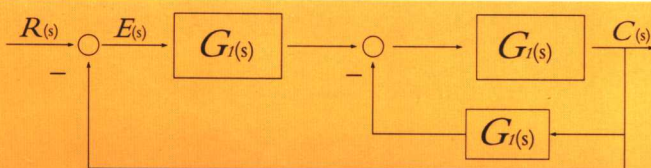


自动控制原理

基本理论 · 例题详解 · 典型习题

Z I D O N G K O N G Z H I Y U A N L I
J I B E N L I L U N L I T I X I A N G J I E D I A N X I N G X I T I

主编 张家桂 黄明键



國防工業出版社

National Defense Industry Press

自动控制原理

基本理论 · 典型系统 · 典型习题

本书可作为高等院校自动化专业及相关专业的教材，也可供从事自动控制工作的工程技术人员参考。

主编 张纪俊 副主编 王明海



清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

TP13/223

2007

自动控制原理

基本理论·例题详解·典型习题

主 编 张家桂 黄明键
副主编 李 毅 唐述宏 袁铸钢 申 涛
参 编 程新功 王中华 王学军

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书根据教育部对高等院校本科自动控制原理课程要求及硕士研究生入学考试的基本要求而编写。全书共9章,涵盖自动控制原理和现代控制理论基础两大部分,每章都包括基本理论、例题详解和典型习题三个组成部分。书末还附有5个附录,以便学习本课程查阅。本书共编有例题详解200题和典型习题200题,可作为一个较好的试题库。

本书可作为自动化、电气工程及其自动化等相近专业本科学生学习自动控制原理的主要参考书,更可以作为硕士研究生入学考试的考前复习辅导教材,还可供高校教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理:基本理论·例题详解·典型习题/张家桂,黄明键主编.—北京:国防工业出版社,2007.9
ISBN 978-7-118-05322-7

I.自... II.①张...②黄... 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(2007)第 122787 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 25 字数 583 千字

2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

自动控制原理(含现代控制理论基础)是自动化、电气工程及其自动化以及其它相关专业本科生必修的主干课程,是报考控制理论与控制工程等专业硕士研究生入学考试必考的专业基础课。

本书主要编者从事本科自动控制原理和现代控制理论课程教学二十余年,使用过多种版本的优秀教材,积累了一些宝贵的资料,为编写本书奠定了坚实的基础;编者还从事硕士研究生自动控制原理课程入学考试的考前辅导教学工作十余年,期间经常解答学生提出的各高校试题中的问题,并亲手做过百余套试题,总结了不少经验,吸取了同类书籍的优点和长处,为编写本书拓宽了思路。在上述背景下,为进一步提高该课程教学质量和提高学生的考研成绩,特精心编写本书,以奉献给莘莘学子,确信辛勤耕耘必有收获。

本书的编写与一般同类教材相比较,具有如下几方面特点:重视基本理论的科学性、例题详解的全面性和典型习题的多样性。基本理论阐述部分以科学严谨为目标,注意公式运用条件的界定;例题详解中,注重解题思路清晰,方法简便多样;典型习题的选择力争精益求精,以培养学生的独立思考能力,提高学生解题的正确性和快速性。由于篇幅所限,这里不再详细说明。

全书共分9章,每章涵盖基本理论、例题详解和典型习题三个组成部分,并给出了典型习题的参考答案。基本理论部分除了浓缩一般自动控制原理的基本内容外,还增加部分新概念、新公式、新方法;例题详解与典型习题部分中,编者自拟和选编了200个例题和200个习题。本书的最后还附有5个附录,便于读者查阅。

本书的编写过程中,得到了金辉、李永亮、李沛然、周红超、郭庆玲、郭璟、汤振娟、张玉尊、解海洋的帮助,特别得到了张勇教授和徐威编审的全力支持和鼓励,使本书的编写得以顺利进行,在此深表谢意。

