

高等学校教材



控制工程基础

王长松 吕卫阳 马祥华 齐昕 编著

高等教育出版社

高等学校教材

控制工程基础

Kongzhi Gongcheng Jichu

王长松 吕卫阳 马祥华 齐昕 编著

高等教育出版社·北京

内容提要

本书根据普通高等学校非自动化专业学生学习本课程的基本要求,主要从经典控制理论角度,论述了控制系统的研究和设计方法,主要内容包 括控制系统的动态数学模型、时域瞬态响应分析、频率特性分析、稳定性分析、根轨迹法、控制系统的设计与校正、计算机控制技术等。

本书着重阐明机电控制工程基本概念的建立和基本方法,简化或省略了与机电工程关系不大且深奥烦琐的数学推导。本书论述由浅入深,注重实例分析,便于自学,结合 MATLAB 的数值分析功能,使控制问题的分析研究数字化和形象化。一些繁复的数学运算可以利用 MATLAB 便利地完成,有助于引导学生在机电工程实际工作中应用。

本书可作为普通高等学校机械类和其他非自动化类工科专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础 / 王长松等编著. -- 北京:高等教育出版社, 2015.6

ISBN 978-7-04-042366-2

I. ①控… II. ①王… III. ①自动控制理论-高等学校-教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 060766 号

| | | | | | | | |
|------|-----|------|----|------|----|------|----|
| 策划编辑 | 卢广 | 责任编辑 | 卢广 | 封面设计 | 张志 | 版式设计 | 童丹 |
| 插图绘制 | 杜晓丹 | 责任校对 | 陈杨 | 责任印制 | 尤静 | | |

| | | | |
|------|-------------------|------|---|
| 出版发行 | 高等教育出版社 | 咨询电话 | 400-810-0598 |
| 社址 | 北京市西城区德外大街4号 | 网址 | http://www.hep.edu.cn |
| 邮政编码 | 100120 | | http://www.hep.com.cn |
| 印刷 | 北京凌奇印刷有限责任公司 | 网上订购 | http://www.landracom.com |
| 开本 | 787mm×1092mm 1/16 | | http://www.landracom.com.cn |
| 印张 | 27 | 版次 | 2015年6月第1版 |
| 字数 | 660千字 | 印次 | 2015年6月第1次印刷 |
| 购书热线 | 010-58581118 | 定价 | 41.80元 |

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 42366-00

前 言

本书是为机械类专业学生学习控制理论编写的,也适用于其他非自动化专业的学生以及工程技术人员。

本书是针对机械工程专业特点与要求,在总结作者数年教学经验的基础上,广泛参考和借鉴了国内外同类教材和其他有关著作而编写的。考虑到机械类专业学生的知识基础和特点,本书包括了拉普拉斯变换及反变换数学分析方法等内容。由于非自动化专业的控制理论课程学时较少,一般为32~52学时,而控制理论博大精深,不能奢望学生用较短学时全面系统掌握,本书以经典控制理论为主,着重阐明机电控制工程基本概念的建立和基本方法,不苛求研究方法的多元化和严格的数学推证,侧重于简洁和实用性,特别重视控制理论在机电工程领域的应用。本书论述由浅入深,附有较多机、电、液方面的例题,便于学生自学。为了开拓读者的视野,本书有部分拓展内容供选学,采用本书的学校可以根据本校专业特点及学时进行取舍。

本书注重利用MATLAB软件工具,使控制问题的分析研究数字化和图形化,一些繁琐的数学运算可以利用MATLAB便利地完成,有助于引导学生在今后机电工程实际中的应用。

本书共10章,由北京科技大学机械电子工程系王长松、吕卫阳、马祥华、齐昕编著,具体分工如下:第1章由中国石油大学(华东)赵小明编写,第2、3、5、6章由吕卫阳编写,第4、7章由齐昕编写,第8、9章由王长松编写,第10章由马祥华编写。

全书由新加坡国立大学机械工程系方玉顺教授主审。

在编写本书的过程中,参考了许多相关的优秀教材和著作,本书编者向参考文献的各位作者表示真诚的谢意。对于本书的错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2014年12月

