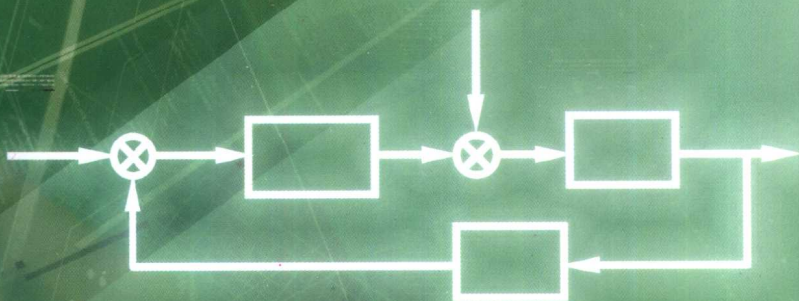


考研必备
复习必读

自动控制理论 复习指导与习题精解

于希宁 刘红军 主编

- 自动控制理论知识总汇
- 自动控制理论基础习题详解
- 硕士、博士研究生入学考试试题精选详解
- 部分院校研究生入学考试试卷及参考答案



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

自动控制理论复习指导与习题精解

主编：于希宁 刘红军

参编：戴毅姜 刘鑫平 魏乐

王东风 孙万云



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是根据国家教委制定的高等学校自动控制理论课程的基本要求及硕士研究生入学考试的基本要求编写的。全书共分为四部分，第一部分为自动控制理论知识总汇；第二部分为自动控制理论基础习题详解；第三部为硕士、博士研究生入学考试试题精选详解；第四部分给出了备有答案的部分院校研究生入学考试试卷。

本书内容全面，分析透彻，可以帮助读者循序渐进，理清思路、掌握重点、突破难点，从而提高应试能力。

本书可作为考研学生系统复习用的必备参考书，又可作为大学本科生学习本课程用的辅导教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制理论复习指导与习题精解/于希宁，刘红军
主编. —北京：中国电力出版社，2004

ISBN 7-5083-1797-1

I. 自… II. ①于… ②刘… III. 自动控制理论—
高等学校—自学参考资料 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 100508 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京通天印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 1 月第一版 2004 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 29.5 印张 744 千字

印数 0001—3000 册 定价 45.00 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

随着科学技术和生产的发展,自动控制技术广泛地应用于国民经济的各个领域,并成为探索各种技术的工具。自动控制理论课已经成为各工科类专业的技术基础课。为了帮助本科生或本课程的初学者掌握这门技术,尤其为满足广大报考研究生的读者进行系统复习的需求,针对该课程的特点,并结合作者多年从事该课程的教学经验,特编写此书。

本书紧扣国家教育部关于自动控制理论课程的教学大纲的要求,对经典控制理论及现代控制理论基础两门课中各章的内容进行了系统的归纳和总结。通过大量典型例题展示了教学中的基本概念和基本要求,本书收集了近年来全国部分大学硕士、博士研究生入学考试试题300余题,并加以归类,整理,给出了详细的解题过程及答案。本书具有系统性、实用性、针对性强的特点。与同类书目相比,本书无论从涉及问题的广度、深度等方面都具有特色。相信一定会帮助教师和学生更好地理解教学内容,明确基本概念和基本要求,拓宽解题思路提高解题技巧。特别有益于研究生入学应试复习,是广大考生最后拼搏的必备材料。

全书共分为五部分,第一部分为自动控制理论知识总汇;第二部分为古典控制理论基础习题详解;第三部分为现代控制理论基础习题详解;第四部分为硕士、博士研究生入学试题精选详解;为了便于报考研究生的同学进行自我检查,在第五部分给出了备有答案的部分研究生入学考试试卷。

本书由华北电力大学自动化系于希宁、刘红军主编,戴毅姜、刘鑫屏、魏乐、孙万云、王东风参编,另外,牛成林、朱晓燕、朱丽玲同学也为本书的出版作为一些工作。

本书在编写过程中,参考了相关书籍及资料,在此不一一列举,对这些资料的提供者深表谢意。

由于时间及作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请各位读者批评指正。

编 者

2003年9月

目 录



前言

第一部分 自动控制理论知识汇总

第一篇 古典控制理论知识汇总	3
第一章 自动控制系统的基本概念	3
第二章 线性连续控制系统的数学模型	4
第三章 线性连续控制系统的稳定性分析	6
第四章 线性连续控制系统的稳态性能分析	7
第五章 线性连续控制系统的动态性能分析	8
第六章 线性连续控制系统的设计与校正	10
第七章 非线性系统分析	14
第八章 线性离散控制系统分析	18
第二篇 现代控制理论知识汇总	21
第九章 状态空间描述	21
第十章 线性系统状态空间表达式的解	23
第十一章 线性系统的能控性和能观性	25
第十二章 控制系统的稳定性分析	29
第十三章 线性控制系统的综合	31

