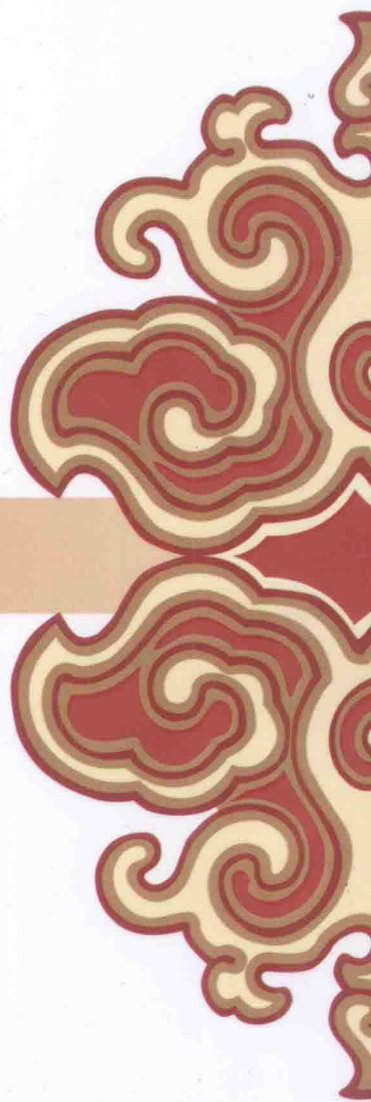




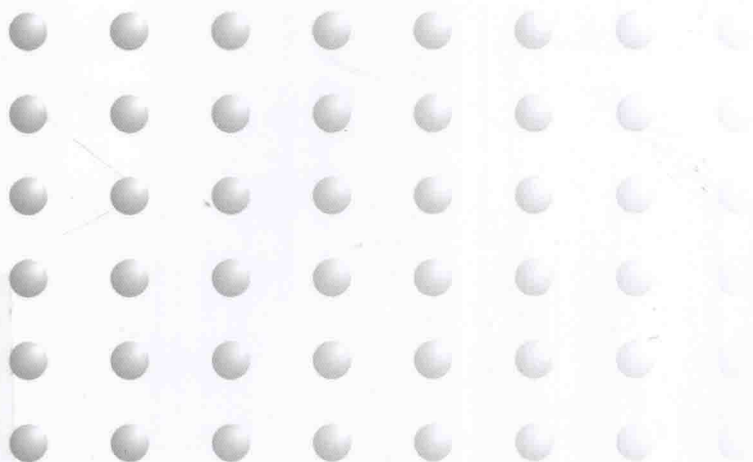
高等学校机械类专业“十三五”课改规划教材

机电控制工程基础



主 编 罗庚合

副主编 李 玲 王 瑜



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校机械类专业“十三五”课改规划教材

机电控制工程基础

主 编 罗庚合

副主编 李 玲 王 瑜

参 编 王 晋 彭琰举 蔡 霞

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书根据应用型高等本科教育的特点,以培养知识面宽、基础扎实、应用能力强、综合素质高的高新技术应用人才为目的,本着“一定范围的系统性和完整性,注重工程性和实用性”的原则进行编写。

本书以经典控制理论为基本内容,结合机电控制系统实例,阐述控制工程的基本理论、基本方法和基本内容,主要包括控制系统的基本概念和数学模型、控制系统的性能指标、控制系统的稳定性与精确性分析、控制系统的校正和工程设计、工程实例分析及计算机辅助分析设计等内容。全书以基本概念和工程应用能力培养为主线,从工程控制的角度出发,开拓学生知识视野,培养学生思考、分析问题的能力,开发学生的创新思维。

本书可作为高等工科大学机械设计及其自动化、机械电子工程专业的教材,也可作为近机电类非信息控制类专业、自学考试或成人本科教育相近专业教材,还可作为高职高专学生的教材和教学参考书,以及广大工程技术人员学习机电控制工程的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机电控制工程基础/罗庚合主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.3

高等学校机械类专业“十三五”课改规划教材

ISBN 978-7-5606-4041-9

I. ①机… II. ①罗… III. ①机电一体化—控制系统—高等学校—教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 032022 号

策 划 毛红兵

责任编辑 许青青 王文秀

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2016年3月第1版 2016年3月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 16.5

字 数 389千字

印 数 1~3000册

定 价 33.00元

ISBN 978-7-5606-4041-9/TH

XDUP 4333001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

为了确保未来德国在世界上的经济竞争力和技术领先地位,德国政府出于领先意识、危机意识和机遇意识,于2013年在《德国高技术战略2020》中提出了德国工业4.0的国家发展战略,试图以高科技带动工业生产的发展,给德国企业提出了一个明确的努力方向。工业4.0,意即“第四次工业革命”,其总体目标是实现以信息物理系统为基础的“绿色的”智能化生产。

目前我国与德国签订了多达110条内容的《中德合作行动纲要》,其中“工业4.0合作”的内容颇为引人瞩目。这意味着我国要在工业化与信息化同步发展的战略中更快地促进两者的融合。工业4.0对我国经济社会的发展,以及当下中国经济转型与结构调整都有着特殊的意义。

工业机器人、智能化工厂及信息技术的集成是工业4.0的主要内容。为适应工业4.0的需要,一线的工程技术人员需要尽快地提高专业素质,这对培养人才的高等应用型本科教育提出了更高的要求。

机电控制工程基础是智能工厂中的机电一体化设备控制的理论基础。本书以机电控制的应用为对象,主要阐述经典控制理论的基本概念、基本原理和基本分析方法,以及机电系统的校正和工程设计方法。其目的是通过对本书的学习,使读者在系统静态设计的基础上建立动态设计的概念,用系统模型、框图及校正等概念为机电一体化设备的设计、安装、调试和维修服务,为后续专业课程的学习和进一步提高打下坚实的基础。

