

21世纪高等学校电子信息工程规划教材

自动控制原理 学习指导及习题解答

李玉惠 晋 帆 主编
向凤红 主审



清华大学出版社

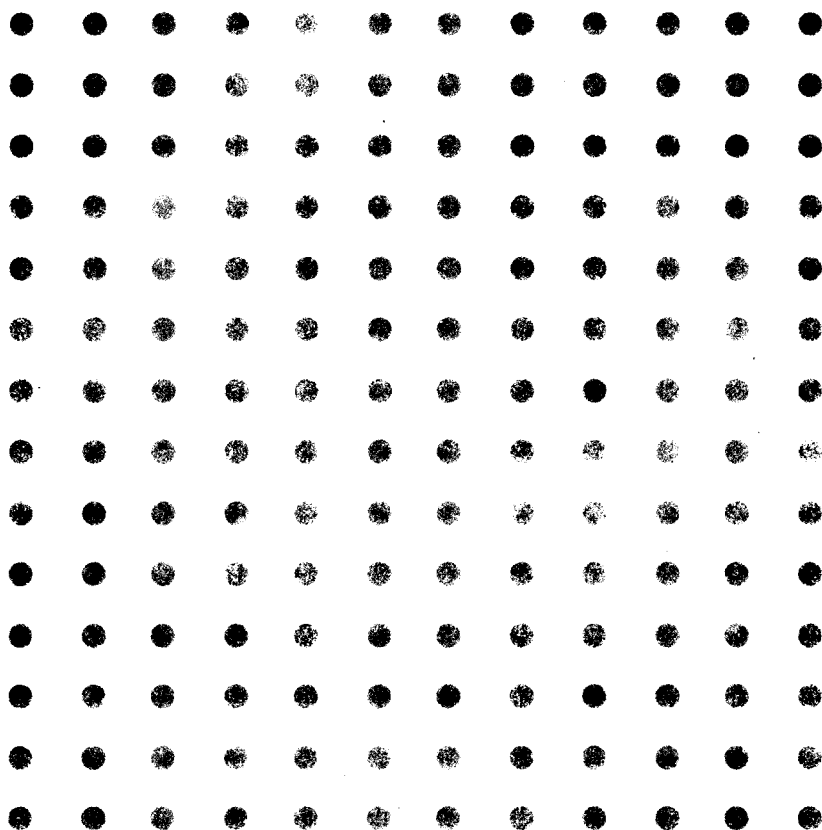
TP13/238C

2008

21世纪高等学校电子信息工程规划教材

自动控制原理 学习指导及习题解答

李玉惠 晋 帆 主编
向凤红 主审



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书为《自动控制原理》(李玉惠、晋帆主编,向凤红主审,清华大学出版社2008年出版)教材的配套用书,书中对主教材每章的思考题与习题做了较详细的分析解答,并给出了各章的学习要点。

本书可作为高等院校电类和非电类相关专业本科生深入学习与理解自动控制原理课程内容的辅助用书,也可供有关工程技术人员自学和参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理学习指导及习题解答/李玉惠,晋帆主编. —北京:清华大学出版社,2008.5
(21世纪高等学校电子信息工程规划教材)

ISBN 978-7-302-17188-1

I. 自… II. ①李… ②晋… 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(2008)第 031911 号

责任编辑:梁毅 徐跃进

责任校对:焦丽丽

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:6.5 字 数:159 千字

版 次:2008 年 5 月第 1 版 印 次:2008 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:13.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:028838-01

出版说明

随着我国高等教育规模的扩大和产业结构调整的进一步完善,社会对高层次应用型人才的需求将更加迫切。各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,合理调整和配置教育资源,在改革和改造传统学科专业的基础上,加强工程型和应用型学科专业建设,积极设置主要面向地方支柱产业、高新技术产业、服务业的工程型和应用型学科专业,积极为地方经济建设输送各类应用型人才。各高校加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的力度,从而实现传统学科专业向工程型和应用型学科专业的发展与转变。在发挥传统学科专业师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势的同时,不断更新其教学内容、改革课程体系,使工程型和应用型学科专业教育与经济建设相适应。

