

高等学校教材

Gao Deng Xue Xiao Jiao Cai

自动控制原理

ZI DONG KONG ZHI YUAN LI

上册

黄家英



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校教材

自动控制原理

上 册

黄家英



高等教育出版社

内容提要

本书打破了“自动控制理论”的传统课程体系,将“经典控制理论”与“现代控制理论”两门课有机地融合成一门课程,实现了两者比较完美的结合,建立了新的体系结构。全书引入国际流行的 MATLAB SIMULINK 软件进行计算机辅助分析与设计,并引入学科发展的新观点,如鲁棒性、智能控制、内模原理、回路整形和逆系统控制等。本书以学生为本,并为他们的自主学习和自由发展创造条件。在每章末增设“典型例题分析”,强调理论与实际相结合。全书由浅入深,循序渐进,将理论的严密性和方法的实用性结合起来,处理得恰到好处。因此本书适合于不同层次、不同水平的教学要求,也适合读者自学。

这套新体系教材的问世,将为自动控制理论教学开辟新的前景。

全书分上、下两册,上册内容包括:绪论、控制系统的数学描述、线性控制系统的运动分析、根轨迹法、频率响应分析法;下册内容包括:频率响应综合法、线性系统的基本结构特性、线性定常系统的综合、离散控制系统、非线性控制系统。

本书可作为自动化类专业和相关专业研究生的教材,也可供从事与自动化技术相关工作的读者自学或参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理. 上/黄家英. —北京:高等教育出版社, 2003.7

ISBN 7-04-011473-9

I. 自… II. 黄… III. 自动控制理论-高等学校-教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 046749 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京新丰印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 32.25
字 数 790 000

版 次 2003 年 7 月第 1 版
印 次 2003 年 7 月第 1 次印刷
定 价 39.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

序

自动控制理论是分析与设计控制系统的理论基础。“自动控制原理(理论)”课程是控制或自动化类专业的基础理论课,是一门核心课程。学好自动控制理论对掌握自动化技术有重要作用。

自动控制理论经历了经典控制理论与现代控制理论两个发展阶段,现正向智能控制方向发展。前两者现已比较系统、成熟。大学本科阶段主要学习和掌握经典控制理论,适当学习现代控制理论的基础部分(通常称为线性系统理论,状态空间法的基础),为进一步学习和研究现代控制理论的分支及新发展打好基础。

“经典”与“现代”理论不仅是发展阶段的不同,而且它们的数学基础和处理问题的方法也是不同的。前者建立在拉普拉斯变换和频率响应分析基础上,主要解决单变量(单输入-单输出)定常系统的分析与设计问题,而后者是建立在矩阵理论基础上的状态空间分析法(用状态空间模型描述系统并用状态空间法进行分析与设计),它能解决单变量系统和多变量(多输入-多输出)系统,定常系统和时变系统的分析与设计问题。两者之间存在着显著的重要的区别。

现代控制理论是在经典控制理论的基础上发展起来的,它与经典控制理论有着内在联系,例如反馈控制、稳定性与零极点等概念以及分析与设计的目标等方面都有类似之处。只强调“区别”和“联系”中的某一方面都是片面的,对深刻地阐述或认识两种控制理论的本质是不利的。

传统的“自动控制理论”往往被分别设置成“经典”和“现代”两门课程,并分别由不同学者编写成不同的教材。它们只是从两种理论自身的体系阐述各自的概念、方法和理论。两种理论是被割裂的、互不联系的。本教材则将它们有机地统一与融合,形成了控制理论教材的新体系。抓住了两者的若干结合点,分析了它们的共性与差别以及它们之间的联系,从而对控制理论中的一些基本问题阐述得更深刻透彻,发挥了这种新体系的优越性。黄家英教授为建立这种新体系,进行了十余年的研究探索,作出了巨大的艰辛劳动。本教材是在多次教学实践基础上,吸收了许多教师的意见,经反复修改,逐步完善写成的,是此类教材中比较优秀的一部。

本教材除了上述显著特征外,还有如下特点:

1. 内容丰富翔实。既保持了理论的完整性,又兼顾工程实用性,书中介绍了工程上广泛应用的PID控制器设计算法,并提供了一些有价值的经验公式与数据;又考虑了学科的新发展,引入了鲁棒性、内模原理、回路整形和逆系统控制等概念和方法初步,提高了教学的先进性和前瞻性。

2. 从方法论的角度,抓住了控制科学的两个基本方法:反馈与优化。尤其值得倡导的是加强优化的观念,这是现代工程师应具有的重要意识。

3. 遵循认识规律,由浅入深,由具体到抽象,并重视能力的培养。全书以随动系统和直流调速系统为典型例子,把控制系统的分析与设计方法的应用贯彻始终;设置了较多的例题,以加深对理论方法的理解;每章配置了丰富的有难度层次的典型例题分析和习题,为不同需

