



高等教育学习辅导丛书

自动控制理论自学同步训练习题与精解

杨京燕 主编

GAODENGJIAOYU XUEXI FUDAO CONGSHU

中国电力出版社

高等教育学习辅导丛书

自动控制理论

自学同步训练习题与精解

杨京燕 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书为学习辅导类书籍,紧扣高教自学考试指导委员会颁布的自学考试大纲及全国自考委组织编写的指定教材。本书从应试的角度出发,全面总结、归纳了《自动控制理论》课程的基本内容、基本概念、各章重点,以及这些概念在解题中的应用。各章均选择典型例题,给出了解题思路和解题方法。章末附相应的习题和参考答案。

本书可供参加高教自考的人员学习使用,也可供相关专业的学生、技术人员参加其他考试使用。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论自学同步训练习题与精解/杨京燕主编.
北京:中国电力出版社,2003

ISBN 7-5083-1773-4

I.自… II.杨… III.自动控制理论-高等教育-自学考试-解题 IV.TP13-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 086115 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>)

航远印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行各地新华书店经售

*

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 11.75 印张 264 千字

印数 0001—3000 册 定价 19.00 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

本书是全国高等教育自学考试电力系统及其自动化专业（独立本科）《自动控制理论》（正文中讲义所指即为此书）课程的配套辅导用书，是针对高自考学生特点，及时解决学习中常面临的困难，大大提高应试能力的好帮手，也可作为自动控制专业本专科生复习考试参考之用。

在本书编写过程中，依据自学考试大纲，按照指定教材的结构，以章为单位，每章设“内容提示”、“习题讲解”、“同步练习”、“参考答案”四部分。“内容提示”对该章的重点难点进行了总结归纳。“习题讲解”针对指定教材的习题进行详细解答。“同步练习”将主要知识点以考试题型的形式编写，包括“名词解释”、选择题、填空题、问答题及应用题几类题型。“参考答案”给出了同步练习中所有试题答案。在“习题解答”和“同步练习”中，针对重点、难点加了相应的评注，以方便读者对题目的理解和掌握。

本书给出了两套模拟题及答案，以方便应试者检验学习效果。

根据自学考试大纲的要求，学生须完成相应的实验，针对高自考学生工作单位分散，实验手段不足的问题，本书以目前流行的 MATLAB 软件为基础，编写了详细的实验指导书。学生按照指导书列出的步骤，可方便完成大纲中要求的 5 个实验，并依思考题的提示写出实验报告。

在本书编写过程中，融入了编者从事本课程教学工作二十余年的经验，同时又参考了国内高校广泛应用的相关教材，在此向其作者表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不少缺点和不足之处，敬请读者和同行批评指正。

目 录

前言

第 1 章 概 论	1
1.1 内容提示	1
1.2 习题讲解	3
1.3 同步练习	4
1.4 参考答案	5
第 2 章 自动控制系统的数学模型	7
2.1 内容提示	7
2.2 习题讲解	16
2.3 同步练习	28
2.4 参考答案	30
第 3 章 时域分析法	32
3.1 内容提示	32
3.2 习题讲解	39
3.3 同步练习	45
3.4 参考答案	48
第 4 章 频域分析法	50
4.1 内容提示	50
4.2 习题讲解	58
4.3 同步练习	65
4.4 参考答案	67
第 5 章 稳定性分析	69
5.1 内容提示	69
5.2 习题讲解	72
5.3 同步练习	82
5.4 参考答案	85
第 6 章 根轨迹法	87
6.1 内容提示	87
6.2 习题讲解	90
6.3 同步练习	98
6.4 参考答案	100

第 7 章 自动控制系统的设计和校正	104
7.1 内容提示	104
7.2 习题讲解	108
7.3 同步练习	115
7.4 参考答案	118
第 8 章 状态空间分析法	121
8.1 内容提示	121
8.2 习题讲解	129
8.3 同步练习	138
8.4 参考答案	139
第 9 章 基于 MATLAB 的自动控制系统实验	142
9.1 受控对象动态特性实验	142
9.2 典型环节的动态特性实验	145
9.3 环节或受控对象的频率特性实验	150
9.4 控制系统根轨迹图绘制实验	152
9.5 控制系统的分析和校正实验	154
9.6 实验说明	161
附录 模拟试卷 (一)	173
模拟试卷 (二)	177

