

高等学校教材

控制工程基础

孙志毅 李虹 陈志梅 赵志诚 编著

陈志新 主审



机械工业出版社

本书介绍了经典控制理论的基础知识。主要内容包括自动控制的基本概念,自动控制系统的数学模型,线性连续系统的时域分析,频域分析和根轨迹分析方法,线性连续系统的综合方法,非线性系统的相平面分析和描述函数分析方法,最后介绍了离散系统的分析和综合方法。与以上内容紧密结合,本书还介绍了 MATLAB 辅助控制系统分析和设计的方法。

为了便于自学,在各章均列举了大量的例题,并设计了练习与习题。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及自动化以及相关专业的教材,也可供企业和科研单位的有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础/孙志毅等编著. —北京:机械工业出版社, 2004.10
高等学校教材

ISBN 7-111-15334-0

I. 控... II. 孙... III. 自动控制理论—高等学校—教材
IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 098996 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:闫晓宇 于苏华 王保家 贡克勤 版式设计:冉晓华

责任校对:李秋荣 策划编辑:闫晓宇

封面设计:解辰 责任印制:李妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·21.5 印张·529 千字

定价 32.00 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

封面无防伪标均为盗版

序

在国家教育部批准“太原重型机械学院”更名为“太原科技大学”的喜庆日子里,我校的专家学者出版这套学术丛书,让我们共同分享这些最新研究成果。

52年前,新中国刚刚成立不久,为了迎接国家经济建设高潮的到来,一所以培养机械工业高级专门技术人才为主的学校在华北大地诞生。从此,她伴随着祖国经济建设的蓬勃发展和时代前进的步伐,历经半个多世纪的风风雨雨,由小变大,由弱变强,现已发展成为一所以工为主,理、工、文、管、经、法、教育门类较为齐全、协调发展、特色鲜明的多科性大学。过去50多年来,太原重型机械学院为国家培养了大批高素质的各类创新人才,他们正奋战在祖国建设的各条战线上。今天,为了适应市场经济和高等教育发展的需要,这所曾经为共和国重工业发展做出过重要贡献的知名学院,正式更名为太原科技大学。不言而喻,这是太原重型机械学院办学实力不断增强、水平不断提高的明证,也是太原科技大学走向美好明天的开始。

浓郁的学术氛围是母校保持的优良传统。众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘、硕果累累,为神圣的科技教育事业和祖国的社会主义现代化建设做出了新的贡献。这套丛书的编撰出版,定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享母校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。
谨以为序。

太原科技大学校长 郭勇义
二〇〇四年六月十日

前 言

本书是作者在多年从事自动控制理论教学与研究的实践基础上,总结多年的教学经验,结合 MATLAB 现代计算机辅助分析与设计手段编写而成。考虑到本科教学现状和发展需要,主要介绍经典控制理论基础以及利用 MATLAB 辅助控制系统分析与设计等内容。全书内容主要包括了线性连续系统、离散控制系统、非线性系统的基础理论、基本分析方法和综合方法。

第一章介绍自动控制的基本概念、自动控制系统的分类及特点;第二章介绍自动控制系统的数学模型;第三、第四、第五章主要介绍线性连续系统的时域分析、频域分析和根轨迹分析方法;第六章介绍线性连续系统的综合方法;第七章主要介绍非线性系统的相平面分析和描述函数分析方法;第八章介绍离散系统的分析和综合方法,各章均有一定的独立性。鉴于 MATLAB 已成为当前应用最为广泛的控制系统分析与设计的工具,本书在讲述各章节内容的同时,与内容紧密结合介绍 MATLAB 辅助控制系统分析和设计的方法,既保证了以控制理论为主线,又可以通过上机操作加深读者对控制理论的理解和掌握,增强学习效果。为了不使篇幅过长,将控制系统分析的常用 MATLAB 命令以及使用方法列为附录,以便读者查阅。为了便于自学,在各章均列举了大量的例题,并设计了练习与习题。全书力求深入浅出、突出重点、联系实际。

