

工程控制理论

胡国清 刘文艳 编著

工程控制理论

Engineering Control Theory

胡国清 编著
刘文艳
史维祥 主审



机械工业出版社

本书主要介绍自动控制系统基本理论及其工程分析和设计方法,并将 MATLAB 语言引入控制理论,使控制理论中的计算机仿真极为简化。一般的仿真语言如:FORTRAN, C, PASCAL, BASIC 等语言需要上千条语句才能完成的功能,使用 MATLAB 语言只需要几句或十几句语句就可以完成,从而大大地减轻了科技工作者编程的工作量,可以从繁重的计算机编程中解放出来,提高工程设计及科研工作的效率。

全书共 10 章。第 1 章主要介绍控制系统的发展史、分类及发展概况;第 2 章主要介绍自动控制系统基本工作原理、分类及物理系统建模。第 3~7 章分别介绍三种控制系统分析方法,即时域分析法、频率分析法、根轨迹法。主要分析系统的稳定性、快速性和准确性。第 8 章介绍控制系统校正。第 9、10 两章分别为非线性系统理论和离散控制系统。书中各章均有大量例题和习题。

本书可作为机械、机电一体化、液压及其他非自控专业本科生、各类大专生的教材,也可作为广大科技工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程控制理论 / 胡国清, 刘文艳编著. —北京: 机械工业出版社, 2004.1
ISBN 7-111-13807-4

I. 工… II. ①胡… ②刘… III. 工程控制论
IV. TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 127235 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 张秀恩

封面设计: 陈 沛 责任印制: 闫 焱

中国农业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·25 印张·637 千字

0001—6000 册

定价: 43.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

[Http://www.machineinfo.gov.cn/book/](http://www.machineinfo.gov.cn/book/)

封面无防伪标均为盗版

序

控制理论是人类社会在生产及科学研究实践中总结出来的一种重要自然规律，其重要性不仅表现在科学技术上，而且它还是一种科学方法论。控制理论创始人维纳（N.Wiener）指出：机器系统、生命系统甚至社会和经济都有一个共同的特点，即通过信息的传递、加工处理和反馈来进行控制，亦即控制论所具有的信息、反馈与控制三个要素。以上三个要素及它们之间的相互作用实际上是人类社会及自然界普遍存在的规律，亦是认识客观世界的一种重要思想与方法。第二次世界大战后，随着这种理论的发展与不断完善，控制论作为一种重要技术或思想方法，已广泛地渗透到人类社会实践的各个领域，并得到了广泛的应用。

控制论在机械工程等领域中的应用约开始于 20 世纪中叶，它与信息科学、电子技术及计算机等进入机械工程就形成了机电一体化或称机械电子工程这一新兴学科，这个学科的形成与发展正体现了当今科学技术向综合交叉发展的方向，中国科学院院长路甬祥院士指出：机械电子技术的发展趋势可用五化一新来概括，即集成化、智能化、网络化、绿色化、多样化以及持续创新。可以说以上五化大都与控制技术密切相关。当然控制技术在工程中的应用远不只是机械工程，其他如航天航空、仪器仪表、冶金、化工、轻工以及生物工程等都得到重要的应用。

为适应这些发展与实际需要，20 世纪 80 年代以来，在高等学校一些非控制类专业学科都相继开设了有关控制工程的课程。

厦门大学胡国清老师多年从事这类课程的教学，有着深厚的控制理论基础及丰富的教学经验。在长期教学实践的基础上，胡国清老师博采众长，写成了这本教材。虽然当前有关这方面的教材已有多本，但本教材有着自己的特色，如在控制理论方面讲得较全面，覆盖到经典控制理论各个方面，这样就便于各种专业根据实情在较大范围内选择；在各章中都介绍了 MATLAB 这个实践控制技术的重要工具，并使学生反复练习，务使牢固掌握；此外附的例题与习题也很丰富。相信本书的出版会受到相关教师及学生的欢迎，在控制课程的教学工作中发挥积极的作用。

西安交通大学 史维祥

前 言

本书是根据机电一体化、机械设计制造及自动化、机械电子、测试计量技术及仪器、精密机械等专业大学本科生的教学大纲编写的。系统地介绍了经典控制理论的主要内容,着重阐述控制系统的工作原理,物理系统建模,系统分析和设计及 MATLAB 语言在控制系统中的应用,同时介绍了非线性控制理论、离散控制系统。为便于学生加深对概念的理解和在实践中具体应用,每章都列举了大量例题和习题。

本书的特点:

1) 重点放在基本理论和基本概念上,为适应工科专业需要,在讲述基本理论时,适当理论联系工程实际,帮助学生掌握基础理论。

2) 由于 MATLAB 语言引入控制论,对系统理论分析、计算机辅助设计和仿真具有深刻的理论和实践意义,故可使控制工作者大大提高控制系统的设计效率,对控制论专家与学者来说,则可以从繁琐的数值计算和数字仿真中解脱出来,投入高技术、高水平和高智商的科学研究。为了配合自动控制理论的学习,使读者能够迅速掌握计算机 MATLAB 语言编程技巧,书中列举了大量 MATLAB 程序。全书中理论部分由胡国清编写,例题与习题部分和答案由刘文艳编写,最后由胡国清统稿。

