

21世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

自动控制原理学习辅导

杨平 翁思义 王志萍 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

TP13
175



21世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

自动控制原理学习辅导

编著 杨平 翁思义 王志萍
主审 蒋式勤

北方工业大学图书馆



00594824



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

RBR73/08

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书以知识性、实用性为宗旨,根据作者多年来教学经验和教学体会,针对自动控制原理每一部分的内容都进行复习概念、练习做题和测试能力三个环节,能为学习自动控制原理课程的学生提供最直接的帮助,让他们在做题的过程中有必要的信息可查、有足够的例题可读、有丰富的练习题可做,并且有精选的大学本科课程测试题和研究生入学试题可练。

本书第一篇提供给读者自动控制原理的精华概要,这是在做题之前一定要先熟读掌握的;第二篇先给出典型例题及其详解,再提供足够多的针对性练习题目;第三篇提供了大学课程考试的模拟试题,并精选了近几年来有代表性的若干高校的研究生入学试题;本书的第四篇“用 MATLAB 解自控原理习题”,专门介绍一些有效的技术和方法,给出了典型的解题程序和应用示例。

本书可作为普通高等学校自动化类各专业的教学辅导用书,也可供自学自动控制原理的科技人员及工程技术人员学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理学习辅导/杨平,翁思义,王志萍编著.
北京:中国电力出版社,2005
21 世纪高等学校规划教材
ISBN 7-5083-1690-8

I. 自... II. ①杨... ②翁... ③王... III. 自动控制理论-高等学校-教学参考资料 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 087828 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 8 月第一版 2005 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.125 印张 534 千字
印数 0001—3000 册 定价 35.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

自动控制原理课程是大学本科电气信息类专业中普遍开设的必修课,也是硕士研究生的入学考试课程。学好和教好这门课是广大本科生、考硕士研究生的考生和课程主讲教师的共同愿望。要学好这门课的关键有几点,例如,深入对基本概念的理解、重视课堂教学中教师的言传身教等等,其中重要的一环是学习者自己在课外主动地做题。因为听课听懂了不算真懂,做题做通了,才能心领神会。亲自做题的过程是新概念认识逐步深化的过程,是建立基本概念的积累过程,是不可缺少的环节。通过做题可以加深对自动控制原理的理解;通过做题可以掌握控制系统性能的分析方法;通过做题可以掌握设计和分析控制系统的专门技能;通过做题可以检验自己学习自动控制原理课程的效果和了解自己掌握控制理论的程度和应用控制理论的能力大小,从而使学习更上一层楼。成功地练就做题功夫的诀窍可归为三点:首先将基本概念和基本理论提炼成便于熟记的要点;其次是认真地研读例题的详解,并揣摩其解题方法和技巧;最后是独立地做练习题或测试题。对每一部分理论都应循环往复地进行复习概念、练习做题和测试能力三个动作,直到确认已有信心解决此类问题为止。为此,需要一本好的学习辅导参考书,能为学好自动控制原理课程的学生提供最直接的帮助,让他们在练就做题功夫的过程中有必要的信息可查、足够的例题可读、丰富的练习题可做以及精选的大学课程测试题和研究生入学试题可用。

就课程复习而言,最重要的莫过于记牢基本概念和基本原理。为此,本书第一篇的编写就是提供给读者自动控制原理的精华概要。这是在做题之前一定要先熟读掌握的。若阅读时仍存疑惑,则需要再复习教科书和请教老师。

就做题而言,最重要的莫过于先读懂典型例题的解法,然后自己有针对性地去完成一定量的练习题。本书第二篇就是根据这一需求设计的。先给出典型题及其详解,再提供足够多的针对性练习题目。

就测试能力而言,考试无疑是测试能力的最直接的手段。考前自测需要有多套试题可选,本书第三篇提供了三类共9套大学课程考试的模拟试题和精选多家高校近年的研究生入学试题(共计31套)。大学课程考试模拟试题按高级、中级和初级水平编排,分别针对较多学时、中等量学时和较少学时开设课程的考试需要。所选的研究生试题主要是近几年来有代表性的若干高校的硕士研究生入学试卷。其中有一流名校的,也有普通高校的,还有研究所的。