本书第二、第三章由赵志诚编写,第四、第五、第六章由李虹编写,第七、第八章由陈志梅编写,其余由孙志毅编写,并负责全书的统稿工作。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及自动化以及相关专业的教材,也可供企业和科研单位的有关技术人员参考。

由于作者学识水平有限,书中错误与不妥之处在所难免,恳请各位专家与读者批评指正。

作 者

二〇〇四年八月

目 录

| | | | |
|--------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 前言 | | 第二节 绘制根轨迹图的一般规则 | 104 |
| 第一章 自动控制的基本概念 | 1 | 第三节 非典型形式系统根轨迹的绘制 | 115 |
| 第一节 自动控制的提出 | 1 | 第四节 增加开环零、极点对根轨迹的影响 | 126 |
| 第二节 控制系统分类 | 3 | 第五节 根轨迹分析法应用实例 | 129 |
| 第三节 对自动控制系统的基本要求 | 7 | 第六节 MATLAB 在控制系统根轨迹分析中的应用 | 135 |
| 第四节 控制工程基础研究的主要内容 | 8 | 小结 | 139 |
| 小结 | 9 | 习题四 | 140 |
| 习题一 | 9 | 第五章 自动控制系统的频域分析 | 144 |
| 第二章 自动控制系统的数学模型 | 10 | 第一节 频率响应及频率特性的基本概念 | 144 |
| 第一节 控制系统微分方程的建立 | 10 | 第二节 典型环节的频率特性 | 149 |
| 第二节 传递函数 | 22 | 第三节 开环系统的对数频率特性图 | 157 |
| 第三节 结构图及其等效变换 | 30 | 第四节 开环系统的极坐标频率特性图 | 162 |
| 第四节 信号流图 | 40 | 第五节 奈奎斯特稳定判据 | 164 |
| 第五节 脉冲响应函数 | 45 | 第六节 控制系统的相对稳定性和稳定裕量 | 173 |
| 第六节 传递函数描述与转换的 MATLAB 方法 | 46 | 第七节 开环频率特性与控制系统时域性能的关系 | 177 |
| 小结 | 49 | 第八节 闭环频域性能指标与系统性能的关系 | 181 |
| 习题二 | 49 | 第九节 MATLAB 在控制系统频域分析中的应用 | 187 |
| 第三章 自动控制系统的时域分析 | 52 | 小结 | 192 |
| 第一节 线性定常系统的时域响应 | 52 | 习题五 | 193 |
| 第二节 线性定常系统的稳定性 | 56 | 第六章 自动控制系统校正装置综合 | 197 |
| 第三节 闭环系统的稳态误差 | 62 | 第一节 校正的基本概念 | 197 |
| 第四节 一阶系统的瞬态性能分析 | 71 | 第二节 PID 控制器的参数整定 | 199 |
| 第五节 二阶系统的瞬态性能分析 | 73 | 第三节 常用串联校正装置特性 | 203 |
| 第六节 高阶系统分析 | 87 | 第四节 根轨迹法综合串联校正装置 | 211 |
| 第七节 基本控制规律的分析 | 90 | 第五节 频率法综合串联校正装置 | 214 |
| 第八节 MATLAB 在控制系统时域分析中的应用 | 93 | 第六节 期望频率特性法综合串联校正装置 | 223 |
| 小结 | 96 | | |
| 习题三 | 97 | | |
| 第四章 自动控制系统的根轨迹分析 | 100 | | |
| 第一节 根轨迹和根轨迹图 | 100 | | |

