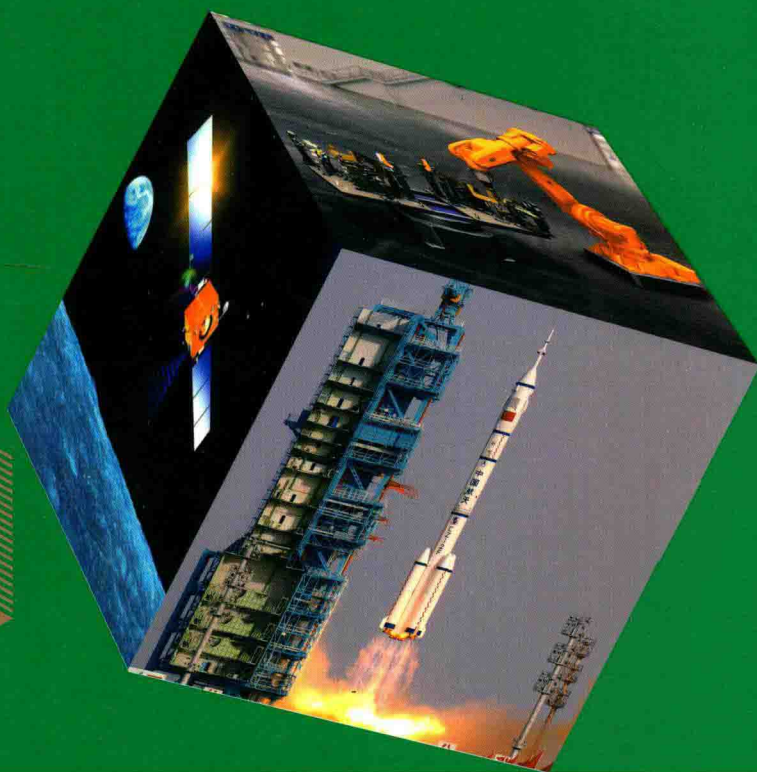


中国石油大学（华东）远程与继续教育系列教材

自动控制原理 简明教程

CONCISE TUTORIAL ON AUTOMATIC
CONTROL PRINCIPLE

刘宝 王君红 主编

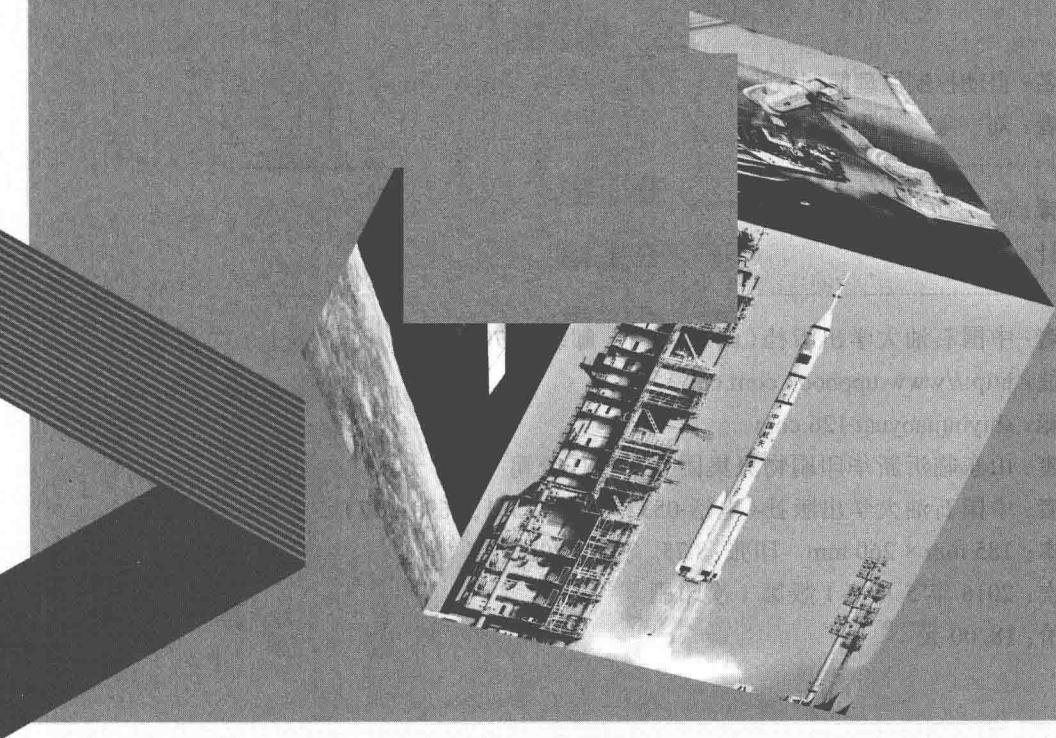


东) 远程与继续教育系列教材

自动控制原理 简明教程

CONCISE TUTORIAL ON AUTOMATIC
CONTROL PRINCIPLE

刘宝 王君红 主编



图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理简明教程 / 刘宝, 王君红主编. — 东营: 中国石油大学出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5636-5050-7

I. ①自… II. ①刘… ②王… III. ①自动控制理论—教材 IV. ① TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 009220 号

书 名: 自动控制原理简明教程

作 者: 刘 宝 王君红

责任编辑: 高 颖 岳为超(电话 0532—86983568)

封面设计: 悟本设计

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 山东临沂新华印刷物流集团有限责任公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531, 86983437)

开 本: 185 mm × 260 mm 印张: 8.75 字数: 205 千字

版 次: 2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 18.00 元