本书共分10章。第1、2章是基础知识,包括机电控制系统的基本概念和数学模型;第3章主要介绍控制系统的时域分析及其性能指标;第4、5章讨论了控制系统的频域分析和稳定性分析;第6章介绍了控制系统的准确性分析;第7、8章主要分析了控制系统的校正与工程设计;第9章是机电控制系统的实例分析;第10章主要包括机电控制系统的计算机辅助分析与设计等内容。每章末附有不同类型的习题,并在附录A中提供了3套模拟测试题,供学生检验自己的学习效果。

本书是在西安航空学院机械工程学院的多位老师多年“机电控制工程”教学经验的基础上,结合应用型本科教育的特点编写而成的。鉴于学生对数学、力学、电工电子学等基础知识的掌握程度较浅,全书以基本概念和工程应用能力培养为主线,从工程控制的角度出发,努力开拓学生的知识视野,培养学生思考、分析问题的能力,开发学生的创新思维能力。

本书由西安航空学院罗庚合任主编,王瑜、李玲任副主编,王晋、彭琰举、蔡霞任参编。其中,王晋编写了第6、8章,王瑜编写了第3、7章,彭琰举编写了第10章,蔡霞编写了附录A,李玲编写了第4、5章,罗庚合编写了第1、2、9章。全书由罗庚合负责统稿和定稿。西安航空学院机械工程学院机电教研室全体教师参与了本书大纲的讨论,提出了许

多宝贵意见和建议。本书由西安航空学院宋文学教授任主审，他对本书给予了许多宝贵的意见。在此编者特向他们表示衷心的感谢。

本书可作为高等工科学学校机械设计及其自动化、机械电子工程专业的教材，也可作为近机电类非信息控制类专业、自学考试或成人本科教育相近专业教材，还可作为高职高专学生的教材和教学参考书，以及广大工程技术人员学习机电控制工程的参考书。

本书在编写体系和内容取舍方面做了一些新的尝试，限于编者水平，书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者
2015 年 10 月

目 录

| | |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 机电控制系统的工作原理及其组成 | 1 |
| 1.1.1 机电控制系统概述 | 1 |
| 1.1.2 机电控制系统的应用实例 | 3 |
| 1.1.3 机电控制系统的组成和相关信号 | 6 |
| 1.2 机电控制系统的基本要求 | 7 |
| 1.3 机电控制系统的分类 | 8 |
| 1.4 机电控制理论的发展历史和发展方向 | 10 |
| 1.4.1 经典控制理论的发展 | 10 |
| 1.4.2 现代控制理论的发展现状 | 10 |
| 1.4.3 机电一体化设备的发展方向 | 11 |
| 习题 | 11 |
| 第 2 章 控制系统的数学模型 | 14 |
| 2.1 时域中的数学模型——控制系统的微分方程 | 14 |
| 2.1.1 机电控制工程的几个基本理论 | 14 |
| 2.1.2 建立控制系统的微分方程 | 17 |
| 2.2 非线性数学模型的线性化 | 20 |
| 2.3 拉氏变换与反变换 | 22 |
| 2.3.1 拉氏变换与反变换的定义 | 22 |
| 2.3.2 几种典型函数的拉氏变换 | 23 |
| 2.3.3 拉氏变换的主要定理 | 27 |
| 2.3.4 拉氏变换与反变换的应用 | 29 |
| 2.4 传递函数 | 34 |
| 2.4.1 传递函数的概念和定义 | 34 |
| 2.4.2 传递函数的特征方程及零点和极点 | 35 |
| 2.4.3 传递函数的性质和有关说明 | 36 |
| 2.4.4 几种典型环节的传递函数 | 36 |
| 2.5 传递函数的方框图及其运算 | 46 |
| 2.5.1 方框图的符号及含义 | 46 |
| 2.5.2 系统方框图的绘制 | 47 |
| 2.5.3 方框图的等效变换 | 49 |
| 2.5.4 信号流图 | 53 |
| 2.5.5 梅逊公式 | 60 |
| 2.5.6 多输入作用下控制系统的传递函数 | 62 |
| 习题 | 65 |
| 第 3 章 控制系统的时域分析 | 71 |
| 3.1 典型输入信号与系统性能指标 | 71 |

