



普通高等教育机械类“十二五”规划系列教材

机械工程控制基础学习指导与题解

JIXIE GONGCHENG KONGZHI JICHU XUEXI ZHIDAO YU TIJIE

曾孟雄 李 郁 赵千惠 编著



Mechanical
Engineering



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育机械类

机械工程控制基础

学习指导与题解

曾孟雄 李 郁 赵千惠 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是根据普通高等学校机械类机械工程控制基础课程教学大纲和课程要求而编写的, 针对经典控制理论内容进行归纳总结式学习辅导, 精选针对性强的例题给出详细解题步骤, 对全部习题予以解析。

本书为曾孟雄等编著的《机械工程控制基础》教材的配套教辅, 其体系、内容、章节与教材完全对应。每章均设有基本要求及重难点、本章学习指导、例题题解和习题解析 4 部分。

本书适用于高等工科院校机械类各专业, 可供大学本科生和报考普通硕士研究生与工程硕士等的读者学习、参考使用。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程控制基础学习指导与题解 / 曾孟雄, 李郁, 赵千惠编著. —北京: 电子工业出版社, 2012.4
普通高等教育机械类“十二五”规划系列教材

ISBN 978-7-121-16154-4

I. ①机… II. ①曾… ②李… ③赵… III. ①机械工程—控制系统—高等学校—教学参考资料 IV. ①TP273
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 037462 号

策划编辑: 李 洁

责任编辑: 刘 凡

印 刷: 涿州市京南印刷厂
装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 12.75 字数: 326.4 千字

印 次: 2012 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 27.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

本书是根据普通高等学校机械类机械工程控制基础课程教学大纲和课程要求而编写的。全书力求按认知规律围绕“快速性、稳定性、准确性”的工程设计基本要求和“系统”、“动态”两个观点针对经典控制理论内容进行归纳总结式学习辅导。每章均设有基本要求及重难点、本章学习指导、例题题解和习题解析 4 部分。学习指导部分尽量用图表归纳总结,突出学习目标,使读者清晰快捷地明确学习主线;例题题解部分精选针对性强的例题和部分研究生入学考试题并给出详细解题步骤,注重解题思路清晰,方法简便多样;习题解析部分对原教材中的每道习题都进行了详细剖析、诠释和解答。

本书为曾孟雄等编著的《机械工程控制基础》教材的配套教辅,其体系、内容、章节与教材完全一致。全书共 7 章。第 1 章为机械工程控制概述;第 2 章为控制系统的数学模型;第 3 章为控制系统的时域分析;第 4 章为控制系统的频域分析;第 5 章为控制系统校正;第 6 章为离散控制系统;第 7 章为控制系统的建模仿真。本书附录提供了 L 变换法与 Z 变换法,供读者参考。

本书由三峡大学曾孟雄、赵千惠和西北工业大学明德学院的李郁共同编著。各章重难点与学习要点和第 1~5 章例题题解由曾孟雄编写,第 6~7 章例题题解由李郁编写,各章习题解析由赵千惠和曾孟雄编写;欧阳文参与了本书部分文档的输入和整理工作,全书由曾孟雄整理定稿。本书由三峡大学机械设计制造及其自动化国家特色专业建设项目资助。在编写本书过程中,原教材编写与审稿人员张屹、刘春节和方子帆等对本书的编写给予了大力支持,在此深表谢意。

本书适用于高等工科院校机械类各专业,可供大学本科生和报考普通硕士研究生与工程硕士等的读者学习或复习参考使用。

本书中难免存在疏漏和不当之处,恳请读者不吝指正。

编 者

目 录

第1章 机械程控制概述	(1)
1.1 基本要求及重难点	(1)
1.2 本章学习指导	(1)
1.2.1 机械程控制概述	(1)
1.2.2 控制系统的分类	(3)
1.2.3 控制系统的组成和基本要求	(5)
1.2.4 课程性质与任务	(6)
1.3 例题题解	(7)
1.4 习题解析	(10)
第2章 控制系统的数学模型	(18)
2.1 基本要求及重难点	(18)
2.2 本章学习指导	(18)
2.2.1 系统的数学模型与微分方程	(18)
2.2.2 系统分析的基本数学工具——传递函数	(20)
2.3 例题题解	(26)
2.4 习题解析	(36)
第3章 控制系统的时域分析	(48)
3.1 基本要求及重难点	(48)
3.2 本章学习指导	(48)
3.2.1 系统响应构成与时域特征	(48)
3.2.2 系统时域动态性能分析	(50)
3.2.3 控制系统的稳定性	(56)
3.2.4 系统误差时域分析	(58)
3.3 例题题解	(61)
3.4 习题解析	(69)
第4章 控制系统的频域分析	(87)
4.1 基本要求及重难点	(87)
4.2 本章学习指导	(87)
4.2.1 频域特性的基本概念	(87)
4.2.2 典型环节和一般系统的频率特性	(89)
4.2.3 频率特性的性能指标	(94)
4.2.4 控制系统的频域稳定性	(95)
4.3 例题题解	(97)
4.4 习题解析	(104)



