



普通高等教育“十一五”国家级规划教材·配套习题集

自动控制原理

题解 学习指导与指南

主编 张苏英 主审 李友善



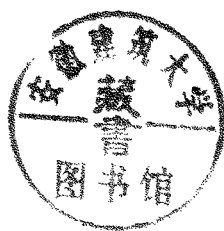
国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材·配套习题集

自动控制原理 学习指导与题解指南

主 编	张 苏 英
主 审	李 友 善
副主编	庞 志 锋
	杜 云
	樊 劲 辉



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理学习指导与题解指南/张苏英主编. —北京:
国防工业出版社, 2007.3

普通高等教育“十一五”国家级规划教材·配套习题集
ISBN 978-7-118-04945-9

I. 自... II. 张... 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 003159 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 22½ 字数 560 千字

2007 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 36.00 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

随着自动控制技术广泛应用于国民经济的各个领域,自动控制原理得到了不断的发展与完善,已经成为高等院校自动化类专业教学中的一门重要的技术基础课。为了帮助本科生及自动控制原理课程的初学者掌握这门技术,也为满足报考硕士研究生的读者作系统复习的需求,编者结合多年从事该课程教学的经验和体会,围绕国家教委关于自动控制原理教学大纲的要求,特编写了该书。

全书共分 10 章。第 1 章介绍了控制系统的一般概念,第 2 章介绍了控制系统的数学模型,第 3 章介绍了线性系统的时域分析,第 4 章介绍了根轨迹法,第 5 章介绍了线性系统的频域分析,第 6 章介绍了控制系统的综合与校正,第 7 章介绍了线性离散系统的分析与综合,第 8 章介绍了线性系统的状态空间分析法,第 9 章介绍了线性系统的状态空间综合法,第 10 章介绍了非线性控制系统分析。

书中各章内容都由三部分构成。第一部分为知识要点分析,详细分析了各章的知识结构、重点和难点,归纳讨论了解析方法,使读者不仅可以清晰地掌握理论,而且可以拓宽思路,灵活运用,帮助读者较好地掌握各个知识点,并把各知识点结合在一起,增强将知识融会贯通的能力;第二部分为参考习题解析,给出了教材中各章习题的分析及解答,可以帮助读者掌握正确的解题思路、解题步骤和解题方法,目的在于使读者能够举一反三、触类旁通;第三部分为考研试题选编,精选部分重点院校的考研试题作为本教材中参考习题的扩展与补充,使读者可以开阔视野,对本课程的经典题型有一个较为全面的掌握。

本书由张苏英教授主编,李友善教授主审。其中第 1、2 章由樊劲辉编写,第 3、6 章由张苏英编写,第 4、5、8 章由庞志锋和杜云合作编写,第 7 章由王素芝、田强、乔世权、王彬合作编写。第 9 章由薛增涛编写,第 10 章由张刚和赵英宝合作编写。全书由张苏英负责统稿。参加本书编写工作的还有马坤、何英秋、李占坤等。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 控制系统的一般概念	1
第 2 章 控制系统的数学模型	3
2.1 知识要点分析	3
2.2 参考习题解析	5
2.3 考研试题选编	26
第 3 章 线性系统的时域分析	31
3.1 知识要点分析	31
3.2 参考习题解析	38
3.3 考研试题选编	75
第 4 章 根轨迹法	81
4.1 知识要点分析	81
4.2 参考习题解析	85
4.3 考研试题选编	109
第 5 章 线性系统的频域分析	118
5.1 知识要点分析	118
5.2 参考习题解析	123
5.3 考研试题选编	158
第 6 章 控制系统的综合与校正	164
6.1 知识要点分析	164
6.2 参考习题解析	167
6.3 考研试题选编	204
第 7 章 线性离散系统的分析与综合	210
7.1 知识要点分析	210
7.2 参考习题解析	215
7.3 考研试题选编	231
第 8 章 线性系统的状态空间分析法	234
8.1 知识要点分析	234
8.2 参考习题解析	242
8.3 考研试题选编	267

