

十一五规划理工类主干课程辅导丛书

自动控制原理 习题与解析

孙虹 姜萍萍 吴婷 编著

Exercise

&
Analysis



科学出版社

十一五规划理工类主干课程辅导丛书

自动控制原理习题与解析

孙 虹 姜萍萍 吴 婷 编著

科学出版社

内 容 提 要

本书是根据国家教委制定的高等工业学校自动控制原理课程的教学基本要求,并参照目前高校普遍使用的主流教材编写的自动控制原理基础辅导教材。书中通过对知识点概念和习题的讲解与分析,帮助读者了解和掌握该课程的难点、要点,提高读者分析问题与解决问题的能力。

全书按照主流教材的章节安排,对自动控制原理课程内容进行归纳分类。每章分成若干个知识点,每个知识点又分为“要点归纳”和“例题解析”。“要点归纳”是对重要知识点的提炼总结;“例题解析”部分精选典型例题(包括疑难习题、课程考试试题以及近年考研真题),对例题的题意、解题思路、容易混淆的概念、容易产生的错误进行分析,并给出十分详尽的解答,以帮助读者熟练掌握常考知识点。部分解答还给出了多种解题方法,扩展读者的解题思路。全书最后提供了课程测试题和考研真题各一套,并附参考答案,以提高读者的应试水平和知识的综合应用能力。

本书可作为本、专科学生学习自动控制原理课程的辅助教材,对准备考研的学生也是一本很好的考研复习资料。书中提供的海量习题为从事课程教学的老师提供了宝贵的教学资源,可作教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

• 自动控制原理习题与解析/孙虹,姜萍萍,吴婷编著. —北京:

科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-022785-0

I. 自… II. ①孙… ②姜… ③吴… III. 自动控制理论—解题
IV. TP13-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 123937 号

责任编辑: 张少波 / 责任校对: 科 海

责任印刷: 科 海 / 封面设计: 林 陶

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>

北京市艺辉印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 9 月第一版

开本: 16 开

2008 年 9 月第一次印刷

印张: 19.75

印数: 0 001-5 000

字数: 480 千字

定价: 32.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

本书是为读者学习自动控制原理课程而编写的教学辅导书,可帮助读者复习课程的基本内容,检验基本理论和基本概念的掌握程度,培养和提高分析问题、解决问题的能力,力争使读者在学完本书之后,在课程的理解和掌握方面达到一个新的高度。

阅读指南

全书共分 10 章。

第 1 章 主要介绍自动控制的基本概念和控制系统方框图,自动控制的基本控制方式及特点,自动控制系统的分类,对自动控制系统的基本要求等内容。

第 2 章 主要介绍控制系统的数学模型,传递函数,动态结构图及等效变换,信号流程图,梅森增益公式等内容。

第 3 章 主要介绍线性系统的时域分析法,系统时间响应的性能指标,一阶、二阶系统的典型响应,代数稳定判据及有关分析计算,稳态误差及其一般的计算方法等内容。

第 4 章 主要介绍线性系统的根轨迹法,根轨迹方程,常规根轨迹, 0° 根轨迹,参数根轨迹等内容。

第 5 章 主要介绍线性系统的频率特性及其各种几何表示方法,奈奎斯特稳定判据、对数稳定判据,稳定裕度等内容。

第 6 章 主要介绍系统校正的基本概念和校正方式,串联超前、串联滞后、串联滞后-超前校正设计的原理、步骤和方法等内容。

第 7 章 主要介绍线性离散系统的分析与校正, Z 变换,脉冲传递函数,离散系统结构图,离散系统的稳定性与稳定性判据,离散系统的稳态误差等内容。

第 8 章 主要介绍非线性系统特征,非线性因素对系统运动的影响,相平面法,描述函数法等内容。

第 9 章 主要介绍线性系统的状态空间表达式,传递函数矩阵,线性变换,线性定常连续系统与离散系统的可控性、可观性,状态观测器,李雅普诺夫稳定性等内容。

第 10 章 提供了课程测试题和考研真题各一套,并给出了参考答案,供读者检验学习成果并进行考前练习。

特色与优点

编写本书的指导思想是:在内容上重视基础理论,覆盖课程全部基本教学要求;在体系上照顾不同专业学生,反映自动控制原理面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的成果;在形式上根据教学实践经验和对相关内容的思考理解,简明描述课程的基本知识点、重点和难点内容,使学生迅速把握重点。