为了配合高校工程型和应用型学科专业的建设和发展,急需出版一批内容新、体系新、方法新、手段新的高水平电子信息类专业课程教材。目前,工程型和应用型学科专业电子信息类专业课程教材的建设工作仍滞后于教学改革的实践,如现有的电子信息类专业教材中有不少内容陈旧(依然用传统专业电子信息教材代替工程型和应用型学科专业教材),重理论、轻实践,不能满足新的教学计划、课程设置的需要;一些课程的教材可供选择的品种太少;一些基础课的教材虽然品种较多,但低水平重复严重;有些教材内容庞杂,书越编越厚;专业课教材、教学辅助教材及教学参考书短缺,等等,都不利于学生能力的提高和素质的培养。为此,在教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议下,清华大学出版社组织出版本系列教材,以满足工程型和应用型电子信息类专业课程教学的需要。本系列教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 系列教材主要是电子信息学科基础课程教材,面向工程技术应用培养。本系列教材在内容上坚持基本理论适度,反映基本理论和原理的综合应用,强调工程实践和应用环节。电子信息学科历经了一个多世纪的发展,已经形成了一个完整、科学的理论体系,这些理论是这一领域技术发展的强大源泉,基于理论的技术创新、开发与应用显得更为重要。

(2) 系列教材体现了电子信息学科使用新的分析方法和手段解决工程实际问题。利用计算机强大功能和仿真设计软件,使得电子信息领域中大量复杂的理论计算、变换分析等变得快速简单。教材充分体现了利用计算机解决理论分析与解算实际工程电路的途径与方法。

(3) 系列教材体现了新技术、新器件的开发应用实践。电子信息产业中仪器、设备、产品都已使用高集成化的模块,且不仅仅由硬件来实现,而是大量使用软件和硬件相结合方法,使得产品性价比很高,如何使学生掌握这些先进的技术、创造性地开发应用新技术是本系列教材的一个重要特点。

(4) 以学生知识、能力、素质协调发展为宗旨,系列教材编写内容充分注意了学生创新

能力和实践能力的培养,加强了实验实践环节,各门课程均配有独立的实验课程和课程设计。

(5) 21 世纪是信息时代,学生获取知识可以是多种媒体形式和多种渠道的,而不再局限于课堂上,因而传授知识不再以教师为中心,以教材为唯一依托,而应该多为学生提供各类学习资料(如网络教材,CAI 课件,学习指导书等)。应创造一种新的学习环境(如讨论,自学,设计制作竞赛等),让学生成为学习主体。该系列教材以计算机、网络和实验室为载体,配有多种辅助学习资料,提高学生学习兴趣。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平的以老带新的教材编写队伍才能保证教材的编写质量和建设力度,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材编委会

联系人: 魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前 言

为帮助广大学生和读者深入理解与掌握《自动控制原理》有关自动控制系统概念、建模、分析和设计的基本理论和方法,我们编写了这本与《自动控制原理》(李玉惠、晋帆主编,向凤红主审,清华大学出版社 2008 年出版)教材配套使用的《自动控制原理学习指导及习题解答》。

本书内容与教材完全对应。因此,书中对学习要点作了简要提示,对基本概念、基本理论和方法不再赘述,在解题过程中注意突出相应的概念、适用理论、具体方法和计算技巧间的联系。

本书是在多年教学实践与经验积累的基础上,参考多种相关教材与题集编写的,其中李玉惠负责第 1、5、6 章,晋帆负责第 2、3 章,薛洁负责第 4 章,张光辉负责第 7 章,周建华负责第 8 章,向凤红主审。

编写过程中参考了很多优秀教材和习题集,编者向各位作者表示诚挚的谢意。本书的编写和出版得到清华大学出版社和昆明理工大学精品课程项目的支持与资助。在此,向两单位表以诚挚的谢意!

由于水平有限,书中不当之处,敬请读者予以指正。

编 者

2007 年 12 月

目 录

第 1 章	自动控制系统的基本概念	1
1.1	学习要点	1
1.2	思考题与习题详解	1
第 2 章	自动控制系统的数学模型	4
2.1	学习要点	4
2.2	思考题与习题详解	4
第 3 章	线性系统的时域分析	15
3.1	学习要点	15
3.2	思考题与习题详解	15
第 4 章	根轨迹分析法	23
4.1	学习要点	23
4.2	思考题与习题详解	23
第 5 章	频域分析法	36
5.1	学习要点	36
5.2	思考题与习题详解	36
第 6 章	控制系统的设计	58
6.1	学习要点	58
6.2	思考题与习题详解	58
第 7 章	线性离散系统的理论基础	67
7.1	学习要点	67
7.2	思考题与习题详解	67
第 8 章	非线性系统	78
8.1	学习要点	78
8.2	思考题与习题详解	78
参考文献		92

第 1 章 自动控制系统的基本概念

1.1 学习要点

- (1) 开环与闭环系统的结构特征、控制原理及二者性能特点；
- (2) 由系统的物理结构图或工作原理示意图绘出系统功能框图；
- (3) 闭环控制系统的一般构成与各构成部分的功能作用；
- (4) 控制系统的基本类型；
- (5) 对控制系统的基本要求。

1.2 思考题与习题详解

题 1.1 列举几个开环控制与闭环控制系统的例子,并分析说明其工作原理。

答: 略。

题 1.2 比较开环控制与闭环控制系统的优缺点。

答: 开环控制系统是按照给定的参考输入量控制系统输出量,因此,开环控制系统结构简单,易于实现,投资小。但开环控制系统受到扰动其输出量会偏离期望值,系统无纠正偏差功能,控制精度低,无抗扰动能力。

闭环控制系统是按照给定的参考输入量与系统输出量的偏差进行控制(按偏差控制)。因此,闭环控制系统结构复杂,投资大,具有纠正偏差功能,控制精度较高,有较强的抗扰动能力。

题 1.3 什么是反馈?什么是正反馈和负反馈?负反馈在自动控制系统中有什么意义?

