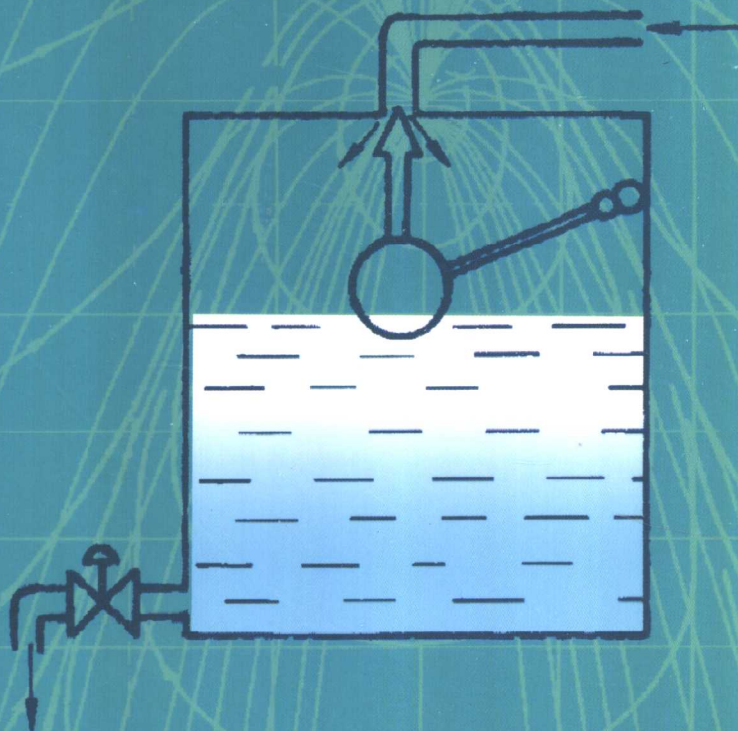


21世纪高校理工科重点课程辅导书

# 自动控制原理

## 学习指导与精选题型详解

陈来好 彭康拥 编



华南理工大学出版社

21 世纪高校理工科重点课程辅导书

# 自动控制原理

## 学习指导与精选题型详解

陈来好 彭康拥 编

华南理工大学出版社  
·广州·

## 内 容 简 介

本书是针对“自动控制原理”这门理工科重点课程,为学生复习和考研编写的学习辅导书。全书共8章,包括:自动控制的一般概念;自动控制系统的数学模型;自动控制系统的时域分析法;根轨迹分析法;频率特性分析法;自动控制系统的校正;非线性系统的分析方法;线性离散控制系统分析。附录中给出了各章习题答案以及部分高校硕士研究生入学考试试题。

本书所精选的例题和习题,内容全面、重点突出、分析透彻,可帮助学生理清思路、掌握重点、突破难点,从而提高分析问题和解决问题的能力,因此它是学生复习必读、考研必备的一本辅导书。

## 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理学习指导与精选题型详解/陈来好,彭康拥编. —广州:华南理工大学出版社, 2004.1

(21世纪高校理工科重点课程辅导书)

ISBN 7-5623-2048-9

I. 自… II. ①陈…②彭… III. 自动控制理论-高等学校-解题 IV. TP13-44

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第096434号

总发行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学17号楼,邮编510640)

发行部电话:020-87113487 87111048(传真)

E-mail: scut202@scut.edu.cn

http://www.scutpress.com

责任编辑:詹志青

印刷者:中山市新华印刷厂有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:16.25 字数:400千

版次:2004年1月第1版第1次印刷

印数:1~5000册

定价:26.00元

版权所有 盗版必究

# 前 言

随着人类跨入 21 世纪, 自动控制技术已经广泛地应用于国民经济的各个领域, 并成为探索各种新技术的工具。自动控制原理是理工科各类专业的技术基础课, 更是自动化专业的重点课程。然而自动控制原理课内容的理论性和实践性很强, 学生学起来比较困难。为了帮助学生理清思路、总结归纳和有效地提高解题能力, 应广大学生及有志考研者的要求, 我们结合多年的教学实践经验, 并吸取兄弟院校有关教材及资料的精华, 编写了这本《自动控制原理学习指导与精选题型详解》。

本书力求通过对各章基本内容和基本要求的归纳和精选例题的分析解答, 帮助读者正确理解和应用自动控制原理的基本理论和基本方法。本书例题和习题内容丰富, 注意理论与实践相结合, 注重知识综合应用能力的训练和培养, 培养学生分析问题、解决问题的能力 and 创新能力; 并附有各章习题的答案和部分高校近年来硕士研究生入学考试试题。因此, 本书既可作为学生和自学者学习“自动控制原理”课程的指导书, 也可为考研者进行系统复习提供有益的辅导, 其适用面较宽。本书可与电子工业部“九五”规划教材《自动控制原理》(高国燊 余文杰编著, 华南理工大学出版社出版) 配套使用。