| | | |
|------------|-----------------------------|------------|
| 3.1.1 | 典型输入信号 | 71 |
| 3.1.2 | 过渡过程与稳态过程 | 72 |
| 3.1.3 | 控制系统的时域性能指标 | 72 |
| 3.2 | 一阶系统的时间响应 | 74 |
| 3.2.1 | 一阶系统的数学模型 | 74 |
| 3.2.2 | 一阶系统的单位阶跃响应 | 74 |
| 3.2.3 | 一阶系统的单位斜坡响应 | 75 |
| 3.2.4 | 一阶系统的单位脉冲响应 | 76 |
| 3.2.5 | 一阶系统的三种响应之间的关系 | 77 |
| 3.3 | 二阶系统的时间响应 | 77 |
| 3.3.1 | 二阶系统的数学模型 | 77 |
| 3.3.2 | 二阶系统的单位阶跃响应 | 79 |
| 3.3.3 | 二阶系统响应的性能指标 | 82 |
| 3.4 | 高阶系统的时间响应 | 87 |
| 3.4.1 | 高阶系统的数学模型 | 87 |
| 3.4.2 | 高阶系统的单位阶跃响应 | 87 |
| | 习题 | 88 |
| 第4章 | 线性系统的频域分析法 | 91 |
| 4.1 | 频率特性 | 91 |
| 4.1.1 | 频率特性的基本概念与定义 | 91 |
| 4.1.2 | 关于频率特性的几个结论 | 93 |
| 4.1.3 | 频率特性的求取 | 94 |
| 4.2 | 频率特性的图示法 | 94 |
| 4.3 | 典型环节的频率特性 | 96 |
| 4.3.1 | 比例环节 | 96 |
| 4.3.2 | 积分环节 | 97 |
| 4.3.3 | 纯微分环节 | 98 |
| 4.3.4 | 惯性环节 | 99 |
| 4.3.5 | 一阶微分环节 | 100 |
| 4.3.6 | 振荡环节 | 101 |
| 4.3.7 | 二阶微分环节 | 103 |
| 4.3.8 | 延迟环节 | 104 |
| 4.4 | 控制系统的开环频率特性 | 105 |
| 4.4.1 | 开环奈氏图的绘制 | 105 |
| 4.4.2 | 开环 Bode 图 | 107 |
| 4.4.3 | 最小相位系统 | 109 |
| 4.4.4 | 由 Bode 图估算最小相位系统的传递函数 | 110 |
| | 习题 | 113 |
| 第5章 | 控制系统的稳定性分析 | 119 |
| 5.1 | 稳定性的基本概念 | 119 |
| 5.1.1 | 稳定性的定义 | 119 |
| 5.1.2 | 系统稳定的基本条件 | 119 |
| 5.2 | 劳斯稳定判据 | 121 |

| | | |
|--------------|------------------------|------------|
| 5.2.1 | 判定系统稳定的必要条件 | 121 |
| 5.2.2 | 劳斯稳定判据 | 121 |
| 5.2.3 | 一阶至四阶系统的劳斯稳定判定 | 123 |
| 5.2.4 | 劳斯稳定判据的特殊情况 | 124 |
| 5.2.5 | 稳定裕度 | 125 |
| 5.3 | 奈奎斯特稳定判据 | 126 |
| 5.3.1 | 辅助函数的构造 | 127 |
| 5.3.2 | 幅角原理 | 127 |
| 5.3.3 | 奈奎斯特图判定法 | 129 |
| 5.3.4 | 奈奎斯特判据举例 | 131 |
| 5.4 | 对数稳定判据 | 133 |
| 5.4.1 | 系统开环 Bode 图与开环奈氏图的对应关系 | 133 |
| 5.4.2 | 对数 Bode 图稳定判据的描述 | 134 |
| 5.4.3 | 系统的相对稳定性——稳定裕度的计算 | 134 |
| | 习题 | 137 |
| 第 6 章 | 控制系统的准确性分析 | 140 |
| 6.1 | 系统元件参数变化对闭环系统性能的影响 | 140 |
| 6.1.1 | 灵敏度的基本概念 | 140 |
| 6.1.2 | 闭环系统对灵敏度的影响 | 140 |
| 6.1.3 | 应用举例 | 141 |
| 6.2 | 控制系统的时域性能指标与频域性能指标的关系 | 143 |
| 6.2.1 | 时域性能指标回顾 | 143 |
| 6.2.2 | 频域性能指标及其与时域性能指标的关系 | 143 |
| 6.2.3 | 开环对数频率特性与时域性能指标的关系 | 146 |
| 6.3 | 控制系统的误差分析和计算 | 148 |
| 6.3.1 | 偏差、误差和稳态误差 | 148 |
| 6.3.2 | 输入作用下的稳态误差 | 149 |
| 6.3.3 | 干扰作用下的稳态误差 | 152 |
| 6.3.4 | 提高系统稳态精度的措施 | 154 |
| | 习题 | 156 |
| 第 7 章 | 控制系统的校正设计 | 158 |
| 7.1 | 校正设计概述 | 158 |
| 7.2 | 校正装置及其特性 | 159 |
| 7.2.1 | 无源校正装置 | 159 |
| 7.2.2 | 有源校正装置 | 164 |
| 7.3 | 控制系统的串联校正 | 169 |
| 7.3.1 | 分析法的超前校正步骤 | 169 |
| 7.3.2 | 分析法的滞后校正步骤 | 171 |
| 7.3.3 | 希望特性法的串联校正 | 173 |
| 7.4 | 控制系统的并联校正 | 174 |
| 7.4.1 | 反馈校正对系统品质的影响 | 174 |
| 7.4.2 | 局部反馈的校正方法 | 175 |
| 7.4.3 | 反馈校正的近似法分析 | 176 |