第 5 章 控制系统校正	(113)
5.1 基本要求及重难点	(113)
5.2 本章学习指导	(113)
5.2.1 系统校正概述	(113)
5.2.2 控制系统时频性能指标及转换关系	(115)
5.2.3 系统的无源校正	(116)
5.2.4 PID 校正与典型设计	(120)
5.3 例题题解	(124)
5.4 习题解析	(134)
第 6 章 离散控制系统	(148)
6.1 基本要求及重难点	(148)
6.2 本章学习指导	(148)
6.2.1 离散控制系统概述	(148)
6.2.2 离散控制系统的数学模型	(149)
6.2.3 离散控制系统分析	(151)
6.3 例题题解	(154)
6.4 习题解析	(163)
第 7 章 控制系统的建模仿真	(169)
7.1 基本要求及重难点	(169)
7.2 本章学习指导	(169)
7.3 例题题解	(170)
7.4 习题题解	(178)
附录 A L 变换与 L 逆变换	(187)
A.1 拉普拉斯变换的定义	(187)
A.2 典型函数的拉普拉斯变换	(187)
A.3 拉普拉斯变换的主要定理	(190)
A.4 拉普拉斯逆变换	(191)
附录 B Z 变换与 Z 逆变换	(193)
B.1 Z 变换的定义	(193)
B.2 Z 变换求法	(194)
B.3 Z 变换的基本定理	(195)
B.4 Z 逆变换	(196)
参考文献	(198)

第1章 机械工程控制概述

1.1 基本要求及重难点

基本要求

- 了解控制理论的发展概况;
- 熟悉机械工程控制的研究对象与任务;
- 掌握反馈和反馈控制的基本原理以及在控制系统中的应用;
- 熟悉控制系统的基本组成及各部分的作用;
- 掌握控制系统的基本分类以及对控制系统的基本要求;
- 了解本教材的体系结构和学习方法。

教学重点

- 机械工程控制的研究对象与任务;
- 反馈控制的基本原理;
- 控制系统的基本分类和基本要求。

教学难点

- 控制系统原理示意图到系统框图的转化。

1.2 本章学习指导

1.2.1 机械工程控制概述

1. 控制理论与机械工程控制

控制理论是自动控制、电子技术、计算机科学等多种学科相互渗透的产物,是关于控制系统建模、分析和综合的一般理论。其任务是分析控制系统中变量的运动规律和如何改变这种运动规律以满足控制需求,为设计高性能的控制系统提供必要的理论手段。

控制理论主要研究两方面问题:一是在系统的结构和参数已经确定的情况下,对系统的性能进行分析,并提出改善性能的途径;二是根据系统要实现的任务,给出稳态和动态性能指标,要求组成一个系统,并确定适当的参数,使系统满足给定的性能指标。

控制理论在日渐成熟的发展过程中推广到了工程技术领域,体现为工程控制论,在同机械工业相对应的机械工程领域中体现为机械程控制论。机械制造技术发展的一个重要方向是紧密地同信息科学交融和深刻地引入控制理论,形成机械程控制的学科分支。

控制理论分为经典控制理论和现代控制理论两部分。经典控制理论的研究对象是单输入、单输出的自动控制系统,特别是线性定常系统。它主要研究系统运动的稳定性,时间域和频率域中系统的运动特性,控制系统的设计原理和校正方法。现代控制理论是建立在状态空间基础之上的,研究对象包括单变量系统和多变量系统,定常系统和时变系统。其基本分析和综合方法是时间域方法,包括各类系统数学模型的建立及其理论分析。

控制理论的发展历史可分为四个阶段:经典控制理论阶段、现代控制理论阶段、大系统控制理论阶段和智能控制阶段。

本书主要介绍经典控制理论。

2. 机械程控制论的研究对象

机械程控制论主要研究机械工程技术中广义系统的动力学问题。它研究机械程广义系统在一定外界条件下,从系统初始条件出发的整个动态历程,以及在这个历程中和历程结束后所表现出来的动态特性和静态特性,研究系统及其输入、输出三者之间的动态关系。

(1) 系统。系统是由相互联系、相互作用的若干部分构成,而且有一定目的或一定运动规律的一个有机整体。通常研究机械程中的实际问题时就可以把研究对象看做一个系统。

工程控制论研究的系统是广义系统,系统可大可小,可繁可简,可虚可实,完全由研究需要而定。系统一般具有固有特性,由其结构和参数决定。

(2) 系统的研究类型。系统由于其内部机制和与外界的相互作用,都会有相应的行为表现。研究系统就是研究系统和输入、输出三者之间的相互关系。工程控制论对系统及其输入、输出三者之间动态关系的研究内容大致包括以下五种研究类型:

① 当系统已定、输入(或激励)已知时,求出系统的输出(或响应),并通过输出来分析研究系统本身的问题,这类研究称为系统分析。

② 当系统已定时,确定输入,且所确定的输入应使得输出尽可能符合给定的最佳要求,这就是最优控制问题。

③ 当输入已知时,确定系统,且所确定的系统应使得输出尽可能符合给定的最佳要求,这就是最优设计问题。

④ 当输出已知时,确定系统,以识别输入或输入中的有关信息,这就是预测或滤波问题。

⑤ 当输入、输出均已知时,求出系统的结构与参数,即建立系统的数学模型,这就是系统识别或系统辨识问题。

机械程控制以经典控制理论为核心,主要研究线性控制系统的分析问题。

(3) 外界条件。系统自身无法体现自身性能,需要给系统一定的外界条件施加影响,以此产生系统的输出(或响应),通过系统输出的表现来反映和分析研究系统本身的性能。

系统的外界条件是指对系统的输入(激励),包括人为激励、控制输入、干扰输入等。

系统的输入又称为“激励”。激励本质上是主体与客体的交互过程,在一定时空环境下,激励主体采用一定手段激发激励客体,使激励客体朝着目标前进。人为有意识地加到系统中的激励称为“控制”,偶然因素产生而无法完全人为控制的输入称为“扰动”。在实际的控制系统

中,给定输入和扰动往往是同时存在的。另外,系统在时间为0时的初始状态也视为一种特殊的输入。

通常,把能直接观察到的响应称为输出。在经典控制理论中,响应即输出,一般都能测量观察到;而在现代控制理论中,状态变量不一定都能观察到。系统的输出是分析系统性能的主要依据。

(4) 动态过程与特性。从时间历程角度看,在输入作用下,系统输出从初始状态到达新的状态,或系统从一种稳态到另一种稳态之间都会出现一个过渡过程,也称为动态过程或动态历程。实际系统在输入信号的作用下,其输出过程包含瞬态过程和稳态过程两部分。

实际系统发生状态变化时总存在一个动态过程,其原因是系统中总有一些储能元件(如机械系统中的阻尼器、弹簧),使输出不能立即跟随其输入的变化。在动态过程中,系统的动态性能得到充分体现,如输出响应是否迅速(快速性)、动态过程是否有振荡或振荡程度是否剧烈(平稳性)、系统最后是否收敛稳定下来(稳定性)等。动态过程结束后,系统进入稳态过程,也称为静态过程。系统的稳态过程主要反映系统工作的稳态误差(准确性)。快速性、稳定性、准确性是系统设计的三大指标要求。

1.2.2 控制系统的分类

1. 按输入量的变化规律分类

按输入量变化规律分,控制系统可分为恒值控制系统、程序控制系统和随动系统。

恒值控制系统的输入量在系统运行过程中始终保持恒定。其任务是保证在任何干扰作用下维持系统输出量为恒定值。恒值控制系统分析的重点是克服扰动对被控量的影响。

程序控制系统的输入量是事先设定好的不为常数的给定函数,变化规律预先可知,其任务是保证在不同运行状态下被控量按照预定的规律变化。

随动控制系统的输入量不恒定、不按已知规律变化,而是按事先不能确定的一些随机因素而改变,所以被控量也是跟随这个预先不能确定的输入量而随时变化。其任务是当输入量发生变化时,要求输出量迅速而平稳地跟随着变化,且能排除各种干扰因素的影响,准确地复现控制信号的变化规律。

2. 按反馈分类

按控制系统的结构中有无反馈控制作用分,控制系统可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

开环控制系统是指系统的输出量对控制作用没有影响的系统。开环控制系统用一定的输入量产生一定的输出量,既不需要对输出量进行测量,也不需要将输出量反馈到输入端进行比较,对于每一个参考输入量有一个固定的工作状态与之对应。如果由于某种扰动作用使系统的输出量偏离原始值,开环系统没有纠偏的能力。若要进行补偿,只能再借助人工改变输入量,所以开环系统的控制精度较低。

凡是系统输出量与输入端之间存在反馈回路的系统就称为闭环控制系统。若反馈信号是与输入信号相减而使偏差值越来越小,称为负反馈;反之,则称为正反馈。负反馈控制是一个利用偏差进行控制并最后消除偏差的过程。闭环控制系统具有自动修正被控制量出现偏差的能

力,可以修正元件参数变化及外界扰动引起的误差,所以其控制效果好、精度高。

将开环控制和闭环控制配合使用,可组成复合控制系统。例如前馈-反馈控制系统,当发生扰动但被控量还没反应时,前馈控制器先按扰动量的大小和方向进行“粗略”调整,尽可能使控制作用在一开始就基本抵消扰动对被控量的影响,使被控量不致发生大的变化。被控量出现的“剩余”偏差则通过闭环回路的校正作用来进行微调。