本书已在厦门大学机电工程系作为“机械设计及自动化”、“测试计量技术及仪器”“飞机工程”等专业的教材,也作为“机电控制工程”专业研究生的教材或参考用书,收到了良好的效果。本书标星号*的小节为自选内容,使用时可以根据专业和学时取舍。

本书由西安交通大学前任校长,著名的控制理论专家,国务院学位委员会委员史维祥教授审稿,并提出了许多宝贵修改意见。本书的出版得到了机械工业出版社的支持,在本书的撰写研究和出版过程中得到了厦门大学机电工程系的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平、经验和时间有限,书中不足之处,敬请专家、教授和广大读者不吝斧正。

胡国清 刘文艳 于厦门大学

2003 年 8 月

目 录

序

前言

第 1 章 控制系统概述	1
1.1 控制理论在工程技术中的应用	2
1.1.1 系统的微分方程	2
1.1.2 物理模型与系统方块图	2
1.2 控制系统的基本组成	4
1.3 自动控制系统的基本类型	5
第 2 章 控制系统的数学模型	11
2.1 控制系统的微分方程	11
2.2 微分方程的线性化	14
2.3 Laplace 变换和逆变换	17
2.3.1 Laplace 变换的定义	17
2.3.2 典型函数的 Laplace 变换	17
2.3.3 Laplace 变换的性质	19
2.3.4 Laplace 逆变换	26
2.3.5 用 Laplace 变换求解常系数线性微分方程的解	33
2.4 传递函数	34
2.5 系统方块图及其简化	44
2.5.1 方块图的组成	44
2.5.2 方块图的等效变换	44
2.6 信号流图及 MASON 公式	48
2.6.1 信号流图	48
2.6.2 MASON 公式	49
2.7 控制系统建模	51
第 3 章 时域瞬态响应分析	62
3.1 时域分析中的典型信号	62
3.2 一阶系统的瞬态响应	64
3.3 二阶系统的瞬态响应	67
3.4 二阶系统的瞬态响应性能指标	71
3.4.1 瞬态响应性能指标	71
3.4.2 二阶系统的瞬态响应性能指标计算	73
*3.5 过阻尼和临界阻尼状态下二阶系统的瞬态性能指标估算	83
*3.6 二阶系统的单位脉冲响应	86
*3.7 二阶系统的单位斜坡响应	88

*3.8 高阶系统的瞬态响应	93
3.9 利用 MATLAB 语言实现时域仿真	99
第 4 章 控制系统的频率特性	120
4.1 频率特性	120
4.1.1 频率特性的数学基础	120
4.1.2 频率特性的基本概念	124
4.1.3 频率特性的几何表示	128
4.2 频率响应的 Nyquist 图	129
4.2.1 典型环节的 Nyquist 图	129
4.2.2 Nyquist 图的一般作图方法	134
4.3 频率响应的 Bode 图 (对数坐标图)	139
4.3.1 典型环节的 Bode 图	141
4.3.2 一般系统 Bode 图作图方法	147
4.3.3 最小相位系统	150
4.3.4 由频率响应曲线求系统传递函数	151
4.4 控制系统的闭环频率响应	155
4.4.1 由开环频率响应特性估计闭环频率特性	155
4.4.2 系统的频域指标	156
4.5 MATLAB 语言绘制 Bode 图和 Nyquist 图	159
第 5 章 控制系统的稳定性与快速性	169
5.1 稳定性和快速性的基本概念	169
5.2 Routh-Hurwitz 判据	170
5.2.1 系统稳定的必要条件	170
5.2.2 控制系统稳定的充分必要条件	171
5.2.3 二阶三阶和四阶系统的 Routh 判据	172
5.2.4 Routh 判据的特殊情况	173
*5.2.5 Hurwitz 判据	175
5.3 Nyquist 稳定性判据	176
5.3.1 Nyquist 判据的特性	176
5.3.2 Nyquist 判据的推理之一	176
5.3.3 Nyquist 判据的推理之二	177
5.4 Bode 图上的稳定性判据	179
*5.5 多回路 Nyquist 曲线上的稳定性判据	181
*5.6 多回路 Bode 图上的稳定性判据	182
5.7 稳定裕度	182
*5.8 二阶系统频域与时域的关系	187
5.8.1 相位裕度 γ 与阻尼比 ξ 的关系	187
5.8.2 谐振峰值 M_r 与超调量 σ 的关系	188
5.8.3 谐振频率及频宽与时域指标的关系	190
5.8.4 剪切频率 ω_c 、频宽 ω_b 与系统的时域指标关系	195

