



教育部高职高专规划教材

自动控制原理

● 王恩荣 主编
胡寿松 主审

3-43
1

化学工业出版社
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

自动控制原理

王恩荣 主编
叶彪明 副主编
胡寿松 主审

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/王恩荣主编. —北京: 化学工业出版社,
2001.12
教育部高职高专规划教材
ISBN 7-5025-3624-8

I. 自… II. 王… III. 自动控制理论-高等学校: 技
术学校-教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 093725 号

教育部高职高专规划教材

自 动 控 制 原 理

王恩荣 主编

叶彪明 副主编

胡寿松 主审

责任编辑: 王丽娜 张建茹

责任校对: 凌亚男

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社

教材出版中心出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市云浩印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 12¼ 字数 302 千字

2001 年 12 月第 1 版 2001 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3624-8/G·967

定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分吸取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001年4月3日

前 言

根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》精神,为满足高职高专电类相关专业教学基本建设的需要,在教育部高教司和教育部高职教育教学指导委员会的关心和指导下,全国石油和化工高职教育教学指导委员会广泛开展调研,召开多次高职高专电类教材研讨会,组织编写了20本面向21世纪的高职高专电类专业系列教材,供工业电气化技术、工业企业电气化、工业电气自动化、应用电子技术、机电应用技术及工业仪表自动化、计算机应用技术等相关专业使用。

本套教材立足高职高专教育人才培养目标,遵循主动适应社会发展需要、突出应用性和针对性、加强实践能力培养的原则,组织编写了专业基础课程的理论教材和与之配套的实训教材。实训教材集实验、设计与实习、技能训练与应用能力培养为一体,体系新颖,内容可选择性强。同时提出实训硬件的标准配置和最低配置,以方便各校选用。

由于本套教材的整体策划,从而保证了专业基础课与专业课内容的衔接,理论教材与实训教材的配套,体现了专业的系统性和完整性。力求每本教材的讲述深入浅出,将知识点与能力点紧密结合,注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力。

本书的特点主要体现在以下几个方面。

(1) 体系方面 对原有教材的体系进行了较大的调整,将系统分析方法和系统的性能分析分开介绍,突出了系统分析方法的综合应用。以系统的性能分析为目的,介绍各种分析方法的应用。

(2) 内容方面 主要介绍经典控制理论的内容,加强了对基本理论及其应用的阐述,深入浅出地介绍了自动控制的基本概念。减少了公式和结论的理论推导过程。针对高等职业教育的特点,本书强调了对公式和结论应用能力的培养,而不强调其推导过程。

(3) 创新方面 由于计算机的迅速普及和应用,借助计算机进行控制系统的分析和设计已成为现实,因此本书引入了当今世界上最流行的,基于MATLAB的系统分析和设计的内容。使学生在掌握基本概念的同时,还掌握了一种有力的工具。这也为教师进行CAI教学提供了条件。

本书由王恩荣主编,叶彪明任副主编,并负责全书的统稿与最后定稿。南京航空航天大学胡寿松教授主审。编写分工为:王恩荣、叶彪明(第一、二章及附录),朱光衡(第三、四、五章),叶彪明(第六、八章及各章中有关MATLAB的内容),周鸿博(第九、十章)、陈中(第七章)。

本书在编写过程中,得到了南京师范大学、化学工业出版社等单位有关同志的大力支持,特别是胡寿松教授仔细审阅了全稿,并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

书中错误和不妥之处,恳请使用本书的师生及广大读者批评指正。

编 者

2001年10月

目 录

第一章 自动控制理论概述	1	第一节 系统稳定性分析概述	106
第一节 自动控制理论的发展	1	第二节 系统稳定性的代数分析法	108
第二节 自动控制与自动控制系统	2	第三节 系统稳定性的频率特性分析法	111
第三节 自动控制系统应用示例	6	第四节 MATLAB 在系统稳定性分析中 的应用	120
第四节 计算机辅助工具 MATLAB 软件 简介	8	本章小结	124
本章小结	15	习题	125
习题	16	第七章 自动控制系统的稳态性能分析 ..	127
第二章 控制系统的数学模型	18	第一节 系统稳态性能分析概述	127
第一节 控制系统的微分方程	18	第二节 给定输入信号作用下的稳态 误差	129
第二节 传递函数	23	第三节 扰动信号作用下的稳态误差	131
第三节 控制系统的动态结构图	29	第四节 根据频率特性分析系统的稳态 性能	133
第四节 反馈控制系统的传递函数	35	第五节 MATLAB 在系统稳态性能分析 中的应用	134
第五节 MATLAB 中的数学模型表示及 等效变换	37	本章小结	136
本章小结	40	习题	136
习题	41	第八章 自动控制系统的动态性能 分析	138
第三章 自动控制系统的时域分析法	44	第一节 系统动态性能的频域分析	138
第一节 时域分析法概述	44	第二节 系统动态性能的根轨迹分析	144
第二节 一阶系统的时域分析	48	第三节 MATLAB 在系统动态性能分析 中的应用	148
第三节 二阶系统的时域分析	50	本章小结	151
第四节 高阶系统的时域分析	57	习题	152
第五节 MATLAB 在系统时域分析中的应用 ..	59	第九章 自动控制系统的性能改善 方法	153
本章小结	64	第一节 自动控制系统性能改善概述	153
习题	64	第二节 提高系统准确性的校正方法	155
第四章 自动控制系统的频域分析法	67	第三节 改善系统动态性能的校正方法	156
第一节 频域分析方法概述	67	第四节 MATLAB 在改善系统性能方面 的应用	169
第二节 开环系统的伯德图分析	70	本章小结	171
第三节 开环系统的乃奎斯特图分析	79	习题	172
第四节 闭环频率特性与闭环频域指标	85	第十章 采样控制系统分析	173
第五节 MATLAB 在系统频域分析中的 应用	86	第一节 采样控制系统分析概述	173
本章小结	89	第二节 采样控制系统分析的理论基础	176
习题	89	第三节 采样控制系统的脉冲传递函数	180
第五章 自动控制系统的根轨迹 分析法	91	本章小结	184
第一节 根轨迹分析法概述	91	习题	185
第二节 根轨迹的绘制方法	94	附录 MATLAB 函数命令索引表	187
第三节 MATLAB 在系统根轨迹分析中 的应用	101	参考文献	189
本章小结	104		
习题	104		
第六章 自动控制系统的稳定性分析 ..	106		