本书由华南理工大学陈来好、彭康拥副教授编写。全书共有 8 章, 其中第 1、2、3、7、8 章由陈来好副教授编写, 第 4、5、6 章由彭康拥副教授编写。全书由金韶宁副教授主审, 审者对书中例题、习题进行了认真细致的审核并提出许多宝贵的修改意见。华南理工大学高国燊、余文杰教授对本书的编写提出了许多宝贵的意见和建议; 华南理工大学自动化学院副院长、博士生导师胡跃明教授对本书的编写工作给予关心和指导, 在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限, 书中难免有不当之处, 敬请读者批评指正。

编 者  
2003 年 9 月

# 目 录

1 自动控制的一般概念 .....	1
1.1 本章要点 .....	1
1.2 例题详解 .....	1
1.3 习题 .....	5
2 自动控制系统的数学模型 .....	7
2.1 本章要点 .....	7
2.2 例题详解 .....	8
2.3 习题 .....	19
3 时域分析法 .....	23
3.1 本章要点 .....	23
3.2 例题详解 .....	24
3.3 习题 .....	41
4 根轨迹分析法 .....	48
4.1 本章要点 .....	48
4.2 例题详解 .....	51
4.3 习题 .....	75
5 频率特性分析法 .....	80
5.1 本章要点 .....	80
5.2 例题详解 .....	89
5.3 习题 .....	110
6 自动控制系统的校正 .....	117
6.1 本章要点 .....	117
6.2 例题详解 .....	128
6.3 习题 .....	157
7 非线性系统的分析方法 .....	160
7.1 本章要点 .....	160
7.2 例题详解 .....	166
7.3 习题 .....	186
8 线性离散系统分析方法 .....	191
8.1 本章要点 .....	191
8.2 例题详解 .....	194

8.3 习题 .....	206
附录 I 习题答案 .....	210
附录 II 部分高校硕士研究生入学考试题 .....	238
参考文献 .....	252

# 1 自动控制的一般概念

## 1.1 本章要点

### 1.1.1 基本概念

#### 1. 自动控制

自动控制是指在没有人直接参与的情况下,利用自动控制装置(简称控制器),使被控对象(简称对象)自动地按预定的规律运行。

#### 2. 自动控制系统

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。

#### 3. 负反馈控制原理

将系统的输出信号引回输入端,与输入信号相减得到偏差信号,由偏差信号产生相应的控制作用,力图减少或消除偏差。反馈控制又称闭环控制或偏差控制。

#### 4. 基本控制方式

基本控制方式有开环控制、闭环控制、复合控制。

#### 5. 自动控制系统分类

若按给定输入信号形式分类,自动控制系统可分为恒值系统、随动系统、程序控制系统。

#### 6. 对自动控制系统的基本要求

“稳”——基本要求:系统首先必须具有稳定性才能正常工作。

“快”——动态要求:调节时间要短,超调量要小。

“准”——稳态要求:稳态误差要小。

### 1.1.2 基本要求

(1)掌握自动控制的含义、自动控制系统的组成、负反馈控制原理、方块图表示方法。

(2)理解自动控制系统的分类、工程上对自动控制系统的基本要求。

(3)了解自动控制理论的发展过程及发展趋势。

## 1.2 例题详解

**例 1-1** 某住宅楼水池水位控制系统如图 1-1 所示。试简述系统各组成元件的作用及系统的工作原理,并画出系统的方块图。

**解** 该系统的控制任务是保持水池水位基本不变。水池是被控对象,水位  $H$  是被控

量,而  $H_r$  是水位的希望值。

浮子随水位上下浮动,可以反映水位的实际高度  $H$ ,也可以表示水位给定(希望)高度与实际高度的偏差  $H_r - H$ ,相当于测量元件和比较元件。

浮子带动铰链机构控制进水阀开度,调节进水量,从而控制水位高度,故铰链和控制阀相当于放大元件和执行元件。

系统的工作原理:设系统原来处于进、出水量相等,水位高度等于给定值(即  $H = H_r$ )的工作状态下,若出水量  $Q_2$  增大(而进水量一时没有改变),则  $Q_1 < Q_2$ ,水位高度  $H$  下降,使浮子下移,产生水位偏差  $H_r - H > 0$ ,

铰链联动使进水阀门开度增大,进水量  $Q_1$  增大,直至  $Q_1$  重新等于  $Q_2$ ,最后使水位高  $H$  又恢复到或接近希望值  $H_r$ 。