答: 反馈是指系统功能作用的结果反过来对系统功能特性的影响。系统的功能是通过系统的输入(环境对系统的作用)和输出(系统对环境的作用)关系表现出来的。

在工程控制系统中,反馈是指控制系统的输出量信息返回到输入端,与参考输入量信息进行综合,系统利用综合量进行自身调节。

反馈有正反馈和负反馈之分。正反馈是指控制系统的输出量信息与参考输入量信息进行叠加,系统利用叠加量进行自身调节的结果,是使系统沿着现有状态或方向变化,最终处于限幅振荡。典型的实例是正弦函数产生器。

负反馈是指控制系统的输出量信息与参考输入量信息进行比较,系统利用偏差量进行自身调节的结果,是使系统按照给定的参考输入变化。因此负反馈在自动控制系统中具有控制生产设备或工艺过程稳定运行的重要作用。

图 1.1 给出了具有正/负信息反馈概念常用的示意图。

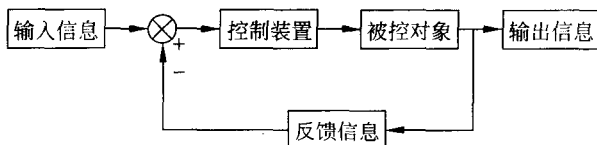


图 1.1 题 1.3 用图

题 1.4 复合控制与开环控制、闭环控制是什么关系？什么情况下可采用复合控制方式？

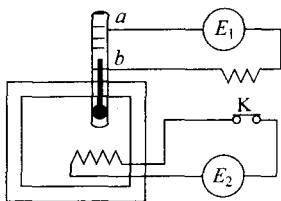
答：复合控制是开环控制方式与闭环控制方式的某种组合。复合控制系统中，既有开环控制通道，又有闭环反馈控制结构。当闭环控制系统不能取得满意的稳态性能（精度）和动态性能时，可在闭环控制的基础上，引入按给定或按扰动的开环控制通道，形成复合控制方式，提高系统类型或无差度。

题 1.5 判断下列概念正确与否

- (1) 闭环控制系统精度通常比开环系统精度高。
- (2) 负反馈有时用于提高控制系统的精度。
- (3) 开环控制系统不存在稳定性问题。
- (4) 闭环控制系统总是稳定的。
- (5) 反馈可能引起系统振荡。
- (6) 控制系统的稳定性是其固有特性，由系统结构与外界因素决定。

答：(1) 正确；(2) 正确；(3) 正确；(4) 错误；(5) 正确；(6) 错误。

题 1.6 炉温闭环控制系统如题 1.6 图所示，电阻丝电源的通断由接触式水银温度计控制，水银温度计的两个触点 a 和 b 接在常闭继电器的线圈电路中，它随着水银柱的升降而接通或断开，通过控制继电器触点 K 的开、闭而接通或断开电阻丝电源，以达到自动调温的目的。试说明该系统的控制过程，并画出系统的方框图。



题 1.6 图 炉温闭环控制系统原理图

解：炉温闭环控制系统的控制过程描述如下。

当炉温低于期望值时，水银温度计的水银柱低于触点 a ，常闭继电器的线圈电路仍然处于断开状态，常闭继电器触点 K 仍然处于闭合状态，电阻丝电源回路仍然闭合，电炉继续加热，炉温继续上升。

当炉温大于等于期望值，水银温度计的水银柱上升到或超过触点 a 时，常闭继电器的线圈电路闭合，常闭继电器触点 K 打开，电阻丝电源回路断开，电炉不再加热，炉温逐渐下降。