第 9 章 线性系统的状态空间综合法	273
9.1 知识要点分析	273
9.2 参考习题解析	278
9.3 考研试题选编	293
第 10 章 非线性控制系统分析	302
10.1 知识要点分析.....	302
10.2 参考习题解析.....	309
10.3 考研试题选编.....	345
参考文献	353

第 1 章 控制系统的一般概念

“自动控制原理”是自动控制技术的基础理论，根据自动控制技术的发展阶段，自动控制原理可以分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

本章主要包含四部分内容：自动控制系统组成、自动控制系统基本控制方式、控制系统的分类以及对控制系统的基本要求。

1. 自动控制的概念

所谓自动控制就是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置（称为控制器），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。

2. 自动控制系统的基本组成

自动控制系统是由控制器和被控对象组成，能够实现自动控制任务的整个组合体。反馈控制系统的一般组成如图 1.1 所示。

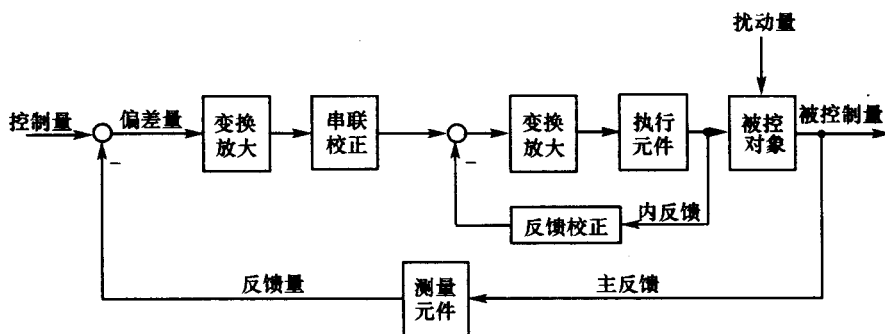


图 1.1 反馈控制系统的一般组成

为测量控制量以及被控制量，系统必须有测量元件。

为实现被控制量至控制量的负反馈以产生偏差信号，系统需有比较元件。

由于偏差信号一般比较微弱，为使其具有足够大的幅值和功率，系统需有放大元件。

为能使系统偏差经放大形成的控制作用驱动被控对象，系统通常还需有执行元件。

另外，为使系统能正常工作，还需在系统中加进能提高其控制性能的元件，称为校正元件。

3. 对自动控制系统的基本要求

自动控制系统有不同的类型，但是对每一类系统的基本要求都是一样的，可以归结为：稳（稳定、平稳）、快（快速）、准（准确）。

稳定性：是保证控制系统正常工作的先决条件，平稳性是对动态响应过程的评价，主要指标包括超调量以及振荡次数等。

快速性：也是对系统动态响应过程的评价，主要指标包括系统的过渡过程时间、上升时间、峰值时间等。

准确性：是指在理想情况下，当过渡过程结束后，被控制量达到的稳态值（即平衡状态）应与期望值一致。主要指标为稳态误差。

4. 自动控制系统的分类

自动控制系统有多种分类方法。例如，按控制方式可分为开环控制、闭环控制（反馈控制）、复合控制等；按元件类型可分为机械系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等；按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等；按系统性能可分为线性系统和非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统和时变系统、确定系统和不确定系统等；按参变量变化规律可分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统等。

5. 自动控制系统的~~基本~~控制方式

自动控制系统的基本控制方式主要有三种，即开环控制方式、闭环控制方式（反馈控制方式）以及复合控制方式。

第2章 控制系统的数学模型

2.1 知识要点分析

数学模型的建立主要有两种方法：分析法(解析法)和实验法。本章只涉及用分析法建立控制系统的数学模型。最常见的是求取系统的传递函数。

1. 知识要点概述

- ① 熟练掌握方框图、信号流图的组成以及绘制方法。
- ② 熟练掌握方框图的等效变换和化简以及与信号流图的相互转换。
- ③ 熟练掌握运用 Mason 公式求取系统传递函数的方法。

