

21 世纪高职高专规划教材
高等职业教育规划教材编委会专家审定

ZIDONG KONGZHI JISHU

自动控制技术

郁建中 主编
杨菁 王君 石建华 副主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

教育部高等学校工程教育专业认证
自动化专业工程教育认证标准

《自动化专业工程教育认证标准》

自动控制技术

主编：王 强
副主编：张 强 李 强

清华大学出版社

21 世纪高职高专规划教材

高等职业教育规划教材编委会专家审定

自动控制技术

主 编 郁建中

副主编 杨 菁 王 君 石建华

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书论述了经典控制系统的分析方法,包括常用时间函数的拉普拉斯变换、动态系统的数学模型、典型二阶系统的瞬态响应分析、稳定性分析、根轨迹分析法、频率响应分析法、系统校正、PID 控制器、系统鲁棒性分析。书中配有设计实例和 MATLAB 应用。

本书适合于高职高专学生、非控制类本科生和控制工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制技术/郁建中主编. —北京:北京邮电大学出版社,2008

ISBN 978-7-5635-1674-2

I. 自… II. 郁… III. 自动控制—高等学校:技术学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 064411 号

书 名: 自动控制技术

作 者: 郁建中

责任编辑: 王晓丹

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京忠诚胶印厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 13.75

字 数: 337 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1674-2

定 价: 24.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

高职电类精品课程规划教材

编审委员会

- 主任** 高 林(北京联合大学副校长)
- 副主任** 鲁宇红(金陵科技学院副院长)
- 鲍 泓(北京联合大学信息学院院长)
- 孙建京(北京联合大学自动化学院院长)
- 郁建中(金陵科技学院信息技术学院副院长)
- 华永平(南京信息职业技术学院电子信息系主任)
- 杜庆波(南京信息职业技术学院通信工程系主任)
- 黄伟文(宁波职业技术学院华建信息学院副院长)
- 刘连青(北京信息职业技术学院电子工程系主任)
- 朱运利(北京电子科技职业学院工程系主任)
- 刘 威(北京电子科技职业学院电信系主任)
- 姚建永(武汉职业技术学院电信学院院长)
- 章 讯(长江职业学院工学院院长)
- 吕玉明(天津电子信息职业技术学院电子系主任)
- 丁学恭(杭州职业技术学院机电工程系主任)
- 韩春光(宁波大红鹰职业技术学院应用电子系主任)
- 李锦伟(浙江交通职业技术学院信息与管理系主任)
- 倪 勇(浙江机电职业技术学院电子信息工程系主任)
- 龚赤兵(广东水利电力职业技术学院计算机系副主任)
- 朱祥贤(淮安信息职业技术学院信息通信系主任)

委 员 (排名不分先后)

陈传军	许学梅	吴志荣	楼晓春	刘大会
黄一平	王 川	石建华	万少华	冯友谊
何正宏	陈 卉	王建生	任力颖	卢孟夏
李红星	张益农	李 媛	钱琳琳	李永霞
白桂银	马靖宇	杨 菁	齐连运	杨 帆

执行编委 王志宇

高职电类精品课程规划教材

参编院校

北京联合大学

东北电力大学

宁波职业技术学院

北京电子科技职业学院

长江职业学院

天津电子信息职业技术学院

宁波大红鹰职业技术学院

浙江机电职业技术学院

江西九江职业技术学院

常州信息职业技术学院

吉林电子信息职业技术学院

武汉交通职业技术学院

南京交通职业技术学院

金陵科技学院

南京信息职业技术学院

北京信息职业技术学院

武汉职业技术学院

湖北交通职业技术学院

杭州职业技术学院

浙江交通职业技术学院

浙江工商职业技术学院

广东水利电力职业技术学院

淮安信息职业技术学院

沈阳职业技术学院

武汉船舶职业技术学院

南京正德职业技术学院

前 言

本书是一本为高职高专电类专业学生学习而编写的专业基础课类教材。适合于机电、电气、电子、航天、化工等专业学生选用。

自动控制是一个充满挑战的领域,属于跨学科的综合性工程学科,通过学习有助于学生视野和思路的拓宽,提高他们跨学科学习的能力。尤其是航天工业、计算机控制工程的迅猛发展使工科学生掌握和了解自动控制原理和方法显得更加重要。

