

◎[德] H·翁勃豪恩 著

自动控制工程 (第一册)

◎ 吴启迪 黄圣乐 译

◎ 同济大学出版社

REGELUNGSTECHNIK I

TONGJI UNIVERSITÄT VERLAG

自动控制工程

(第一册)

[德] H·翁勃豪恩 著

吴启迪 黄圣乐 译

同济大学出版社

内 容 提 要

本书是自动控制工程方面的教科书。全书共分九章，主要内容包括自动控制系统的性质和基本结构、动态系统的时域与频域描述方法、各种类型的控制器及其工程实现、稳定性及稳定判据、根轨迹法、各种控制器的综合与设计、多环控制系统以及经典的系统辨识方法。

本书取材新颖，概念准确，推理严密，工程性强，适合于自动化、管理学及其他相关学科的本科生作为课程教材，也可供电气和机械自动化方面的科技人员和有关教师参考。本书还提供了大量设计公式和图表，便于工程设计人员使用。

责任编辑 张平官

封面设计 王肖生

自动控制工程

(第一册)

[德] H. 翁勃豪恩 著

吴启迪 黄圣乐 译

同济大学出版社出版

(上海四平路 1233号)

新华书店上海发行所发行

上虞科技外文印刷厂排版

吴县人民印刷二厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 17.5 字数: 448千字

1990年11月第一版 1990年11月第一次印刷

印数: 1—2500 定价: 3.85元

ISBN 7-5600-0670-8/TP·46

译 者 的 话

德国波鸿鲁尔大学教授 H·翁勃豪恩(同济大学电气工程系顾问教授) 所著《自动控制工程》一书共分三册。第一册为线性反馈控制系统,第二册为线性系统状态空间方法、采样系统和非线性系统,第三册为过程辨识、自适应控制和最优控制。前两册可供自动化专业本科生作为专业基础课(“反馈控制原理”和“现代控制理论基础”)教材使用,第三册则可作为本科生选修课教材或者研究生教材。

本书特点是准确、系统、编排合理、工程性强,特别适合于工科院校学生使用,也很适于有关科技人员自学。自 1982 年来,本书已经发行 6 版,内容更新比较及时;又由于作者多年来一直亲自教授该门课程,教学经验丰富,全书前后推理严密,比较注重教学法。正因如此,本书不仅是鲁尔大学自动化专业本科生教材,而且已被德国许多大学以及瑞士联邦苏黎世理工学院选为自动化课程的基本教材。

本教材在同济大学电气工程系自动化专业已经试用 3 年,效果良好。

在本书翻译过程中,译者对原著中个别印刷错误作了更正,并在重要之处加了一些必要的注释。这里还要着重说明,本书原著中使用的符号和图表等与 IEC 标准和我国国标不尽相同,为了保持原著的风格,本书均不加更动,谨请国内同行谅解,并请读者给予充分的注意。

本书主要由电气工程系自动控制教研室吴启迪和黄圣乐负责翻译和校对。该室蒋式勤、凌培亮等以及自动化专业部分研究生也参加了部分翻译工作。上海交通大学席裕庚教授和上海同济大学徐衍华教授对本书进行了详细的评阅,并提出许多宝贵意见。参加本课程教学的其他教师也提出了许多意见。研究生王闯舟、许维胜、乔非等同学做了许多整理、抄写、读样等工作,谨在此一并表示感谢。

限于译者水平,本书中定有许多不妥之处,敬请读者批评指正。

译者

1990 年 10 月

于同济大学

前 言

当代自动控制工程已成了大多数工程学科的基础。以前,调节原理是在个别的工程领域中根据一些特殊的例子或者设备技术功能推导出来并进行解释的,而在今天,自动控制工程的处理方式在很大程度上被看作是一种方法论,它是独立于应用领域的。这种方法一般包括,将不同应用领域的控制系统表示为统一的形式,并对之进行分析和综合,同时又不丢失其物理和工程解释。

在本书中,也即在三册著作的第一册中,我们试图系统地叙述久经考验的经典控制工程中最重要的那些方法。在这部分入门性的内容中,仅限于处理线性、连续的系统,这即对应了自动控制工程的入门课程。本书是面向工科大学本科生和感兴趣于用自动控制工程方法解决实际问题的工程技术人员的。本书可用作教科书,也可用于自学。至于更深入的方法,例如非线性控制系统、采样控制系统的处理方法,以及控制系统在状态空间中的表达和综合,必须参阅即将出版的第二册。第三册将讨论控制系统分析的统计方法以及自适应和最优控制系统的设计。