第一章

自动控制理论概述

自动控制理论 (Automatic Control Theory), 是控制论的一个重要分支, 包括经典控制理论和现代控制理论两大部分, 是一门既与技术科学又与基础科学相关的学科, 同相对论和量子论一起被誉为 20 世纪上半叶的三大伟绩。实践证明, 控制论不仅具有重大的理论意义, 而且对生产力的发展、生产效率的提高、高新技术的研究与现代尖端武器的研制, 以及对社会管理等方面都已产生了重大的影响。虽然现代控制理论的发展与应用在当今已占主导地位, 但是作为基础理论的经典控制理论却是绝对不可或缺的, 因此, 本书主要介绍经典控制理论的基本内容, 并引进基于 MATLAB 的有关计算机辅助分析方法。本章主要从宏观角度简要地介绍自动控制理论的发展、基本概念、应用等情况, 以便于读者一开始就能把握住学习的目的性和核心内容及其体系。

第一节 自动控制理论的发展

一、经典控制理论的发展

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学, 在工程和科学技术发展过程中担负着重要的角色。其发展初期, 是以反馈理论为基础的自动调节理论, 并主要用于工业控制。第二次世界大战期间, 为了设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统以及其他基于反馈原理的军用设备, 进一步促进并完善了自动控制理论的发展。到战后, 已形成完整的自动控制理论体系, 这就是以传递函数 (Transfer Function) 为基础的经典控制理论, 它主要研究单输入-单输出、线性定常系统的分析和设计问题。这其中, 1922 年, 维纳研制出船舶操纵自动控制器, 并且证明了如何从描述系统的微分方程来确定系统的稳定性; 1932 年, 奈奎斯特提出了一种相当简便的方法, 根据对正弦输入的开环响应, 确定闭环系统的稳定性; 20 世纪 40 年代, 频率响应法为工程技术人员设计满足性能要求的线性闭环控制系统提出了一种可行的方法; 从 20 世纪 40 年代末到 50 年代初, 伊凡思提出并完善了根轨迹法。

因此, 20 世纪 20~40 年代, 是经典控制理论发展的重要时期, 形成了以频率响应法和根轨迹法为核心的经典控制理论体系。

二、现代控制理论的发展

用经典控制理论方法设计出来的系统虽然能满足一定的性能要求, 但还不是某种意义上的最佳系统, 特别是对多输入-多输出复杂控制系统的研究还不能提供有效的手段。

20 世纪 60 年代, 随着计算机技术的发展和运用, 为复杂系统的时域分析等提供了极为有效的工具, 而且由于航空航天等高科技事业的需要, 进一步推动了自动控制理论的发展, 迅速形成了针对多输入-多输出复杂线性控制系统, 用状态空间模型及时域分析方法进行研究的现代控制理论体系。同时, 随着自动化技术的日益发展, 人们力求使所设计的控制系统能达到最优的性能指标, 这就是为使系统在一定的约束条件下, 其某项性能指标能达到最优的最优化控制 (Optimal Control); 而当控制对象或环境特性发生变化时, 为了使系统能自行调节, 以跟踪这种变化并保持其良好的品质, 又出现了自适应控制 (Adaptive Control); 由于实现精度控制的重要条件之一是要建立精确的控制对象的数学模型, 而精确的数学模型实际上又是很难真正得到的, 因此, 真正优良的控制系统设计必须能允许模型的结构和参数并不一定要十分精确, 且应允许它们能在一定的范围内变化, 这就是鲁棒性控制 (Robust Control)。