要、不同层次的学生自主学习、培养解题能力和自由发展提供条件。全书叙述翔实，便于自学。

4. 引入了先进的符合世界潮流的 **MATLAB** 科学计算软件，进行计算机辅助分析与设计，培养现代化的设计能力，适应教学现代化的发展趋势。

综上所述可知，该书可作为大学本科自动化类专业的一本好教材，也可作相关专业的研究生教材或有关教师及工程技术人员的参考书。

上海交通大学自动化系教授、博士生导师

施颂椒

2002年8月于上海

前 言

本书是按“九五”电子信息类专业教材编审出版规划,由全国高校自动控制专业教学指导委员会评选审定并推荐出版的。责编委谢剑英教授,由施颂椒教授、钟秋海教授主审。

本书的特色是:为了适应科学技术的迅速发展和新世纪对自动化人才培养的要求,将控制理论的两部分基础内容——经典控制理论与“现代控制理论”(即状态空间法基础)——有机地融合在一起,并建立了《自动控制原理》教材的新体系。自本书第一版于1991年问世以来,受到了国内外学者和使用师生的肯定,并获得了第三届全国工科电子类专业优秀教材奖。已故中科院院士、新体系教材的倡导者与组织者张钟俊先生认为,这种新体系“是自动控制基础课程改革的方向和发展的趋势”。近年来国内外自动控制教学改革动向和新近出版的同类教材的发展趋势说明,张先生的上述论断是科学的。

为了适应近十年来科学技术特别是自动化技术的飞速发展和社会需求的巨大变化,本教材在原书的基础上进行了全面的改写,使新体系日臻完善并便于教学。新版的主要特点是:

(1) 注重学科的基本结构(即控制理论学科的基本概念、基本理论和基本方法以及它们之间的内在联系与区别)。由于控制理论内容丰富、方法林立、新的理论和方法又不断地涌现,故本书注重其中最基本和广泛起作用的学科的基本结构,并强调总体概念而不是它们的细节。全书以线性定常单变量系统理论为主,从控制系统所要解决的问题出发,将全书的基础内容概括为:讨论线性控制系统的两种数学描述方法(外部描述法与内部描述法)、两类数学模型(输入输出模型与状态空间模型)和相应的两套分析与综合的方法(复、频域法与时域法),以及它们之间的内在联系与区别。并以零极点方法和线性定常系统的基本特性作为“主线”,将“经典”与“现代”控制理论有机地融合在一起。从而使整个基础内容,从系统描述、建模到分析与综合,构成一个统一的理论框架和有机融合的新体系。

(2) 以学生为本,加强能力培养,并为他们的自主学习和自由发展创造条件。遵照学生的认识规律,由浅入深、循序渐进,注重物理概念的阐述,淡化数学推导和证明,前六章所涉及的数学工具只是基本的复变函数和拉氏变换以及初步的线性代数知识;注重理论联系实际,全书以天线方位角位置随动系统和直流调速恒值控制系统作为典型实例贯穿始终,每章还设置有联系实际的例题和习题;为了便于学生自主学习,每章末有小结,概括该章的知识结构体系、基本要求、重点与难点并给予学习上指导;为了帮助读者理解教学内容,掌握解题思路 and 技巧,以及提高分析与解决问题的能力,在每章末设有“典型例题分析”,为不同层次、不同需要的读者的自主学习和自由发展提供条件。

(3) 从方法论着眼,突出控制科学的两个基本方法:反馈与优化。对于反馈的作用,不仅定性而且借助系统灵敏度概念从定量方面进行了深入的分析,阐明了自动控制的基本原理——反馈控制的重要性以及自动控制系统的基本组成原理。对于系统的优化,它是现代工程师应具有的系统意识,在上册引入了优化的概念,在下册专门讨论“最优控制”问题以进一步加强优

化的意识。

(4) 在保持理论完整性的同时,注重工程意识和工程的实用性。全书所介绍的控制系统分析与综合的方法,均以工程实用方法为主。在介绍经典设计方法时除了讨论工业上广泛使用的PID控制及控制器参数的工程整定法外,还引入“二阶最佳”和“三阶最佳”的工程设计法以及一些有价值的经验公式与数据。