第 1 章 概 论

- ☆ 控制系统中常用术语
- ☆ 控制系统组成及分类
- ☆ 负反馈控制系统的基本原理
- ☆ 对控制系统的基本要求

1.1 内 容 提 示

一、自动控制和自动控制系统的基本概念

自动控制：应用控制装置自动地、有目的地控制或调节机器设备或生产过程，使其具有希望的状态或功能。

自动控制系统：能够实现自动控制任务的、由控制器和被控对象等部件组成的系统。

参考（给定）输入量：作用于系统输入端，并作为控制依据的物理量。

输出量（被控量）：要求实现自动控制的物理量。

控制对象：要求实现自动控制的机器设备或生产过程。

扰动量：破坏系统输入、输出之间预定关系的物理量。

控制器：对系统起控制作用的设备总体。

二、自动控制系统的分类及基本组成

（一）按自动控制系统结构分类

开环控制系统：输出量不参与系统的控制，即输出量（被控量）与输入量之间不存在反馈通道的系统。

（1）按给定值控制。见图 1-1（a），信号由给定值向输出量单向传送。

（2）前馈控制系统。见图 1-1（b），直接根据扰动信号进行调节，可以补偿某些可测

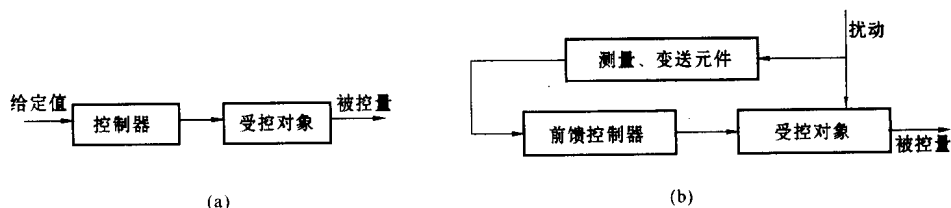


图 1-1 开环控制系统典型方框图

（a）按给定信号控制的方框图；（b）前馈控制系统的方框图

扰动对系统输出量的影响，注意到输出量并不参与系统的控制，所以仍属于开环控制系统。

(3) 开环控制系统的特点。结构简单易实现，但没有自动补偿各种扰动及特性参数变化对系统输出量影响的能力，即使前馈控制系统对不可测扰动也无能为力，用于控制精度不高的场合。

闭环控制系统：又称反馈控制系统。输出量直接或间接地反送到输入端，参与系统控制，即输出量（被控量）与输入量之间存在反馈通道的系统。图 1-2 为闭环控制系统方框图。

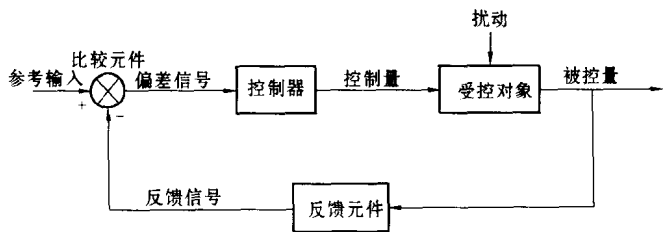


图 1-2 闭环控制系统方框图

(1) 判断一个系统是否是闭环控制系统应掌握三个要素：取得偏差、改造偏差、按偏差进行反馈调节。

取得偏差：参考输入信号与反馈信号比较得到偏差信号，由测量变送器组成的反馈元件和比较元件（用“⊗”表示）共同完成。反馈信号是被控量的函数，注意进行比较的信号必须有相同的量纲。

