
第三节 用根轨迹分析系统性能	128
第四节 系统结构参数对根轨迹的影响	132
第五节 Scilab 在根轨迹分析中的应用	140

本章小结·····	144
思考题与习题·····	145
第五章 线性连续控制系统的频域分析 ·····	147
第一节 频域分析法的基本概念·····	147
第二节 典型环节频率特性·····	152
第三节 用频域法分析系统性能·····	159
第四节 Scilab 在频域分析法中的应用·····	165
本章小结·····	173
思考题与习题·····	174
第六章 线性连续控制系统的校正 ·····	176
第一节 控制系统设计与校正的基本概念·····	176
第二节 局部反馈校正·····	178
第三节 前馈补偿校正·····	181
第四节 串联校正·····	184
本章小结·····	193
思考题与习题·····	194
第七章 PID 控制参数整定及其系统仿真 ·····	196
第一节 PID 控制器·····	196
第二节 PID 参数整定方法·····	200
第三节 PID 参数工程整定法应用仿真·····	204
第四节 大延迟控制系统和比值控制系统的仿真·····	212
本章小结·····	216
思考题与习题·····	217
第八章 线性离散时间控制系统的分析 ·····	220
第一节 离散时间控制系统的基本概念·····	220
第二节 信号的采样和复现·····	222
第三节 差分法与差分方程·····	226
第四节 Z 变换与脉冲传递函数·····	230
第五节 线性离散时间系统的数学模型·····	239
第六节 线性定常离散时间系统的稳定性分析·····	247
第七节 线性定常离散时间系统动态性能分析·····	250
第八节 线性定常离散时间系统稳态性能分析·····	255
第九节 数字计算机控制及其采样周期的影响·····	259
第十节 数字 PID 控制器及其系统仿真·····	265
本章小结·····	270
思考题与习题·····	271
第九章 非线性控制系统的仿真分析 ·····	275
第一节 非线性系统基本概念·····	275

第二节 典型的非线性特性环节	276
第三节 非线性系统的分析方法简介	279
第四节 非线性控制系统的 Xcos 仿真应用分析	281
本章小结	287
思考题与习题	288
第十章 开关量逻辑控制系统简介	289
第一节 开关量控制系统基本概念	289
第二节 基本逻辑功能环节	293
第三节 可靠性技术基础知识	296
本章小结	298
思考题与习题	299
附录 Scilab 科学计算自由软件应用基础	300
附录 A Scilab 应用基础	300
附录 B Xcos 应用基础	312
附录 C CACSD 应用基础	321
附录 D Scilab 部分常用指令函数	326
附录 E Scilab 的许可协议参考译文	329
参考文献	335

第一章 概 述

自动控制技术在许多领域中得到了广泛的应用,并且随着科学技术的进步而不断发展。特别是在现代工业生产过程中,对于如压力、温度、液位、流量等生产工艺参数操作来说,为了保证生产的安全、可靠、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、环境保护等预期目标的实现,自动控制技术已成为必不可少的组成部分。自动控制就是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基础,可用于分析自动控制系统的性能,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;仿真技术是自动控制系统分析和设计的有力工具。因此,从事和应用生产过程自动化技术的人员应当具备自动控制及仿真的基础知识和技能。

本章主要阐述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,以及自动控制原理内容和应用的基本问题;概要介绍计算机辅助控制系统设计、数值计算和仿真应用的基本知识。

第一节 自动控制技术与系统组成

生产过程中采用的自动控制技术一般都要综合应用开关量控制技术和模拟量控制技术。

开关量控制是指其控制指令是二位状态的信号,即随时间变化时,其状态处于1/0、通/断、ON/OFF、打开/关闭、启动/停止等,一般称为开关控制。开关量控制运算基本特点是逻辑关系运算,如与、或、非等运算。开关量控制指令是对生产过程中的相关设备进行启动/停止、打开/关闭等控制和操作的信号,常用于生产过程控制中的自动报警、自动保护和顺序控制功能系统之中。如锅炉燃烧器启动/停止的顺序控制和炉膛安全保护。

