



21

21世纪大学课程辅导丛书

自动控制理论

学习指导 典型题解

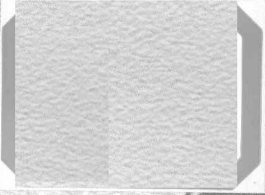
新版

张爱民 葛思攀 杜行俭 杨清宇

42



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



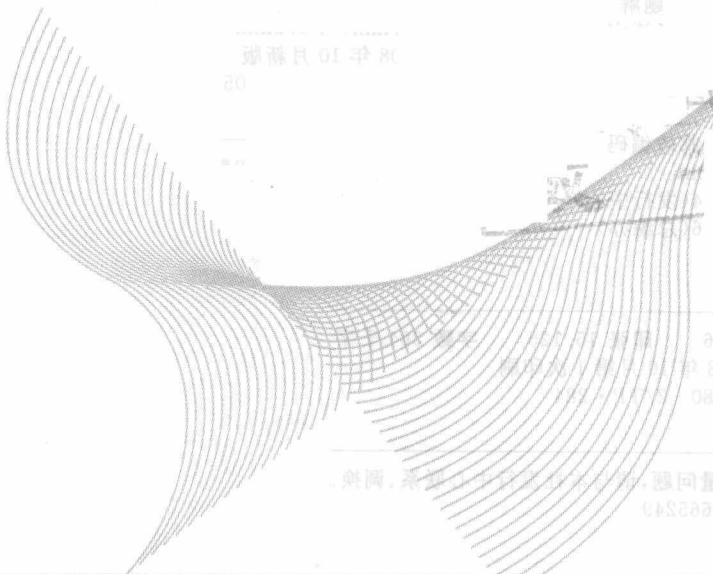
21世纪大学课程辅导丛书

自动控制理论

学习指导—典型题解

新版

张爱民 葛思擘 杜行俭 杨清宇



 西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是本科生自动控制理论课程的辅助教材,覆盖了经典控制理论的主要内容和现代控制理论的部分内容。全书六章分别为:绪论、系统的数学模型、控制系统的时域分析、根轨迹法、频率响应法、状态空间分析法。每章由基本知识点、重点与难点、典型题解析和练习题四部分组成。附录中给出了每章练习题的参考答案,并收录了西安交通大学自控系 2001 年至 2008 年硕士研究生入学考试自动控制理论试题和相应的参考答案。

本书可作为本科生、专科生学习自动控制理论课程的辅助教材,也可作为报考硕士研究生人员的复习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论学习指导典型题解/张爱民,葛思攀,杜行俭,
杨清宇编著. —新版. —西安:西安交通大学出版社,2008.10
(21 世纪大学课程辅导丛书)
ISBN 978-7-5605-1480-2

I. 自… II. ①张…②葛…③杜…④杨… 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(2008)第 149525 号

书 名 自动控制理论学习指导、典型题解
编 著 张爱民 葛思攀 杜行俭 杨清宇
责任编辑 任振国

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82668280
印 刷 陕西元盛印务有限公司

开 本 787mm×1 092mm 1/16 印张 15.125 字数 364 千字
版次印次 2008 年 10 月新版 2008 年 10 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-1480-2/TP·284
定 价 22.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdlgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

丛书总序

“21世纪大学课程辅导丛书”第一版出版已有十年时间,几经再版,深受广大读者的喜爱。为了满足读者朋友的需要,也为了适应高等教育改革的形势和新的教学要求,我们组织作者对本丛书进行了修订,以全新的面貌奉献给大家。

我们出版这套丛书的目的是为普通高等学校理工类专业的大学生提供一流的学习资源,使大家共享一流教师的教学经验和教学成果,更好地学习、掌握基础课和专业基础课知识,为今后的学习和深造打下良好的基础。

西安交通大学是国内仅有的几所具有百年历史的高等学府,是首批进入国家“211工程”建设的七所大学之一,1999年被国家确定为中西部地区唯一一所建设世界知名高水平大学为目标的学校。西安交大历来重视本科生教学,1996年成为全国首家本科教学评估为优秀的大学。学校拥有国家级、省部级、校级教学名师数十名,具有丰富的、一流的教学资源。