| | |
|-------------------------------------|------------|
| 习题 | 178 |
| 第 8 章 控制系统的工程设计 | 180 |
| 8.1 控制系统工程设计概述 | 180 |
| 8.2 典型系统的特性 | 180 |
| 8.2.1 典型 I 型系统 | 181 |
| 8.2.2 典型 II 型系统 | 183 |
| 8.2.3 典型 I 型和 II 型系统跟随性能的比较 | 187 |
| 8.3 工程设计的基本原则 | 187 |
| 8.3.1 非典型系统简化为典型系统的近似条件 | 187 |
| 8.3.2 利用典型系统预期特性进行工程设计的一般步骤 | 195 |
| 习题 | 196 |
| 第 9 章 机电控制系统应用举例 | 197 |
| 9.1 晶闸管交流调压位置随动系统 | 197 |
| 9.1.1 晶闸管交流调压位置随动系统的工作原理 | 197 |
| 9.1.2 晶闸管交流调压位置随动系统的数学模型 | 201 |
| 9.2 水位控制系统 | 202 |
| 9.2.1 系统组成 | 202 |
| 9.2.2 系统工作原理分析 | 203 |
| 9.3 发动机离心调速系统 | 203 |
| 9.3.1 液压阀控液压缸和液压阻尼器 | 203 |
| 9.3.2 发动机离心调速系统 | 204 |
| 习题 | 206 |
| 第 10 章 控制系统的计算机辅助分析与设计 | 210 |
| 10.1 MATLAB 入门 | 210 |
| 10.1.1 MATLAB 简介 | 210 |
| 10.1.2 MATLAB 入门 | 211 |
| 10.2 控制系统的数学模型 | 215 |
| 10.2.1 传递函数模型 | 215 |
| 10.2.2 零极点模型 | 217 |
| 10.2.3 模型之间的转换 | 217 |
| 10.3 控制系统的性能分析 | 218 |
| 10.3.1 控制系统的稳定性分析 | 218 |
| 10.3.2 时域响应分析 | 221 |
| 10.3.3 频率响应分析 | 223 |
| 10.4 控制系统的校正设计 | 228 |
| 习题 | 233 |
| 附录 A | 234 |
| 附录 B | 253 |
| 参考文献 | 255 |

第1章 绪 论

控制论强调用系统的、反馈的和控制的方法研究工程实际问题。机电控制工程是一门技术科学,是研究控制论在机电工程中的应用的科学。“机电控制工程基础”课程主要阐述自动控制技术的基本理论及其在机电行业中的应用。当前,随着计算机技术和检测技术的发展与应用,机械制造行业越来越多地引入了微电子技术、检测技术、液压与气动技术及电气控制技术,使得传统的机械产品发生了很大的变化。这些技术被称为机电一体化技术。目前制造业普遍使用数控机床、工业机器人、自动化装配生产线等机电一体化设备,这些设备的设计、制造和使用等过程中都用到了控制工程论的基础知识。可以预计未来的机械设备无疑要走上机电一体化产品之路,因此控制论是一门极其重要的应用学科,也是科学方法论之一。

本章主要介绍机电控制工程基础中的几个重要概念和基本含义,结合具体实例阐述控制系统的组成及其原理,引入机电控制系统的基本概念、名词和参量等,明确机电设备控制系统的基本要求和控制系统的基本类型与特点,并介绍控制工程论的发展历史和未来趋势。

1.1 机电控制系统的工作原理及其组成

1.1.1 机电控制系统概述

1. 自动控制与自动控制系统的概念

机电系统的自动控制是指对机械设备采取一定的措施,使得在生产过程中被控对象的某些物理量准确地按照预期的规律变化。机械设备的所有组成部分及控制环节构成了自动控制系统。

例如,要想使发电机正常供电,就必须设法保持其输出电压、频率和相位恒定,尽量使其不受负载变化和发电机原动机的转速波动的影响;要想使数控机床加工出高精度的零件,就必须采取措施保证其工作台或刀架准确地跟随指令进给要求而移动;要想使烘烤炉烘烤出合格产品,就必须保证炉温符合某产品的生产工艺要求。这里所指的采取一定的措施就是说实行某种控制,这种具有控制作用的系统才可以称为控制系统。发电机、数控机床和烘烤炉等可以称为控制系统或控制对象;电压频率和相位、工作台或刀架位置、炉温等表征这些设备工作状态的物理参量称为这些系统的被控量;设定的电压频率相位、刀架或工作台的进给路线、炉温等所对应的物理参量称为被控量的设定值(希望值);而最终机电设备所执行的过程或终止值称为实际值。如用空调遥控器设定房间的温度为 28°C ,控制空调开始运行制冷,房间温度慢慢降低,当温度为 27°C 时,制冷停止只是换风,当房间温度到 29°C 时,空调又开始制冷,实际房间温度可能是 28.5°C 。在这个空调系统中,控制对象是空调,被控量是房间温度,空调遥控器设定的温度 28°C 为设定值(希望值),房间的稳

定温度 28.5°C 为实际值, 希望值与实际值之间的差值称为稳态误差。

所以任何控制系统都包含控制系统(对象)、控制量、希望值、实际值和误差等含义。若系统设备不具备以上各项中的任一项, 就不能看成完整意义上的控制系统。如抽水机、搅拌机、普通卷扬机等就不具备明显的控制意义, 因为它们只有开或关这种简单的逻辑控制, 再没有其他控制要求; 而飞机、巡航导弹、轧钢生产线等都具有随时变化着的工作状态, 始终存在着希望值和当前值的误差, 用给定信号与反馈信号的偏差来纠正误差, 使实际值逼近给定值, 从而使误差逐渐减小, 因而属于完整意义上的控制系统。

2. 控制系统中信息传递、反馈及反馈控制的概念

信息传递、反馈及反馈控制是控制论中几个极其重要的概念。利用反馈进行控制, 使机电系统按一定的“规律”进行运动, 是自动控制的重要原理。

1) 信息及信息的传递

在科学史上, 控制论与信息论第一次把一切能表达一定含义的信号、密码、情报和消息概括为信息, 把它列为与能量、质量重要性相当的科学概念。

所谓信息传递, 就是指信息在系统及过程中以某种关系动态地传递或变换。如图 1-1 所示, 在数控编程及数控加工工艺过程中, 信息的传递过程是: 工件的毛坯尺寸信息转变成数控加工程序信息, 程序信息控制数控机床进行加工, 之后得到零件尺寸信息。