模拟量控制是指其控制指令随时间变化而连续变化的信号,即可以连续开大/关小、增大/减小或0~1、0~100%等,一般称为调节控制。模拟量控制运算基本特点是连续函数运算,如算术运算、比例、积分、微分运算等。模拟量控制指令是连续地在数量或程度上对生产过程参数进行调整、控制和操纵的信号,使其在规定的范围,以达到生产工艺要求。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,它对生产的经济性和安全性有极大的影响,如锅炉汽包水位调节、蒸汽温度调节、汽轮机转速调节、功率调节等。

下面举例说明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、产品质量等,生产工艺要求对生产设备或过程进行控制,使生产设备或生产过程实现功能要求或具有希望的状态,令某些物理量处于生产工艺要求的范围内。将这些被控制的设备或过程称为被控对象,简称对象;将所要求保持的物理量称为被控量或被调量,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经常会受到各种因素的影响而偏离工艺所

要求的值。因此,运行操作人员需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。这种由操作人员按照一定的程序和技术要求进行的活
 动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。能够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。控制机构产生的扰动称为基本扰动,而其他的扰动则称为干扰,即不可控、不可预测的输入。

1. 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:为保证正常用水负荷(即流出量)和设备安全经济运行,将水箱水位保持在一定的高度上(所要求的水位高度即期望值)。水箱水位控制结构示意图如图 1-1 所示。在此,被控对象就是水箱,被控量就是

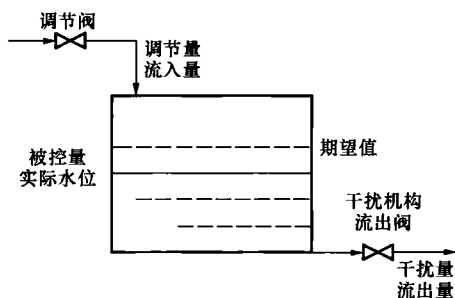


图 1-1 水箱水位控制结构示意图

是水位高度,控制量就是水箱的流入量,控制机构就是流入侧调节阀门,扰动量就是水箱的流出量,扰动机构就是流出侧阀门。在人工控制时,操作人员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。从质量守恒的知识可知,当水箱流入量与其流出量持续平衡时,水箱的水位不变化,保持在一定高度上,即平衡状态;当用户用水量增大(即流出量增大)造成水位下降时,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水位值

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。由于不同的人对被控对象及设备的熟悉程度和操作水平不同,调节效果也不同。操作人员用手操作阀门的同时还要感觉(即小反馈)是否操作过头或不及,最终要靠眼睛来观察(即大反馈)实际水位值是否达到要求的希望值高度。当流入量与流出量再次达到平衡,实际水位维持在要求的水位希望值(希望值与实际值的偏差为零)时,阀门保持相应的开度,系统又进入平衡状态,即静态,从而实现水箱水位控制任务。

2. 自动控制

可以采用浮子—杠杆—阀门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,杠杆接受到浮子传递过来的浮力并产生位移,通过杠杆系统(根据几何相似、力矩平衡)去操纵调节机构——调节阀。动态调节过程分析与上述人工控制相同。由于杠杆支点居中,当流出量增大造成水位下降时,浮子下降,通过杠杆系统使杠杆另一边上升,开大调节阀,增大流入量,使流入量与流出量达到新的平衡,进而使水位保持在相应的高度上。这里被控量

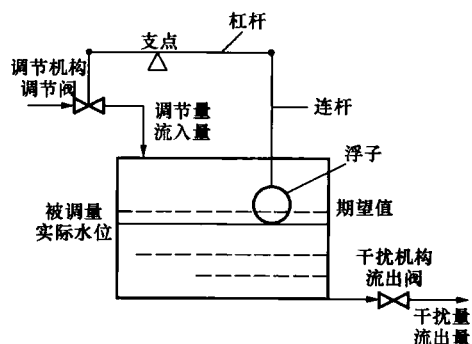


图 1-2 水箱水位简单机械自动控制示意图

水位的变化通过杠杆改变了控制量流入量,即被控量的变化对控制量有影响,这就是反馈。流出量增大致使被控量水位下降,并通过杠杆使控制量一流入量增大造成水位上升,二者方向相反(即负反馈),从而使流入量与流出量平衡,水位保持在一定高度上。可见,在该过程中可以不需要人工操作或人工调节。