第二部分 自动控制理论基础习题详解

第一篇 古典控制理论基础习题详解	37
第一章 概述	37
第二章 控制系统的数学模型	40
第三章 时域分析法	49
第四章 根轨迹分析法	60
第五章 频域分析法	74
第六章 线性控制系统的设计与校正	95
第七章 非线性系统分析	104

第八章 线性离散控制系统的分析与综合	113
第二篇 现代控制理论基础习题详解	121
第九章 控制系统的状态空间描述	121
第十章 状态空间表达式的解	136
第十一章 线性控制系统的能控性和能观性	159
第十二章 控制系统的稳定性分析	179
第十三章 状态反馈和状态观测器	191

第三部分 硕士、博士研究生入学考试试题精选详解

第一章 线性系统数学模型的求取	207
第二章 线性系统的时域分析与综合设计	227
第三章 线性系统的频域分析与综合设计	275
第四章 线性离散控制系统	329
第五章 非线性系统分析	350
第六章 现代控制理论基础	380

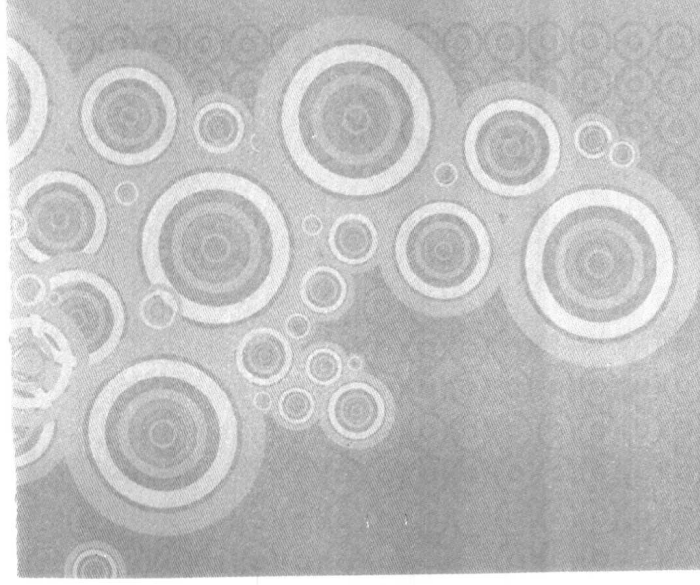
第四部分 部分院校攻读硕士学位研究生入学考试 试题及参考答案

第一章 试题	431
北京理工大学 1999 年自动控制理论 (控制类) 试题	431
北京理工大学 2000 年自动控制理论 (控制类) 试题	432
大连理工大学 1999 年自动控制原理 (含近代 20%) 试题	433
大连理工大学 2000 年自动控制原理 (含近代 20%) 试题	434
浙江大学 2000 年过程控制原理及工程试题	435
浙江大学 2001 年过程控制原理及工程试题	436
西安交通大学 1998 年自动控制原理试题	437
西安交通大学 1999 年自动控制原理试题	440
西安交通大学 2000 年自动控制原理试题	441
西安交通大学 2001 年自动控制原理试题	443
华北电力大学 (保定) 1998 年自动控制理论试题 (A)	444
华北电力大学 (保定) 1999 年自动控制理论试题 (A)	445
华北电力大学 (保定) 2001 年自动控制理论试题 (A)	447
华北电力大学 (保定) 2002 年自动控制理论试题 (A)	448
华北电力大学 (保定) 2003 年自动控制理论试题 (A)	450
第二章 参考答案	453
参考文献	464