现代控制理论之所以能得到迅速的发展和运用, 其重要的原因之一是由于计算机辅助分析和设计方法的引进, 从而使得复杂的数学计算已经变得十分容易。近年来, 现代控制理论在非线性系统理论、离散事件系统、大系统和复杂系统理论等方面也均有了不同程度的发展, 特别是在智能控制 (Intelligent Control) 方面得到了很快的发展和运用, 它主要包括专家系统 (Expert System)、模糊控制 (Fuzzy Control) 和人工神经网络 (Artificial Neural Network) 等先进的控制方法。目前, 现代控制理论的应用已经扩充到非工程系统, 诸如: 生物系统、生物医学系统、经济系统和社会系统等。

自动控制理论的不断发展和运用, 为人们提供了研究和实现动态系统最佳性能的控制方法, 它不仅推动了社会的发展, 而且使人们从繁重的体力劳动和大量重复性的手工操作中解放出来。因此, 大多数工程技术人员和科学工作者现在都必须具备一定的自动控制理论方面的知识。

第二节 自动控制与自动控制系统

自动控制理论研究的是如何按受控对象和环境特征, 通过能动地采集和处理信息施加控制作用, 使系统在变化或不确定的条件下正常运行并具有预定的功能, 它既具有很强的理论性, 又具有很强的应用性, 是一门研究自动控制共同规律的技术科学, 其主要内容涉及受控对象、控制目标和控制手段以及它们之间的互相作用等。下面首先介绍在研究自动控制理论及自动控制系统时一些常用的术语。

一、常用术语

(1) 受控对象 (或被控对象) (Controlled Object): 是指被控制的装置或者设备, 如一台电气设备、一个加热炉、一种机械装置等。

(2) 受控量 (或被控量) (Controlled Variable): 是指被控制的物理量, 通常作为系统的输出量, 如炉温、转速等。

(3) 参考输入 (或给定值) (Reference Input): 是指系统的给定输入信号, 或者称为希望值。

(4) 偏差信号 (Error Signal): 是指系统的参考输入信号与反馈信号之差。

(5) 前向通道 (Forward Channel): 是指系统从输入端到输出端的单方向通道。

(6) 反馈通道 (Feedback Channel): 是指系统从输出端到输入端的反方向通道。

(7) 扰动 (Noise): 是一种对系统的输出产生不利影响的信号。如果扰动产生在系统的内部, 则称为内部扰动 (Inner Disturbance); 反之, 当扰动产生在系统外部时, 则称为外部扰动 (External Disturbance), 外部扰动是系统的输入量。

(8) 系统 (System): 是指一些部件的组合, 这些部件组合在一起, 可完成一定的任务, 系统不限于物理系统, 也可以适用于抽象的动态现象, 如经济学中遇到的一些现象等。

二、基本概念

所谓自动控制 (Automatic Control), 是指在没有人直接参与的情况下, 利用外加的设备或装置 (称为控制装置或控制器), 使受控对象的受控量按照预定的规律运行, 如图 1-1 所示。自动控制有两种基本的控制方式: 开环控制 (Open Loop Control) 和闭环控制 (Close Loop Control), 对应与这两种控制方式的系统分别为开环控制系统 (Open Loop Control System) 和闭环控制系统 (Close Loop Control System)。



图 1-1 自动控制示意图

1. 开环控制系统

开环控制系统是指系统的输出量对控制作用没有影响的系统, 如图 1-2 所示。也就是说, 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系统的输入端与输入量进行比较。或者说, 控制装置与受控对象之间只有顺向作用, 而没有逆向联系。例如, 洗衣机就是开环控制系统的一个实例, 在洗衣机中, 浸湿、洗涤和漂清过程都是按照一种时间顺序进行的, 洗衣机不必对输出信号, 即衣服清洁程度进行测量。



图 1-2 开环控制系统

开环控制系统的特点是: 系统结构和控制过程均很简单, 但抗干扰能力差, 一般仅用于控制精度不高且对控制性能要求较低的场合; 由于开环控制系统均无需将输出量与参考输入量进行比较, 因此对应于每个参考输入量, 一般只有一个固定的工作状态与之对应。这样, 系统的精确度便取决于标定的精确度, 且当出现扰动时, 开环系统就不能完成既定任务了。在实践中, 只有当输入量与输出量之间的关系已知, 并且既不存在内部扰动, 也不存在外部扰动时, 才能采用开环控制系统。

2. 闭环控制系统

闭环控制系统 (亦称为反馈控制系统, Feedback Control System) 如图 1-3 所示, 是指能对输出量与参考输入量进行比较, 并且将它们偏差作为控制手段, 以保持两者之间预定关系的系统。在闭环控制系统中, 控制装置与受控对象之间不仅有顺向作用, 而且还有逆向联系。作为输入信号与反馈信号之差的误差信号被传送到控制装置, 以便减小误差, 并且使系统的输出达到期望值。