| | | | | | |
|-----|---------------------------|-----|------|--------------------------|-----|
| 第七节 | 期望频率特性法综合反馈校正装置 | 229 | 第四节 | 脉冲传递函数 | 288 |
| 第八节 | 延迟系统校正装置综合 | 232 | 第五节 | 离散控制系统稳定性分析 | 296 |
| 小结 | | 233 | 第六节 | 离散控制系统动态性能分析 | 299 |
| 习题六 | | 234 | 第七节 | 离散控制系统稳态误差分析 | 303 |
| 第七章 | 非线性控制系统分析 | 237 | 第八节 | 根轨迹法在离散控制系统中的应用 | 306 |
| 第一节 | 非线性控制系统概述 | 237 | 第九节 | 频率特性法在离散控制系统中的应用 | 309 |
| 第二节 | 描述函数法 | 239 | 第十节 | 最少拍离散控制系统的综合 | 315 |
| 第三节 | 相平面法 | 252 | 第十一节 | 利用 MATLAB 分析离散控制系统 | 321 |
| 第四节 | 利用 MATLAB 分析非线性控制系统 | 268 | 小结 | | 323 |
| 小结 | | 269 | 习题八 | | 324 |
| 习题七 | | 269 | 附录 | | 326 |
| 第八章 | 线性离散控制系统分析与综合 | 271 | 附录一 | 常用函数的拉普拉斯变换表 | 326 |
| 第一节 | 线性离散控制系统概述 | 271 | 附录二 | 常用函数的 z 变换表 | 327 |
| 第二节 | 采样过程和采样定理 | 273 | 附录三 | 常用 MATLAB 命令 | 328 |
| 第三节 | z 变换理论 | 277 | 参考文献 | | 335 |

第一章 自动控制的基本概念

控制是有目的的操纵或操作。所谓自动控制是在没有人直接参与的情况下,利用附加的装置(自动控制装置)使生产过程或生产机械(被控对象)自动地按照某种规律(控制目标)运行,使被控对象的一个或几个物理量(被控量如温度、压力、流量、位移、转速等)按照预定的要求变化。采用自动控制不仅可以改善劳动生产环境,将人们从繁重的体力劳动和复杂的手工操作中解放出来,而且明显提高了产品质量、提高了劳动生产率、降低了产品的成本。自动控制已广泛地应用于工农业生产、机械加工与制造、军事、国防、航空、航天、资源探测以及人们日常生活等各个领域。例如,电梯可以不受乘员多少的影响按照人的要求准确地停在任一楼层,导弹能够在目标运动的情况下将其击中,这些都离不开自动控制。

控制工程基础以自动控制系统为研究对象,是一门研究自动控制系统共同规律的技术科学。它来源于工程实践,并随着生产的发展和技术的进步不断发展完善,又反过来指导工程实践。

第一节 自动控制的提出

一、人工控制系统

在图 1-1 所示的恒定水位的水池供水系统中,在出水流量 Q_2 和进水流量 Q_1 严格相等且保持不变的情况下,进出水处于平衡状态,水位不会发生变化。但是在这个系统中,出水流量是随时变化的。控制的任务是在出水流量随时间不断变化的情况下,通过调节进水阀门的开口度控制进水量,以使水池中的水位保持为要求值。

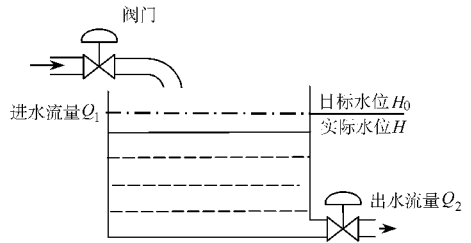


图 1-1 水位人工控制系统示意图

总结上述系统的人工控制过程中人的作用是:

- 1)记忆水位的设定值 H_0 ;
- 2)不断观察实际水位 H ;
- 3)将目标水位和实际水位比较,得到水位的误差 ΔH ;
- 4)根据水位误差大小调节进水阀门的开口度,改变进水量,使 H 与 H_0 之间的误差减小直至为零。

为方便起见,常用框图来表示组成系统的各部分功能和信号传递之间的关系。水位人工控制系统框图如图 1-2 所示。图中用带有箭头的实线表示信号的传递方向,用方框表示各部分的功能。目标水位 H_0 称为给定值。 Q_1 为控制输入,或称控制作用。实际水位是被控对象中被控制的物理量称为被控量,也称输出量。出水流量 Q_2 的变化是不可预见的,是导致水位