本书每章内容均包括各基本知识点的要点归纳，并精选一些具有代表性的例题（包括疑难习题、课程考试试题及考研真题），给出了解题思路和分析方法，题后明示了解题中应注意的问题。这样编写的目的在于：力争使读者在尽可能短的时间内，巩固课程基本概念，加深理解基本理论并融会贯通，熟练掌握基本分析计算方法举一反三，不断提高读者的应试水平和知识的综合应用能力。在本书最后给出了一套课程测试题和考研真题及其解题方案。

读者定位

本书可供自动控制原理课程的学生和考研读者学习，并可供从事课程教学的教师参考。

本书由孙虹、姜萍萍、吴婷编写，全书框架结构由何光明和吴婷拟定。感谢安徽建筑工业学院自动化系的同志们给予的支持和帮助。另外还要感谢王珊珊、陈玉旺、许娟、陈芳、范荣钢、钱阳勇、杨明、丁善祥、张凌云、陈智等同志的关心和帮助。

由于编者水平和经验有限，加之编写时间仓促，本书难免会有不妥或错误之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2008年6月

目 录

第1章 自动控制的一般概念 1

- 1.1 知识点1: 自动控制与自动控制系统 1
 - 1.1.1 要点归纳 1
 - 1.1.2 例题解析 2
- 1.2 知识点2: 自动控制系统基本控制方式与分类 4
 - 1.2.1 要点归纳 4
 - 1.2.2 例题解析 5

第2章 控制系统的数学模型 11

- 2.1 知识点1: 控制系统的数学模型 ... 11
 - 2.1.1 要点归纳 11
 - 2.1.2 例题解析 13
- 2.2 知识点2: 控制系统的结构图与信号流图 19
 - 2.2.1 要点归纳 19
 - 2.2.2 例题解析 22
- 2.3 知识点3: 控制系统的典型传递函数 34
 - 2.3.1 要点归纳 34
 - 2.3.2 例题解析 36

第3章 线性系统的时域分析法 ... 39

- 3.1 知识点1: 系统时间响应的性能指标 39
 - 3.1.1 要点归纳 39
 - 3.1.2 例题解析 41
- 3.2 知识点2: 一阶系统的数学模型和典型响应 41
 - 3.2.1 要点归纳 41
 - 3.2.2 例题解析 43

- 3.3 知识点3: 二阶系统的数学模型和典型响应 45
 - 3.3.1 要点归纳 45
 - 3.3.2 例题解析 50
- 3.4 知识点4: 线性系统的稳定性分析... 57
 - 3.4.1 要点归纳 57
 - 3.4.2 例题解析 59
- 3.5 知识点5: 线性系统的稳态误差 ... 66
 - 3.5.1 要点归纳 66
 - 3.5.2 例题解析 69

第4章 线性系统的根轨迹法 77

- 4.1 知识点1: 根轨迹的基本概念 77
 - 4.1.1 要点归纳 77
 - 4.1.2 例题解析 79
- 4.2 知识点2: 根轨迹绘制的基本法则... 79
 - 4.2.1 要点归纳 79
 - 4.2.2 例题解析 82
- 4.3 知识点3: 系统性能的分析 105
 - 4.3.1 要点归纳 105
 - 4.3.2 例题解析 106

第5章 线性系统的频域分析法 ... 109

- 5.1 知识点1: 频率特性 109
 - 5.1.1 要点归纳 109
 - 5.1.2 例题解析 110
- 5.2 知识点2: 开环频率特性曲线的绘制 113
 - 5.2.1 要点归纳 113
 - 5.2.2 例题解析 117
- 5.3 知识点3: 频域稳定判据 131
 - 5.3.1 要点归纳 131



5.3.2 例题解析	132
5.4 知识点4: 稳定裕度	143
5.4.1 要点归纳	143
5.4.2 例题解析	143
5.5 知识点5: 闭环系统的频域性能指标	150
5.5.1 要点归纳	150
5.5.2 例题解析	151
第6章 线性系统的校正方法	154
6.1 知识点1: 系统的设计与校正问题	154
6.1.1 要点归纳	154
6.1.2 例题解析	155
6.2 知识点2: 常用校正及特性	156
6.2.1 要点归纳	156
6.2.2 例题解析	159
第7章 线性离散系统的分析与校正	186
7.1 知识点1: 离散系统的数学模型	186
7.1.1 要点归纳	186
7.1.2 例题解析	191
7.2 知识点2: 离散系统的性能分析	200
7.2.1 要点归纳	200
7.2.2 例题解析	203
7.3 知识点3: 离散系统的数字校正	210
7.3.1 要点归纳	210
7.3.2 例题解析	210
第8章 非线性控制系统分析	215
8.1 知识点1: 非线性控制系统概述	215
8.1.1 要点归纳	215
8.1.2 例题解析	216
8.2 知识点2: 相平面法	217