自动控制理论复习指导与习题精解

第一部分

自动控制理论 知识汇总



第一篇

古典控制理论知识汇总

第一章 自动控制系统的基本概念

一、自动控制系统的一般组成

1. 简单自动控制（调节）系统

(1) 简单自动控制系统原理方框图，如图 1-1-1 所示。

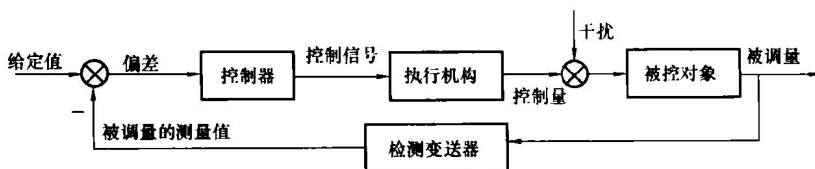


图 1-1-1 简单控制系统原理方框图

(2) 结构特征和自动调节机理。单回路闭环负反馈调节系统。当系统的给定值变化或扰动进入系统破坏了原有的平衡状态时，控制器依据给定值与测量值之间的偏差经过数学运算，产生控制信号，通过控制量的变化使系统重新回到平衡状态。

2. 常用术语

- (1) 设备。被控对象和控制装置（包括检测变送器、执行机构和控制器）。
- (2) 信号（变量）。给定值、测量值、偏差、干扰、控制信号和控制量。

3. 常见自动控制系统的典型结构形式

自动控制系统的一般结构形式为上述所示的简单结构形式，即单回路闭环负反馈控制系统。但是，当被控对象的结构复杂或系统存在的干扰作用很强，造成控制系统的控制水平难以满足设计要求时，控制系统的结构就需要发生相应的变化。常见的系统结构为以下两种形式。

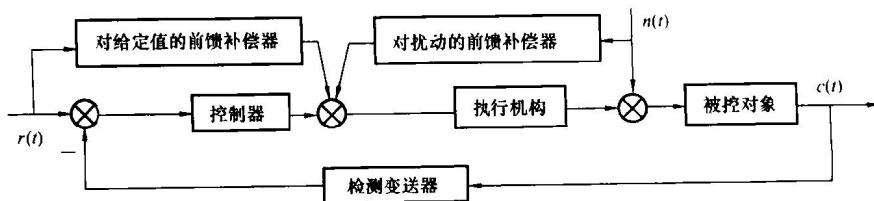


图 1-1-2 前馈加负反馈的复合控制系统



- (1) 前馈加负反馈的复合控制系统 (见图 1-1-2)。
- (2) 串级负反馈控制系统 (见图 1-1-3)。

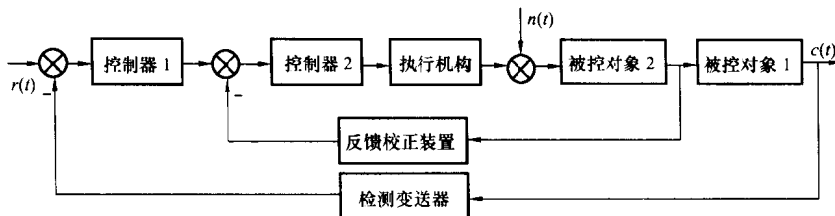


图 1-1-3 串级负反馈控制系统

不同结构的控制系统的特点和使用范围将在后续的学习过程中解决。

二、对自动控制系统的基本要求

三要素——稳、准、快。

(1) 稳。指稳定性。即当扰动信号进入系统破坏系统平衡时，有重新恢复平衡的能力。

(2) 准。指准确性。又分动态过程的准确性和静态的准确性。当扰动信号进入系统破坏系统平衡时，用其动态过程中给定值与测量值之间产生的最大偏差来衡量系统动态过程的准确性。而当动态过程结束，系统重新进入稳态后，用给定值与测量值之间残余偏差的大小来衡量系统静态的准确性。

(3) 快。指快速性。从扰动信号进入系统开始，到重新恢复平衡时所需要的时间长短来度量系统的快速性。

第二章 线性连续控制系统的数学模型

一、建立控制系统数学模型的目的

进行控制系统的性能分析以及从事系统性能的设计与改造。

二、线性连续控制系统数学模型的代表方法

线性连续控制系统的数学模型所要描述的是系统变量与变量之间的动态关系，即构成系统中的所有变量(信号)都是时间 t 的函数，所以数学模型是动态模型。常见的数学模型有：微分方程、方框图、信号流图、传递函数和频率特性。它们之间一般可以进行相互转换。

三、传递函数 $G(s)$

1. 一般概念

传递函数是线性系统性能分析中应用最多的一种数学模型。传递函数基于 Laplace 变换这一数学工具，它巧妙地将控制系统的数学模型由时间域里的微分方程转换成 S 域里的代数方程，从而使微分方程中输入变量与输出变量之间的隐函关系变成了代数方程中的显函关系，使复杂系统的建模过程得以简化。系统的性能分析一般是基于传递函数进行的。