5.8.5 高阶系统的频域与时域之间的关系	199
5.9 控制系统的稳定性分析的 MATLAB 实现	200
第 6 章 根轨迹法	210
6.1 根轨迹方程	210
6.1.1 根轨迹与系统性能的关系	211
6.1.2 闭环零极点与开环零极点的关系	211
6.1.3 根轨迹方程、幅角、幅值条件	212
6.1.4 简单系统的根轨迹图	214
6.2 绘制根轨迹的基本法则	216
*6.3 广义根轨迹(参量根轨迹)	229
*6.4 零度根轨迹	231
6.5 MATLAB 根轨迹应用举例	233
6.5.1 绘制根轨迹图	233
6.5.2 用根轨迹法判断系统的稳定性	237
第 7 章 控制系统的误差分析	244
7.1 稳态误差	244
7.1.1 阶跃信号引起的稳态误差	244
7.1.2 斜坡(速度)信号输入引起的稳态误差	245
7.1.3 抛物线(加速度)信号输入引起的稳态误差	246
7.2 动态误差系数	248
7.3 扰动信号作用下的稳态误差	253
第 8 章 控制系统的校正方法	260
8.1 系统的性能指标	260
8.2 时域性能指标	260
8.2.1 瞬态性能指标	260
8.2.2 稳态误差	261
8.3 开环频域指标	261
8.4 闭环频域指标	261
8.5 系统校正综述	262
8.6 串联校正	262
8.6.1 无源超前网络校正	262
8.6.2 无源滞后网络校正	264
8.6.3 滞后-超前网络校正	266
8.6.4 有源网络校正装置	268
*8.7 反馈校正	271
*8.8 复合校正	272
8.9 频率法校正	276
*8.10 根轨迹校正	283
第 9 章 非线性控制系统	294
9.1 典型的非线性类型	294

9.2	非线性系统的分析方法	296
9.3	描述函数	296
9.4	常见非线性元件的描述函数	298
9.5	描述函数分析非线性系统的稳定性	306
9.5.1	非线性系统的稳定性分析	307
9.5.2	自振荡的确定	309
9.6	相平面法分析	312
9.6.1	相轨迹的作图法	313
9.6.2	由相平面确定时间信息	319
9.6.3	相平面上的奇点	320
9.6.4	相平面上的极限环	322
9.7	非线性系统的相平面分析	325
9.8	李雅普诺夫 (Liapunov) 直接法 (第二方法)	330
第 10 章	离散控制系统	337
10.1	Z 变换	337
10.1.1	采样器和保持器	337
10.1.2	根据定义求 Z 变换	339
10.1.3	留数定理求 Z 变换	340
10.1.4	Z 变换的性质	341
10.2	Z 逆变换	347
10.2.1	逆变换公式	347
10.2.2	幂级数法求 Z 逆变换	348
10.2.3	部分分式展开法	349
10.3	Z 变换求差分方程	350
10.4	脉冲传递函数	351
10.5	有零阶保持器的开环脉冲传递函数	354
10.6	闭环系统的脉冲传递函数	356
10.7	脉冲系统的稳定性分析	360
10.8	MATLAB 语言在离散控制系统中的应用	365
附录	MATLAB 语言简介	372
习题参考答案		380
参考文献		390

第1章 控制系统概述

机电一体化 (mechatronics) 技术中最主要的组成部分之一就是控制理论。控制理论诞生于 20 世纪 40 年代, 作为一门独立的学科和科学的方法论得到迅速发展, 它是自动控制、电子技术、计算机科学等多学科相互交叉、相互渗透的产物。20 世纪 50 年代后期, 由于军事和高科技如航空、航天、航海、火炮、导弹、电力、冶金等领域发展的需要, 控制理论日趋完善。1954 年钱学森运用控制论的思想和方法, 创立了工程控制论, 把控制论应用到工程技术领域, 使之蓬勃发展。20 世纪 60 年代后期控制论出现分支, 即“古典控制理论”和“现代控制理论”。“古典控制理论”是以传递函数为基础, 主要研究单输入单输出控制系统的分析和设计问题。频率响应法和根轨迹法是古典控制理论的核心, 由这两种方法设计出来的系统是稳定的, 并且或多或少地满足一组适当的性能指标。一般来说, 这些系统是令人满意的, 但它不是某种意义上的最佳系统。由于具有多输入多输出的现代设备变得越来越复杂, 所以需要大量的方程来描述现代控制系统。古典控制理论只涉及单输入单输出系统, 并且难以揭示系统的更深刻特性。

随着数字计算机的出现, 复杂系统的时域分析成为了可能, 因此现代控制理论应运而生, 其重要标志之一就是美国著名学者 R.E.Kalman 提出了控制系统的状态空间理论。“现代控制理论”是以状态空间法为基础, 研究多输入多输出、变参数、变结构、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题, 主要在时间域内进行, 从而适应了现代设备日益增加的复杂性, 同时满足了军事、空间技术和工业应用领域对精确性、重量、成本等方面的严格要求。

如果说 20 世纪 50~60 年代是控制理论发展的鼎盛时期, 那么 20 世纪 80~90 年代计算机和软件技术的高速发展则是控制理论的第二次革命。自从 MATLAB 语言进入控制理论后, 使控制工作者大大提高了控制系统的设计效率, 对控制论专家与学者来说, 则可以从繁琐的数字计算和仿真中解脱出来, 从事高技术、高水平研究。