改造偏差：由控制器完成。将偏差信号改造成具有合适的控制规律和足够的功率的控制量，作用于受控对象。

按偏差进行反馈调节：当受控对象受到各种扰动引起被控量变化时，测出偏差量，按偏差进行控制和调节，直到偏差量接近于或等于零为止。

(2) 闭环控制系统的特点。可以按偏差自动调节，抗干扰性能好，控制精度高。系统参数应选择适当，否则不能正常工作。

前馈—反馈复合控制系统：在反馈控制系统的基础上，增加了对扰动信号的前馈补偿通路，属于闭环控制和前馈控制方式的组合。前馈补偿通路可及时消除扰动的影响，包括低频强扰动，反馈回路可保证控制精度。

(二) 其他分类方式

其他分类方式如表 1-1 所示。

表 1-1 其他分类方式归类表

分 类 方 式	系 统 名 称	主 要 特 点
按给定值信号的特点分类	恒值系统	输入量为常值，要求出现扰动时，被控制量等于给定常值
	随动系统	输入量随时间任意变化，要求被控制量跟踪输入量变化
	程序控制系统	输入量为已知函数，要求被控制量按此函数变化

续表

分 类 方 式	系 统 名 称	主 要 特 点
按系统元件的特性分类	线性控制系统	各元件的输入、输出特性为线性，可用线性微分方程描述的系统，线性系统服从于叠加原理
	非线性控制系统	一个或以上为非线性元件的系统，用非线性微分方程描述，不服从叠加原理
按控制信号的形式分类	连续控制系统	各物理量是时间的连续函数
	离散控制系统	在时间上离散的系统

三、对自动控制系统的性能要求

稳定性：系统能够工作的首要条件。

快速性：指系统的响应速度应尽可能快。

准确性：指过渡过程结束后，被控量应尽可能准确地达到希望值。

总之，系统应能达到稳、快、准的要求，实际上它们相互之间会产生矛盾，因此要研究怎样兼顾这三方面的性能，以满足实际系统的需求。

1.2 习 题 讲 解

1-1 解释下列名词术语：自动控制系统、受控对象、扰动、给定值、参考输入、反馈。

解 自动控制系统——受控对象和控制装置的总体。

受控对象——要求实现自动控制的机器、设备和生产过程。

扰动——除给定值之外，引起被控制量变化的各种外界原因。

给定值（参考输入）——作用于控制系统输入端，并作为控制依据的物理量。

反馈——将输出量直接或间接的反送至输入端，并与输入量比较，使系统按其差值进行调节，使偏差减小或消除。

1-2 开环控制系统和闭环控制系统有什么优缺点？

解 开环控制系统结构简单易实现，响应速度快，没有稳定问题，但不能自动纠正或减小各种扰动引起的输入量与被控制量间的偏差，只能根据给定值或可以测量到的扰动量进行补偿。

闭环控制系统利用反馈原理可自动纠正或减小输出量与被控制量间的偏差，抗干扰能力强，可用较低廉的元件构成精度较高的控制系统，但闭环控制系统所面临的研究课题较开环控制系统复杂，例如调节的稳定性问题、响应速度以及控制精度等问题。

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？

解 反馈控制系统是基于反馈原理构成的闭环系统。

前馈控制系统是一种按干扰进行补偿的开环控制系统，(测量的值是干扰量)，用于抑制可测量到的干扰对系统的影响。

前馈—反馈复合控制系统是在闭环反馈控制系统的基础上增加了对扰动进行补偿的前馈控制部分，同时按给定值和主要干扰进行控制，兼有开环控制和闭环控制两者的优点。

1-4 反馈控制系统的动态过程（动态特性）由哪几种类型？生产过程希望的动态特性是什么？

解 反馈控制系统对阶跃响应的动态过程有：

- (1) 单调指数上升过程。无振荡但响应速度较慢。
- (2) 正弦衰减振荡过程。有振荡但响应速度较单调指数上升过程快，合理地选择系统参数，可使其具有适宜的超调量和较快的响应速度，是生产过程常希望的动态特性。
- (3) 等幅振荡过程。幅值不衰减的正弦振荡过程，此时系统工作在稳定与不稳定的边界。
- (4) 渐扩振荡过程。随着时间的推移，输出幅值越来越大的振荡过程，此时系统工作在不稳定状态。