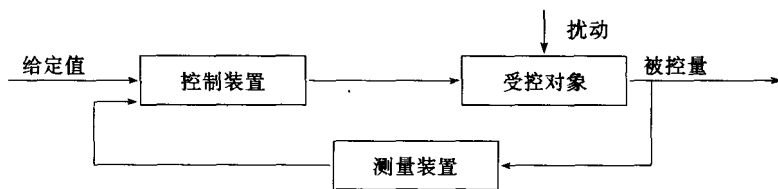


图 1-3 闭环控制系统

闭环控制系统的特点是：由于采用了反馈，因而可使系统的响应对外部干扰和系统内部的参数变化不敏感，系统可达到较高的控制精度和较强的抗干扰能力。这样，对于给定的被控对象，就有可能采用不太精密且成本较低的元件来构成比较精确的控制系统，这在开环情况下，是不可能做到的。

从稳定的观点出发，开环控制系统的稳定性不是主要问题，但在闭环控制系统中，稳定性却始终是一个重要问题，因为闭环系统可能引起过调误差，从而导致系统不稳定。

当系统的输入量能预先知道，并且不存在任何扰动时，采用开环控制比较合适。只有当存在着无法预计的扰动或系统中的元件参数存在着无法预计的变化时，闭环控制系统才具有优越性。闭环控制系统中采用的元件数量比相应的开环控制系统多，因此闭环控制系统的成本和功率通常比较高。

三、自动控制系统的分类

自动控制系统有多种分类方法，根据不同的分类方法可以将系统分成不同的类型，实际的系统可能是几种系统类型的组合体。如前面已经介绍过的开环控制系统与闭环控制系统，这是按照控制方式来分类的。下面再介绍自动控制系统的另外几种常见的分类方法。

1. 线性控制系统和非线性控制系统

这是根据系统数学性质的不同来分类的。

线性控制系统 (Linear Control System) 是指能满足均匀性和叠加性特性的控制系统。当系统在输入信号 $r_1(t)$ 的作用下产生系统的输出是 $c_1(t)$ ，在输入信号 $r_2(t)$ 的作用下产生的输出是 $c_2(t)$ ，而当系统的输入信号为 $ar_1(t) + br_2(t)$ 时，系统的输出如为 $ac_1(t) + bc_2(t)$ ，则这样的系统称为线性系统，否则称为非线性控制系统 (Nonlinear Control System)。这里，系数 a 、 b 是常数。

2. 连续系统、离散系统和采样系统

这是根据系统中信号的类型来分类的。

若系统各部分的信号都是时间的连续函数 (即模拟量)，则称此系统为连续系统 (Continue System)；若系统中既有模拟信号又有离散信号，则称此系统为离散系统 (District System)；通常，把系统中的离散信号是脉冲序列形式的离散系统，称为采样系统 (Sampling System)；而把数字序列形式的离散系统，称为数字控制系统 (Digital Control System)。计算机控制系统是一个数字控制系统。

3. 定常系统与时变系统

这是根据系统中的参数是否随时间的变化而变化来分类的。

从系统的数学模型来看，若描述系统的微分方程的系数不是时间变量的函数，则称此系统为定常系统 (Time-Invariant System)，否则称为时变系统 (Time-Varied System)。

4. 恒值系统、随动系统和程序控制系统

这是根据给定的参考输入信号的不同来分类的。

当系统的参考输入为一定值，而控制任务就是克服扰动，使被控量保持恒值，此类系统称为恒值系统 (Uniform Control System)；若系统给定值按照事先不知道的时间函数变化，并要求被控量跟随给定值变化，则此类系统称为随动系统 (Following Control System)；若系统的给定值按照设定的时间函数变化，并要求被控量随之变化，则此类系统称为程序控制系统 (Programed Control System)。如一些自动化生产线等。

本书主要的研究对象是线性定常控制系统 (Linear Time-Invariant Control System)。

四、自动控制系统的性能评价

自动控制系统有多种不同的类型，对每个系统也有不同的特殊要求，但对于各类系统来说，在已知系统的结构和参数时，最感兴趣的是系统在某种典型输入信号下，其被控量变化的全过程。对每一类系统被控量变化全过程提出的共同基本要求都是一样的，且可以归结为稳定性、准确性、快速性，即“稳、快、准”的性能要求。

1. 稳定性

稳定性 (Stability) 是指系统在受到外部作用后，其动态过程的振荡倾向和系统恢复平衡的能力。它是保证控制系统正常工作的先决条件，一个稳定的控制系统，其被控量偏离期望值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小或趋于零，如图 1-4 所示。图 1-5 示出了不稳定系统的两种响应情况，其中图 1-5 (a) 为在给定信号作用下，被控量振荡发散的不稳定情况；图 1-5 (b) 为系统受扰动作用后，不能恢复平衡的不稳定情况；还有一种情况称为临界稳定 (Critical Stable State) 情况，即系统的响应处于稳定的等幅振荡状态，实际上，这也是不允许系统出现的一种不稳定情况。