目 录

| | | | |
|----------------------------|----|-------------------------|----|
| 第 1 章 概论 | 1 | 3.1.2 复变函数 | 31 |
| 1.1 控制工程概述 | 1 | 3.2 拉普拉斯变换的定义 | 31 |
| 1.2 自动控制系统的基本概念 | 2 | 3.3 几种典型函数的拉普拉斯变换 | 32 |
| 1.2.1 控制系统的工作原理 | 2 | 3.3.1 指数函数 | 32 |
| 1.2.2 反馈控制系统的组成 | 5 | 3.3.2 阶跃函数 | 32 |
| 1.3 控制系统的分类 | 6 | 3.3.3 斜坡函数 | 33 |
| 1.3.1 按反馈情况分类 | 6 | 3.3.4 正弦函数 | 33 |
| 1.3.2 按输入信号变化规律分类 | 7 | 3.3.5 幂函数 | 34 |
| 1.3.3 按系统的数学描述分类 | 8 | 3.3.6 脉冲函数 | 35 |
| 1.3.4 按系统内部的信号特征分类 | 8 | 3.4 拉普拉斯变换的基本性质和 | |
| 1.4 对控制系统的基本要求 | 9 | 定理 | 35 |
| 1.4.1 稳定性 | 9 | 3.4.1 线性性质 | 36 |
| 1.4.2 快速性 | 9 | 3.4.2 时域微分定理 | 36 |
| 1.4.3 精确性 | 10 | 3.4.3 时域积分定理 | 37 |
| 习题 | 10 | 3.4.4 时域延时定理 | 38 |
| 第 2 章 控制系统的微分方程 | 12 | 3.4.5 时域衰减定理 | 38 |
| 2.1 建立微分方程的一般步骤 | 12 | 3.4.6 时域尺度变换定理 | 39 |
| 2.2 一阶系统的微分方程 | 13 | 3.4.7 时域初值定理 | 40 |
| 2.2.1 比例控制系统的微分方程 | 13 | 3.4.8 时域终值定理 | 40 |
| 2.2.2 积分控制系统的微分方程 | 14 | 3.4.9 时域卷积定理 | 41 |
| 2.2.3 微分控制系统的微分方程 | 15 | 3.4.10 复微分定理 | 42 |
| 2.2.4 一阶惯性控制系统的微分 | | 3.5 拉普拉斯反变换 | 43 |
| 方程 | 16 | 3.5.1 拉普拉斯反变换的定义 | |
| 2.3 二阶系统的微分方程 | 17 | 和计算公式 | 43 |
| 2.4 高阶系统的微分方程 | 18 | 3.5.2 拉普拉斯反变换的部分 | |
| 2.5 应用 MATLAB 求解微分方程 | 20 | 分式展开法 | 43 |
| 2.6 非线性微分方程的线性化 | 24 | 3.6 应用拉普拉斯变换求解微 | |
| 习题 | 27 | 分方程 | 50 |
| 第 3 章 拉普拉斯变换 | 30 | 3.7 应用 MATLAB 进行部分分 | |
| 3.1 复变函数基础 | 30 | 式展开 | 52 |
| 3.1.1 复平面 | 30 | 习题 | 54 |
| | | 第 4 章 传递函数 | 56 |
| | | 4.1 传递函数的定义和性质 | 56 |

| | | | | | |
|-------|---------------------|-----|-------|---------------------|-----|
| 4.1.1 | 传递函数的定义 | 56 | 5.3.2 | 二阶系统的单位阶跃响应 | 117 |
| 4.1.2 | 传递函数的性质 | 56 | 5.3.3 | 二阶系统的单位脉冲响应 | 122 |
| 4.2 | 传递函数的特征方程、零点和极点 | 57 | 5.3.4 | 二阶系统的单位速度响应 | 124 |
| 4.2.1 | 特征方程、零点和极点 | 57 | 5.4 | 高阶系统的时间响应 | 127 |
| 4.2.2 | 极点和零点对输出的影响 | 58 | 5.4.1 | 高阶系统的单位阶跃响应 | 127 |
| 4.3 | 典型环节及其传递函数 | 58 | 5.4.2 | 主导极点和偶极子 | 130 |
| 4.4 | 系统方框图及其简化 | 66 | 5.5 | 控制系统的动态性能分析 | 131 |
| 4.4.1 | 系统方框图 | 66 | 5.5.1 | 控制系统时域动态性能指标的 定义 | 131 |
| 4.4.2 | 系统方框图的简化 | 73 | 5.5.2 | 二阶系统时域动态性能指标的 计算 | 132 |
| 4.4.3 | 系统信号流图和梅森公式 | 81 | 5.6 | 控制系统的稳态性能分析 | 136 |
| 4.4.4 | 考虑干扰的控制系统的传递函数 | 86 | 5.6.1 | 稳态误差的基本概念 | 137 |
| 4.5 | 控制系统传递函数推导实例 | 88 | 5.6.2 | 稳态误差的计算 | 138 |
| 4.5.1 | 机械系统 | 88 | 5.6.3 | 稳态误差系数 | 139 |
| 4.5.2 | 液压系统 | 92 | 5.6.4 | 扰动引起的稳态误差 | 144 |
| 4.5.3 | 有源电路网络 | 94 | 习题 | | 146 |
| 4.6 | 应用 MATLAB 表示与化简传递函数 | 95 | 第 6 章 | 控制系统的频率特性 | 148 |
| 4.6.1 | 传递函数的多项式表示 | 95 | 6.1 | 频率特性的基本概念 | 148 |
| 4.6.2 | 传递函数的零、极点表示 | 96 | 6.1.1 | 引例 | 148 |
| 4.6.3 | 连续系统的模型转换 | 96 | 6.1.2 | 频率特性的定义 | 150 |
| 4.6.4 | 结构图化简 | 97 | 6.1.3 | 频率特性的性质 | 155 |
| 习题 | | 99 | 6.1.4 | 频率特性的表示方法 | 156 |
| 第 5 章 | 控制系统的时间响应 | 106 | 6.2 | 频率特性的极坐标图 | 159 |
| 5.1 | 时间响应的基本概念 | 106 | 6.2.1 | 极坐标图概述 | 159 |
| 5.2 | 一阶系统的时间响应 | 107 | 6.2.2 | 典型环节的极坐标图 | 160 |
| 5.2.1 | 一阶系统的数学模型 | 107 | 6.2.3 | 一般系统的极坐标图 | 177 |
| 5.2.2 | 一阶系统的单位阶跃响应 | 108 | 6.2.4 | 极点和零点对极坐标图的影响 | 183 |
| 5.2.3 | 一阶系统的单位脉冲响应 | 109 | 6.3 | 频率特性的对数坐标图 | 188 |
| 5.2.4 | 一阶系统的单位速度响应 | 110 | 6.3.1 | 对数坐标图概述 | 188 |
| 5.2.5 | 一阶系统的单位加速度响应 | 111 | 6.3.2 | 典型环节的对数坐标图 | 191 |
| 5.2.6 | 线性定常系统时间响应的性质 | 112 | 6.3.3 | 一般系统的对数坐标图 | 209 |
| 5.3 | 二阶系统的时间响应 | 114 | 6.4 | 最小相位系统 | 213 |
| 5.3.1 | 二阶系统的数学模型 | 114 | 6.4.1 | 最小相位系统和非最小相位系统的定义 | 213 |
| | | | 6.4.2 | 最小相位系统和非最小 | |