在当今的信息技术时代,控制原理课程的学习模式也有了许多变化。高性能的计算机和功能强大的CAD软件工具使我们轻而易举地做成以前费时费力都做不好的事情。比如说,我们要花十几分钟才能手工绘制的一张奈氏曲线图,用MATLAB来画也就是一眨眼的功夫。我们已没有必要仅依赖于纸、笔和计算器,完全可充分利用现代信息处理技术和CAD工具把控制原理题做得更快、更好、更有成效。为此,就有了本书的第四篇“用MATLAB解

自控原理习题”。专门介绍一些有效的技术和方法，给出了典型的解题程序和应用示例。当然，再多的计算机代劳做题也无法培养出人的分析解题和人工推算能力，所以应当把计算机解题作为一种辅助方法来使用。让计算机代劳但不代心。借计算机的力练自己的能。

为了学生做题后自我检查对错的需要，在第二篇的最后一章给出了单数的练习题的参考答案；在第三篇的后两章分别给出了大学课程考试模拟题 A 卷的参考答案和部分研究生入学试卷题的参考答案。之所以没有给出练习题和大学试题卷的全部答案，一是为了给教师布置课后作业和进行课内测验留出余地，二是为了学生养成良好的做题习惯。

本书的第一篇、第二篇和第四篇的每章编排与 2001 年出版的《自动控制原理》（翁思义、杨平编著，中国电力出版社）教科书一一对应。该书已于 2004 年获的上海市高校优秀教材奖。该书的特点是面向普通高校，将经典控制理论和现代控制理论的状态空间法部分合为一体，章节编排沿历史发展主线，即先时域后频域、先连续后离散，理论介绍简明扼要而略去繁难证明。尽管该书每章后编有若干习题，但是重在练习局部方法和理论，范围不够宽，难度不够大。所以还需要本书这样的配套辅助教材。

本书的编写历时近 3 年，2003 年先在校内试用。这次进行了很大的修改和添加，本书的第一篇至第三篇由翁思义编写，第四篇由王志萍编写，全书编写规划及统稿由杨平负责。此外，参与本书编写工作的还有彭道刚、张春梅、曾婧婧、张世玺、于会群、胡隼、张玲芳、余洁、孙宇贞，借此机会向他们表示感谢。本书编著工作还得到上海电力学院精品课程建设基金的支持。

本书全稿已请同济大学蒋式勤教授仔细地审阅。蒋式勤教授审阅后提出的许多具体的修改意见中的绝大部分已被采纳。在此特别感谢蒋教授为保证和提高本书质量所做的贡献。

限于编者水平，书中错误和不妥之处难免，请读者批评指正，联系邮箱：yangping 0978@126.com。

编者

2005 年 6 月

目 录

前言

第一篇 基本原理和基本概念提要

第一章 绪论	1
第二章 自动控制系统的数学描述	3
第三章 控制系统的时域分析	6
第四章 根轨迹法	10
第五章 控制系统的频域分析	13
第六章 控制系统的设计与校正	16
第七章 离散控制系统	19
第八章 控制系统的状态空间分析	22
第九章 非线性控制系统	28

第二篇 例题详解与习题精选

第一章 控制系统的基本概念	32
第一节 例题	32
第二节 习题	36
第二章 自动控制系统的数学描述	38
第一节 例题	38
第二节 习题	48
第三章 控制系统的时域分析	52
第一节 例题	52
第二节 习题	63
第四章 根轨迹法	69
第一节 例题	69

第二节 习题	83
第五章 控制系统的频域分析	86
第一节 例题	86
第二节 习题	100
第六章 控制系统的设计与校正	105
第一节 例题	105
第二节 习题	116
第七章 离散控制系统	118
第一节 例题	118
第二节 习题	125
第八章 控制系统的状态空间分析	129
第一节 例题	129
第二节 习题	146
第九章 非线性控制系统	151
第一节 例题	151
第二节 习题	164
第十章 第二篇习题参考答案 (单数题目)	168
第一节 第一章习题参考答案	168
第二节 第二章习题参考答案	168
第三节 第三章习题参考答案	170
第四节 第四章习题参考答案	171
第五节 第五章习题参考答案	175
第六节 第六章习题参考答案	176
第七节 第七章习题参考答案	177
第八节 第八章习题参考答案	178
第九节 第九章习题参考答案	180
第三篇 大学考试与研究生入学考试试题汇编	
第一章 大学考试模拟试题	182
第一节 高级水平大学考试模拟试题	182