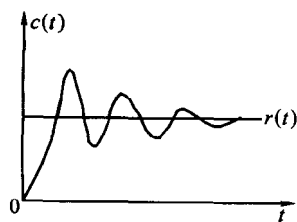


图 1-4 稳定系统的动态过程

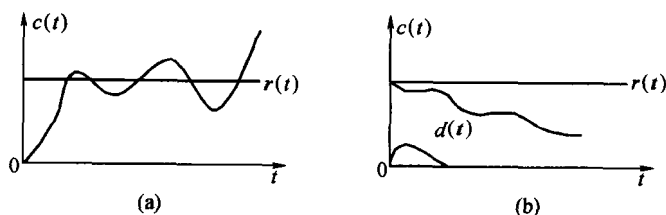


图 1-5 不稳定系统的动态过程

线性控制系统的稳定性是由系统自身的结构和参数所决定，与外界因素无关。

2. 快速性

快速性 (Fastness) 是用动态过程的时间长短来表征的，过渡过程时间越短，表明快速性越好，反之亦然，如图 1-6 所示。为了很好地完成控制任务，一个控制系统如仅仅满足了稳定性的要求还是不够的，还必须对其过渡过程的形式和快慢提出要求，一般称为动态性能 (Dynamic Characteristics)。

快速性表明了系统的输出对其输入响应速度的快慢。

3. 准确性

准确性 (Accuracy) 是由输入给定值与输出响应的终值之间的差值大小来表征的，如图 1-7 所示。在理想情况下，当过渡过程结束后，被控量达到的稳态值应与期望值一致。但实

际上, 由于系统结构、外作用形式以及摩擦、间隙等非线性因素的影响, 被控量的稳态值与期望值之间会有误差存在, 称为稳态误差 (Stable State Error)。稳态误差是衡量控制系统控制精度的重要标志, 若系统的稳态误差为零, 则称为无差系统 (Error-free System), 否则称为有差系统 (Erroneous System)。

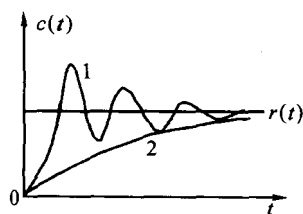


图 1-6 控制系统的快速性

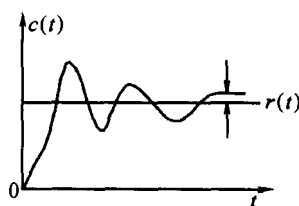


图 1-7 控制系统的稳态精度

控制系统的稳定性、快速性和准确性往往是互相制约的。求稳有可能引起反应迟缓, 精度降低; 求快则可能加剧震荡, 甚至引起不稳定。怎样根据工作任务的不同, 分析和设计自动控制系统, 使其对三方面的性能有所侧重, 并兼顾其他, 以达到要求, 正是自控原理及其后续课程要解决的核心问题。

第三节 自动控制系统应用示例

自动控制理论在工程领域发挥了前所未有的重要作用, 它不仅推动了诸如宇宙飞船系统、导弹制导系统和机器人系统等高科技成果的不断出新, 而且已成为现代机器制造业和工业生产过程中的重要组成部分。例如, 在制造工业的数字机床控制中, 在航空和航天工业的自动驾驶仪系统设计中, 在汽车的设计和制造中, 自动控制都是必不可少的。此外, 在压力、温度、湿度、流量等工业过程控制中, 自动控制也起了重要的作用。下面介绍一些简单自动控制系统的应用实例。

一、电气控制系统

【例 1-1】 采用转速负反馈的直流电动机调速系统, 如图 1-8 所示。

本例中, 受控对象为电动机; 控制装置为电位器、放大器; 测量装置为测速发电机及分压电位器。当改变给定电压 U_n^* 时, 经放大器放大后的电压 U_a 随之变化, 作为被控量的电

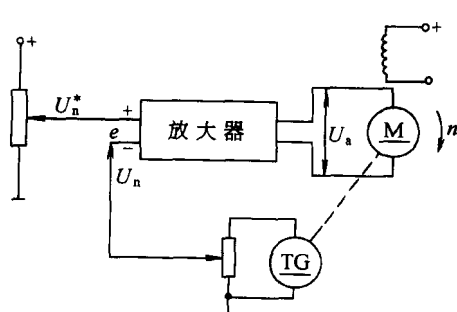


图 1-8 闭环控制的调速系统

动机转速 n 亦随之变化。同时, 电动机转速 n 经测量装置被转换成反馈电压 U_n , 并反馈至输入端, 形成闭环。加在放大器输入端的电压 e 为给定电压 U_n^* 和 U_n 的差值: $e = U_n^* - U_n$ 。因此, 对于电网电压波动、负载变化以及除测量装置之外的其他部分的参数变化所引起的转速变化, 可以通过自动调整加以抑制。例如: 若由于以上原因使得转速下降, 将通过以下调节过程使 n 基本维持恒定。即

$$n \downarrow \rightarrow U_n \downarrow \rightarrow e \uparrow \rightarrow U_a \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

二、机械控制系统

【例 1-2】 水温控制系统，如图 1-9 所示。

本例中，受控对象是水箱中的水。控制装置包括热敏元件、控制器和阀门。被控量为水温，给定值为要求达到的水温值，它可以是与该水温值对应的不同形式的物理量。水箱中流入冷水后，热蒸汽经阀门并流经热传导器件，通过热传导作用将冷水加热，加热后的水流出水箱。若由于某种原因，水箱中的水温低于给定值所要求的水温，则热敏元件将检测到的水温值转换成一定形式的物理量之后，馈送给控制器，控制器将给定值和检测值比较计算后，发出控制信号，将阀门开度增加，使更多的热蒸汽流入，直至实际水温与给定值相符为止。反之，当水温偏高时也可相应地调节。即实现了自动水温控制。