本丛书由西安交通大学长期在教学一线主讲的教授、副教授主编,他们具有丰富的基础课、专业基础课教学和辅导经验。丛书作者们在长期的教学实践中,深深了解学生在学习基础课、专业基础课时的难点和困惑点之所在,对如何使学生更有效地学习、掌握课程的基本知识和解题技巧进行了深入的探索和研究,并将成果体现于书中。

本丛书以普通高等学校的学生为主要对象,不拘泥于某一教材,而是将有特色和使用量较大的各种版本的教材加以归纳总结,取其精华,自成一体。书中对课程的基本内容、研究对象、教学要求、学习方法、解题思路等进行了全面、系统的总结和提炼,按基本知识点、重点与难点、典型题解析、自我检测题等环节进行编排;书后附录了自我检测题参考答案和近年来一些院校的期末考试题、考研试题及相应题解。本丛书的指导思想是帮助学生理清学习思路,总结并掌握各章节的要点;通过各类精选题的剖析、求解和示范,分析解题思路,示范解题过程,总结方法要略,展示题型变化;达到扩展知识视野,启迪创新思维,促进能力提高的目的。

本丛书既可以单独使用,也可以与其他教材配合使用;既可以作为课程学习时的同步自学辅导教材,也可以作为考研复习时的主要参考资料。

我们衷心希望本丛书成为您大学基础课和专业基础课学习阶段的良师益友，帮助您克服困难，进入大学学习的自由王国；也希望在考研冲刺时本丛书能助您一臂之力，使您一举成功！

在学习使用过程中，您如果发现书中有不妥之处或有好的建议，敬请批评指正并反馈给我们，我们一定会进一步改进自己的工作，力争使您满意。

真诚感谢您使用西安交大版图书。

西安交大出版社网址：<http://press.xjtu.edu.cn/>

理工医事业部网址：<http://lgny.xjtupress.com/>

理工医事业部信箱：jdlgy@yahoo.cn

西安交通大学出版社

2008年6月

前 言

自动控制理论作为工科院校电类和部分非电类专业的技术基础课程,越来越受到人们的重视。控制理论中分析问题和解决问题的思想方法已受益于各行各业的人们。为了帮助本科生、自动控制理论的学习者和报考硕士研究生的读者学好这门课程,本书的编者根据多年的教学经验,参考了国内外大量的同类教材,编写了《自动控制理论——学习指导、典型题解》一书。

本书分为两个部分,第一部分由六章组成,涵盖了以传递函数为基础的古典控制理论和以状态方程为基础的现代控制理论的部分内容。每章均分为以下四个部分:

(1) 基本知识点

这一部分是对自动控制原理基本内容的归纳和总结。

(2) 重点与难点

给出了读者应该加以注意和重点学习的内容。

(3) 典型题解析

列举了大量的典型例题,通过例题的解析,使读者加深对基本概念的理解,掌握解题思路。每个例题中的提示,指出了该例题说明的问题和读者应从中得到的启示。

(4) 练习题

这一部分和典型例题配合,通过这些题的练习,巩固读者应掌握的内容。

第二部分附录由各章练习题答案和2001年至2008年西安交通大学自控系硕士研究生入学考试自动控制理论试题及相应的参考答案组成,供大家学习、参考。

参加本书编写工作的有张爱民、葛思擘、杜行俭、杨清宇。在编写过程中,编者除了总结多年的教学经验之外,还参考了大量现有教材和参考书,在许多方面得到启发,在此不再一一指明,特此致谢。

由于我们的学识水平有限,本书中难免有不妥或错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2008年8月于西安交大