(5) 引导读者了解学科发展的基本趋势,用学科发展的新观点,如鲁棒性、内模原理、回路整形以及逆系统控制等概念和方法,来组织或更新经典控制理论的有关内容。

(6) 引入国际流行的MATLAB进行控制系统的计算机辅助分析与设计,培养现代化的分析与设计能力,适应教学现代化的发展趋势。

在内容组织上,注意理论上的基础性和工程上的实用性,在取材上贯彻少而精,并适当反映控制理论学科的发展趋势。讨论的对象以线性定常单变量连续系统为主,兼顾线性离散系统和非线性系统,并适当地介绍线性多变量系统和时变系统。全书共10章,分上、下两册,上册包含前5章。第1章绪论。第2章控制系统的数学描述,讨论线性控制系统的两种数学描述方法和相应的两类数学模型的特点、表示方法以及它们之间的相互转换关系,介绍建模的两种基本方法并以常见系统为例说明机理建模的基本方法与特点。控制系统的分析方法有三种:时域法、复域法(即根轨迹法)和频域法(即频率响应法),将分别在第3至第5章介绍。第3章线性控制系统的运动分析,介绍时域分析法,讨论在任意输入信号作用下系统时间响应的特性和系统运动的基本规律,并着重介绍系统的稳定性、暂态特性和稳态特性的工程实用分析方法,以及改善系统特性的基本手段——PID控制。第4章根轨迹法,包括根轨迹分析法和根轨迹综合法两部分。根轨迹法和频率响应法是基于传递函数的两套系统分析与综合的工程实用方法,为了使读者全面地了解这两套经典方法以及系统分析与综合之间的关系,将它们作为整体来介绍。频率响应法同样也包括两部分:频率响应分析法(第5章)和频率响应综合法(第6章),由于它们是全书的一个重点内容,篇幅较大,故分设为两章来介绍。下册包含后5章:即第6章频率响应综合法,第7章线性系统的基本结构特性,第8章线性定常系统的综合,第9章离散控制系统,第10章非线性控制系统。本教材的参考学时数为100。书中排成小号字的为扩展内容或供读者自由选读的内容,给不同层次、不同要求的读者留有较大的自由选择空间,在每章的小结里提供了多学时和少学时两种教学方案的建议。因此教学内容和学时数,可根据各校的具体情况和要求灵活地考虑。

控制理论教材体系的改革和建设,一直为国内外自动化教育界所重视。原全国自动控制专业教材编委会和教学指导委员会,对新体系教材的编写和出版予以了精心的组织与指导。在编写过程中还得到了国内外控制界许多专家教授的热情鼓励和大力帮助,因此这套新体系教材实际上是集体智慧的结晶。借此要衷心地感谢给笔者以帮助各位国内外学者、使用师生和为新体系的建立而共同耕耘的同志们。尤其要感谢王众托院士、张嗣瀛院士、黄琳教授、郑大钟教授、席裕庚教授、施颂椒教授、谢剑英教授、涂葦生教授、袁震东教授、钟秋海教授、戴亚平副教授、秦寿康教授、许世范教授、陈宗基教授、胡中楫教授、蔡尚峰教授、萧蕴诗教授、周其鉴教授、牛景汉教授、吴晓蓓教授、陶永华教授、俸远贞教授、吴坚教授、张汉全教授、柏建国教授、刘士荣教授、宁元中教授和高等教育出版社金春英编辑和张培东编辑以及四川大学

领导对笔者的热情指导与支持。

参加本书编写工作的有：(美)佐治亚理工学院黄虹博士和我的学生刘智勇、李成鑫、代军、杨晓梅、蒋毅、涂海燕等同志。

由于笔者水平有限，书中会有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

黄家英

2003年4月于四川大学

目 录

第 1 章 绪论	1	2.3.2 信号流图与梅森增益公式	69
1.1 引言	1	2.3.3 状态变量图	76
1.2 自动控制系统的基本形式	3	2.3.4 反馈控制系统的传递函数	79
1.2.1 开环控制系统	4	2.3.5 应用 MATLAB 求反馈控制系统的传递函数	83
1.2.2 闭环控制系统	6	2.4 状态空间描述法	90
1.2.3 智能化发展趋势	10	2.4.1 状态与状态空间	90
1.3 自动控制的基本方式	11	2.4.2 控制系统的状态空间表达式	94
1.3.1 反馈控制与顺馈控制	11	2.4.3 线性定常系统状态空间表达式的建立	98
1.3.2 复合控制	12	2.4.4 系统零极点及其与传递函数零极点的关系	101
1.4 自动控制系统的基本类型	14	2.4.5 应用 MATLAB 求线性定常系统的状态空间表达式	102
1.4.1 连续控制系统与离散控制系统	14	2.5 输入输出模型与状态空间模型之间的相互转换	105
1.4.2 线性控制系统与非线性控制系统	15	2.5.1 由状态空间模型转换为传递函数(阵)	105
1.4.3 定常系统与时变系统	16	2.5.2 由传递函数转换为状态空间模型	108
1.4.4 恒值控制系统与随动控制系统	17	2.5.3 应用 MATLAB 进行模型之间的相互转换和求零极点	115
1.5 对自动控制系统的基本要求	18	2.6 实际控制系统数学模型的建立	119
1.5.1 基本要求	18	2.6.1 非线性数学模型的线性化	121
1.5.2 典型输入信号	20	2.6.2 典型机电控制系统的传递函数与状态空间表达式	124
1.6 历史的回顾与全书的体系结构	23	2.6.3 典型机械系统的数学模型与相似性原理	130
小结	26	2.6.4 典型液面控制系统的传递函数与状态空间表达式	135
典型例题分析	28	2.6.5 热力控制系统的传递函数与状态空间表达式	139
习题	32	小结	142
第 2 章 控制系统的数学描述	34	典型例题分析	144
2.1 引言	34	习题	164
2.2 输入输出描述法	39		
2.2.1 输入输出微分方程的建立及其求解	39		
2.2.2 传递函数与传递函数的零点和极点	42		
2.2.3 典型环节的传递函数	50		
2.2.4 多变量系统的传递函数阵	58		
2.3 数学模型图示法与反馈控制系统的传递函数	60		
2.3.1 结构图	60		