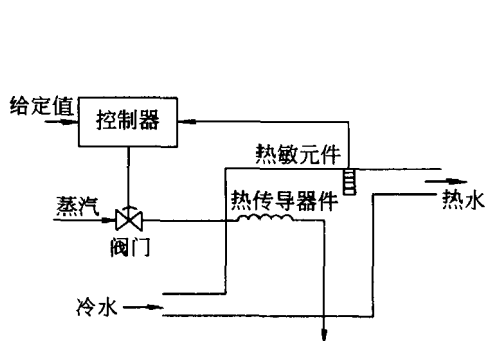


图 1-9 水温控制系统

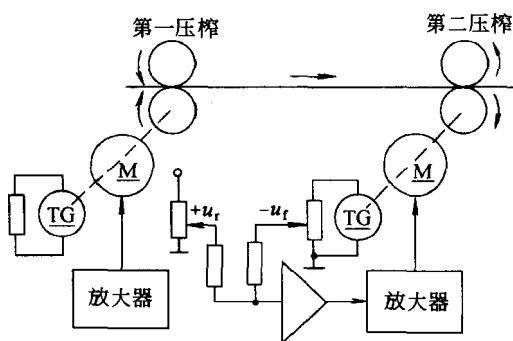


图 1-10 造纸机分部传动闭环系统

三、机电控制系统

【例 1-3】 造纸机分部传动系统，如图 1-10 所示。

本例中，受控对象为电动机，控制装置为电位器、放大器，测量装置为测速发电机，被控量为电动机转速，给定值为适宜的转速值，即电压 u_r 。

含有大量水分的纸张经第一压榨辊后，去掉了一部分含水量，而后再进入第二压榨辊，再榨去一部分水分。第一和第二压榨辊分别由各自的电动机 M 拖动，为避免拉断纸页或出现叠堆，显然两个拖动电动机的转速必须协调。工作中，压榨辊拖动电机 M 的转速由测速发电机 TG 检测出来，并转换为速度反馈电压 u_f 。参考输入电压 u_r 与反馈电压 u_f 都送到运算放大器的输入端并相比较（相减），得到偏差电压 $u_r - u_f$ ，经过放大器放大去控制拖动电动机的转速，即可使分部拖动电动机的转速受扰动的影响降低至可接受的水平。

四、微机控制系统

【例 1-4】 电阻炉微机温度控制系统，如图 1-11 所示。

用于工业生产中炉温控制的微机控制系统，具有精度高、功能强、显示醒目、读数直观、灵活性和适应性好等优点。用微机控制系统代替模拟控制系统是今后工业过程控制的发展方向。图 1-11 所示为某厂电阻炉微机温度控制系统原理示意图，电阻丝通过晶闸管主电路加热，炉温期望值用计算机键盘预先设置，炉温实际值由热电偶检测，并转换成电压 (mV)，经放大、滤波后，由 A/D 转换器将模拟量变换为数字量送入计算机，在计算机中与

所设置的温度期望值比较后产生偏差信号，计算机便根据预定的控制算法（即控制规律）计算出相应的控制量，再经 D/A 变换器转换成 $0 \sim 10\text{mA}$ 电流，通过触发器控制晶闸管导通角，从而改变电阻丝中电流大小，达到控制炉温的目的。

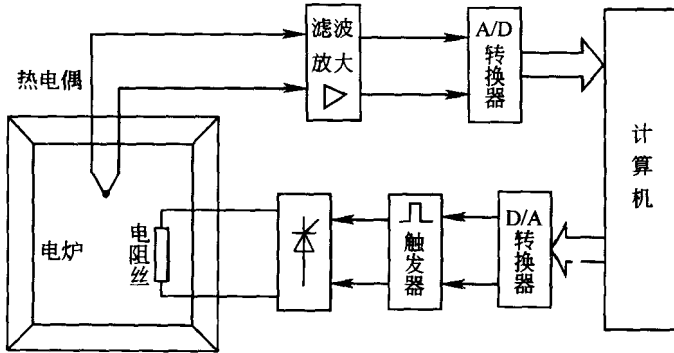


图 1-11 电阻炉微机控制系统

第四节 计算机辅助工具 MATLAB 软件简介

MATLAB 语言是由美国 New Mexico 大学的 Cleve Moler 于 1980 年开始开发的，1984 年由 Cleve Moler 等人创立的 Math Works 公司推出了第一个商业版本。MATLAB 具有许多显著的优点，如强大的矩阵运算能力、完美的图形可视化功能、各种动态系统的建模和仿真等。现在，MATLAB 已成为国际控制界应用最广的首选计算机工具，它不但广泛应用于控制领域，也应用于其他的工程和非工程领域。在控制界，很多知名学者都为其擅长的领域写出工具箱，其中很多工具箱已经成为该领域的标准。如 John Little 和 Alan Laub 开发的控制系统工具箱（Control Systems Toolbox），Ljung 开发的辨识工具箱（Identification Toolbox）等。