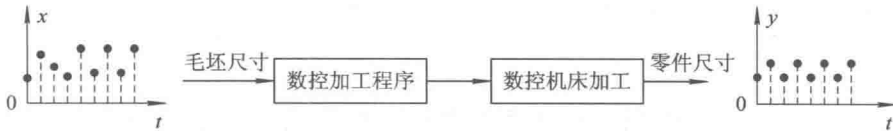


图 1-1 数控编程及数控加工工艺过程中信息的传递

2) 反馈及反馈控制

所谓信息的反馈, 就是把一个系统的输出信号经过反馈回路变换后全部或部分地送回到输入端, 使其与输入信号进行比较。反馈信号与给定输入信号叠加后得到偏差信号, 用偏差信号再对系统进行控制的过程称为反馈控制。若叠加后得到的偏差信号增强, 则称为正反馈; 反之, 则称为负反馈。一般的控制系统都是负反馈控制。通常我们把具有反馈的系统称为闭环系统, 如我们日常用到的最古老而简单的储槽液面自动调节器(老式的抽水马桶)就是一个简单的闭环系统, 如图 1-2 所示。

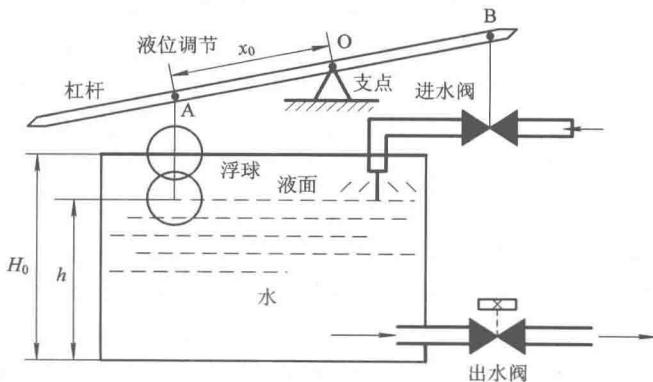


图 1-2 储槽液面自动调节器

浮球测出液面高度 h 与要存储的液面高度 H_0 之差, 推动杠杆控制进水阀给存水池注水; 当实际液面高度 h 与希望液面高度 H_0 相等时, 通过杠杆机构关闭注水阀。该调节器的信息传递作用和传递关系可用图 1-3 表示。这里的反馈信息就是实际液面高度 h , 经与期望液面高度 H_0 比较形成一个闭环系统。调整浮球挂钩点 A 到杠杆支点 O 的距离, 可以改变期望液面高度 H_0 。



图 1-3 液面控制信息传递

1.1.2 机电控制系统的应用实例

在各种生产过程或生产设备中, 常常需要使某些物理量, 如温度、压力、位置、速度等保持恒定或按一定的规律变化, 为此就要对生产机械或设备进行实时的控制或调整, 以抵消外界的扰动和影响。以下几个例子可总结出一般控制系统的工作原理。

1. 恒温箱温度控制

1) 人工控制

图 1-4 为人工控制的恒温箱示意图。通过人工观察温度计(恒温箱实际温度)与恒温箱期望温度之差的大小来调节调压器, 从而改变加载到加热电阻丝上电压的大小, 使电阻丝电流随之改变, 实现升温或降温。当温差大时, 调整调压器使电压最大(或最小), 从而使电流最大(或最小), 实现快速升温(或快速降温), 温差逐渐减小时, 电热丝上的电压变化也逐渐减小, 使电热丝产生的热量和与外界交换损失热量相等, 保持恒温箱内的温度恒定。

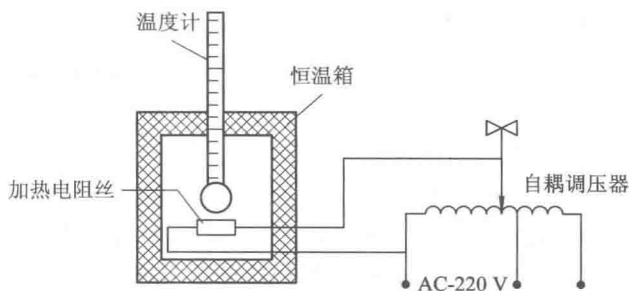


图 1-4 人工控制的恒温箱示意图

人工调节的过程可归结为以下步骤:

- (1) 已知恒温箱的期望温度值(在人的大脑中记忆);
- (2) 观察得到恒温箱的实际温度值(由测温元件温度计测量), 作为被控量;
- (3) 将期望温度值与实际值比较得出偏差的大小和方向;
- (4) 根据偏差的大小和方向, 由人工调节调压器, 从而改变加载到加热电阻丝上电压的大小, 进而改变实际温度。