3. 按传递信号的性质分类

按系统中传递信号的性质分,控制系统可分为连续控制系统和离散控制系统。

系统中各部分传递的信号都是连续时间变量的系统称为连续控制系统,其控制规律多采用硬件组成的控制器实现,描述连续控制系统的数学工具是微分方程和拉普拉斯变换,连续控制系统的特点是系统中所有环节之间的信号传递是不间断的,而且各个环节的输入量与输出量之间存在的都是连续的函数关系,所以控制作用也是连续的。

在某一处或数处的信号是脉冲序列或数字量传递的系统称为离散控制系统,其控制规律一般是用软件实现的,描述此种系统的数学工具是差分方程和 Z 变换。在离散控制系统中,数字测量、放大比较、给定等部件一般由微处理器实现。

4. 按系统的数学描述分类

按系统的数学描述分,控制系统可分为线性控制系统和非线性控制系统。

系统中所有的元件、部件都是线性的,输入与输出之间可以用线性微分方程来描述的控制系统称为线性控制系统。线性系统的重要特点是满足叠加原理,这对于分析多输入、多输出的线性系统具有重要意义。

当控制系统中存在非线性元件、部件时,该系统称为非线性系统,其输入/输出关系需要用非线性微分方程来描述。

5. 按系统输入/输出信号数量分类

按系统输入/输出信号的数量分,控制系统可分为单变量系统和多变量系统。

单变量是从系统外部变量的描述来分类的,不考虑系统内部的通路与结构。单变量系统只有一个输入量和一个输出量,但系统内部的结构回路可以是多回路的,内部变量也可以是多种形式的。单变量系统是经典控制理论的主要研究对象。

多变量系统有多个输入量和多个输出量,当系统输入与输出信号多于一个时就称为多变量系统。多变量系统的特点是变量多,回路也多,而且相互之间呈现多路耦合,研究起来比较复杂。多变量系统是现代控制理论研究的主要对象。

6. 按闭环回路的数目分类

按系统闭环回路的数目,控制系统可分为单回路控制系统和多回路控制系统。

单回路控制系统只有被控量的一个量反馈到控制器的输入端,形成一个闭合回路。如果除被控量反馈到控制器输入端之外,还有另外的辅助信号也作为反馈信号送到控制系统的某一个入口,形成一个以上的闭合回路,即形成多回路控制系统。

1.2.3 控制系统的组成和基本要求

1. 系统组成和基本环节（元件、装置）

典型反馈控制系统结构如图 1-1 所示，它表示了控制系统各元件在系统中的位置和相互之间的关系。

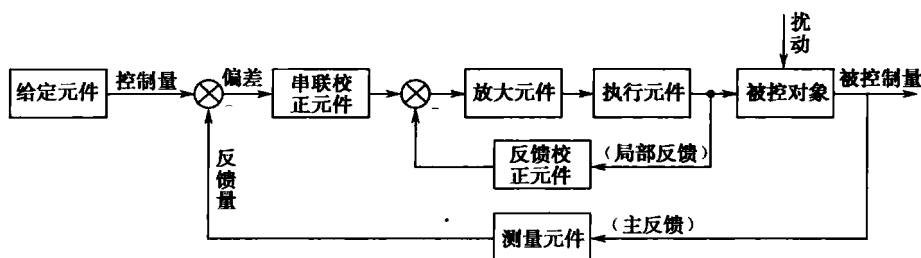


图 1-1 典型反馈控制系统结构

(1) 给定环节：产生控制系统的输入量（给定信号），一般与期望的输出相对应。输入信号的量纲与主反馈信号的量纲相同。给定元件通常不在闭环回路中，可以有各种形式，以电类元件居多。

(2) 测量环节：测量被控制量，产生与被控制量有一定函数关系的信号，起反馈作用，一般为非电量电测。测量元件的精度直接影响控制系统的精度。

(3) 比较环节：比较控制量和反馈量并产生偏差信号。

(4) 放大环节：对偏差信号进行幅值或功率的放大以足够的功率来推动执行机构或被控对象，以及对信号形式进行变换。

(5) 执行环节：直接推动被控对象，使其被控量发生变化。执行元件应具有足够大的功率和足够宽的工作频带。

(6) 校正环节：为改善或提高系统的动态和稳态性能而在系统基本结构基础上增加的校正元件。校正元件是根据被控对象特点和性能指标的要求而设计的。校正元件串联在由偏差信号到被控制信号间的前向通道中的称为串联校正；校正元件在反馈回路中的称为反馈校正。