4.1.3	参量根轨迹的绘制	(90)
4.1.4	增加开环零点、极点对根轨迹的影响	(90)
4.1.5	利用根轨迹分析系统性能	(91)
4.2	重点与难点	(91)
4.3	典型题解析	(91)
4.4	练习题	(101)
第5章 频率响应法		
5.1	基本知识点	(104)
5.1.1	频率特性	(104)
5.1.2	典型环节的频率特性	(105)
5.1.3	非最小相位系统	(107)
5.1.4	开环频率特性曲线的绘制	(108)
5.1.5	幅角原理	(110)
5.1.6	有理分式 $F(s)$ 的选取	(110)
5.1.7	封闭曲线 Γ_s 的选取	(110)
5.1.8	奈奎斯特稳定判据	(111)
5.1.9	奈奎斯特稳定判据在对数坐标图上的应用	(112)
5.1.10	逆奈奎斯特稳定判据	(113)
5.1.11	频率域性能指标	(113)
5.2	重点与难点	(115)
5.3	典型题解析	(115)
5.4	练习题	(143)
第6章 状态空间分析法		
6.1	基本知识点	(148)
6.1.1	时间响应和状态转移矩阵	(148)
6.1.2	系统的能控性	(150)
6.1.3	系统的能观测性	(151)
6.1.4	传递函数与能控性和能观测性的关系	(152)
6.1.5	状态反馈与极点配置	(152)
6.2	重点与难点	(153)
6.3	典型题解析	(153)
6.4	练习题	(169)
附录1 练习题参考答案		(174)
附录2 西安交大近年硕士研究生入学考试自动控制理论试题		(196)
附录3 西安交大硕士学位研究生入学试题参考答案		(213)
参考文献		(233)

第1章 绪论

1.1 基本知识点

1. 自动控制和自动控制系统的概念

自动控制:所谓自动控制是在人不直接参与的情况下,利用外加的设备或装置使整个生产过程或工作机械(称为被控对象)自动地按预定的规律运行,或使其某个参数(称为被控量)按预定的要求变化。

自动控制系统:由被控对象和自动控制装置按一定的方式连接起来,完成一定的自动控制任务,并具有预定性能的动力学系统。

2. 反馈控制系统的组成、工作原理和特点

反馈控制系统的方块图如图 1-1 所示。一般讲,反馈控制系统由被控对象和自动控制装置(如方块图虚线部分所示)组成。



图 1-1 反馈控制系统方块图

自动控制装置主要包括以下几个部分:

输入装置:产生给定的输入信号;

比较元件:将给定输入信号和反馈信号进行比较,得到偏差信号;

校正装置:根据偏差信号的大小产生控制信号;

放大元件:将控制信号放大,以产生足够的功率驱动执行机构;

执行机构:按放大元件产生的信号实现对被控对象的控制;

测量装置:对系统输出信号进行测量和变换,产生反馈信号。

外部对系统的作用称为系统的输入信号,从对输出信号的影响看,可以分为给定输入信号和扰动输入信号两种。系统的输出信号又称为系统被控量。

系统的输出信号经测量和变换后反馈到输入端,构成信号回路的闭环结构。这种系统叫做反馈控制系统或闭环控制系统。反馈到输入端的信号称为反馈信号。

反馈控制系统的工作原理:反馈信号在输入端和给定输入信号进行比较,得出偏差信号,经校正、放大和执行元件后产生控制作用,该控制作用使被控制量回复到或趋近于要求的输入值,从而使偏差减小或消除。

反馈控制系统的特点如下。

(1)从信号的流向看,输出量经测量后回送到输入端。回送的反馈信号使回路闭合,构成闭环系统。

(2)从控制作用的产生看,它是由偏差引起的。偏差产生的控制作用使系统沿减小或消除偏差的方向运动。

(3)由于形成了闭环系统,因而能有效地抑制被反馈通道包围的前向通道中各种扰动对系统输出量的影响。

(4)由于闭环系统可能引起过调,因而带来了系统稳定性的问题。

3. 控制系统的分类

按控制系统结构分:开环、闭环和复合控制系统。

按控制系统功用分:恒值控制系统、随动系统和程序控制系统。

按控制系统性能分:线性和非线性系统、连续和离散系统、确定与不确定系统。

4. 经典控制的主要研究内容

(1)控制系统分析:对已知的系统,分析其稳定性、静态和动态性能。对控制系统的基本要求是稳:要求系统稳定;准:稳态误差要小;快:动态响应快,超调量要小,调节时间要短。

(2)控制系统的设计:根据所要求系统的性能指标来设计系统。

1.2 重点与难点

(1)自动控制和自动控制系统的含义;