| | | | |
|------------------------------|------------|-------------------------------|------------|
| 相位系统的极点限制条件 | 214 | 8.1.1 根轨迹 | 260 |
| 6.4.3 最小相位系统的特点 | 216 | 8.1.2 根轨迹方程及根轨迹满足 的相角、幅值条件 | 261 |
| 6.5 传递函数的实验确定方法 | 217 | 8.2 绘制常规根轨迹的基本法则 | 263 |
| 6.5.1 频率特性的实验测量方法 | 217 | 8.3 利用 MATLAB 绘制根轨迹图 | 267 |
| 6.5.2 根据频率特性确定传递 函数的步骤 | 218 | 8.4 根轨迹与系统稳定性 | 270 |
| 6.6 闭环系统的开环频率特性 | 220 | 8.4.1 增加开环零、极点对系统 稳定性的影响 | 270 |
| 6.6.1 开环传递函数与开环 频率特性的定义 | 220 | 8.4.2 开环零、极点抵消对系统 稳定性的影响 | 273 |
| 6.6.2 根据开环频率特性近 似分析闭环频率特性 | 222 | 8.5 系统闭环零、极点的分布与 性能指标 | 278 |
| 习题 | 224 | 8.5.1 闭环零极点分布与阶跃 响应的定性关系 | 278 |
| 第7章 线性系统的稳定性分析 | 228 | 8.5.2 利用主导极点估算系统 性能指标 | 280 |
| 7.1 稳定性的定义和条件 | 228 | 8.6 其他参量根轨迹图的绘制 | 285 |
| 7.2 劳思稳定性判据 | 230 | 习题 | 286 |
| 7.2.1 系统稳定的必要条件 | 230 | 第9章 控制系统的设计和校正 | 289 |
| 7.2.2 系统稳定的充分条件 | 230 | 9.1 概述 | 289 |
| 7.2.3 低阶系统的劳思稳定判据 | 231 | 9.1.1 系统的性能指标 | 289 |
| 7.2.4 两种特殊情况处理 | 232 | 9.1.2 连续系统带宽的确定 | 290 |
| 7.2.5 劳思判据应用于反馈系统 | 234 | 9.1.3 校正方式 | 290 |
| 7.3 奈奎斯特稳定性判据 | 235 | 9.2 PID 控制规律及其实现 | 292 |
| 7.3.1 幅角定理 | 235 | 9.2.1 比例(P)控制规律 | 292 |
| 7.3.2 奈奎斯特稳定性分析 | 237 | 9.2.2 比例-微分(PD)控制规律 | 293 |
| 7.3.3 由博德图判断系统的 稳定性 | 243 | 9.2.3 积分(I)控制规律 | 297 |
| 7.4 控制系统的相对稳定性 | 245 | 9.2.4 比例-积分(PI)控制规律 | 297 |
| 7.4.1 采用劳思判据估计系统的 相对稳定性 | 245 | 9.2.5 比例-积分-微分(PID)控制 规律 | 300 |
| 7.4.2 采用奈奎斯特判据度量系统 的相对稳定性 | 246 | 9.2.6 串联校正的特性比较 | 305 |
| 7.5 利用 MATLAB 分析系统 稳定性 | 250 | 9.3 用频率法进行串联校正 | 306 |
| 7.5.1 在时域分析系统的稳定性 | 250 | 9.3.1 概述 | 306 |
| 7.5.2 在频域分析系统的稳定性 | 251 | 9.3.2 系统期望开环对数频率 特性 | 307 |
| 习题 | 255 | 9.3.3 PD 或超前校正网络参数 的确定 | 313 |
| 第8章 根轨迹法 | 260 | | |
| 8.1 根轨迹与根轨迹方程 | 260 | | |

| | | | |
|----------------------------|------------|-----------------------|-----|
| 9.4 反馈校正 | 321 | 10.3 Z 变换 | 342 |
| 9.4.1 利用反馈校正改变局部结构和参数 | 321 | 10.3.1 Z 变换的定义 | 342 |
| 9.4.2 利用反馈校正取代局部结构 | 323 | 10.3.2 求 Z 变换的方法 | 343 |
| 9.5 复合校正 | 323 | 10.3.3 Z 变换的基本定理 | 347 |
| 9.5.1 按输入补偿(顺馈控制) | 323 | 10.3.4 Z 反变换 | 351 |
| 9.5.2 按干扰补偿(前馈控制) | 325 | 10.4 离散控制系统的数学模型 | 354 |
| 9.6 工程中确定 PID 参数的齐格勒-尼柯尔斯法 | 326 | 10.4.1 线性定常差分方程及其求解方法 | 354 |
| 9.6.1 齐格勒-尼柯尔斯第一法 | 327 | 10.4.2 脉冲传递函数 | 357 |
| 9.6.2 齐格勒-尼柯尔斯第二法(连续振荡法) | 327 | 10.5 离散系统的稳定性及稳态误差 | 366 |
| 9.6.3 1/4 衰减法 | 328 | 10.5.1 离散系统的稳定性分析 | 367 |
| 9.7 MATLAB 在系统综合校正中的应用 | 328 | 10.5.2 离散系统的稳态误差 | 373 |
| 习题 | 330 | 10.6 离散系统的动态性能分析 | 375 |
| 第 10 章 计算机控制技术 | 334 | 10.6.1 离散系统的时间响应 | 376 |
| 10.1 计算机控制系统概述 | 334 | 10.6.2 闭环极点与动态响应的关系 | 377 |
| 10.1.1 计算机控制系统的组成 | 334 | 10.7 离散系统的设计 | 380 |
| 10.1.2 计算机控制系统特点 | 335 | 10.7.1 离散系统的模拟化设计 | 380 |
| 10.1.3 计算机控制系统优点与问题 | 335 | 10.7.2 数字 PID 控制器 | 385 |
| 10.2 采样与保持 | 336 | 10.7.3 离散系统的数字校正 | 391 |
| 10.2.1 计算机控制系统中信号的处理及传递过程 | 336 | 习题 | 395 |
| 10.2.2 采样 | 337 | 附录 拉普拉斯变换表 | 398 |
| 10.2.3 保持器 | 340 | 习题参考答案 | 402 |
| | | 参考文献 | 421 |