只有维持流入量与流出量持续相等,水位才能保持不变。而杠杆系统是刚性系统,在一定的流出量负荷扰动下,必须使流入量阀门改变相应的开度,以保持流入量与流出量的相应变化,达到流入流出平衡,从而将水位维持在与流出量负荷对应的新高度上。例如,流出量增大一定量的扰动,经浮子—杠杆—调节阀,水位维持在低于原流出量负荷下的水位的位置上,即调节后的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变化的,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。

定性分析如图 1-3 所示汽轮机离心式机械转速调节系统。其中,被控对象是汽轮机,被控量是汽轮机实际转速,控制量是蒸汽流量,控制机构是进汽阀门,扰动量主要是汽轮机所带的发电机负载。自动调节装置由离心式测速器、定值弹簧、杠杆系统、进汽阀门等组成。代表转速希望值的给定值是由调整给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,保持阀门在一定开度。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平衡,进汽阀门保持与负荷要求相应的开度,实际转速也恢复至希望转速的给定值,从而实现自动调节。当负荷减小时,也可类同分析,只是将阀门关小到与负荷要求相应的开度,以实现自动调节实际转速恢复到希望转速的给定值上。

可见,该汽轮机调速系统可以克服负载扰动的影响,自动调节进汽阀门的开度,从而改变进汽量,满足负荷的需求,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。

这种取代人的直接操作,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的机械、电气、电子等的装置,称为自动控制装置。自动控制装置具有相应于人工操作中人体器官(眼、脑、手等)功能的部件和设备,一般有检测变送器、控制器(计算判断)、操作执行器等元器件设备实现自动控制装置的三大功能,即传感、计算和执行。

二、自动控制系统

所谓系统一般是指事物按一定关系组成的整体或集合。自动控制系统是由自动控制装置和被控对象组成的,通过相关信号的有机联系和相互作用,能自动地使被控对象的工作状态

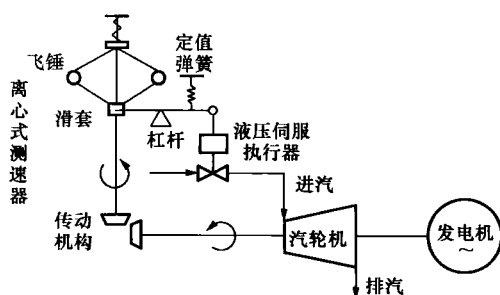


图 1-3 汽轮机离心式机械转速调节系统示意

或其被控量得以控制并具有预定的性能。

自动调节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或要求运行,并且使被控量相应于或等于希望值(或给定值)。若被控量和希望值分别用 $c(t)$ 和 $r(t)$ 表示,则可以表达为 $c(t) \Rightarrow r(t)$, 即被控量相应于希望值。

1. 被控对象

为了实现自动控制系统的任务,进行控制对象特性的分析是控制系统设计和调试整定的必要条件。下面以简单的锅炉汽包水位调节控制系统为例,讨论一般控制系统的构成和原则性功能方框图的表示。该系统的任务是保证机组运行的安全性、经济性,要求进水量和出

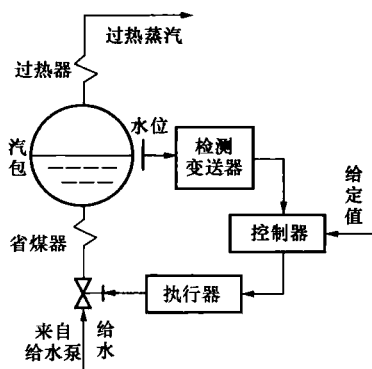


图 1-4 锅炉汽包水位控制系统结构原理

汽量平衡,必须保持汽包水位在工艺要求的数值范围内。该系统的结构原理如图 1-4 所示。其中,被控制对象是汽包,被控制量是汽包水位,控制量是给水量,控制机构是给水调节阀,干扰量是蒸汽流量(外扰)、锅炉燃烧引起的蒸发量(外扰)和给水母管压力(内扰)的变化。外扰一般是指由负荷侧、过程侧等引起被控量变化的外部扰动;内扰是指由调节控制侧产生的对被控量变化的扰动。