(7) 被控对象：控制系统所要控制的对象，系统输出量即为被控量。设计控制系统时，认为被控对象是不可改变的。

系统的环节（元件、装置）在具体实现时不一定是各自独立的，可能是一个实际元件同时担负几个元件的作用，也可能是几个实际元件共同担负一个元件的作用。

2. 控制系统中的量

(1) 被控量：也称为输出量或被控参量，是系统中按规定任务需要加以控制的物理量。

(2) 控制量：也称为给定量或控制输入，是根据要求与输出量相适应的预先给定信号。

(3) 干扰量：也称为扰动量，干扰或破坏系统按预定规律运行的各种外部和内部条件。

(4) 输入量：是控制量与干扰量的总称，一般多指控制量。

(5) 反馈量：由输出端引回到输入端的量。

- (6) 偏差量: 控制量与反馈量之差。
- (7) 误差量: 实际输出量与希望输出量之差值。

3. 控制系统的基本要求

评价控制系统好坏的指标是多种多样的, 但对控制系统的基本要求一般可归纳为稳定性、快速性、准确性。

(1) 稳定性。控制系统能起控制作用, 首先必须稳定, 且必须满足一定的稳定裕量。即使受到外界短暂干扰或系统参数发生某些变化时, 也能够使系统保持稳定的工作状态。稳定性是系统动态过程的振荡倾向和系统能否恢复平衡状态的性能。

(2) 快速性。快速性是在系统稳定性的前提下提出的, 反映对控制系统动态过程持续时间的要求。系统从一种平衡状态到另一种平衡状态都存在一个过渡过程。快速性是指当系统输出量与给定输入量之间产生偏差时, 消除这种偏差的快速程度。一般希望系统从扰动开始到系统达到新的平衡状态的过渡过程时间尽可能短。

(3) 准确性。准确性反映系统的控制精度, 一般用系统的稳态误差来衡量。稳态误差是指系统稳定后的实际输出与期望输出之间的差值。稳态误差反映了动态过程后期的性能, 是衡量系统品质的一个重要指标。

对一个控制系统要求稳定性、快速性、准确性三方面都达到很高的质量往往是不可能的, 因为三者之间往往是相互制约的。在设计与调试过程中, 若过分强调系统的稳定性, 可能会导致系统响应迟缓和精度较低; 若过分强调系统响应的快速性, 又会使系统的振荡加剧, 甚至引起不稳定。不同的生产过程对稳定性、快速性和准确性的具体要求和主次地位是不同的, 设计时, 一般总是在满足稳定性要求后, 对准确性和快速性进行综合考虑。

1.2.4 课程性质与任务

本课程是一门技术基础课。课程以数学、物理及有关科学为理论基础, 以机械工程中系统动力学为抽象、概括与研究的对象, 运用信息的传播、处理与反馈进行控制的思维方法与观点, 作为桥梁作用将数理基础课程与专业课程紧密结合起来。

本课程的任务是使学生通过课程学习, 掌握控制理论的基本原理, 学会以动力学的基本观点对待机械工程系统, 能够从整体系统的角度研究系统中信息传递及反馈控制的动态行为, 结合生产实际来考察、分析和解决机械工程中的实际问题。

学习本课程应力求掌握如下特点:

- (1) 围绕工程设计基本要求“稳定性、快速性、准确性”对系统进行分析与校正。
- (2) 坚持“系统”和“动态”两个观点, 将研究对象抽象为系统, 运用控制理论的方法解决机械工程中的实际问题。
- (3) 贯彻“时域”和“频域”两条分析主线对系统性能进行分析或设计。

学习本课程时, 既要十分重视抽象思维了解一般规律, 又要充分注意结合实际, 联系专业努力实践; 既要善于从个性中概括出共性, 又要善于从共性出发深刻了解个性; 学习运用广义系统动力学的方法去抽象与解决实际问题。

1.3 例题题解

例 1.1 已知某电动机转速控制系统原理图如图 1-2 所示。试画出系统的原理框图；分析系统的工作原理。

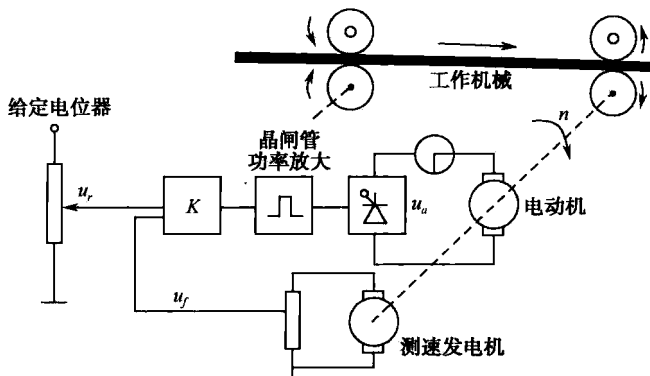


图 1-2 电动机转速控制系统原理图

解 通过画直流转速控制系统的原理框图，加深对控制系统基本概念和工作原理的理解。在此基础上，总结出反馈控制规律。

1) 系统原理框图

本系统的控制任务是控制工作机械的转速保持恒定值。系统的输入量是给定电压 u_r ，对应于希望转速 n_r ，输出量（被控量）是工作机械的转速 n ，工作机械是被控对象，负载的变化是系统的扰动输入。测速发电机是测量元件，它将电动机的转速转换成电压信号 u_f 并反馈到输入端。放大器是比较放大元件，可控整流装置和电动机是执行机构。按照信号传递的顺序和方向，由输入量开始，将各部分连接起来，画出的系统原理框图如图 1-3 所示。