(2)反馈和反馈控制的概念、反馈控制系统的组成和特点;

(3)控制系统的分类,对反馈控制系统的基本要求;

(4)确定控制系统的被控对象、被控量和给定值,绘制控制系统的原理方块图,分析实际系统的控制原理。

1.3 典型题解析

例 1-1 热水电加热器如图 1-2 所示。为了保持希望的温度,由温控开关接通或断开电加热器的电源。在使用热水时,水箱中流出热水并补充冷水。试说明系统的被控对象、输出量、输入量、工作原理并画出系统原理方块图。

解:在热水电加热器系统中,输入量为预定的希望温度(给定值),设为 $T_{\text{希}}$,被控量(输出量)为水箱实际水温,设为 T ,控制对象为水箱。扰动信号主要是由于放出热水并注入冷水而产生的降温作用。当 $T = T_{\text{希}}$ 时,温控开关断开,电加热器

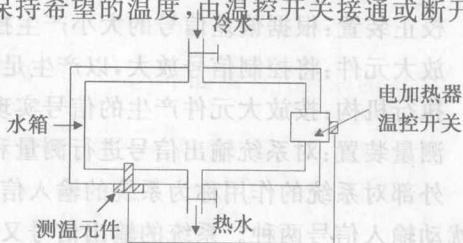


图 1-2 电加热系统

不工作,此时水箱中水温保持在希望水温上。当使用热水时,由于扰动作用使实际水温下降,测温元件感受 $T < T_{希}$ 的变化,并把这一温度变化转换为电信号使温控开关接通电源,电加热器工作,使水箱中的水温上升,直到 $T = T_{希}$ 为止。系统原理方块图如下:



图 1-3 系统原理方块图

例 1-2 船舶驾驶舵角位置跟踪系统如图 1-4 所示。试分析其工作原理,并画出系统方块图。

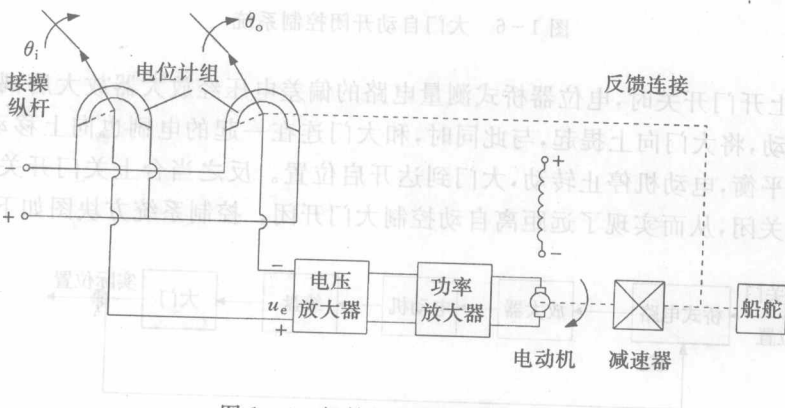


图 1-4 船舶舵角位置跟踪系统

解: 该系统的任务是实现船舶舵角位置 θ_o 跟踪操纵杆角位置 θ_i 。被控对象是船舵,被控量(输出量)是船舵的角位置 θ_o ,给定量(输入量)是操纵杆角位置。理想跟踪情况下, $\theta_o = \theta_i$,两环电位计组成的桥式电路处于平衡状态,输出电压 $u_e = 0$,电动机不转。系统相对静止。

如果操纵杆角 θ_i 改变了,而船舵仍处于原位,则电位器输出 $u_e \neq 0$, u_e 经放大后使电动机通过减速器连同船舵和输出电位计滑臂一起作跟随给定值 θ_i 的运动。当 $\theta_o = \theta_i$ 时,电动机停转,系统达到新的平衡状态,从而实现角位置跟踪的目的。

由以上分析可见,操纵杆是输入装置,电位计组同时完成测量和比较功能,电压、功率放大器完成调节器工作,电动机和减速器共同起执行器的作用。

系统的原理方块图如下:

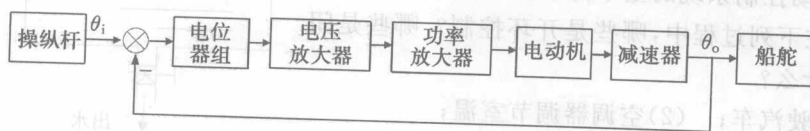


图 1-5 船舶舵角位置跟踪系统原理方块图

例 1-3 仓库大门自动控制原理示意图如图 1-6 所示。试说明自动控制大门开关的工作原理并画出方块图。

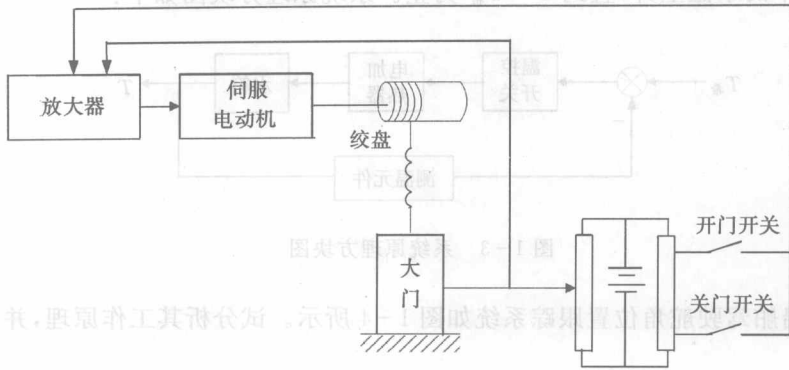


图 1-6 大门自动开闭控制系统

解：当合上开门开关时，电位器桥式测量电路的偏差电压经放大器放大后，驱动伺服电动机带动绞盘转动，将大门向上提起，与此同时，和大门连在一起的电刷也向上移动。直到桥式测量电路达到平衡，电动机停止转动，大门到达开启位置。反之当合上关门开关时，电动机带动绞盘使大门关闭，从而实现了远距离自动控制大门开闭。控制系统方块图如下：

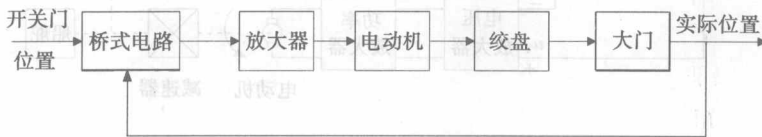


图 1-7 大门自动控制系统方块图

1.4 练习题

1-1 试回答以下问题：

- (1) 自动控制装置一般包括哪几部分？论述各部分的功能。
- (2) 比较开环控制系统和闭环控制系统的主要特征，说明优、缺点。

(3) 什么是反馈控制原理？

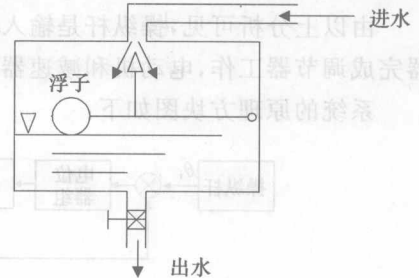
(4) 对自动控制系统的基本要求是什么？

1-2 在下列过程中，哪些是开环控制？哪些是闭环控制？为什么？

(1) 人驾驶汽车； (2) 空调器调节室温；

(3) 机器人踢足球； (4) 投掷铅球。

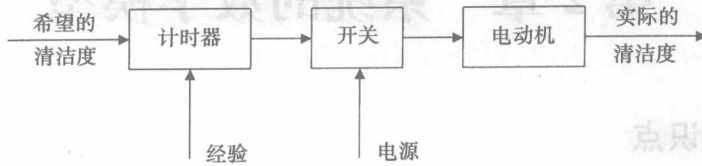
1-3 题图 1-3 表示一个水位自动控制系统，试说明输入量、输出量、被控对象和工作原理，并画出方块