炉温闭环控制系统反复上述调节过程，实现炉温控制在一定范围内，满足生产要求。

系统的方框图如图 1.2 所示。

题 1.7 供电闭环控制系统原理图如题 1.7 图所示。试分析该系统的控制过程，并画出系统的方框图。

解：供电闭环控制系统的控制过程描述如下。

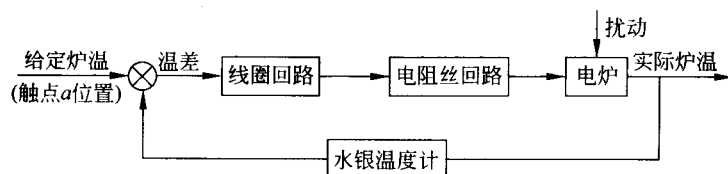
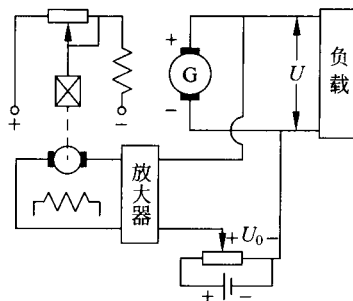


图 1.2 炉温闭环控制系统方框图



题 1.7 图 供电闭环控制系统原理图

引出发电机端电压 U 与参考电压 U_0 进行比较, 偏差(具有正、负极性)经放大器功率放大后, 作为执行电机的端电压。通过电机的正、反转, 经减速装置调节发电机励磁回路电阻大小, 从而改变励磁电流, 调节发电机端电压 U 保持与参考电压 U_0 一致, 实现恒压供电, 满足生产要求。

系统的方框图如图 1.3 所示。

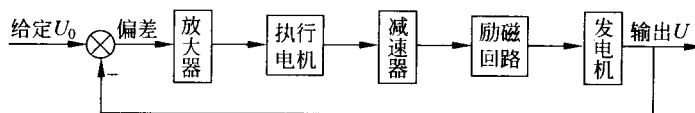


图 1.3 供电闭环控制系统方框图

第2章 自动控制系统的数学模型

2.1 学习要点

- (1) 控制系统数学模型的概念、描述形式与相互转换;
- (2) 物理系统数学模型的编写方法和步骤;
- (3) 非线性系统线性化的意义、适用性和具体方法;
- (4) 系统方框图等效变换原则与应用;
- (5) 信号流图等效变换与梅逊增益公式。

2.2 思考题与习题详解

题 2.1 思考与总结下述问题。

- (1) 我们学习的动态物理系统的数学模型有哪些形式?
- (2) 非线性系统线性化的意义、适用性和具体方法。
- (3) 传递函数的意义、作用和性质;与微分方程模型相比,这种模型有何优点?

答: (1) 自动控制系统的数学模型指的是系统运动特性的数学描述。

我们学习的动态物理系统的数学模型有微分方程、传递函数和频率特性等表达式描述形式,还有方框图和信号流图等图形化描述形式。

(2) 实际系统中变量之间的关系都或多或少地具有某种非线性特性。由于求解非线性微分方程比较困难,因此提出了线性化问题。如果控制系统的工作状态是在工作点的一个小偏差范围内变化,就可以用一条过工作点的切线代替工作曲线在这个小偏差范围内的变化关系,这样,就把非线性特性线性化了。应用线性化的数学模型就可以简化系统分析和设计的过程,虽然这是一种近似的处理方法,但却很有实际意义。

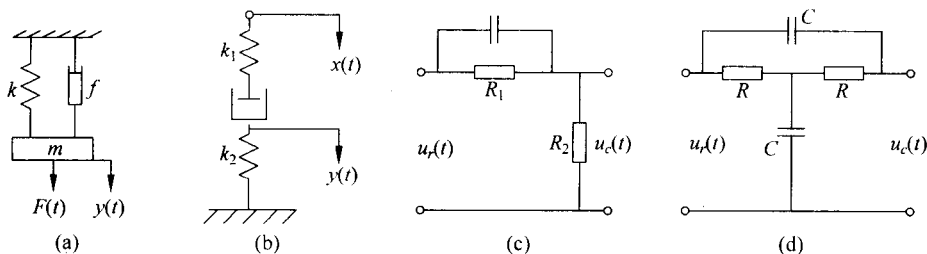
只要这样做所造成的误差在允许范围内,不会对控制系统的分析和设计造成本质影响,就可以进行非线性系统线性化。

具体方法是:对任意函数,在某一点(工作点)处对函数进行泰勒级数展开,忽略二阶以上高次项,就可以得到线性化的函数关系。

(3) 系统输入和输出在零初始条件下拉氏变换的比 $G(s)$ 称为系统的传递函数。传递函数表示了系统输入输出之间的关系,是控制系统的一种数学模型,可以直接从微分方程导出。

传递函数只与系统结构与参数有关,与外部输入无关,传递函数反映了系统的结构特征和参数特性。由于传递函数是以复数 s 为变量,避免了许多求解微分方程的麻烦。因此,经典控制论中更常用传递函数这种数学模式对控制系统进行分析和设计。