对于本书存在的不当之处,恳请读者不吝指正。

编 者

2007年7月于济南大学

目 录

第 1 章 自动控制系统的基本知识	1
1.1 基本理论	1
1.1.1 自动控制系统的基本概念	1
1.1.2 控制系统的基本组成	1
1.1.3 对控制系统的控制性能要求	2
1.1.4 控制系统的分类	2
1.1.5 反馈控制系统的工作原理	2
1.1.6 拉普拉斯变换	3
1.1.7 拉普拉斯变换法求解线性定常微分方程	6
1.1.8 自动控制原理的研究内容和方法	7
1.2 例题详解	8
1.3 典型习题	10
1.4 习题参考答案	12
第 2 章 控制系统的数学模型	13
2.1 基本理论	13
2.1.1 数学模型的建立	13
2.1.2 控制系统结构框图及信号流图	15
2.1.3 控制系统的响应	18
2.2 例题详解	20
2.3 典型习题	35
2.4 习题参考答案	38
第 3 章 控制系统的时域分析法	41
3.1 基本理论	41
3.1.1 系统响应的品质	41
3.1.2 线性定常系统的稳定性	41
3.1.3 控制系统的误差	43
3.1.4 控制系统的动态性能	48
3.2 例题详解	53
3.3 典型习题	80
3.4 习题参考答案	87

第 4 章 控制系统的根轨迹分析法	90
4.1 基本理论	90
4.1.1 根轨迹的基本概念	90
4.1.2 绘制根轨迹的基本法则	92
4.1.3 以非 K 为参变量的根轨迹	95
4.1.4 利用根轨迹图分析控制系统的性能	95
4.1.5 主导极点以外的零极点对系统性能的影响	97
4.2 例题详解	98
4.3 典型习题	115
4.4 习题参考答案	118
第 5 章 控制系统的频率分析法	120
5.1 基本理论	120
5.1.1 频率特性的基本概念	120
5.1.2 频率特性的三种曲线描述	121
5.1.3 开环频率特性的绘制	121
5.1.4 奈奎斯特稳定性判据	124
5.1.5 对数频率特性稳定性判据	124
5.1.6 系统动态及静态性能指标	125
5.2 例题详解	128
5.3 典型习题	152
5.4 习题参考答案	160
第 6 章 控制系统的校正方法	162
6.1 基本理论	162
6.1.1 期望数学模型及其性能指标	162
6.1.2 系统校正方式	164
6.1.3 校正装置	165
6.1.4 校正方法	168
6.1.5 闭环传递函数零极点分布与动态性能指标估算	172
6.2 例题详解	172
6.3 典型习题	184
6.4 习题参考答案	186
第 7 章 非线性控制系统分析	187
7.1 基本理论	187
7.1.1 非线性控制系统的特性	187
7.1.2 非线性系统的分析方法	187
7.1.3 描述函数分析法	188

7.1.4	相平面分析法	196
7.1.5	相轨迹作图法	198
7.1.6	一阶、二阶非线性系统相轨迹作图问题	201
7.2	例题详解	204
7.3	典型习题	224
7.4	习题参考答案	228
第 8 章	离散控制系统	231
8.1	基本理论	231
8.1.1	离散(时间)控制系统	231
8.1.2	Z 变换	233
8.1.3	Z 反变换	234
8.1.4	差分方程求解	235
8.1.5	线性离散系统的脉冲传递函数	236
8.1.6	线性离散系统的分析	239
8.1.7	数字控制器设计	241
8.2	例题详解	243
8.3	典型习题	269
8.4	习题参考答案	273
第 9 章	现代控制理论基础	276
9.1	基本理论	276
9.1.1	控制系统的状态空间描述	276
9.1.2	控制系统的运动分析	286
9.1.3	控制系统的状态能控性和能观测性	291
9.1.4	状态反馈控制与状态观测器	299
9.1.5	控制系统的稳定性分析——李亚普诺夫第二法	301
9.2	例题详解	306
9.3	典型习题	355
9.4	习题参考答案	365
附录 A	拉普拉斯变换简表	374
附录 B	离散信号的 Z 变换定理及 Z 变换表	377
附录 C	关于极点之和及极点之积公式推导	381
附录 D	关于 $(-2-1-2)$ 系统闭环频率特性 $M_{\min}$ 推导	384
附录 E	矩阵理论摘要	387
参考文献		394

第1章 自动控制系统的基本知识

1.1 基本理论

1.1.1 自动控制系统的基本概念

1. 自动控制

在无人时刻操纵，实现对某个或某些物理量大小的控制，使其按照人的期望规律变化。

2. 反馈控制

首先把期望的物理量(输入量)送进系统中；其次要检测被控制的物理量(输出量)；再将这两个量的大小相比较之差(偏差)送进偏差运算器；最后将运算器的输出进行功率放大，去控制被控制对象的输出量。