整个控制过程就是测量—比较—调整—纠正误差的过程, 简单说就是检测偏差并纠正偏差, 使偏差越来越小, 直到实际值达到或接近期望值。

2) 自动控制

如果在人工控制的恒温箱中能找到—个控制器代替人的职能, 那么恒温箱就可以成为

自动控制的恒温箱系统，如图 1-5 所示。

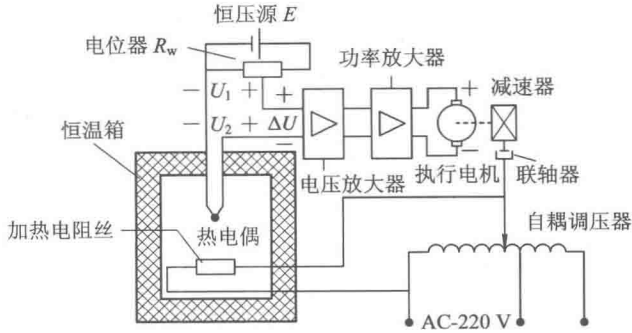


图 1-5 自动控制的恒温箱示意图

用电位器调节恒压源 E 得到恒温箱的温度设定值(期望值) U_1 ，由热电偶直接测量得到恒温箱的实际温度值 U_2 ，加到电压放大器上的输入信号 $\Delta U = U_1 - U_2$ ，它经过电压和功率放大器放大后使得直流伺服电机正转或反转，通过减速器带动调压器动触头实现调压。当实际箱内温度值低于期望温度值，即 $\Delta U = U_1 - U_2 > 0$ 时，该温差信号经过电压和功率放大器放大后使直流伺服电机正转，调压器动触头右移，从而使电压上升，电流增大，恒温箱实际温度上升，热电偶输出电压 U_2 增大，偏差减小，直到 $\Delta U = U_1 - U_2 = 0$ ，电机停止转动。之后，电压不变，恒温箱温度保持恒定，实现了恒温箱温度的自动调节。当要求恒温箱温度降低时，调节电位器使给定电压 U_1 减小，这时由于实际温度高于期望值，即 $\Delta U = U_1 - U_2 < 0$ ，该温差信号经过电压和功率放大器放大后使直流伺服电机反转，调压器动触头左移，电压下降，电流减小，恒温箱实际温度下降，热电偶输出电压 U_2 减小，偏差减小，直到 $\Delta U = U_1 - U_2 = 0$ ，电机停止转动。之后，电压不变，恒温箱温度保持恒定，实现了恒温箱温度的自动调节。

人工控制和自动控制的恒温箱的控制原理极其相似：执行机构类似于人的手；测量装置类似于人的眼睛；控制器(恒压源、电位器和热电偶、电压放大器、功率放大器)类似于人的大脑。其共同特点是检测偏差并用偏差纠正误差。没有偏差就没有调整过程。在自动控制系统中，这一偏差是通过反馈与给定量建立起来的。给定量也叫控制系统的输入量，被控量也叫控制系统的输出量。因此基于反馈基础上的检测偏差并纠正误差的原理称为反馈原理。利用反馈原理的控制系统称为反馈控制系统。图 1-6 所示为恒温箱温度自动控制系统职能方框图，图中的 \otimes 表示比较元件，箭头代表信息传递的方向，各职能环节的作用是单向的，每个环节的输出是受输入控制的。从图中可以看出反馈控制的基本原理。总

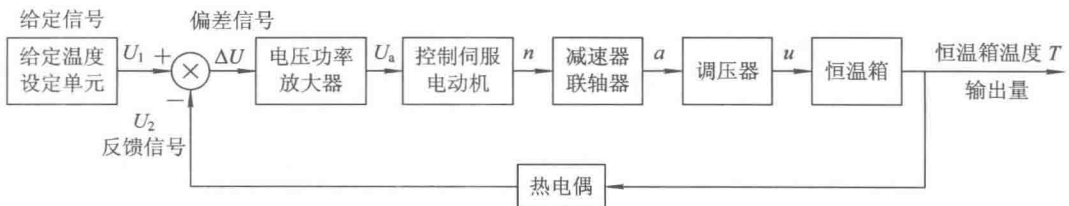


图 1-6 恒温箱温度自动控制系统职能方框图

之,实现自动控制的装置虽然各不相同,但反馈控制的原理是一样的,可以说反馈控制是实现自动控制的基本方法。

2. 飞机自动驾驶仪

作用在飞机上的力和力矩决定着飞机的运动,因此为了控制飞机的运动就必须控制作用在飞机上的力和力矩,使它们按所要求的规律进行改变。图1-7给出了驾驶员控制飞机的过程方框图。驾驶员一般是通过改变升降舵、方向舵、副翼和油门来改变作用在机体上的力和力矩,从而达到控制飞机运动的目的。

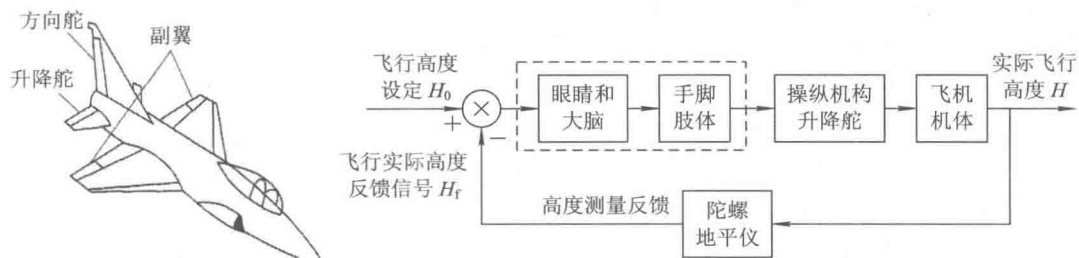


图1-7 驾驶员控制飞机的过程方框图

假设飞机做水平直线飞行,若飞机受阵风干扰偏离原状态,使得飞机抬头,驾驶员用眼睛观察到仪表盘上的陀螺地平仪的变化,用大脑作出决定,通过神经系统传递到手臂,推动驾驶杆使升降舵向下偏转,产生相应的下俯力矩,使飞机趋于水平状态。驾驶员从仪表盘上看到这一变化后,再逐渐把驾驶杆收回到原位。当飞机回到原水平状态时,驾驶杆和升降舵也回到原位。

从图1-7可以看出,这是一个反馈系统,即闭环系统,图中虚线表示驾驶员的职能,如果用自动驾驶仪代替驾驶员控制飞机飞行,那么自动驾驶仪必须包括虚线框内的两个相应部分的装置,并与飞机组成一个闭环系统,如图1-8所示。