中国石油大学(华东)
远程与继续教育系列教材编审委员会

主任：王瑞和

副主任：王天虎 冯其红

委员：刘 华 林英松 刘欣梅 韩 彬

康忠健 黄善波 郑秋梅 孙燕芳

张 军 王新博 刘少伟

总序

Foreword

从1955年创办函授夜大学至今,中国石油大学成人教育已经走过了从初创、逐步成熟到跨越式发展的60年历程。多年来,我校成人教育紧密结合社会经济发展需求,积极开拓新的服务领域,为石油石化企业培养、培训了20多万名本专科毕业生和管理与技术人才,他们中的大多数已经成为各自工作岗位的骨干和中坚力量。我校成人教育始终坚持“规范管理、质量第一”的办学宗旨,坚持“为石油石化企业和经济建设服务”的办学方向,赢得了良好的社会信誉。

自2001年1月教育部批准我校开展现代远程教育试点工作以来,我校以“创新教育观念”为先导,以“构建终身教育体系”为目标,整合函授夜大学教育、网络教育、继续教育资源,建立了新型的教学模式和管理模式,构建了基于卫星数字宽带和计算机宽带网络的现代远程教育教学体系和个性化的学习支持服务体系,有效地将学校优质教育资源辐射到全国各地,全力打造出中国石油大学现代远程教育的品牌。目前,办学领域已由创办初期的函授夜大学教育发展为今天的集函授夜大学教育、网络教育、继续教育、远程培训、国际合作教育于一体的,在国内具有领先水平、在国外具有一定影响的现代远程开放教育系统,成为学校高等教育体系的重要组成部分和石油石化行业最大的成人教育基地。

为适应现代远程教育发展的需要,学校于2001年9月正式启动了网络课程研制开发和推广应用项目,斥巨资实施“名师名课”教学资源精品战略工程,选拔优秀教师开发网络教学课件。随着流媒体课件、WEB课件到网络课程的不断充实与完善,建构了内容丰富、形式多样的网络教学资源超市,基于网络的教学环境初步形成,远程教育的能力有了显著提高,这些网上教学资源的建设与研发为我校远程教育的顺利发展起到了支撑和保障作用。相应