虽然已有许多关于自动控制工程方法的入门书,但是本书仍然试图填补某些空白。许多自动控制工程的基础著作往往以相当大的篇幅讨论稳定性分析的经典方法,而对控制系统设计的综合方法则涉及太少。因此,对于综合方法,至少以与分析方法相当的篇幅来进行阐述,这是我的目标。本书中有内容很丰富的一章,专门叙述线性连续控制系统经典设计的最有效的综合方法。另外,本书还包含相当详细的一章,讨论控制系统环节实验分析的确定性方法,这些方法对于实际应用意义特别大。

在第一章中,通过各种不同的例子直观地引入了自动控制工程中的有关议题,然后在第二章中从系统理论的角度出发描述了控制系统的主要特性。第三章给出了线性连续系统主要的时域描述。线性连续系统的一般频域表达在第四章中讨论。为了掌握处理线性连续控制系统必要的基础知识,在紧接着的第五章中讨论控制系统的动态和静态特性,以及经常使用的各类线性控制器。对于自动控制工程技术人员来说,最重要的问题是第六章所讨论的稳定性分析。这里定义了最重要的稳定性概念,并介绍了代数和几何的稳定性判据。作为到综合方法的过渡,在第七章中介绍了根轨迹法,当然,该方法对于稳定性分析也很重要。在篇幅较大的第八章中,详尽地讨论了线性连续控制系统设计的经典方法。其中除了性能指标外,还讨论了时域和频域中最重要的综合方法。然后还进一步深入讨论了根据前面输入特性和干扰特性来设计控制器的方法,最后还指出了,如何通过使用多环控制系统来改善控制特性。最后的第九章内容包括控制系统实验辨识的一系列有效的确定性方法。这里也较详细地讨论了辨识结果在时、频域间转换的方法。

在材料编写过程中,始终努力做到将所有的中间步骤交待清楚,对所有的结论都作仔细的论证,以使读者自始至终能独立地掌握每一条思路。要理解本书的材料,所必需的知识为:数学分析、常微分方程、线性代数和函数论初步,这些课程都是工科大学本科学生通常的数学基础

课程。为了加深对教材的理解,本书包含了大量数值计算例子。本书所使用的符号和标志不完全符合德国标准 DIN 19226,因为德国标准与国际通用的表达形式不尽一致。

本书的材料起源于我自1976年以来在波鸿鲁尔大学讲授的自动控制工程入门课程。我的学生和同事一直鼓励我把讲稿整理出来。对于他们,我表示感谢。我特别感谢我所在的教研室中当年的和现在的同事们,他们给了我提示和改进意见,计算了书中的例子,认真审核了书稿,以使本书最终得以成功出版。其中我特别要提到 F.Böttiger, F.Ley, J.Dastych, G.Juen 和 F.Sieberski 等先生。此外,我要感谢埃森的 E.Hofer 教授先生,他审核了书稿的一大部分。我还感谢 Vieweg 出版社的合作和对满足我的愿望所作出的努力。我特别感谢 E.schmitt 女士的耐心和细致,她十分出色地打出了我的书稿。H.Vollbrecht 小姐细致地描绘了本书的插图,对此表示感谢。

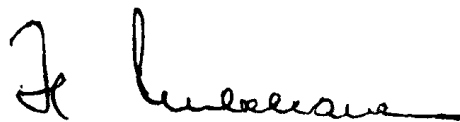
H. 翁勃豪恩

1980年3月于波鸿

中文版前言

自动控制工程(第一册)第一版于7年前问世,不久又出版了该书第二、三册。自此之后,这部囊括现代与经典控制的书在德语国家备受欢迎,以致被许多理工科大学和综合性大学推荐为标准教科书。因此本书多次重版,第一册已出六版,第二册已出五版,第三册已出三版。1986年我到上海同济大学讲授自适应控制系统之际,第三册的有关部分已译成中文^①。我感到很高兴,现在第一册和第二册也译成中文。这两册包括经典和现代控制工程的基本内容。

我要感谢吴启迪博士和黄圣乐先生两位教授。他们为翻译本书做了很认真、细致的工作。如果本书在中国同样也能受到年轻大学生们和工厂企业中工程技术人员的欢迎的话,我将感到十分欣慰。