变化的主要因素,也是我们不希望的,称为扰动输入,在以后的叙述中将直接称之为扰动。

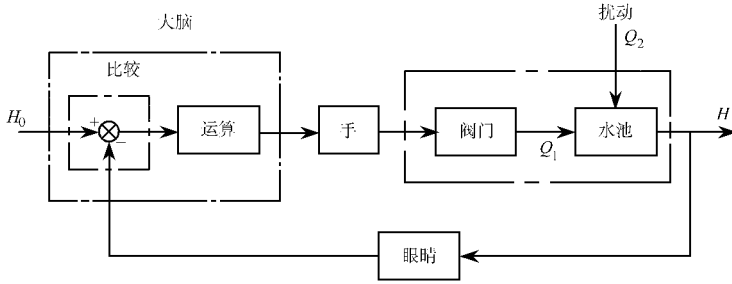


图 1-2 人工水位恒定控制系统原理框图

上述系统之所以能够实现水位的恒定控制,是因为人是以偏差 ΔH ,而不是直接以目标值 H_0 为依据调节系统的。无论什么因素引起偏差,系统都将进行调节,直至消除偏差。这样的系统具有很好的抗干扰能力和较高的控制精度。由于有人的参与,该系统称为人工控制系统。

二、自动控制系统的组成及工作原理

能够代替人在人工控制系统中所起作用、使系统在没有人直接参与的情况下完成控制任务的装置称为自动控制装置。定义自动控制系统为:由自动控制装置控制被控对象的行为,能够完成一定自动控制任务的整体。按其职能将自动控制装置分为四部分:

- 1)检测元件:也称测量元件。用于测量被控量的实际值,必要时进行相应物理量的变换,以便与给定输入值进行比较。
- 2)比较元件:将测量结果与给定值比较,得到偏差。
- 3)控制器:也称调节器、调节元件。按照偏差产生相应的控制信号。控制器的输入信号与输出信号之间的关系 $u = f(e)$ (其中 u 为控制信号, e 为偏差信号)称为控制规律。由于偏差信号较弱,控制器中应包含有起放大作用的部分。
- 4)执行元件:执行控制任务,驱动被控对象,从而使被控量与目标值保持一致。

一般的自动控制系统框图如图 1-3 所示。图中“ \otimes ”称为信号的相加点,它是求取信号代数和的图形符号,信号线箭头旁边的 $+/-$ 号表示对应信号的参考符号。需要特别强调的是,由同一个分支点引出的信号是相同的。框图清楚地表示了组成系统的各部以及它们之间的连接关系。

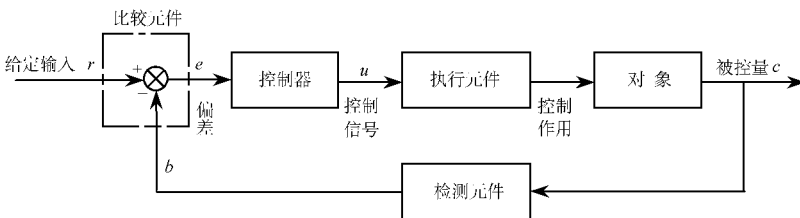


图 1-3 一般自动控制系统框图

水池水位自动控制系统如图 1-4 所示。目标水位由电位器接地点的位置给出,称为给定输入。浮子测量实际水位并通过连杆转换为相应的位置信号,代替了人工控制中眼睛的功能,是本系统中的检测元件。电路的接线方式保证了加在放大器输入端的是与实际水位和目标水

位之差成正比的电压信号,放大器输出电压使电动机转动,经减速器改变进水阀门的开口度,代替人工控制系统中手的功能,从而调节实际水位,直至水位误差为零,电动机停止转动,系统达到平衡状态。显然自动控制系统的工作原理与人工控制系统相同,即:不断检测被控量,与给定输入比较得到偏差,根据偏差产生相应的控制作用,使被控量朝着减小甚至消除偏差的方向变化。