地,作为教学资源建设的一个重要组成部分,与网络教学课件相配套的纸质教材建设就成为一项愈来愈重要的任务。根据学校远程与继续教育发展规划,在“十三五”期间,学校将重点加强教学资源建设工作,选聘石油石化行业和有关石油高校专家、学者参与系列教材的开发和编著工作,计划用5年的时间,组织出版所开设专业的远程与继续教育系列教材。系列教材将充分吸收科学技术发展和成人教育教学改革最新成果,体现现代教育思想和远程教育教学特点,具有先进性、科学性和远程教育教学的适用性,形成纸质教材、多媒体课件、网上教学资料互为补充的立体化课程学习包。

为了保证远程与继续教育系列教材编写出版进度和质量,学校专门成立了远程与继续教育系列教材编审委员会,对系列教材进行严格的审核把关,中国石油大学出版社也对系列教材的编辑出版给予了大力支持和积极配合。远程与继续教育系列教材的建设经过探索阶段,逐步形成了稳定的开发模式,并形成了教材与数字化教学资源一体化设计、内容上以应用为轴心和以能力为本位、形式上适应成人学生自主学习需要的鲜明特色。我们相信,在广大专家、学者们的共同努力下,一定能够创造出体现现代远程教育教学和学习特点的,体系新、水平高的远程与继续教育系列教材。

编委会
2015年7月

前 言

Preface

随着计算机和信息技术的迅速发展,自动控制理论和技术不但在石油化工、智能交通、航空航天、机器人控制、核工业等高新技术领域应用越来越广泛,而且已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多社会生活领域,成为现代社会生活中重要且不可缺少的一部分,相信在人类探知未来、认识和改造自然、建设高度文明社会的活动中,自动控制理论和技术必将发挥越来越重要的作用。因此,了解和掌握自动控制的有关知识是十分必要的。

本书从自动控制原理基本概念、线性模型建立、时域分析、根轨迹分析、频率特性和系统校正等方面,结合实际生活和工业控制实例,利用较为浅显的语言对自动控制原理的基本概念和控制系统的的基本分析方法进行介绍;本书主要面向高等院校或高职非自动化专业学生和工程技术人员,通过加强自动控制原理的反馈控制原理的学习和应用,提高他们分析和解决实际控制问题的能力。

作 者

2015 年 12 月

目 录

Contents

第 1 章 绪 论	1
1.1 自动控制系统的基本概念	1
1.2 开环控制系统与闭环控制系统组成及原理	1
1.3 自动控制系统的分类	4
1.4 自动控制系统的基本要求及典型输入信号	5
本章小结	6
习 题	7
第 2 章 自动控制系统的数学模型	8
2.1 系统动态微分方程模型	8
2.2 系统传递函数	13
2.3 系统结构图及其等效变换	17
2.4 信号流图与梅逊公式	25
2.5 应用 MATLAB 处理系统数学模型	27
本章小结	29
习 题	29
第 3 章 时域分析法	33
3.1 时域性能指标	33
3.2 一阶系统的时域分析	34
3.3 二阶系统的时域分析	36
3.4 高阶系统的时域分析	42
3.5 系统的稳定性分析	43
3.6 系统的稳态误差计算	48
3.7 应用 MATLAB 进行时域分析	53
本章小结	55
习 题	55

第 4 章 根轨迹法	58
4.1 根轨迹的基本概念	58
4.2 绘制根轨迹的规则和方法	60
4.3 控制系统根轨迹的性能分析	65
4.4 应用 MATLAB 绘制根轨迹	70
本章小结	70
习 题	70
第 5 章 频域分析法	72
5.1 频率特性	72
5.2 频率特性的极坐标图	75
5.3 系统的开环频率特性曲线	82
5.4 奈奎斯特稳定性判据	89
5.5 系统的稳定裕量	101
5.6 应用 MATLAB 进行频域分析	104
本章小结	106
习 题	106
第 6 章 控制系统的综合与校正	108
6.1 系统的设计与校正问题	108
6.2 基于频域分析法的串联校正设计	109
6.3 应用 MATLAB 进行校正设计	120
本章小结	123
习 题	124
附录 拉普拉斯变换及反变换	126
参考文献	129