题 2.2 试建立如题 2.2 图所示各系统的微分方程。其中外力 $F(t)$, 位移 $x(t)$ 和电压 $u_r(t)$ 为输入量; 位移 $y(t)$ 和电压 $u_c(t)$ 为输出量; k (弹性系数), f (阻尼系数), R (电阻), C (电容) 和 m (质量) 均为常数。



题 2.2 图

解: (a) 以平衡状态为基点, 对质块 m 进行受力分析 (不考虑重力影响), 根据牛顿定理可写出

$$F(t) - ky(t) - f \frac{dy}{dt} = m \frac{d^2 y}{dt^2}$$

整理得

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{f}{m} \frac{dy(t)}{dt} + \frac{k}{m} y(t) = \frac{1}{m} F(t)$$

(b) 如题 2.2 图(b)所示, 取 A、B 两点分别进行受力分析。对 A 点有

$$k_1(x - x_1) = f\left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dy}{dt}\right) \quad (1)$$

对 B 点有

$$f\left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dy}{dt}\right) = k_2 y \quad (2)$$

联立式(1)、(2)可得

$$\frac{dy}{dt} + \frac{k_1 k_2}{f(k_1 + k_2)} y = \frac{k_1}{k_1 + k_2} \frac{dx}{dt}$$

(c) 应用复数阻抗概念可写出

$$u_r(s) = \frac{R_1 \frac{1}{Cs}}{R_1 + \frac{1}{Cs}} i(s) + u_c(s) \quad (3)$$

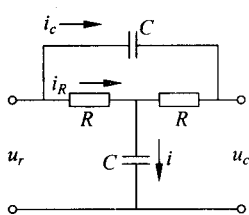
$$i(s) = \frac{u_c(s)}{R_2} \quad (4)$$

联立式(3)、(4), 可解得

$$\frac{u_c(s)}{u_r(s)} = \frac{R_2(1 + R_1 Cs)}{R_1 + R_2 + R_1 R_2 Cs}$$

微分方程为

$$\frac{du_c}{dt} + \frac{R_1 + R_2}{CR_1 R_2} u_c = \frac{du_r}{dt} + \frac{1}{CR_1} u_r$$



解 2.2 图

(d) 由题 2.2 图(d)可写出

$$\begin{cases} u_r(s) = Ri_R(s) + [i_R(s) + i_c(s)] \frac{1}{Cs} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_c(s) \frac{1}{Cs} = Ri_R(s) - Ri_c(s) \end{cases} \quad (6)$$

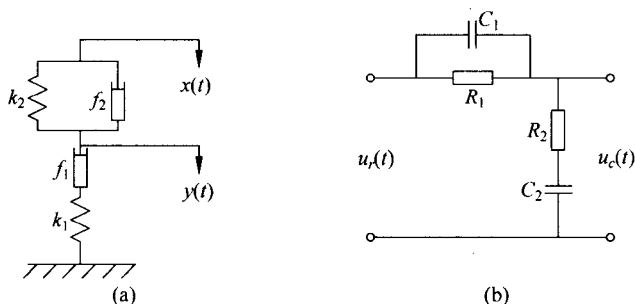
$$\begin{cases} u_c(s) = i_c(s)R + [i_R(s) + i_c(s)] \frac{1}{Cs} \end{cases} \quad (7)$$

联立式(5)、(6)、(7),消去中间变量 $i_c(s)$ 和 $i_R(s)$,可得:

$$\frac{u_c(s)}{u_r(s)} = \frac{R^2 C^2 s^2 + 2RCs + 1}{R^2 C^2 s^2 + 3RCs + 1}$$

微分方程为

$$\frac{du_c^2}{dt^2} + \frac{3}{CR} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{C^2 R^2} u_c = \frac{du_r^2}{dt^2} + \frac{2}{CR} \frac{du_r}{dt} + \frac{1}{C^2 R^2} u_r$$

题 2.3 试证明题 2.3 图中所示的力学系统(a)和电路系统(b)是相似系统(即有相同形式的数学模型)。

题 2.3 图

解:(a) 取 A、B 两点分别进行受力分析

对 A 点有

$$k_2(x-y) + f_2(\dot{x} - \dot{y}) = f_1(\dot{y} - \dot{y}_1) \quad (1)$$

对 B 点有

$$f_1(\dot{y} - \dot{y}_1) = k_1 y_1 \quad (2)$$

对式(1)、(2)分别取拉氏变换,消去中间变量 y_1 ,整理后得

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{f_1 f_2}{k_1 k_2} s^2 + \left(\frac{f_1}{k_1} + \frac{f_2}{k_2} \right) s + 1}{\frac{f_1 f_2}{k_1 k_2} s^2 + \left(\frac{f_1}{k_1} + \frac{f_2}{k_2} + \frac{f_2}{k_1} \right) s + 1}$$