由以上分析可画出系统的方块图,如图 1-2 所示。

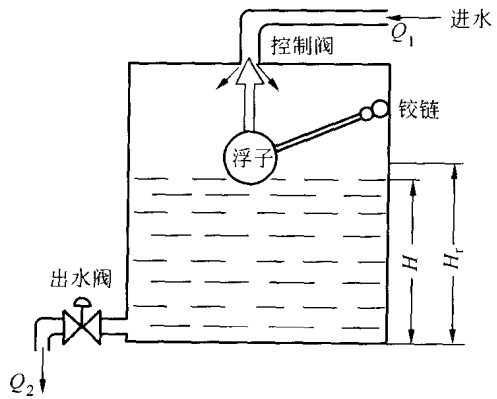


图 1-1 水位控制系统

$Q_1$ —进水量;  $Q_2$ —出水量;  $H$ —实际水位;  $H_r$ —希望水位

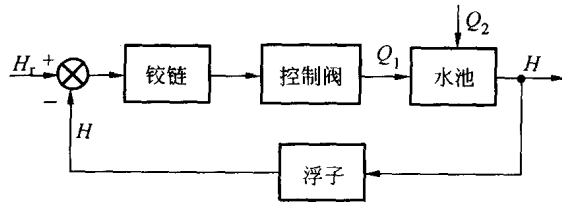


图 1-2 水位控制系统方块图

例 1-2 电冰箱制冷系统工作原理如图 1-3 所示。试简述系统的工作原理,指出系统的被控对象、被控量和给定量,画出系统方块图。

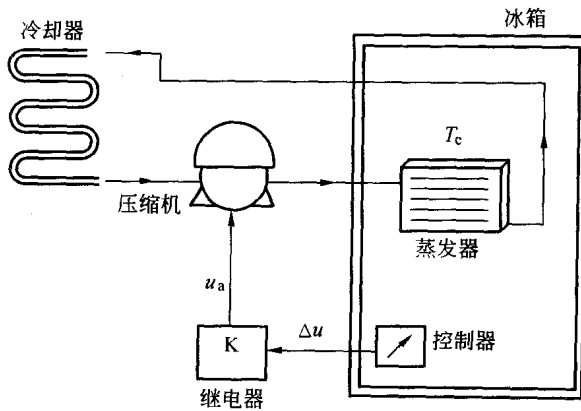


图 1-3 电冰箱制冷系统原理图



**解** 系统的控制任务是保持冰箱内温度  $T_c$  等于给定温度  $T_r$ 。冰箱体是被控对象,箱内温度是被控量,希望的温度  $T_r$  为给定量(由电位器的输出电压  $u_r$  对应给出)。

**工作原理:**温度控制器中的双金属温度传感器(测量元件)感受冰箱内的温度并将其转换为电压信号  $u_c$ ,与控制器旋钮设定的电位器输出电压  $u_r$ (对应于希望温度  $T_r$ )相比较,构成偏差电压  $\Delta u = u_r - u_c$ (表征实际温度与希望温度的偏差),控制继电器 K。当  $\Delta u$  大到一定值时,继电器接通,压缩机启动,将蒸发器中的高温低压制冷剂送往冷却器散热,降温后的低温低压制冷剂被压缩成低温高压液态进入蒸发器,急速降压扩散成气体,吸收箱体热量,使箱体的温度下降;而高温低压制冷剂又被吸入冷却器。如此循环,使冰箱达到制冷的效果。在这里,继电器、压缩机、蒸发器、冷却器所组成的制冷剂循环系统起执行元件的作用。系统的方块图如图 1-4 所示。

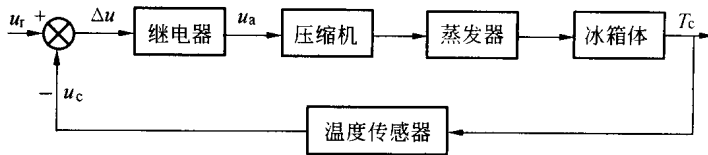


图 1-4 电冰箱制冷系统方块图

**讨论** 被控对象是看得见的实体,不能与被控量相混淆。被控量则是表征被控对象工作状态的物理量。确定被控对象要看控制的目的和任务。本例中的控制任务是使箱体内温度  $T_c$  与设定温度  $T_r$  相一致,所以被控对象是冰箱箱体而不是压缩机或制冷剂。

**例 1-3** 某角位移随动系统如图 1-5 所示,试分析系统的工作原理,画出系统的方块图。

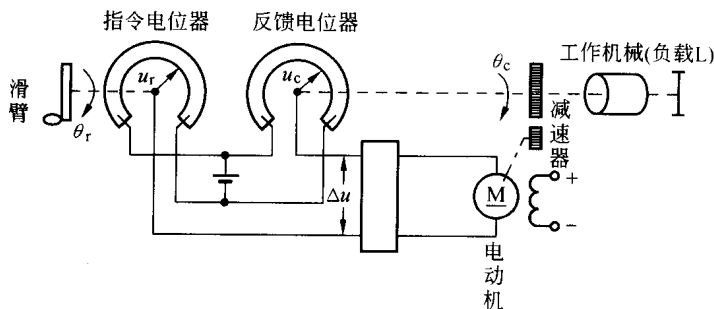


图 1-5 角位移随动系统原理图

**解** 该系统的任务是使负载 L(工作机械)的角位移  $\theta_c$  跟随滑臂给定角度  $\theta_r$  的变化而变化,即要求被控量  $\theta_c$  随给定量  $\theta_r$  之动而动,简称“随动”。