8.2.1 要点归纳	217
8.2.2 例题解析	220
8.3 知识点3: 描述函数法	229
8.3.1 要点归纳	229
8.3.2 例题解析	232

第9章 线性系统的状态空间分析与综合 245

9.1 知识点1: 线性系统的状态空间描述	245
9.1.1 要点归纳	245
9.1.2 例题解析	249
9.2 知识点2: 线性系统的可控性与可观性	260
9.2.1 要点归纳	260
9.2.2 例题解析	263
9.3 知识点3: 线性定常系统的反馈结构及状态观测器	270
9.3.1 要点归纳	270
9.3.2 例题解析	270
9.4 知识点4: 李雅普诺夫稳定性分析	281
9.4.1 要点归纳	281
9.4.2 例题解析	282

第10章 课程测试及考研真题 291

10.1 课程测试	291
10.2 课程测试参考答案	294
10.3 重点大学硕士研究生入学考试试题	299
10.4 重点大学硕士研究生入学考试试题参考答案	302

参考文献 309

第1章 自动控制的一般概念

【基本知识点】自动控制的基本概念；控制系统方框图；自动控制的基本控制方式及特点；自动控制系统的分类；对自动控制系统的基本要求等。

【重点】控制系统原理图；控制系统方框图；自动控制的基本控制方式及特点。

【难点】控制系统方框图。

1.1 知识点1：自动控制与自动控制系统

1.1.1 要点归纳

1. 自动控制

所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，使其被控量按照预定的规律（即给定量）运行。

自动控制的基本概念：

- (1) 被控对象。要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。
- (2) 控制装置。对被控对象起控制作用的设备总体。
- (3) 输出量。位于控制系统输出端，并要求实现自动控制的物理量。也称为被控量。
- (4) 输入量。作用于控制系统输入端，并使系统具有预定功能或预定输出的物理量。也称给定量或控制量。
- (5) 扰动。破坏系统输入量和输出量之间预定规律的信号。

2. 自动控制系统

(1) 控制系统的任务。减小或消除扰动量的影响，使被控对象的被控量始终按给定量确定的运行规律去变化。

(2) 自动控制系统。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。

控制装置包括：

- 给定元件（提供控制量）；
- 测量元件（测量被控量）；
- 比较元件（比较控制量与反馈量，给出偏差信号）；
- 放大元件（放大偏差信号）；
- 执行机构（对被控对象施加控制）；
- 校正元件（也叫补偿元件，用以改善系统性能）。

