

三阶法

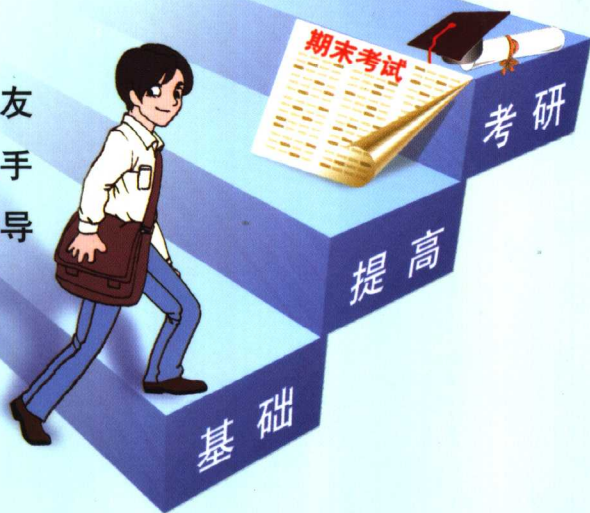
大学课程学习与考研指导系列


自动控制原理

学习与考研指导

梅晓榕 主编
庄显义 主审

- 重点/难点/考点
- 方法/技巧/提示
- 基础篇：学习课程的良好益友
- 提高篇：期末考试的得力助手
- 考研篇：考研复习的系统指导



 科学出版社
www.sciencep.com

三阶法大学课程学习与考研指导系列

自动控制原理学习与考研指导

梅晓榕 主编

柏桂珍 王述一 张卯瑞 副主编

庄显义 主审

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是高等院校“自动控制原理”课程的习题集,共收集习题 400 多道,有控制系统概述、数学模型、时域分析、根轨迹法、频域分析、系统设计、非线性控制系统、离散系统、状态空间分析与设计等内容。每章分为基础篇、提高篇和考研篇三部分,分别适合学习不同阶段和层次。除一般习题外,还收集了大量我国各重点大学研究生入学考试试题。书中有丰富的例题,并对所有人选习题给出了详细解答。

本书可作为高等院校自动化专业及相关专业本科生学习和备考研究生的参考书,也可供研究生和相关专业科技人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理学习与考研指导/梅晓榕主编. —北京:科学出版社,2004
(三阶法大学课程学习与考研指导系列)

ISBN 7-03-011244-X

I. 自… II. 梅… 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(2003)第 016383 号

责任编辑:段博原 / 文案编辑:孙克玮 / 责任校对:宋玲玲
责任印制:安春生 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2004年4月第一次印刷 印张:25

印数:1—5 000 字数:477 000

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

前 言

本书是高等院校“自动控制原理”课程的例题和习题集,与现在通行的自动控制原理教材的基本内容配套。全书有 400 多道习题,绝大多数选自研究生入学考试试题,全部题目都有详细的解答。本书可供正常上课时同步学习使用,也可作为期末考试和研究生入学考试时复习使用。

本书前半部分共有 9 章,包括经典控制理论、离散系统和状态空间法等。每一章都分为基础篇、提高篇和考研篇三部分。基础篇中简单明确地列出该章的重点、难点与考点。提高篇讲解例题,提高综合应用和解题的能力。考研篇中讲解考研题目。附录 A、B 收集了期末考试试题和研究生入学考试试题。题目选自清华大学、西安交通大学、上海交通大学、国防科技大学、中国科学院自动化研究所及哈尔滨工业大学等单位的研究生入学考试试题。附录 C 中包括所有习题、试题的详细解答。

本书由哈尔滨工业大学控制科学与工程系梅晓榕教授任主编,柏桂珍、王述一、张卯瑞副教授任副主编,庄显义教授主审。参加编写工作的还有蔡春田、郭育生、荣海春、于磊等。

编写中参考了很多优秀的教材和习题集。作者向收录于参考文献中的各位作者表示诚挚的谢意。

书中不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

2004 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 自动控制的一般概念	(1)
1.1 基础篇	(1)
1.1.1 重点、难点与考点	(1)
1.1.2 巩固练习	(1)
1.2 提高篇	(2)
1.2.1 习题精解	(2)
1.2.2 本章小结	(3)
1.2.3 习题精选	(3)
1.3 考研篇	(4)
1.3.1 考研试题精解	(4)
1.3.2 考研试题精选	(6)
第 2 章 系统的数学模型	(8)
2.1 基础篇	(8)
2.1.1 重点、难点与考点	(8)
2.1.2 巩固练习	(9)
2.2 提高篇.....	(11)
2.2.1 习题精解.....	(11)
2.2.2 本章小结.....	(18)
2.2.3 习题精选.....	(18)
2.3 考研篇.....	(21)
2.3.1 考研试题精解.....	(21)
2.3.2 考研试题精选.....	(26)
第 3 章 线性系统的时域分析	(28)
3.1 基础篇.....	(28)
3.1.1 重点、难点与考点.....	(28)
3.1.2 巩固练习.....	(30)
3.2 提高篇.....	(30)
3.2.1 习题精解.....	(30)
3.2.2 本章小结.....	(35)
3.2.3 习题精选.....	(35)

3.3	考研篇	(37)
3.3.1	考研试题精解	(37)
3.3.2	考研试题精选	(41)
第4章	根轨迹法	(43)
4.1	基础篇	(43)
4.1.1	重点、难点与考点	(43)
4.1.2	巩固练习	(45)
4.2	提高篇	(46)
4.2.1	习题精解	(46)
4.2.2	本章小结	(50)
4.2.3	习题精选	(51)
4.3	考研篇	(51)
4.3.1	考研试题精解	(51)
4.3.2	考研试题精选	(56)
第5章	频域分析法	(59)
5.1	基础篇	(59)
5.1.1	重点、难点与考点	(59)
5.1.2	巩固练习	(60)
5.2	提高篇	(61)
5.2.1	习题精解	(61)
5.2.2	本章小结	(70)
5.2.3	习题精选	(70)
5.3	考研篇	(71)
5.3.1	考研试题精解	(71)
5.3.2	考研试题精选	(74)
第6章	系统的补偿与设计	(78)
6.1	基础篇	(78)
6.1.1	重点、难点与考点	(78)
6.1.2	巩固练习	(79)
6.2	提高篇	(80)
6.2.1	习题精解	(80)
6.2.2	本章小结	(85)
6.2.3	习题精选	(85)
6.3	考研篇	(87)
6.3.1	考研试题精解	(87)
6.3.2	考研试题精选	(91)

第 7 章 非线性控制系统	(94)
7.1 基础篇	(94)
7.1.1 重点、难点与考点	(94)
7.1.2 巩固练习	(94)
7.2 提高篇	(95)
7.2.1 习题精解	(95)
7.2.2 本章小结	(104)
7.2.3 习题精选	(104)
7.3 考研篇	(107)
7.3.1 考研试题精解	(107)
7.3.2 考研试题精选	(111)
第 8 章 线性离散系统	(114)
8.1 基础篇	(114)
8.1.1 重点、难点与考点	(114)
8.1.2 巩固练习	(114)
8.2 提高篇	(116)
8.2.1 习题精解	(116)
8.2.2 本章小结	(120)
8.2.3 习题精选	(120)
8.3 考研篇	(122)
8.3.1 考研试题精解	(122)
8.3.2 考研试题精选	(126)
第 9 章 状态空间法	(129)
9.1 基础篇	(129)
9.1.1 重点、难点与考点	(129)
9.1.2 巩固练习	(129)
9.2 提高篇	(133)
9.2.1 习题精解	(133)
9.2.2 本章小结	(144)
9.2.3 习题精选	(144)
9.3 考研篇	(147)
9.3.1 考研试题精解	(147)
9.3.2 考研试题精选	(157)
附录 A 哈尔滨工业大学 2002 年期末考试试题	(160)
附录 B 研究生入学考试试题选	(164)
B.1 清华大学研究生入学考试试题	(164)

B.1.1	清华大学 1997 年研究生入学考试试题	(164)
B.1.2	清华大学 1998 年研究生入学考试试题	(165)
B.1.3	清华大学 1999 年研究生入学考试试题	(167)
B.2	西安交通大学研究生入学考试试题	(169)
B.2.1	西安交通大学 1999 年研究生入学考试试题	(169)
B.2.2	西安交通大学 2000 年研究生入学考试试题	(171)
B.2.3	西安交通大学 2001 年研究生入学考试试题	(173)
B.3	上海交通大学 2000 年研究生入学考试试题	(175)
B.4	国防科技大学研究生入学考试试题	(177)
B.4.1	国防科技大学 2000 年研究生入学考试试题	(177)
B.4.2	国防科技大学 2001 年研究生入学考试试题	(179)
B.4.3	国防科技大学 2002 年研究生入学考试试题	(181)
B.5	中国科学院自动化研究所研究生入学考试试题	(184)
B.5.1	中国科学院自动化研究所 1999 年研究生入学考试试题	(184)
B.5.2	中国科学院自动化研究所 2000 年研究生入学考试试题	(186)
B.5.3	中国科学院自动化研究所 2001 年研究生入学考试试题	(188)
B.6	哈尔滨工业大学研究生入学考试试题	(190)
B.6.1	哈尔滨工业大学 2000 年研究生入学考试试题	(190)
B.6.2	哈尔滨工业大学 2001 年研究生入学考试试题(试卷 1)	(194)
B.6.3	哈尔滨工业大学 2001 年研究生入学考试试题(试卷 2)	(197)
B.6.4	哈尔滨工业大学 2002 年研究生入学考试试题(试卷 1)	(200)
B.6.5	哈尔滨工业大学 2002 年研究生入学考试试题(试卷 2)	(203)
附录 C	参考答案	(207)
第 1 章		(207)
第 2 章		(209)
第 3 章		(215)
第 4 章		(220)
第 5 章		(227)
第 6 章		(233)
第 7 章		(245)
第 8 章		(259)
第 9 章		(266)
附录 A		(283)
附录 B		(288)
参考文献		(389)

第 1 章 自动控制的一般概念

1.1 基础篇

1.1.1 重点、难点与考点

一、重点

1. 闭环系统(或反馈系统)的特征:采用负反馈,系统的被控变量对控制作用有直接影响,即被控变量对自己有控制作用。

2. 典型闭环控制系统的功能框图见图 1-1。

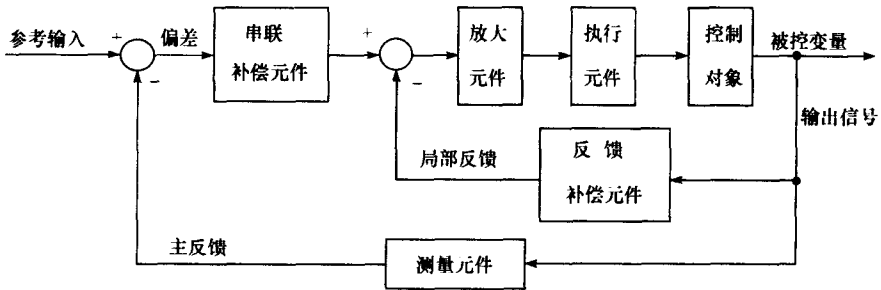


图 1-1 典型闭环系统功能框图

二、难点

参考系统功能框图,由系统的物理结构图或工作原理示意图绘出系统元件框图。

三、考点

1. 基本概念。
2. 由物理结构图或工作原理示意图绘出元件框图。
3. 由系统的微分方程判断出线性定常系统、线性时变系统和非线性系统。

1.1.2 巩固练习

1. 从元件的功能分类,控制元件主要包括哪些类型的元件?
2. 定值控制系统、伺服控制系统和程序控制系统各有什么特点?
3. 开环系统和闭环系统各有什么特点?

4. 线性系统和非线性系统各有什么特点?
5. 对控制系统的基本要求是什么?
6. 学校中师生之间的教与学的过程可以看成是一个闭环系统。选择这个系统的输入量和输出量。参考图 1-1 的形式绘出该系统的原理框图。
7. 图 1-2 为两个液位控制系统。SM 是直流伺服电动机。指出控制对象、控制元件、被控变量、扰动量和参考输入, 绘出系统的元件框图。产生恒值扰动后, 图 1-2(a)、(b)中哪一个系统必然存在误差? 为什么?

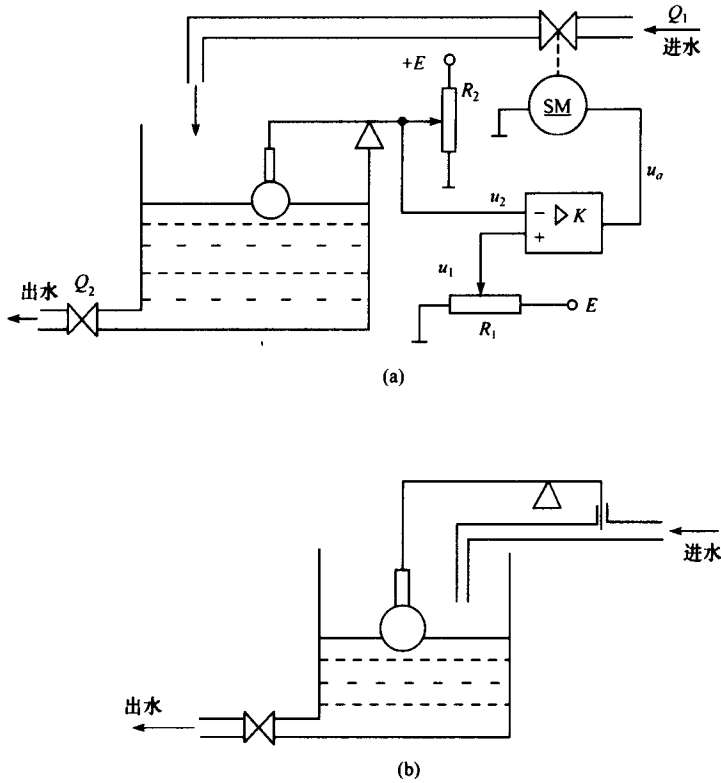


图 1-2 水位控制系统

1.2 提高篇

1.2.1 习题精解

电冰箱制冷系统工作原理如图 1-3 所示。继电器的输出电压 u_a 就是加在压缩机上的电压。简述工作原理, 指出控制对象、执行元件、测量元件、被控变量、参考输入, 绘出系统元件框图。

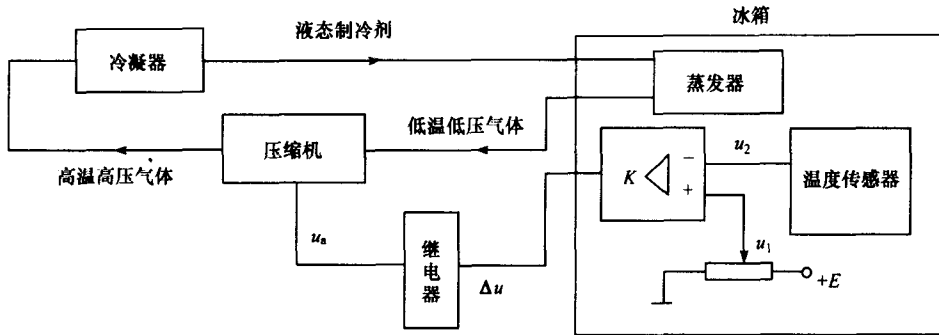


图 1-3 电冰箱制冷系统原理图

解:当冰箱内温度高于设定值时,放大器输出电压 Δu 使继电器动作,接通压缩机电压 u_a 。压缩机运行并从蒸发器中吸入低温低压气态制冷剂,同时送出高温高压气态制冷剂至冷凝器。冷凝器送出的是高压常温液态制冷剂。在蒸发器中制冷剂由液态变成低压气态,同时吸收大量热量使冰箱内部变冷。

控制对象是冰箱箱体,执行元件包括压缩机、冷凝器、蒸发器,测量元件是温度传感器,被控变量是冰箱内的温度,参考输入是电位器动端电压 u_1 。系统元件框图见图 1-4。

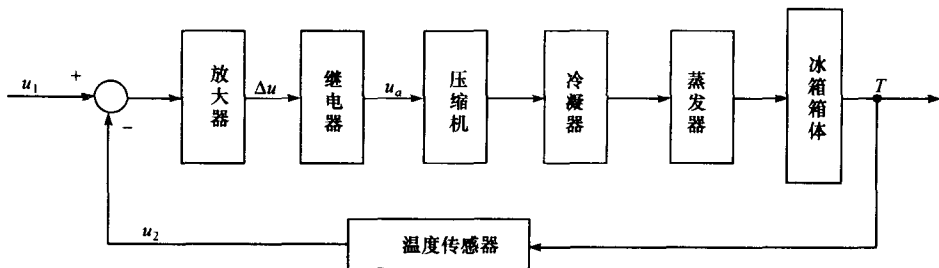


图 1-4 冰箱制冷系统元件框图

1.2.2 本章小结

绘出元件框图是了解、分析和设计系统不可缺少的最基础的工作。当然由系统的物理结构图或工作原理示意图求元件框图和确定系统各元件的功能必然要涉及有关学科或领域的知识。

1.2.3 习题精选

1. 图 1-5 所示为导弹发射架的自动定位系统。指出参考输入、被控变量、执行元件、测量元件和反馈补偿元件,并绘出系统元件框图。该系统是定值控制系

统、伺服系统还是程序控制系统？

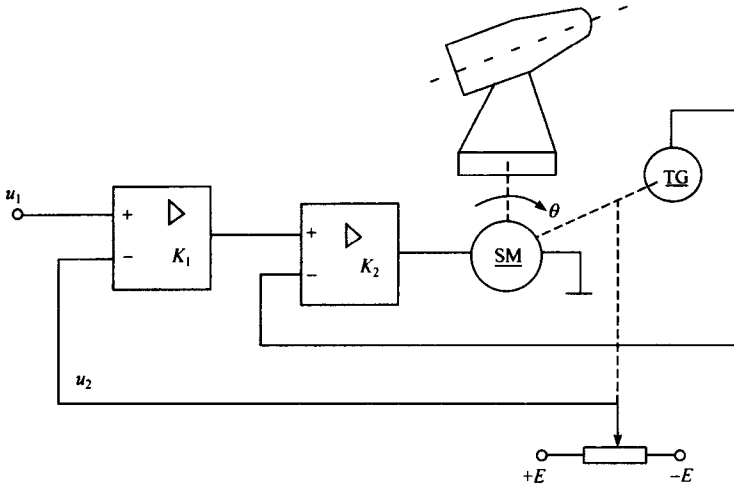


图 1-5 导弹发射架自动定位系统

2. 图 1-6 表示一个炉温控制系统。说明工作原理，指出系统的控制对象、参考输入、被控变量，以及功率放大元件、执行元件、测量元件，并绘出系统元件框图。说明该系统是定值控制系统、伺服系统还是程序控制系统。

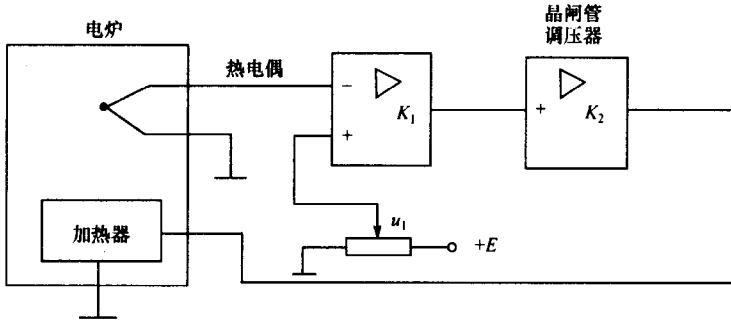


图 1-6 炉温控制系统

1.3 考研篇

1.3.1 考研试题精解

1. 电机转角的伺服系统原理示意图如图 1-7 所示。SM 为直流伺服电动机，TG 为直流测速发电机。指出系统的控制对象、参考输入、被控变量，绘出系统的

元件框图。

思路与技巧:被控变量是轴转角 θ 。除主反馈外,还有电流负反馈和转速负反馈两个局部反馈。

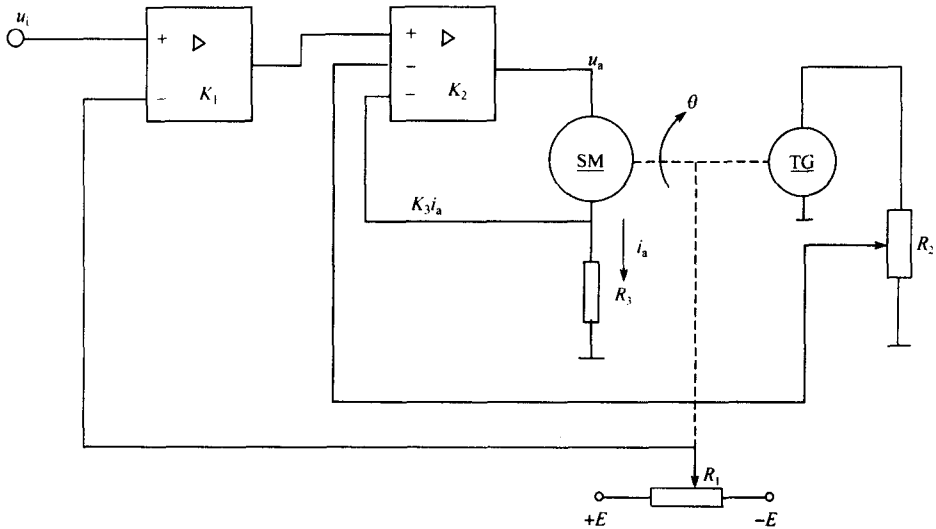


图 1-7 伺服系统原理示意图

解:系统的控制对象是电动机,参考输入是电压 u_i ,被控变量是电机轴的角位移。元件框图见图 1-8。

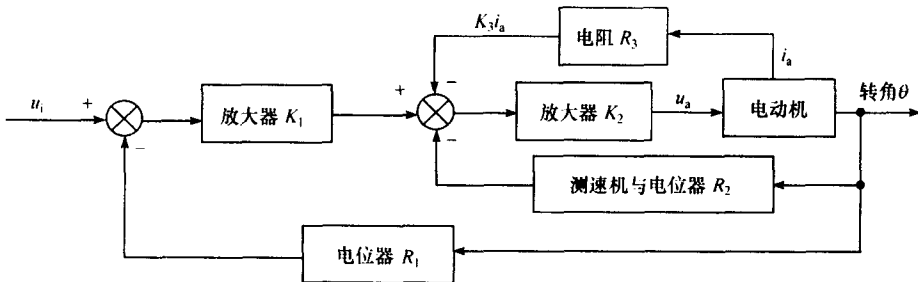


图 1-8 伺服系统元件框图

2. 图 1-9 是晶体管稳压电源。 U_2 是稳压电源输入电压, U_3 是输出电压。指出参考输入电压、被控变量。简述工作原理,说明哪些元件起着放大、测量和执行元件的功能,并绘出系统元件框图。

思路与技巧:图中 NPN 晶体管的特性是 $u_{be} \uparrow \rightarrow I_b \uparrow \rightarrow I_c \uparrow \rightarrow u_{ce} \downarrow$ 。

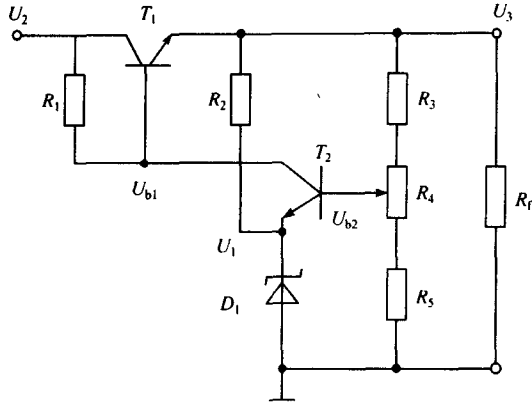


图 1-9 晶体管稳压电源

解:稳压管 D_1 的电压 U_1 是参考输入,稳压电源输出电压 U_3 是被控变量。
 $U_3 \downarrow \rightarrow U_{b2} \downarrow \rightarrow u_{be2} \downarrow \rightarrow u_{ce2} \uparrow \rightarrow U_{b1} \uparrow \rightarrow u_{be1} \uparrow \rightarrow u_{ce1} \downarrow \rightarrow U_3 \uparrow$ 。可见此电路有稳定输出电压 U_3 的功能。

晶体管 T_2 起着比较元件和放大偏差信号的作用,电阻 R_3 、 R_4 和 R_5 起着测量元件作用, T_1 起着执行元件的作用。元件框图见图 1-10。

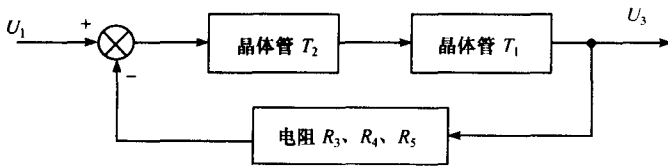


图 1-10 元件框图

1.3.2 考研试题精选

1. 图 1-11 表示摄影机伺服系统。图中 θ_1 是由人手控制的光电显示器, θ_2 是由两相伺服电动机控制的摄影机转角。TG 是交流测速机, K_1 是交流放大器,CX 是控制式自整角发送机,CT 是自整角变压器。指出控制对象、输入量和被控变量,并绘出系统元件框图。

2. 图 1-12 表示一个伺服系统,绘出该系统的元件框图。

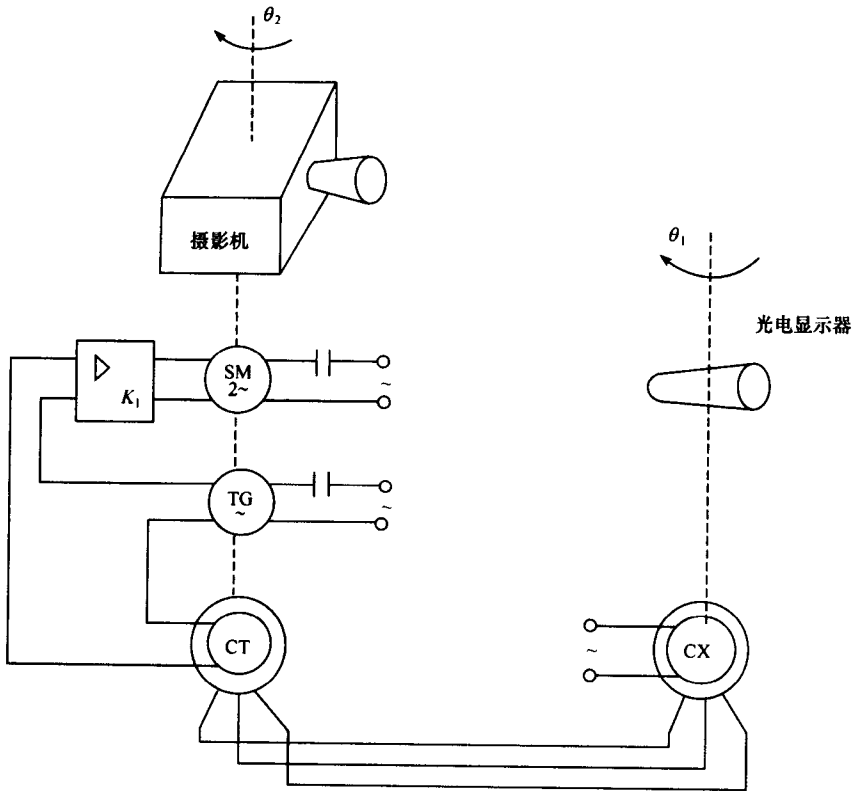


图 1-11 摄影机伺服系统

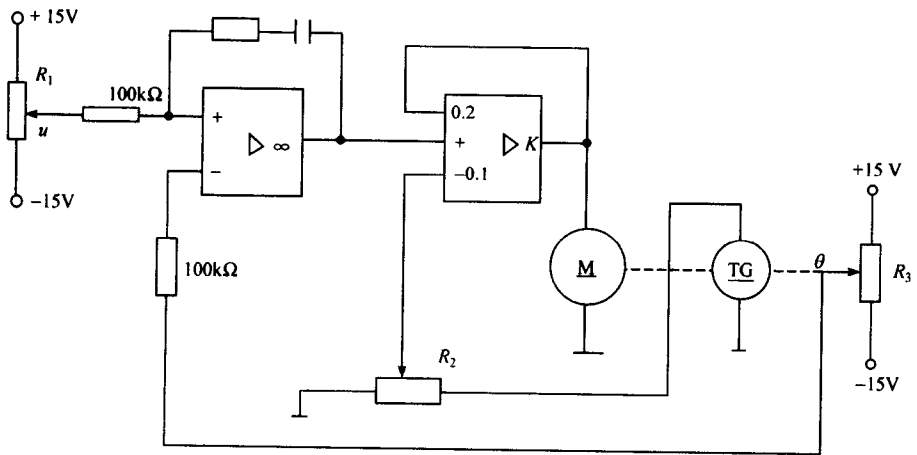


图 1-12 伺服系统原理示意图

第2章 系统的数学模型

2.1 基础篇

2.1.1 重点、难点与考点

一、重点

1. 建立系统的微分方程,绘制动态框图并求传递函数。

系统数学模型的基础是微分方程,建立系统微分方程的步骤如下:

1) 明确输入量与输出量。

2) 列出原始方程组。对复杂系统可设中间变量。方程的个数应比中间变量的个数多1个。

3) 消去中间变量,得到只含输入变量、输出变量及其导数的微分方程。

在零初始条件下对微分方程取拉氏变换就可求得传递函数。

对于微分方程组,一般很难消去中间变量。常用的方法是利用拉氏变换将微分方程组变成 s 的代数方程组。然后,或者利用代数方法消去中间变量,或者按照输出到输入(或输入到输出)的顺序排列方程,绘出动态结构框图,再求传递函数。

2. 动态结构框图的变换与化简。

1) 等效原则。对任一环节进行变换时,变换前后该环节的输入量、输出量及相互关系应保持不变。

2) 主要方法。将串联环节、并联环节和基本反馈环节用一个等效环节代替。

3) 关键。解除交叉结构,即移动分支点或相加点,使被简化的环节内部不存在与外部直接相连的分支点和相加点。

4) 注意。互换分支点和相加点的位置时容易出错,需小心。

3. 利用梅森公式求传递函数。

输入量与输出量之间的传递函数 $\Phi(s)$ 可用下述梅森公式计算

$$\Phi(s) = \frac{\sum_{k=1}^n P_k \Delta_k}{\Delta} \quad (2-1)$$

式中: n ——从输入量到输出量的前向通路的总数;

P_k ——从输入量到输出量的第 k 条前向通路上各传递函数(包括相加点前的符号)之积;

Δ ——特征式, $\Delta = 1 - \sum L_i + \sum L_i L_j - \sum L_i L_j L_k + \dots$, 其中 L_i 是所有各回路“回路传递函数”之和; $\sum L_i L_j$ 是所有两两互不接触的回路, 其“回路传递函数”乘积之和; $\sum L_i L_j L_k$ 是所有的 3 个互不接触的回路, 其“回路传递函数”乘积之和, 其中传递函数包括相加点处的符号。

Δ_k ——余因子式, 在 Δ 中, 将与第 k 条前向通路相接触的回路所在项除去后余下的部分。

梅森公式中输出量可以是输入量之外的任一量, 而输入量只能是不受系统中其他变量影响的量。

二、难点

1. 求复杂物理系统的微分方程。

对于力学系统, 要用到牛顿第二定律。对于电网络, 要用到节点电流定律和回路电压定律。求电网络的传递函数常用运算阻抗的方法。

2. 非线性函数线性化。

若非线性函数 $y = f(x_1, x_2)$, 对应的线性化函数为

$$y = f(x_1, x_2) = \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{y_0} x_1 + \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_{y_0} x_2 + A \quad (2-2)$$

令上式中自变量 x_1, x_2 为工作点 y_0 处的值, 就可求得常数 A 。

三、考点

1. 求实际系统的微分方程、动态框图和传递函数。

2. 求复杂框图(信号流图)的传递函数。

3. 把动态框图变换成信号流图。一般选取比较(加法)器的输出信号及分支点的信号作为节点。

2.1.2 巩固练习

1. 求图 2-1 所示电网络的传递函数, 图中电压 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 分别是输入变量和输出变量。

2. 系统如图 2-2 所示, 求 $\frac{C(s)}{R(s)}$ 。

3. 系统的信号流图如图 2-3 所示, 求 $\frac{C(s)}{R(s)}$ 。

4. 将 $\sin\theta$ 、 $\cos\theta$ 和 θ^2 在 $\theta=0$ 附近线性化。

5. 图 2-4 所示系统中, m_1 、 m_2 是质量, k 为弹簧的弹性系数, 摩擦力为零, $f(t)$ 为外力, $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 是位移。求系统的微分方程、动态框图和传递函数 $X_2(s)/F(s)$ 。