3. 补偿控制

(1) 给定补偿控制：由不同系统结构和输入信号造成的控制误差，可在系统中增设给定补偿器，以减小控制误差。

(2) 扰动补偿控制：由不同系统结构和扰动输入信号造成的控制误差，可在系统中增设扰动补偿器，以减小扰动造成的误差。

4. 综合控制

以反馈控制为主，另加补偿控制。

1.1.2 控制系统的基本组成

控制系统的基本组成如图 1-1 所示。

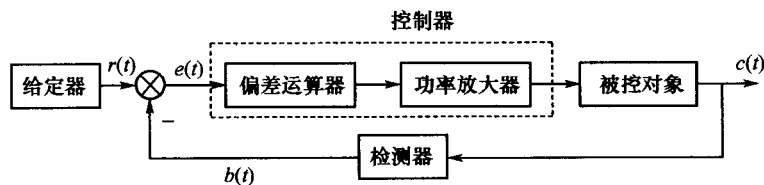


图 1-1 控制系统框图

图中：给定器产生期望的系统输入信号 $r(t)$ ；检测器检测系统输出信号 $c(t)$ ，这里 $b(t) = \alpha c(t)$ ；比较器输出为 $e(t) = r(t) - b(t)$ ；偏差运算器将 $e(t)$ 进行所需要的运算，如比例、比例+积分、比例+积分+微分等运算，以期望得到满意的控制效果；功率放大器将偏差运算器输出的电压信号进行功率放大，以操纵控制对象。

1.1.3 对控制系统的控制性能要求

性能要求：① 稳定性；② 快速性；③ 准确性；④ 抗扰性。

1.1.4 控制系统的分类

1. 按控制要求分类

(1) 恒值调节系统：给定输入信号不变或变化缓慢，主要控制问题是如何提高抗扰性。

(2) 随动控制系统：输入信号变化是随机的，且变化剧烈，主要控制问题是如何提高跟踪的快速性。

2. 按数学模型分类

动态系统要用微分方程来描述，输出与输入的关系与它们的导数有关；静态系统要用代数方程来描述，输出与输入的关系与它们的导数无关。

分类：①线性定常动态系统和线性定常静态系统；②非线性定常动态系统和非线性定常静态系统；③线性时变动态系统和线性时变静态系统；④非线性时变动态系统和非线性时变静态系统。

1.1.5 反馈控制系统的工作原理

以无静差恒值调速系统为例，阐述反馈控制系统的基本结构和工作原理。

1. 工作原理图(图 1-2)

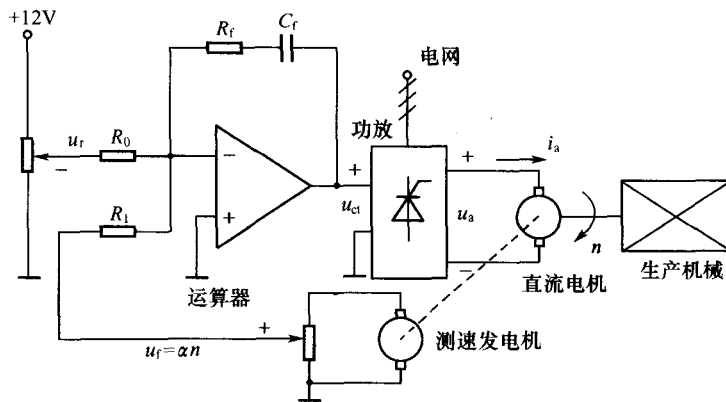


图 1-2 直流电机调速系统工作原理图

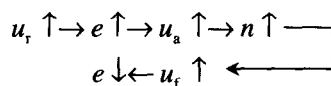
图中： u_r 为转速给定信号电压(0~10V)； $u_f = \alpha n$ 为转速反馈信号电压(0~10V)， $\alpha = 0.01 \text{ V} \cdot \text{min/r}$ ； $e = u_r - u_f$ 为转速偏差信号电压； u_{ct} 为运算放大器输出信号，功率放大器输入信号(0~10V)； $u_a = k_s u_{ct}$ (0~220V) 为直流机电枢电压； n 为电机转速(0~1000r/min)。