(b) 由图可写出

$$\frac{u_c(s)}{R_2 + \frac{1}{C_2 s}} = \frac{u_r(s)}{R_2 + \frac{1}{C_1 s} + \frac{R_1 \cdot \frac{1}{C_1 s}}{R_1 + \frac{1}{C_1 s}}}$$

整理得

$$\frac{u_c(s)}{u_r(s)} = \frac{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2)s + 1}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2)s + 1}$$

比较两系统的传递函数, 如果设 $R_1 = 1/k_1$, $R_2 = 1/k_2$, $C_1 = f_1$, $C_2 = f_2$, 则两系统的传递函数相同, 所以两系统是相似的。

题 2.4 假设某容器的液位高度 h 与液体流入量 Q_r 满足如下方程 $\frac{dh}{dt} + \frac{\alpha}{S}\sqrt{h} = \frac{1}{S}Q_r$, 式中 S 为液位容器的横截面积, α 为常数。若 h 与 Q_r 在其工作点 (Q_{r0}, h_0) 附近做微量变化, 试导出 Δh 关于 ΔQ_r 的线性化方程。

解: 将 $\sqrt{h}$ 在 h_0 处展开为泰勒级数并取一次近似

$$\sqrt{h} = \sqrt{h_0} + \left. \frac{d\sqrt{h}}{dt} \right|_{h_0} \cdot \Delta h = \sqrt{h_0} + \frac{1}{2\sqrt{h_0}} \cdot \Delta h \quad (1)$$

代入原方程可得

$$\frac{d(h_0 + \Delta h)}{dt} + \frac{\alpha}{S} \left(\sqrt{h_0} + \frac{1}{2\sqrt{h_0}} \cdot \Delta h \right) = \frac{1}{S} (Q_{r0} + \Delta Q_r) \quad (2)$$

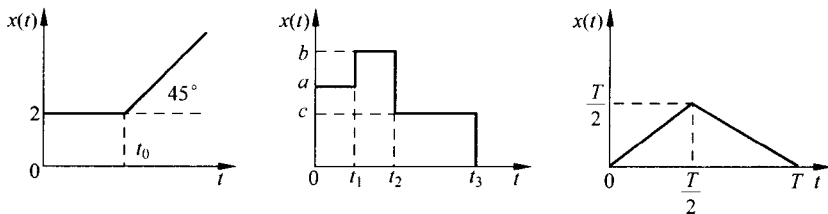
在平衡工作点处系统满足

$$\frac{dh_0}{dt} + \alpha \sqrt{h_0} = Q_{r0} \quad (3)$$

式(2)和式(3)相减可得 Δh 的线性化方程

$$S \frac{d\Delta h}{dt} + \frac{\alpha}{2\sqrt{h_0}} \Delta h = \Delta Q_r$$

题 2.5 试求题 2.5 图所示各信号 $x(t)$ 的象函数 $X(s)$ 。



题 2.5 图

解: (a) $x(t) = 2 + (t - t_0)$

$$X(s) = \frac{2}{s} + \frac{1}{s^2} e^{-t_0 s}$$

(b) $x(t) = a + (b-a)(t-t_1) - (b-c)(t-t_2) - c(t-t_3)$

$$X(s) = \frac{1}{s} [a + (b-a)e^{-t_1 s} - (b-c)e^{-t_2 s} - ce^{-t_3 s}]$$

(c) $x(t) = \frac{4}{T^2}t - \frac{4}{T^2}\left(t - \frac{T}{2}\right) - \frac{4}{T^2}\left(t - \frac{T}{2}\right) + \frac{4}{T^2}(t-T)$

$$X(s) = \frac{4}{T^2 s^2} (1 - 2e^{-\frac{T}{2}s} + e^{-Ts})$$

题 2.6 求下列各拉氏变换式的原函数。

$$(1) X(s) = \frac{e^{-s}}{s-1}$$

$$(2) X(s) = \frac{1}{s(s+2)^3(s+3)}$$

$$(3) X(s) = \frac{s+1}{s(s^2+2s+2)}$$

解: (1) $x(t) = e^{t-1}$

$$(2) \text{原式} = \frac{-1}{2(s+2)^3} + \frac{1}{4(s+2)^2} - \frac{3}{8(s+2)} + \frac{1}{24s} + \frac{1}{3(s+3)}$$

$$x(t) = \frac{-t^2}{4}e^{-2t} + \frac{t}{4}e^{-2t} - \frac{3}{8}e^{-2t} + \frac{1}{3}e^{-3t} + \frac{1}{24}$$

$$(3) \text{原式} = \frac{1}{2s} - \frac{\frac{1}{2}s}{s^2+2s+2} = \frac{1}{2s} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s+1}{(s+1)^2+1} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{(s+1)^2+1}$$

$$x(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}e^{-t}(\sin t - \cos t)$$