传递函数定义: 零初始条件下系统输出 $c(t)$ 和输入 $r(t)$ 的 Laplace 变换之比。

传递函数: $G(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$; 输出象函数: $C(s) = G(s)R(s)$

2. 传递函数的求取

传递函数的求取方法有多种, 具体选择哪种方法, 取决于题目所提供的已知条件。

- (1) 根据阶跃响应曲线, 采用实验法拟合传递函数;
- (2) 依据方框图等效变换求传递函数;
- (3) 依据信号流图化简求传递函数;
- (4) 依据方框图或信号流图由梅逊公式求传递函数;
- (5) 基于物理模型, 建立构成系统局部元件的微分方程或传递函数, 再根据信号的传递规则绘制系统的方框图, 最后选择确定的输入和输出求出相应的传递函数。

四、控制系统传递函数的典型结构形式

1. 控制系统的数学模型

建模的目的是进行控制系统的性能分析。当采用的分析方法不同或分析系统不同的性能时, 则需要提供不同形式的数学模型。总结后续系统性能分析和综合设计的常用解题方法, 需要掌握建立以下数学模型的方法。

设典型控制系统方框图如图 1-2-1 所示, 对应的典型数学模型有以下几种形式。

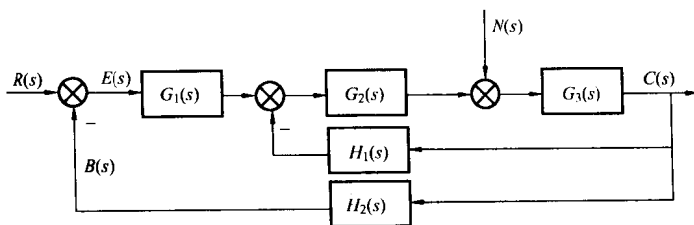


图 1-2-1 典型控制系统方框图

$R(s)$ —系统给定输入; $C(s)$ —系统输出(被测量); $E(s)$ —误差;
 $N(s)$ —干扰; $B(s)$ —主反馈信号(被测量的测量值)

- (1) 控制系统的开环传递函数。主反馈断开后, $B(s)$ 与 $R(s)$ 之间的传递函数。

$$G_k(s) = G_1(s) \cdot \frac{G_2(s)G_3(s)}{1 + G_2(s)G_3(s)H_1(s)} \cdot H_2(s)$$

- (2) 控制系统的四种典型闭环传递函数

$$\text{给定输入下的闭环传递函数: } G_{cr}(s) = \frac{C_r(s)}{R(s)} = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_2 G_3 H_1 + G_1 G_2 G_3 H_2}$$

$$\text{扰动输入下的闭环传递函数: } G'_{cn}(s) = \frac{C_n(s)}{N(s)} = \frac{G_3}{1 + G_2 G_3 H_1 + G_1 G_2 G_3 H_2}$$

$$\text{给定输入下的误差传递函数: } G_{er}(s) = \frac{E_r(s)}{R(s)} = \frac{1 + G_2 G_3 H_1}{1 + G_2 G_3 H_1 + G_1 G_2 G_3 H_2}$$

$$\text{扰动输入下的误差传递函数: } G_{en}(s) = \frac{E_n(s)}{N(s)} = -\frac{G_3 H_2}{1 + G_2 G_3 H_1 + G_1 G_2 G_3 H_2}$$



(3) 特征方程。闭环传递函数的分母等于零, 即 $1 + G_2 G_3 H_1 + G_1 G_2 G_3 H_2 = 0$ 。

2. 控制系统中的典型环节的传递函数

为便于分析系统的性能, 为改造和设计符合性能指标要求的控制系统奠定基础, 往往需要剖析系统内部局部设备的结构特征, 从而深入了解系统特性与系统内部结构之间的内在关系。因此, 对控制系统中常见的典型环节作以下归类。

- (1) 比例环节: k ;
- (2) 积分环节: $\frac{1}{s}$;
- (3) 微分环节: s ;
- (4) 一阶惯性环节: $\frac{1}{Ts + 1}$;
- (5) 一阶微分环节: $Ts + 1$;
- (6) 二阶振荡环节: $\frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}$;
- (7) 二阶微分环节: $T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1$;
- (8) 纯迟延环节: $e^{-\tau s}$ 。