一个典型的自动控制系统的基本组成如图 1.1 所示。

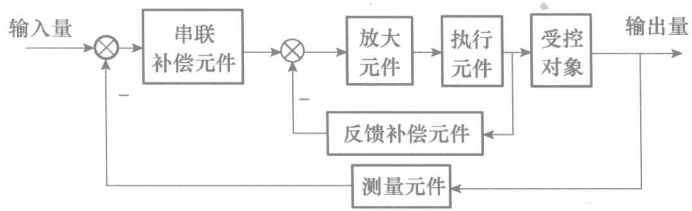


图 1.1

(3) 对自动控制系统的性能要求。

- ① 稳。指动态过程的平稳性。
- ② 快。指动态过程的快速性。
- ③ 准。指动态过程的最终精度。

注意：同一控制系统，稳、快、准相互制约。受控对象不同，对稳、快、准的技术要求也有所侧重。

1.1.2 例题解析

【例 1-1】热处理炉温控系统的工作原理如图 1.2 所示，试简要分析系统的控制原理，并画出系统原理方框图。

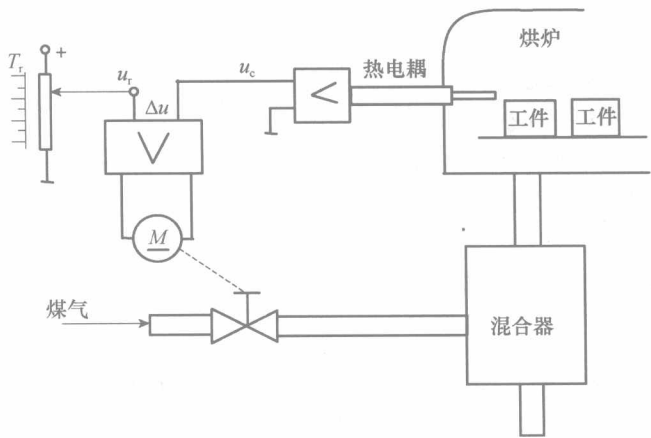


图 1.2

答：

1. 热处理炉温控系统的工作原理分析

控制任务：控制炉温 T_o 使其等于给定温度 T_r^0 。

被控对象——热处理炉；

被控量——炉温 T_o ；

给定输入——给定温度 T_r^0 ；

干扰输入——煤气压力和环境干扰；

测量原件——热电偶；

比较元件——由 u_c 、 u_r 两电压的反接来实现，电压 $\Delta u = u_r - u_c$ ，相当于炉温的偏差；

执行元件——直流电动机及传动装置。

工作原理：假定实际炉温 = 给定炉温，则经事先整定，使 $u_c = u_r$ ，即 $\Delta u = 0$ ，故电机不动，阀门保持一定开度，供气量一定，热处理炉处于平衡工作状态。

如果管道煤气压力下降，而阀门开度一时没变，则供气量减少，炉温下降。致使热电偶的输出减弱， $u_c < u_r$ 、 $\Delta u > 0$ ，电机正转开大阀门，从而使供气量增加，炉温回升，直至又恢复到给定值， $T'_c = T'_r$ 、 $u_c = u_r$ 、 $\Delta u = 0$ ，电机停转，系统重新进入平衡状态，在煤气压力下降的情况下又能按规定的炉温运行。

如果根据工艺要求，从某时刻开始需要将炉温调整到另一数值，则可将给定电位计的温标连同电刷移到相应的新的位置， T'_r 、 u_r 变了，而供气量一时没变、炉温没变，致使 u_c 、 u_r 不等， $\Delta u \neq 0$ ，电机转动调整阀门开度，改变供气量，调整炉温，直至 $T''_c = T'_r$ ，系统进入平衡运行。

2. 热处理炉温控系统原理方框图

根据以上分析，热处理炉温控系统原理方框图如图 1.3 所示。

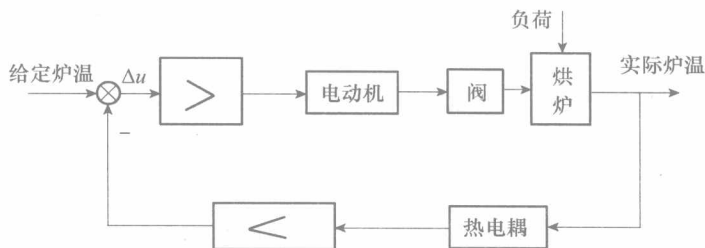


图 1.3

点评：分析系统，首先要明确其控制任务，弄清楚被控对象、被控量、给定输入、干扰输入以及控制装置等。

【例 1-2*】（西安交通大学，2004 年）一个液位控制系统的原理图如图 1.4 所示。试画出该控制系统的原理方框图，简要说明它的工作原理，并指出该控制系统的输入量，输出量及扰动量。

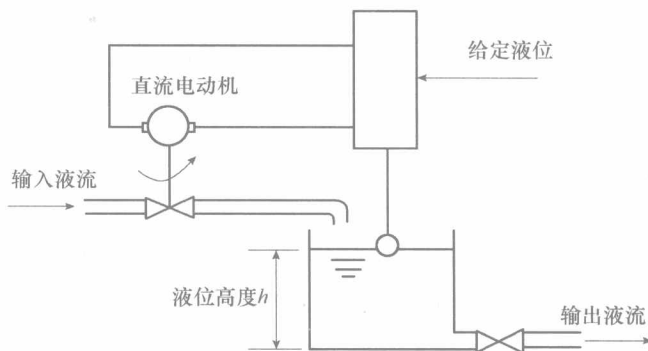


图 1.4

答:

本题考查液位控制系统。

当系统的工作原理为:浮标位置对应于电位计上一点,该点电压与设定液位对应的电压进行比较,如果没有达到设定的液位,将产生偏差电压,功率放大后驱动直流电动机转动,调节输入液流的阀门,改变进入水池的水流量,当输出液流发生改变,液面发生变化时,重复上述过程,使液面保持在给定高度。