第3章 线性控制系统的运动分析	171	典型例题分析	289
3.1 引言	171	习题	310
3.1.1 分析的出发点和基本内容	171	第4章 根轨迹法	319
3.1.2 线性控制系统的时间响应	173	4.1 引言	319
3.2 控制系统的零输入响应	175	4.1.1 系统灵敏度与反馈的作用	319
3.2.1 基于输入输出模型系统的零输入 响应	175	4.1.2 根轨迹法的基本概念	328
3.2.2 基于状态空间模型系统的零输入 响应	178	4.2 根轨迹的基本原理与绘制方法	330
3.2.3 状态转移矩阵与线性时变系统的零 输入响应	186	4.2.1 幅角条件与幅值条件	330
3.2.4 应用 MATLAB 求控制系统的零输入 响应	192	4.2.2 根轨迹法的一般步骤	332
3.3 控制系统的零状态响应	194	4.2.3 绘制根轨迹的基本规则	332
3.3.1 基于输入输出模型系统的零状态 响应	194	4.2.4 参数根轨迹	343
3.3.2 基于状态空间模型系统的零状态 响应	202	4.3 应用 MATLAB 绘制根轨迹和对 系统进行分析	345
3.3.3 应用 MATLAB 求控制系统的零 状态响应	208	4.4 零度根轨迹	347
3.4 控制系统运动的稳定性	210	4.5 根轨迹族	351
3.4.1 内部稳定性	211	4.6 根轨迹综合法	354
3.4.2 外部稳定性及其与内部稳定性 之间的关系	218	4.6.1 校正的基本方式	354
3.4.3 劳斯-赫尔维茨稳定判据	221	4.6.2 添加开环零极点对根轨迹形状的 影响	356
3.4.4 李雅普诺夫第一方法	228	4.6.3 校正装置	359
3.5 控制系统的暂态响应特性	230	4.7 串联校正的综合	364
3.5.1 单位阶跃响应与性能指标	230	4.7.1 串联超前校正的综合	366
3.5.2 一阶系统的暂态响应特性	233	4.7.2 串联滞后校正的综合	370
3.5.3 二阶规范系统的暂态响应特性	235	4.7.3 串联滞后-超前校正的综合	372
3.5.4 添加零点对二阶规范系统暂态特 性的影响	249	4.8 局部反馈校正的综合	375
3.5.5 高阶系统的暂态响应特性	255	小结	377
3.6 控制系统的稳态误差	264	典型例题分析	379
3.6.1 跟踪稳态误差	265	习题	397
3.6.2 扰动稳态误差	277	第5章 频率响应分析法	402
3.7 控制系统的基本控制律——PID 控制	282	5.1 频率特性	402
小结	287	5.1.1 频率特性的基本概念	403
		5.1.2 频率特性的图示方法	407
		5.1.3 频率特性与零极点的关系	412
		5.2 典型环节的频率特性	413
		5.2.1 比例环节的频率特性	413
		5.2.2 积分环节与微分环节的频率特性	413
		5.2.3 惯性环节与一阶微分环节的频 率特性	414

5.2.4 振荡环节与二阶微分环节的频率特性	417	5.6.3 奈奎斯特稳定判据的对数坐标图形式	458
5.2.5 非最小相位环节的频率特性	420	5.7 控制系统的稳定裕量与鲁棒性 ...	460
5.3 控制系统频率特性图的绘制	422	5.7.1 相角裕量与增益裕量	460
5.3.1 控制系统伯德图的绘制	423	5.7.2 应用 MATLAB 或开环对数渐近幅频曲线计算系统的稳定裕量	464
5.3.2 控制系统极坐标图的绘制	426	5.8 应用频率特性估算控制系统的暂态与稳态性能	466
5.3.3 应用 MATLAB 绘制控制系统的频率特性图	430	5.8.1 二阶规范系统的(时域)暂态响应与频率响应之间的关系	466
5.4 闭环频率特性	435	5.8.2 一般控制系统的(时域)暂态响应与频率响应之间的关系	469
5.4.1 应用 MATLAB 绘制尼科尔斯图	435	5.8.3 控制系统的稳态性能与开环频率特性之间的关系	474
5.4.2 闭环频率特性的基本特点	441	5.9 应用频率响应实验法确定传递函数	476
5.5 最小相位系统与频率特性函数的若干重要性质	444	小结	479
5.5.1 最小相位系统与非最小相位系统	444	典型例题分析	481
5.5.2 频率特性函数的若干重要性质	445	习题	498
5.6 奈奎斯特稳定判据	448		
5.6.1 映射定理	448		
5.6.2 奈奎斯特稳定判据	449		

第1章 绪 论

自动控制属于高新技术学科,自动控制系统遍及各类工程领域,“系统”的概念已渗透到社会生活的各个方面。“自动控制原理”是自动控制学科有关专业的核心课程,它是讨论各类自动控制系统共性问题的一门技术科学。本书以工程系统为背景,介绍自动控制的基本原理以及控制系统的数学描述、分析与综合的基本理论和方法。

本章从工程实例出发,介绍自动控制的基本概念、基本方式和自动控制系统的基本形式、类型与要求以及自动控制问题的功能方块图表示法,重点是自动控制系统的基本组成原理,核心是反馈控制原理。同时回顾了控制理论学科的发展历程,对全书的体系结构作一简要说明。