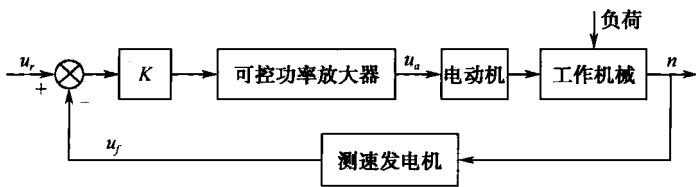


图 1-3 转速控制系统原理框图

2) 系统的工作原理

当系统由于负荷的变化使工作机械的转速 n 下降时， u_f 随之下降， $u_r - u_f$ 上升，该误差信号经过放大及可控整流，使电枢电压 u_a 增大，从而使电动机带动工作机械的转速上升，进而促使 $u_r - u_f$ 减小，完成控制作用，补偿了扰动对被控量 n 的影响。

通过本题可知，反馈控制系统能够使被控量克服各种扰动的影响而按给定值的要求变化。当被控量偏离给定值时，测量元件就测得被控量的值，经物理量变换后，由比较元件将其与给

定值相比较而得到偏差值；根据偏差大小，经放大器、调节装置及执行机构等产生控制作用，使被控量恢复或趋近于要求值，从而使偏差消除或减小。

例 1.2 电冰箱制冷系统原理图如图 1-4 所示。试简述系统的工作原理，指出被控对象、被控量和给定量，并画出制冷系统的框图。

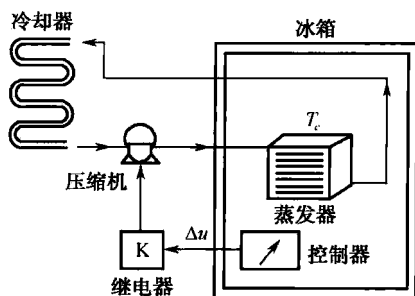


图 1-4 电冰箱制冷系统原理图

解 控制系统的被控对象是看得见的实体，不能与物理量相混淆。被控制量则是被控对象中表征被控对象工作状态的物理量。确定控制对象要根据控制的目标与任务而定。

本题系统的控制任务是保持电冰箱内的温度 T_c 等于设定的希望温度 T_r 。电冰箱的箱体是被控对象，箱内温度是被控量。由控制器旋钮设定出与希望温度 T_r 值相对应的电位器输出电压是给定量。

系统工作原理：温度控制器中的双金属温度传感器（测量元件）感受电冰箱内的温度，并把它转换为电压信号，与控制器旋钮设定出的电位器（给定元件）输出电压（对应于与希望温度 T_r ）相比较，利用偏差电压 Δu （表征实际温度和希望温度的偏差）控制继电器。当 Δu 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气态制冷液送到冷却器中散热。降温后流出的低温低压冷却液被压缩成低温高压液态进入蒸发器急速降压扩散成气体，吸收箱体内部的热量，使箱体内温度降低，而高温低压制冷剂又被吸入冷却器。如此循环，使电冰箱达到制冷效果。

电冰箱制冷系统框图如图 1-5 所示。

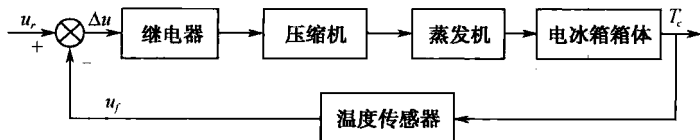


图 1-5 电冰箱制冷系统框图

例 1.3 卷绕加工系统原理图如图 1-6 所示，为了避免发生像进裂、拉伸变形或褶皱等不良现象，通常使被卷物的张力保持在某个规定的数值上，这就是典型的恒张力控制系统。试简述其工作原理，并绘制控制系统的结构框图。

解 卷绕加工系统为一恒张力控制系统，其控制任务是使被卷物上保持恒定的张力。被控对象为开卷筒，被控量为被卷物（如纸张、布匹等）上的张力，给定输入量是电位器的给定输入电压，浮动滚筒和偏角检测器共同构成检测装置，将张力变化转化为相应的电压值，外部扰动、被卷料的不均匀或开卷有效直径减小等原因均会对系统的输出产生干扰。