第二节	中级水平大学考试模拟试题	185
第三节	初级水平大学考试模拟试题	188
第二章	硕士研究生入学试题	192
第一节	清华大学研究生入学试题 (1997, 1998, 1999)	192
第二节	浙江大学研究生入学试题 (2000, 2001)	196
第三节	西安交通大学研究生入学试题 (1999, 2000, 2001)	198
第四节	华中理工大学研究生入学试题 (1999)	203
第五节	同济大学研究生入学试题 (2000, 2002)	204
第六节	西北工业大学研究生入学试题 (2001)	207
第七节	上海理工大学研究生入学试题 (2003, 2005)	209
第八节	上海交通大学研究生入学试题 (2000, 2001, 2002)	212
第九节	哈尔滨工业大学研究生入学试题 (2000, 2001, 2002)	217
第十节	北京理工大学研究生入学试题 (2000, 2001)	224
第十一节	北京航空航天大学研究生入学试题 (2001, 2002)	226
第十二节	华北电力大学研究生入学试题 (2001, 2002, 2003)	229
第十三节	中国科学院自动化研究所研究生入学试题 (2000, 2001)	234
第十四节	西安电子科技大学研究生入学试题 (2001, 2002)	236
第三章	大学考试模拟试题 A 卷参考答案	240
第一节	高级水平大学试题 A 卷参考答案	240
第二节	中级水平大学试题 A 卷参考答案	240
第三节	初级水平大学试题 A 卷参考答案	241
第四章	硕士研究生入学试题部分参考答案	242
第一节	清华大学研究生入学试题参考答案 (1997, 1998, 1999)	242
第二节	浙江大学研究生入学试题参考答案 (2000, 2001)	251
第三节	西安交通大学研究生入学试题参考答案 (1999, 2000, 2001)	252
第四节	华中理工大学研究生入学试题参考答案 (1999)	260
第五节	同济大学研究生入学试题参考答案 (2000)	263
第六节	西北工业大学研究生入学试题参考答案 (2001)	264
第七节	上海理工大学研究生入学试题参考答案 (2005)	265
第八节	上海交通大学研究生入学试题参考答案 (2000)	268
第九节	哈尔滨工业大学研究生入学试题参考答案 (2001, 2002)	272
第十节	北京理工大学研究生入学试题参考答案 (2000)	277
第十一节	北京航空航天大学研究生入学试题参考答案 (2002)	278
第十二节	华北电力大学研究生入学试题参考答案 (2001, 2002, 2003)	281

第十三节 中国科学院自动化研究所研究生入学试题参考答案(2000, 2001)	283
---	-----

第四篇 用 MATLAB 解自控原理习题

第一章 自动控制系统的数学描述	288
第一节 建立系统的数学模型	288
第二节 带未知参数的系统传递函数的求取	289
第三节 根据系统输入输出的时间函数求传递函数	289
第四节 数学模型之间的变换	289
第五节 解题示例	289
第二章 控制系统的时域分析	294
第一节 求控制系统的时域响应	294
第二节 求系统时域性能指标	295
第三节 根据系统性能指标推算系统的参数	295
第四节 解题示例	295
第三章 根轨迹法	311
第一节 利用 Matlab 绘制根轨迹	311
第二节 利用根轨迹图获取相关信息	312
第三节 Matlab 解题实例	313
第四章 控制系统的频域响应	320
第一节 频域响应的计算	320
第二节 频率响应的绘图	321
第三节 解题示例	322
第五章 控制系统的校正和设计	330
第一节 超前校正装置的设计	330
第二节 滞后校正装置的设计	331
第三节 系统性能检验	332
第四节 解题示例	333
第六章 离散控制系统	338
第一节 离散控制系统的描述	338
第二节 离散控制系统的响应	340
第三节 离散控制系统的性能分析	340

第四节 解题示例	341
第七章 控制系统的状态空间分析	348
第一节 状态空间模型的表示	348
第二节 状态方程的求解	350
第三节 线性定常连续系统的能控能观性	351
第四节 线性定常系统的状态反馈和状态观测器	351
第五节 解题示例	351
第八章 非线性控制系统	357
第一节 描述函数法分析非线性系统	357
第二节 解题示例	357
参考文献	359