2. 传递函数

(1) 传递函数的定义

对于线性定常系统，在零初始条件下，输出的拉氏变换与输入的拉氏变换之比，称为系统的传递函数。

(2) 传递函数与微分方程的关系

设 n 阶线性定常系统由下述 n 阶线性定常微分方程描述：

$$a_0 \frac{d^n}{dt^n} c(t) + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} c(t) + \cdots + a_n c(t) = b_0 \frac{d^m}{dt^m} r(t) + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_m r(t)$$

相应的传递函数为

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_n}$$

传递函数与微分方程之间存在一一对应的关系，具体体现在：传递函数分子与输入信号相对应，而传递函数分母与输出信号相对应；传递函数中 s 的幂次与微分方程中导数的阶次相对应。

(3) 传递函数的性质

- ① 传递函数是复变量 s 的有理真分式函数，即 $m \leq n$ ，且所有系数为实数。
- ② 传递函数是系统输入输出关系的表达式，它只取决于系统的结构参数。传递函数与系统的输入信号的具体形式无关，只与系统输入输出信号的位置有关。
- ③ 传递函数与微分方程有相通性，是一一对应的，非常容易转换。
- ④ 传递函数的反拉氏变换是系统的单位脉冲响应。
- ⑤ 传递函数只是对系统的数学描述，并不反映系统的物理构成。

3. 典型环节

线性定常系统的典型环节有：比例环节、积分环节、惯性环节、振荡环节、微分环节(包括纯微分环节、一阶微分环节和二阶微分环节)以及延迟环节等。

4. 用解析法建立系统数学模型的一般方法

解析法建立数学模型的一般方法：分析系统工作原理后，可以根据方框图求取系统的传递函数；或者根据微分方程组求取系统的传递函数；或者根据系统信号流图求取传递函数等。

由于微分方程与传递函数之间存在一一对应的关系，因此，根据系统的具体情况，可以先写出微分方程或直接写出传递函数，对于电网络，先直接写出传递函数往往比较简便。

5. 方框图与信号流图的绘制

控制系统方框图与信号流图都是描述系统各元部件之间信号传递关系的图形。它们同系统的微分方程和传递函数一样，可以视为一种以图形形式表示的系统的数学模型。

(1) 方框图的组成

方框图的组成主要包括：信号线、函数(传递函数)方框、引出点(分支点)、相加点(求和点)。

(2) 方框图的绘制

① 考虑负载效应，分别列写系统中各元部件的时域方程或复域方程；代数方程的时域形式和复域形式相同，微分方程则必须写成复域形式。

② 根据信号流向，用信号线依次将各方框连接。

(3) 信号流图的绘制

信号流图可依据传递函数绘制，也可从系统方框图按照对应关系得到。

在由方框图绘制信号流图的过程中，节点的选取是关键步骤之一。一般地，输入信号、输出信号、分支点、相加点的输出端应选为信号流图的节点。

6. 方框图的变换与化简

方框图的基本连接形式有串联、并联和反馈三种。

相互间无负载效应的环节串联时，串联后的等效环节的传递函数等于每个串联环节空载时的传递函数乘积。

环节同向并联时，并联后等效环节的传递函数等于各同向并联环节的传递函数之和。

反馈环节的传递函数可以根据闭环传递函数和开环传递函数之间的关系

$$\Phi(s) = \frac{G(s)}{1 \pm G(s)H(s)}$$

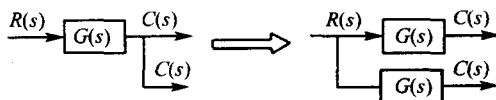
来进行求取。

方框图变换是一种手段，即通过方框图变换使系统中出现三种基本形式，最终的目的是对方框图进行化简。

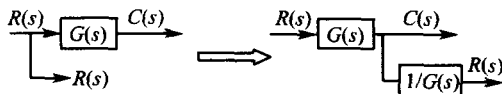
在方框图变换与化简过程中，我们只能减少(或增加)一些中间变量，但各变量之间的数学关系不能改变。