2. 稳定过程和调节过程

当 u_r 不变时， n 也不变，这时 $e = 0$ ， $n = \frac{u_r}{\alpha}$ ，转速也不变。

(1) 当 u_r 增大或减小时, 即 $e = u_r - u_f \neq 0$ 时, 即 $n \neq \frac{u_r}{\alpha}$, 系统转速自动调节, 调节的方向是使 $|e|$ 减小, 最终使 $e = 0$, 即使 $n = \frac{u_r}{\alpha}$ 成立。

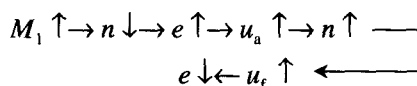
偏差调节过程如下:



调节的最终结果: $e = u_r - u_f = 0$, 即 $n = \frac{u_r}{\alpha}$ 。

(2) 当电机负载轻重发生变化时会使 $e \neq 0$, 即 $n \neq \frac{u_r}{\alpha}$ 。系统自动调节, 最终使 $e = 0$, 即使 $n = \frac{u_r}{\alpha}$ 成立。

偏差调节过程如下:



调节的最终结果: 使 $n = \frac{u_r}{\alpha}$ 。

1.1.6 拉普拉斯变换

在自动控制原理中, 常借助于拉普拉斯变换和反变换, 求解线性定常动态系统的微分方程。

1. 关于拉普拉斯变换的积分下限问题

(1) 在自动控制系统中, 其输入信号常含有 $\delta(t)$ 函数;

(2) 求解线性定常微分方程时, 常给定 0_- 初始条件。

由于上述两个原因, 拉普拉斯变换的积分下限要用 “ 0_- ”, 即

$$F(s) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{0_-}^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (1-1)$$

为了书写简单起见, 式(1-1)的积分下限常写成 “0”, 但是要记住: 下限是 “ 0_- ”, 而不是 “ 0_+ ”, 也不是 “0”。

2. 关于拉普拉斯变换的几个定理

1) 线性定理

如果 $L[f_1(t)] = F_1(s)$, $L[f_2(t)] = F_2(s)$, a, b 为常数, 则有

$$L[af_1(t) + bf_2(t)] = aF_1(s) + bF_2(s) \quad (1-2)$$

2) 微分定理

如果 $L[f(t)] = F(s)$, 则有

$$\begin{aligned}
L[\dot{f}(t)] &= sF(s) - f(0_-) \\
L[\ddot{f}(t)] &= s^2 F(s) - sf(0_-) - \dot{f}(0_-) \\
&\vdots \\
L[f^{(n)}(t)] &= s^n F(s) - s^{n-1} f(0_-) - \cdots - sf^{(n-2)}(0_-) - f^{(n-1)}(0_-)
\end{aligned} \quad (1-3)$$

3) 积分定理

如果 $L[f(t)] = F(s)$, 则有

$$\begin{aligned}
L\left[\int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau\right] &= \frac{F(s)}{s} + \frac{f^{-1}(0_-)}{s}^{(1)} \\
L\left[\int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t f(\tau)(d\tau)^2\right] &= \frac{F(s)}{s^2} + \frac{f^{-1}(0_-)}{s^2} + \frac{f^{-2}(0_-)}{s} \\
&\vdots \\
L\left[\overbrace{\int_{-\infty}^t \cdots \int_{-\infty}^t}^{n重} f(\tau)(d\tau)^n\right] &= \frac{F(s)}{s^n} + \frac{f^{(-1)}(0_-)}{s^n} + \frac{f^{(-2)}(0_-)}{s^{n-1}} + \cdots + \frac{f^{(-n)}(0_-)}{s}
\end{aligned} \quad (1-4)$$

式中 $f^{(-1)}(0_-) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{-\infty}^{0_-} f(\tau) d\tau$

$$f^{(-2)}(0_-) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{-\infty}^{0_-} \int_{-\infty}^{0_-} f(\tau)(d\tau)^2$$

$\vdots$

$$f^{(-n)}(0_-) \stackrel{\text{def}}{=} \overbrace{\int_{-\infty}^{0_-} \cdots \int_{-\infty}^{0_-}}^{n重} f(\tau)(d\tau)^n$$

当 $f^{(-1)}(0_-) = f^{(-2)}(0_-) = \cdots = f^{(-n)}(0_-) = 0$ 时, 则必有

$$L\left[\overbrace{\int_{-\infty}^t \cdots \int_{-\infty}^t}^{n重} f(\tau)(d\tau)^n\right] = \frac{F(s)}{s^n} \quad (1-5)$$