该系统的输入量为给定液位,输出量为实际水位,扰动量为输出液流量,系统原理方框图如图 1.5 所示。

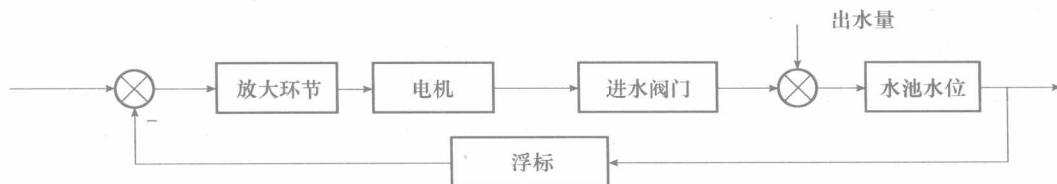


图 1.5

1.2 知识点 2: 自动控制系统基本控制方式与分类

1.2.1 要点归纳

1. 基本控制方式

(1) 开环控制方式

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。分为按给定值操纵和按扰动补偿两种形式。其典型方框图如图 1.6a 和图 1.6b 所示。

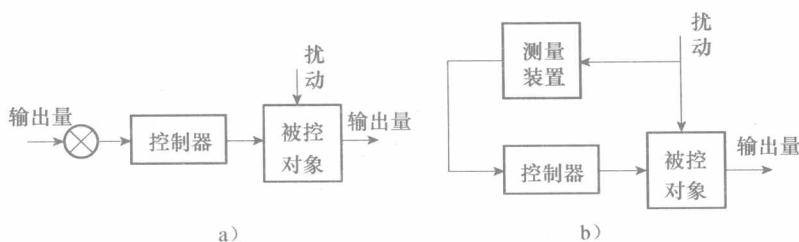


图 1.6

开环控制系统特点:

- 结构简单,所用元器件少。
- 系统没有抗扰动功能,因而限制了系统的应用范围

① 按给定值操纵。信号由给定值至输出量单向传递。一定的给定值对应一定的输出量。系统的控制精度取决于系统事先的调整精度。对于工作过程中受到的扰动或特性参数的变化无法自动补偿。结构简单,成本低廉,多用于系统结构参数稳定和扰动信号较弱的场合。

② 按扰动补偿。利用对扰动信号的测量产生控制作用，以补偿扰动对输出量的影响。对于不可测扰动以及对象、各功能部件内部参数变化给输出量造成的影响，系统自身无法控制。因此，控制精度有限。

(2) 闭环控制方式

闭环控制又称反馈控制，是指控制器与控制对象之间既有顺向作用又有反向联系的控制过程。其典型方框图如图 1.7 所示。

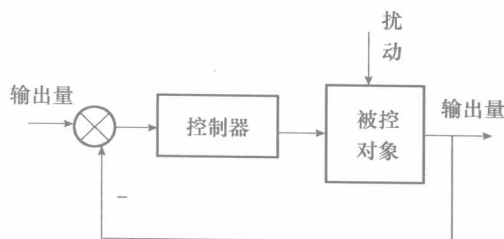


图 1.7

闭环控制系统特点：

- 闭环负反馈控制，即按偏差调节；
- 抗扰性好，控制精度高；
- 系统参数应适当选择，否则可能不能正常工作。

(3) 复合控制方式

它是开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式。分为按偏差控制 + 按给定量补偿和按偏差控制 + 按扰动补偿两种形式。其典型方框图如图 1.8a 和图 1.8b 所示。

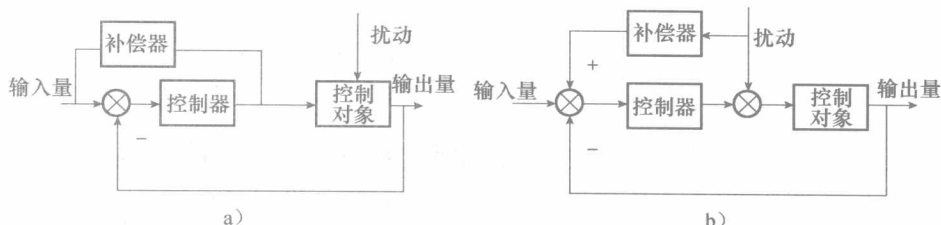


图 1.8

复合控制系统特点：

- 具有很高的控制精度；
- 可以抑制几乎所有的可量测扰动，其中包括低频强扰动；
- 补偿器的参数要有较高的稳定性。

2. 自动控制系统的分类

(1) 按输入信号的特征分类

① 恒值控制系统；② 程序控制系统；③ 位置随动控制系统（又称伺服系统）。

(2) 按信号传输过程是否连续分类

① 连续控制系统；② 离散控制系统。

(3) 按系统构成元件是否线性分类

① 线性控制系统；② 非线性控制系统。

(4) 按系统参数是否随时间变化分类

① 定常控制系统；② 时变控制系统。

1.2.2 例题解析

【例 1-3】什么是反馈控制原理？反馈控制系统的主要特点是什么？



答:

反馈控制原理即是系统的输出通过反馈通道引入输入端,与给定的信号进行比较,利用所得的偏差信号产生控制作用调节被控对象,达到减小偏差或消除偏差的目的。反馈控制的特点是存在偏差,并且用偏差来消除偏差。

【例 1-4】试比较闭环系统与开环系统的优缺点。

答:

在开环控制系统中,系统输出只受输入的控制,控制精度和抑制干扰的特性都相对较差,但是由于没有反馈的作用,开环控制系统反应较快。

闭环控制系统是建立在反馈原理基础之上的,利用输出量同期望值的偏差对系统进行控制,可获得比较好的控制性能,但是闭环控制系统由于反馈作用,一般有个调节过程,动态响应相对较慢,如果参数设计不合理,可能不稳定而出现振荡,通常大多数重要的自动控制系统都采用闭环控制的方式。

【例 1-5】试判断下列用微分方程描述的系统是线性系统还是非线性系统。

$$(1) \frac{d^2 y}{dt^2} + 3 \frac{dy}{dt} + 4y = e(t)$$

$$(2) \frac{du}{dt} + u^2 + u = \sin^2 \omega t$$

$$(3) 3 \frac{d^2 y}{dt^2} + y \frac{dy}{dt} + 2y = 5t^2$$

$$(4) t \frac{d^2 y}{dt^2} + 5 \frac{dy}{dt} + t^2 y = e^{-t}$$

答:

(1) 线性系统; (2) 非线性系统; (3) 非线性系统; (4) 非线性系统。

【例 1-6】水箱液位控制系统如图 1.9 所示。运行中无论用水流量如何变化(由开关 l_2 操纵),希望水面高度(液位) H 保持不变。

(1) 简述工作原理。

(2) 画出系统的原理方块图,并指明被控对象、被控量、给定值和干扰。

答:

控制任务:保持液位 H 不变。

被控对象——水箱;

被控量——液位 H ;

干扰—— l_2 的变化;

执行元件——杠杆,开关 l_1 。

工作原理:当开关 l_2 开大时,出水量 Q_2 增大,液位 H 下降,因此浮子下降,通过杠杆的作用使开关 l_1 开大,进水量 Q_1 增大,从而保持液位 H 不变。对其他的情况可作类似分析。

系统方块图如图 1.10 所示。

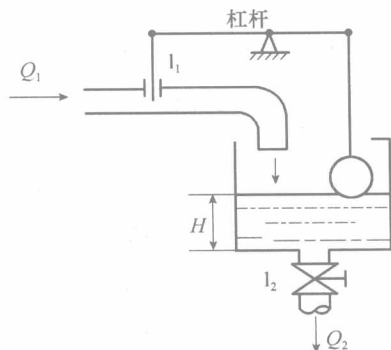


图 1.9

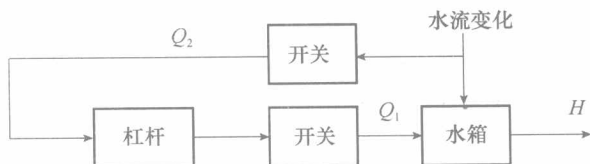


图 1.10

点评：本题为按扰动补偿的开环控制系统。开关 I_1 是通过杠杆控制的。

【例 1-7*】（浙江大学，2005 年）电冰箱的制冷系统原理如图 1.11 所示。继电器的输出电压 U_R 为压缩机上的工作电压。绘制控制系统框图，简述工作原理。若出现压缩机频繁启动，请提出相应的改进措施。