第三章 线性连续控制系统的稳定性分析

一、控制系统稳定的基本概念

当控制系统设计完毕, 则表明系统的结构和参数都已经确定。依据该系统的数学模型可以进行控制系统的性能分析。而系统性能分析首先需要研究的是其稳定性。线性系统的稳定与否完全取决于系统的结构, 与系统的输入信号形式和大小无关, 与系统输入、输出信号的位置无关。唯一确定系统稳定的条件是系统特征方程中所有特征根的位置都在 S 平面的左半平面上。

二、控制系统稳定性的判别方法

1. 时域分析法中的稳定性判别

- (1) 由系统特征方程求出所有特征根;
- (2) 根据系统特征方程, 利用 Routh 稳定判据, 确定所有特征根的分布。

2. 频域分析法中的稳定性判别

(1) 依据开环频率特性 (Nyquist) 曲线以及开环传递函数在右平面的极点数 P_K 和原点的极点数 Q_K , 当闭环在右半平面的极点数 $P_B = P_K - 2(a - b) = 0$ 时 (Nyquist 稳定判据), 系统稳定 (Q_K 用于增添辅助线, a 、 b 为 Nyquist 曲线上的正负穿次)。

(2) 对于最小相位系统, 依据开环系统的对数幅频特性, 计算穿越频率 ω_c , 再依据对数相频特性求相角裕量 γ , 若 $\gamma > 0$ 系统稳定。也可以从 Bode 曲线直接确定。

(3) Nyquist 稳定判据同样可以在对数频率特性 (Bode) 曲线上使用。

三、稳定系统稳定裕量的概念

- (1) 在时域分析法中, 对于稳定系统, 所有特征根距虚轴越远, 则系统的稳定程度越好。

(2) 在频域分析法中, 相角裕量越大或幅值裕量越大, 则系统的稳定程度越好。

第四章 线性连续控制系统的稳态性能分析

一、控制系统稳态误差的基本概念

稳态误差是对稳定系统而言的。所以, 在计算系统稳态误差之前, 首先要确定系统的稳定性。

系统的稳态误差取决于系统的结构、输入信号的位置、大小以及形式。图 1-4-1 所示典型结构的控制系统, 其稳态误差分为给定输入 $\gamma(t)$ 下的稳态误差 e_{ssr} 和扰动输入下的稳态误差 e_{ssn} , 对不同的稳态误差, 其计算方法也不同。

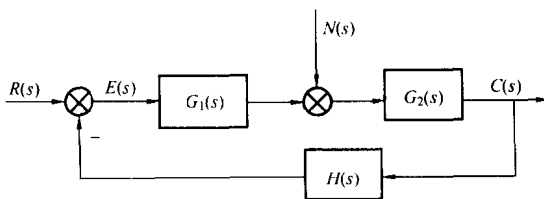


图 1-4-1

二、稳态误差的计算

1. 时域分析法中稳态误差的计算

(1) 依据稳态误差定义计算。

1) 给定输入 $\gamma(t)$ 入下的误差的计算

$$E_r(s) = G_{er}(s) = \frac{1}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} R(s)$$

$$e_r(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} R(s) \right]$$

$$e_{ssr} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_r(t)$$

2) 扰动输入 $n(t)$ 下的误差的计算

$$E_n(s) = G_{en}(s) = - \frac{G_2(s)H(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} N(s)$$

$$e_n(t) = L^{-1} \left[\frac{-G_2(s)H(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} N(s) \right]$$

$$e_{ssn} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_n(t)$$

(2) 典型输入下, 依据终值定理计算。当输入信号为脉冲、阶跃、斜坡或加速度时, 可以依据终值定理简化上述计算过程。避免了求取反变换的复杂计算过程。

1) 给定输入下的误差的计算

$$E_r(s) = G_{er}(s) = \frac{1}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} R(s)$$

$$e_{ssr} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_r(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s E_r(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} R(s)$$

2) 扰动输入下的误差的计算

$$E_n(s) = G_{en}(s) = \frac{G_2(s)H(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} N(s)$$



$$e_{ssn} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_n(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s E_n(s) = - \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{G_2(s)H(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} N(s)$$

(3) 利用开环传递函数典型结构特征, 确定典型输入下的稳态误差。前面两种稳态误差的计算方法都必须以求取闭环传递函数为前提, 所以计算过程复杂, 而且不易发现系统内部典型环节对系统稳态误差大小的影响。用开环传递函数典型结构特征确定典型输入下的稳态误差, 这种方法既直观又简便。但只能针对结构规范的系统。