需要说明,这里的流入量/流出量和输入信号/输出信号概念不同,流入量/流出量的质量(或能量)对某点的流动方向,应符合物质(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。例如,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而言是输入信号。

在明确被控对象并进行分析之后,就可以配备自动控制装置,构成水位控制系统。

2. 自动控制装置

自动控制装置也称为施控装置,它取代人的直接操作,完成对被控对象或被控过程的自动控制,一般由检测变送器、控制器(调节器)和执行器三个功能部分组成。

(1) 检测变送器,或测量变送单元。检测变送器的功能是把被测量的物理量(如液位、压力、流量等)信号作为输入信号,并将其转换为电压、电流、气压、液压等标准化的输出,作为检测信号送到调节器、指示仪表、计算机等,起到检测传感和变换传送的作用。

(2) 控制器,或调节器、调节单元。控制器具有比较、运算功能。它接受输入的检测信号(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(对应于期望值)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(如比例 P、积分 I、微分 D 等运算)后,输出控制指令信号给执行器。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获得。

计算机是功能强大的信息处理机,作为控制器可以实现复杂的控制算法、逻辑关系运算等功能,从而实现模拟量控制、开关量控制或综合控制。

(3) 执行器,或执行单元。执行器的功能是接受输入的控制指令信号,经功率放大后转换为机械力、位移等输出信号以操作调节阀或控制机构的开度等,从而改变控制量。常见的控制执行单元按照其动力源可以分为电动、气动和液动三种。

为了方便对自动控制系统进行描述,可以用方框图表示自动控制系统的组成及各部分功

能、信号和信息的传递变换关系。因此，方框图是一种自动控制的技术语言。

3. 自动控制系统方框图

方框图是控制系统结构和信号变换传递关系的一种直观的图形表示，是对具体控制系统的抽象描述。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；也可以用数学模型来定量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结构方框图。一般提供四个要素来反映控制系统功能构成或信号转换处理流程，即信号线、方框、分支点和综合点，如图 1-5 所示。

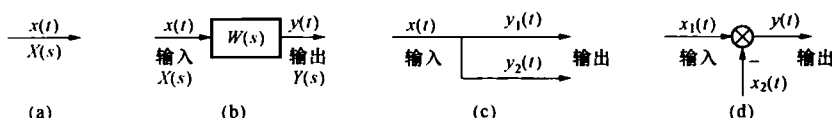


图 1-5 方框图四要素

(a) 信号线；(b) 方框；(c) 分支点；(d) 综合点

(1) 信号线。信号线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）。

(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、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，即激励信号；从方框输出端指出的信号线为方框的输出信号，即响应信号。对于确定的环节，若环节或系统的输出 $y(t)$ 取决于输入 $x(\tau)(\tau \leq t)$ ，则该环节或系统是因果关系。因此，输入信号与输出信号之间是因果关系，可以通过方框的功能名称或数学模型来反映。这里所谓的数学模型是指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 $W(s)=Y(s)/X(s)$ ，当知道环节确定的传递函数和输入信号时，便可得到其输出响应，即 $Y(s)=W(s)*X(s)$ 。

(3) 分支点，也称为引出点。它是在一根信号线上引出另一根信号线。由于信号反映的是信息内容，而不是能量流量、物质流量等，因而信息等量引出。图 1-5 (c) 所示引出点关系为 $y_1(t)=y_2(t)=x(t)$ 。犹如教师讲课的声音对于学生而言，不同距离的学生耳膜受到的声波振动能量不同，但是他们听到的内容是一样的。