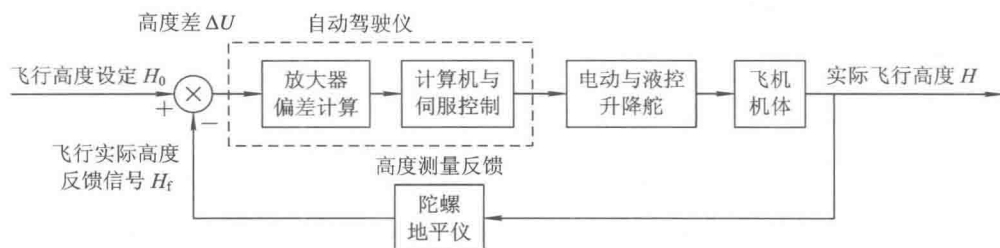


图1-8 自动驾驶仪的闭环系统

自动驾驶仪的工作原理如下:飞机偏离原始状态后,敏感元件接收到偏离方向和大小并输出相应的信号,经过放大整形及计算机处理后操纵执行机构(如舵机),使得某舵或副翼(例如升降舵面)相应偏转。整个系统是按负反馈原理控制的,因此其结果使得飞机趋于原始状态。当飞机回到原始状态时,敏感元件的输出信号为零,舵机以及与其相连接的舵面也回到原位,飞机重新按原始状态飞行。

1.1.3 机电控制系统的组成和相关信号

1. 闭环控制与开环控制

从自动控制的恒温箱和飞机自动驾驶仪的工作原理可以看出,输出量(被控量)全部或部分地返回到系统的输入端,与系统给定信号比较后产生偏差信号,进而对系统进行控制。这样的控制系统称为闭环控制系统。“闭环”的含义就是将被控量用反馈回路反馈到输入端,用给定信号与反馈信号之差控制系统使被控量达到或接近期望值。当系统由于受到干扰或系统内部参数变换或机械传动的间隙和非线性等因素的影响而使输出量偏离给定值时,可通过反馈测量元件检测出来,用偏差信号的调节作用控制系统误差,这是闭环系统的重要功能。闭环系统的突出优点是控制精度高,但不便于调整,容易产生振荡。

图 1-9 所示是用步进电机驱动的位置控制装置的工作框图。步进电机驱动器系统的主要特点是:上位机给步进电机驱动器一个脉冲,不管该脉冲频率是多少(不能超过最高频率),也不管该脉冲的脉宽是多少,步进电机都转过一个同样的步距角 α ,并且通过联轴器使滚珠丝杠也转过同样的角度 α ,则螺母带动滑台沿着直线导轨移动一定的距离,即脉冲当量 δ 。假设步进电机的步距角 α 是 1.5° ,那么驱动器要接收上位机发送来的 240 个脉冲,步进电机才能旋转 1 周即 360° ,而滚珠丝杠也要旋转 1 周,螺母才能沿着轴向移动一个螺距。若滚珠丝杠螺母副的螺距是 4 mm,则脉冲当量 δ 是 $1/60$ mm。若要求与螺母固定连接的控制滑台沿着直线导轨从零位正方向移动 100 mm,上位机应该给步进电机驱动器发送 $100/(1/60)=6000$ 个脉冲。这种控制的输出端和输入端之间不存在反馈回路,输出量只取决于给定输入量而对系统的控制作用没有影响。这样的控制称为开环控制。

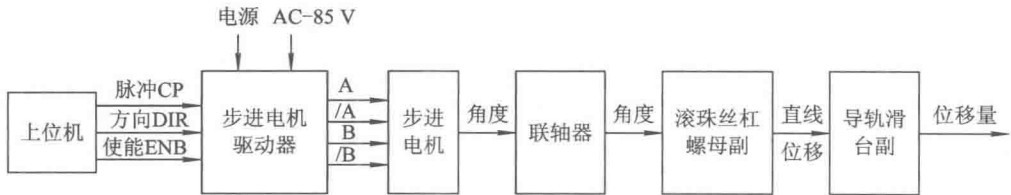


图 1-9 步进电机驱动的位置控制装置工作框图

上述这种位置控制装置,无法克服因联轴松动,滚珠丝杠、螺母副的非线性和反向间隙等对输出量的影响,控制精度较差。如果元件特性和参数比较稳定、外部干扰较小,这种系统可以保证一定的精度,其优点是结构简单,控制调整方便,稳定性较好。

当对整个系统的性能要求较高时,为了解决闭环控制精度和稳定性之间的矛盾,往往将闭环和开环结合在一起使用,即采用复合控制这一比较合理的选择。

2. 闭环控制系统的组成和相关信号

上述闭环控制系统,只是控制系统的基本形式,要想获得理想的控制效果,还必须增加其他有关元件。图 1-10 是一个典型的闭环反馈控制系统,该系统包括了以下元件或单元。