第1章 概 论

目前,自动控制技术已渗透到人们生活的各个领域,成为工程技术人员和科技工作者必须掌握的基础理论。通过本章的学习,主要了解自动控制理论的发展概况、自动控制的基本原理与方式、控制系统的分类及对控制系统的基本要求。

1.1 控制工程概述

控制工程基础课程是有关自动控制技术的基础课程。自动控制理论是一门多学科性的技术科学,控制理论的发展可追溯到1788年,瓦特在发明蒸汽机的同时,发明了离心式调速器使蒸汽机转速保持恒定,这是最早用于工业的自动控制装置。在第二次世界大战期间,由于对诸如飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统以及其他基于反馈原理的军用装备等的设计与制造的强烈需求,进一步促进并完善了自动控制理论。1948年,美国科学家维纳(N. Wiener)所著《控制论》的出版,标志着自动控制理论体系(即所谓的经典控制理论)已基本形成,经典控制理论以传递函数为基础,以频域法为主要研究方法,研究单输入-单输出的线性定常系统的分析和设计问题。

20世纪50年代以后,是控制论的发展时期,一方面,火炮及导弹控制技术得到极大的发展,数控、电力、冶金自动化技术突飞猛进;另一方面,控制理论也日渐成熟。1954年,我国科学家钱学森在美国运用控制论的思想和方法,出版了《工程控制论》,把控制理论推广到工程技术领域。以后又相继出现了生物控制论、经济控制论和社会控制论。

20世纪50年代末到60年代初,控制工程又出现了一个迅猛发展时期,这是由于导弹制导、数控技术、空间技术发展的需要及计算机技术的发展,控制理论发展到了一个新阶段,产生了现代控制理论。现代控制理论是以状态空间分析法为基础,主要分析和研究多输入/多输出、时变、非线性、高精度、高效能等控制系统的设计和分析问题。

从20世纪70年代之后,一方面现代控制理论继续向深度和广度发展,出现了一批新的控制方法和理论,如最优控制、最佳滤波、系统辨识和随机控制、自适应控制理论和方法、鲁棒控制(稳健控制)方法及预测控制方法等。另一方面随着控制理论应用范围的扩大和计算机技术的突飞猛进,发展到对若干相互关联的子系统组成的大系统进行整体控制,从传统的工程领域拓展到包括经济管理、生物工程、能源、运输、环境等大型系统以及社会科学领域,人们开始了对大系统理论的研究。智能控制理论则是在近二三十年发展起来的新型控制理论。它从“仿人”的角度出发,主要研究具有人工智能的工程控制和信息处理问题,指导思想是依据人的思维方式和处理问题的技巧,解决那些传统上需靠人的智能才可能解决的问题,有着极其引人注目的发展前景。

如今控制理论已经渗透到人类社会等各个领域,并伴随着其他科学技术的发展,极大地改变了整个世界。控制理论主要研究两方面的问题。

(1) 分析。在系统的结构和参数已经确定的条件下,对系统性能进行分析,并提出改善性能的途径。

(2) 综合。根据系统需要实现的任务,给出稳态和动态性能指标,要求建成一个系统并确定适当的参数,使系统满足已给定的性能指标。

本书重点讲述经典控制理论的内容。通过本书的学习,学生可对自动控制系统的工作原理、数学模型、系统的校正和调试等方面有一个较系统性的认识,掌握自动控制系统的一般分析方法,为进一步掌握不断发展的各种先进控制理论和从事控制工程技术工作建立初步但十分必要的理论基础。

1.2 自动控制系统的基本概念

所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,借助外加的设备和装置(一般称为控制装置或控制器),使机器、设备或生产过程(称为被控对象)的工作状态或某些参量(即被控量)自动地按照预定的规律变化。例如,数控车床按照预定程序自动地切削工件;机器人按照预定要求自动进行操作;化学反应炉温度或压力的自动调整;雷达和计算机组成的导弹发射和制导系统自动地引导导弹准确击中敌方目标;无人驾驶飞机按照预定航向自动起降和飞行等。为了实现上述的控制目的,把相互联系和制约的各部分按一定规律组合成具有特定功能的整体,这就是自动控制系统。自动控制系统如何实现?其控制原理又是什么?下面以实例来说明。

1.2.1 控制系统的工作原理

以恒温控制系统为例,实现恒温控制有两种方法:人工控制和自动控制。图 1.1 所示为人工控制的恒温箱。控制目的:克服外来干扰(如电源电压的波动、环境温度变化等),保持恒温箱内的温度恒定在某个给定的希望值上。操作者可通过调压器改变加热电阻丝的电流来达到这个目的,而箱内温度是由温度计测量的。