1.1 引 言

在生产力发展的过程中,人类总是不断地认识世界和改造世界,不断地提高社会的劳动生产率。经过一个漫长的历史时期,逐步地用机器代替人工劳动实现了机械化和自动化,开辟了人类对生产活动有意识控制的新纪元。自动控制是科学技术发展到一定阶段的产物,是社会进步的一个象征。它是一门介于多个学科之间综合性的高新技术学科,并渗透到各类工程领域和现代社会生活的各个方面,在信息科学中占有重要的地位。**自动控制的功能是:在没有人的直接参与下,通过控制装置使受控对象的被控量按照预定的规律变化。**例如:

往复式轧钢机的控制 它是通过轧辊频繁地正反向转动来完成对钢材正反向轧制任务的。需要控制的设备为轧钢机的轧辊,它就是该系统的受控对象,而控制装置为轧机的主传动控制装置。根据生产工艺过程要求,主传动电动机必须频繁地正反转。即快速地起动并调整到所要求的转速,进行正向轧制;然后快速制动和反向起动并调整到所要求的转速,进行反向轧制;再快速制动和反方向起动……如此循环,反复轧制至钢材的尺寸满足一定要求为止。如果不用自动控制而改用人工操作,除了极大地加重工人的劳动强度外,还由于生产节奏无法加快,不可避免地将造成钢材或轧辊的等待现象。一个轧制往复过程若空等待1秒钟,一台轧机一年就要少轧几万吨钢。

工业加热炉的控制(以热处理炉为例) 生产工艺过程要求控制炉温为设定值(例如400℃),并且在各种扰动(如电源电压波动、热负荷变化等)作用下只允许很小的偏差(例如0.5℃)。这时受控对象为热处理炉,被控量为炉温。如果不用自动控制而由人工操作,控制精度很难保证,产品质量也将受到影响。

雷达高射炮的控制 其目的是打击来犯的敌机,因此必须使雷达天线随时跟踪飞机的运动并测出敌机的方位和仰角;将这些数据经过计算机加工运算和处理后发出指令,控制高射炮的炮身转动系统和射击装置,使高射炮随时瞄准敌机并给予毁灭性地打击。瞄准的精度要求很高,其角度误差只能以分计。特别是现代的军用飞机速度很快,高射炮的炮身又很重,如果不用自动控制而用人工操作,根本就无法满足现代战争的需要。

空间飞行器飞行姿态的控制 空间飞行器是火箭、导弹和人造地球卫星的通称。它们的飞行控制系统是相类似的,现以人造地球卫星为例。通常将人造地球卫星视为刚体,因此对它的控制包括两部分:控制人造地球卫星质心运动的轨道控制和控制人造地球卫星飞行姿态的姿态控制。对于大多数人造地球卫星而言,卫星的运行轨道是由运载火箭的制导系统来保证的,因而在卫星上只有姿态控制系统。所谓卫星的姿态控制就是对卫星绕质心的运动进行控制,以确保其飞行所要求的姿态。例如:卫星上主要能源是太阳能电池,为了保证它能正常地工作,必须保持卫星相对于太阳的姿态;通信卫星是电话和广播电视的中继站,它的窄波束天线的波束必须以 1° 左右的对地精度指向地球上预定的目标区域。可见人造地球卫星的姿态控制是以高水平的自动控制技术为前提的。尖端技术更需要高品质的自动控制,自动控制系统已成为空间飞行器的重要组成部分。

要使受控对象的被控量变化并不难,难的是使它按预定的规律变化,面临的主要问题有下列两个方面。

(1) 受控系统的特性难合人意

“系统”的概念已渗透到现代社会的各个领域,其含义也是非常广泛的。凡是由若干部件相互作用而构成的并具有特定功能的整体,都可叫做系统。控制系统就是由受控对象和控制装置按照一定方式连接而成的有机整体。而且系统的概念具有相对性:系统的每一组成部分均可视为一个系统,为了和整体的系统相区别通常称之为子系统;一个系统又可以是更大系统的子系统。例如受控对象本身可视为一个系统,在控制系统中它又是一个子系统,称为受控子系统简称受控系统。

系统一般可分为静态系统和动态系统两大类。从物理的角度看,它们的本质区别在于是否含有储能(或储存信息)的元器件。静态系统不含有储能元件,因而描述静态系统各变量之间的关系只需用代数方程,如纯电阻网络和理想的比例运算放大器就属于这类系统。而含有储能(或储存信息)的元器件的系统则称为动态系统,又叫做动力学系统。实际的控制系统均属于动态系统,而静态系统只是实际系统的一种理想化结果。动态系统的特点是:由于其存在储能(或储存信息)的元器件,如质量、弹簧、转动惯量、电感、电容、存储器或寄存器等,因而描述系统各变量之间的关系必须用微分(或差分)方程;系统的运动呈现惯性的特点,在外界输入信号作用下系统的响应不可能立即完成而需要有个过程(称为过渡过程),而过渡过程的特性取决于系统的结构和各元器件的特性。由于受产品结构、材料、生产工艺条件等限制,通常受控系统的元器件的特性难合人意,若不采取措施加以校正,则系统的被控量就难以甚至无法按照预定的规律变化。