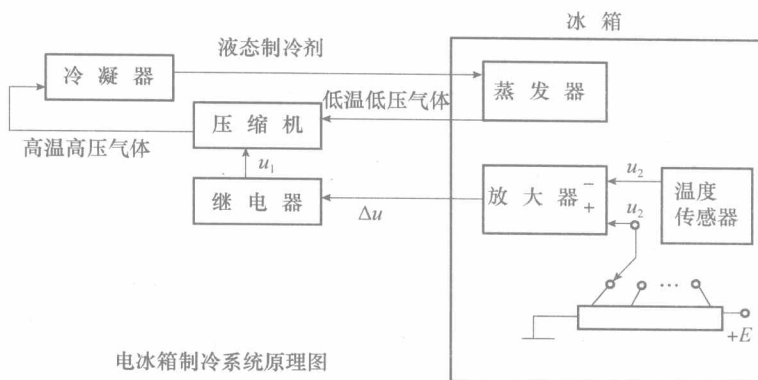


图 1.11

答：

系统的控制系统框图如图 1.12 所示。

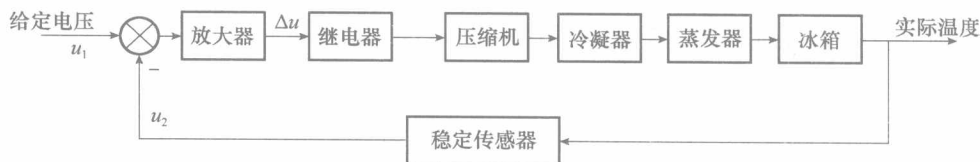


图 1.12

其工作原理为：设定温度 U_1 和温度传感器反馈回的温度 U_2 进行比较，偏差经放大器放大后传送给继电器，若偏差信号放大后能够使继电器闭合，则压缩机启动，驱动冷凝器进行制冷，稳定传感器接受到的稳定降低，直到压缩机停止工作，从而保证实际温度总在设定温度的小范围内。若出现压缩机频繁启动，说明实际温度与设定温度的很小偏差都会使继电器闭合，因此解决的办法是减小放大器的增益，或者增加继电器的闭环门限值。

【例 1-8】图 1.13 为水温控制示意图。冷水在热交换器中由通入的蒸气加热，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是什么？

答：

控制任务：保持热水温度为期望值。

被控对象——热交换器；

被控量——热水温度；

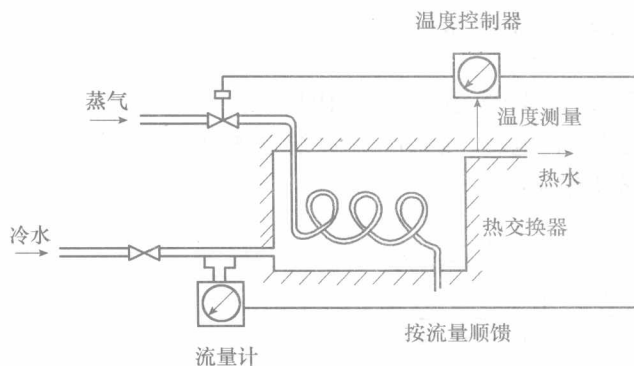


图 1.13

干扰——冷水流量变化；

控制装置——阀门、温度传感器、流量计和温度控制器。

工作原理：温度传感器不断测量热水温度，并在温度控制器中与给定温度进行比较，若水温高于给定温度，则其偏差控制蒸气阀门关小，使进入热交换器的蒸气量减小，水温降低，直至偏差为零。同理可解释水温低于给定温度时的情况。

冷水流量变化对热水温度会产生影响。如冷水流量变大时，热水温度将有所降低。流量计测得冷水流量的变化，按顺馈加到温度控制器加以补偿，使阀门开大，蒸气量增加，从而补偿了由于冷水量变大而引起的水温的降低。

根据系统的工作原理，绘制其原理方块图如图 1.14 所示。

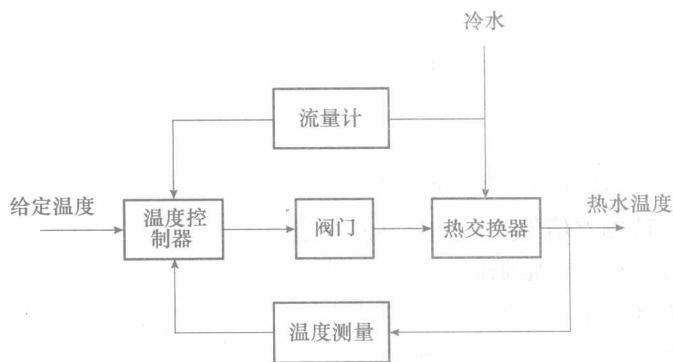


图 1.14

点评：此题既有顺馈又有反馈，是复合控制。

【例 1-9】图 1.15a 与图 1.15b 所示的系统均为电压调节系统。假设空载时两系统的发电机端电压均为 110V，试问带上负载后，图 1.15a 和图 1.15b 中哪个系统能保持 110V 不变？为什么？