第一篇 基本原理和基本概念提要

第一章 绪 论

一、自动控制和自动控制系统基本概念

(1) 自动控制：在没有人直接参与的情况下，利用控制设备或装置，使被控对象的被控量自动地按预定的及希望的规律变化。

(2) 自动控制系统：能自动地对被控对象的被控量（或工作状态）进行控制的系统。

(3) 被控对象（又称受控对象）：指工作状态需要加以控制的机械、装置或过程。

(4) 被控量：表征被控对象工作状态且需要加以控制的物理量，也是自动控制系统的输出量。

(5) 给定值（又称为参考输入）：希望被控量趋近的数值，又称为设定值。

(6) 扰动量（可分为内扰和外扰）：引起被控量发生不期望变化的各种内部或外部的变量。

(7) 控制器（又称调节器）：组成控制系统的两大要素之一（另一大要素即为被控对象），是起控制作用的设备或装置。

(8) 负反馈控制原理：将系统的输出信号反馈至输入端，与给定的输入信号进行比较（相减），所产生的偏差信号通过控制器变换成控制量去调节被控对象，达到减小或消除被控量偏差的目的。

二、自动控制系统的组成和方框图

典型的自动控制系统的基本组成可用图 1.1.1 的方框图来表示，其中的基本环节有：

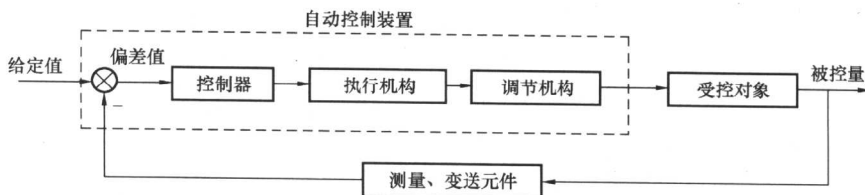


图 1.1.1 典型自动控制系统基本组成的方框图

(1) 受控对象：需要控制的装置、设备及过程。

(2) 测量变送元件：测量被控量的变化，并使之变换成控制器可处理的信号。

(3) 执行机构：将控制器发来的控制信号变换成操作调节机构的动作。

(4) 调节机构：可改变受控对象的被控量，使之趋向给定值。

(5) 控制器：按照预定控制规律将偏差值转换成控制量。

三、自动控制系统的基本控制方式

自动控制系统的基本控制方式有开环控制、闭环控制和复合控制三种。

开环控制适用于控制任务要求不高的场合。工程上绝大部分的自动控制系统为闭环控制。对控制任务要求较高，且扰动量可测量的场合，常采用复合控制系统（又称前馈——反馈复合控制系统）。

四、自动控制系统的分类

(1) 按给定输入的形式分类：恒值控制系统、随动控制系统、程序控制系统。

(2) 按元件的静态特性分类：线性控制系统、非线性控制系统。

(3) 按信号是连续的还是离散的分类：连续（时间）控制系统、离散（时间）控制系统。

(4) 其他分类：多变量控制系统、计算机控制系统、最优控制系统、自适应控制系统、模糊控制系统、神经网络控制系统等。

五、对控制系统的性能要求

对控制系统的性能要求主要有稳定性、快速性、准确性和鲁棒性等。

六、控制系统的典型输入信号

控制系统的典型输入信号有阶跃信号、斜坡信号、抛物线信号、脉冲信号、正弦信号等。

第二章 自动控制系统的数学描述

一、控制系统的数学模型

控制系统的数学模型是描述自动控制系统输入、输出以及内部各变量的静态和动态关系的数学表达式。控制系统的数学模型有多种形式：代数方程、微分方程、传递函数、差分方程、脉冲传递函数、状态方程、方框图、结构图、信号流图和静态/动态关系表等。

控制系统的数学模型的求取，可采用解析法或实验法。控制系统的数学模型关系到整个系统的分析和研究，建立合理的数学模型是分析和研究自动控制系统的最重要基础。

1. 微分方程

用解析法建立系统微分方程的步骤：

- (1) 确定系统的输入、输出变量；
- (2) 根据系统的物理、化学等机理，列写出各元件的输入、输出运动规律的动态方程；
- (3) 消去中间变量，写出系统的输入、输出变量关系的微分方程。

2. 传递函数

(1) 定义：传递函数是在零初始条件下，系统（或环节）输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比。

(2) 性质：

- 1) 传递函数是线性系统在复频域里的数学模型；
- 2) 传递函数只与系统本身的结构与参数有关，与输入量的大小和性质无关；
- 3) 传递函数与微分方程有相通性，两者可以相互转换。

(3) 表达形式：设系统的动态方程为一个 n 阶微分方程，即

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \cdots + a_n y = b_0 r^{(m)} + b_1 r^{(m-1)} + \cdots + b_m r$$