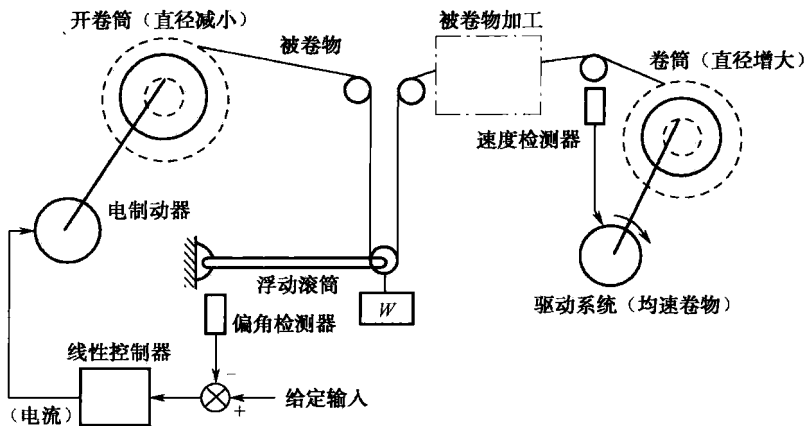


图 1-6 卷绕加工系统原理图

原理图的右边是卷绕驱动系统，由驱动系统以恒定的线速度卷绕被卷物。速度检测器提供反馈信号以使驱动系统保持恒定的线速度；开卷筒与电制动器相连接，以保持一定的张力。为保持恒定的张力，被卷物将绕过一个浮动的滚筒，滚筒具有一定的重量，滚筒摇臂的正常位置是水平位置，这时被卷物的张力等于浮筒总重量的一半。

在实际运行中，因为外部扰动，被卷物的不均匀或开卷筒有效直径的减小而使张力发生变化时，滚筒摇臂便保持不了水平位置，这时通过偏角检测器测出偏角位移量，并将其转化为电压信号，与给定输入量相比较，两者的偏差电压经放大后控制电制动器。若张力过大，则使电制动器的力矩降低，以减少张力；反之，若张力过小，则制动力矩增大以增大张力，从而保持恒定的张力。

系统的结构框图如图 1-7 所示。

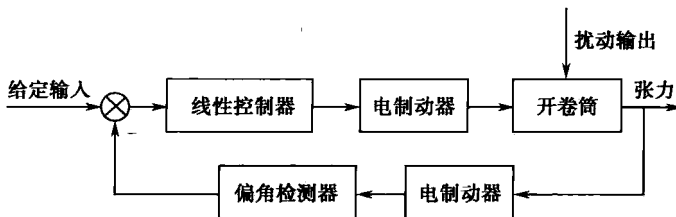


图 1-7 卷绕加工系统框图

例 1.4 某龙门刨床速度控制系统原理如图 1-8 所示。其中，SM 为电枢控制的直流电动机，TG 为测速发电机，FD 为放大器，CF 为触发器，KZ 为晶闸管整流装置。试分析系统的工作原理，并画出系统的原理框图。

解 该控制系统的任务是控制龙门刨床中电动机的转速为恒定值，系统以测速发电机作为测量元件构成反馈回路，形成闭环控制系统。

工作原理：当龙门刨床工作时，给定电压 u_i 与测速发电机的反馈电压 u_f 比较后得到偏差电压信号 Δu ，经过放大环节 FD，再经过触发电路 CF，作为控制晶闸管的触发电压整流输出电压 u_d 供直流电动机工作。此时电动机输出转速 n ，同时，经过测速发电机测速，形成反馈

电压 u_f ，在放大器输入端经比较形成 $\Delta u = u_i - u_f$ 。当实际转速与给定转速不同时， Δu 值为正或者为负，放大器的输出 u_k 发生变化，经过触发电路 CF、晶闸管整流装置 KZ，控制 u_d 输出，从而改变电动机的转速，当 $\Delta u = 0$ 时，实际转速与给定转速相等，达到控制转速为恒值的目的。

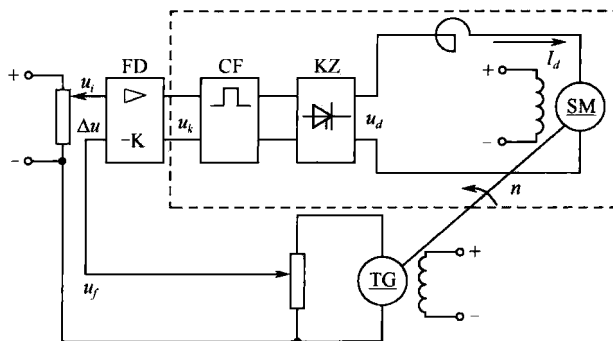


图 1-8 龙门刨床速度控制系统原理图

根据系统的结构，画出原理框图如图 1-9 所示。

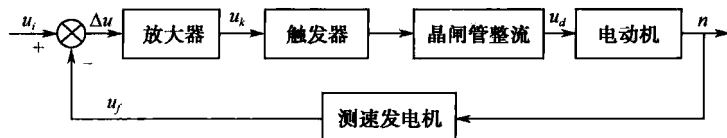


图 1-9 龙门刨床速度控制系统框图

1.4 习题解析

题 1.1 机械工程控制论的研究对象和任务是什么？闭环控制系统的工作原理是什么？

【解析】 本题要求加深对机械工程控制基本概念的理解，从研究对象的控制引出广义系统、输入/输出/系统、瞬态过程/稳态过程等相关概念。

解 机械工程控制是研究机械工程中广义的动力学问题。研究机械工程中的广义系统在一定外界条件（输入或激励，包括外加控制与外加干扰）作用下，从系统的初始状态出发，所经历的由其内部固有特性（即由系统的结构与参数所决定的特性）所决定的整个动态过程；研究这一系统及其输入、输出三者之间的动态关系。