Prof. Dr.-Ing. H. Unbehauen

H·翁勃豪恩 博士、教授

1989年12月

^① 第三册自适应控制部分曾作为翁勃豪恩教授在华讲学的讲义在同济大学译成中文印发,目前正与其他两部分一起整理,以便出版付印——译者注。

目 录

译者的话

前 言

中文版前言

1. 控制工程问题的提出

1.1 控制工程问题的分类	1
1.2 用方框图描述系统	1
1.3 开环控制与闭环控制	4
1.4 闭环控制的基本作用方式	5
1.5 控制系统的基本结构	8
1.6 调节过程的一些典型例子	10
1.6.1 电压控制系统	10
1.6.2 导航控制系统	10
1.6.3 液位控制系统	11
1.6.4 热交换器控制系统	11
1.7 历史发展背景	12

2. 控制系统的几个重要性质

2.1 数学模型	15
2.2 系统的动态和静态特性	16
2.3 系统特性	17
2.3.1 线性和非线性系统	17
2.3.2 集中和分布参数系统	20
2.3.3 时变和时不变系统	21
2.3.4 连续和离散系统	21
2.3.5 确定性和随机变量系统	22
2.3.6 因果和非因果系统	23
2.3.7 稳定和不稳定系统	23
2.3.8 单变量和多变量系统	23

3. 线性连续系统的时域描述

3.1 用微分方程来描述系统	24
3.1.1 电学系统	24
3.1.2 力学系统	25
3.1.3 热学系统	28
3.2 以特殊输出信号描述系统	30
3.2.1 过渡函数(阶跃响应)	30
3.2.2 权函数(脉冲响应)	31
3.2.3 卷积积分[杜哈美尔(Duhamel) 积分]	32

3.3 状态空间表达	34
3.3.1 单变量系统的状态空间表达	34
3.3.2 多变量系统的状态空间表达	35
4. 线性连续系统的频域描述	
4.1 拉氏变换	37
4.1.1 定义和收敛域	37
4.1.2 拉氏变换表	38
4.1.3 拉氏变换的主要性质	40
4.1.4 拉氏反变换	44
4.1.5 利用拉氏变换求解线性微分方程	47
4.1.6 脉冲函数 $\delta(t)$ 的拉氏变换	51
4.2 传递函数	52
4.2.1 定义和推导	52
4.2.2 传递函数的零、极点	53
4.2.3 传递函数的计算	54
4.2.4 由状态空间表达式推导 $G(s)$	55
4.2.5 分布参数系统的传递函数	58
4.2.6 传递矩阵	59
4.2.7 复 G 平面	59
4.3 频率特性表达	61
4.3.1 定义	61
4.3.2 频率特性图(奈奎斯特图)	63
4.3.3 对数频率特性波特(Bode)图	64
4.3.4 最重要传递环节分类	65
4.3.4.1 比例环节(P环节)	65
4.3.4.2 积分环节(I环节)	66
4.3.4.3 微分环节(D环节)	66
4.3.4.4 一阶延迟环节(PT_1 环节)	68
4.3.4.5 比例-微分环节(PD环节)	70
4.3.4.6 超前环节(DT_1 环节)	70
4.3.4.7 二阶延迟环节(PT_2 环节和 PT_2S 环节)	73
4.3.4.8 其他传递环节	73
4.3.4.9 传递环节的频带宽度	79
4.3.4.10 具有有理分式传递函数的传递环节的波特图绘制举例	84
4.3.5 最小和非最小相位系统	85
5. 线性连续控制系统的特性	
5.1 控制系统的动态特性	89
5.2 控制系统的静态特性	91
5.2.1 具有比例特性的传递函数 $G_0(s)$	92