1) 给定输入下的误差的计算。已知开环传递函数为典型环节的乘积形式

$$G_k(s) = G_1(s)G_2(s)H(s) = \frac{k}{s^N} G_0(s) \quad (\text{其中有 } G_0(s)|_{s=0} = 1)$$

定义: k 为系统的开环增益; N 为系统的型别。

系统在不同给定输入下的稳态误差可以直接查下表获得。

系统型别	静态误差系数			阶跃输入 $r(t) = a$	斜坡输入 $r(t) = bt$	抛物线输入 $r(t) = 0.5ct^2$
N	k_p	k_v	k_a	$e_{ss} = \frac{a}{1+k_p}$	$e_{ss} = \frac{b}{k_v}$	$e_{ss} = \frac{c}{k_a}$
0	k	0	0	$\frac{a}{1+k}$	∞	∞
1	∞	k	0	0	$\frac{b}{k}$	∞
2	∞	∞	k	0	0	$\frac{c}{k}$

显然系统型别越高, 对消除误差越有利; 系统的开环增益越大, 对减小误差越有利; 输入函数的次数越高, 对系统稳态误差越不利。

2) 扰动输入下的误差的计算。定义从误差到扰动输入的和点之间的开环传递函数为 $G_1(s) = \frac{k_1}{s^{N_1}} G_{10}(s)$, 其中有 $G_{10}(s)|_{s=0} = 1$, 当系统的开环传递函数 $G_k(s) = \frac{k}{s^N} G_0(s)$ 为 1 型及

以上的系统 ($N \geq 1$) 时, 典型输入下系统的稳态误差为 $e_{ssn} = - \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^{N_1+1}}{k_1} N(s)$ 。

2. 频域分析法中稳态误差的计算

(1) 根据开环对数频率特性曲线确定系统的型别 N 和开环增益 k , 然后采用上述时域法确定给定输入下的稳态误差。

(2) 正弦 $r(t) = r_0 \sin \omega_1 t$ 输入下系统稳态输出的计算可以采用频率特性的定义求取。即当 $C(s) = G(s)R(s)$ 时, 有 $c_{ss}(t) = |G(j\omega_1)| r_0 \sin[\omega_1 t + \angle G(j\omega_1)]$ 。然后根据系统结构确定 $G_{ss}(t)$ 与 $e_{ss}(t)$ 的关系, 最终求出稳态误差。

第五章 线性连续控制系统的动态性能分析

一、时域分析法中的动态性能指标

在时域分析法中, 对于稳定的系统, 动态性能指标是在给定输入为单位阶跃信号作用下的输出阶跃响应曲线上获得的。

(1) 主要指标: 调节时间 t_s 、超调量 $\sigma\%$ 、峰值时间 t_p 。



(2) 典型一阶系统的性能指标计算

若 $\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1}$, 则有, $\sigma\% = 0$

$$t_s = \begin{cases} 3T & (\Delta = \pm 5\%) \\ 4T & (\Delta = \pm 2\%) \end{cases}$$

(3) 典型二阶系统的性能指标计算

若系统闭环传递函数为: $\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$

闭环极点为: $s_{1,2} = -\sigma \pm j\omega_d = -\zeta\omega_n \pm j\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n$ ($0 < \zeta < 1$)

$$\text{则有} \begin{cases} t_s = \frac{3}{\sigma} = \frac{3}{\zeta\omega_n} & (\Delta = \pm 5\%) \\ t_s = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{\zeta\omega_n} & (\Delta = \pm 2\%) \end{cases}, \sigma\% = e^{-\frac{\pi\sigma}{\omega_d}} \times 100\% = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\%$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n}$$

(4) 高阶系统性能指标的估算。已知稳定系统的所有闭环极点位置, 消去偶极子, 略去远离虚轴的极点, 取靠近虚轴最近的两个主导极点的坐标, 采用二阶系统性能指标的计算方法, 估算高阶系统的动态性能指标。

(5) 用计算机求闭环系统的单位阶跃响应曲线, 根据定义从响应曲线获取系统的动态性能指标。

二、频域分析法中的动态性能

在频域分析法中, 稳定系统的动态性能指标一般根据开环频率特性求取。借助于开环频率特性曲线或对数频率特性曲线求取下列指标。

(1) 主要指标: 穿越(截止、剪切)频率 ω_c 、相角裕量 γ 、幅值裕量 k_g 或 k_g (dB)。

(2) 依据开环频率特性曲线计算最小相位系统动态性能指标。已知系统开环传递函数为 $G_k(s)$

$$\text{令 } \angle G_k(j\omega_g) = -180^\circ \Rightarrow \omega_g \Rightarrow k_g = \frac{1}{|G(j\omega_g)|}$$

$$\text{令 } |G_k(j\omega_c)| = 1 \Rightarrow \omega_c \Rightarrow \gamma = 180^\circ - \angle G_k(j\omega_c)$$