自动控制就是在没有人参与的情况下, 使生产过程或被控对象的某些物理量按照预定的规律变化。如液压系统的压力、流量、温度、污染度 $f(P, Q, T, C)$ 等, 电气网络中的电压、电流、功率、电阻、电容、电感 $f(V, I, W, R, C, L)$ 等。

程序控制机床按照给定的预定程序变化, 加工出各种预定的产品形状; 焊接机器人按工艺要求焊接出流水线上的各个机器部件; 淬火工艺中的保温控制等等。这些系统的共同特点就是按照规定的程序工作和变化。

随动系统也叫调节系统就是调节量随输入量的变化而变化, 即如何使控制量随给定量的变化规律而变化, 这是控制系统所需要解决的基本任务。

反馈就是把输出结果的一部分或全部作为新的信息调节量, 反馈到新的调节部分, 再反馈回控制系统。

学习自动控制技术主要解决两个问题: ①如何分析某个给定控制系统的工作原理、元部件组成和分析稳定性等; ②根据实际需要进行系统设计, 并用光、机、电、液、气元件或设备等实现这一系统。

1.1 控制理论在工程技术中的应用

1.1.1 系统的微分方程

系统的动力学问题可以归结为系统的微分方程问题, 在机械系统中, 根据受力分析, 列出系统的微分方程; 在电气网络中根据电气网络特性, 列出网络的微分方程。如图 1-1 所示的机械系统中, 根据受力分析得系统的微分方程

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) + f\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \\ x(0) = x_0 \quad \dot{x}(0) = v_0 \end{cases} \quad (1-1)$$

式 (1-1) 的特征方程为

$$mp^2 + fp + k = 0 \quad (1-2)$$

式 (1-2) 中 $p = \frac{d}{dt}$, 它与系统本身的结构和参数有关, 反映了与外界无关的系统本身特性。

$F(t)$ 称为系统的外输入, $x(t)$ 称为系统的输出, 从广义动力学的角度来讲, 机械设备、电器设备和其它任何控制系统的物理模型都可以用图 1-2 来描述系统、输入和输出三者之间的关系。

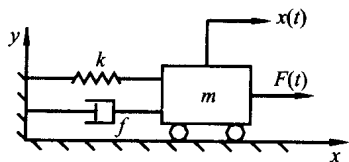


图 1-1 质量-弹簧-阻尼系统

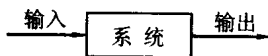


图 1-2 系统模型

由以上的分析可得, 从控制工程的角度可归纳为以下五个方面

- 1) 当系统给定, 输入已知, 求系统的输出响应, 通过输出响应来研究系统本身的各种问题, 即系统分析。
- 2) 系统确定, 求输入, 使输出尽可能符合给定的最优要求, 即最优控制问题。
- 3) 输入已知, 使输出尽可能复现输入给定的最佳要求, 即最优设计问题。
- 4) 输出已知, 确定系统, 识别输入中的有关信息, 即滤波与预测问题。
- 5) 输入和输出已知, 确定系统的结构和参数, 即建立数学模型, 称为系统辨识问题。

1.1.2 物理模型与系统方块图

函数记录仪是一种通用的自动化记录仪, 它可以在二维直角坐标纸上自动绘出两个测量函数之间的函数关系。同时记录仪还带有走纸机构, 用以描绘一个电量对时间的函数关系。记录仪采用负反馈原理, 其结构由衰减器、测量电路、放大装置、伺服电动机、测速机组、齿轮系和绳轮等组成, 如图 1-3 所示。系统的输入信号是待记录的电压, 被控对象为记录笔, 其位移即为控制量, 函数记录仪控制系统的任务是控制记录笔位移, 使其在记录纸上绘出待

记录的电压信号曲线。

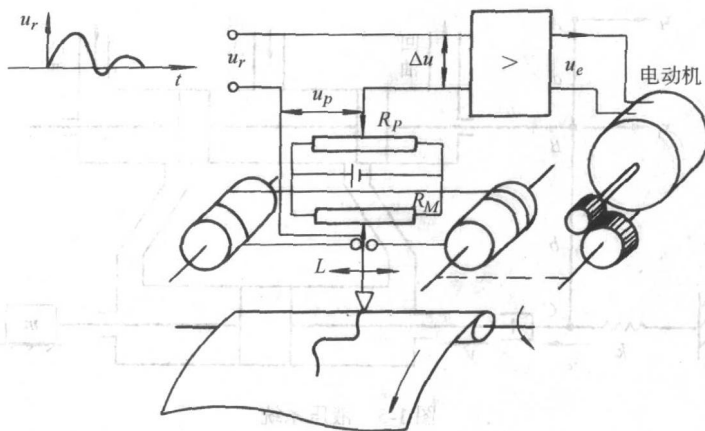


图 1-3 函数记录仪原理图

在图 1-3 中, 测量电路是由电位器 R_p 和 R_M 组成的桥式电路, 记录笔就固定在电位器 R_M 的电刷上, 因此测量电路的输出电压 u_p 与记录笔的位移成正比。当有输入信号 u_r 时, 在放大器输入口得到偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p$, 经放大后驱动伺服电动机, 并通过齿轮系及绳轮而带动记录笔移动, 使偏差电压减小。当偏差 $\Delta u = 0$ 时, 电动机停止转动, 记录笔也不动, 当输入信号随时间连续变化时, 记录笔便绘出随时间变化的连续曲线。