注意: 如果 $f(t) = g(t) \cdot 1(t)$, 则必有 $f^{(-1)}(0_-) = f^{(-2)}(0_-) = \cdots = f^{(-n)}(0_-) = 0$ 。

4) 初值定理

如果 $L[f(t)] = F(s)$, 且 $\lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$ 存在, 则有

$$f(0_+) = \lim_{t \rightarrow 0_+} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s) \quad (1-6)$$

5) 终值定理

如果 $L[f(t)] = F(s)$, 且 $\lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$ 存在, 则有

$$f(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s) \quad (1-7)$$

6) 位移定理

(1) t 域位移定理:

如果 $L[f(t)] = F(s)$ ，则有

$$L[f(t-\tau) \cdot 1(t-\tau)] = e^{-s\tau} F(s) \quad (1-8)$$

(2) s 域位移定理:

如果 $L[f(t)] = F(s)$ ，则有

$$L[e^{at} f(t)] = F(s-a) \quad (1-9)$$

7) 相似定理

如果 $L[f(t)] = F(s)$ ，则有

$$L\left[f\left(\frac{t}{a}\right)\right] = aF(as) \quad (1-10)$$

8) 卷积定理

如果 $L[f_1(t)] = F_1(s)$ ， $L[f_2(t)] = F_2(s)$ ，则有

$$F_1(s)F_2(s) = L\left[\int_0^t f_1(t-\tau)f_2(\tau)d\tau\right] = L\left[\int_0^t f_2(t-\tau)f_1(\tau)d\tau\right] \quad (1-11)$$

式中 $\int_0^t f_1(t-\tau)f_2(\tau)d\tau \stackrel{\text{def}}{=} f_1(t) * f_2(t)$ ，即 $f_1(t)$ 与 $f_2(t)$ 的卷积；

$\int_0^t f_2(t-\tau)f_1(\tau)d\tau \stackrel{\text{def}}{=} f_2(t) * f_1(t)$ ，即 $f_2(t)$ 与 $f_1(t)$ 的卷积。

9) $tf(t)$ 及 $\frac{1}{t}f(t)$ 的拉普拉斯变换

如果 $L[f(t)] = F(s)$ ，则有

$$L[tf(t)] = -\frac{d}{ds} F(s) \quad (1-12)$$

$$L\left[\frac{1}{t}f(t)\right] = \int_s^\infty F(s)ds \quad (1-13)$$

3. 基本拉普拉斯变换表(表 1-1)

表 1-1 用于部分分式法求时域响应

$F(s)$	$f(t)$
1	$\delta(t)$
s^n	$\delta^{(n)}(t)$
$\frac{1}{s}$	$1(t)$
$\frac{1}{s^n}$	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!} \cdot 1(t)$
$\frac{1}{s+a}$	e^{-at}
$\frac{1}{(s+a)^n}$	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!} \cdot e^{-at}$

(续)

$\frac{c+jd}{(s+\sigma)-j\omega} + \frac{c-jd}{(s+\sigma)+j\omega}$	$2\sqrt{c^2+d^2}e^{-\sigma t} \cos\left(\omega t + \arctan \frac{d}{c}\right)$
$\frac{e+jf}{[(s+\sigma)-j\omega]^n} + \frac{e-jf}{[(s+\sigma)+j\omega]^n}$	$2\sqrt{e^2+f^2} \frac{t^{n-1}}{(n-1)!} e^{-\sigma t} \cos\left(\omega t + \arctan \frac{f}{e}\right)$
$\frac{ms+n}{s^2+\omega^2} = m \frac{s}{s^2+\omega^2} + \frac{n}{\omega} \frac{\omega}{s^2+\omega^2}$	$m \cos \omega t + \frac{n}{\omega} \sin \omega t$
$\frac{ms+n}{(s+\sigma)^2+\omega^2} = m \frac{s+\sigma}{(s+\sigma)^2+\omega^2} + \frac{n-m\sigma}{\omega} \frac{\omega}{(s+\sigma)^2+\omega^2}$	$e^{-\sigma t} \left[m \cos \omega t + \frac{n-m\sigma}{\omega} \sin \omega t \right]$

