

自动控制理论

AUTOMATION

学习指导

■ 张冬妍 孙丽萍 岳 琪 编著
■ 王矛棣 审

东北林业大学出版社

自动控制理论学习指导

张冬妍 孙丽萍 岳 琪 编著
王矛棣 审

东北林业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制理论学习指导/张冬妍, 孙丽萍, 岳琪编著. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003.10

ISBN 7-81076-522-1

I. 自... II. ①张... ②孙... ③岳... III. 自动控制理论—高等学校—教学参考资料 IV. TP 13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 121040 号

责任编辑: 冯 琪

封面设计: 彭 宇



NEFUP



自动控制理论学习指导

Zidong Kongzhi Lilun Xuexi Zhidao

张冬妍 孙丽萍 岳 琪 编著

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路26号)

东北林业大学印刷厂印装

开本787×960 1/16 印张15.5 字数276千字

2003年12月第1版 2004年9月第2次印刷

ISBN 7-81076-522-1

TP·57 定价: 18.60 元

内 容 简 介

本书是普通高等学校林业机电类自动控制原理课程学习指导教材。全书系统而精炼地总结了古典控制理论和线性系统状态空间分析的基本内容。全书共分八章,包括自动控制系统的基本概念、控制系统的数学模型、时域分析法、频域分析法、控制系统的综合校正、非线性系统分析、线性离散系统的分析和校正及线性系统状态空间分析。书中还附有 MATLAB 在控制理论中的应用例子和相关内容简介。

为便于读者的学习和参考,书中不仅提炼了涵盖重、难点知识在内的学习目标、内容概要和主要概念复习,而且提供了大量综合例题详解和习题。

本书可作为自动控制原理课程教学参考书,同时对非控制专业的研究生和相关工程技术人员也有较好的参考价值。

前 言

本书是结合国家林业局普通高等学校林业机电类教学指导委员会 2001 年第三次会议的决定,依据教育部对高等院校自动控制原理课程教学大纲要求,面向林业机电类高年级学生的一本学习(考研)指导和教学参考书。

为使读者更好地理解和掌握自动控制理论的基本内容,提高对知识的综合运用能力,编者结合课程教学经验编写了此书,力求内容系统、精炼,条理清晰,重点突出。为配合以上的想法和目标,本书采用了“学习目标、内容概要、主要概念复习、疑难解析、习题”的框架结构,其中,学习目标是结合各章的基本知识点、重难点要求而提炼得到的,以使读者清楚而快捷地明确关于学习或复习的主线和内容掌握程度;内容概要部分归纳了每章的主要内容和基本概念;作者精心筛选了具有典型性和代表性的例题和习题,通过例题详解和习题自测练习,加深读者对知识点的掌握,提高解题的能力和技巧。同时针对习题还配备了相应的参考答案。书中在附录中对 Matlab 在控制理论中的部分应用例题和相关知识做以介绍,以使读者初步掌握关于控制系统工程计算分析软件的运用。

本书由张冬妍、孙丽萍、岳琪主编。全书共分 8 章,其中第 1、2、4 章由张冬妍编写,第 3 章由叶树亮编写,第 5 章、附录由岳琪和朱莉编写,第 6、7、8 章由孙丽萍编写。本书由王矛棣任主审,在此向他表示诚挚的谢意。同时也感谢给予编写工作大力支持和帮助的教师和研究生们。

由于编者水平有限,编写时间仓促,因此疏漏和不当之处在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

编著者
2003 年 12 月

目 录

1 自动控制系统的基本概念	(1)
1.1 学习目标	(1)
1.2 内容概要	(1)
1.3 主要概念复习	(3)
1.4 疑难解析	(3)
习题	(10)
习题答案	(14)
2 控制系统的数学模型	(15)
2.1 学习目标	(15)
2.2 内容概要	(15)
2.3 主要概念复习	(19)
2.4 疑难解析	(20)
习题	(35)
习题答案	(41)
3 时域分析法	(44)
3.1 学习目标	(44)
3.2 内容概要	(44)
3.3 主要概念复习	(50)
3.4 疑难解析	(50)
习题	(62)
习题答案	(68)
4 频域分析法	(71)
4.1 学习目标	(71)
4.2 内容概要	(71)