函数记录仪控制系统的方框图如图 1-4 所示, 测速发电机反馈一个与电动机转速成正比的电压信号, 以增大系统阻尼而得到改善系统性能的目的。

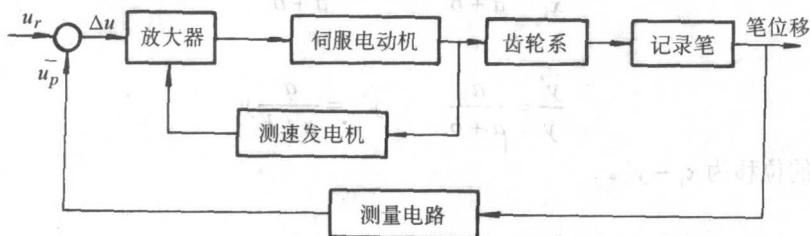


图 1-4 函数记录仪系统方框图

综上所述, 函数记录仪的功能是控制记录笔正确记录输出的电压信号。而输入电压信号可以是时间的任意函数, 因此这种系统称为随动系统。组成函数记录仪系统的元件有机械、电气等元件。系统中传递的电压、位移等信号都是随时间变化的连续信号, 因此函数记录仪系统是一个随时间变化的机电一体化的随动系统。

一个简单的液压系统如图 1-5 所示。由图 1-5 可知这是一个随动系统, x_i 为输入位移, y 为输出位移, 确定系统的方框图。

根据液压系统的工作原理得: 当在 A 点输入向左的位移 x_i 时, 即通过 B 点向阀芯输入一向左位移, 节流阀口打开, 高压油进入液压缸的左端, 推动活塞向右运动。活塞杆通过 C 点带动 B 点向右移动, B 点通过阀杆带动阀芯运动, 并将阀芯推回中点位置, 堵住阀口, 液压缸停止运动。当通过 A 点向右输入一位移 x_i 时, B 点向右运动, 即向阀芯输入一向右的位移时, 运动过程与上述运动过程恰好相反。因此可得 B 点为系统的比较点, 根据图 1-5 及图