给定元件:主要用于产生给定信号或输入信号,与控制量有着对应的关系。

给定信号:给定元件产生的信号,如自动控制恒温箱中的恒压源 E 和电位器产生的 U_1 。

反馈元件:产生与输出量有着一定确切函数关系的反馈信号的元件或电路,如自动控

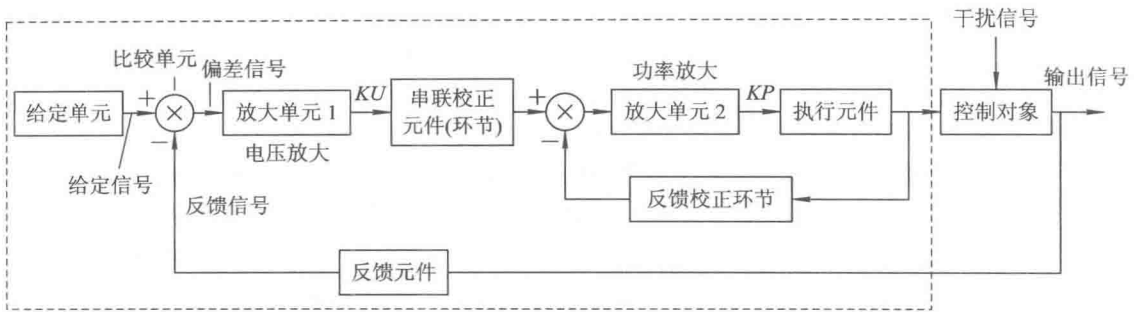


图 1-10 典型的闭环反馈控制系统框图

制恒温箱中的热电偶。

反馈信号：反馈元件产生的信号。

比较单元：实现给定信号与反馈信号比较的电路、单元或机构等。

偏差信号：给定信号与反馈信号比较后产生的信号。

放大元件：对偏差信号进行信号放大或功率放大的元件。

执行元件：直接对控制对象进行操作的元件，如电动机、减速器和调压器等。

控制对象：控制系统所要操纵的对象，即负载。它的输出量即为系统的输出量。例如，恒温箱中的电加热丝为控制对象，恒温箱的温度为输出量。

校正元件：或称校正装置，用于稳定控制系统，提高控制系统的动态性能，是一种附加措施，有串联校正和反馈校正等形式。

尽管一个控制系统由许多功能不同的元件所组成，但从总体上来看，比较元件、给定元件、放大元件、执行元件和反馈元件等共同起着控制作用，而剩余部分就是被控对象。因此，任何控制系统都是由控制部分和被控对象两部分组成的，图 1-10 中的虚线框包含的内容就是控制部分。

1.2 机电控制系统的基本要求

当自动控制系统用于不同的目的时，要求往往也不一样。但自动控制技术是研究各类控制系统共同规律的一门技术，对控制系统有共同的要求，一般可归结为稳定性、快速性和准确性 3 个方面。

1. 稳定性

由于系统存在惯性，当系统的各个参数分配不当时，将会引起系统的振荡而失去工作能力。稳定性就是指当系统输入信号突变或突遇干扰信号时，系统动态过程的振荡倾向和系统能否恢复平衡状态的能力，或者说系统的输出量在这种情形下短时间偏离原平衡状态后随时间收敛并且最后回到初始(或新的)平衡状态的能力。稳定性的要求是系统工作的首要条件。

2. 快速性

快速性是在系统稳定的前提下提出的。快速性是指系统跟随输入信号变化的快慢程度，也可以说当系统输出量与给定输入量之间产生偏差时，消除这种偏差的快慢程度。

3. 准确性

准确性是指在调整过程结束后实际输出量与期望输出量之间的误差,或称为稳态误差,这也是衡量系统工作性能的重要指标。如数控机床的稳态误差越小,其加工精度越高。而一般恒温和恒速系统的稳态误差都可以控制在给定值的 $\pm 1\%$ 以内。

由于受控对象的具体情况不同,各种系统对稳、准、快的要求各有侧重。例如,伺服系统对快速性要求较高,而调速系统则对稳定性有较严格的要求。

在同一系统中,稳、准、快是相互制约的。如快速性好,可能会产生强烈的振荡;而改善稳定性,控制过程有可能过于迟缓,精度也可能降低。分析和解决这些矛盾,也是本学科讨论的重要内容。对于机械传动系统来说,首要的是稳定性,因为过大的振荡会使部件过载而损坏;此外还要防止自激振荡,降低噪声,增加刚度等。这些都是控制理论研究的中心问题。

1.3 机电控制系统的分类

在实际工作中,可以从不同的角度对控制系统进行分类。根据信号传递路径可将控制系统分为开环控制系统和闭环控制系统;根据输入量的变化规律可将控制系统分为恒值控制系统、程序控制系统和伺服控制系统;根据系统传输信号对时间的关系可将控制系统分为连续控制系统和离散控制系统;根据系统的输出量和输入量之间的关系可将控制系统分为线性控制系统和非线性控制系统;根据系统执行部件的类型可将控制系统分为机电控制系统和液压与气动控制系统。为了了解控制系统的实质,下面按不同的研究方法,简要地说明不同类型控制系统的主要特点。

1. 根据信号传递路径分类

1) 开环控制系统

若系统的输出量不被引回到输入端对系统的控制部分产生影响,而是按照给定信号→放大单元→执行机构→控制对象→输出信号一个方向传送,那么这样的系统称为开环系统。例如,一般的洗衣机都是依设定的时间程序控制依次进行浸泡、洗涤、漂洗、脱水,而无需对输出量(如衣服是否清洗干净、脱水程度等)进行测量。

2) 闭环控制系统

若系统的输出量通过反馈环节全部或部分地反馈回来作用于控制部分,则形成闭环控制系统。前述的自动控制恒温箱、飞机自动驾驶仪和古老而简单的储槽液面自动调节器(老式的抽水马桶)等都属于闭环控制。

2. 根据输入量的变化规律分类

1) 恒值控制系统

恒值控制系统的输入给定信号是一个恒定值,并且要求在任何扰动作用下,系统的输出量仍能基本保持恒定,如液压系统中的恒压,电路系统的恒压源和恒流源,电力系统中的恒频率、恒电压、恒相位,原动机的恒速度等。

2) 程序控制系统

程序控制系统是指将输入量的变化规律编成程序,由该程序发出控制指令,在控制系