最常见的变换方式如下。

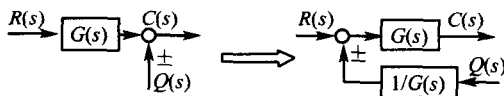
(1) 分支点前移



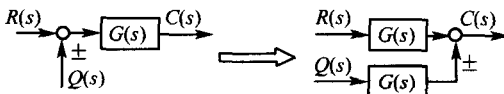
(2) 分支点后移



(3) 相加点前移



(4) 相加点后移



7. Mason 增益公式

应用 Mason 公式可以直接求出系统的传递函数。

Mason 增益公式：

$$P = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^n P_k \Delta_k$$

式中 P ——系统总传递函数；

n ——前向通路总条数；

P_k ——第 k 条前向通路总增益；

Δ ——特征式。

这里

$$\Delta = 1 - \sum L_a + \sum L_b L_c - \sum L_d L_e L_f + \cdots;$$

式中 $\sum L_a$ ——单独回路增益之和；

$\sum L_b L_c$ ——每两个互不接触回路增益乘积之和；

$\sum L_d L_e L_f$ ——每三个互不接触回路增益乘积之和；

Δ_k ——特征式的余子式。即特征式中去掉与第 k 条前向通路相接触的回路增益项 (包括回路增益的乘积项) 后的余式。

注意：在方框图中的第 i 个回路的传递函数 L_i ，应该包含该回路经过的相加点处的“+”号或“-”号。

2.2 参考习题解析

习题 2.1 求取如图 2.1 所示电路的传递函数 $I(s)/U(s)$ 。图中 ψ 为铁芯线圈的磁链， R 为线圈电阻。

【解】由系统特性可得微分方程为：

$$\frac{d\psi(i)}{di} \cdot \frac{di}{dt} + Ri = u$$

式中 $\psi(i)$ ——流经线圈的电流 i 的函数。

$\frac{d\psi(i)}{di}$ —— $\psi(i)$ 曲线上各点的斜率。

因为 $\psi(i)$ 为电流 i 的非线性函数, 所以不能直接使用拉氏变换。但是在很小的范围内可以近似认为是

线性系统, 令 $I_0 = i(0)$ 为工作点电流: $\left. \frac{d\psi(i)}{di} \right|_{i=I_0}$ 为在微

小区域内的常值。

可以使用拉氏变换, 因此可得系统的传递函数为

$$\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1/R}{Ts + 1}$$

式中, $T = \left. \frac{d\psi(i)}{di} \right|_{i=I_0} / R$ 称为时间常数。

【评注】在求取传递函数的题目中, 应考虑初始条件为零的情况。另外, 本题中系统的数学模型为非线性模型, 因此要先作近似处理, 才可以使用拉氏变换, 进而求出系统的传递函数。

习题 2.2 求取如图 2.2 所示无源电路的传递函数 $U_o(s)/U_i(s)$ 。

【解】根据无源网络知识, 可以直接写出复阻抗方程组如下:

$$U_i(s) = R_1 I_1(s) + U_o(s)$$

$$U_o(s) = \frac{1}{Cs} I_2(s)$$

$$U_o(s) = R_2 I_3(s)$$

$$I_1(s) = I_2(s) + I_3(s)$$

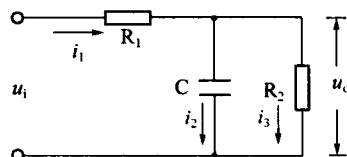


图2.2 无源电路图

解方程组, 消去中间变量 $I_1(s)$ 、 $I_2(s)$ 、 $I_3(s)$ 可得系统的传递函数为

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2}}{\left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right) Cs + 1}$$

习题 2.3 求取如图 2.3 所示有源网络的传递函数 $U_o(s)/U_i(s)$ 。

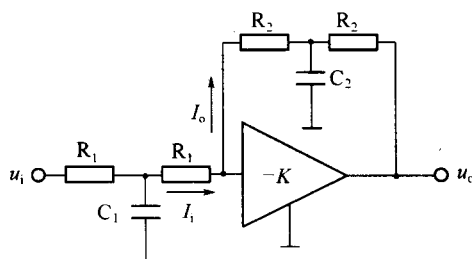


图2.3 有源网络图

【解】根据有源网络知识，可得如下方程组：

$$I_i(s) = \frac{U_i(s)}{R_1 + \frac{R_1 \frac{1}{C_1 s}}{R_1 + \frac{1}{C_1 s}}} \cdot \frac{\frac{1}{C_1 s}}{R_1 + \frac{1}{C_1 s}} = \frac{\frac{1}{2R_1}}{\frac{1}{2}R_1 C_1 s + 1} \cdot U_i(s)$$