1-6 可得如图 1-7 所示的系统方框图。

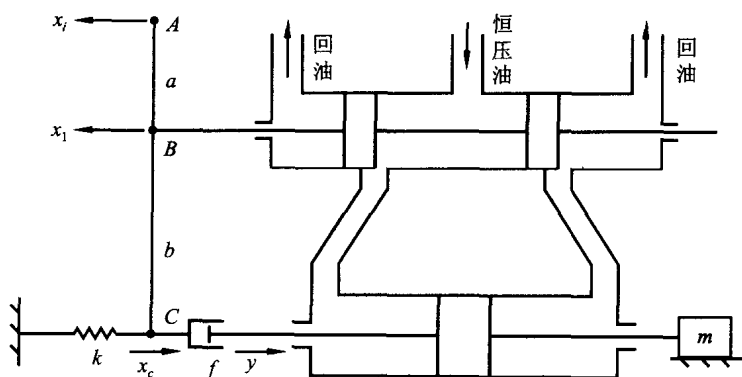


图 1-5 液压系统

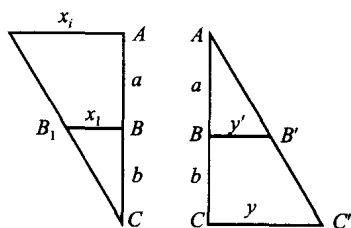


图 1-6 阀芯位移关系

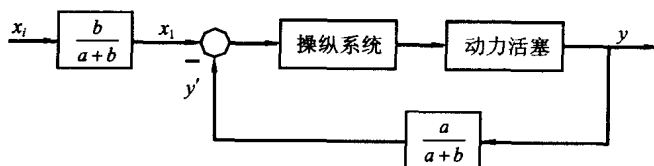


图 1-7 液压随动系统方框图

$$\frac{x_1}{x_i} = \frac{b}{a+b} \quad x_1 = \frac{b}{a+b} x_i$$

$$\frac{y'}{y} = \frac{a}{a+b} \quad y' = \frac{a}{a+b} y$$

阀芯总的位移为 $x_1 - y'$ 。

1.2 控制系统的基本组成

一个典型的控制系统主要包括反馈元件、给定元件、比较元件、放大元件、执行元件及校正元件等，如图 1-8 所示。

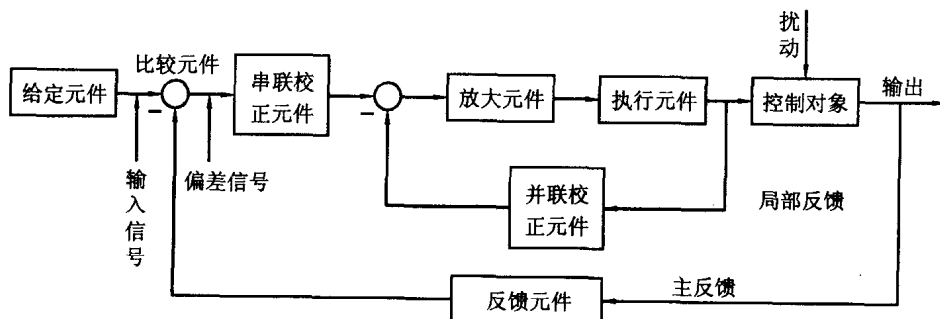


图 1-8 典型反馈控制系统方框图

给定元件：主要用于产生给定信号或输入信号，例如调速系统的电位计。

反馈元件：测量被调量或输出量，产生主反馈信号，该信号与输出量之间存在确定的函数关系（通常是比例关系），例如：调速系统的测速电动机。反馈元件也称测量元件。

比较元件：用来比较输入信号和反馈信号之间的偏差。即对系统输入量与输出量进行加减运算，给出偏差（误差）信号，起信号的综合作用，这个作用往往是由综合电路或由测量元件兼而完成，也可以是一个差接电路，但它往往不是一个专门的物理元件，有时也称比较环节或系统误差监测器。

放大元件：对偏差信号进行信号放大和功率放大的元件，使输出量具有足够的功率或要求的物理量。例如：伺服功率放大器，电液伺服阀。

执行元件：直接对控制对象进行操纵的元件，即根据放大后的偏差信号，对被控对象执行任务，使被控量与希望输出量保持一致，例如液压缸、液压马达和执行电动机。

控制对象：控制系统要操纵的对象。它的输出量即为系统的被调量（或被控制量），例如：机床、工作台、设备或生产线等。

校正元件：也称校正装置，即参数或结构便于调整的元件，用以稳定控制系统，改善系统的性能。主要有反馈校正和串联校正两种形式。

1.3 自动控制系统的的基本类型

控制系统的基本类型很多，其结构和所完成任务各不相同，主要有：

1. 按给定量的运动规律分类

1) 恒值控制系统，例如：稳压源、恒温系统。重点克服扰动对被调量的影响。

2) 程序控制系统，输入量为已知的时间函数，如计算机数字程序控制系统。图 1-9 为某程序控制系统。

3) 随动系统，这种系统的给定量是时间的未知函数，即给定量的变换规律事先无法准确确定。但要求输出量能够准确、快速地复现给定量。如火炮瞄准敌机系统，液压仿形刀架的随动系统等等。

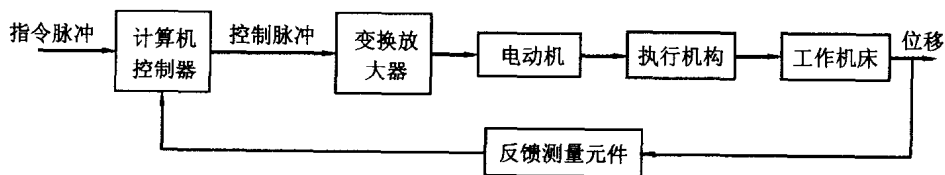


图 1-9 某程序控制系统

2. 按系统反应特性分类

1) 连续控制系统，连续控制系统又可分为：线性控制系统和非线性控制系统。线性控制系统是指能用线性微分方程来描述的控制系统；非线性系统是指不能用线性微分方程来描述的控制系统，可以用分段函数（微分方程）来描述的控制系统。

2) 数字控制系统，即离散控制系统，系统的一切量都用数字量表示，数字量之间不连续，用计算机控制。

3. 按执行元件的物理性能分类

1) 电气控制系统。

- 2) 液压控制系统。
- 3) 机械控制系统。
- 4) 机电一体化控制系统。
- 5) 热能控制系统。

4. 按控制类型分类

1) 开环控制系统, 即系统的输出与输入信号之间不存在反馈回路, 输出信号对控制系统无影响。其特点是: 结构简单, 成本较低, 通常用于系统结构参数稳定, 没有干扰或所受干扰很小的场合。

2) 闭环控制系统, 即系统的输出与输入信号之间存在反馈回路, 输出信号对控制系统产生影响, 从而提高系统的控制精度。

无论对哪一类控制系统, 都必须要求控制系统稳定、快速和准确。稳定性: 指系统的动态过程的振荡趋向或使系统能够恢复平衡的能力, 要求输出量在受扰动信号作用后能够随时间的推移而得到平衡状态, 稳定性是控制系统的最基本要求。快速性: 在控制系统处于稳定的条件下, 要求系统在受扰动信号的作用后, 输出量与给定量之间的偏差能够及时消除。准确性: 在调节过程结束后输出量与给定量之间的偏差, 也称稳态精度。准确性是衡量系统工作性能的重要指标之一。在同一控制系统中, 准、稳、快是相互制约的, 快速性好, 可能会有强烈的振荡; 改善稳定性, 控制过程可能又减慢, 精度也可能降低。这些问题是控制工程领域所必须解决的重要课题。