第1章 绪论

自动控制原理是自动控制技术的理论基础,是一门理论性较强的工程科学。自动控制理论一般可分为经典控制理论和现代控制理论两部分。本书内容以经典控制理论为主,其内容主要以传递函数为基础,研究单输入单输出自动控制系统的分析和设计问题,是研究自动控制系统的重要理论基础。

1.1 自动控制系统的基本概念

自动控制是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(控制器)使机器、设备或生产过程(被控对象)的某个工作状态或参数(被控变量)自动地按照预定规律运行。例如,自动驾驶汽车按照预定的行驶路线自动拐弯和行驶,其自动控制理论中常用的名词术语如下。

参考输入:自动驾驶汽车按照预先给定的行驶路线参数(方向等)行驶,则预先给定的行驶路线参数称为参考输入或给定输入。

扰动:汽车在行驶过程中受到路面状况的影响而偏离预定的路线,路面状况使汽车行驶参数改变称为扰动。

控制器:当汽车的测量比较装置测出实际行驶参数与预定行驶参数存在偏差时,需对汽车的某些设备装置进行控制调节,起控制作用的设备装置称为控制器。

控制量:控制器发出的控制输出信号称为控制量。

被控对象:汽车称为被控对象。

被控变量:汽车实际行驶参数称为被控变量。

自动控制系统:由控制装置与被控对象结合起来的,能够对被控对象的一些物理量进行自动控制的一个有机整体称为自动控制系统。

1.2 开环控制系统与闭环控制系统组成及原理

自动控制系统有两种最基本的形式,即开环控制和闭环控制。

1.2.1 开环控制系统

开环控制是一种最简单的控制方式,其特点是在控制器与被控对象之间只有正向控制作用而没有反馈控制作用,即系统的输出量对控制量没有影响。开环控制系统的方框图如图1-1所示。从图中可以看出,开环控制系统中控制信号的流动未形成闭合回路。常见的开环控制系统有以下两种。

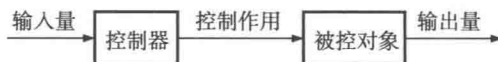


图 1-1 开环控制系统方框图

1) 按给定值操作的开环控制系统

例如,某加热炉温度控制系统,其炉温通常由阀门调节向炉内加入的燃油量来控制,即燃油流量是控制量;而被加热物料的数量和环境温度能够影响炉温,称之为干扰量。所谓对炉温的控制,就是用某种方式调节燃油流量以抵消干扰因素对炉温的影响。如果事先计算出炉温所需的燃油流量,那么调节阀门向加热炉内提供该燃油流量即可。这种按给定值操作的开环控制系统如图 1-2 所示。



图 1-2 按给定值操作的开环控制系统方框图

优点:系统的结构参数稳定。当干扰极弱或控制精度要求不高时,可采用这种开环控制方式。

缺点:当被控对象受到某种干扰而使被控参数偏离预期值时,无法实现自动补偿,从而影响系统的控制精度。

2) 按干扰补偿的前馈控制系统

对于前面的加热炉温度控制系统,要想稳定控制炉温,必须在干扰信号出现时调节燃油流量使之对炉温的影响与干扰量对炉温的影响互相抵消以保持被控变量不变,其原理方框图如图 1-3 所示。在该系统中,只能对可测干扰进行补偿。对于不可测干扰,该系统自身无法控制。