题 2.7 已知系统传递函数 $\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{2}{s^2+3s+2}$, 且初始条件为 $c(0) = -1, \dot{c}(0) = 0$, 试求系统在输入 $r(t) = 1(t)$ 作用下的输出 $c(t)$ 。

解: 单位阶跃输入时, 有 $R(s) = \frac{1}{s}$, 依题意

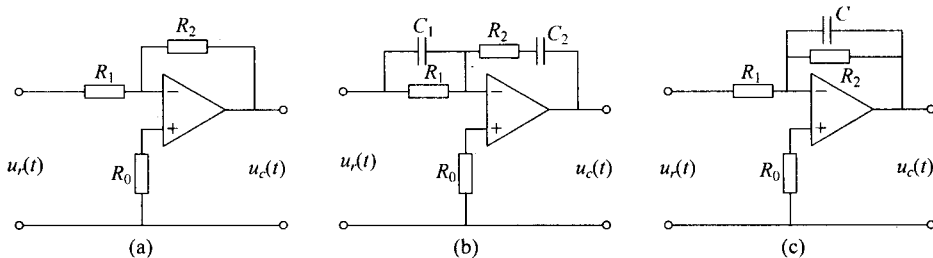
$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{2}{s+2} + \frac{1}{s+1} = \frac{3s+2}{(s+1)(s+2)} \cdot \frac{1}{s}$$

所以

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{3s+2}{(s+1)(s+2)}$$

$$k(t) = L^{-1}[G(s)] = L^{-1}\left(\frac{-1}{s+1} + \frac{4}{s+2}\right) = 4e^{-2t} - e^{-t}$$

题 2.8 求题 2.8 图所示各有源网络的传递函数 $\frac{u_c(s)}{u_r(s)}$ 。



题 2.8 图

解: (a) 根据运算放大器“虚地”概念, 可写出

$$\frac{u_c(s)}{u_r(s)} = -\frac{R_2}{R_1}$$

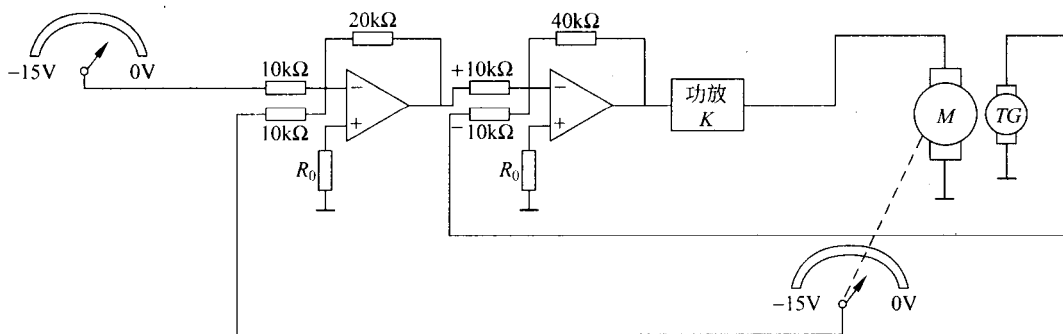
$$(b) \frac{u_c(s)}{u_r(s)} = - \frac{R_2 + \frac{1}{C_2 s}}{R_1 \cdot \frac{1}{C_1 s}} = - \frac{(1 + R_1 C_1 s)(1 + R_2 C_2 s)}{R_1 C_1 C_2 s^2}$$

$$\frac{R_2 \cdot \frac{1}{C_2 s}}{R_1 + \frac{1}{C_1 s}}$$

$$(c) \frac{u_c(s)}{u_r(s)} = - \frac{R_2 + \frac{1}{C_2 s}}{R_1} = - \frac{R_2}{R_1 (1 + R_2 C_2 s)}$$

题 2.9 某位置随动系统原理框图如题 2.9 图所示, 已知电位器最大工作角度 $Q_m = 330^\circ$, 功率放大器放大系数为 K_3 。

- (1) 试分别求出电位器的传递函数 K_0 , 第一级和第二级放大器的放大系数 K_1, K_2 ;
- (2) 画出系统的结构图;
- (3) 求系统的闭环传递函数 $Q_c(s)/Q_r(s)$ 。



题 2.9 图

解: (1) 电位器的传递函数

$$K_0 = \frac{E}{Q_m} = \frac{30}{330^\circ \times \frac{\pi}{180}} = \frac{180}{11\pi}$$

根据运算放大器的特性, 可分别写出两级放大器的放大系数为

$$K_1 = - \frac{30 \times 10^3}{10 \times 10^3} = -3, \quad K_2 = - \frac{20 \times 10^3}{10 \times 10^3} = -2$$