指令电位器和反馈电位器组成的电桥电路是测量、比较元件,其作用是测量给定量(即输入角度  $\theta_r$ )和被控量(即输出角度  $\theta_c$ ),即将它们分别转换成与之成正比的输入电压  $u_r$  和输出电压  $u_c$ ,并产生与偏差角度  $\Delta\theta = \theta_r - \theta_c$  成正比的偏差电压  $\Delta u = u_r - u_c$ 。

当负载轴的实际位置  $\theta_c$  与给定位置  $\theta_r$  相同时,则  $\Delta u = 0$ ,电动机不转动。当负载轴的实际位置  $\theta_c$  与给定位置  $\theta_r$  不相同,  $\Delta u \neq 0$ ,偏差电压  $\Delta u$  经放大器放大,使执行电动机转

动,再通过减速器带动负载轴和反馈电位器滑臂向减小偏差的方向转动,最终当  $\theta_c = \theta_r$  时,电动机停转,系统达到新的平衡状态,从而实现了角位移跟踪的目的。

在该系统中,负载  $L$ (工作机械)是被控对象,负载轴的角位移  $\theta_c$  是被控量,放大器是放大元件,而电动机和减速器是执行元件。这是一个典型的位置随动系统,系统的方块图如图 1-6 所示。

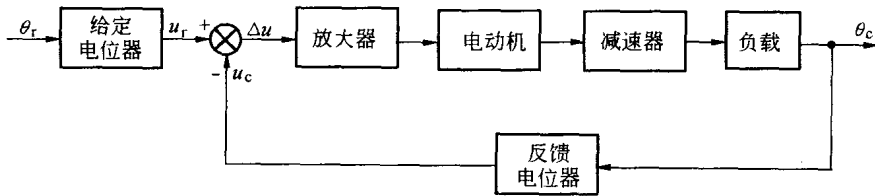


图 1-6 角位移随动系统方块图

**例 1-4** 函数记录仪是一种自动记录电压信号的仪器,其原理如图 1-7 所示。试分析系统的工作原理并画出系统的方块图。

**解** 该系统的任务是使记录笔的位移  $L$ (对应于由电位器  $R_1$ 、 $R_2$  所组成的电桥电路的输出电压  $u_f$ ) 跟随待记录电压  $u_g$  变化,所以该系统属于随动系统,被控对象是记录笔,记录笔的位移  $L$  为被控量,而待记录电压  $u_g$  为给定输入量。

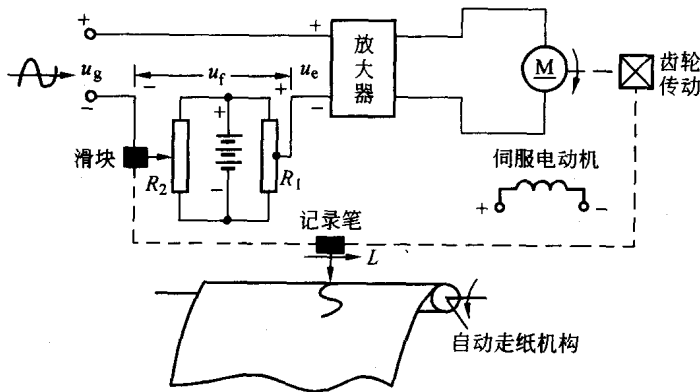


图 1-7 函数记录仪原理图

由图 1-7 可见,电桥电路为测量、比较元件,  $u_e = u_g - u_f$  为偏差信号,经放大后驱动伺服电动机,并经减速齿轮带动记录笔和电位器  $R_2$  的滑块移动。当  $u_g > u_f$  时,  $u_e$  为正,记录笔正向移动,同时滑块移动结果使  $u_f$  增大;当  $u_g < u_f$  时,  $u_e$  为负,记录笔及  $R_2$  滑块均反向移动,  $u_f$  减少;当  $u_g = u_f$  时,  $u_e = 0$ ,移动停止。总之,记录笔位移跟随待记录输入电压  $u_g$  大小而变化。该系统的方块图如图 1-8 所示。