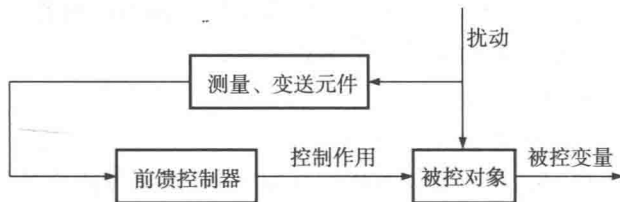


图 1-3 按干扰补偿的前馈控制系统方框图

1.2.2 闭环控制系统

闭环控制系统在控制器与被控对象之间存在着正向作用和反馈作用,其中反馈作用即系统的输出量对控制量有直接影响。闭环控制系统方框图如图 1-4 所示。在加热炉温度控制系统中,当干扰量影响炉温使其偏离设定温度时,通过检测装置测出实际炉温,送到比较器与设定温度进行比较,得出偏差信号来控制阀门开度,由此增加或减小燃油流量,从而使炉温恢复到设定温度。

图 1-4 中,“○”为比较元件(又称比较器)。参考输入信号(给定值信号)与反馈信号通过比较元件进行比较产生偏差信号,作为控制器的输入。系统中控制信号和反馈信号等形

成了闭合回路,称为闭环控制系统。

反馈:将检测出来的输出量送回到系统的输入端,并与输入量比较的过程。

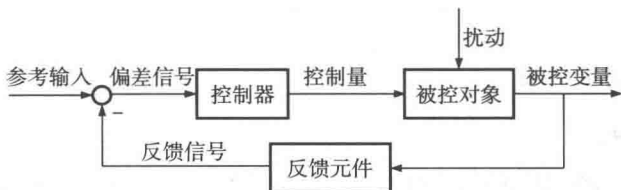


图 1-4 闭环控制系统方框图

负反馈:反馈信号与输入信号相减。

正反馈:反馈信号与输入信号相加。

偏差信号:输入信号与反馈信号之差。

反馈控制:偏差信号作用于控制器上,使系统的输出量趋向于给定的数值。闭环控制利用负反馈的作用来减小系统的误差,因此闭环控制又称为反馈控制。

在工业生产中,按照偏差控制的闭环系统种类繁多,但是从产生偏差到利用偏差信号对被控对象进行控制以减小或纠正输出量的偏差的控制过程却是相同的。这种系统具有如下特点:

(1) 闭环控制系统中必须有从输入端到输出端正向信号传递通道和从输出端到输入端的反向信号传递通道。

(2) 闭环控制系统必须有检测环节、给定环节和比较环节,以产生偏差。

(3) 闭环控制系统必须具有执行纠正偏差这一任务的执行机构。

反馈控制系统将偏差信号作为控制信号,自动纠正输出量与其期望值之间的误差,可以构成精确的控制系统。

例如,在水位控制系统中,被控变量是水池的水位高度 h , 出水量 Q_2 为干扰量,如图 1-5 所示,水位高度由浮子测出,通过杠杆控制调节阀位置,水位越高,进水量 Q_1 越小,从而使水位下降回到期望高度。

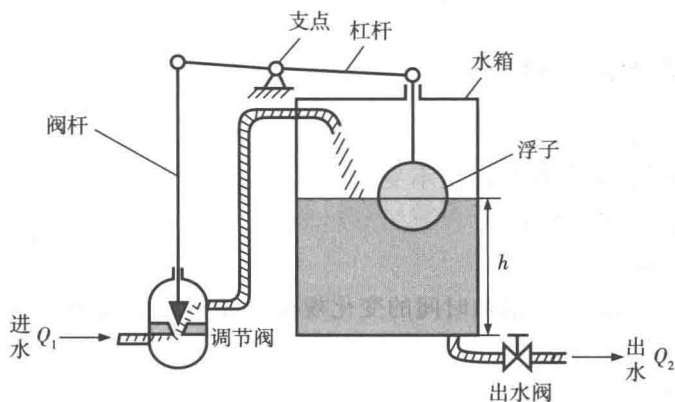


图 1-5 水位控制系统图

1.3 自动控制系统的分类

1.3.1 按控制方式分类

1) 开环控制系统

如果一个控制系统在其控制器的输入信号中不包含来自被控对象输出端的被控变量的反馈信号,则为开环控制系统。开环控制系统易受各种干扰的影响,其控制精度较低,但结构简单,成本低,也容易实现。