4.3	主要概念复习	(79)
4.4	疑难解析	(79)
	习题.....	(96)
	习题答案.....	(101)
5	控制系统的综合校正	(105)
5.1	学习目标	(105)
5.2	内容概要	(105)
5.3	主要概念复习	(112)
5.4	疑难解析	(113)
	习题.....	(127)
	习题答案.....	(131)
6	非线性控制系统分析	(133)
6.1	学习目标	(133)
6.2	内容概要	(133)
6.3	主要概念复习	(143)
6.4	疑难解析	(144)
	习题.....	(157)
	习题答案.....	(163)
7	线性离散系统的分析和校正	(166)
7.1	学习目标	(166)
7.2	内容概要	(166)
7.3	主要概念复习	(173)
7.4	疑难解析	(173)
	习题.....	(185)
	习题答案.....	(190)
8	线性系统的状态空间分析	(192)
8.1	学习目标	(192)
8.2	内容概要	(192)
8.3	主要概念复习	(202)
8.4	疑难解析	(203)
	习题.....	(215)
	习题答案.....	(219)
附录	Matlab	(223)
	参考文献.....	(239)

1 自动控制系统的基本概念

1.1 学习目标

通过本章的学习，应掌握负反馈控制原理；学会根据系统工作原理图确定系统的被控对象、被控制量、控制量，分析系统工作原理，绘制系统原理方框图；掌握自动控制系统各基本组成部分功能；了解控制系统分类及基本要求。

1.2 内容概要

1.2.1 本章中所涉及的基本概念

自动控制系统：为完成特定的控制任务，将被控对象和控制装置（控制器）按照一定的方式连接在一起，而形成的有机整体。

被控对象：系统中需要加以控制的目标装置或元件。

控制装置：控制系统中除去被控对象以外的其他装置或元件。

被控制量：描述被控对象工作状态的物理量，也即系统的输出量。

控制量：为了对被控对象实施控制而加给系统的量，也即系统给定量。

扰动量：妨碍系统被控制量按照预定规律进行变化的量。

反馈：将输出信号从系统的输出端取回送到输入端，与输入信号进行比较，而形成偏差信号的过程。

偏差信号：输入信号与反馈信号的代数差。

自动控制：在没有人直接参与的情况下，利用一定的控制装置，使被控制量按照预定的规律进行变化的控制过程。

1.2.2 负反馈控制原理

将系统的输出信号从输出端取回送到输入端，与给定信号进行比较，形成偏差信号而产生控制作用，作用的结果是使偏差信号逐渐减小或消除。即基于偏差控制的“测偏纠偏”过程。

反馈控制系统方框图如图 1-1 所示：

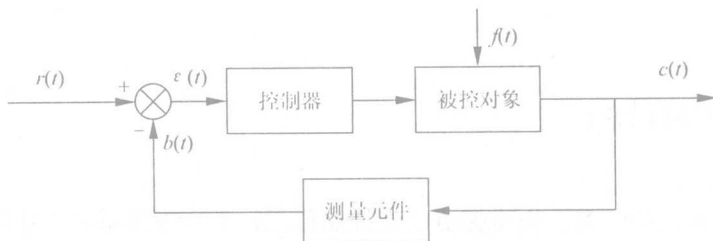


图 1-1

其中, $r(t)$ 表示输入信号; $\epsilon(t)$ 表示偏差信号; $c(t)$ 表示输出信号; $f(t)$ 表示干扰信号; $b(t)$ 表示反馈信号。

从偏差信号 $\epsilon(t)$ 到输出信号 $c(t)$ 的通道称为前向通道; 从输出信号 $c(t)$ 到反馈信号 $b(t)$ 的通道称为反馈通道。

1.2.3 反馈控制系统基本组成

除去被控对象以外, 反馈控制系统均可看成由一定的基本组成元件构成, 包括:

给定元件: 功能是提供系统控制量;

测量元件: 功能是将被控制量检测回来而转换成一定的电量输出;

比较元件: 比较系统的输入量和反馈量, 而得到偏差量;

放大元件: 放大信号, 从而提供系统足够大的功率或电压(电流)使用信号。

执行元件: 功能是接受控制指令而作用于被控对象。

校正元件: 为改善系统性能而加在系统中的元件。

1.2.4 控制系统分类

控制系统按照不同的方法可以分成不同的种类:

(1) 按系统的控制方式, 可以分为开环控制系统、闭环控制系统、复合控制系统;

- (2) 按组成系统的元件性质, 可以分为线性系统、非线性系统;
- (3) 按系统中元件参数的时变性, 可以分为定常系统、时变系统;
- (4) 按加给系统的输入信号的形式, 可以分为恒值调节系统、随动系统、程序控制系统;
- (5) 按输入信号对系统的作用时间, 可以分为连续控制系统、离散控制系统;
- (6) 按被控制量的性质, 可以分为温度控制系统、压力控制系统、转速控制系统等。

1.2.5 控制系统基本要求

通常对控制系统的性能评价从三个方面进行, 即三个基本要求: 稳定性、准确性、快速性。

稳定性(稳): 这是保证系统正常工作的先决条件。若系统产生的偏差是随时间的增长而减小或趋于零, 则系统是稳定的。

准确性(准): 系统控制精度的体现, 通常用稳态误差来评价。

快速性(快): 系统动态特性的描述, 通常用能表征系统过渡过程的性能指标量来评价。

1.3 主要概念复习

被控对象: 系统中需要加以控制的目标装置或元件。

被控制量: 描述被控对象工作状态的物理量, 也即系统的输出量。

控制量: 为了对被控对象实施控制而加给系统的量, 也即系统给定量。

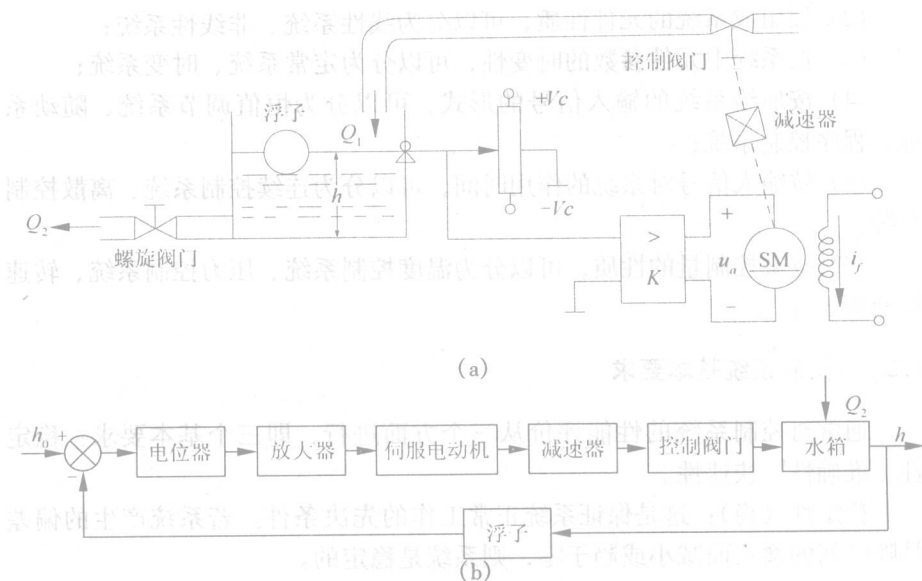
扰动量: 妨碍系统被控制量按照预定规律进行变化的量。

反馈: 将输出信号从系统的输出端取回送到输入端, 与输入信号进行比较, 而形成偏差信号的过程。

偏差信号: 输入信号与反馈信号的代数和。

1.4 疑难解析

例 1-1 如例图 1-1 (a) 所示为水位自动控制系统原理图。试说明其工作原理, 并画出系统原理方框图。



例图 1-1

解：首先分析系统组成，包括以下几个部分：

水箱、浮子、电位器、放大器、伺服电动机、减速器、控制阀门

被控对象：水箱

控制装置：电位器、放大器、伺服电动机、减速器和控制阀门

被控制量：实际水位 h

控制量：期望水位 h_0

干扰量：出水量 Q_2

测量元件：浮子

放大元件：放大器

执行元件：伺服电动机（执行机构：伺服电动机、减速器、控制阀门）

此水位系统中进水量 Q_1 的大小由控制阀门开度决定，出水量 Q_2 由用户决定。系统要完成的控制任务是当出水量 Q_2 发生变化时，保持水箱水位 h 在期望高度 h_0 不变。