本书在内容安排和知识点取舍上,力求概念清楚、重点突出、讲求实用,通过例题适当反映控制工程在现代工业中的应用。

本书共分10章,其内容概括如下:第1章介绍自动控制简史,回顾和展望自动控制领域所涉及的知识和发展前景。第2章阐述自动控制的基本数学模型和基本数学知识,介绍了建立数学模型的方法和常用时间函数拉普拉斯变换。第3章介绍反馈控制系统的特性,主要讲述了开环控制和闭环控制系统的区别,闭环控制系统对信号的响应和对参数变化的灵敏度。第4章阐述了反馈控制系统的性能,介绍了反馈控制系统的时域性能指标、瞬态响应和稳态误差。第5章介绍了控制系统的稳定性概念,引入劳斯(Routh-Hurwitz)稳定性判据。第6章介绍控制系统分析和设计的根轨迹法,介绍根轨迹的绘制、根轨迹法对系统稳定性的判别方法。第7章介绍控制系统分析和设计的频率响应法。第8章介绍在频域内系统稳定和相对稳定的奈奎斯特(Nyquist)判据。第9章介绍控制系统设计中的问题,主要介绍校正网络的设计选用、不同校正系统的参数对系统性能的影响。第10章介绍控制系统中重要的鲁棒性问题,主要讲述了鲁棒PID控制器在控制系统中的应用。

本书第1章、第5章、第10章由金陵科技学院郁建中执笔;第2章、第9章由武汉职业技术学院石建华执笔;第3章、第4章、第6章由金陵科技学院王君执笔;第7章、第8章由湖北交通职业学院杨菁执笔。在编写教材的过程中金陵科技学院刘钰老师和程雪同学做了大量的材料收集和整理等前期准备工作。郁建中对全书进行了统稿。

借此机会编者对上述同仁和专家以及对本教材编写给予帮助领导的领导和老师致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限,疏漏和谬误在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

第 1 章 控制系统导论

1.1 引言	1
1.2 自动控制简史	1
1.3 自动控制系统类型	2
1.3.1 定义	2
1.3.2 闭环控制系统和开环控制系统	3
1.4 自动控制系统举例	5
1.4.1 压力控制系统	5
1.4.2 速度控制系统	6
1.4.3 汽车驾驶控制系统	7
1.4.4 汽轮发电机控制系统	7
1.4.5 机器人	7
1.5 控制工程实践	7
1.6 控制系统展望	8
1.7 控制系统设计概论	9
本章小结	10
习题	10

第 2 章 系统的数学模型

2.1 引言	11
2.2 线性系统的传递函数	12
2.2.1 系统的微分方程	12
2.2.2 用拉普拉斯变换求解线性微分方程	16
2.2.3 传递函数的概念和定义	20
2.2.4 典型环节的传递函数	21
2.3 框图模型	25
2.3.1 框图的概念	25
2.3.2 系统框图的基本组成形式	26
2.3.3 系统框图绘制	28

2.3.4 系统框图的等效变换	29
2.4 信号流图模型	32
2.4.1 信号流图的基本概念	32
2.4.2 常用术语	32
2.4.3 信号流图的基本性质	33
2.4.4 信号流图的简化	33
2.5 MATLAB 在控制系统中的应用	35
2.5.1 数学模型的 MATLAB 表示	35
2.5.2 数学模型的 MATLAB 转换及举例	36
本章小结	41
习题	41

第 3 章 反馈控制系统的特性

3.1 开环和闭环控制系统	44
3.2 控制系统对参数变化的灵敏度	45
3.3 控制系统的瞬态响应	46
3.4 控制系统的稳态误差	48
3.5 实例设计	51
3.6 应用 MATLAB 分析控制系统的特点	53
本章小结	56
习题	56

第 4 章 反馈控制系统的性能

4.1 引言	58
4.2 测试输入信号	59
4.3 二阶系统的性能	60
4.4 阻尼比的估计	65
4.5 反馈控制系统的稳态误差	66
4.6 性能指标	70
4.7 线性系统的简化	72
4.8 设计实例	74
4.9 应用 MATLAB 分析系统的性能	77
本章小结	80
习题	80