5.2.2 具有积分特性的传递函数 $G_0(s)$	93
5.2.3 具有二重积分特性的传递函数 $G_0(s)$	93
5.3 PID 调节器及由其导出的调节器类型	95
5.3.1 传递特性	95
5.3.2 不同类型调节器的优缺点	97
5.3.3 线性调节器的工程实现	99
5.3.3.1 反馈原理	99
5.3.3.2 电气调节器	100
5.3.3.3 气动调节器	103
6. 线性连续控制系统的稳定性	
6.1 稳定性的定义和稳定条件	106
6.2 代数稳定性判据	107
6.2.1 系数条件	107
6.2.2 赫尔维茨(Hurwitz)判据	109
6.2.3 劳斯(Routh)判据	111
6.3 米氏 (CLM)稳定性判据	113
6.4 奈奎斯特 (Nyquist)稳定性判据	116
6.4.1 奈奎斯特判据的极坐标图形式	116
6.4.1.1 奈奎斯特判据应用举例	119
6.4.1.2 在有延迟特性系统中的应用	120
6.4.1.3 奈奎斯特判据的简化形式	123
6.4.2 在对数频率特性图中的奈奎斯特判据	124
7. 根轨迹法	
7.1 根轨迹法的基本思路	129
7.2 绘制根轨迹的一般规则	132
7.3 根轨迹绘制规则的应用举例	137
8. 线性连续控制系统设计的经典方法	
8.1 问题的提出	141
8.2 时域中的设计	143
8.2.1 时域中的性能指标	143
8.2.1.1 动态过渡误差	143
8.2.1.2 积分指标	144
8.2.1.3 二次型控制面积的计算	144
8.2.2 根据二次型性能指标设计调节器最优参数	147
8.2.2.1 根据二次型性能指标求解最优参数的例题	147
8.2.2.2 对 PT_n 型被控对象标准调节器的参数优化	150
8.2.3 经验方法	160
8.2.3.1 日格雷(Ziegler)和尼柯尔斯(Nichols)的经验方法	160
8.2.3.2 通过仿真的经验设计	161

8.3 频域设计	162
8.3.1 频域内的特征参数	162
8.3.1.1 频域内闭环控制系统的特征参数及其与时域性能指标的关系	162
8.3.1.2 开环控制系统的特征参数及其与闭环控制系统时域性能指标的关系	168
8.3.2 用频率特性曲线法进行调节器综合设计	171
8.3.2.1 基本思路	171
8.3.2.2 相位校正环节	172
8.3.2.3 频率特性曲线法应用举例	177
8.3.3 尼柯尔斯图	180
8.3.3.1 霍尔图	180
8.3.3.2 幅相图(尼柯尔斯图)	182
8.3.3.3 尼柯尔斯图的应用	182
8.3.4 利用根轨迹法设计调节器	185
8.3.4.1 基本思路	185
8.3.4.2 用根轨迹法设计调节器的实例	185
8.4 分析设计法	190
8.4.1 闭环控制系统性能的给定	190
8.4.2 特鲁克萨-哥勒名(Truxal-Guillemin)方法	194
8.4.3 代数设计法	199
8.4.3.1 基本思路	199
8.4.3.2 关于闭环控制系统零点的讨论	200
8.4.3.3 综合方程组的解	202
8.4.3.4 方法的应用	204
8.5 定值和抗干扰性能的调节器设计	208
8.5.1 控制系统结构	208
8.5.2 调节器设计	209
8.5.2.1 当干扰作用于控制系统输入端时的调节器设计方法	209
8.5.2.2 当干扰作用于被控对象输出端时的调节器设计方法	211
8.5.3 前置滤波器的设计	213
8.5.3.1 当被控对象输入端有干扰时前置滤波器的设计	213
8.5.3.2 当被控对象输出端有干扰时前置滤波器的设计	214
8.5.4 方法的应用	216
8.5.4.1 干扰作用于被控对象输入端	216
8.5.4.2 干扰作用于被控对象输出端	217
8.6 设计多环控制系统以改善控制特性	220
8.6.1 问题的提出	220
8.6.2 干扰电路	220
8.6.2.1 干扰电路接到调节器上的方法	220

8.6.2.2 干扰电路接到控制量上的方法	221
8.6.3 利用辅助被控量的控制系统	223
8.6.4 多环控制	224
8.6.5 有辅助控制量的控制系统	226
9. 利用典型信号辨识控制系统环节	
9.1 理论和实验辨识	228
9.2 实验辨识任务的提法	228
9.3 时域辨识	231
9.3.1 由测量值确定过渡函数	231
9.3.1.1 输入信号为方波脉冲	231
9.3.1.2 输入信号为斜台函数	232
9.3.1.3 任意确定性输入信号	232
9.3.2 用过渡函数或权函数进行辨识的方法	233
9.3.2.1 拐点切线法和时间百分值法	234
9.3.2.2 其他方法	242
9.4 频域辨识	244
9.4.1 频率特性曲线辨识法	244
9.4.2 对已知频率特性曲线(奈奎斯特曲线)的近似辨识方法	245
9.5 时域和频域数值变换方法	248
9.5.1 基本理论关系	248
9.5.2 由阶跃响应计算频率特性	251
9.5.3 计算非阶跃测试信号频率特性的方法推广	253
9.5.4 从频率特性计算过渡函数	255
参考文献	258