$$I_o(s) = -\frac{\frac{1}{2R_2}}{\frac{1}{2}R_2 C_2 s + 1} \cdot U_o(s)$$

$$I_o(s) = I_i(s)$$

消去中间变量可得系统的传递函数为

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = -\frac{R_2 \left(\frac{1}{2}R_2 C_2 s + 1 \right)}{R_1 \left(\frac{1}{2}R_1 C_1 s + 1 \right)}$$

习题 2.4 图 2.4 所示为机械平移系统，其中 m 、 k 、 f 分别代表物体质量、线性弹簧的弹性系数、阻尼器的黏性摩擦系数。设输入信号为作用力 $f_i(t)$ ，输出信号为物体位移 $y(t)$ ，试求取该系统的传递函数 $Y(s)/F_i(s)$ 。

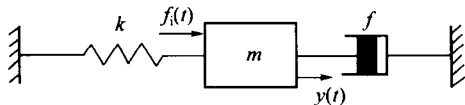


图2.4 机械平移系统

【解】根据牛顿定律可得系统的运动方程为

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = f_i - f \frac{dy}{dt} - ky$$

式中 $\frac{d^2 y}{dt^2}$ ——物体 m 的加速度；

$f \frac{dy}{dt}$ ——阻尼器的阻力；

ky ——线性弹簧的弹力。

方程两边取拉普拉斯变换得

$$ms^2 Y(s) = F_i(s) - f s Y(s) - k Y(s)$$

整理可得系统的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{F_i(s)} = \frac{1}{ms^2 + fs + k} = \frac{\frac{1}{k}}{\frac{m}{k}s^2 + \frac{f}{k}s + 1}$$

习题 2.5 图 2.5 所示为机械转动系统, 其中 J 表示转动惯量, f 代表黏性摩擦系数。设输入信号为外作用力矩 $m_i(t)$, 输出信号为轴角位移 $\theta(t)$ 。试求取系统的传递函数 $\theta(s)/M_i(s)$ 。

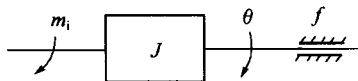


图2.5 机械转动系统

【解】 根据牛顿定律可得系统对应的方程为

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = m_i - f \frac{d\theta}{dt}$$

式中 $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ ——转轴的角加速度;

$\frac{d\theta}{dt}$ ——转轴的角速度;

$f \frac{d\theta}{dt}$ ——转轴对物体的黏性力矩。

方程两边取拉普拉斯变换可得

$$Js^2\theta(s) = M_i(s) - fs\theta(s)$$

整理可得系统的传递函数为

$$\frac{\theta(s)}{M_i(s)} = \frac{1}{Js^2 + fs} = \frac{\frac{1}{f}}{s \left(\frac{J}{f}s + 1 \right)}$$

习题 2.6 如图 2.6 所示为齿轮传动系统, 其中 M_i 为主动轴上的外作用力矩, M_1 为齿轮 1 承受的阻力矩, M_2 为齿轮 2 的传动转矩。试求取传递函数 $\theta_2(s)/M_i(s)$ 。

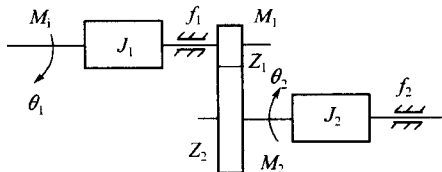


图2.6 齿轮传动系统

【解】 根据牛顿定律可得主动轴上对应的方程为

$$M_i = J_1 \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + f_1 \frac{d\theta_1}{dt} + M_1$$

从动轴上对应的方程为

$$J_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2} + f_2 \frac{d\theta_2}{dt} = M_2$$