(2) 可画出系统结构如图 2.1 所示

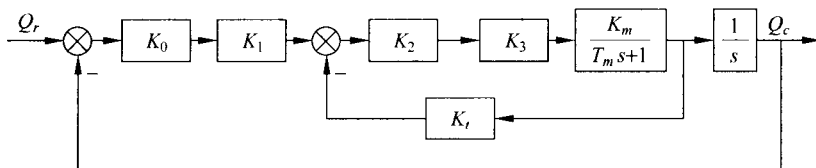


图 2.1 题 2.9 系统结构图

$$\begin{aligned}
 (3) \quad \frac{Q_c(s)}{Q_r(s)} &= \frac{\frac{K_0 K_1 K_2 K_3 K_m}{s(T_m s + 1)}}{1 + \frac{K_2 K_3 K_m K_t}{T_m s + 1} + \frac{K_0 K_1 K_2 K_3 K_m}{s(T_m s + 1)}} \\
 &= \frac{1}{\frac{T_m}{K_0 K_1 K_2 K_3 K_m} s^2 + \frac{1 + K_2 K_3 K_m K_t}{K_0 K_1 K_2 K_3 K_m} s + 1}
 \end{aligned}$$

题 2.10 已知系统方程组如下：

$$\begin{cases}
 X_1(s) = G_1(s)R(s) - G_1(s)[G_7(s) - G_8(s)]C(s) \\
 X_2(s) = G_2(s)[X_1(s) - G_6(s)X_3(s)] \\
 X_3(s) = [X_2(s) - C(s)G_5(s)]G_3(s) \\
 C(s) = G_4(s)X_3(s)
 \end{cases}$$

试绘制系统结构图，并求闭环传递函数 $\frac{C(s)}{R(s)}$ 。

解：系统结构如图 2.10 图所示。

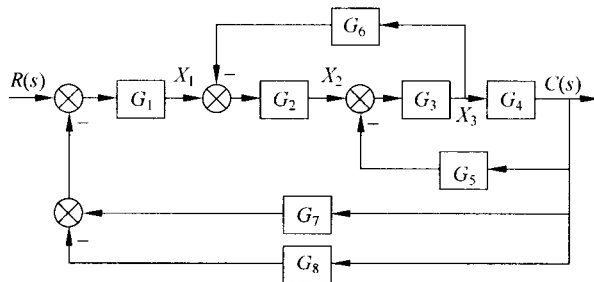
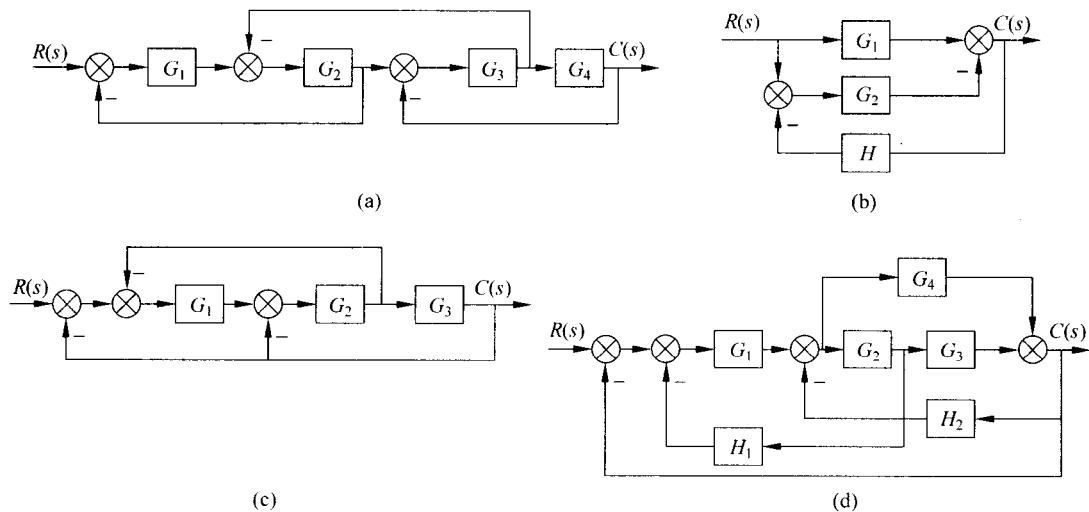


图 2.2 题 2.10 系统结构图

利用结构图等效化简或梅逊增益公式可求出系统的闭环传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1 G_2 G_3 G_4}{1 + G_2 G_3 G_6 + G_3 G_1 G_5 + G_1 G_2 G_3 G_1 G_7 - G_1 G_2 G_3 G_4 G_8}$$

题 2.11 试用结构图等效化简求题 2.11 图所示各系统的传递函数 $\frac{C(s)}{R(s)}$ 。



题 2.11 图