1. 控制工程问题的提出

1.1 控制工程问题的分类

我们所处的时代经常被称为自动化时代,这是以应用于十分复杂的工业过程和系统、能动运行的机器和设备为标志的。这些自动化过程或现代化的自动化技术构成了控制工程及过程数据处理的一个很重要的部分。虽然控制工程问题几乎在所有工程技术领域都会遇到,但是作为一种特殊的考虑方式,控制工程具有其独特的专业方向,而这些方向之间,如我们面还要指出的,虽然有许多共性,但相互间也具有十分明显的差异。

控制工程是一个十分强调方法论的专业领域。因此控制工程方法完全是独立于各种应用领域的。它所处理的问题当然是很相类似的;然而它们并不一定是工程问题,它们也可以在非工程性的动态系统,如生物、经济和社会学系统中应用。所以,首先应当很全面地来理解动态系统这一概念,这里我们选择如下定义:

动态系统表示信号处理和传输的一个功能单元(例如:信号可以是能量、材料、信息、资金及其他形式),其中系统的起因和由此引起的时间上的效果分别作为系统的输入量和输出量来考虑。

这种系统结构对简单的仅有单个输入与输出量的单变量系统(例如测量元件、放大器等),复杂的具有多个输入与输出量的多变量系统(例如蒸馏塔、高炉等),直至递阶分层次系统(如经济过程),都能适用。这些系统的结构框图如图 1.1.1 所示。

如此定义的系统具有共同的特征,即在其中一定存在有目标的作用、信息处理、闭环和开环控制过程,如同维纳(N. Wiener)所提出的,这里可引入所谓控制论^[1-1] (Cybernetics)的更高级的概念。控制论旨在认识自然界、工程技术和社会科学中控制过程以及信息处理的共通性(分析),从而将此分析结果应用于工程系统的综合以及自然界系统的改善。从这一观点出发,今后涉及控制工程问题的重点将不在于设备技术,而应在于系统科学。因此以下将主要讨论控制工程的系统理论基础,而较少讨论设备技术基础。

1.2 用方框图描述系统

根据前面给出的动态系统定义,在系统中必存在信号的处理和传输。这时系统也可描述为传输环节或传输系统。传输环节具有唯一的作用方向,这由输入、输出信号的箭头方向给出。对于一个传输环节,至少有一个输入信号或输入量 $x_e(t)$ 和至少一个输出信号或输出量 $x_a(t)$ 。单个传输环节的共同作用一般用方框图来表示。传输环节用小方块表示,这些小方块通过信号流通线互相连接起来。图 1.2.1 给出了方框图的例子。在这种表达方式中可用表 1.2.1 所示的信号连接关系符号。这里假定,传输环节的输出量只决定于对应的输入量,与来自后接电路的负荷无关,也即传输环节无后向作用。