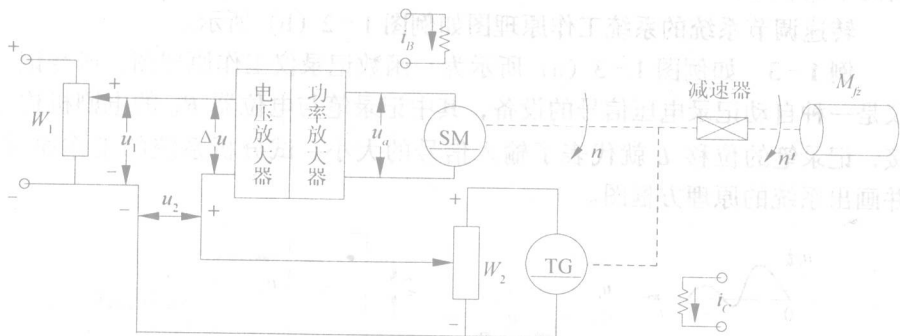
当水位处于期望水位时，浮子不动，电位器的输出电压为零，电动机不动，控制阀门保持一定的开度。

当出水量 Q_2 加大时（ $Q_2 > Q_1$ ），水位高度 h 下降（ $h < h_0$ ）。通过电位器产生一正电压输出，提供给电动机，使电动机正转。电动机带动减速器，使控制阀门的开度增大，从而使进水量 Q_1 增大，提高了水位 h 。当 $h = h_0$

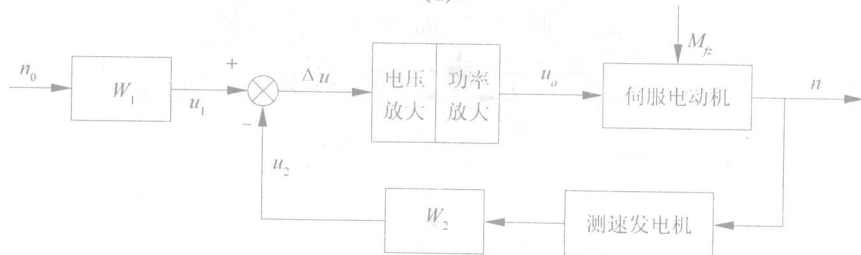
时调节过程结束,电动机不动,阀门保持一定开度,系统处于新平衡状态。

水位自动控制系统原理方框图如例图 1-1 (b) 所示。

例 1-2 某电动机转速自动控制系统如例图 1-2 (a) 所示,图中 W_1 为给定基准电压的电位器,SM 为伺服电动机, M_L 为负载转矩,TG 为测速发电机,实现将测量的转速值线性转换为电压值。试说明系统工作原理,并画出系统工作原理图。



(a)



(b)

例图 1-2

解: 此系统包含以下几个组成元件:伺服电动机、测速发电机、电压和功率放大器、减速器、电位器 1、电位器 2。

被控对象:电动机

控制装置:系统内除去被控对象(电动机)以外的其他元件

被控制量:电动机实际转速 n

控制量:给定的基准电压 u_1

测量元件:测速发电机

放大元件:电压和功率放大器

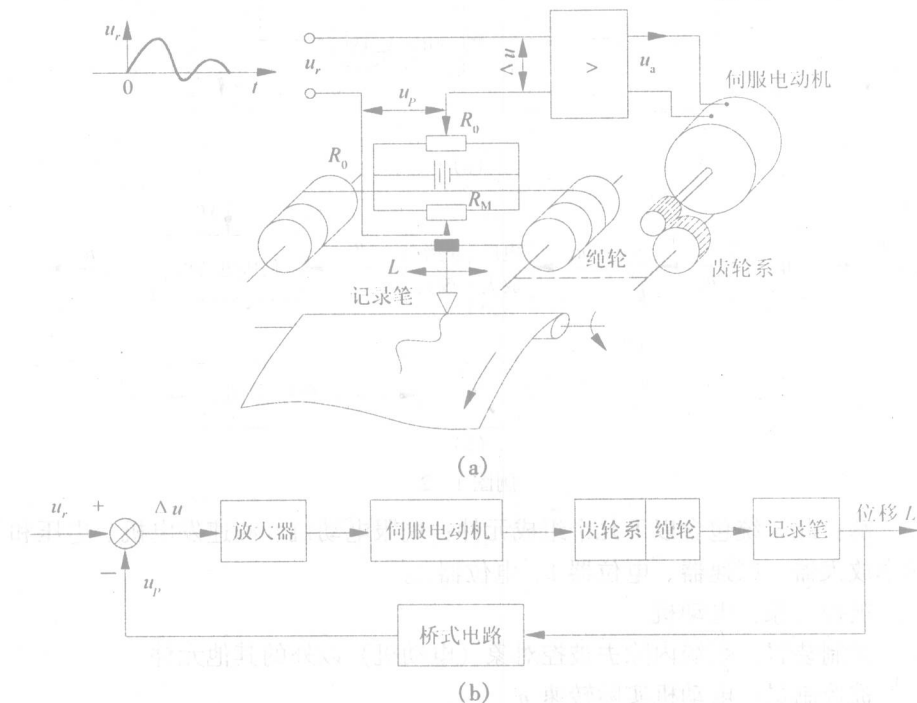
此系统的控制任务是保持电动机转速 n 为期望转速 n_0 。当 $u_1 = u_{20}$ 时,