三、自动控制的特点

自动控制系统是具有负反馈的闭环控制系统,由于能及时根据测量到的实际情况纠正系统的行为,所以控制精度较高,被广泛应用于工程实际中。虽然用于不同场合的自动控制系统其组成和控制目的千差万别,但就其工作过程和原理而言却都是相同的。自动控制系统的特点归纳如下:

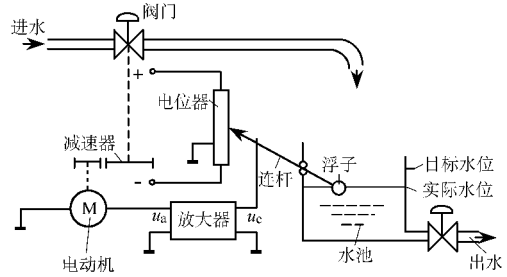


图 1-4 水位自动控制系统

1)具有负反馈的闭环结构。检测元件检测被控量并反送至输入端称为反馈,将检测结果反号后送至输入端称负反馈。自动控制系统也称闭环控制系统、反馈控制系统,自动控制理论也称反馈控制理论。

2)信号传递有两条通道。沿着箭头方向由输入至输出的前向通道和由输出反送至输入端的反馈通道。系统中既存在有给定输入对被控量的控制作用,又存在有被控量对控制作用的影响。

3)按照偏差的大小和方向产生控制作用。

第二节 控制系统分类

按照不同的分类方式可将系统分为不同的种类。

一、开环控制系统和闭环控制系统

按照结构及信号传递特点来分,控制系统有开环和闭环两种控制方式。图 1-5 所示为他励直流电动机转速开环控制系统原理图。该系统中既不需要测量输出量,又不需要将被控量反馈到输入端与输入量进行比较,控制作用直接由给定输入产生,被控量对控制作用没有影响,信号单方向传递。这种系统称开环控制系统。例如,采用时基信号的路口交通指挥、洗衣机的洗净度控制系统等。这样的系统结构简单,对于每一个给定量,有一个确定的工作状态与之对应,但是输出量是否受到系统内部或外部扰动的影响而偏离目标值,系统不得而知,也就不可能自动产生相应的控制作用予以纠正。系统抗干扰能力差,控制精度低。因此,实际中只有在输入输出关系已知,且对系统的控制精度要求不高的场合,才使用开环控制。

与开环控制系统相比,闭环控制系统虽然结构相对复杂,但其抗干扰能力强,在输入标度精度一定的情况下,可以用精度不高的元件和装置组成较高精度的控制系统。合理设计控制器,可使系统满足各种不同性能指标的要求。图 1-6 所示为带有负反馈的转速闭环控制系统。已处于平衡状态的系统,在扰动作用下,输出将偏离原来的平衡状态,以负载转矩突然增加、实际转速低于要求值为例,闭环控制系统对转速的自动调整过程为

$$n \downarrow \rightarrow \Delta n = (n_0 - n) \uparrow \rightarrow u_c = (u_{gd} - u_f) \uparrow \rightarrow u_1 \uparrow \rightarrow u_a \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