题图 1-3 水位自动控制系统

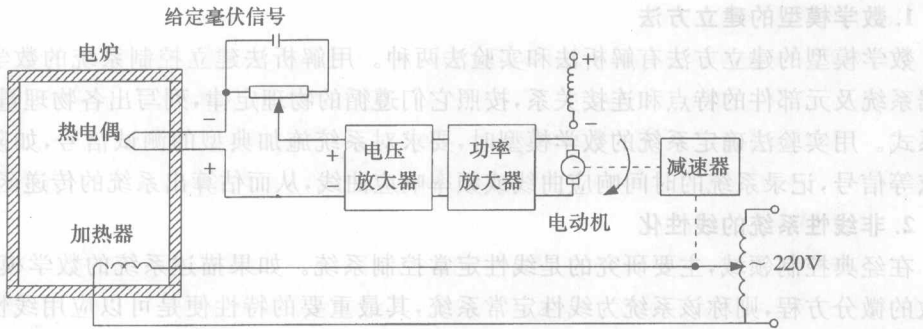
图。

1-4 洗衣机控制系统方块图如题图 1-4 所示。试问该系统属于开环控制系统还是闭环控制系统？请设计一个闭环控制的洗衣机系统方块图。



题图 1-4 洗衣机控制系统方块图

1-5 如题图 1-5 所示的温度控制系统。指出系统的输入量和被控量，区分控制对象和自动控制装置。画出方块图并说明控制系统是怎样出现偏差、检测偏差和消除偏差的。



题图 1-5 温度控制系统

第2章 系统的数学模型

2.1 基本知识

2.1.1 数学模型

数学模型是描述系统内部各物理量之间动态关系的数学表达式,是系统分析和综合的基础。常用的数学模型有:微分方程、传递函数、结构图、信号流图、频率特性以及状态空间描述等多种。

1. 数学模型的建立方法

数学模型的建立方法有解析法和实验法两种。用解析法建立控制系统的数学模型时,应根据系统及元部件的特点和连接关系,按照它们遵循的物理定律,列出各物理量之间的数学关系式。用实验法确定系统的数学模型时,要求对系统施加典型的测试信号,如阶跃、脉冲或正弦等信号,记录系统的时间响应曲线或频率响应曲线,从而估算出系统的传递函数。

2. 非线性系统的线性化

在经典控制领域,主要研究的是线性定常控制系统。如果描述系统的数学模型是线性常系数的微分方程,则称该系统为线性定常系统,其最重要的特性便是可以应用线性叠加原理,即系统的总输出可以由若干个输入引起的输出叠加得到。若描述系统的数学模型是非线性微分方程,则相应的系统称为非线性系统,这种系统不能应用线性叠加原理。在经典控制领域对非线性系统的处理能力是很小的。但在工程应用中,除了含有强非线性环节或系统参数随时间变化较大的情况,一般对非线性系统采用近似的线性化方法。对于非线性方程,可在工作点附近用泰勒级数展开,取前面的线性项。采用这种方法时应注意:在工作点附近有较高的精度,而远离工作点则误差较大。

例如:流体通过薄壁小孔时,其流量公式为

$$Q = Kx \sqrt{P}$$

式中: Q 为流量, K 为常数, x 为开度, P 为压差。

这是一个典型的非线性方程,需将它线性化。可在某一工作点 (P_0, x_0) 附近把它线性化。将流量公式在 (P_0, x_0) 点用泰勒级数展开,并取线性项,得

$$Q - Q_0 = \left. \frac{\partial Q}{\partial P} \right|_{\substack{x=x_0 \\ P=P_0}} (P - P_0) + \left. \frac{\partial Q}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_0 \\ P=P_0}} (x - x_0)$$

整理得

$$\Delta Q = K_p \Delta P + K_x \Delta x$$

式中各变量都是增量式, K_p, K_x 是与工作点有关的常数。

2.1.2 线性系统的微分方程

1. 系统微分方程的建立

系统的微分方程是描述控制系统的一种数学模型。建立系统的微分方程的一般步骤如下:

- (1) 确定系统和各元部件的输入量和输出量;
- (2) 对系统中每一个元部件列写出与其输入、输出量有关的物理方程;
- (3) 对上述方程进行适当的简化。比如略去一些对系统影响小的次要因素,对非线性元部件进行线性化等;
- (4) 从系统的输入端开始,按照信号的传递顺序,在所有元部件的方程中消去中间变量,最后得到描述系统输入和输出关系的微分方程。