在本书中，将应用 MATLAB 语言及其控制系统工具箱作为辅助工具，帮助进行控制系统的分析和设计。由于 MATLAB 的很多功能是通过函数实现的，因此将介绍相关函数的使用。

下面的学习可以看到，本书介绍的经典控制理论是在计算机还未出现或未广泛应用的情况下出现的，很多内容在计算机上采用诸如 MATLAB 这样的软件来解决已变得十分简单。同时也应当指出，虽然有像 MATLAB 这样的强大软件可以直接使用，但这并不意味着可以放弃控制理论的学习，而一味依赖于强大的软件来解决所遇到的问题。因为这样既不能很好地理解软件本身，也不能解决工具箱没有提供解法的问题。有扎实的理论基础，可以更好地利用强大的工具，提高工作效率，解决新问题。现以 MATLAB5.3 为例介绍 MATLAB 的基础知识，这些基础知识是读者在求解工程问题时，有效地应用 MATLAB 所必需的。

一、MATLAB 的命令窗口

MATLAB 的命令窗口是用户使用 MATLAB 进行工作的窗口，同时也是实现 MATLAB 各种功能的窗口。用户可以直接在 MATLAB 命令窗口内输入命令，实现其相应功能。当双击 MATLAB 图标进入 MATLAB 时，将首先进入 MATLAB 的命令窗口。如图 1-12 所示。

MATLAB 命令窗口除了能够直接输入命令和文本，还包括菜单命令和工具栏。

MATLAB 的菜单命令由 File、Edit、View、Window、Help 5 组菜单命令组成。通过这

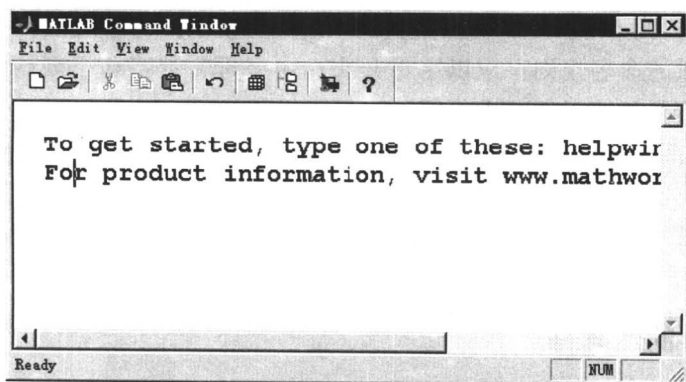


图 1-12 MATLAB 的命令窗口

些菜单命令，可以保存工作空间中的变量；打开 M 文件编辑/调试器；新建图形窗口和模型窗口等。

工具栏是 MATLAB 为用户提供的常用命令的快捷方式，不同按钮的功能可以从菜单命令中找到相应的选项。

二、MATLAB 中的命令和函数

MATLAB 命令和函数是分析和设计控制系统时经常采用的。MATLAB 具有许多预先定义的函数，供用户在求解许多不同类型的控制问题时调用。

在附录 A 中，列举了一些 MATLAB 的命令和函数供大家在使用时参考。

当遇到一些比较复杂的问题，应用单个 MATLAB 提供的命令和函数无法解决时，也可以自己编制 M 文件。建立一个新的 M 文件的方法是在 MATLAB 主菜单“File”下选择“New”→“M-file”，然后会出现 MATLAB 提供的编辑器：MATLAB Editor/Debugger，如图 1-13 所示。

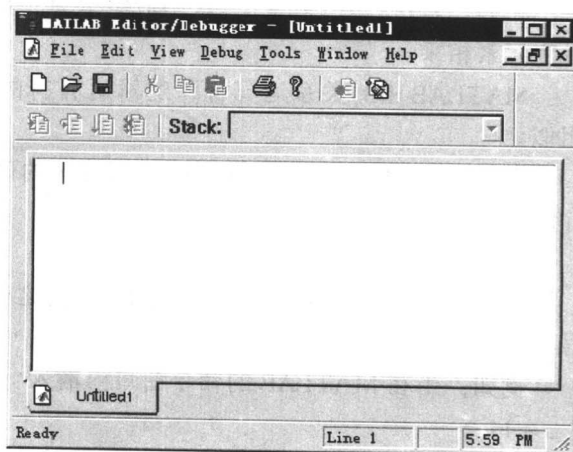


图 1-13 M 文件编辑器

在该编辑器中输入程序代码后，在 File 菜单下选择 Save 命令，出现保存文件对话框，指定文件名以保存输入的内容，这样就建立了一个新的 M 文件。

M 文件包括脚本文件和函数文件，脚本文件是一些 MATLAB 的命令和函数的组合，类似 DOS 下的批处理文件。函数文件是有输入输出参数的 M 文件。函数文件与脚本文件类似之处在于它们都是一个有“.m”扩展名的文本文件。