(2) 存在各种扰动阻碍系统的被控量按照预定的规律变化

作用于系统的输入信号可分为两大类:一类是有用的输入信号,它决定系统被控量的变化规律,通常称其为参考输入信号;另一类为扰动(或干扰)信号,简称扰动,它们将阻碍系统被控量按照预定的规律变化,因此扰动是一类有害的信号。系统的扰动包含两部分:由系统外部因素造成的扰动(例如电源电压的波动、电动机负载和环境温度的变化、飞行中气流的冲击等)叫做外部扰动,简称外扰;由系统内部因素造成的扰动(例如所使用元器件的老化、磨损和特性的变化等)叫做内部扰动,简称内扰。在实际系统中扰动总是不可避免的,而且其变化规律往往是难以预计的,甚至扰动的形式也是未知的。

此外,系统又涉及各类工程技术领域,遍布现代社会生活的各个方面,它们的物理属性又各不同,例如有工业控制系统、军事系统、经济系统、生物系统、社会系统……。工业控制系统又包括电气系统、机械系统、液压系统、气动系统、电气传动系统、过程控制系统等。

因此,自动控制理论学科以及本课程具有下列两个特点:

1. 自动控制理论研究的是自动控制系统运动的一般规律和分析、设计的基本方法

研究的对象是各类控制系统;研究的问题是如何根据被控对象和环境的特性,通过对系统运动信息的采集、加工和处理,形成适当的控制作用,使系统在各种扰动因素作用下能够正常地工作并具有预定的功能;研究的基本方法是对各类物理属性迥异的控制系统加以抽象与概括,抓住其本质特征和影响系统特性的主要因素,略去次要因素,用数学方程或表达式对系统加以描述(该数学方程或表达式称为系统的数学模型),并总结出分析与设计^①自动控制系统的基本理论和方法,以指导工程实践。

因此本课程的特点是从“共性”角度讨论自动控制系统运动的一般规律和普遍适用于各类系统的分析与设计的基本方法。这对于未接触过具体系统的读者来说会感到抽象,建议学习时应与具体的控制系统以及例题和习题结合起来,以便通过“个性”来理解和掌握“共性”,并以“共性”为指导来加深对“个性”的了解。

2. 自动控制理论讨论的中心问题是控制系统的性能

自动控制理论讨论的内容,可简单地概括为关于自动控制系统的基本组成原理以及控制系统的数学描述、分析和设计的基本方法,而核心在于后者。因此从本质上说,本课程是一门方法论的技术基础课。讨论的重点是分析与设计自动控制系统的基本理论和基本方法。讨论的出发点和归宿点始终围绕自动控制的功能(使系统的被控量按照预定的规律变化)这个中心。而系统所具有的自动控制功能的优劣程度可用控制系统的性能来描述,它包括定性性能和定量性能两个部分。因此本课程讨论的中心问题是控制系统的性能。这就是说:在系统分析时,系统已经确定,讨论的中心问题是系统的结构和参数与系统性能的关系,以及改善和提高系统性能的途径;在系统设计时,从对系统性能的要求出发,讨论的中心问题是如何确定合适的系统结构与参数(或控制算法),使系统在技术经济指标综合评价的意义下较好地满足对系统性能的要求。

1.2 自动控制系统的基本形式

控制系统的种类繁多,复杂程度亦各异。但就控制系统的外部联系而言,它们的共同特点是具有外界作用于系统的输入量和系统往外界传送信息的输出量。输入量可分为两类:一类是人为设置对系统进行控制的有用输入信号,称为参考输入信号(或给定信号),有时简称为输入信号;另一类是破坏系统控制功能的有害信号,称为扰动信号(简称扰动)。为了分析方便通常

^① 控制系统的设计是一项较复杂的工作,要考虑多方面的因素:既要考虑技术要求,又要考虑该系统的社会意义、经济性、可靠性和使用维护的方便性等方面的要求。这里只限于讨论设计的技术性部分,即用数学方法寻找一个能满足技术要求的控制系统,通常把这项工作叫做系统的综合。文中所说的系统设计,严格地说是指系统的综合。但在习惯上,往往将设计与综合视为同义词而不加以区分。

将内部扰动和外部扰动统一处理,均视为作用于系统的扰动信号。而输出量一般也是系统的被控量(或被调量)。于是控制系统的外部联系可用图 1.1 所示的方块图来表示。实际的控制系统都是因果系统,即有“因”才有“果”,有输入才有输出,而输出决不会产生在输入作用时刻之前。或者说,系统只是在“激励”作用下才引起“响应”的。因此输入量又叫做系统的激励,输出量又叫做系统的响应。参考输入信号是使系统响应朝着希望方向变化的,而扰动信号则是干扰甚至破坏系统的这种变化的。例如飞机控制系统,它的输入量是飞机舵的转角和发动机产生的推进力,它们的大小均可由驾驶员来控制,改变它们便可达到改变系统输出(飞行的速度、飞行的方位和高度)的目的;而在飞行过程中遇到的由气流形成的阻力将干扰飞机的航迹,这种阻力就是作用于飞机控制系统的扰动量。该系统的特点是输入量和输出量有若干个,通常称这种类型的系统为多输入多输出(或 MIMO^①)系统,简称多变量系统。控制系统的另一种类型是只有一个输入量和一个输出量,通常称这类系统为单输入单输出(或 SISO^②)系统,简称单变量系统。它是工业系统中常见的或者可以等效化成的基本类型,也是本书讨论的主要对象。