即 $\Delta u = u_1 - u_{20} = \Delta u_0$ ，系统提供电动机一定值的电枢电压 u_{a0} ，使电动机保持期望转速。

若负载转矩 M_f 突然增大，会使电动机的转速 n 突然下降 ($n < n_0$)， $u_1 < u_2$ ， $\Delta u < \Delta u_0$ ，经过放大器进行电压和功率放大之后，提供给电动机一个更大的正向电压，使转速 n 上升。当 $n = n_0$ 时，调节过程结束，系统进入新的平衡状态。

转速调节系统的系统工作原理图如例图 1-2 (b) 所示。

例 1-3 如例图 1-3 (a) 所示为一函数记录仪工作原理图。函数记录仪是一种自动记录电压信号的的设备，其中记录笔与电位器 R_M 的电刷机构连接，记录笔的位移 L 就代表了输入信号的大小。试分析系统的工作原理，并画出系统的原理方框图。



例图 1-3

解：通过对原理图的分析，可以看到系统由以下元件构成：

记录笔、桥式电路、放大器、伺服电动机、齿轮系、绳轮

被控对象：记录笔

控制装置：系统中除去记录笔以外的其他元件

被控制量：记录笔的实际位移

控制量：给定电压

比较元件和测量元件：桥式电路

执行元件：伺服电动机

由电位器 R_0 和 R_M 组成桥式电路，其输出电压 u_p 与记录笔位移成正比。当记录笔的实际位移与期望值一致，即 $u_r = u_p$ 时， $\Delta u = 0$ ，电枢电压 $u_a = 0$ ，电动机不动，系统处于平衡状态。

当有输入信号 u_r 时，在放大器输入端得到偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p$ ，经放大后驱动伺服电动机，并通过齿轮系及绳轮带动记录笔移动，同时使偏差电压减小，直至 $u_r = u_p$ 时，电动机停止转动，系统进入新平衡状态。

若输入信号随时间连续变化，则记录笔便跟随并描绘出信号随时间变化的曲线。

系统原理方框图如例图 1-3 (b) 所示。

例 1-4 如例图 1-4 (a) 所示为工作台位置液压控制系统。由控制电位器和反馈电位器构成测角线路，实现将控制电位器滑臂转角 θ_1 和反馈电位器滑臂转角 θ_2 比较，得到角差 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ ，并转换为电压值 u 输出，该值与角度差成正比 (K 倍)。反馈电位器的转轴与工作台转轴相连。试分析系统的工作原理，并画出系统原理方框图。