式中：等号左边是系统输出量 y 及其各阶导数，等号右边是系统输入量 r 及其各阶导数，各项的系数 $a_j (j = 0, 1, \cdots, n)$ 和 $b_i (i = 0, 1, \cdots, m)$ 均为实数，则系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_n}$$

传递函数也可写成分子、分母多项式因式分解的形式，即

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_n)} = \frac{k \prod_{i=1}^m (s+z_i)}{\prod_{j=1}^n (s+p_j)}$$

式中 k ——称为传递系数， $k = b_0/a_0$ ；

$-z_i$ ——分子多项式的根，又称为系统的零点；

— p_j ——分母多项式的根，又称为系统的极点。

(4) 典型环节的传递函数。一个自动控制系统，可以认为是由一些典型环节所组成。常见的典型环节及其传递函数有以下几种：

- 1) 比例环节 $G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = k$
- 2) 积分环节 $G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts}$
- 3) 微分环节：理想 $G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = T_d s$
实际 $G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k_d T_d s}{1 + T_d s}$
- 4) 惯性环节 $G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k}{1 + Ts}$
- 5) 二阶振荡环节 $G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
- 6) 迟延环节 $G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = e^{-\tau s}$

3. 结构图 (又称方框图、方块图)

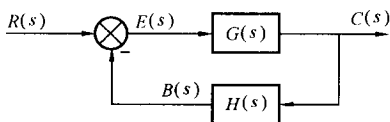


图 1.2.1 结构图的基本形式

(1) 结构图的基本形式 (如图 1.2.1 所示)。结构图是反映系统各个元、部件的功能和信号流向的图解表示法，它是一种数学模型。利用结构图可以求出系统输入对输出的总的传递函数。在图 1.2.1 中，开环传递函数为

$$G_o(s) = G(s)H(s) = \frac{B(s)}{E(s)}$$

闭环传递函数为

$$G_b(s) = \frac{G(s)}{1 + G_o(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = \frac{C(s)}{R(s)}$$

(2) 结构图的等效变换基本法则：

1) 串联 (如图 1.2.2 所示)，其传递函数为

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = G_1(s)G_2(s)$$

2) 并联 (如图 1.2.3 所示)，其传递函数为

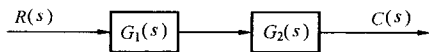


图 1.2.2 串联结构图

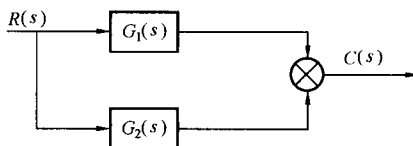


图 1.2.3 并列结构图

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = G_1(s) + G_2(s)$$

3) 反馈连接 (如图 1.2.1 所示), 其传递函数为

$$G_b(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 \pm G(s)}$$

上式分母中的“ \pm ”号在负反馈时取“+”号, 在正反馈时取“-”号。

4. 信号流图

信号流图是结构图的一种简易画法, 它与结构图在本质上没有什么区别。只是形式上的不同。

信号流图中的有关术语: 源节点、阱节点、混合节点、前向通路、回路、不接触回路。

5. 梅逊 (Mason) 公式

应用梅逊公式可以不经任何结构变换, 一步写出系统的总的传递函数, 所以是一个十分有用的数学工具。梅逊公式如下:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^n p_k \Delta_k$$

式中 Δ ——特征式, $\Delta = 1 - \Sigma L_a + \Sigma L_a L_b - \Sigma L_a L_b L_c + \dots$;

n ——从输入节点到输出节点前向通路的总条数;

p_k ——从输入节点到输出节点第 k 条前向通路的总传递函数;

ΣL_a ——所有不同回路的传递函数之和;

$\Sigma L_a L_b$ ——所有两两互不接触回路的传递函数乘积之和;

$\Sigma L_a L_b L_c$ ——所有三个互不接触回路的传递函数乘积之和;

Δ_k ——与第 k 条前向通路不接触部分的 Δ 值。

第三章 控制系统的时域分析

一、控制系统的时域分析法

对系统加入典型输入信号进行时域特性试验，分析系统输出响应特性的动态性能和稳态性能，研究其是否满足生产过程对控制系统的性能要求。

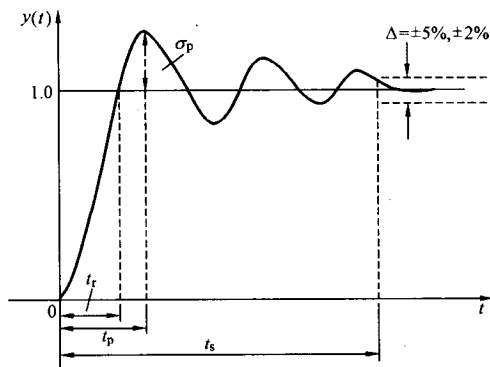


图 1.3.1 控制系统的性能指标

二、控制系统的性能指标 (如图 1.3.1 所示)