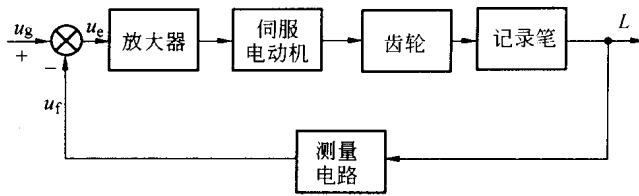


图 1-8 函数记录仪方块图

## 1.3 习题

**题 1-1** 电动机转速控制系统如图 1-9 所示。试分析系统的工作原理,说明测速机的作用,找出系统的被控量、给定输入量、反馈量;画出系统的方块图。

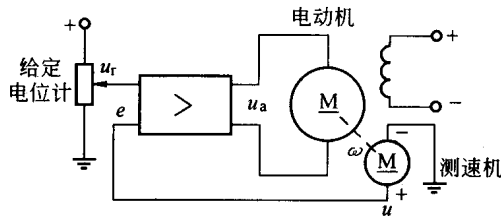


图 1-9 电动机调速系统

**题 1-2** 某分立元件组成的直流稳压电源原理图如图 1-10 所示。分析其工作原理,并说明哪些元件起测量、比较、放大、执行的作用,系统的被控量、给定输入量、扰动量是什么?画出该系统的方块图。

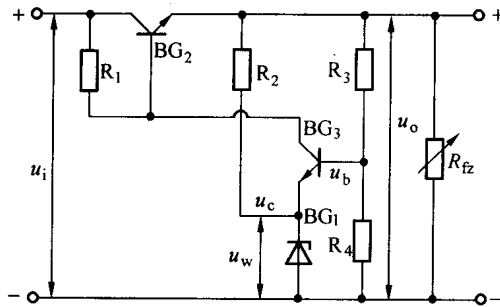


图 1-10 直流稳压电源原理图

**题 1-3** 图 1-11 是按扰动补偿的复合控制的调速系统。系统中,负载力矩  $M_c$  的变化将引起转速的改变。如果能测量出变化的负载力矩,并根据它的大小产生附加的控制作用,以补偿由它引起的转速改变,这样就可以克服或减小力矩变化对转速的影响,这里电枢电流  $i$  反映负载力矩的大小,即  $u_3$  作为附加的控制电压,它将引起  $u_4$  的变化。复合控制把闭环控制和开环控制有机地结合起来,可获得较理想的控制效果。请指出系统的给定量、

被控量和扰动量,并画出该系统的方块图。

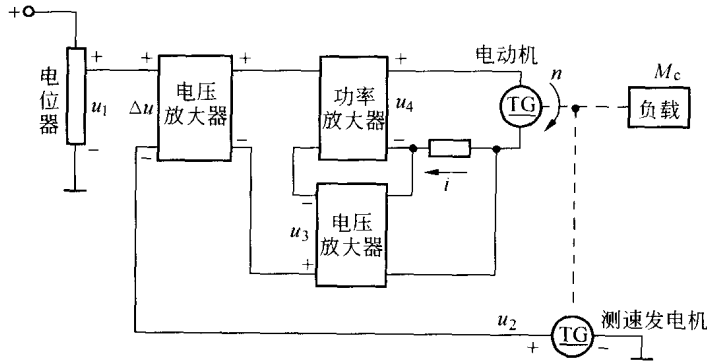


图 1-11 复合控制调速系统

题 1-4 图 1-12 是一个带有测速负反馈的随动系统,试分析系统的工作原理,并画出系统的方块图。

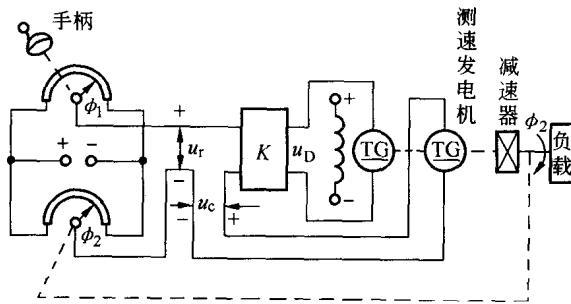


图 1-12 带测速负反馈的随动系统

题 1-5 某自动开、闭门控制系统如图 1-13 所示。指出该系统给定量的特点和电位器 \$R\_p\$ 的作用,该系统属于哪种类型的控制系统? 画出系统的方块图。

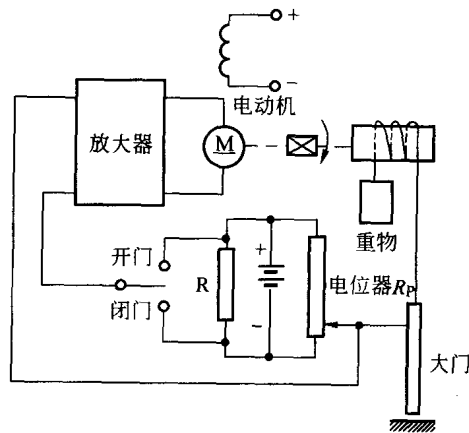


图 1-13 自动开、闭门控制系统

# 2 自动控制系统的数学模型

## 2.1 本章要点

### 2.1.1 基本概念

#### 1. 传递函数

(1)定义:传递函数是在初始条件全为零的条件下,系统输出信号的拉氏变换与输入信号的拉氏变换之比(初始条件全为零是指当 $t < 0$ 时,系统的输入、输出信号以及它们的各阶导数全为零)。