例题与习题

本章要求学生了解控制系统的基本概念, 开环控制与闭环控制的区别, 闭环控制系统的基本原理和组成环节。学会将简单系统原理图抽象成方块图。

例题

例 1-1 电冰箱制冷系统工作原理如图 1-10 所示。试简述系统工作原理, 指出被控对象、被控量和给定量, 画出系统方块图。

解 系统的任务是保持冰箱内温度 T_c 等于设定的温度 T_r 。冰箱箱体是被控对象, 箱内温度是被控量, 由控制器旋钮设定的电位器输出电压 (与希望的温度 T_r 值对应) 是给定量。

温度控制器中的双金属温度传感器 (测量元件) 感受冰箱内的温度并把它转换为电压信号, 与控制器旋钮设定的电位器 (给定元件) 输出电压 (对应希望温度 T_r) 相比较, 利用偏差电压 Δu (表征实际温度 T_c 与希望温度 T_r 的偏差) 控制继电器。当 Δu 达到一定值时, 继电器接通, 压缩机起动, 将蒸发器中的高温低压气态制冷液送经冷却器散热; 降温后的低温低压制冷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。如此循环流动, 使冰箱达到制冷的效果。继电器、压缩机、蒸发器和冷却器组成系统的执行机构, 完成降温功能。

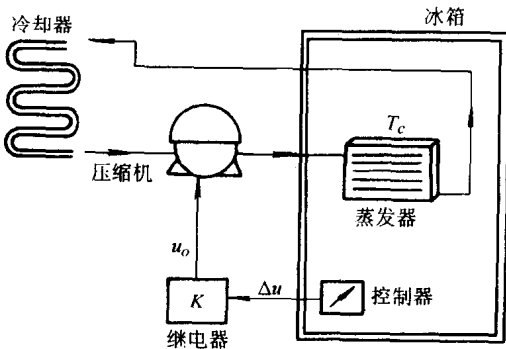


图 1-10 电冰箱制冷系统原理图

电冰箱制冷系统方块图如图 1-11 所示。

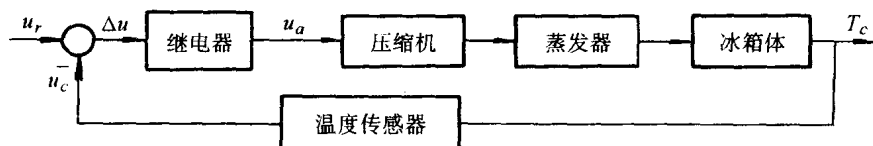


图 1-11 电冰箱制冷系统方块图

例 1-2 设热水电加热器如图 1-12 所示。为了保持希望的温度，由温控开关接通或断开电加热器的电源。在使用热水时，水箱中流出热水并补充冷水。试说明系统工作原理并画出系统原理方块图。

解 在热水电加热器系统中，输入量为预定的希望温度（给定值），设为 $T_{\text{希}} (^{\circ}\text{C})$ ；输出量为水箱的实际水温，设为 $T (^{\circ}\text{C})$ ；控制对象为水箱；扰动信号主要是由于放出热水并注入冷水而产生的降温作用。

当 $T=T_{\text{希}}$ 时，电加热器不工作，此时水箱中水温保持在希望温度上。当使用热水时，由于扰动作用使实际水温下降，测温元件感受 $T < T_{\text{希}}$ 的变化，并把这一温度变化转换为电信号使温控开关工作。温控开关接通电源，使水箱中的水升温，直到 $T=T_{\text{希}}$ 为止。系统原理方块图如图 1-13 所示。