第 5 章 线性反馈系统的稳定性

5.1 稳定性的概念	83
------------	----

5.2	劳斯(Routh-Hurwitz) 稳定性判据	85
5.3	相对稳定性分析	90
5.4	设计实例	90
5.5	应用 MATLAB 研究系统的稳定性	93
	本章小结	95
	习题	95
第 6 章 根轨迹法		
6.1	引言	98
6.2	根轨迹的概念	98
6.3	绘制根轨迹的一般方法	100
6.4	应用根轨迹法进行参数设计	107
6.5	PID 控制器	110
6.6	设计实例	113
6.7	应用 MATLAB 研究根轨迹	115
	本章小结	118
	习题	118
第 7 章 频率响应方法		
7.1	引言	120
7.2	频率响应图	122
7.2.1	频率响应的极坐标图	122
7.2.2	频率响应的 Bode 图	123
7.2.3	基本因子项的伯德(Bode)图	126
7.2.4	最小相位系统	130
7.3	绘制 Bode 图举例	131
7.4	对数幅相图	133
7.5	应用 MATLAB 绘制频率响应图	134
7.5.1	绘制 Bode 图	134
7.5.2	绘制 Nyquist 图	135
	本章小结	136
	习题	137
第 8 章 频域稳定性		
8.1	引言	139
8.2	奈奎斯特(Nyquist)稳定性判据	142
8.2.1	奈奎斯特稳定判据	142

8.2.2 奈奎斯特稳定判据在一、二型系统中的应用	145
8.3 相对稳定性与奈奎斯特判据	147
8.4 频域性能指标	152
8.4.1 频域性能指标	152
8.4.2 闭环频域性能指标与时域性能指标间的关系	152
8.4.3 开环频率特性与时域性能指标间的关系	155
8.5 利用频域方法确定系统的时域性能指标	155
8.5.1 等 M 圆图和等 N 圆图	156
8.5.2 尼柯尔斯(Nichols)图	158
8.6 系统带宽 频域中的 PID 控制器	158
8.6.1 系统带宽	158
8.6.2 频域中的 PID 控制器	159
8.7 应用 MATLAB 分析频域稳定性	160
本章小结	163
习题	164

第 9 章 反馈控制系统设计

9.1 引言	166
9.2 系统设计方法	166
9.3 串联校正网络	167
9.3.1 超前校正	168
9.3.2 滞后校正	169
9.3.3 超前-滞后校正	170
9.3.4 其他校正网络	170
9.4 用 Bode 图设计校正网络	172
9.4.1 用 Bode 图设计超前校正网络	173
9.4.2 用 Bode 图设计滞后校正网络	175
9.4.3 用 Bode 图设计滞后-超前校正网络	177
9.5 用根轨迹方法设计校正网络	178
9.5.1 用根轨迹方法设计超前校正网络	179
9.5.2 用根轨迹方法设计滞后校正网络	181
9.5.3 用根轨迹方法设计滞后-超前校正网络	183
9.6 利用校正网络设计反馈控制系统	184
9.6.1 带有前置滤波器的反馈控制系统	184
9.6.2 设计具有最小节拍响应的系统	185
9.7 应用 MATLAB 进行系统设计	187
9.7.1 频率法校正	187

9.7.2 根轨迹法校正	190
本章小结	193
习题	194
第 10 章 鲁棒控制系统	
10.1 引言	196
10.2 鲁棒控制系统和系统灵敏度	196
10.3 鲁棒性分析	198
10.4 鲁棒控制系统设计	198
10.5 鲁棒 PID 控制器系统的设计	199
10.6 用 MATLAB 设计鲁棒控制系统	201
本章小结	203
习题	204
参考文献	206

控制系统导论

1.1 引言

工程技术通过理解并控制自然而造福于人类,控制系统工程师通过理解和控制我们环境的一部分,即所谓的系统,为社会提供经济实用的产品。为了达到对系统的控制目的就要理解系统,但是,控制工程也常常对尚未充分理解的系统实施控制,例如对化工过程的控制。控制工程最显著的特点就是对各类机器、工业生产过程及经济活动过程实施控制,以造福于社会。

除了在航空航天、导弹制导、机器人技术等领域中,自动控制系统具有特别重要的作用之外,在现代机器制造业、化工过程、交通管制系统等实用工业自动化和复杂的现代系统中都是不可缺少的组成部分。

随着自动控制技术的不断发展,它为人们提供了获得动态系统最佳性能的方法,提高了产品的质量、降低了生产成本、扩大了劳动生产率,同时使人们从繁重的体力劳动和重复的手工操作中解放出来。所以大多数工程技术人员和科学工作者,都必须具备一定的自动控制知识。

1.2 自动控制简史

在科学技术发展过程中,自动控制技术扮演了十分重要的角色。在飞行器制导、机器人控制、现代机器制造业生产流水线和工业过程控制方面,到处能看到自动控制的影子。没有自动控制技术的应用就没有现代工业的成果。日常生活中也有许多自动控制的应用实例,如市场上常见的高压锅上的安全阀就是一个简单的控制系统,当锅内因过热导致压力过高时,安全阀会自动打开从而减压。即使是一个生物体,我们也能看到自动控制的实例,当我们感到热的时候,我们会出汗,当体温下降后,汗腺又会自动收缩,这是身体的控制器官、感知器官、执行器官协调工作的结果,它们形成了一个闭环控制系统。控制系统有多种多样的结构,闭环控制系统是其中重要的一种。

人们普遍认为,1769年 James Watt 发明的飞球调节器,是最早应用于工业过程的自动反馈控制器,它被用来控制蒸汽机的转速。如后面图 1-6 所示,机械装置用来测量驱动杆的转速并利用飞球的转动来控制阀门,进而控制进入蒸汽机的蒸汽流量。当转速大时,飞球离开轴线,重心上移,通过连杆使阀门关闭。

二次世界大战期间,包括自动控制理论在内的一大批科学技术得到了空前高速发展。从某种意义上说,战争迫使科学技术迅猛发展,战争需要设计和建造高性能的飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统等军事装备。这些军用系统的复杂性和对高性能的追求,要求改进控制技术。一些崭新的设计方法随之问世。自动控制工程因而发展成为一门崭新的学科,成为工科中特别重要的专业。

1868年之前,自动控制系统发展的主要特点是凭借直觉的实证性发明。发展自动控制理论主要解决的问题是提高控制系统精度、解决瞬态振荡的减振问题和系统的稳定性问题。在这一时期,J. C. Maxwell用微分方程建立了一类调节器的模型,发展了与控制理论相关的数学理论,其工作重点是研究不同系统参数对系统性能的影响。在同一时期,I. A. Vyshnegradskii建立了调节器的数学理论。

二战之前,控制理论及应用在美国和西欧的发展与它在俄国和东欧的发展采取了不同的途径。在美国,Bode、Nyquist和Black等人采用频域方法来描述反馈放大器的工作情况。与此相反,在前苏联,一些著名的数学家和应用力学家倾向于用微分方程描述系统的时域方法。

第二次世界大战期间,自动控制理论及应用得到了巨大的发展,产生了许多新的见解和方法。1940年以前,控制系统设计在绝大部分场合是一门艺术或手艺,用的是“试凑法”。在20世纪40年代,数学和分析的方法无论在数量还是在实用性方面都有了很大发展,之后,频域方法在控制领域占据着主导地位。

20世纪50年代,控制工程理论的重点是发展和应用 s 平面方法,特别是根轨迹法。到80年代,数字计算机大量用于控制部件,这些新部件为控制工程提供了前所未有的运算速度和精度,它们主要用于过程控制系统,同时也用于多变量同步测量和控制。

随着人造卫星和空间时代的到来,控制工程又有了新的推动力。为导弹和空间探测器设计复杂、高精度的控制系统成了现实需要。最优控制变得十分重要。最近20年来,由Lia-punov、Minorsky等人提出的时域方法受到了极大的关注。由前苏联的L. S. Pontryagin和美国的R. Bellman研究提出的最优控制理论,以及人们对鲁棒系统的研究,为时域方法提供了有力的工具。一般来说,控制工程在进行控制系统分析与设计时可同时考虑时域和频域两种方法。

1.3 自动控制系统类型

1.3.1 定义

在正式讨论控制系统之前,我们将对一些术语下定义。

1. 对象

我们称任何被控物体为对象,它可能是一个设备,它是由一些机器零件有机地组合在一起的,其作用是完成一个特定的动作。例如,一个机械装置、一个加热炉或者一个飞行器都可以称做对象。

2. 过程

人为的或随意的连续进行的运行状态,这种运行状态由一系列被控制的动作和一直进

行到某一特定结果或状态的有规则的运动构成。在本书中,我们称任何被控制的运行状态为过程,例如,化学过程、经济学过程和生物学过程。

3. 系统

系统是一些部件的组合,这些部件组合在一起,完成一定的任务。系统的概念可以应用于抽象的动态现象,如在经济学中遇到的一些现象。因此“系统”这个词应当理解为包含了物理学、生物学和经济学等现象的系统。