(4) 综合点，也称为求和点。指向综合点的信号线为其输入信号，由综合点出发的信号线为输出信号。由于是以输入信号的代数和作为综合点的输出信号，其量纲必须相同。一般在输入信号线箭头旁以“+”或“-”表示正、负，通常“+”省略表示。图 1-5 (d) 所示综合点输出为 $y(t)=x_1(t)-x_2(t)$ ，对应这种关系的元件称为比较元件。

习惯上，方框图以水平方式反映主信号流程，将被控对象及其被控量放在图的右边，把给定值信号和比较元件放在图的左边，中间则是根据各信号间的联系将有关功能环节连接为信号流程，如控制器、执行器、检测变送器等功能环节。一般，从输入到输出的信号流程称为前向通道，从输出到输入的信号流程称为反向通道。

4. 负反馈控制系统及其原则性功能方框图

根据图 1-4 所示的锅炉汽包水位控制系统结构原理，可以从对象的被控量水位信号出发，按照“眼—脑—手”的顺序，通过调节机构作用到对象的信号关系，并考虑有关扰动，依照

方框图四要素的规定, 连接各组成环节的信号便构成其原则性方框图, 如图 1-6 所示。该系统的输出信号只有一个被控量水位, 系统的输入信号有三个: 水位给定值、给水流量或压力 (内扰) 和蒸汽流量 (外扰)。

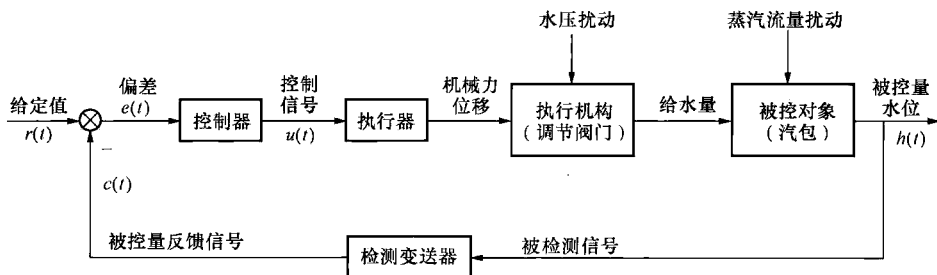


图 1-6 锅炉汽包水位控制系统原则性功能方框图

下面对锅炉汽包水位控制系统的调节过程进行分析。当给水流入量与蒸汽流出量维持平衡, 实际水位测量值保持在给定值时 (即偏差为零), 给水调节阀门保持在相应的开度, 此时系统处于静态, 其原因是系统处于动态平衡状态, 系统中各物理量 (如流量、阀门开度、水位高度等) 的数值不随时间变化。当蒸汽流量增大使流入量小于流出量, 致使系统不平衡, 引起实际水位下降, 造成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, 产生控制信号去执行器, 开大给水调节阀门, 增加给水流量, 使流入量与流出量之差减少, 从而减少水位给定值与水位测量值的偏差, 在合适的控制下, 最终使得实际水位的测量值等于给定值, 系统重新达到平衡状态。

从上述对控制过程的分析中可以看出: 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, 以减小偏差, 克服扰动的影响, 使被控量相应于给定值, 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或过渡过程, 其原因是系统处于非平衡状态, 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作用克服扰动作用对被控量的影响, 使系统重新达到平衡状态的工作过程。因此, 偏差是控制的依据, 偏差的减小和消除是控制的目的, 而偏差的产生则是依靠负反馈。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任务的数学表达式, $c(t) \Rightarrow r(t)$, 则偏差 $e(t) = r(t) - c(t) \Rightarrow 0$ 。因此, 负反馈控制方式可以保证自动控制任务的完成, 它是实现生产过程自动化的基本结构形式之一。也可以将图 1-6 视为典型负反馈控制系统的原则性功能方框图。