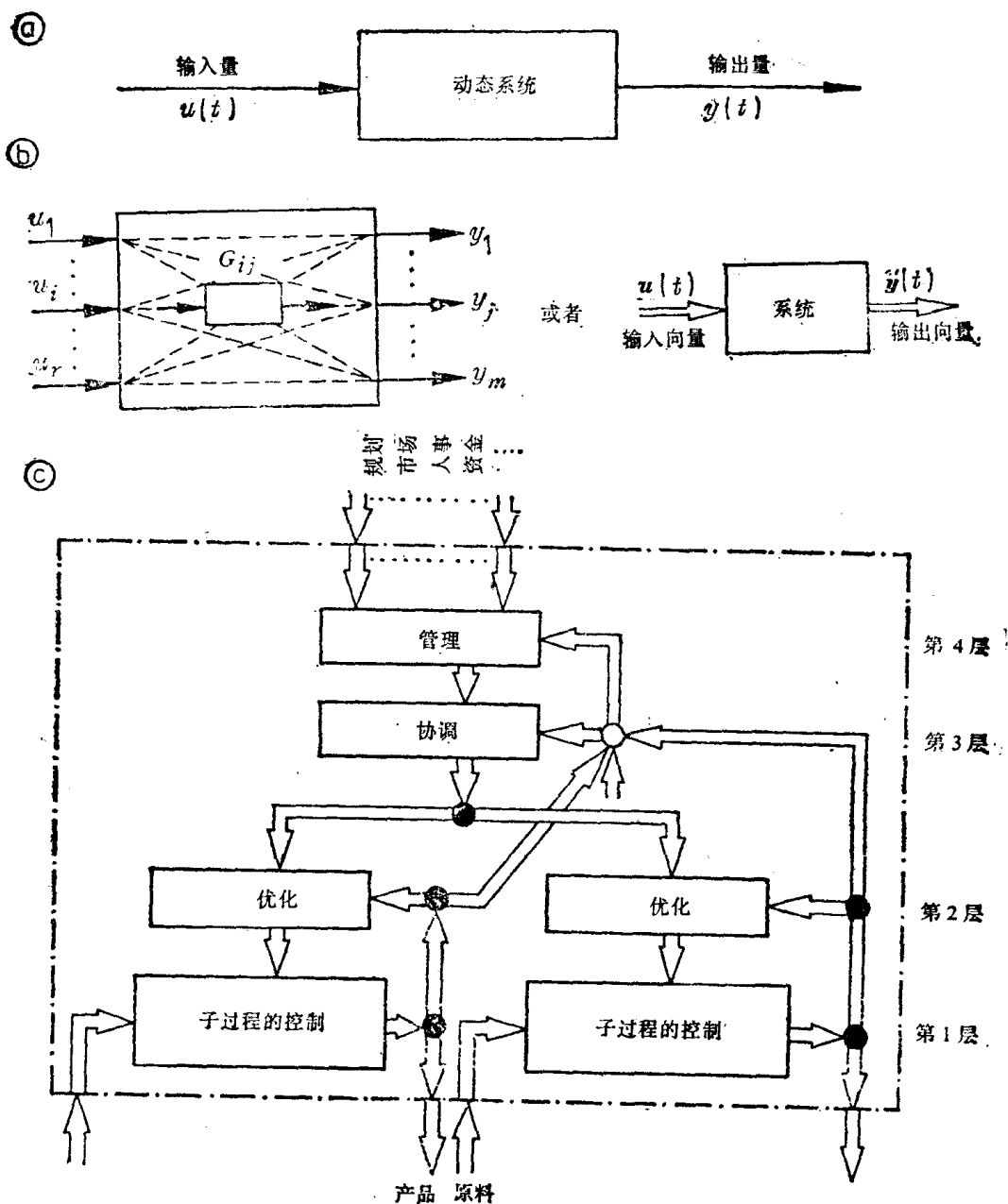


图 1.1.1 系统概念示意图

(a) 单变量系统 (b) 多变量系统 (c) 多层次系统

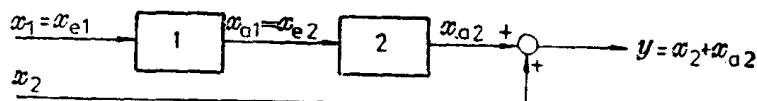


图 1.2.1 由多个传输环节组成的传输系统方框图示例

传输环节传输特性的方框图可用多种方法来表示。

对于线性系统,可如图 1.2.2,在相应的小方框中写入:

- 对应输入、输出量之间的微分方程,
- 过渡函数(输入阶跃的系统响应)的曲线或者,
- 传递函数或频率特性(见第 4.2, 4.3 节)。

表 1.2.1

信号连接关系符号

名称	符号	数学运算
分支点		$x_1 = x_2 = x_3$
相加点		$x_3 = x_1 \pm x_2$
相乘点		$x_3 = x_1 \cdot x_2$

(注：相加点处正号可省略)

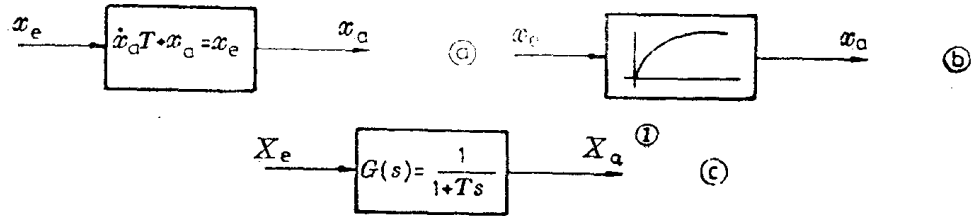


图 1.2.2 线性传输环节的几种表示法^①

(a) 微分方程 (b) 过渡函数 (c) 传递函数

在表达非线性静态传递环节时，通常在稍加修改的方框符号中直接画上静态特性曲线。要强调一下，这里所使用的概念在以下章节中还将详细定义。

除方框图表达以外，还有信号流图。在信号流图中，对应于节点的是信号，而支路则表示两点之间的传输特性。在图 1.2.3 中对于不同的例子对照地给出了方框图和信号流图。