(3) 依据开环对数频率特性折线近似计算最小相位系统动态性能指标。已知系统开环传递函数为 $G_k(s)$, 绘制 Bode 折线草图。

$$\text{令 } 20\lg |G_k(j\omega_c)| = 0 \Rightarrow |G_k(j\omega_c)| = 1 \Rightarrow \omega_c \Rightarrow \gamma = 180^\circ - \angle G_k(j\omega_c)$$

注意: $|G_k(j\omega_c)|$ 为按频率分段折线的表示形式, 可以简化计算。

$$\text{令 } \angle G_k(j\omega_g) = -180^\circ \Rightarrow \omega_g \Rightarrow k_g = 20\lg \frac{1}{|G_k(j\omega_g)|} = -20\lg |G_k(j\omega_g)| \text{ (dB)}$$

注意: 动态性能指标也可以在曲线上根据定义直接读出。

三、时域与频域动态性能指标的对应关系

定性地讲, 若系统的稳定性好, 则相角裕量 γ 大且超调量 $\sigma\%$ 小; 若系统的穿越频率 ω_c 大, 则调节速度快, 即 t_s 就小。



若满足一定的条件, 则频域指标和时域指标之间具有下列近似转换关系。

$$(1) \sigma\% \approx \left[0.16 + 0.4 \left(\frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right) \right] \times 100\% \quad (35^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ);$$

$$(2) t_s(5\%) = \frac{k\pi}{\omega_c}, \text{ 式中 } k = 2 + 1.5 \left(\frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right) + 2.5 \left(\frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right)^2 \quad (35^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ)。$$

第六章 线性连续控制系统的设计与校正

一、设计与校正的基本概念

1. 基本思路

在被控对象数学模型 $G_k(s)$ 已知的前提下, 一般需要根据对系统的性能指标要求选择一种设计方案。设计指标一般包括动态和静态两部分, 设计方案则包括对系统的结构选择和确定校正装置结构以及参数取值等内容。

控制系统的设计与校正的方法是非唯一的。因此, 如何选择设计结构和如何确定校正装置的结构和参数, 能够使得系统既能满足设计指标要求, 又能使设计过程计算简单且易于工程实现, 这是问题的核心所在。

2. 设计指标

(1) 稳定性。

(2) 静态指标。稳态误差 e_{ss} 或位置误差系数 k_p 、速度误差系数 k_v 和加速度误差系数 k_a 。

(3) 动态指标。

1) 时域: 包括调节时间 t_s 、超调量 $\sigma\%$ 和峰值时间 t_p , 或确定系统主导极点位置;

2) 频域: 包括穿越频率 ω_c 和相角裕量 γ 。

3. 控制系统设计的结构及特点

(1) 串联校正。串联设计与校正的结构如图 1-6-1 所示。 $G_0(s)$ 为被控对象的传递函数,

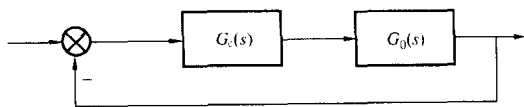


图 1-6-1 串联校正结构

$G_c(s)$ 为校正装置的传递函数。闭环系统的性能指标取决于 $G_c(s)G_0(s)$ 的结构与参数的取值, 由于 $G_0(s)$ 固化不变, 设计的任务是怎样选择 $G_c(s)$ 的结构与参数的取值, 使得 $G_c(s)G_0(s)$ 构成的闭环控制系统满足性能指标的要求。

1) 参数校正: $G_c(s) = k$ 。

2) 结构校正: $G_c(s)$ 为动态结构形式。

(2) 串联加局部反馈校正。当串联校正不能完全满足动态性能的设计指标要求时, 选择局部反馈校正, 通过改变被控对象的结构提高系统的性能指标。

串联加局部反馈校正的系统结构如图 1-6-2 所示。原被控对象传递函数为 $G_0(s) = G_{01}(s)G_{02}(s)$, 加局部反馈后被控对象的传递函数改变为 $G_0(s) = \frac{G_{01}(s)G_{02}(s)}{1 + G_{01}(s)G_c(s)}$ 。