1.1.7 拉普拉斯变换法求解线性定常微分方程

1. $m < n$ 的 n 阶微分方程经典解法

给定

$$\begin{cases} c^{(n)}(t) + a_{n-1}c^{(n-1)}(t) + \cdots + a_1\dot{c}(t) + a_0c(t) = f(t) (t > 0), c(0_+), \dot{c}(0_+), \dots, c^{(n-1)}(0_+) \\ f(t) = b_m r^{(m)}(t) + b_{m-1}r^{(m-1)}(t) + \cdots + b_1\dot{r}(t) + b_0r(t) \end{cases} \quad (1-14)$$

非齐次方程的解

$$c(t) = \text{齐次方程的通解} + \text{非齐次方程的特解} \quad (1-15)$$

齐次方程通解中所含的 n 个待定系数, 可由 $c(t)$ 及其 0_+ 初始条件确定。在电路中, 当已知 0_- 初始条件时, 可由换路定律求得 0_+ 初始条件。这种解法比较繁琐, 而在自动控制原理中已不用, 而是用拉普拉斯变换法求解线性定常微分方程。

2. $m < n$ 的 n 阶微分方程拉普拉斯变换解法

给定

$$\begin{cases} c^{(n)}(t) + a_{n-1}c^{(n-1)}(t) + \cdots + a_1\dot{c}(t) + a_0c(t) = \\ \quad b_m r^{(m)}(t) + b_{m-1}r^{(m-1)}(t) + \cdots + b_1\dot{r}(t) + b_0r(t) \\ c(0_-), \dot{c}(0_-), \dots, c^{(n-1)}(0_-); r(0_-) = \dot{r}(0_-) = \cdots = r^{(m-1)}(0_-) = 0 \end{cases} \quad (1-16)$$

利用微分定理, 对微分方程两边取拉普拉斯变换, 整理后可得

$$C(s) = \frac{B(s)}{A(s)} R(s) + \frac{E_0(s)}{A(s)} \quad (1-17)$$

式中

$$\begin{cases} A(s) = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_1s + a_0 \\ B(s) = b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \cdots + b_1s + b_0 \\ E_0(s) = c(0_-)s^{n-1} + [\dot{c}(0_-) + a_{n-1}c(0_-)]s^{n-2} + [\ddot{c}(0_-) + a_{n-1}\dot{c}(0_-) + a_{n-2}c(0_-)]s^{n-3} + \\ \quad \cdots + [c^{(n-1)}(0_-) + a_{n-1}c^{(n-2)}(0_-) + \cdots + a_2\dot{c}(0_-) + a_1c(0_-)] \\ c(t) = L^{-1}\left[\frac{B(s)}{A(s)}R(s)\right] + L^{-1}\left[\frac{E_0(s)}{A(s)}\right] \quad (t > 0) \end{cases} \quad (1-18)$$

式中 $c(t)$ 为全响应; $L^{-1}\left[\frac{B(s)}{A(s)}R(s)\right]$ 为零状态响应; $L^{-1}\left[\frac{E_0(s)}{A(s)}\right]$ 为零输入响应。

这种解法,不需要从 0_- 到 0_+ 的初始状态的变换,利用拉普拉斯变换法比经典法方便多了。

3. $m < n$ 的二阶系统 0_+ 初始条件的求法

(1) 当已知时域解时,求 0_+ 初始条件

$$c(0_+) = c(t)\Big|_{t=0_+}; \quad \dot{c}(0_+) = \dot{c}(t)\Big|_{t=0_+} \quad (1-19)$$

(2) 当已知复频域解时,求 0_+ 初始条件

$$c(0_+) = \lim_{s \rightarrow \infty} sC(s); \quad \dot{c}(0_+) = \lim_{s \rightarrow \infty} s[sC(s) - c(0_+)] \quad (1-20)$$

4. $m < n$ 二阶系统 0_+ , 0_- 初始条件间的关系

设

$$\begin{cases} \ddot{c}(t) + a_1\dot{c}(t) + a_0c(t) = b_1\dot{r}(t) + b_0r(t) \\ c(0_-), \dot{c}(0_-); r(0_-) = 0 \end{cases} \quad (1-21)$$

0_- 和 0_+ 初始条件间的关系

$$\int_{0_-}^{0_+} \ddot{c}(t)dt + a_1 \int_{0_-}^{0_+} \dot{c}(t)dt + a_0 \int_{0_-}^{0_+} c(t)dt = b_1 \int_{0_-}^{0_+} \dot{r}(t)dt + b_0 \int_{0_-}^{0_+} r(t)dt \quad (1-22)$$