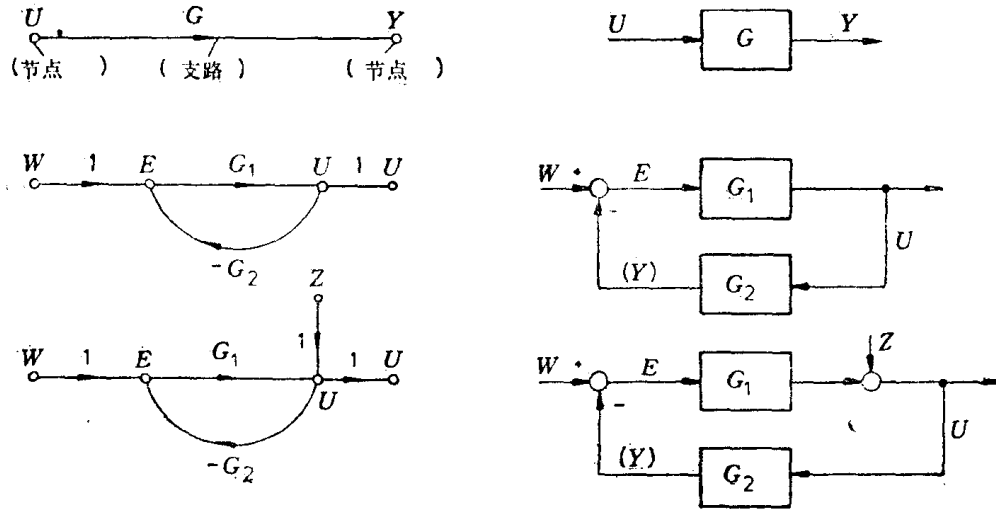


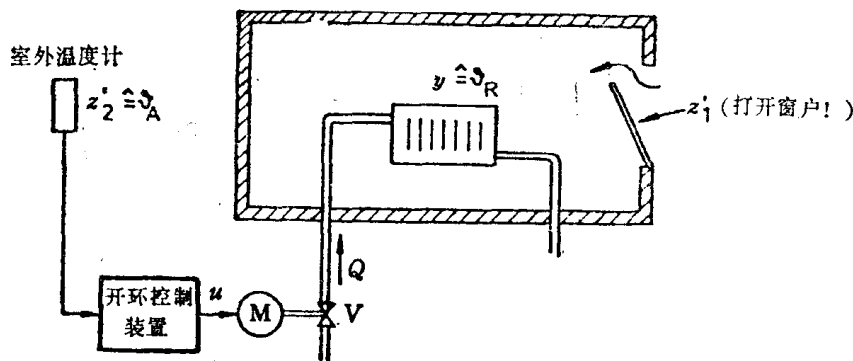
图 1.2.3 方框图和信号流图对照

^① 在频域中描述系统的量以后全用大写(参见 4.1)

1.3 开环控制与闭环控制

开环控制与闭环控制这两个概念的区别强调得往往不够。现通过一个室内暖气系统来指出这两者之间的区别。如图 1.3.1 所示,在室内温度开环控制中,由一个温度计测量室外温度 ϑ_A ,然后送到一个控制装置上。该装置由电动机 M 和阀门 V 组成,按图 1.3.2 所示控制曲线 $Q = f(\vartheta_A)$ 来调节热流量 Q 。这一特性曲线的斜率可设置在控制装置上。如果室内温度 ϑ_R 在某些情况下变化了(例如有一扇窗打开了,表现为干扰量 z_1'),则对于阀门位置将不会产生影响,因为只有室外温度才能影响热流量。因此,在这种开环控制下,并不能去除所有干扰的作用。

在图 1.3.3 所示的室内温度闭环控制情况下,要量测的是室内温度 ϑ_R ,然后将其与给定值 w (例如 $w = 20^\circ\text{C}$) 比较。如果室温偏离给定值,则通过一个调节偏差的调节器 (R) 改变



■ 1.3.1 室内暖气装置的开环控制

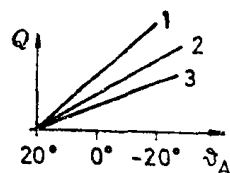


图 1.3.2 对于三种不同调整状况的暖气装置特性曲线(1,2,3)