(2)性质:①传递函数只适用于线性定常系统;②传递函数表达式中分子、分母多项式各项系数的值完全取决于系统的结构和参数,所以它是系统的动态数学模型;③系统的传递函数与该系统的微分方程相联系,两者可以相互转换;④实际物理系统分母多项式的阶数 $n$ 总是大于或等于分子多项式的阶数 $m$ ,即 $n \geq m$ ,并且将分母多项式的阶数为 $n$ 的系统称为 $n$ 阶系统;⑤传递函数是一个单输入、单输出函数;⑥传递函数可以用零、极点形式来表示。

#### 2. 典型环节

典型环节是具有最基本相同形式传递函数的元件的集合。

线性定常系统的典型环节有:放大环节、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)、延迟环节。

#### 3. 结构图

(1)组成:信号线、函数(传递函数)方块、相加点、分支点。

(2)特点:①结构图是线性定常系统数学模型的一种图示形式;②利用结构图可以直观地研究系统的运动特性,分析各环节及其参数变化对系统性能的影响;③同一系统的结构图形式不是唯一的,但对应于确定的输入、输出信号的系统,其传递函数是唯一的。

#### (3)结构图等效变换法则

所谓“等效变换”,是指系统在变换前和变换后,有关的输出信号与输入信号之间的传递函数保持不变。

等效化简结构图的主要方法是将串联环节、并联环节、基本反馈环节用一个等效环节代替。化简结构图的关键是解除交叉结构,即通过移动相加点或分支点,使系统中环节间的连接关系化为串联连接、并联连接和基本反馈连接,最后将系统化简为一个等效环节。

#### 4. 信号流图

(1)基本符号:节点、支路、传输。

(2)有关术语:源节点、阱节点、混合节点、前向通路、回路、不接触回路。

(3)信号流图与结构图本质上是一样的,只是图形中所用的符号不同。

### 5. 梅逊(Mason)公式

在系统的结构图或信号流图中,输出量与输入量之间的传递函数  $G(s)$  可由梅逊(Mason)公式直接求得,即

$$G(s) = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^n P_k \cdot \Delta_k$$

式中,  $n$ ——系统前向通道的总数;

$P_k$ ——从输入到输出的第  $k$  条前向通道上各传递函数之积(简称第  $k$  条前向通道的传递函数);

$\Delta$ ——系统的特征式,其计算公式为:

$$\begin{aligned} \Delta &= 1 - \sum_a L_a + \sum_{b,c} L_b \cdot L_c - \sum_{d,e,f} L_d \cdot L_e \cdot L_f + \dots \\ &= 1 - (\text{各回路的回路传递函数之和}) + \\ &\quad (\text{所有两两互不接触回路的回路传递函数乘积之和}) - \\ &\quad (\text{所有三个互不接触回路的回路传递函数乘积之和}) + \dots \end{aligned}$$

$\Delta_k$ ——第  $k$  条前向通道的余子式,它等于在  $\Delta$  中,将与第  $k$  条前向通道相接触的回路传递函数除去后所余下的部分。

应该注意,在结构图中第  $i$  个回路的回路传递函数  $L_i$  应包含该回路所通过的相加点进行运算的“+”、“-”符号。

#### 2.1.2 基本要求

- (1)了解元件和系统微分方程建立的一般方法。
- (2)牢固掌握传递函数的概念、定义和性质。
- (3)熟悉典型环节及其传递函数。
- (4)熟练地对系统结构图进行等效变换。
- (5)正确理解并利用梅逊公式求取系统的传递函数。
- (6)初步了解脉冲响应函数的概念及性质。

## 2.2 例题详解

例 2-1 某 RLC 网络如图 2-1 所示,其中  $u_o$  和  $u_i$  分别为网络的输出量和输入量。

①求出网络的微分方程;②求出网络的传递函数;③画出网络的结构图并求出网络的传递函数。

**解 分析:**通过本题主要是明确微分方程、结构图、传递函数之间的对应关系与转换关系,从而灵活运用这三种数学模型。

①根据电路定律,列写出方程组:

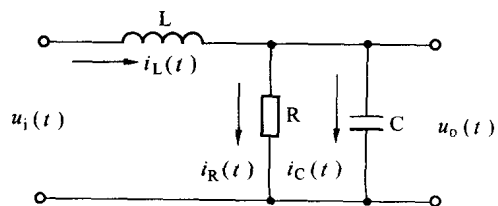


图 2-1 RLC 网络

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} + u_o = u_i \quad (2-1)$$

$$u_o = R \cdot i_R = \frac{1}{C} \int i_C dt \quad (2-2)$$

$$i_L = i_R + i_C \quad (2-3)$$

消去中间变量  $i_L, i_R, i_C$  可得网络的微分方程:

$$L \cdot C \cdot \frac{d^2 u_o}{dt^2} + \frac{L}{R} \cdot \frac{du_o}{dt} + u_o = u_i \quad (2-4)$$