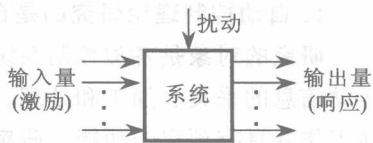


图 1.1 控制系统外部联系的方块图

控制系统的内部结构远比外部联系要复杂得多。但就控制系统的基本形式而言,可分为两种类型:开环控制系统和闭环控制系统。

1.2.1 开环控制系统

若系统的输出量不返送到系统的输入端,则称这类系统为开环控制系统。图 1.2 (a)所示的晶闸管可控整流器供电的直流调速系统,就是其中的一例。

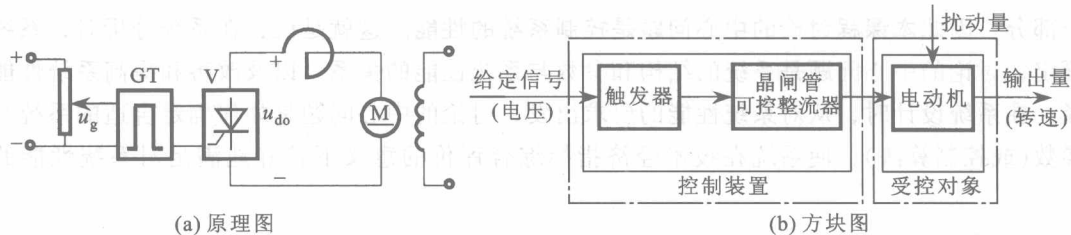


图 1.2 开环调速系统

在工业上广泛使用的电气传动系统中,晶闸管-电动机调速系统(简称 V-M 系统)是直流调速系统的基本形式。图 1.2 (a)所示为 V-M 开环直流调速系统的原理图。在该系统中直流电动机为系统的受控对象,通过改变电动机电枢两端的电压来调节电机的转速,而电机的转速为系统的输出量(即被控量)。改变给定电压 u_g 的大小,使触发器 GT 所产生的触发脉冲的相位发生变化,从而改变晶闸管整流装置的输出电压(即电机的电枢电压)以调节电机转速的高低,故给定电压 u_g 为系统的输入量(即给定信号)。而电动机负载的改变以及电网电压的波动等也是外界作用于系统的输入信号,但它们是使电动机转速偏离希望值的,故它们为系统的扰动信

① MIMO 是英文术语 Multiple-input Multiple-output (多输入多输出)的缩写词。

② SISO 是英文术语 Single-input Single-output (单输入单输出)的缩写词。

号。在功能上,晶闸管可控整流器和触发器起着控制电动机(受控对象)转速的作用,通常把它们合在一起称为系统的控制装置(或控制器)。

从这个简单控制系统的讨论中可以看到:

(1) 自动控制理论所关心的是系统的“控制”问题。所谓系统的“控制”问题是指:根据对系统有关信息的采集、加工和处理以形成适当的控制作用,对系统进行控制使之在各种扰动作用下能实现预定功能的问题。在控制系统中随时间变化的物理量称为变量,又叫做信号。而信号是信息的载体。因此在具体讨论时,所研究的是根据对系统有关信号的采集、加工和处理以形成控制的共性问题。在客观世界存在的三大要素中,除了“信息”之外还有“物质”和“能量”问题,这些问题将由其他课程(如电力电子技术,电机与拖动,电力拖动自动控制系统,工业仪表与过程控制系统等课程)来解决。

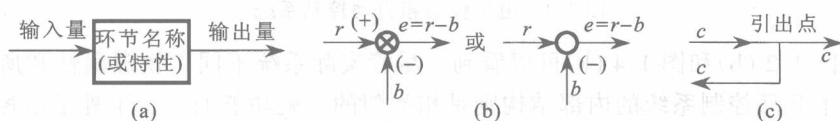


图 1.3 方块图的基本组成单元

(2) 系统的控制问题广泛采用功能方块图表示法。控制系统的功能方块图简称系统的方块图,是从控制功能出发用图形的方式来描述系统的控制问题。由于方块图能形象直观地将系统中信号的传递、加工处理和决策控制的问题定性表示出来,因而得到了广泛的应用。图 1.1 就是一个最简单的应用实例。方块图的基本组成单元如图 1.3 所示:图中每一条线代表控制系统中的一个信号变量,故又叫做信号线;信号的传递方向用箭头来表示,在控制系统中信号只能沿着箭头进行单方向传递;系统中具有一定功能的部分称为环节,用一方块来表示,在方块内标出该环节的名称(符号或特征);进入方块的信号称为该环节的输入量,离开方块的信号称为该环节的输出量(如图 1.3 (a)所示);用符号“ $\otimes$ ”或“ $\odot$ ”表示信号的综合点,即对进入该综合点的信号进行运算,运算的结果由离开综合点的信号线往外传送(如图 1.3 (b)所示),常用的综合运算是相加(减),故相应的综合点又叫做相加点,为了简化表示,我们约定,凡是送至相加点的信号是负值必须以符号“ $(-)$ ”加以标明,凡是正值则不另加标志符号;图 1.3 (c)表示的是信号的引出点(或测量点),它代表信号引出或测量的位置,从同一信号线引出的信号均为同一信号。