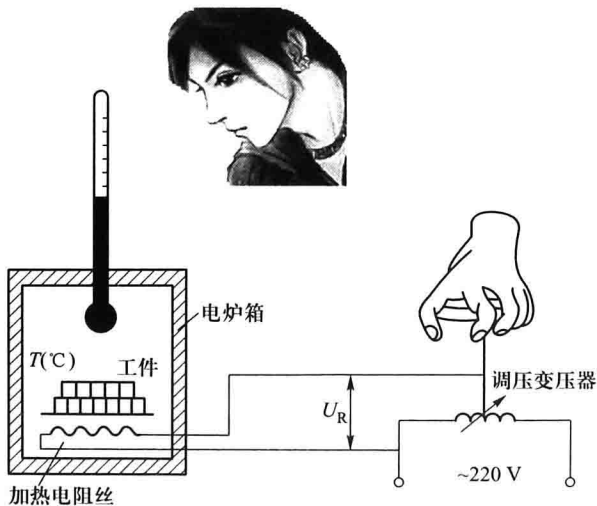


图 1.1 人工控制的恒温箱示意图

人工控制恒温箱的调节过程如下：

(1) 人用眼睛观测由测量元件(温度计)测出的恒温箱内的温度(被控量)。

(2) 人的大脑将测出的恒温箱内的温度与要求的温度值(给定值)进行比较,得出偏差的大小和方向。

(3) 人再根据偏差的大小和方向进行调节。当恒温箱内的温度值高于所要求的温度值时,用手调整调压器,使通过加热电阻丝的电电流减小,温度就会降低;若温度低于所要求的温度值,则反向调整调压器,使电流增大,温度升高到正常范围。

从上述调节过程可看出,人工控制的过程就是测量、求偏差、再控制以纠正偏差的过程,简单地说就是“检测偏差,再纠正偏差”的过程。

这种人工控制过程要求操作者随时观察恒温箱内温度的变化情况,随时进行调节。如果能找到一个控制器来代替人的职能,就可以把人工控制系统变成一个自动控制系统。

图 1.2 即为恒温箱的自动控制系统示意图。其中,恒温箱所需温度由电压信号 u_1 给定。当外界因素引起箱内温度变化时,作为测量元件的热电偶就会把测得的箱内温度转换成对应的电压信号 u_2 ,并反馈回去与给定信号 u_1 进行比较,所得结果即为偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。偏差信号经电压放大、功率放大后,用以改变执行电动机转速和旋转方向,并通过减速器等传动装置拖动调压器的触头。若箱内温度高于给定温度时,调压器的触头向着减小电流的方向运动;反之,则加大电流,直到偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2 = 0$,即箱内温度值与给定温度值一致时,电动机才停止转动,这样就完成了所要求的控制任务。

分析图 1.1 的人工控制的恒温箱和图 1.2 自动控制的恒温箱的工作过程,可以看出,自动控制系统与人工控制系统非常相似。在自动控制系统中,测量装置就相当于人的眼睛,控制器则类似于人的大脑,执行机构好比人的手。在控制过程中,它们的共同点都是要检测偏差,再根据检测到的偏差去纠正偏差。没有偏差就不会有控制调节过程。

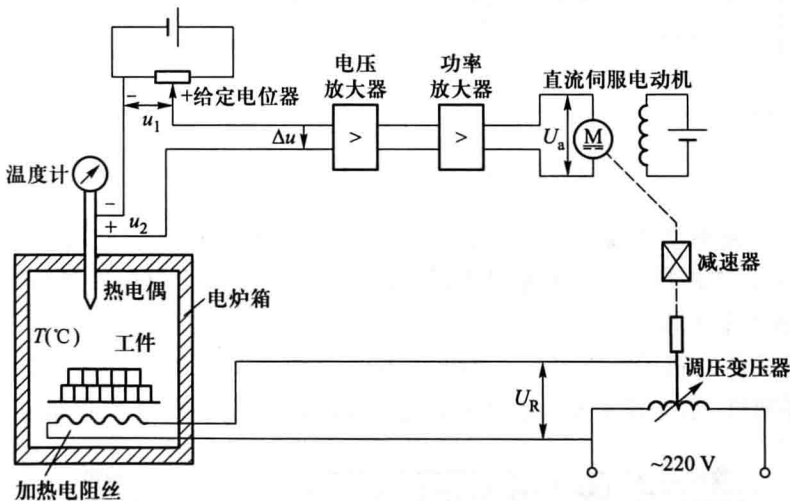


图 1.2 恒温箱的自动控制系统示意图

在自控系统中,这一偏差是通过反馈建立起来的。在控制系统中,给定量又称为输入量,被控制量又称为输出量。反馈就是指输出量的全部或一部分取出再返回到输入端,与输入量进行

比较(如果输出量和输入量不是同一种物理量,则输出信号必须经过适当的器件变换为与输入量相同的物理量),比较的结果称为偏差。

综上所述,控制系统的工作原理可归纳如下:

- (1) 通过测量元件检测输出量的实际值;
- (2) 将输出量的实际值与给定值(输入量)进行比较,得到偏差信号;
- (3) 用偏差值产生的控制调节作用消除偏差。

这种基于反馈原理,通过“检测偏差,利用偏差纠正偏差”的系统称为反馈控制系统。显然,作为反馈控制系统,至少应具备检测、比较(或计算)和执行三个基本功能。

研究自动控制系统(以恒温控制系统为例),首先必须解决如下四个问题:

(1) 控制目的。恒温控制系统的控制目的是:克服外来干扰,保持恒温箱内的温度恒定在某个给定的希望值上。这个希望值就是系统的输入信号(输入量)。

(2) 被控对象。恒温控制系统的被控对象是恒温箱。

(3) 输出信号(被控量)。描述被控对象行为、状态特征的某个物理量。输出信号是受输入信号控制的信号,总是要求它随输入信号的变化而变化。恒温控制系统的被控量为箱内温度。