令  $T_C = RC, T_L = \frac{L}{R}$  可将上式改写为

$$T_C \cdot T_L \cdot \frac{d^2 u_o}{dt^2} + T_L \cdot \frac{du_o}{dt} + u_o = u_i \quad (2-5)$$

这就是所求网络的二阶微分方程。

② 当初始条件全为零时,对式(2-5)进行拉氏变换得

$$[T_C \cdot T_L \cdot s^2 + T_L \cdot s + 1]U_o(s) = U_i(s)$$

网络的传递函数为

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{T_C \cdot T_L \cdot s^2 + T_L \cdot s + 1} \quad (2-6)$$

③ 将微分方程式(2-1)、(2-2)、(2-3)分别在初始条件全为零时进行拉氏变换,得

$$L \cdot sI_L(s) + U_o(s) = U_i(s) \quad (2-7)$$

$$U_o(s) = R \cdot I_R(s) = \frac{1}{Cs} I_C(s) \quad (2-8)$$

$$I_L(s) = I_R(s) + I_C(s) \quad (2-9)$$

由以上三式可画出该网络的结构图如图 2-2 所示。

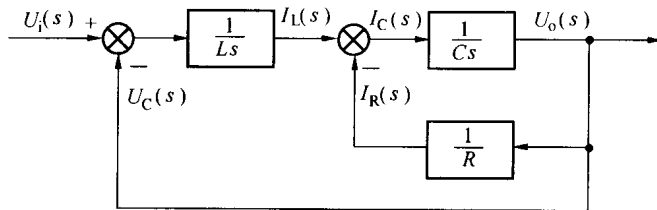


图 2-2 RLC 网络结构图

对例图 2-2 进行等效变换化简最后可得该网络的传递函数为

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{T_C \cdot T_L \cdot s^2 + T_L \cdot s + 1} \quad (2-10)$$

可见,由网络的微分方程经拉氏变换求取传递函数,与由网络的结构图经等效变换求取传递函数,其结果是相同的。

例 2-2 电动机转角随动系统原理图如图 2-3 所示。图中, M 和 TG 分别为直流电动机和直流测速机,  $u_i$  为给定输入电压,  $\theta$  为电动机转角。直流电动机的机电时间常数为  $\tau_m$ , 反电动势系数为  $k_e$ ,  $u_T = k_s \cdot \dot{\theta}$ ,  $u_{T1} = k_3 \cdot u_T$ ,  $u_o = k_4 \cdot \theta$ 。绘出系统的方块图、结构图,并求

传递函数  $\theta(s)/U_i(s)$ 。

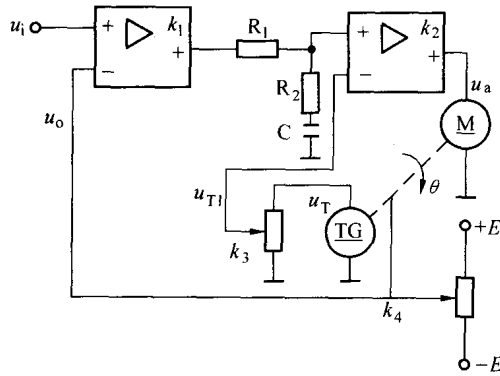


图 2-3

解 经分析可绘出系统的方块图和结构图如图 2-4a、b 所示。

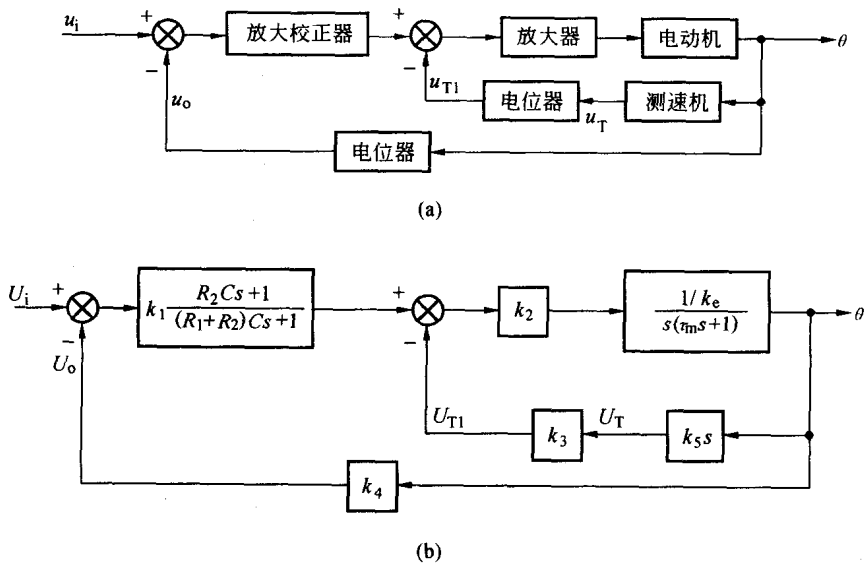


图 2-4

令  $\tau = R_2C, T = (R_1 + R_2)C$ , 由结构图经等效变换可得

$$\Phi(s) = \frac{\theta(s)}{U_i(s)} = \frac{k_1 \cdot \frac{\tau s + 1}{Ts + 1} \cdot \frac{k_2/k_e}{s(\tau_m s + 1)}}{1 + k_1 \cdot \frac{\tau s + 1}{Ts + 1} \cdot \frac{k_2/k_e}{s(\tau_m s + 1)} \cdot k_4 + \frac{k_2/k_e}{s(\tau_m s + 1)} \cdot k_3 \cdot k_5 \cdot s}$$

$$= \frac{k_1 k_2 (\tau s + 1)}{k_e T \tau_m s^3 + (k_e \tau_m + k_e T + k_2 k_3 k_5 T) s^2 + (k_e + k_1 k_2 k_4 \tau + k_2 k_3 k_5) s + k_1 k_2 k_4}$$

例 2-3 RC 网络如图 2-5 所示, 绘出系统的结构图并求传递函数  $U_2(s)/U_1(s)$ 。

解 分析: 对于 RC 网络的求解, 可以采用复数阻抗法处理, 即用复数阻抗  $R, Ls, \frac{1}{Cs}$  分



别代替相应的电阻、电感、电容元件,电流、电压也用复数形式表示,便可避开微分方程的列写直接写出系统的代数方程。

列写出网络的代数方程如下:

$$U_2 = R_2 I_2 + (I_1 + I_2) \frac{1}{C_2 s} \quad (2-11)$$

$$U_2 = \left( R_2 + \frac{1}{C_2 s} \right) I_2 + \frac{1}{C_2 s} I_1 \quad (2-12)$$

$$I_2 = (U_1 - U_2) \cdot C_1 s \quad (2-13)$$

$$I_1 R_1 = \left( R_2 + \frac{1}{C_1 s} \right) I_2$$

由

可得

$$I_1 = \left( \frac{1}{R_1 C_1 s} + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot I_2 = \frac{R_2 C_1 s + 1}{R_1 C_1 s} \cdot I_2 \quad (2-14)$$

根据以上各式可绘出该网络的结构图如图 2-6a 所示,该图可化简为图 2-6b,最后可求出网络的传递函数

$$\frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 + R_2) C_1 \cdot s + 1}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_1 C_2) s + 1}$$

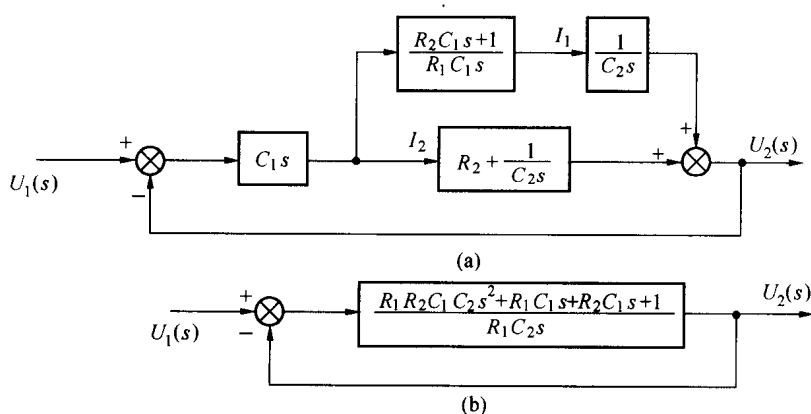


图 2-6

例 2-4 求如图 2-7 所示有源网络的传递函数

$U_2(s)/U_1(s)$ 。

解 网络中,  $R_2$  与  $C_1$  的并联阻抗为  $R_2/(R_2 C_1 s + 1)$ ,  $C_2$  与  $R_4$  的串联阻抗为  $(R_4 C_2 s + 1)/(C_2 \cdot s)$ 。令节点 A 的电压为  $u_3$ , 根据节点电流定律可得

$$\frac{U_3}{\frac{R_2}{R_2 C_1 s + 1}} + \frac{U_3}{\frac{R_4 C_2 s + 1}{C_2 s}} + \frac{U_3 - U_2}{R_3} = 0$$

可得

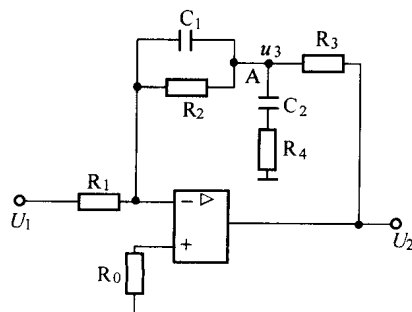


图 2-7