若采用方块图表示法,则上述开环调速系统可简单地用图 1.2 (b)来表示。可见方块图形象地描述了系统的结构、信号的流向以及控制的关系,非常直观和简便。如果每个环节均用它们的特性来表示,建立各个环节的输入-输出关系式并将其写入相应环节的方块内,则该图形不仅能定性而且也能定量地描述系统的结构和控制的关系,这样的图形称为函数方块图或叫做结构图(如图 2.5 所示,详见第二章)。虽然实际系统千差万别、形式各异,但是各类系统的结构、信号的传递以及各环节之间的控制关系都可用方块图或结构图形象地表示出来,而且直观的结构图化简可以取代数学方程的繁杂运算,因此图示法已成为分析研究系统的一种重要工具,并在实际中得到了广泛的应用。

图 1.4 (a)所示的是电炉恒温箱的自动控制系统。恒温控制的任务是在扰动作用下(如打开箱门放入物品或取出物品,电源电压的波动以及环境温度的变化等)保持箱内温度恒定,以满足

生产工艺过程对温度的要求。开环控制的方法是：移动调压器活动触头的位置，改变加在加热电阻丝两端的电压，从而调节电阻丝电流的大小以达到控制温度的目的。若用方块图则可简便地用图 1.4 (b)来表示。

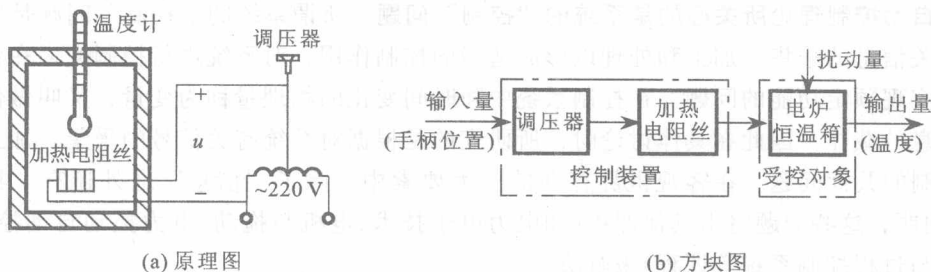


图 1.4 电炉恒温箱自动控制系统

分析比较图 1.2 (b)和图 1.4 (b)可以看到：尽管实际系统不同，物理属性和所用的元器件也各异，但两个开环控制系统的内部结构则是相类似的。就功能而言，不外乎由控制装置和受控对象这两个环节所组成，如图 1.5 所示。

开环控制的特点：控制装置与受控对象之间只有顺向作用而无反向联系；每一输入量对应的有一输出量，系统的控制精度完全取决于所用元器件的精度和特性调整的准确度，只要受控对象稳定，系统就能稳定地工作；开环控制的缺点是抗扰动能力差，当有扰动作用时都将使被控量偏离给定值，直接影响系统的控制精度。因此在实际工程中应根据对系统精度的要求，选用与之相适应的较精密的元器件，或对主要扰动加以补偿和实施按扰动的补偿控制(详见 1.2.3 小节)。



图 1.5 开环控制系统方块图

开环控制系统由于结构简单、易于构造、调整方便、成本低，故在对系统精度要求不高、扰动的影响较小或扰动的作用可以预先加以补偿的场合，得到了广泛的应用。

1.2.2 闭环控制系统

在实际控制系统中扰动的影响总是不可避免的，而且也往往是无法预计的。当对系统的精度要求较高时，为了在随机扰动作用下提高系统的性能，通常引入反馈构成闭环控制系统。图 1.6 所示的直流调速系统，就是其中的一个实例。

闭环调速系统 图 1.6 (a)所示为电气传动领域常用的闭环直流调速系统的原理图。将它与图 1.2 所示的开环调速系统相比较可以看到：它们都是晶闸管可控整流器供电的直流调速系统(即 V-M 系统)，因而具有相同的受控对象(直流电动机)和相同的被控量(转速)；并且都是通过调节触发器的控制电压改变由晶闸管可控整流器所提供的电枢电压的高低，来达到调节电动机转速的目的。它们的不同之处，也就是闭环控制系统的特点是：在图 1.6 (a)所示的闭环调速系统中由测量元件(测速发电机)对被控量(转速)进行检测，并将其反馈至输入端与给定电压相比较(相减)得到偏差电压($u_e = u_g - u_f$)；经放大器放大后加到触发器-晶闸管可控整流装置的输入端，并根据偏差的信息(偏差电压的极性和大小)对被控量进行相应的调节，以达到消除偏差或使偏差减小到容许范围内的目的。这种联接极性的反馈称为负反馈。这种通过负反馈产生偏差并根据偏差的信息进行控制，以达到最终消除偏差或使偏差减小到容许范围内的控制