1-5 举出几个生产过程自动控制系统常遇到的非线性元件，并说明是什么类型的非线性元件。

解 带死区（不灵敏区）的元件、带饱和特性的元件、带继电特性的元件、变放大系数的元件、带间隙特性的元件等。

1-6 对自动控制系统基本的性能要求是什么？

解 对自动控制系统基本的性能要求是：

稳定性。首要条件。

快速性。动态过程的要求，超调量要小，响应速度要快。

准确性。稳态要求，稳态误差要小。

1.3 同步练习

一、名词解释

1. 自动控制
2. 自动控制系统
3. 开环控制系统
4. 闭环控制系统
5. 前馈—反馈控制系统

二、多项选择题

1. 开环控制系统的输出

- A. 参与系统的反馈调节 B. 不参与系统的反馈调节
C. 到输入有反馈通路 D. 到输入无反馈通路
2. 闭环控制系统的输出
A. 参与系统的反馈调节 B. 不参与系统的反馈调节
C. 到输入有反馈通路 D. 到输入无反馈通路
3. 前馈控制系统是
A. 闭环控制系统 B. 开环控制系统
C. 按扰动信号进行补偿的系统 D. 能抑制不可测量的扰动的系统

三、填空题

1. 常规控制器由 _____ 元件、 _____ 元件、 _____ 元件和 _____ 元件组成。
2. 对自动控制系统基本性能的要求是 _____ 性、 _____ 性和 _____ 性。

四、问答题

1. 开环控制系统和闭环控制系统的本质区别是什么？
2. 自动控制系统一般有多少种分类方式？

五、应用题

根据图 1-3 所示的电动机速度控制系统工作原理图：

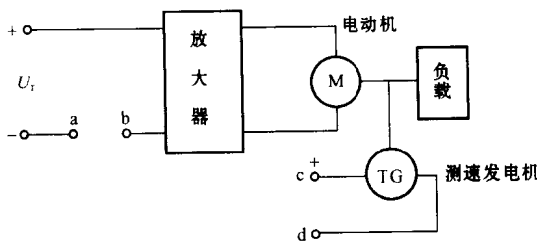


图 1-3 电动机速度控制系统工作原理图

- (1) 将 a、b、c、d 用连连接成负反馈控制系统；
(2) 画出系统方框图。

1.4 参 考 答 案

一、名词解释

1. 自动控制——应用自动控制装置自动的、有目的地控制或调节机器设备或生产过程，使之按照期望的性能指标运行。
2. 自动控制系统——完成自动控制任务的所需部件按一定方式连接构成的系统。
3. 开环控制系统——系统控制器的输入信号中不包含受控对象输出端的反馈信号的系统。
4. 闭环控制系统——系统控制器的输入信号中包含受控对象输出端的反馈信号的系统。

5. 前馈—反馈控制系统——在闭环控制系统的基础上加入对主扰动补偿环节的系统。

【评注】 理解常用名词术语的含义，正确叙述即可，不必死记硬背。

二、多项选择题

1. B、D 2. A、C 3. A、C

三、填空题

1. 定值 比较 放大 反馈

2. 稳定 快速 准确

四、问答题

1. 开环控制系统和闭环控制系统的本质区别是输出量是否参与控制，从输出端到输入端有无反馈通路。

2. 自动控制系统一般按结构分为开环控制系统和闭环控制系统；按给定输入信号分为恒值系统、随动系统和程序控制系统；按元件的性质分为线性控制系统和非线性控制系统；按控制信号的形式分为连续控制系统和离散控制系统。