从系统、输入、输出三者之间的关系出发，根据已知条件与求解问题的不同，机械工程控制论的任务可体现为五方面：

- (1) 已知系统、输入，求系统的输出，即系统分析问题；
- (2) 已知系统和系统的理想输出，设计输入，即最优控制问题；
- (3) 已知输入和理想输出，设计系统，即最优设计问题；
- (4) 已知输出，确定系统，以识别输入或输入中的有关信息，此即滤波与预测问题；
- (5) 已知系统的输入和输出，求系统的结构与参数，即系统辨识问题。

基于反馈原理，通过检测偏差再纠正偏差的系统称为闭环控制系统。通常闭环控制系统至少具有测量、比较和执行三个基本功能。检测控制量或输出量的实际值，实际值与给定值进行

比较后得出偏差值；用偏差值产生控制调节作用来消除偏差。

题 1.2 试举出 2 个日常生活中控制系统的例子，用框图说明其工作原理，并指出是开环控制系统或是闭环控制系统。

【解析】要求理解机械工程控制的基本原理，理解开环控制系统和闭环控制系统的基本定义及在实际生活中的应用。

解 (1) 在日常生活中有许多闭环系统，如电冰箱、电热水器等。其中在电热水器系统中，水箱的水温需要控制，即水箱为被控制量，或称为输出量，设为 $T_o(^{\circ}\text{C})$ ；输入量为用户希望的温度（给定值），设为 $T_i(^{\circ}\text{C})$ ；由于放出热水并注入冷水或水箱温度散热等原因而使水箱内水温下降为该系统的主要干扰。

当 $T_o(^{\circ}\text{C})=T_i(^{\circ}\text{C})$ 时，水箱的实际水温经测温元件检测，并将实际水温转化成相应的电信号，与温控开关预先设定的信号进行比较而得到的偏差为零，此时电加热器不工作，水箱中的水温保持在希望的温度上。当使用热水并注入冷水时，水温下降，此时 $T_o(^{\circ}\text{C})<T_i(^{\circ}\text{C})$ ，则偏差不为零，使温控开关工作。于是电源接通，电加热器开始对水箱内的水进行加热，使水温上升，直到 $T_o(^{\circ}\text{C})=T_i(^{\circ}\text{C})$ 时为止。系统控制框图如图 1-10 所示。

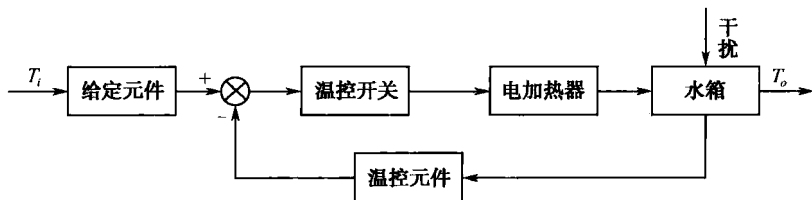


图 1-10 电热水器框图

(2) 在日常生活中，有许多开环控制系统，如全自动洗衣机等。对于全自动洗衣机，用户输入指令，机器按照用户选择的洗衣程序洗涤衣物。程序完成后，无论衣物是否干净，机器均停止。其框图如图 1-11 所示。

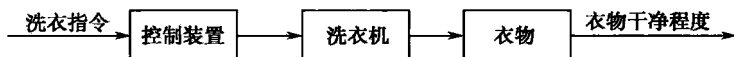


图 1-11 全自动洗衣机框图

题 1.3 对控制系统的基本性能要求有哪些，并说明为什么？

【解析】掌握控制系统的基本性能要求，了解控制系统设计都是围绕基本性能要求而展开的。

解 对控制系统的基本要求是稳定性、准确性和快速系统性。

稳定性是保证系统正常工作的首要条件，是指系统动态过程的振荡倾向及其恢复平衡状态的能力。

准确性是衡量控制系统的性能重要指标，是指控制系统的控制精度，一般用稳态性能来衡量。

快速性是指当输出量与输入量之间产生偏差时，系统消除这种偏差的快慢程度。

题 1.4 如图 1-12 所示是仓库大门自动控制系统原理示意图。试说明系统自动控制大门开、闭的工作原理，并画出系统框图。

【解析】学会分析仓库大门控制系统的工作原理和系统框图的画法。加深对闭环反馈控制思想的理解。