为了方便对控制系统的分析, 依据图 1-6 说明系统的偏差信号和误差信号。在系统输入端, 比较元件后输出的给定信号 $r(t)$ 与反馈信号 $c(t)$ 之差, 即 $r(t) - c(t) = e(t)$, 其量纲单位是控制信号的电流、电压单位或数值等, 常称为系统偏差信号; 在系统输出端, 指工艺要求的希望值 $h_0(t)$ 与系统实际输出值 $h(t)$ 之差, 即 $h_0(t) - h(t) = \Delta h(t)$, 其量纲单位是过程变量的物理量纲, 如压力、温度、高度等, 常称为系统误差信号。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, 一般为测量变送器简单的比例关系或近似比例关系。由于输入端的偏差 $e(t)$ 反映了输出端的误差 $\Delta h(t)$, 负反馈系统

依据偏差 $e(t)$ 进行控制，并且人们也是通过检测变送后的信号 $c(t)$ 观察被控量 $h(t)$ ，因此，一般着重研究偏差信号 $e(t)$ 。

第二节 自动控制系统分类

生产过程中的自动控制系统有多种分类方法。按照控制信号（控制指令）的类型和控制运算的特点，可以将自动控制系统分为模拟量控制系统与开关量控制系统，它们各自还可以从不同角度出发形成不同的分类。

一、模拟量控制系统分类

（一）按照控制系统信号回路结构分类

1. 按照系统输出信号对系统控制作用的影响分类（也称为自动控制的基本方式）

（1）开环（前馈）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，开环控制的系统结构较为简单，控制直接快速，但是开环控制不能保证控制精度。根据系统输入信号的特点，开环控制可分为按给定值操作和按干扰值补偿两种方式，二者的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。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。其原则性方框图如图 1-7 所示。该方式的特点是：输入对应输出，信号单向传递，无反馈回路，

自身无法纠正干扰的影响，不能控制精度保证，结构简单，易于实现，多用于对给定值及时跟踪，对精度要求不高、干扰影响比较小的场合。例如，在日常生活中，

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。再如，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，若过程无异常且时间到，则认为炉膛已吹扫干净。



图 1-7 按给定值操作的开环控制

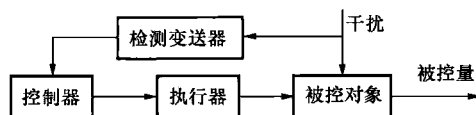


图 1-8 按干扰值补偿的开环控制

2) 按干扰值补偿的开环（前馈）控制方式。

这种方式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。其原则性方框图如图 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。该方式的特点是：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，以及时克服或减小由对象的干扰通道引入的干扰对被控量的影响。按干扰值补偿的开环控制方式常用于干扰影响比较大且经常出现的场合。在如图 1-4 所示的锅炉汽包水位控制系统中，锅炉的任务是给汽轮机提供

参数合格满足负载能量需求的蒸汽量，所以蒸汽量的大小是由汽轮机用汽负荷决定的。因此，尽管蒸汽量的变化可影响汽包水位，但不能作为水位的调节手段，只是该系统的负荷扰动。因此，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，也将控制器称为补偿器。

(2) 闭环（反馈）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。其工作机理就是通过测量被控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。其原则性方框图如图 1-9 所示。闭环控制系统的特点是：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控量的影响，能以较高的精度实现“使被控量相应于给定值”的任务。例如，生活中的空调、冰箱、电饭煲等的温度控制都采用了闭环负反馈按偏差控制的方式；图 1-3 所示的汽轮机闭环负反馈调速系统就可以在汽轮机给负载提供能量的同时保持汽轮机一定的转速；图 1-4 所示的汽包水位闭环负反馈控制系统在保证锅炉给汽轮机提供足够蒸汽量的同时保证汽包水位在给定值及其允许的范围内。正是因为这种闭环负反馈是按偏差控制的方式，所以有偏差才动作，相比开环控制响应慢，系统结构也较复杂，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方式。