2) 闭环控制系统

如果一个控制系统在其控制器的输入信号中包含来自被控对象输出端被控变量的反馈信号,则为闭环控制系统。闭环控制系统有更高的控制精度,因为在闭环控制系统中,当被控对象受到各种扰动影响时,可以通过被控变量变化后的反馈作用使控制器动作,进行控制和调节,使被控变量恢复到给定值。

闭环控制系统也包括前馈-反馈复合控制系统。前馈控制系统直接根据扰动信号进行调节,是一种开环控制系统。一般在反馈控制系统中加入前馈控制作用构成前馈-反馈复合控制系统,达到兼取两者优点的目的。图 1-6 是前馈-反馈复合控制系统的方框图。

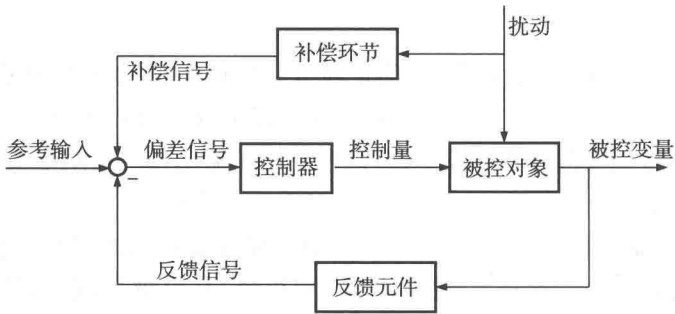


图 1-6 前馈-反馈复合控制系统方框图

1.3.2 按设定值信号分类

1) 恒值控制系统

恒值控制系统的设定值保持恒定不变或在很长一段时间内保持恒定不变,如恒温、恒压、恒液位等属于恒值控制系统。

2) 随动控制系统

随动控制系统是指其设定值随时间的变化规律事先不能确定的控制系统,如工业位置控制系统等属于随动控制系统。

3) 程序控制系统

在程序控制系统中,其给定值按事先预定的规律变化,如数控机床、自动阶梯温度控制系统等属于程序控制系统。

1.3.3 按控制系统特性分类

1) 线性控制系统

当控制系统各元件的输入/输出特性可以用线性微分方程(或线性差分方程)来描述时,称这种控制系统为线性控制系统。线性控制系统的特点是可以应用叠加原理。

2) 非线性控制系统

当控制系统中有一个或一个以上的非线性元件时,系统的特性就要用非线性方程来描述。由非线性方程描述的控制系统称为非线性控制系统。非线性控制系统不能应用叠加原理。

1.3.4 按控制系统信号分类

1) 连续控制系统

连续控制系统的传递信号都是时间的连续函数,又称模拟量控制系统。

2) 离散控制系统

控制系统在某处或几处传递的信号是脉冲系列或数字形式的,在时间上是离散的,称为离散控制系统。

自动控制系统的分类方法还有很多,如新型控制系统可分为最优控制系统、自适应控制系统、预测控制系统、模糊控制系统、神经网络控制系统等。

1.4 自动控制系统的基本要求及典型输入信号

1.4.1 基本要求

1) 稳定性(稳)

一个自动控制系统的最基本要求是系统必须是稳定的,不稳定的控制系统是不能工作的。可以通过劳斯稳定判据、赫尔维茨稳定判据、奈奎斯特稳定判据等判断系统是否稳定。

2) 快速性(快)

在系统稳定的前提下,希望控制过程(过渡过程)进行得越快越好。但是如果要求过渡过程时间很短,则可能使动态误差(偏差)过大。因此,应该兼顾这两方面的要求。

3) 准确性(准)