(1) 当 $f(t) = b_1\dot{r}(t) + b_0r(t)$ 中不含 $\delta(t)$ 、 $\delta(t)$ 函数时,如 $r(t) = t \cdot 1(t)$ 或 $r(t) = \frac{1}{2}t^2 \cdot 1(t)$, $f(t)$ 中就不含 $\delta(t)$ 、 $\delta(t)$ 。在 $t=0$ 处, $c(t)$ 、 $\dot{c}(t)$ 均无跳变,则必有

$$c(0_+) = c(0_-), \quad \dot{c}(0_+) = \dot{c}(0_-) \quad (1-23)$$

(2) 当 $f(t) = b_1\dot{r}(t) + b_0r(t)$ 中不含 $\delta(t)$ 但含 $\delta(t)$ 函数时,如 $r(t) = 1(t)$, $f(t)$ 就不含 $\delta(t)$ 但含 $\delta(t)$ 。在 $t=0$ 处, $c(t)$ 无跳变,但 $\dot{c}(t)$ 存在有限跳变,则

$$c(0_+) = c(0_-), \quad \dot{c}(0_+) \neq \dot{c}(0_-) \quad (1-24)$$

由 $[\dot{c}(0_+) - \dot{c}(0_-)] = b_1[r(0_+) - r(0_-)]$ 得

$$\dot{c}(0_+) = \dot{c}(0_-) + b_1 \quad (1-25)$$

(3) 当 $f(t) = b_1\dot{r}(t) + b_0r(t)$ 中含 $\delta(t)$ 、 $\delta(t)$ 函数时,如 $r(t) = \delta(t)$, $f(t)$ 函数就属于这种情况。在 $t=0$ 处, $c(t)$ 、 $\dot{c}(t)$ 均存在有限跳变。

$$c(0_+) \neq c(0_-), \quad \dot{c}(0_+) \neq \dot{c}(0_-) \quad (1-26)$$

但满足下列关系

$$[\dot{c}(0_+) - \dot{c}(0_-)] + a_1[c(0_+) - c(0_-)] = b_0 \quad (1-27)$$

1.1.8 自动控制原理的研究内容和方法

1. 研究内容

1) 系统分析

对于给定的系统,分析其稳定性、响应的快速性、稳态的准确性、抗扰动性。总之,分析系统结构参数对系统工作性能的影响。

2) 系统综合

在给定系统的固有部分结构、参数的基础上，再增添部分环节，使改造后的系统满足期望的性能指标要求。

2. 研究方法

1) 古典控制理论

线性定常系统的研究方法归结为：一个函数，即传递函数；三个方法，即时域法、根轨迹法、频率法。

非线性定常系统的研究方法：描述函数法和相平面法。

2) 现代控制理论

基本研究方法的基础是状态空间法。目前，自动控制系统的分析和综合已广泛采用计算机辅助分析和计算机辅助设计方法。

1.2 例题详解

A-1-1 某温度控制系统如图 A-1-1 所示。

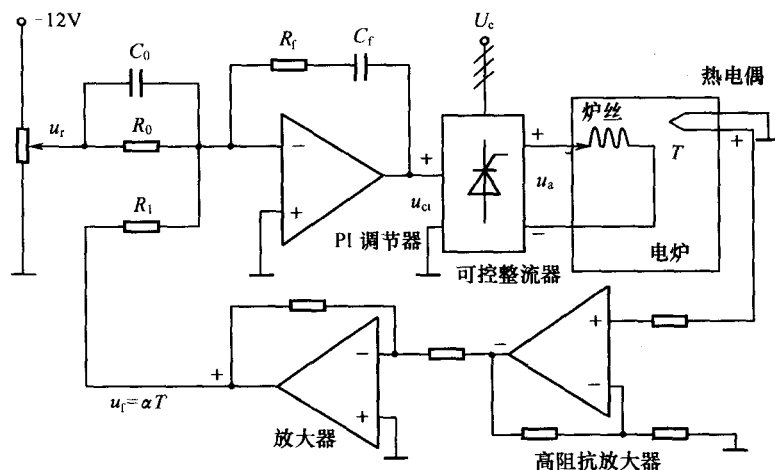


图 A-1-1 温度控制系统原理图

- (1) 指出本系统被控制的物理量是什么？
- (2) 指出给定输入量、负反馈输入量、偏差输入量及系统输出量。
- (3) 画出系统方框图并指出各部分的作用。
- (4) 指出扰动输入量。