2. 用拉氏变换解线性微分方程

求解线性微分方程的方法有很多。拉氏变换法是求解微分方程的常用方法。微分方程的解即是系统的时间响应函数。方法和步骤如下:

- (1) 对微分方程的各项进行拉氏变换;
- (2) 对变换后的方程进行整理,求出待求变量的像函数表达式;
- (3) 对像函数进行拉氏反变换,可得到对应的原函数表达式,即是系统的时间响应函数。

2.1.3 传递函数

1. 传递函数的定义

线性系统的传递函数是在零初始条件下,系统输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比。

零初始条件是指当 $t \leq 0$ 时,系统输入量 $r(t)$ 、输出量 $c(t)$ 以及它们的各阶导数均为零。

设线性定常系统的微分方程为

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dc(t)}{dt} + a_0 c(t) = \\ b_m \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dr(t)}{dt} + b_0 r(t) \end{aligned}$$

式中: $c(t)$ ——系统输出量;

$r(t)$ ——系统输入量。

$a_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$ 和 $b_j (j=0, 1, \dots, m, m \leq n)$ 是由系统结构与参数决定的常数。当初始条件为零时,对上式进行拉氏变换。根据传递函数的定义,可得系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = \frac{K \prod_{i=1}^m (s + z_i)}{\prod_{j=1}^n (s + p_j)}$$

这是传递函数的一般表示式。

传递函数的零点和极点:若 $s = -z_i (i=1, 2, \dots, m)$, 使 $G(s) = 0$, 则称 z_i 为 $G(s)$ 的零点。若 $s = -p_j (j=1, 2, \dots, n)$, 使 $G(s) \rightarrow \infty$, 则称 p_j 为 $G(s)$ 的极点。

2. 传递函数的性质

- (1) 传递函数只与系统自身的结构参数有关,与系统的输入、输出形式和大小无关。
- (2) 传递函数是复变量 s 的有理分式函数,对于大多数物理系统(环节或元件),其分子多

项式的次数 m 一般不高于分母多项式的次数 n , 且所有系数都为实数。

(3) 传递函数与系统的微分方程相联系, 两者可以互相转换。

(4) 传递函数是系统单位脉冲响应的拉氏变换。

(5) 传递函数与 s 平面上一定的零极点图相对应。

传递函数的局限性:

(1) 传递函数的概念只适用于单输入、单输出的线性定常系统。

(2) 传递函数原则上只反映零初始条件下系统的动态特性。

3. 典型环节的传递函数

环节: 具有相同形式传递函数的元部件集合。

典型环节:

(1) 比例环节: $G(s) = K$;

(2) 积分环节: $G(s) = 1/s$;

(3) 惯性环节: $G(s) = \frac{1}{T_s + 1}$;

(4) 振荡环节: $G(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\zeta T s + 1} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$ 式中: $\omega_n = \frac{1}{T}$;

(5) 微分环节: $G(s) = s$;

(6) 一阶微分环节: $G(s) = T_s + 1$;

(7) 二阶微分环节: $G(s) = T^2 s^2 + 2\zeta T s + 1$;

(8) 延迟环节: $G(s) = e^{-\sigma}$ 。

4. 传递函数的求法

常用两种方法求取系统传递函数:

(1) 由系统的微分方程求取传递函数;

(2) 由系统的结构图或信号流图求取传递函数。

2.1.4 结构图

1. 组成和特点

结构图是系统中各个环节的传递函数和信号流向的图形表示。

组成: 由信号线、环节传递函数方框、引出点(分支点)和比较点(相加点)组成。

特点: ①具有概括性和抽象性, 不表示某具体系统的物理结构。比如一个结构图可以表示一个机械系统也可以表示一个电气系统。②同一系统的结构图形式不唯一, 但在系统的输入、输出信号点确定后, 对应的传递函数是唯一的。