热流量 Q 。室内温度 ϑ_R 的总变化,如由窗户打开引起的或由阳光照射所引起的变化,由调节器来处理并尽可能排除。

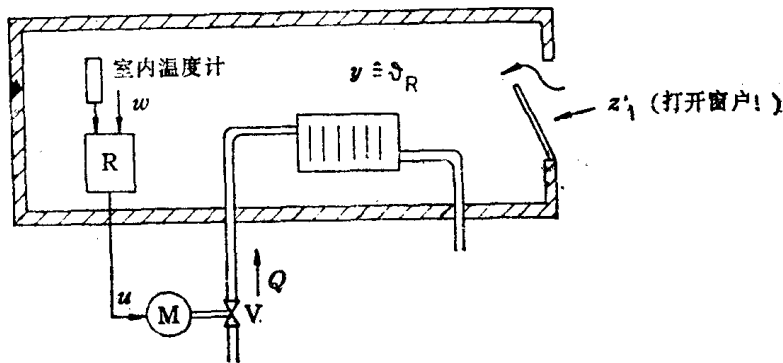


图 1.3.3 室内暖气装置的闭环控制

图 1.3.4 和图 1.3.5 表示室内温度开环和闭环系统对应的方框图,由图可直观地看出开环控制与闭环控制的差别。

这里可用下列步骤来描述闭环控制的流程:

- 量测被控量 y (实际值);
- 得到控制误差 $e = w - y$ (被控量 y 与给定值 w 的差值);
- 处理控制误差,通过调节量 u 的变化来减少或消除控制误差。

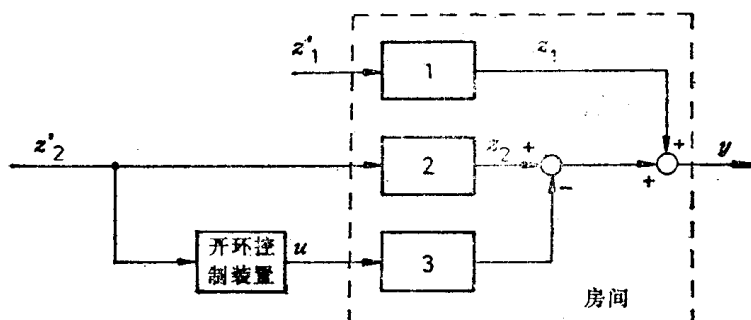


图 1.3.4 暖气开环控制方框图

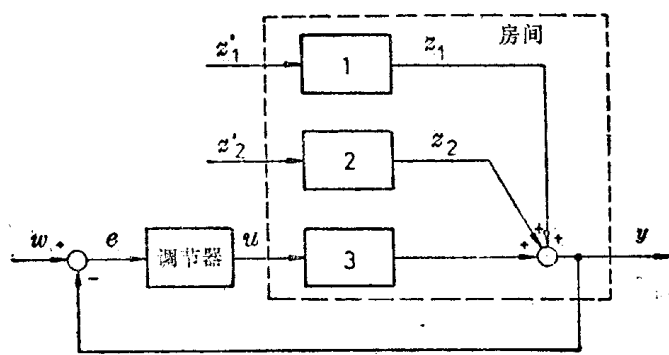


图 1.3.5 暖气闭环控制方框图

比较开环控制与闭环控制,不难看出如下差别:

闭环控制

- 表示一个闭合的作用过程(控制回环);
- 根据闭环作用原理可增加抗干扰性(负反馈);
- 可能不稳定,也即被控量不再衰减,而是增长到无穷大(理论上)。

开环控制

- 表示一个开放的作用过程(控制序列);
- 只能对抗规定由其处理的干扰,其他干扰因素无法消除;
- 只要被控制对象自己保持稳定,不可能不稳定。

1.4 闭环控制的基本作用方式

在考虑闭环控制时一般应区分两种不同的情况:

- 一种情况是闭环控制要消除过程中的干扰作用。过程的某些变量,如被控量,应遵循预先确定的给定值,而干扰对过程不具有实质性的影响。这类控制可称为定值控制或干扰控制。
- 另一种情况是,一个过程的被控量必须始终尽可能准确地跟随变动的给定值。这类控制称为跟踪控制或者随动控制。变动的给定值在此称为整定量。