准确性要求动态误差(偏差)和稳态误差(偏差)都越小越好。当与快速性有矛盾时,应兼顾两方面的要求。

1.4.2 典型输入信号

自动控制系统常用的典型输入信号有下面几种形式。

1) 阶跃函数

阶跃函数定义为:

$$u(t) = \begin{cases} U & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (1-1)$$

式中, U 是常数, 称为阶跃函数的阶跃值; t 是时间。 $U=1$ 的阶跃函数称为单位阶跃函数, 记为 $1(t)$ 。

2) 斜坡函数

斜坡函数定义为:

$$u(t) = \begin{cases} Ut & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (1-2)$$

这种函数相当于在随动控制系统中加入一个按恒速变化的位置信号, 其恒速度为 U 。当 $U=1$ 时, 称为单位斜坡函数。

3) 抛物线函数

抛物线函数定义为:

$$u(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}Ut^2 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (1-3)$$

这种函数相当于在系统中加入一个按加速度变化的位置信号, 其加速度为 U 。当 $U=1$ 时, 称为单位抛物线函数。

4) 单位脉冲函数

单位脉冲函数 $\delta(t)$ 定义为:

$$\delta(t) = u(t) = \begin{cases} \infty & (t=0) \\ 0 & (t \neq 0) \end{cases} \quad (1-4)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1-5)$$

单位脉冲函数的积分面积是 1。

5) 正弦函数

正弦函数定义为:

$$u(t) = A \sin \omega t \quad (1-6)$$

式中, A 为振幅, ω 为角频率。

用正弦函数作输入信号, 可以求得系统对不同频率的正弦输入函数的稳态响应, 由此可以间接判断系统的性能。

本章小结

本章介绍了自动控制及自动控制理论中经常用到的术语; 说明了开环控制系统和闭环控制系统; 介绍了自动控制系统的各种分类方法; 介绍了对自动控制系统的性能要求, 即稳定性、快速性和准确性。

习 题

- 1-1 试举出几个日常生活中开环控制系统和闭环控制系统的实例,并说明它们的工作原理。
- 1-2 开环控制系统和闭环控制系统各有什么优缺点?
- 1-3 什么是反馈控制系统、前馈控制系统、前馈-反馈复合控制系统?
- 1-4 对自动控制系统基本的性能要求是什么?最主要的要求是什么?

第2章 自动控制系统的数学模型

自动控制系统的数学模型是系统内部物理量(或变量)之间关系的数学表达式。数学模型是分析和设计自动控制系统的基础。

2.1 系统动态微分方程模型

2.1.1 系统微分方程数学模型的建立

建立系统微分方程数学模型的一般步骤如下:

- (1) 确定系统的输入、输出量。
- (2) 根据遵循的物理或化学定律,定义必要的中间变量,列写微分方程组。
- (3) 消去中间变量,得到输入与输出量之间的微分方程。
- (4) 整理成标准形式微分方程。
 - ① 输出量在方程的左端,输入量在方程的右端。
 - ② 方程两端变量的导数项均按降幂次序排列。

【例 2-1】 列写图 2-1 所示 RLC 网络的微分方程。

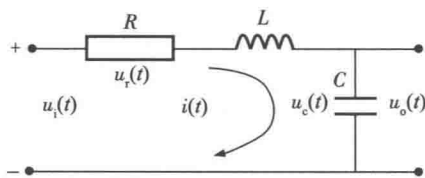


图 2-1 RLC 网络

解 (1) 确定输入、输出量。

网络的输入量为电压 $u_i(t)$, 输出量为电压 $u_o(t)$ 。

(2) 列出原始微分方程组。

根据电路理论得:

$$u_i(t) = L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt + Ri(t) \quad (2-1)$$

$$u_o(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (2-2)$$

式中, $i(t)$ 为网络电流, 是除输入、输出量之外的中间变量。

(3) 消去中间变量。

将式(2-2)两边分别求导得: