



圣才考研网

www.100exam.com

- ✓ 扫一扫 送本书 **手机版**
- ✓ 摇一摇 找学友互动学习
- ✓ 播一播 看名师直播答疑



国内外经典教材辅导系列·理工类

胡寿松 《自动控制原理》

(第6版)

笔记和课后习题 (含考研真题) 详解

主编：圣才考研网
www.100exam.com

**买一
送五**



450元大礼包

- 送1** 视频课程 (46小时, 价值300元)
- 送2** 3D电子书 (价值25元)
- 送3** 3D题库【名校考研真题+课后习题+章节题库+模拟试题】 (价值40元)
- 送4** 手机版【电子书/题库】(价值65元)
- 送5** 圣才学习卡 (价值20元)

详情登录：圣才考研网 (www.100exam.com) 首页的【购书大礼包】，
刮开本书所贴防伪标的密码享受购书大礼包增值服务。

特别提醒：本书提供名师考前直播答疑，手机电脑均可观看，**扫一扫**
本书右上角二维码下载电子书学习。

本书提供
名师考前
直播答疑

中国石化出版社

HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM

教·育·出·版·中·心

圣才考研网
www.100exam.com

网络课程·题库·光盘·图书
购书送大礼包

密码

国内外经典教材辅导

胡寿松《自动控制原理》(第6版)

笔记和课后习题(含考研真题)详解

主编：圣才考研网

www.100exam.com

中国石化出版社

内 容 提 要

国内外经典教材辅导系列是一套全面解析当前国内外各大院校权威教科书的辅导资料。本书是胡寿松《自动控制原理》(第6版)的学习辅导书。本书基本遵循第6版的章目编排,共分10章,每章由三部分组成:第一部分为复习笔记,总结本章的重难点内容;第二部分是课(章)后习题详解,对第6版的所有习题都进行了详细的分析和解答;第三部分为名校考研真题详解,精选近年考研真题,并提供了详细的解答。

圣才考研网(www.100exam.com)提供胡寿松《自动控制原理》网授精讲班【教材精讲+考研真题申讲】、3D电子书、3D题库(详细介绍参见本书书前彩页)。随书赠送大礼包大礼包增值服务【300元网授班+25元3D电子书+40元3D题库+65元手机版电子书/题库+20元圣才学习卡】。扫一扫本书封面的二维码,可免费下载本书手机版;摇一摇本书手机版,可找到所有学习本书的学友,交友学习两不误;本书提供名师考前直播答疑,手机电脑均可观看,直播答疑在考前推出(具体时间见网站公告)。

图书在版编目(CIP)数据

胡寿松《自动控制原理》(第6版)笔记和课后习题
(含考研真题)详解/圣才考研网主编. —北京:中
国石化出版社,2015.6
(国内外经典教材辅导系列)
ISBN 978-7-5114-3417-3

I. ①胡… II. ①圣… III. ①自动控制理论-研究生
-入学考试-自学参考资料 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 130028 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者
以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

http://www.sinopec-press.com

E-mail:press@sinopec.com

保定华泰印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 4 彩页 442 千字

2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

定价:36.00 元

《国内外经典教材辅导系列·理工类》

编 委 会

主编：圣才考研网(www.100exam.com)

编委：邱亚辉 赵芳微 肖 萌 段瑞权 娄旭海
涂幸运 肖 娟 谢盼盼 陈敬龙 李雪萍
张宝霞 倪彦辉 黄前海 万军辉 李昌付

序 言

我国各大院校一般都把国内外通用的权威教科书作为本科生和研究生学习专业课程的参考教材，这些教材甚至被很多考试(特别是硕士和博士入学考试)和培训项目作为指定参考书。为了帮助读者更好地学习专业课，我们有针对性地编著了一套学习国内外教材的复习资料，并提供配套的名师讲堂、3D电子书和3D题库。

胡寿松主编的《自动控制原理》是我国高校采用较多的自动控制原理权威教材之一。作为该教材的学习辅导书，本书具有以下几个方面的特点：

1. 整理名校笔记，浓缩内容精华。本书每章的复习笔记均对本章的重难点进行了整理，并参考了国内名校名师讲授该教材的课堂笔记。因此，本书的内容几乎浓缩了该教材的所有知识精华。

2. 解析课后习题，提供详尽答案。本书参考大量自动控制原理相关资料对胡寿松《自动控制原理》的课(章)后习题进行了详细的分析和解答，并对相关重要知识点进行了延伸和归纳。

3. 精选考研真题，巩固重难点知识。为了强化对重要知识点的理解，本书精选了部分名校近几年的自动控制原理考研真题，这些高校大部分以该教材作为考研参考书目。所选考研真题基本涵盖了各个章节的考点和难点，特别注重联系实际，凸显当前热点，同时精选了大量现实案例并进行了分析。

购买本书享受大礼包增值服务，登录圣才考研网(www.100exam.com)，刮开所购图书封面防伪标的密码，即可享受大礼包增值服务：①30小时网授精讲班【教材精讲+考研真题串讲】(价值300元)；②本书3D电子书(价值25元)；③3D题库【名校考研真题+课后习题+章节题库+模拟试题】(价值40元)；④手机版【电子书/题库】(价值65元)；⑤圣才学习卡(价值20元)，可在圣才学习网旗下所有网站进行消费。扫一扫本书封面的二维码，可免费下载本书手机版；摇一摇本书手机版，可找到所有学习本书的学友，交友学习两不误；本书提供名师考前直播答疑，手机电脑均可观看，直播答疑在考前推出(具体时间见网站公告)。

与本书相配套，圣才考研网提供胡寿松《自动控制原理》网授精讲班【教材精讲+考研真题串讲】、3D电子书、3D题库(免费下载，送手机版)(详细介绍参见本书书前彩页)。

要深深牢记：考研不同一般考试，概念题(名词解释)要当作简答题来回答，简答题要当作论述题来解答，而论述题的答案要像是论文，多答不扣分。有的论述题的答案简直就是一份优秀的论文(其实很多考研真题就是选自一篇专题论文，完全需要当作论文来回答)！

圣才考研网(www.100exam.com)是圣才学习网旗下的考研考博专业网站，提供考研公共课和全国500所院校考研考博专业课辅导【一对一辅导、网授精讲班等】、3D电子书、3D题库(免费下载，免费升级)、全套资料(历年真题及答案、笔记讲义等)、国内外经典教材名师讲堂、考研教辅图书等。

考研辅导：www.100exam.com(圣才考研网)

官方总站：www.100xuexi.com(圣才学习网)

圣才学习网编辑部

目 录

第1章 自动控制的一般概念	(1)
1.1 复习笔记	(1)
1.2 课后习题详解	(2)
1.3 名校考研真题详解	(7)
第2章 控制系统的数学模型	(8)
2.1 复习笔记	(8)
2.2 课后习题详解	(11)
2.3 名校考研真题详解	(35)
第3章 线性系统的时域分析法	(40)
3.1 复习笔记	(40)
3.2 课后习题详解	(43)
3.3 名校考研真题详解	(70)
第4章 线性系统的根轨迹法	(74)
4.1 复习笔记	(74)
4.2 课后习题详解	(77)
4.3 名校考研真题详解	(104)
第5章 线性系统的频域分析法	(109)
5.1 复习笔记	(109)
5.2 课后习题详解	(113)
5.3 名校考研真题详解	(137)
第6章 线性系统的校正方法	(141)
6.1 复习笔记	(141)
6.2 课后习题详解	(146)
6.3 名校考研真题详解	(165)
第7章 线性离散系统的分析与校正	(168)
7.1 复习笔记	(168)
7.2 课后习题详解	(171)
7.3 名校考研真题详解	(189)
第8章 非线性控制系统分析	(193)
8.1 复习笔记	(193)
8.2 课后习题详解	(196)
8.3 名校考研真题详解	(215)
第9章 线性系统的状态空间分析与综合	(219)

9.1	复习笔记	(219)
9.2	课后习题详解	(221)
9.3	名校考研真题详解	(253)
第10章	动态系统的最优控制方法	(256)
10.1	复习笔记	(256)
10.2	课后习题详解	(256)
10.3	名校考研真题详解	(273)

第1章 自动控制的一般概念

1.1 复习笔记

自动控制是指利用控制装置自动地操纵机器、设备或生产过程，使其具有希望的状态或性能。

自动控制系统是指能够实现自动控制任务的系统，由控制装置与被控对象组成。

一、自动控制的基本原理与方式

1. 反馈控制方式

反馈控制方式又称为闭环控制方式，是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用又有反向联系的控制过程。其主要特点包括：

- (1) 闭环负反馈控制，即按偏差进行调节；
- (2) 抗干扰性好，控制精度高；
- (3) 系统参数应适当选择，否则可能不能正常工作。

2. 开环控制方式

开环控制方式是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程，其特点是系统的输出量不会对系统的控制作用发生影响。它可以分为按给定量控制和按扰动控制两种形式。

3. 复合控制方式

复合控制是开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式，是把按偏差控制和按扰动控制结合起来的一种控制方式。

二、自动控制系统的分类

按照不同的分类标准，自动控制系统有多种分类方法。将各种分类方法综合应用，可以将自动控制系统分为3类：线性连续控制系统、线性定常离散控制系统和非线性控制系统。

三、对自动控制系统的的基本要求

1. 基本要求的提法

稳定性、快速性和准确性是对每一类控制系统被控量变化的全过程提出的共同的基本要求，即稳、准、快的要求。

2. 典型外作用

目前，在控制工程中常用的典型外作用函数有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数以及正弦函数等。

(1) 阶跃函数

阶跃函数的数学表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ R, & t \geq 0 \end{cases}$$

函数如图1-1所示。

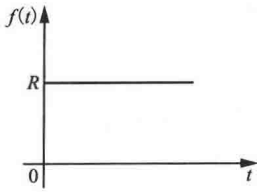


图 1-1 阶跃函数

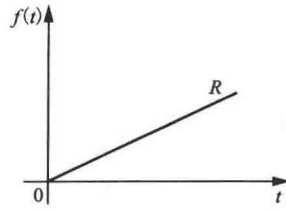


图 1-2 斜坡函数

(2) 斜坡函数

斜坡函数的数学表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ Rt, & t \geq 0 \end{cases}$$

函数如图 1-2 所示。

(3) 脉冲函数

脉冲函数定义为

$$f(t) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{A}{t_0} [1(t) - 1(t - t_0)]$$

函数如图 1-3 所示。

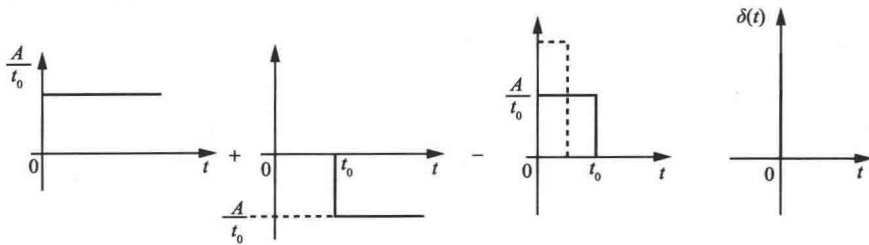


图 1-3 脉冲函数

(4) 正弦函数

正弦函数的数学表达式为

$$f(t) = A \sin(\omega t - \varphi)$$

式中, A 为正弦函数的振幅; $\omega = 2\pi f$ 为正弦函数的角频率; φ 为初始相角。

1.2 课后习题详解

1-1 图 1-4 是液位自动控制系统原理示意图。在任意情况下, 希望液面高度 c 维持不变, 试说明系统工作原理并画出系统方块图。

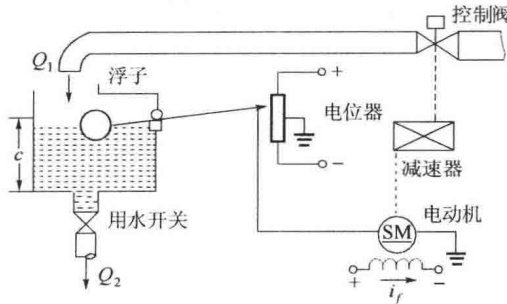


图 1-4 液位自动控制系统原理图

解: 当 $Q_1 \neq Q_2$ 时, 液面高度的变化。例如, c 增加时, 浮子升高, 使电位器电刷下移,

产生控制电压，驱动电动机减小阀门开度，使进入水箱的流量减少。反之，当 c 减小时，则系统会自动增大阀门开度，加大流入水量，使液位升到给定高度 c 。方块图如图 1-5 所示。

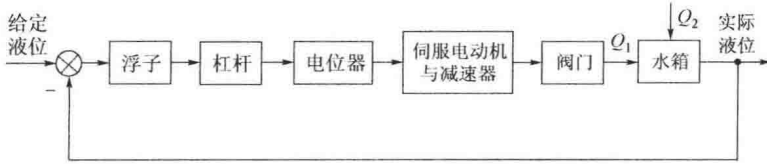


图 1-5 液位自动控制系统方块图

1-2 图 1-6 是仓库大门自动控制系统原理图。试说明系统自动控制大门开闭的工作原理并画出系统方块图。

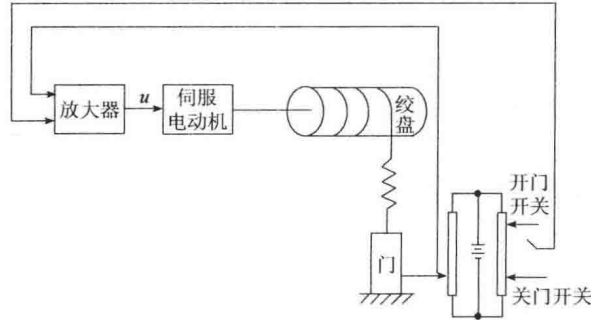


图 1-6 仓库大门自动控制系统原理图

解：当合上开门开关时，产生偏差电压信号，信号被放大后，驱动伺服电动机转动，带动绞盘使大门向上提起。同时，电位器电刷上移，测量电路重新达到平衡，电动机停止转动。反之，当合上关门开关时，伺服电动机反向转动，带动绞盘转动使大门关闭。方块图如图 1-7 所示。

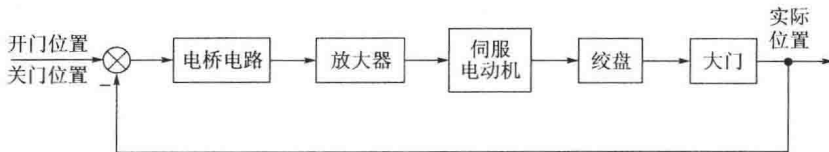


图 1-7 仓库大门自动控制系统方块图

1-3 图 1-8(a)和(b)均为自动调压系统。设空载时，图(a)和图(b)的发电机端电压均为 110 V。试问带上负载后，图(a)和图(b)中哪个系统能保持 110 V 电压不变？哪个系统的电压会稍低于 110 V？为什么？

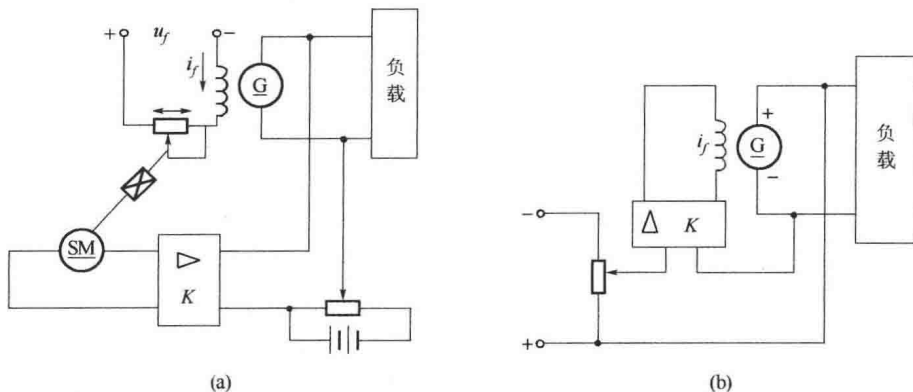


图 1-8 自动调压系统

解：图 1-8(a) 中的系统能够恢复到 110 V，图 1-8(b) 中的系统的端电压将稍低于 110 V。

对图 1-8(a) 系统，当端电压低于给定电压时，其偏差电压经放大器放大使伺服电机 SM 转动，使偏差电压减小至零，伺服电机停止转动，故图 1-8(a) 中的系统端电压能够恢复到 110 V。

对图 1-8(b) 系统，当偏差电压为零时，激磁电流也为零，发电机不能工作，故图 1-8(b) 中的系统的端电压将稍低于 110 V。

1-4 图 1-9 为水温控制系统原理示意图。冷水在热交换器中由通入的蒸汽加热，从而得到一定温度的热水。冷水流量变化用流量计测量。试绘制系统方块图，并说明为了保持热水温度为期望值，系统是如何工作的？系统的被控对象和控制装置各是什么？

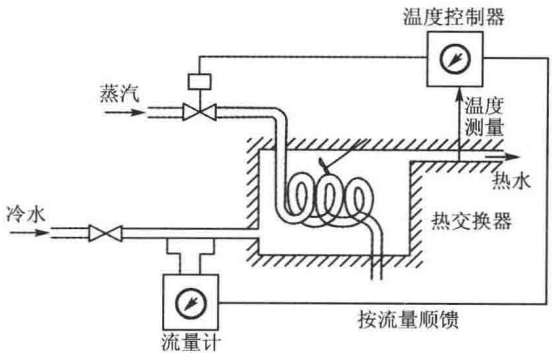


图 1-9 水温控制系统原理图

解：方块图如图 1-10 所示。

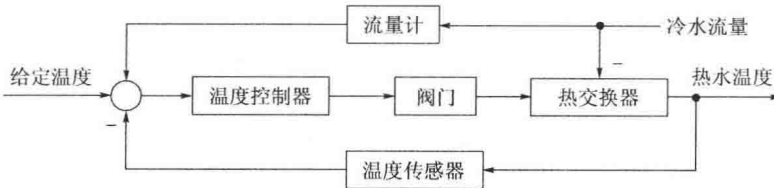


图 1-10 水温控制系统方块图

水温控制系统的控制方式是按偏差的闭环控制与按扰动补偿的顺馈控制结合起来。

采用温度负反馈，若温度过高，使阀门关小，减小蒸汽量，热水温度回到给定值。采用扰动顺馈补偿，当冷水减少时，补偿量减小，使阀门关小，蒸汽量减少，以保持热水温度恒定。

系统的被控对象是热交换器，被控量是热水温度，控制装置是温度控制器。

1-5 图 1-11 是电炉温度控制系统原理示意图。试分析系统保持电炉温度恒定的工作过程，指出系统的被控对象、被控量以及各部件的作用，最后画出系统方块图。

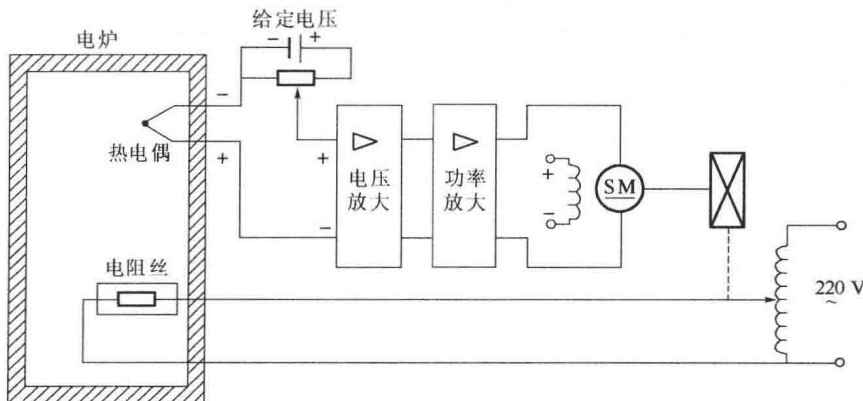


图 1-11 电炉温度控制系统原理图

解：当炉温偏低时，偏差电压为 Δu ，且 Δu 为正，电动机“正”转，电流加大，炉温上升至 $\Delta u = 0$ ，电动机停止转动，炉温保持恒定。

当炉温偏高时, Δu 为负, 电动机“反”转, 使供电电压减小, 至炉温等于给定值为止。

被控对象是电炉, 被控量是电炉炉温, 伺服电动机、减速器、调压器是执行机构, 热电偶是检测元件。方块图如图 1-12 所示。

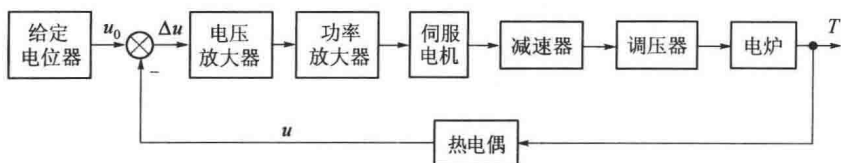


图 1-12 电炉温度控制系统方块图

1-6 图 1-13 是自整角机随动系统原理示意图。系统的功能是使接受自整角机 TR 的转子角位移 θ_o 与发送自整角机 TX 的转子角位移 θ_i 始终保持一致。试说明系统是如何工作的, 并指出被控对象、被控量以及控制装置各部件的作用并画出系统方块图。

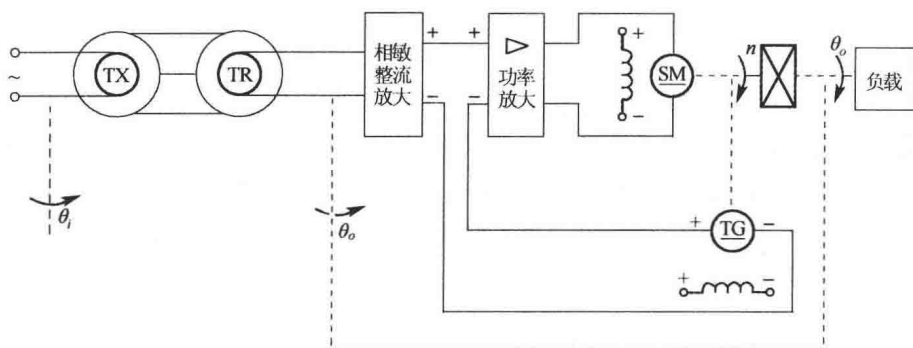


图 1-13 自整角机随动系统原理图

解: 在一定范围内有

$$u_e = k_e(\theta_i - \theta_o) \sin \omega t$$

上式是一个振幅随角偏差 $(\theta_i - \theta_o)$ 的改变而变化的交流电压。放大后的直流信号作用在伺服电动机电枢两端, 带动负载和接收自整角机的转子, 使其跟随发送自整角机的转子旋转, 实现 $\theta_i = \theta_o$ 。

被控对象是负载轴, 被控量是负载轴转角 θ_o , 电动机和减速器是执行机构, 相敏整流放大器与功率放大器起着放大信号的作用, 测速发电机是检测反馈元件。方块图如图 1-14 所示。

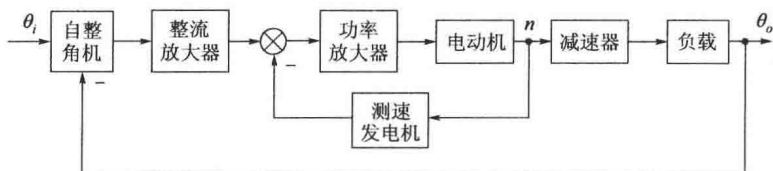


图 1-14 自整角机随动系统方块图

1-7 在按扰动控制的开环控制系统中, 为什么说一种补偿装置只能补偿一种与之相应的扰动因素? 对于图 1-15 按扰动控制的速度控制系统, 当电动机的激磁电压变化时, 转速如何变化? 该补偿装置能否补偿这个转速的变化?

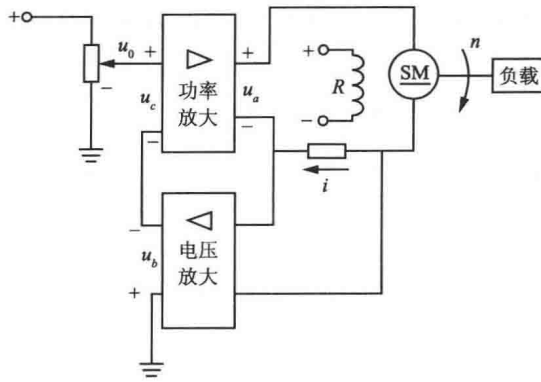


图 1-15 按扰动控制的速度控制系统

解：按扰动控制的开环控制系统只适用于扰动是可测量的场合，且一个补偿装置只能补偿一种扰动因素，对其余扰动均不起补偿作用。

图 1-15 为按电枢电流进行补偿的速度控制系统。当电动机电压增大时，其转速上升；当电压减小时，其转速下降。不能补偿由激磁电压变化引起的转速变化。

1-8 图 1-16 为谷物湿度控制系统原理示意图。在谷物磨粉的生产过程中，有一种出粉最多的湿度，因此磨粉之前要给谷物加水以得到给定的湿度。图中，谷物用传送装置按一定流量通过加水点，加水量由自动阀门控制。加水过程中，谷物流量、加水前谷物湿度以及水压都是对谷物湿度控制的扰动作用。为了提高控制精度，系统中采用了谷物湿度的顺馈控制，试画出系统方块图。

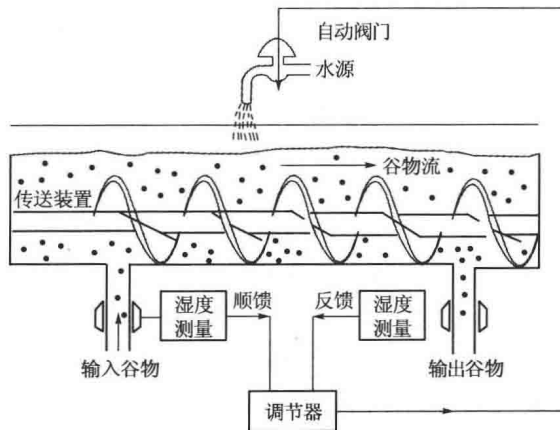


图 1-16 谷物湿度控制系统原理图

解：该系统是一个按扰动补偿的复合控制系统，方块图如图 1-17 所示。

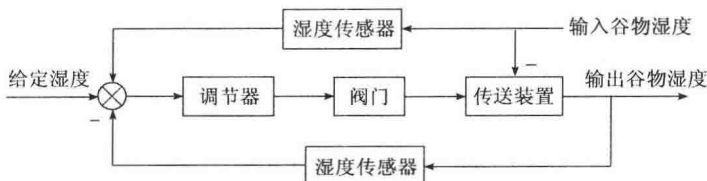


图 1-17 谷物湿度控制系统方块图

1-9 图 1-18 为数字计算机控制的机床刀具进给系统。要求将工件的加工任务编制成

程序预先存入数字计算机。加工时，步进电动机按照计算机给出的信息动作，完成加工任务。试说明该系统的工作原理。

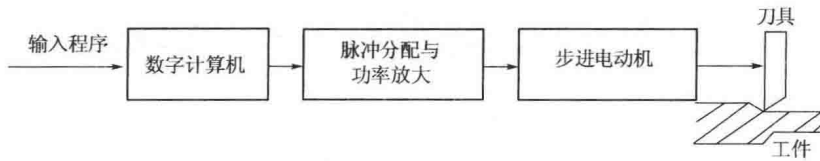


图 1-18 机床刀具进给系统

解：该系统是一开环控制系统。将控制程序转换为控制 X, Y, Z 三个方向运动的电脉冲信号，经过脉冲分配与功率放大，信号输入到步进电动机控制刀具与工件的相对运动位置，保证刀尖的运动轨迹符合工件的轮廓形状。（此系统中只有顺向作用而没有反向联系）

1-10 下列各式是描述系统的微分方程，其中 $c(t)$ 为输出量， $r(t)$ 为输入量，试判断哪些是线性定常或时变系统，哪些是非线性系统。

$$(1) c(t) = 5 + r^2(t) + t \frac{d^2 r(t)}{dt^2};$$

$$(2) \frac{d^3 c(t)}{dt^3} + 3 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 6 \frac{dc(t)}{dt} + 8c(t) = r(t);$$

$$(3) t \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) + 3 \frac{dr(t)}{dt};$$

$$(4) c(t) = r(t) \cos \omega t + 5;$$

$$(5) c(t) = 3r(t) + 6 \frac{dr(t)}{dt} + 5 \int_{-\infty}^t r(\tau) d\tau;$$

$$(6) c(t) = r^2(t);$$

$$(7) c(t) = \begin{cases} 0, & t < 6, \\ r(t), & t \geq 6. \end{cases}$$

解：(1)非线性时变系统；(2)线性定常系统；(3)线性时变系统；(4)非线性时变系统；(5)线性定常系统；(6)非线性定常系统；(7)线性延迟系统。

1.3 名校考研真题详解

本章主要是对整本教材的一个总体介绍，基本上没有学校的考研试题涉及到本章内容，所以读者简单了解即可，不必作为复习重点，因此，本部分也就没有选用考研真题。

第2章 控制系统的数学模型

2.1 复习笔记

一、控制系统的时域数学模型

1. 建立控制系统微分方程的步骤

(1) 由系统原理图画系统方块图, 分别列写系统各元件的微分方程;

(2) 消去中间变量, 得到描述系统输出量与输入量关系的微分方程。

注意: ①信号传递的单向性; ②后级元件对前级元件的负载效应。

2. 线性系统的基本特性

(1) 叠加性: 对于一个 $y=f(t)$ 的系统, 若满足 $f(t_1+t_2)=f(t_1)+f(t_2)$, 则称系统具有叠加性。

(2) 齐次性: 对于一个 $y=f(t)$ 的系统, 若满足 $f(Kt)=Kf(t)$, 则称系统具有齐次性。

同时满足叠加性和齐次性的系统称为线性系统。

3. 线性定常微分方程的求解——拉氏变换法

(1) 考虑初始条件, 对微分方程中的各项分别进行拉氏变换, 将微分方程转换成变量为 s 的代数方程。

(2) 求解代数方程, 得到输出量拉氏变换函数的表达式。

(3) 对输出量拉氏变换表达式进行反变换, 得到时域表达式, 即为所求微分方程的解。

4. 非线性微分方程的线性化

常用切线法或小偏差法, 其实质是在一个很小的范围内, 将非线性特性用一段直线来代替。

5. 运动的模态

如果 n 阶微分方程的特征根是 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 且无重根, 则把函数的 $e^{\lambda_1 t}, e^{\lambda_2 t}, \dots, e^{\lambda_n t}$ 称为该微分方程所描述运动的模态, 也称振型。如果特征根中有多重根 λ , 则模态会有形如 $t e^{\lambda t}, t^2 e^{\lambda t}, \dots$ 的函数; 如果特征根中有共轭复根 $\lambda = \sigma \pm j\omega$, 则有模态 $e^{\sigma t} \sin \omega t, e^{\sigma t} \cos \omega t$ 。

二、控制系统的复数域数学模型

1. 传递函数及其性质

线性定常系统的传递函数, 定义为零初始条件下, 系统输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比。数学表达式为:

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

性质:

(1) 传递函数是复变量 s 的有理真分式函数, 具有复变函数的所有性质; $m \leq n$, 且所有的系数均为实数。

(2) 传递函数表示输入量与输出量之间的关系, 只与系统(或元件)本身的结构和参数有

关，而与输入信号无关，也不反映系统内部的任何信息。

(3) 传递函数与微分方程具有相通性。

(4) 传递函数的拉氏反变换是脉冲响应。

2. 传递函数的零点和极点

传递函数的分子多项式和分母多项式因式分解后可得到如下形式：

$$G(s) = \frac{b_0(s - z_1)\cdots(s - z_m)}{a_0(s - p_1)\cdots(s - p_n)} = K^* \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{j=1}^n (s - p_j)}$$

式中， z_i 为传递函数的零点； p_j 为传递函数的极点；系数 $K^* = \frac{b_0}{a_0}$ 称为传递系数或根轨迹增益。

3. 传递函数的零极点对输出的影响

(1) 传递函数的极点就是系统微分方程的特征根，决定了系统的模态。

(2) 传递函数的零点、极点和增益共同确定每一项(指数项、指数振荡项、常数项)的系数大小。

三、控制系统的结构图与信号流图

1. 系统结构图的组成

控制系统的结构图由许多对信号进行单向运算的方框和一些信号流向线组成，它包含四种基本单元：信号线、引出点、比较点和方框。

2. 结构图的等效变换和简化

(1) 串联

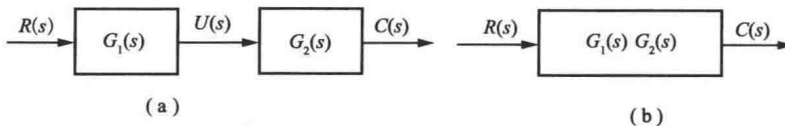


图 2-1 方框串联连接及其简化

(2) 并联

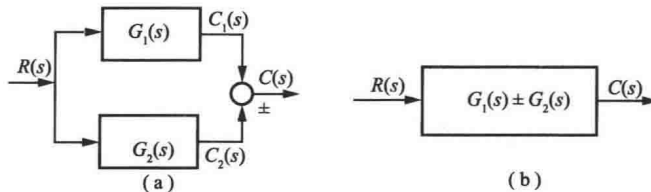


图 2-2 方框并联连接及其简化

(3) 反馈

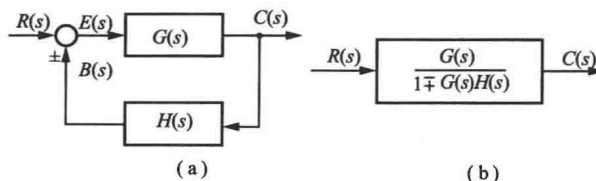


图 2-3 方框反馈连接及其简化

(4) 比较点和引出点的移动

①注意在移动前后必须保持信号的等效性，而且比较点和引出点一般不宜交换其位置；

②“-”号可依沿信号线越过方框，但不可越过比较点和引出点。

3. 信号流图

(1)源节点(输入节点)：只有输出支路的节点。

(2)阱节点(输出节点)：只有输入支路的节点。

(3)混合节点：既有输出支路，又有输入支路的节点。

(4)前向通道：从源节点到阱节点之间，与每个节点仅相交一次的通道。

(5)回路：起于并终于同一节点，且与其他任何节点相交不多于一次的闭合通道。

(6)不接触回路：相互之间无公共节点的回路。

4. 梅森增益公式

设系统的传递函数为 P ，则梅森增益公式表示为：

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

式中， P 为总增益； n 为前向通路总数； p_k 为第 k 条前向通路总增益； Δ 为信号流图的特征式， $\Delta = 1 - \sum L_a + \sum L_b L_c - \sum L_d L_e L_f + \dots$ ； Δ_k 为第 k 条前向通路的流图余因子式，是特征式中与第 k 条通路不接触的部分。

5. 闭环系统的传递函数

闭环系统在输入信号和扰动作用下，以 $C(s)$ 为输出量时的系统传递函数，称为闭环传递函数。

(1) 输入信号作用下的闭环传递函数

输入信号作用下，即 $R(s) \neq 0$ ， $N(s) = 0$ 时，

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

(2) 扰动作用下的闭环传递函数

扰动信号作用下，即 $R(s) = 0$ ， $N(s) \neq 0$ 时，

$$\Phi_n(s) = \frac{C(s)}{N(s)} = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

(3) 输入和扰动同时作用下的闭环传递函数

输入信号和扰动信号同时作用下，系统的输出量为

$$\begin{aligned} \Sigma C(s) &= \Phi(s)R(s) + \Phi_n(s)N(s) \\ &= \frac{G_1(s)G_2(s)R(s) + G_2(s)N(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \end{aligned}$$

(4) 闭环系统的误差传递函数

闭环系统在输入信号和扰动作用下，以误差信号 $E(s)$ 作为输出量时的传递函数称为误差传递函数。

$$\begin{aligned} \Phi_e(s) &= \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \\ \Phi_{en}(s) &= \frac{E(s)}{N(s)} = \frac{-G_2(s)H(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \end{aligned}$$