4. 扰动

扰动是一种对系统的输出量产生相反作用的信号。如果扰动产生在系统的内部,称为内扰;如果扰动产生在系统外部,则称为外扰。外扰是系统的输入量。

5. 反馈控制

反馈控制是这样一种控制过程:它能在存在扰动的情况下,力图减小系统的输出量与参考输入量之间的偏差,而且其工作也正是基于这一偏差。反馈控制是对于无法预计的扰动,即那些预先无法知道的扰动设计的,而对于可以预计的或是已知的扰动来说,总是可以在系统中加以校正的。

6. 反馈控制系统

反馈控制系统是一种能对输出量与参考输入量进行比较,并力图保持两者之间的既定关系的系统,它利用输出量与参考输入量的偏差来进行控制。

1.3.2 闭环控制系统和开环控制系统

1. 闭环控制系统

凡是系统输出信号对控制作用能有直接影响的系统,都叫做闭环系统。闭环系统也就是反馈控制系统。输入信号和反馈信号(反馈信号可以是输出信号本身,也可以是输出信号的函数或导数)之差,称为误差信号。误差信号加到控制器上,以减小系统的误差,并使系统的输出量趋于所希望的值。换句话说,“闭环”的涵义就是应用反馈作用来减小系统的误差。

图 1-1 表示了闭环控制系统的输入量与输出量之间的关系。表示这种关系的图叫方块图。下面是两个闭环控制系统的例子,如图 1-2 所示,在这里,人起了控制器的作用。他希望热水的温度保持在给定的温度上,为了测量热水的实际温度,在热水的输出管道内安装了一个温度计,温度计测得的温度就是系统的输出量。作为控制器的人始终监视着温度计,当发现温度高于希望值时,就减少输送到系统中的蒸汽量,以降低其温度;当发现温度低于希望温度时,就反向操纵蒸汽阀门,使进入系统的蒸汽量增大,以提高这一温度。

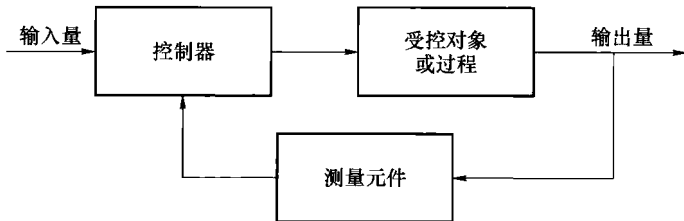


图 1-1 闭环控制系统

本例的控制作用是基于闭环控制原理的。在这个例子中,输出量(水温)的反馈与参考输入量的比较,以及控制作用,都是通过人来实现的。这就是一种闭环控制系统。这类系统可以叫人工闭环控制系统。

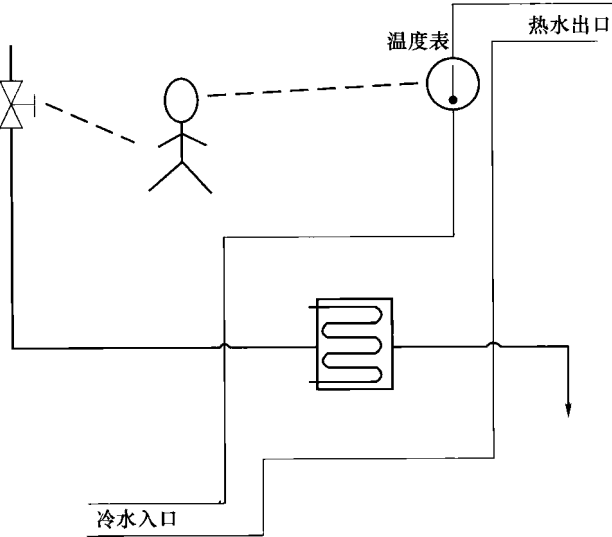


图 1-2 热力系统的人工闭环控制

当用自动控制器来取代人工操作,如图 1-3 所示,就变成了自动控制系统,也称自动反馈或自动闭环控制系统。将自动控制器刻度盘上指针的位置,即热水的实际温度,由温度测量装置予以测定后,与希望的温度值进行比较,以产生误差信号。为此,在比较之前,需通过传感器将输出温度变成与输入量(即给定值)相同的物理量。在自动控制器中,产生的误差信号经过放大后,作为控制器的输出量,加到控制阀门上,从而改变控制阀的开度,使进入系统的蒸汽量发生相应改变,最终使实际的水温得到校正。如果没有误差信号,阀门的开度就不能自动调节了。