根据两齿轮做功相等, 可得: $M_1\theta_1 = M_2\theta_2$, 且角速度与齿数成反比, 即

$$M_2 = \frac{M_1\theta_1}{\theta_2} = M_1 \frac{Z_2}{Z_1} \Rightarrow \theta_1 = \frac{Z_2}{Z_1} \theta_2$$

以上两式中设初始条件为零, 取拉普拉斯变换可得方程如下:

$$M_1(s) = J_1 s^2 \theta_1(s) + f_1 s \theta_1(s) + M_1(s)$$

$$J_2 s^2 \theta_2(s) + f_2 s \theta_2(s) = M_2(s)$$

将 $\theta_1 = \frac{Z_2}{Z_1} \theta_2$ 及 $M_2 = \frac{M_1\theta_1}{\theta_2} = M_1 \frac{Z_2}{Z_1}$ 代入上面两式中可得方程:

$$J_2 s^2 \theta_2(s) + f_2 s \theta_2(s) = k [M_1(s) - k J_1 s^2 \theta_2(s) - k f_1 s \theta_2(s)]$$

其中 $k = \frac{Z_2}{Z_1}$ 。

整理可得系统的传递函数为

$$\frac{\theta_2(s)}{M_1(s)} = \frac{k}{k^2 (J_1 s^2 + f_1 s) + J_2 s^2 + f_2 s}$$

即

$$\frac{\theta_2(s)}{M_1(s)} = \frac{\frac{Z_2}{Z_1}}{\left[J_2 + \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 J_1 \right] s^2 + \left[f_2 + \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 f_1 \right] s}$$

习题 2.7 已知系统方框图如图 2.7 所示。试计算传递函数 $C_1(s)/R_1(s)$ 、 $C_2(s)/R_1(s)$ 、 $C_1(s)/R_2(s)$ 、 $C_2(s)/R_2(s)$ 。

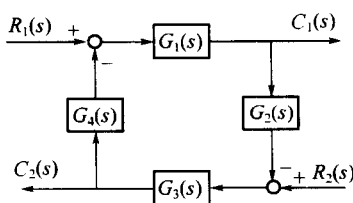


图2.7 系统方框图

【解】应用 Mason 公式求取系统的传递函数。

系统仅包含一个回路, 则有:

$$L_1 = G_1 G_2 G_3 G_4$$

因此特征式为

$$\Delta = 1 - G_1 G_2 G_3 G_4$$

令 $R_2(s) = 0$, 则有

$$\frac{C_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_1}{1 - G_1 G_2 G_3 G_4}, \quad \frac{C_2(s)}{R_1(s)} = \frac{-G_1 G_2 G_3}{1 - G_1 G_2 G_3 G_4}$$

令 $R_1(s) = 0$ ，则有

$$\frac{C_1(s)}{R_2(s)} = \frac{-G_1 G_3 G_4}{1 - G_1 G_2 G_3 G_4}, \quad \frac{C_2(s)}{R_2(s)} = \frac{G_3}{1 - G_1 G_2 G_3 G_4}$$

习题 2.8 设已知描述某控制系统的运动方程如下：

$$x_1(t) = r(t) - c(t) - f_1(t)$$

$$x_2(t) = K_1 x_1(t)$$

$$x_3(t) = x_2(t) - x_5(t)$$

$$T \frac{dx_4(t)}{dt} = x_3(t)$$

$$x_5(t) = x_4(t) - K_2 f_2(t)$$

$$K_0 x_5(t) = \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + \frac{dc(t)}{dt}$$