解：该系统包括：工作台、测角线路、放大器、电液伺服阀、液压缸

被控对象：工作台

控制装置：测角线路、放大器、电液伺服阀和液压缸

被控制量：反馈电位器滑臂转角 θ_2

控制量：控制电位器滑臂转角 θ_1

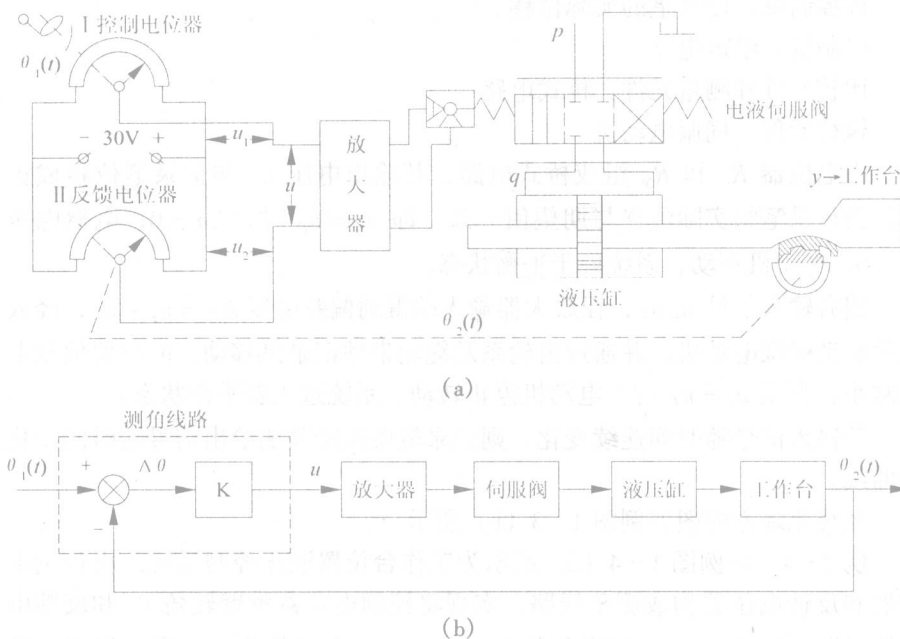
测量和比较元件：测角线路

当 $\theta_1 = \theta_2$ 时， $\Delta\theta = 0$ ，系统内没有相应电压值产生，伺服阀不动，工作台处于静止状态。

当控制量 (转角 θ_1) 输入时，系统会有相应的偏差信号 $\Delta\theta \neq 0$ ，即有电压值 $u \neq 0$ ，经放大器后控制电液伺服阀，使其输出压力液压油，改变液压缸内活塞的位置，从而带动工作台移动，减小偏差，直到 $\theta_1 = \theta_2$ 为止，调节过程结束，系统进入新的平衡状态。

若输入信号 θ_1 是随时间变化的函数，则实现了输出信号对输入信号的复现，即跟随。

该系统的原理方框图如例图 1-4 (b) 所示。



例图 1-4

例 1-5 如例图 1-5 (a) 所示为一谷物湿度控制系统。在谷物磨粉生产过程中, 有一个出粉率最高的湿度, 因而磨粉前需进行谷物加水操作, 以保证需要的湿度。谷物按一定的流量通过加水点, 加水量由调节器驱动的阀门控制。加水过程中, 谷物流量的变化和加水前谷物湿度都会影响谷物湿度的控制。试分析该系统的工作原理, 并画出系统原理方框图。