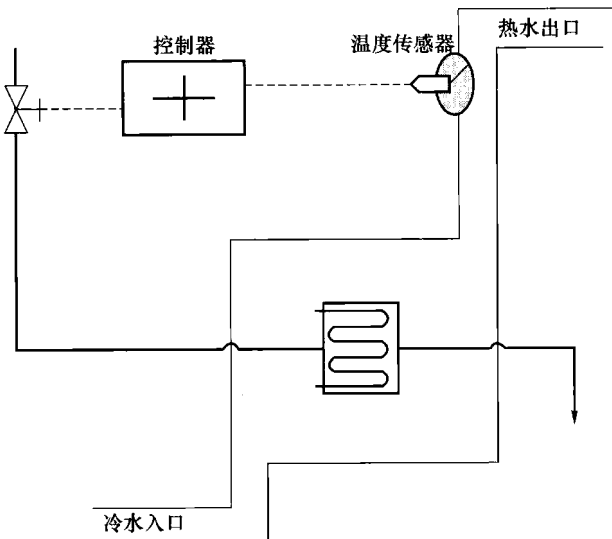


图 1-3 热力系统的自动闭环控制

对上述系统,环境温度的变化、输入冷水温度的变化等,都可以看成是系统的外扰。

以上人工反馈和自动反馈控制系统的工作原理是相似的。人的眼睛类似于误差测量装置;人的头脑类似于自动控制器;人的肌体类似于执行机构。

在工业生产和日常生活中,广泛应用着闭环控制系统。例如:位移跟踪系统(又称随动系统)、大多数的机床数控系统、冷藏设备、热水器、空调器等,都是闭环系统。

2. 开环控制系统

如果系统的输出量对系统的控制作用没有影响,则叫做开环控制系统。在开环控制系统中,既不需要对输出量进行测量,也不需要将输出量反馈到输入端与输入量进行比较。图 1-4 表示开环控制系统输入量与输出量之间的关系。目前的洗衣机就是开环系统的例子。洗涤、漂洗、脱水过程,依次进行,无需对其输出信号,即衣服的清洁程度进行测量。类似的开环系统例子还有采用时基信号控制的交通管制系统,这种系统并不测量车的实际流量,完全由时间来控制。



图 1-4 开环控制系统

在任何开环控制系统中,系统的输出量都不被用来与参考输入进行比较。因此,对应于每一个参考输入量,都有一个相应的固定工作状态与之对应。这样,系统的精度便决定于校准的精度。为了满足实际应用的需要,开环控制系统必须先精确校准,并且在工作过程中保持这种校准值不发生变化。

当出现扰动时,开环控制系统就不能完成既定的任务了。因此,只有输入量与输出量之间的关系已知,并且不存在内扰与外扰的情况下,才可以采用开环控制。应当指出,沿时间坐标轴单向运行的任何系统,都是开环系统。

3. 闭环与开环控制系统的比较

闭环控制系统的优点是采用了反馈控制,因而使系统响应对外扰和内部系统参数变化很不敏感。这样,对于相同的控制对象,就可以采用成本低的精度不太高的元件,构成精确的控制系统。相反,在开环系统中,则无法做到这一点。

从稳定性来考虑,开环控制系统比较容易建造,因为对开环系统来说,稳定性不是重要问题。而在闭环控制系统中,稳定性始终是一个重要的问题,因为闭环系统可能引起过调,而造成系统产生等幅振荡或变幅振荡,使系统不稳定。

应当强调指出,当系统的输入量能预先知道,并且不存在任何扰动时,建议采用开环控制;当存在着无法预计的扰动或者系统中元件参数存在着无法预计的变化时,则应采用闭环控制。对于比较复杂的系统,为了降低成本,同时满足系统的性能要求,可将局部开环和闭环控制适当结合在一起。

1.4 自动控制系统举例

1.4.1 压力控制系统

如图 1-5 所示,炉内的压力由挡板的位置来控制,并且由压力测量元件(传感器)进行测