五、应用题

(1) 将 a、b、c、d 用连线接成负反馈控制系统，如图 1-4 所示。

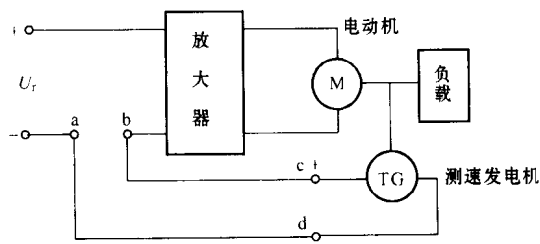


图 1-4 电动机速度负反馈控制系统图

(2) 画出系统方框图如图 1-5 所示。

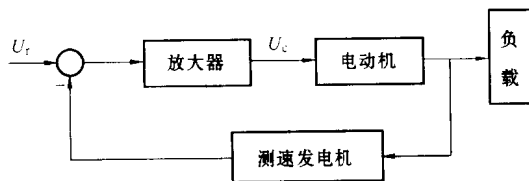


图 1-5 电动机速度控制系统方框图

第 2 章 自动控制系统的数学模型

- ☆ 拉氏变换
- ☆ 传递函数
- ☆ 方框图等效转换
- ☆ 信号流图及 Mason 公式
- ☆ 基本控制作用

2.1 内 容 提 示

数学模型：自动控制系统输入、输出及内部各物理量之间动态关系的数学表达式。

常用数学模型：解析式形式的数学模型有微分方程、差分方程、传递函数、状态方程；常见图形方式的数学模型有方框图、信号流图、频率特性。

建立数学模型的目的：用于分析系统的性能，不同的分析方法应采用不同的数学模型，同一系统可用不同的数学模型表示。

一、微分方程、拉氏变换和传递函数

(一) 系统微分方程的建立步骤

(1) 确定系统各元件的输入量和输出量。

(2) 根据元件所遵循的定律，列写原始方程式。注意考虑负载效应。系统微分方程在一定条件下可适当进行简化，略去某些次要因素。

(3) 消去中间变量，得到描述系统输入、输出关系的微分方程式。

(二) 拉氏变换

拉氏变换的作用：将微分方程经拉氏变换变为以 S 为变量的代数方程，简化了运算，是经典控制理论最重要的数学工具。

拉氏变换的定义、性质和定理：已知原函数 $x(t)$ ，求象函数 $X(s)$ 的拉氏正变换，关系式为 $X(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st}dt$ ，其逆运算称为拉氏反变换，关系式为 $x(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} X(s)e^{st}ds$ ，简记为 $x(t) = L^{-1}[X(s)]$ 。

拉氏变换的性质和定理列于表 2-1，常用函数的拉氏变换列于表 2-2。

表 2-1 拉氏变换的性质和定理

定 理	表 达 式	说 明
线性性质	$L[ax_1(t) \pm bx_2(t)] = aX_1(s) \pm bX_2(s)$	其中 $a、b$ 为常数

续表

定 理	表 达 式	说 明
微分定理	$L[x^{(n)}(t)] = s^n X(s) - [s^{n-1}x(0) + s^{n-2}\dot{x}(0) + \cdots + x^{(n-1)}(0)]$	当 $n-1$ 个初值为零时, 中括号部分等于零
积分定理	$L\left[\int_0^t \cdots \int_0^{\tau_{n-1}} x(t) dt^n\right] = \frac{1}{s^n} X(s) + \left[\frac{1}{s^{n-1}} x^{(-1)}(0) + \cdots + \frac{1}{s} x^{(-n)}(0)\right]$	当多重初值积分为零时, 中括号部分等于零
终值定理	$x(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sX(s)$	常用于求系统的稳态误差
初值定理	$x(0) = \lim_{t \rightarrow 0} x(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sX(s)$	
延迟定理	$L[x(t-\tau)] = e^{-s\tau} X(s)$	

表 2-2

拉普拉斯变换对照表

序 号	$x(t)$	$X(s)$
1	单位脉冲 $\delta(t)$	1
2	单位阶跃 $l(t)$	$\frac{1}{s}$
3	单位斜坡 t	$\frac{1}{s^2}$
4	e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
5	te^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$
6	$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
7	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
8	$t^n (n=1, 2, 3, \cdots)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
9	$t^n e^{-at} (n=1, 2, 3, \cdots)$	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
10	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$
11	$\frac{1}{b-a}(be^{-bt} - ae^{-at})$	$\frac{s}{(s+a)(s+b)}$
12	$\frac{1}{ab}\left[1 + \frac{1}{a-b}(be^{-bt} - ae^{-at})\right]$	$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$
13	$e^{-at} \sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
14	$e^{-at} \cos \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$