式中 $r(t)$ ——系统的控制信号；

$f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ ——系统的扰动信号；

$c(t)$ ——系统的被控制信号；

$x_1(t) \sim x_5(t)$ ——中间变量；

K_0 、 K_1 、 K_2 ——常值增益；

T ——时间常数。

试绘制系统的方框图，并由方框图求取闭环传递函数 $C(s)/R(s)$ 、 $C(s)/F_1(s)$ 以及 $C(s)/F_2(s)$ 。

【解】① 对系统的微分方程组取拉普拉斯变换，可得系统的复域方程组为

$$X_1(s) = R(s) - C(s) - F_1(s)$$

$$X_2(s) = K_1 X_1(s)$$

$$X_3(s) = X_2(s) - X_5(s)$$

$$TsX_4(s) = X_3(s)$$

$$X_5(s) = X_4(s) - K_2 F_2(s)$$

$$K_0 X_5(s) = s^2 C(s) + sC(s)$$

根据复域方程组绘制系统的方框图如图 2.8 所示。

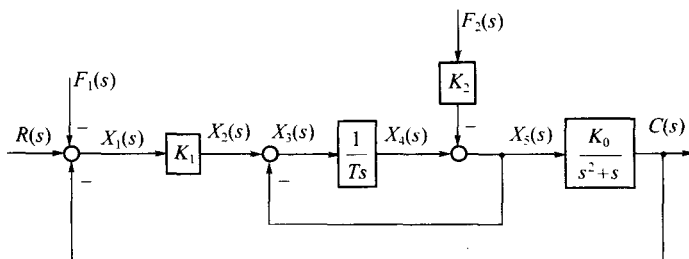


图2.8 系统方框图

② 求传递函数 $C(s)/R(s)$ ，令 $F_1(s)=0$ 且 $F_2(s)=0$ ，可得：系统有两条回路：

$$L_1 = -\frac{1}{Ts}, \quad L_2 = -\frac{K_0 K_1}{Ts^2(s+1)}, \quad \text{无不接触回路。}$$

前向通路有一条： $P_1 = \frac{K_0 K_1}{Ts^2(s+1)}$ ， $\Delta_1=1$ ，应用 Mason 公式可得系统的传递函数

$C(s)/R(s)$ 为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_0 K_1}{Ts^2(s+1)}}{1 + \frac{1}{Ts} + \frac{K_0 K_1}{Ts^2(s+1)}} = \frac{K_0 K_1}{Ts^3 + (T+1)s^2 + s + K_0 K_1}$$

同理：求 $C(s)/F_1(s)$ ，令 $R(s)=0$ 且 $F_2(s)=0$ ，由于 $F_1(s)$ 的作用点与 $R(s)$ 相同，符号相反，所以可得

$$\frac{C(s)}{F_1(s)} = -\frac{\frac{K_0 K_1}{Ts^2(s+1)}}{1 + \frac{1}{Ts} + \frac{K_0 K_1}{Ts^2(s+1)}} = -\frac{K_0 K_1}{Ts^3 + (T+1)s^2 + s + K_0 K_1}$$

求 $C(s)/F_2(s)$ ，令 $R(s)=0$ 且 $F_1(s)=0$ ，回路情况不变，前向通路有一条：

$$P_1 = -\frac{K_0 K_2}{s(s+1)}, \quad \Delta_1=1$$

应用 Mason 公式可得

$$\frac{C(s)}{F_2(s)} = \frac{-\frac{K_0 K_2}{s(s+1)}}{1 + \frac{1}{Ts} + \frac{K_0 K_1}{Ts^2(s+1)}} = -\frac{K_0 K_2 Ts}{Ts^3 + (T+1)s^2 + K_0 K_1}$$

习题 2.9 求取图 2.9 所示 RC 电路的传递函数 $U_3(s)/U_1(s)$ 。图中 K 为放大器的增益。

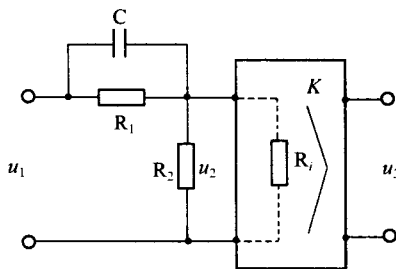


图2.9 电路图

【解】 设 $R_i = \infty$ ，则本题不需要考虑负载效应，可直接写出各变量关系，得如下方程组：

$$U_1(s) = U_2(s) + \frac{U_2(s)}{R_2} \cdot \left(\frac{1}{Cs} \parallel R_1 \right) = \left[1 + \frac{R_1}{R_2(R_1 Cs + 1)} \right] U_2(s)$$