(4) 输出信号的检测。采用各种检测装置(如传感器)将输出物理量转换为电信号。图 1.1 中人工控制的恒温箱是通过观测温度计来检测实际温度的。

恒温箱自动控制系统的控制过程可以用如图 1.3 所示的职能框图表示。图 1.3 中,⊗代表比较元件;→代表信号的传递及方向;□为职能框,代表一个环节,每个环节的作用是单向的,其输出受输入控制。从图 1.3 恒温箱自动控制系统职能框图可清楚地看到反馈控制的基本原理。

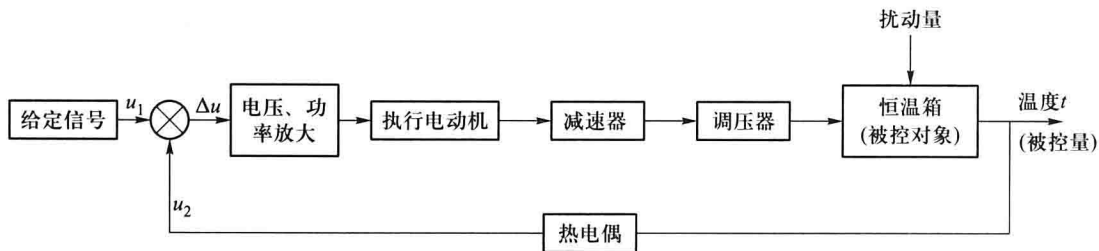


图 1.3 恒温箱自动控制系统职能框图

各种不同的控制系统实现自动控制的装置可以各不相同,但反馈控制的原理却是相同的。可以说,反馈控制是实现自动控制的最基本的方法。下面再举两个反馈控制的例子。

1) 汽车驾驶控制系统

人与汽车构成的控制系统如图 1.4 所示,司机通过观察交通和道路情况并适当地操纵加速踏板、离合器、变速杆、制动器和方向盘等来确定和控制汽车的路线、速度和加速度。

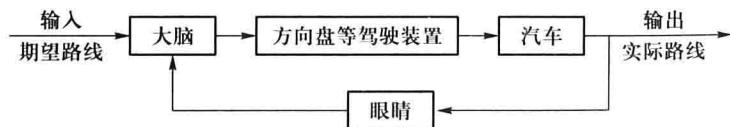


图 1.4 人工驾驶系统示意图

假如司机想要保持 100 km/h 的速度(期望的输出),他借助于加速踏板将汽车加速到此速度,而后通过保持加速踏板位置不变来维持这个速度。只要路况不变和没有其他干扰,就不致出现汽车的速度误差。汽车的实际速度通过车速表测量,并显示在速度表盘上。司机观察速度表盘,并将实际的速度与他期望达到的速度比较,若与所期望的速度有偏差,那么他相应地决定提高或降低速度,这个决定通过改变他的脚在加速器踏板上的压力来完成。如果遇到弯路,司机要按估算的角度转动方向盘,遇到避让或超车,则需要更复杂的观察、判断和驾驶操作。

近年来,国内外都在进行无人驾驶车辆的研究,用自动控制系统代替司机驾驶。用雷达、激光器和摄像头代替人的视觉,用 GPS 引导路径,由计算机控制的自动驾驶装置代替人的驾驶。2012 年,谷歌宣布该公司研发的十余辆无人驾驶汽车已经在计算机的控制下安全行驶了 48 万多千米。同年,由我国军事交通学院研制的无人驾驶汽车,也实现了复杂高速公路环境下,从北京台湖收费站到天津东丽收费站的实测测试,最高时速达 105 km,超车共 33 次。这仅仅是国内外方兴未艾的无人驾驶智能汽车研究进程的两个实例。

2) 液位控制系统

水箱水位控制系统简化后如图 1.5 所示。该系统的控制任务是将水箱的液面维持在一定高度。从图中可以看出,水箱是被控对象,水箱液位是被控制量,浮球顶杆(杠杆)的长度(表征液位的期望值)是给定量。杠杆平衡时,控制进水阀门位于某一位置而具有一定开度,使水箱中输入水量 q_i 与流出水量 q_o 相等,从而使液位保持在期望高度 h 上。当液位降低时,浮球位置也随之降低,这时,通过杠杆机构使水阀阀门开度增大,进入水箱的水流量增大,水箱中液面随之上升,浮球位置也随之上升,使水阀阀门开度减小,进水增加量减小,直至系统处于新的平衡状态。反之,若水箱液位上升,系统会自动减小阀门开度,从而减少流入的水量,使液位降低,直至达到新的平衡位置。

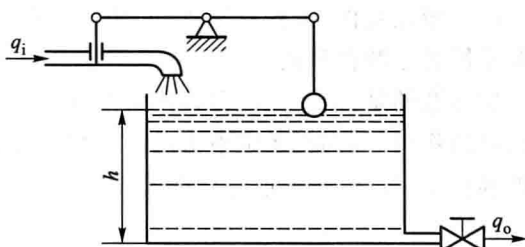


图 1.5 液位控制系统结构示意图

1.2.2 反馈控制系统的组成

图 1.6 所示为一典型的反馈控制系统框图。该框图表示了控制系统各元件在系统中的位置和其相互间的关系。一个典型的反馈控制系统,应包括给定元件、反馈元件、比较元件、放大元件、执行元件、被控对象及校正元件等。

(1) 给定元件 产生系统的给定(输入)信号的元件,如调速系统的给定电位计。

(2) 反馈元件 该元件的功能是对系统输出量的实际值进行测量,将它转换成反馈信号,并使反馈信号变为与给定输入信号同类型、同数量级的物理量。一般来说,主反馈信号多为电信号,因此反馈元件通常是一些用电量来测量非电量的元件,如各种传感器。