(3) 串联反馈加前馈校正。

1) 对给定值的前馈校正。系统设计结构如图 1-6-3 所示。由于前馈作用介入不会破坏

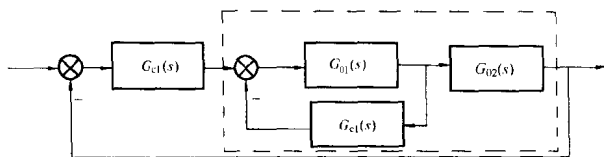


图 1-6-2 串联加局部反馈校正结构

系统的稳定性，所以，当设计的串联反馈控制系统已经基本满足系统稳定性设计要求时，加入对给定值的前馈校正可以提高测量值跟踪给定值的能力，且包括静态和动态。

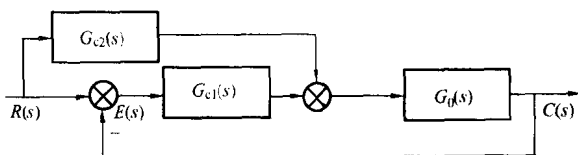


图 1-6-3 串联反馈加对给定值前馈校正的结构

校正后给定输入下的误差传递函数为

$$\frac{E_r(s)}{R(s)} = \frac{1 - G_{c2}(s)G_0(s)}{1 + G_{c1}(s)G_0(s)}, E_r(s) = \frac{1 - G_{c2}(s)G_0(s)}{1 + G_{c1}(s)G_0(s)} R(s)$$

若选择 $G_{c2}(s) = \frac{1}{G_0(s)}$ ，使得 $1 - G_{c2}(s)G_0(s) = 0$ ，则给定值变化时，被调量动态无差跟踪。设计难度主要是 $G_{c2}(s)$ 的工程实现。

若在确定的典型输入信号 $r(t)$ 作用下，选择 $G_{c2}(s)$ 能使得给定输入下的稳态误差 $e_{ssr} = \lim_{s \rightarrow 0} s E_r(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1 - G_{c2}(s)G_0(s)}{1 + G_{c1}(s)G_0(s)} R(s) = 0$ ，则在给定输入作用下，被调量静态无差跟踪。

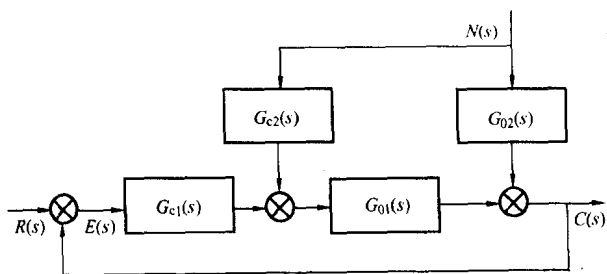


图 1-6-4 串联反馈加对扰动前馈的校正结构

2) 对扰动值的前馈校正。系统设计结构如图 1-6-4 所示。当设计的串联反馈控制系统已经基本满足系统稳定性设计要求时，加入对扰动信号的前馈校正可以提高系统抗拒干扰的能力，且包括静态和动态。

校正后扰动输入下的误差传递函数为

$$\frac{E_n(s)}{N(s)} = -\frac{G_{02} + G_{c2}(s)G_{01}(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{01}(s)}$$

$$E_n(s) = -\frac{G_{02} + G_{c2}(s)G_{01}(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{01}(s)} N(s)$$

若选择 $G_{c2}(s) = -\frac{G_{02}(s)}{G_{01}(s)}$ ，使得 $G_{02}(s) + G_{c2}(s)G_{01}(s) = 0$ 。又因为 $R(s) = 0$ ，所以 $C(s) = -E_n(s) = 0$ ，则扰动作用时，对被调量没有任何动静影响。设计难度主要是 $G_{c2}(s)$ 的工程实现。

若在确定的典型扰动信号 $n(t)$ 作用下，选择 $G_{c2}(s)$ 能使得扰动输入下的稳态误差 $e_{ssn} = \lim_{s \rightarrow 0} s E_n(s) = -\lim_{s \rightarrow 0} s \frac{G_{02}(s) + G_{c2}(s)G_{01}(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{01}(s)} N(s) = 0$ ，则在扰动输入作用下被调量静态无差。

4. 串联校正的几种计算方法

- (1) 时域校正法；
- (2) 根轨迹校正法；