续表

序 号	$x(t)$	$X(s)$
15	$\frac{1}{a^2}(at - 1 + e^{-at})$	$\frac{1}{s^2(s+a)}$
16	$\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t$	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
17	$\frac{-1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \phi) \quad \phi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$	$\frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
18	$1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \phi) \quad \phi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$	$\frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}$

用拉氏变换和拉氏反变换求解微分方程的步骤:

(1) 对微分方程进行拉氏变换 (常用拉氏变换的线性性质和微分定理), 得到以 s 为变量的代数方程, 方程中的初值设为零。

(2) 整理以 s 为变量的代数方程, 得到系统输出变量的表达式。

(3) 将系统输出变量的表达式展开成部分分式。

(4) 对部分分式进行拉氏反变换 (可查拉氏变换表), 即可得微分方程的解。掌握拉氏反变换的部分分式展开法才能实施步骤 (3)、(4)。

拉氏反变换的部分分式展开法: 设系统输出变量的表达式为 $X(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$, 对分母进行因式分解, 若 $A(s) = 0$ 无重根, 则

$$X(s) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{s + p_i} \quad (2-1)$$

其中

$$A_i = \left[\frac{B(s)}{A(s)} (s + p_i) \right]_{s = -p_i} \quad (2-2)$$

式 (2-1) 经拉氏反变换得

$$x(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-p_i t}$$

若 $A(s) = 0$ 有 r 个重根 p_1 ($r \geq 2$), 则

$$\begin{aligned} X(s) = \frac{B(s)}{A(s)} &= \frac{A_r}{(s + p_1)^r} + \frac{A_{r-1}}{(s + p_1)^{r-1}} + \cdots + \frac{A_1}{(s + p_1)} + \frac{A_{r+1}}{(s + p_{r+1})} \\ &+ \cdots + \frac{A_n}{(s + p_n)} \end{aligned} \quad (2-3)$$

其中待定常数 A_{r+1} 、 A_{r+2} 、 $\cdots$ 、 A_n 为对应单根的系数, 按式 (2-2) 计算, 而 A_r 、 A_{r-1} 、 $\cdots$ 、 A_1 按式 (2-4) 计算

$$A_{r-j} = \frac{1}{j!} \left\{ \frac{d^{(j)}}{ds^j} \left[\frac{B(s)}{A(s)} (s + p_1)^r \right] \right\}_{s = -p_1} \quad (2-4)$$

式 (2-4) 经拉氏反变换得

$$x(t) = \left[\frac{A_r}{(r-1)!} t^{r-1} + \frac{A_{r-1}}{(r-2)!} t^{r-2} + \cdots + A_2 t + A_1 \right] e^{-p_1 t} + \sum_{i=r+1}^n A_i e^{-p_i t} \quad (2-5)$$

(三) 传递函数

传递函数的定义：零初始条件下，系统输出量的拉式变换与输入量的拉式变换之比。

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n} = \frac{B(s)}{A(s)} \quad (n \geq m) \quad (2-6)$$

分子分母均可分解成一阶因式的连乘积，具体有两种标准形式

$$\text{首 1 型:} \quad G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{k \prod_{i=1}^m (s + z_i)}{\prod_{j=1}^n (s + p_j)} \quad (2-7)$$

$$\text{尾 1 型:} \quad G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{K \prod_{i=1}^m (\tau_i s + 1)}{s^v \prod_{j=v+1}^n (T_j s + 1)} \quad (2-8)$$