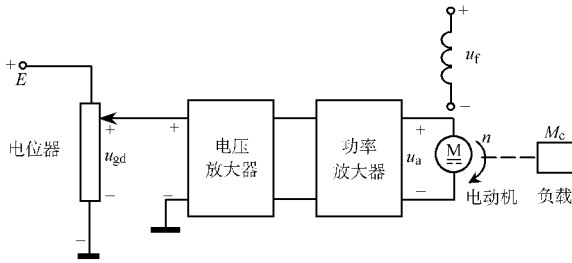


图 1-5 直流电动机转速开环控制系统

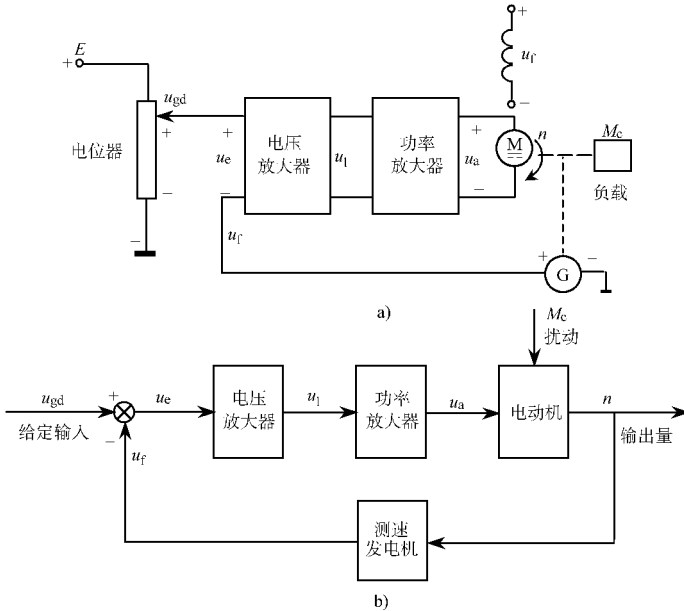


图 1-6 直流电动机转速反馈的闭环控制系统

a)原理图 b)系统框图

闭环控制不能忽视的是稳定性问题。开环控制虽然性能不够理想,精度不高,但输出却总是可以按输入的要求变化;闭环控制系统如果设计不合理、参数选择不合适,系统输出可能总也达不到目标值,甚至距离目标值越来越远,系统根本不能工作,无法完成控制任务。我们称这样的系统是不稳定的系统。

二、补偿控制系统、反馈控制系统和复合控制系统

按照控制作用产生的依据,可将系统分为补偿控制系统、反馈控制系统和复合控制系统三种类型。

补偿控制是针对给定输入或某种扰动作用下系统出现的误差,利用补偿装置产生附加的控制作用,对误差进行补偿,以减小甚至消除误差的控制方式。只有在扰动可以测量且扰动与被控量之间的关系已知时,才能采用针对扰动的补偿控制。图 1-7 所示为具有励磁扰动补偿的直流电动机转速控制系统。当负载恒定,励磁电压 u_f 降低,电动机实际转速 n 升高并偏离

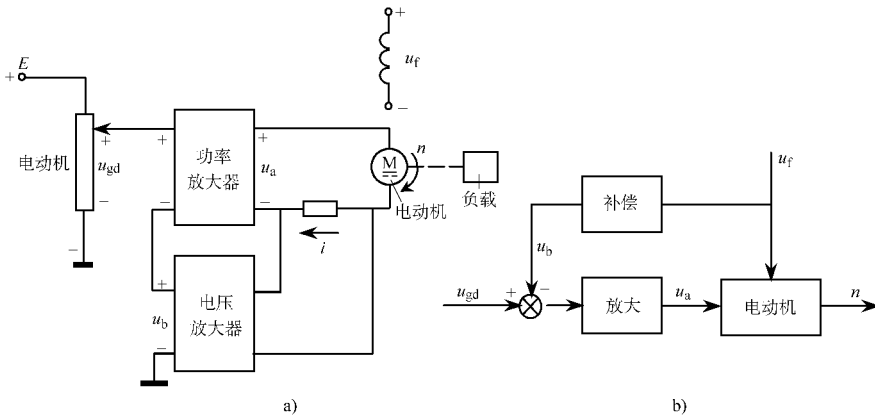


图 1-7 具有励磁补偿的扰动控制系统原理图

a)原理图 b)系统框图

设定值 n_0 时,系统对偏差 Δn 的补偿过程为

$$u_f \downarrow \rightarrow i \uparrow \rightarrow (u_{gd} - u_b) \downarrow \rightarrow u_a \downarrow \rightarrow n \downarrow$$

转速的升高是由其他因素(如负载的突然减小)引起,则

$$n \uparrow \rightarrow i \downarrow \rightarrow (u_{gd} - u_b) \uparrow \rightarrow u_a \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