三、MATLAB 中的变量

MATLAB 不要求用户在输入变量的时候进行声明，也不需要指定其阶数。当用户在 MATLAB 工作空间内输入一个新的变量时，MATLAB 会自动给该变量分配适当的内存，若

输入的变量已经存在，则 MATLAB 将使用新输入的变量替换原有的变量。

MATLAB 中变量的命名规则：应以字母开头；由字母、数字和下划线组成；字符长度不大于 31 个；组成变量的字母区分大小写。

为了得到工作空间内的变量清单，可以通过键盘在命令窗口输入命令 whos，当前存在于工作空间内的所有变量便会显示在屏幕上。

命令 clear 能从工作空间中清除所有非永久性变量。如果只要从工作空间中清除某个特定变量，比如“x”，则应输入命令 clear x。

四、MATLAB 的运算符

MATLAB 的运算符包括算术运算符、关系运算符、逻辑运算符和操作符。由于 MATLAB 中的基本运算单元为矩阵，其算术运算符较复杂，如表 1-1 所示。

表 1-1 算术运算符

操 作 符	解 释	操 作 符	解 释
+	加	.	数组乘方
-	减	\	矩阵左除
*	矩阵乘	.\	数组左除
.*	数组乘	/	矩阵右除
^	矩阵乘方	./	数组右除

在此要特别注意矩阵运算和数组运算的区别。例如， $a = [12]$ ， $b = [34]$ ，若执行 $c = a * b$ ，MATLAB 将给出出错信息，因为 $a * b$ 是矩阵运算，而矩阵 a 的行数和矩阵 b 的列数并不相等。若执行 $c = a . * b$ ，这是数组运算，MATLAB 将给出结果 $c = [38]$ ，为 a 和 b 的对应元素相乘。

MATLAB 中的关系运算符和逻辑运算符的使用方法和其他计算机语言中的使用方法相似。

在 MATLAB 中，一些操作符具有特殊的使用方法，下面对几个较为重要的符号做一介绍。

1. 冒号“:”

冒号“:”是 MATLAB 最重要的运算符之一，也是 MATLAB 最常用的运算符之一。冒号主要用于输入行向量。

例如，当在 MATLAB 的命令窗口内输入

? a=1:5

此处符号“?”是 MATLAB 命令窗口的提示符（下同），符号“?”之后是用户输入的内容。输入回车后，显示如下

a=

1 2 3 4 5

当在 MATLAB 的命令窗口输入

? b=1:.2:2

输入回车后，显示如下

b=

1.0000 1.2000 1.4000 1.6000 1.8000 2.0000

其中,产生向量 a 时,其增量为 1;产生向量 b 时,其增量为 0.2。

2. 分号 “;”

分号 “;” 除了在矩阵中用来分隔行以外,如果出现在一条语句的末尾,则说明除了这条语句外,还有语句等待输入,这时, MATLAB 将不给出运行的中间结果,当所有语句输入完毕,回车后,将显示最终的运行结果。例如在 MATLAB 的命令窗口输入

```
? a = [1 2; 3 4]
```

```
a =
```

```
1    2
```

```
3    4
```

此时分号 “;” 起到分行的作用,同时 a 可以显示出来。

若在 MATLAB 的命令窗口输入

```
? a = [1 2; 3 4];
```

此时 a 将不显示出来,但 a 已存在于 MATLAB 的工作空间。

3. 方括号 “[]”

方括号 “[]” 可以用来输入矩阵,也可以用方括号删除矩阵的行或列。

4. 省略号 “.....”

在输入程序时,经常会遇到较长的命令行而在一行中无法完整输入该命令行。此时,可以在未完的语句末端输入六个点 “.....” 来表示将在下一行继续输入。例如,输入如下命令

```
? a = 1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16 + 1/32 + 1/64 + 1/128.....
```

```
+ 1/256 + 1/512;
```

可以注意到,在第一行的末端,添加了 “.....”,这样,用户可以在下一行接着输入程序语句。

5. 百分号 “%”

在编制 MATLAB 程序时,有时需要附有注解和说明,这些注解和说明阐明了发生在程序中的具体进程。在 MATLAB 中以 “%” 开始的程序行,表示注解和说明。这些注解和说明是不执行的。

五、绘制响应曲线

MATLAB 提供了非常方便的绘图功能和强大的图形处理功能。函数 `plot()` 可以产生线性 x - y 图形(用命令 `loglog`、`semilogx`、`semilogy` 或 `polar` 取代 `plot`,可以产生对数坐标图和极坐标图)。所有这些命令的应用方式都是相同的,它们只对如何对坐标轴进行分度和如何显示数据产生影响。

1. 二维 x - y 图形

```
plot(x, y)
```

这是最常用的形式。 x 为横坐标向量, y 为纵坐标向量。 x 和 y 必须方向相同,长度相等。

例如,输入命令

```
? t = 0: 0.1: 2 * pi; % 输入自变量 t (0~2 $\pi$ )
```

```
? y = sin(t); % 计算各 t 时刻的 y 值
```

```
? plot(t, y) % 绘图
```