(3) 比较元件 用来接受输入信号和反馈信号并进行比较,产生偏差信号的环节,如电压比较电路、平衡电桥等。

(4) 放大元件 对偏差信号进行信号放大或功率放大的元件,例如电压放大器、功率放大器、电液伺服阀等。放大元件的输出要有足够的能量,才能驱动执行元件,实现控制功能。

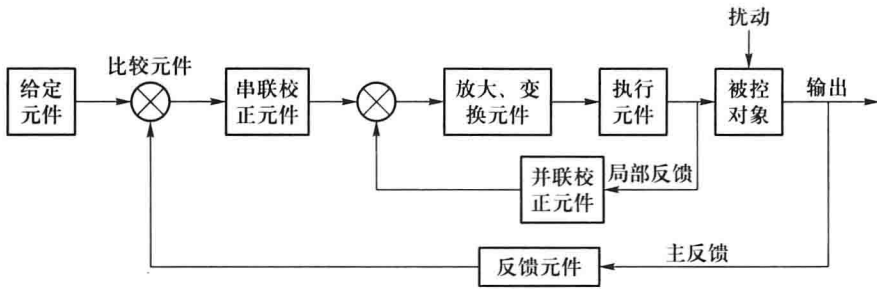


图 1.6 典型反馈控制系统框图

(5) 执行元件 在控制信号作用下,进行功率放大(功率流、物质流、信息流从该环节进入系统),直接推动被控对象,使被控制量发生变化的环节,如晶闸管整流装置、液压缸、电动机等。

(6) 被控对象 控制系统所要控制的设备或生产过程,它的输出量就是被控制量,如机床、工作台等。

(7) 校正元件(或校正装置) 用以稳定控制系统,提高控制性能的环节。校正分为并联校正和反馈校正两种形式。

应注意的是,上述元件在具体工作时不一定是各自独立的,可能是一个实际器件同时担负几个元件的作用。例如,系统中常用的运算放大器,往往同时起着比较元件、放大变换元件及校正元件的作用;反之,也可能是几个实际器件共同担负一个元件的作用。

1.3 控制系统的分类

控制系统的种类很多,在实际工程中,可以从不同的角度对控制系统进行分类。

1.3.1 按反馈情况分类

工业上实际的控制系统,根据有无反馈控制作用可分为开环控制系统、闭环控制系统和半闭环控制系统三类。

(1) 开环控制系统

如果系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路,输出量对系统的控制作用没有影响,这样的系统称为开环控制系统。图 1.7 所示的数控机床的控制系统,由于没有反馈回路,所以是一个开环控制系统,系统的输出量仅受输入量的控制。

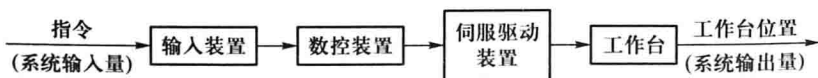


图 1.7 数控机床的开环控制系统

开环控制系统用一定输入量产生一定的输出量,如果由于某种干扰作用(如电源波动、温度变化等)使系统输出量偏离原始值,由于它没有自动纠偏的能力,要进行补偿,得再借助人工改

变输入量,所以开环系统的控制精度较低。如果组成系统的元件特性、参数比较稳定,外界干扰影响较小,则用开环控制也可保证一定的精度。开环控制系统的优点是系统简单,不易失稳,对于精度要求不高的系统可采用这种控制方式。

(2) 闭环控制系统

如果系统的输出端和输入端之间存在着反馈回路,输出量对控制过程产生直接影响,这种系统称为闭环控制系统。图 1.2 所示的恒温箱自动控制系统就是闭环控制系统。闭环控制的作用就是利用反馈来纠正偏差,所以反馈控制系统必是闭环控制系统。

闭环控制系统的优点是控制精度高,不管遇到什么干扰,只要被控制量的实际值偏离给定值,闭环控制就会产生控制作用来减少这一偏差。但闭环控制系统也有它的缺点。由于这类系统是靠偏差来进行控制的,因此控制的执行与偏差是直接关联的,在偏差消除那一刻控制也暂停,若系统元件的参数配置不当,则因元件的惯性会引起超调,严重时甚至可能引起系统的振荡,使系统不稳定而无法工作,因此在闭环控制系统中需解决好精度与稳定性之间的矛盾。

(3) 半闭环控制系统

如果控制系统的反馈信号不是直接从系统的输出端引出,而是间接地取自途径中间的测量元件,则这种系统称为半闭环控制系统,例如在数控机床的进给伺服系统中,将位置检测装置安装在传动丝杠的端部,间接测量工作台的实际位移。半闭环控制系统的控制精度可以比开环控制系统更高,却比闭环系统要低,但比闭环系统较易实现系统的稳定。

需要说明的是,有些机械动力学系统表面上没有反馈环节,却也可以用具有反馈的方框图来表达,但这个反馈并非人为添加,而是这些机械系统所固有的,一般来说这不叫反馈控制系统,但它可以用反馈控制理论来分析,可认为它是存在内反馈的反馈系统。

1.3.2 按输入信号变化规律分类

按输入信号变化规律分,控制系统可分为恒值控制系统、程序控制系统、随动系统。

(1) 恒值控制系统

恒值控制系统的输入量是一恒定值,输入量一经给定,在运行过程中就不再改变。恒温度、恒压力、恒定液面等对保持参数不变的控制都属于恒值控制。这种系统的任务是保证在任何干扰作用下,维持系统的输出量为恒定值。对于恒值控制系统,分析的重点在于克服扰动对被控量的影响。