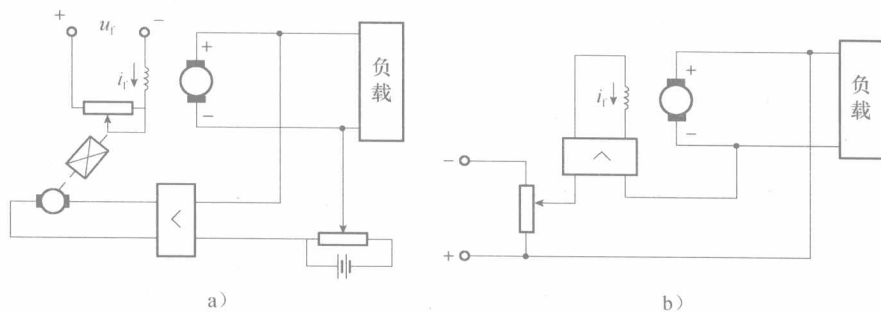


图 1.15

答：

带上负载后，图 1.15a 与图 1.15b 所示的系统的端电压均下降，图 1.15a 系统的端电压能恢复到 110V，而图 1.15b 的端电压则低于 110V。

带上负载后，系统图 1.15a 的发电机端电压低于给定电压 110V，其偏差电压经放大器放大后使电动机转动，经减速器带动变阻器使电阻变小，从而使励磁电流 i_f 增大，使其偏差减小，直至为零，电动机停止转动。所以其端电压能保持在 110V。

系统图 1.15b 带上负载后，同样发电机端电压低于给定电压 110V，其偏差电压经放大器直接使发电机励磁电流 i_f 增大，使其偏差减小，从而提高端电压。但偏差电压始终不能为零，否则发电机将无法工作。因此其端电压会低于 110V。

点评：两个系统励磁电流的提供者不同，图 1.15a 由单独的电源提供，而图 1.15b 是由发电机的端电压提供。

【例 1-10*】（华中科技大学，2005 年）炉温控制系统的工作原理如图 1.16 所示，指出系统的输入量、输出量、偏差信号和被控对象，画出系统的方块图，并简单说明炉温的调节过程。

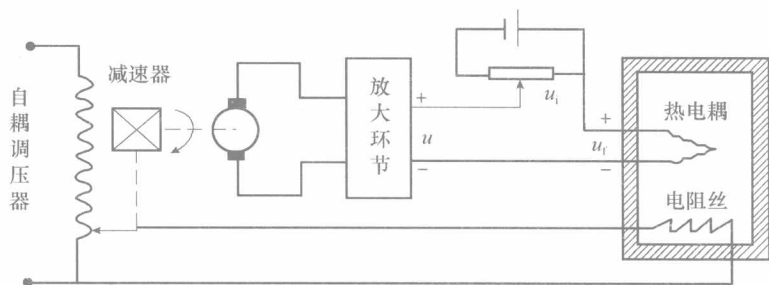


图 1.16

答：

炉温的动态调节过程为：炉内温度经热电偶测量转变为电信号 u_f ，当炉内温度小于设定的温度时，即 $u_f < u_i$ ，产生偏差信号 u ，经放大环节后，驱动电机正向转动，经减速器调整

自耦变压器的动点位置，从而提高加热电压，使炉内稳定升高，直到 $u_f = u_i$ ，此时电机停止转动；反之亦然。

该系统的输入量为给定电压 u_i ，输出量为炉温，偏差信号为 u ，被控对象为电炉，方块图如图 1.17 所示。

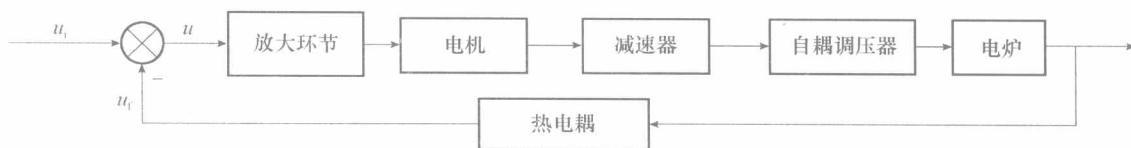


图 1.17