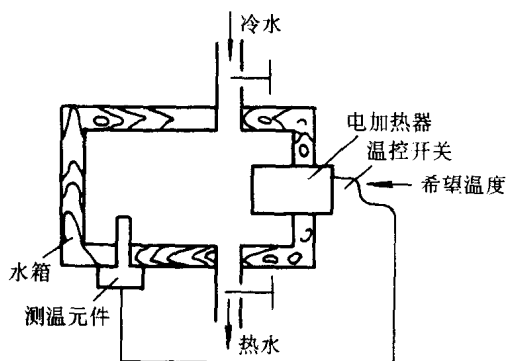


图 1-12 电加热器系统

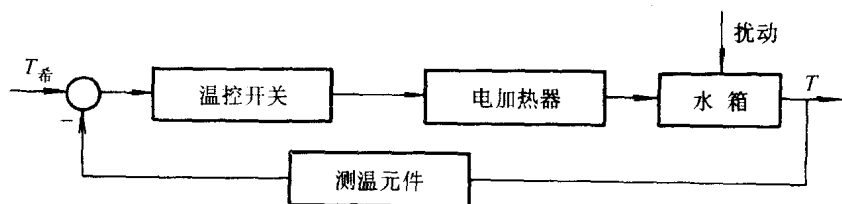


图 1-13 电加热器系统原理方块图

例 1-3 图 1-14 为液位自动控制系统示意图。在任何情况下，希望液面高度 c 维持不变，试说明系统工作原理，并画出系统原理方块图。

解 系统的控制任务是保持液面高度不变。水箱是被控对象，水箱液位是被控量，电位器设定电压 u_r （表征液位的希望值 c_r ）是给定量。

当电位器电刷位于中点位置（对应 u_r ）时，电动机不动，控制阀门有一定的开度，

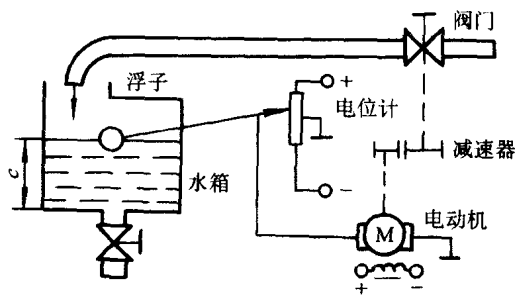


图 1-14 液位自动控制系统示意图

使水箱中流入水量与流出水量相等,从而液面保持在希望高度 c_r 上。一旦流入水量或流出水量发生变化,例如当液面升高时,浮子位置也相应升高,通过杠杆作用使电位器电刷从中点位置下移,从而给电动机提供一定的控制电压,驱动电动机通过减速器减小阀门开度,使进入水箱的液体流量减少。这时,水箱液面下降,浮子位置相应下降,直到电位器电刷回到中点位置,系统重新处于平衡状态,液面恢复到给定高度。反之,若水箱液位下降,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_r 。系统原理方块图如图 1-15 所示。

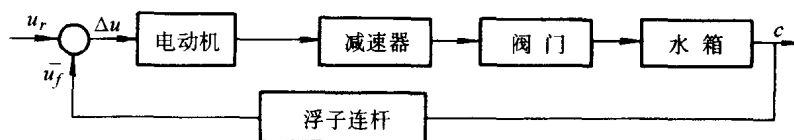


图 1-15 液位自动控制系统方块图

习题

1. 在给出的几种答案里,选择出正确的答案。

1) 以同等精度元件组成的开环系统和闭环系统,其精度比较为_____。

a) 开环高 b) 闭环高 c) 相差不多 d) 一样高 e) 两者都不高

2) 系统的输出信号对控制作用的影响_____。

a) 开环有 b) 闭环有 c) 都没有 d) 都有

3) 对于系统抗干扰能力_____。

a) 开环强 b) 闭环强 c) 都强 d) 都不强

4) 作为系统_____。

a) 开环不振荡 b) 闭环不振荡 c) 开环一定振荡 d) 闭环一定振荡

2. 日常生活中有许多闭环和开环控制系统,试举几个具体例子,并说明它们的工作原理。

3. 什么叫反馈?它有哪些作用?什么叫负反馈、正反馈?为什么稳定系统的主反馈一定是负反馈?

4. 图 1-16 表示角速度控制系统原理图,调速器的轴通过减速齿轮以角速度 ω 旋转,旋转的飞锤所产生的离心力被弹簧力抵消,所要求的速度由弹簧预应力调准,试画出其职能方块图。

5. 图 1-17 是仓库大门自动控制原理示意图,试说明系统自动控制大门开闭的工作原理并画出系统方块图。

6. 图 1-18 为一带有校正装置的液压伺服系统。由伺服阀、液压缸、差动杆、阻尼器组成。在差动杆端部输入位

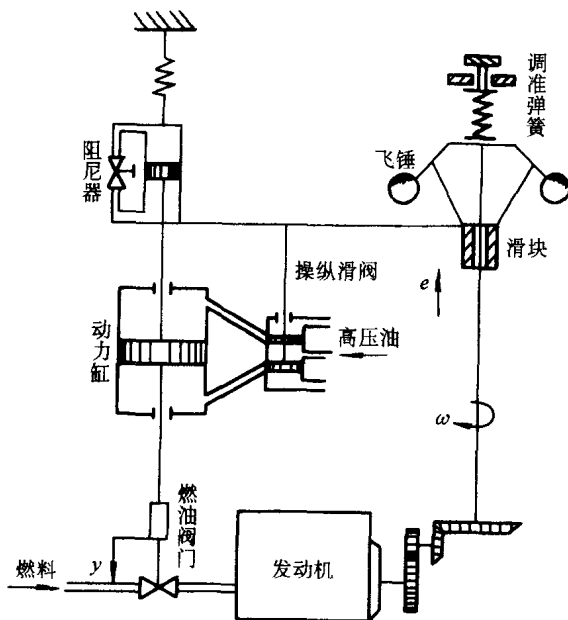


图 1-16 角速度控制原理图