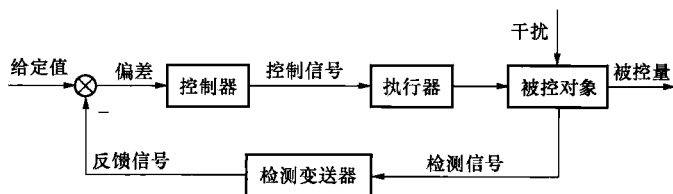


图 1-9 闭环负反馈控制系统原则性方框图

需要说明，并非自动控制系统只要实现负反馈就一定能够完成控制任务。这与构成系统的对象特性和控制装置的特性参数有关。若两者不匹配或不合适，如控制作用过强、过弱、不及时等，则达不到被控量相应于给定值的目的，反而可能会偏离给定值，以致偏离越来越大，或者振荡、发散而不能工作。因此，需要对控制系统进行定量的分析、设计和调试整定，这些工作都是自动控制原理和仿真研究的主要内容。

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。复合控制结合了开环+闭环（或前馈+反馈）两种控制方式的优点，既能及时克服干扰的影响或跟踪给定值的变化，又能保证系统的控制精度，可以构成实现较高性能指标的控制系统。其原则性方框图如图 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按蒸汽流量干扰值补偿的前馈—反馈控制方式。

2. 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，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，可以另建一个给水压力控制系

统, 保证给水压力不变来克服扰动; 也可以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的影响。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, 从而使原来的单回路控制系统成为双回路控制系统。一般将单回路控制称为简单控制系统, 将多回路控制称为复杂控制系统。

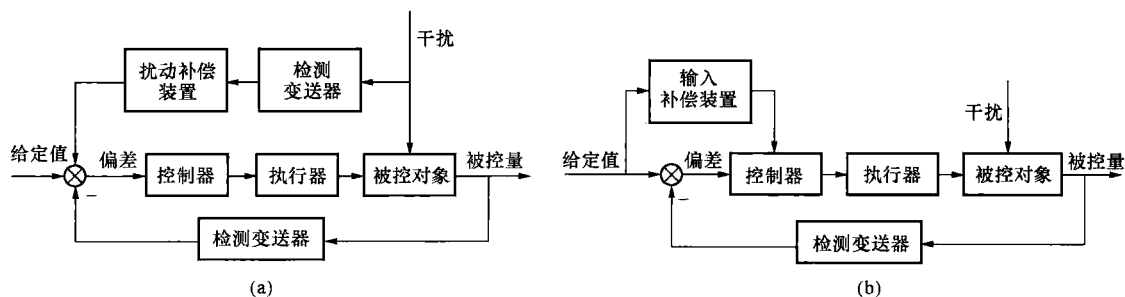


图 1-10 复合控制系统原则性方框图

(a) 按干扰值补偿的闭环控制; (b) 按给定值补偿的闭环控制

一些单回路或多回路控制器所谓的“回路”，是指控制器能够连接的单个或多个执行器或执行机构，是执行机构的阀位信号反馈到执行器或控制器的小反馈。此回路用以检查和减小控制指令 $u(t)$ 与执行机构的阀位 $\mu(t)$ 之间的偏差，以保证阀位跟踪控制指令。

3. 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分类，可以有单级、串级、多级控制系统之分。简单控制系统一般采用一个控制器的单级控制系统。当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 所示为锅炉过热蒸汽温度控制系统结构示意图。此系统中有两个测量信号和两个控制器，形成两个回路。辅助信号（或导前信号）和副调节器等构成内回路，可及时克服内扰（如减温水压力的变化）的影响，起粗调作用；被控量信号和主调节器构成外回路，可及时克服各种干扰的影响，保证被控量在给定值上，起细调作用。

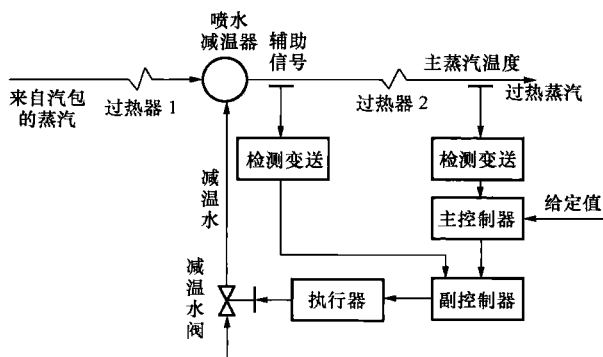


图 1-11 锅炉过热蒸汽温度控制系统结构示意图