解: 谷物湿度控制系统包括: 谷物流、湿度测量器 1、湿度测量器 2、调节器、控制阀门。

被控对象: 谷物流

控制装置: 系统中除去谷物流以外的其他元件

被控制量: 谷物流湿度

控制量: 谷物期望湿度

干扰量: 谷物流量、输入谷物湿度

当谷物流湿度与期望湿度值相同时, 控制阀门保持一定开度, 即有一定量的水加入, 谷物正常传送, 控制系统处于平衡状态。

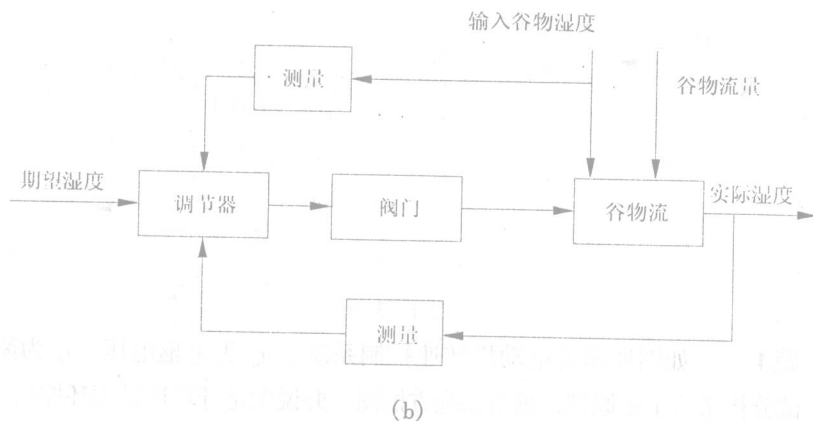
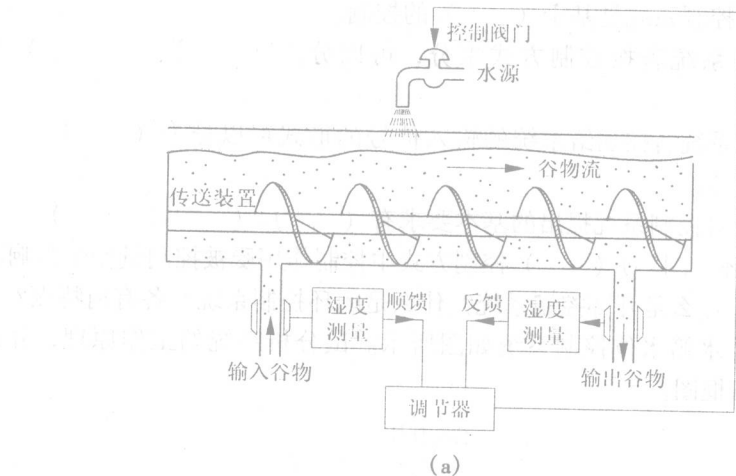
若通过测量装置检测到谷物流湿度与期望湿度不一致, 则会在系统内产生相应的偏差信号。调节器输出控制指令, 使阀门的开度增大或减小, 从而改变加水量的大小, 使谷物湿度向偏差减小的方向变化, 直至谷物湿度重新

达到期望值, 调节过程结束, 系统进入新平衡状态。

输入谷物的湿度也会影响系统的控制作用。该信号通过湿度测量器 1 检测回来, 送到系统的输入端, 实现顺馈控制, 即开环干扰补偿控制。

该系统是由负反馈控制和开环控制构成的复合控制系统。

系统原理方框图如例图 1-5 (b) 所示。



例图 1-5

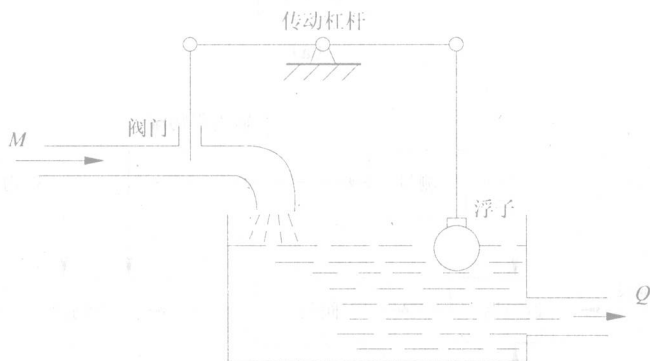
习 题

题 1-1 填空题:

- (1) 一般来说,自动控制系统是由()和()两大部分组成。
- (2) 反馈控制系统是基于()的控制。
- (3) 控制系统若按控制方式来分,可以分为()、()和()。
- (4) 控制系统若按加给系统的输入信号的形式可以分为()、()和()。
- (5) 通常对控制系统提出的基本要求有()、()、()。
- (6) (开环、闭环)()控制方式中控制作用受被控制量变化影响。

题 1-2 什么是开环控制系统?什么是闭环控制系统?各有何特点?

题 1-3 水箱水位控制系统如图所示。试分析系统的工作原理,并画出系统原理方框图。



题 1-3 图

题 1-4 如图所示为电动机转速控制系统, u_a 为电枢电压, i_f 为激磁电流。试分析系统工作原理,画出系统方框图,并说明是开环还是闭环控制。

题 1-5 某恒温箱温度自动控制系统原理图如图所示。试分析该系统的工作原理,画出系统原理方框图。

题 1-6 如图所示为自动调压系统。设空载时,图(a)和(b)发电机两端电压均为 110V。试分析若给系统带上负载后,两图所表示的系统哪个能保持 110V 电压不变?哪个会稍低于 110V?并说明原因。

题 1-7 晶体管稳压电源线路图如图所示,试分析稳压电源的工作原