[解答]

- (1) 由于反馈信号与炉温成正比，即 $u_f = \alpha T$ ，所以被控制量是炉内温度 T 。
- (2) 给定输入量 u_r ，用于设定炉内温度；反馈输入量 u_f ，用于反映炉内实际温度； $e = u_r - u_f$ ，代表设定炉温和实际炉温的差；系统输出量是实际炉温 T 。
- (3) 系统方框图如图 A-1-2 所示。

图中：

- (1) 比较器——比较 u_r 和 u_f 的大小，得出 $e = u_r - u_f$ 。

- (2) PI 调节器——完成对 e 的 PI 运算。
- (3) 功率放大器——将偏差运算器输出的信号进行功率放大，以实现控制对炉内温度的控制。
- (4) 电炉——控制对象。
- (5) 热电偶——检测炉内的温度。
- (6) 前置放大器——将热电偶检测到的微弱信号通过电压放大器放大，得到 u_f 。

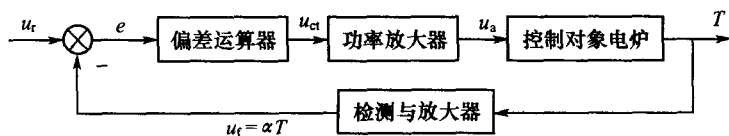


图 A-1-2 温度控制系统方框图

A-1-2 图 A-1-3 所示是直流发电机负载电压恒值调节系统，试画出系统的结构框图。

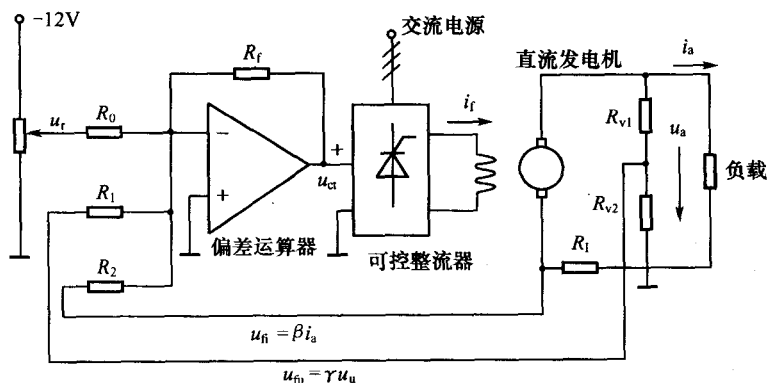


图 A-1-3 负载电压恒值调节系统原理图

[解答] 这是一个由负载电压负反馈加负载电流扰动补偿的控制系统。其结构框图如图 A-1-4 所示。

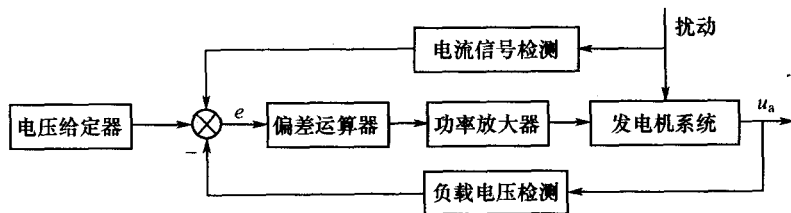


图 A-1-4 负载电压恒值调节系统框图

A-1-3 下列各系统输入为 $r(t)$ ，输出为 $c(t)$ 。试按线性非线性、定常时变、动态静态划分下列系统各属于哪一类？

- (1) $\ddot{c}(t) + a_1 \dot{c}(t) + a_0 c(t) = b_1 \dot{r}(t) + b_0 r(t)$; (2) $\dot{c}(t) + 2c(t) + 3 \int_{-\infty}^t c(\tau) d\tau = 4r(t) + 8$;
- (3) $c(t) = br(t)$; (4) $t^2 \dot{c}(t) + e^{-t} c(t) = r(t) \sin \omega t$; (5) $c(t) = \sqrt{tr(t)}$;
- (6) $\dot{c}(t) + 3c^2(t) = 4r(t)$; (7) $tc(t) + e^{-t} \sqrt{c(t)} = r(t)$;