2. 结构图的连接方式

(1) 串联: 串联环节的总传递函数为

$$G(s) = \prod_{i=1}^n G_i(s)$$

式中: $G_i(s) (i=1, 2, \dots, n)$ ——串联各环节的传递函数; n ——串联环节数。

(2) 并联: 并联环节的总传递函数为

$$G(s) = \sum_{i=1}^n G_i(s)$$

式中： $G_i(s) (i=1, 2, \dots, n)$ ——并联各环节传递函数； n ——并联环节数。

(3) 反馈连接：基本回路如图 2-1 所示。

其传递函数为

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

式中： $G(s)$ ——前向通道传递函数；

$G(s)H(s)$ ——开环传递函数；

$H(s)$ ——反馈通道传递函数。

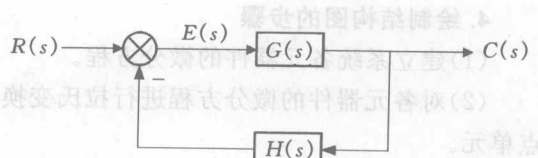


图 2-1 反馈连接的基本回路

3. 结构图的等效变换

(1) 变换方法：分支点的前移和后移；相加点的前移和后移；

(2) 变换原则：分支点或相加点移动前后必须保持信号的等效性。即在结构图变换的过程中，被变换部分的输入、输出应保持不变，这样才能确保变换前后结构图的等效。

注意：① 分支点和相加点之间一般不宜互相变换位置。

② 相邻的分支点或相加点可以任意变换位置，而不改变等效性。

③ “-”号可以在信号线上越过方框移动，但不能越过相加点和分支点。

(3) 结构图的典型等效变换：

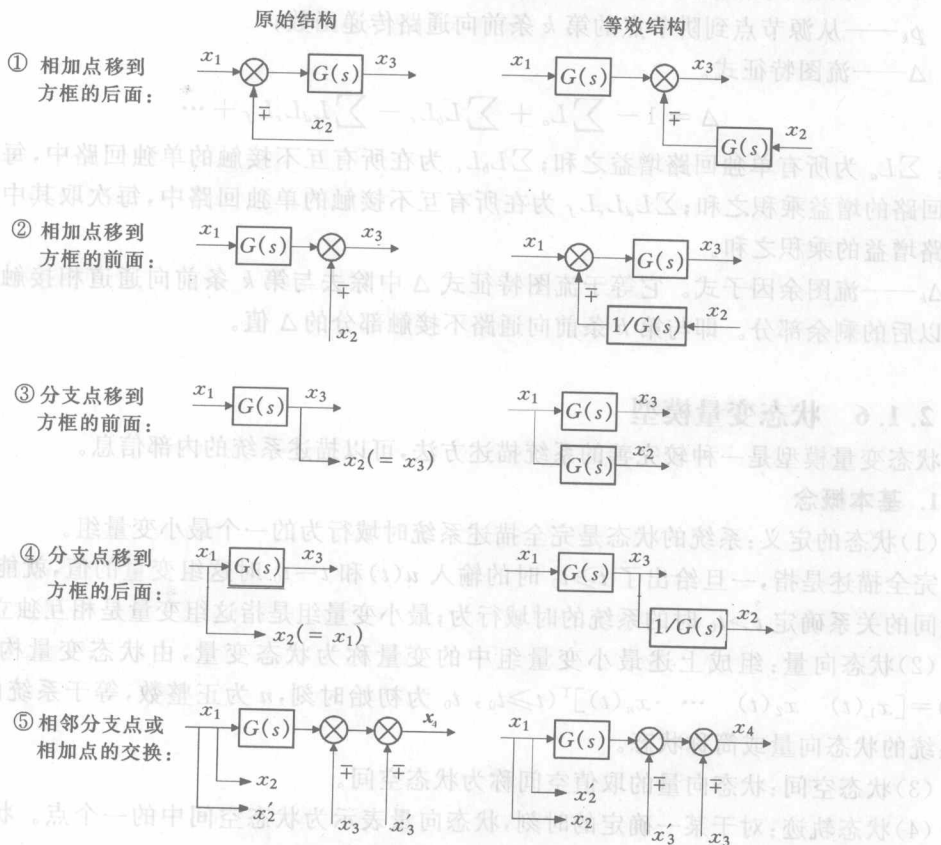


图 2-2 结构图的典型等效变换