式中 z_i ——传递函数的零点， $i = 1, 2, \cdots, m$ ；

p_j ——传递函数的极点，又称特征根， $j = 1, 2, \cdots, n$ ；

k ——传递系数 $k = \frac{b_0}{a_0}$ ，又称根轨迹增益；

K ——开环增益。

注意到 $K \neq k$ ，将式 (2-7) 和式 (2-8) 均取 s 趋向于零的极限，得根轨迹增益 k 与开环增益 K 的关系。即

$$K = k \frac{\prod_{i=1}^m |z_i|}{\prod_{j=1}^n |p_j|} \quad (2-9)$$

传递函数的性质：

- (1) 传递函数是以复变量 s 为自变量的有理真分式，即 $m \leq n$ ，且具有实系数。
- (2) 传递函数只与本身结构和参数有关，与输入信号的形式和作用位置无关。
- (3) 传递函数不反应具体的物理系统，不同的物理系统可能有相同的传递函数。
- (4) 传递函数等于系统单位脉冲响应的拉式变换。

因为 $Y(s) = G(s) \times R(s)$ ，而单位脉冲信号的拉式变换等于 1 的缘故，即 $R(s) = 1$ 。

传递函数的局限性：传递函数是一种输入输出的外部描述，传递函数只适用于零初始条件下的线性定常系统，当初始条件不为零时，需另外计入非零初始条件对输出的影响。

传递函数与线性微分方程之间具有相通性，可以互换（令 $s = d/dt$ ）。一个传递函数只能表示系统一个输入信号对一个输出信号的关系，不同的输入信号和输出信号之间的传递函数是不同的。

传递函数的求法：

- (1) 按定义求。已知系统的微分方程，在零初始条件下求输出变量的拉式变换与输入

变量拉式变换的比值。

(2) 用复阻抗法求电路的传递函数。推导电路的传递函数时,可不写微分方程,利用复阻抗直接写出输出等效阻抗与输入等效阻抗之比,即为电网络的传递函数。已知电阻的复阻抗为 R , 电容的复阻抗为 $\frac{1}{Cs}$, 电感的复阻抗为 LS , 利用普通阻抗的串

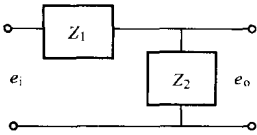


图 2-1 电路图

并联方法可计算电路的等效复阻抗,考虑某电路已经简化成图 2-1 的最简形式,则电路的传递函数为

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)}$$

二、典型环节的动态特性和传递函数

控制系统可看成是由典型环节组成的,研究典型环节的基本特性是研究整个系统的基础,常见的典型环节见表 2-3。

表 2-3 典型环节的动态特性和传递函数归纳表

环 节	动 态 方 程	传 递 函 数	特 点 及 作 用
比例环节	$y(t) = kx(t)$	$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = k$	输入、输出形状相同,幅值不同,为可调增益的放大环节
积分环节	$y(t) = \frac{1}{T} \int_0^t x(t) dt$ 或 $\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1}{T} x(t)$	$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{Ts}$	若输入为误差信号,输出为误差的积累;若误差为零,输出不变;误差加倍,输出值的变化率加倍。误差幅值愈大, T 愈小,积累作用愈强。可控制或消除系统的误差
微分环节	理想 $y(t) = T_d \frac{dx(t)}{dt}$	$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = T_d s$	若输入为误差信号,输出为误差的变化速度,能在误差变大前产生修正,改善系统的动态性能
	实际 $T_d \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_d T_d \frac{dx(t)}{dt}$	$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k_d T_d s}{1 + T_d s}$	
惯性环节	$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$	$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{1 + Ts}$	若输入为阶跃信号,输出为指数上升曲线,表明存在惯性
二阶振荡环节	$T^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\zeta T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$ $\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\omega_n \zeta \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 x(t)$	$G(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1}$ $= \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\omega_n \zeta s + \omega_n^2}$	$\omega_n = \frac{1}{T}$ 称自然振荡频率; ζ 称阻尼比, $0 < \zeta < 1$ 时,阶跃响应为正弦衰减振荡
延迟环节	$y(t) = x(t - \tau)$	$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = e^{-s\tau}$	输入、输出形状相同,只是延迟了时间 τ

三、电气环节的负载效应及传递函数

负载效应:环节的负载对环节传递函数的影响。若两个无源网络串联时,满足输出端负载阻抗为无穷大而输入阻抗为零,称这两个无源网络不存在负载效应,否则存在负载效