1. 动态性能指标

- (1) 最大超调量 $\sigma_p\%$;
- (2) 上升时间 t_r ;
- (3) 峰值时间 t_p ;
- (4) 调整时间 t_s 。

2. 稳态性能指标

稳态误差 e_{ss} 是输出响应的稳态值与希望的给定值之间的偏差。

三、二阶系统的数学模型和动态性能指标计算

1. 典型二阶系统的闭环传递函数

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Ts^2 + s + K} \quad (1.3.1)$$

式中 T ——系统的时间常数;

K ——系统的增益。

其典型结构图如图 1.3.2 所示。式 (1.3.1) 可改写成标准形式，即

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1.3.2)$$

式中 ω_n ——无阻尼自然振荡频率， $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{T}}$;

ζ ——阻尼比， $\zeta = \frac{1}{2\sqrt{TK}}$ 。

2. 二阶系统动态性能指标的计算 ($0 < \zeta < 1$ 的欠阻尼情况)

$$(1) \text{ 上升时间 } t_r = \frac{\pi - \theta}{\omega_d} \quad (1.3.3)$$

式中 $\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ 。

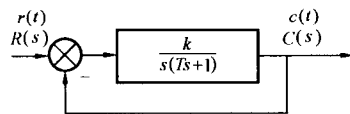


图 1.3.2 二阶系统的典型结构图

$$(2) \text{ 峰值时间} \quad t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (1.3.4)$$

$$(3) \text{ 超调量} \quad \sigma_p\% = e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \times 100\% \quad (1.3.5)$$

$$(4) \text{ 调整时间} \quad t_s = \begin{cases} \frac{3}{\zeta\omega_n} & (\Delta = \pm 5\%) \\ \frac{4}{\zeta\omega_n} & (\Delta = \pm 2\%) \end{cases} \quad (1.3.6)$$

(5) 其他性能指标：衰减指数 m 和衰减率 ψ 。

$$1) \text{ 衰减指数} \quad m = \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{\zeta\omega_n}{\omega_d} \quad (1.3.7)$$

$$2) \text{ 衰减率} \quad \psi = e^{-2\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} = e^{-2\pi m} \quad (1.3.8)$$

四、高阶系统的动态响应和简化分析

高阶系统的动态响应，在工程中常采用主导极点的概念进行简化分析。

闭环主导极点的基本概念：如果高阶系统中距离虚轴最近的一对共轭复数极点（或一个实极点）的实部绝对值，仅为其他极点的五分之一或更小，并且附近有没有零点，则系统的响应主要由这一对复数极点（或一个实极点）确定，称之为闭环主导极点。找到了主导极点，高阶系统就可以近似作为二阶（或一阶）系统来分析。

五、控制系统的稳定性分析与代数判据

(1) 稳定的定义：控制系统受扰动而偏离了平衡状态，当扰动消除后系统能自动恢复到原来的平衡状态，或能稳定在一个新的平衡状态，则称系统是稳定的；反之，称系统是不稳定的。

(2) 控制系统稳定的充分必要条件：系统的特征根全部具有负的实部。

(3) 劳斯和赫尔维茨稳定性代数判据。

1) 劳斯判据：设系统特征多项式的各项系数均大于零，则由系统特征方程各项系数列出劳斯阵列表。若劳斯阵列表中的第一列元素都是正数则系统稳定；如果劳斯阵列表中第一列元素中出现负数，则系统不稳定；第一列元素符号改变的次数，为特征方程的正实部根的个数。

2) 赫尔维茨判据：由系统特征方程各项系数所构成的各阶赫尔维茨行列式的值全部为正，则系统稳定；反之，系统不稳定。

(4) 线性系统的稳定性是属于系统本身的特性，它只与自身的结构与参数有关，而与初始条件，外界扰动的大小等无关。系统的稳定性只取决于系统的特征根（极点），而与系统的零点无关。

六、控制系统的稳态误差及误差系数

1. 误差的定义

常见的误差定义有两种。

(1) 从输出端定义的误差：系统输出量的期望值与实际值之差，即