(2) 程序控制系统

当输入量为已知给定的时间函数时,这种系统称为程序控制系统。这种系统的输入量不为常数,但其变化规律是预先知道的,故可预先把输入量的变化规律编成程序,由该程序发出控制指令,在输入装置中再将控制指令转换成控制信号,经过全系统的作用,使被控对象按指令的要求而运动。图 1.8 所示是一套用于机床切削加工的程序控制系统。图中,指令脉冲是由输入装置根据编制的程序而发出的。

工业生产中的过程控制按生产工艺的要求编制成特定的程序,由计算机来实现其控制,这是近年来迅速发展起来的数字程序控制系统和计算机控制系统。微处理器控制将程序控制系统推向更普遍的应用领域。

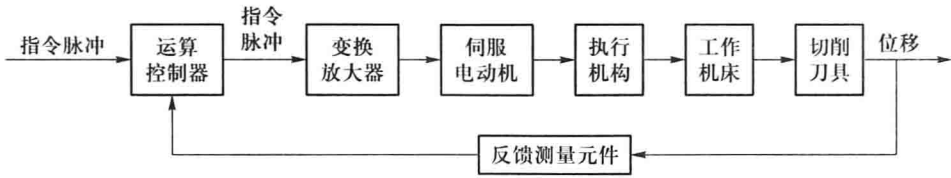


图 1.8 机床切削加工的程序控制系统

(3) 随动系统

随动系统的输入量是未知的,即给定量变化规律是不能预先确定的。当输入量发生变化时,则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(此即伺服的含义)。控制指令由操作者根据需要随时发出,也可以由目标物或相应的测量装置发出,如火炮自动瞄准系统、导弹目标自动跟踪系统及机械加工中的液压仿形机床等均属随动系统。在工业部门,这种系统大多用来控制机械位移及速度,故也把随动系统称为伺服控制。

1.3.3 按系统的数学描述分类

按系统的数学描述分类,控制系统可分为线性控制系统、非线性控制系统

(1) 线性控制系统

能用线性微分方程描述的系统,称为线性控制系统。线性系统的重要特点是满足叠加原理。

叠加原理包含叠加性和齐次性(或均匀性)。所谓叠加性是指作用于线性系统的多个输入信号的总响应等于各个输入信号单独作用时产生的响应的代数和。所谓齐次性是指如果输入信号 $r(t)$ 作用于线性系统引起响应 $y(t)$,那么在 $kr(t)$ 的作用下,该系统的响应也变为 $ky(t)$,在这里, k 为常数。

如果线性微分方程所有系数均为不随时间变化的常数,则称此系统为线性定常(时不变)系统;若有系数(即使只有一个)为随时间变化的函数,则称此系统为线性时变系统。

(2) 非线性控制系统

不能用线性微分方程描述的系统,称为非线性控制系统。非线性系统的重要特点是含有(即使只有一个)非线性元件,它的输入/输出关系要用非线性微分方程描述。

1.3.4 按系统内部的信号特征分类

按系统内部的信号特征分类,控制系统可分为连续控制系统和离散控制系统。

(1) 连续控制系统

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。在连续控制系统中根据系统能否用线性微分方程描述又可分为线性控制系统和非线性控制系统。

(2) 离散控制系统(或数字控制系统)

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。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机实现,计算机的输出信号经 D/A 转换传送给伺服放大器,然后再驱动执行元件;或由计算机直接输出数字信号,经数字放大器后驱动数字

式执行元件。

此外,按系统组成元件的物理性质还可以分为电气控制系统、机械控制系统、液压控制系统、气动控制系统、机电控制系统等。

1.4 对控制系统的基本要求

当自动控制系统受到各种干扰(扰动)时,被控量就会发生变化而偏离给定值。通过系统的自动控制作用,经过一定的过渡过程,被控量又恢复到原来的稳定值。当系统的给定值(参考输入量)发生改变时,通过系统的自动控制作用,经过一定的过渡过程,被控量也会稳定到这一新的给定值。当系统从原来的平衡状态过渡到一个新的平衡状态时,一般把被控量在变化过程中的过渡过程称为动态过程,即随时间变化而变化的过程,而把被控量处于平衡状态称为静态或稳态。

控制系统应用于不同场合和目的,要求也往往不同。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,故对控制系统有共同的要求,即稳定、精确、快速,简言之,就是“稳、准、快”三个字。

1.4.1 稳定性

稳定性是对控制系统的首要要求。由于控制系统都包含有储能元件,存在惯性,当系统的各个参数匹配不当时,将会引起系统的振荡而失去工作能力。稳定性就是指动态过程的振荡倾向和系统能否恢复平衡状态的性能。对于稳定的系统,当输出量偏离平衡状态时,偏离量应该随着时间收敛并且最后回到初始的平衡状态。

一个控制系统要能起控制作用,稳定性是对系统最基本的、第一位的要求,而且必须满足一定的稳定裕量,这样当系统参数受干扰或环境影响发生小范围内的变化时,也能够使系统保持稳定的工作状态。

1.4.2 快速性

快速性是在系统稳定的前提下提出的。所谓快速性是指当系统的输出量与输入量之间产生偏差时,消除这种偏差的快慢程度。

由于系统的被控对象和元件通常都具有一定的惯性(如机械惯性、电磁惯性、热惯性等),再加上能源功率的限制,系统的各种量值(如速度、位移、电流、温度等)的变化不可能是突变的。因此,系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态都需要一定的时间,或者说要经历一个过渡过程。

表征过渡过程的性能指标称为动态指标。动态指标的最主要指标就是反映快速性的指标,即过渡过程调整时间以及上升时间、峰值时间;此外动态指标中还包括反映过渡过程平稳性的指标,即最大超调量、振荡次数。

动态指标通常用系统在阶跃信号(作为给定量)的作用下系统的动态响应来评价。

快速性好的系统消除偏差的过渡过程时间短,也就能复现快速变化的输入信号,因而具有较