这说明针对某种特定输入(给定或扰动)设计的补偿控制对由于其他因素引起的误差一般是无能为力的。注意到图 1-7a 中补偿信号取自电动机的励磁电压,而在原理图中取自电动机的电枢电流。这是因为电枢电流可以反映励磁电压的变化且电流的检测比较方便。表 1-1 列出了补偿控制与反馈控制各自的特点。

表 1-1 补偿控制与反馈控制的特点对照表

| 特 点 | 反馈控制 | 补偿控制 |
|------|--------------------|------------------------------|
| 控制方式 | 通过测量被控量,体现扰动对系统的影响 | 扰动及其与被控量的关系已知、可测,检测输入进行补偿 |
| 控制目的 | 对包围在闭环内任意形式的扰动都起作用 | 针对某种输入设计的补偿装置一般只能补偿由该输入引起的误差 |
| 控制效果 | 一般只能使误差减小 | 可以消除输入或指定扰动引起的偏差 |
| 系统结构 | 闭环结构 | 开环结构 |

补偿控制不具有闭环结构,与反馈控制对应,这种控制方式常被称为前馈控制。一般来讲,系统的给定输入一定是可测量的,而存在于系统中的扰动是不确定、不可直接测量甚至不知道作用在哪里的。因此为使控制系统具有良好的性能,反馈这种基本的控制方式是必须的。在此基础上增加针对给定或扰动的补偿控制可以进一步提高系统的精度。同时采用反馈和前馈控制的系统我们称之为复合控制系统。

三、恒值调节系统、随动控制系统和顺序控制系统

按照系统给定输入信号的特点将自动控制系统分为三种。

1. 恒值调节系统(也称定值调节系统、恒值控制系统)

这类系统的输入是不随时间变化的常数。当系统在扰动作用下,被控量偏离要求值时,主要的控制任务是:克服各种扰动的影响,使被控量始终与给定输入要求的值保持一致。如水位

控制系统 转速控制系统 温度、压力、流量等过程控制系统等都属此类。

2. 随动系统

这类系统中 输入是预先未知且随时间任意变化的函数 要求控制系统使被控量以最快的速度、尽可能小的误差跟随输入变化 如图 1-8 所示 这类系统又称伺服系统。尽管扰动对随动系统而言并非主要因素 但仍需采用闭环结构以保证系统对目标值的跟踪精度。

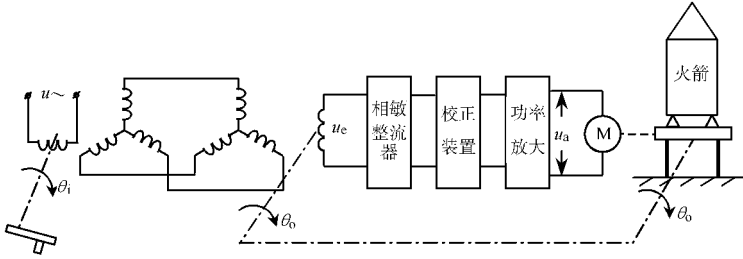


图 1-8 火箭方位角随动控制系统

3. 顺序控制系统

如果系统的输入是一个已知的、随时间缓慢变化的函数 则称之为顺序控制系统。这种系统介于上述两种系统之间 控制的主要目的是保证被控量能够按给定的时间函数变化。例如热处理升温过程 根据材料特性的要求 温度的升高须按要求的时间函数进行 ;又如汽轮机启动时的升速过程、顺序控制机床等均属于顺序控制系统。

四、单输入单输出系统和多输入多输出系统

单输入单输出(SISO)系统也称单变量系统 是指只有一个输入和一个被控量的系统。如果系统的输入或被控量多于一个则称之为多输入多输出(MIMO)系统或多变量系统。

五、按照自动控制系统组成元件的特性分类

1. 线性系统和非线性系统

组成系统的所有元件均为线性元件 它们的输入-输出静态特性是线性的 符合叠加原理 可以用线性微分方程(或差分方程)来描述其运动过程 这样的系统称为线性系统。只要系统中含有一个非线性元件 整个系统的运动过程就无法用线性微分方程描述 这样的系统称为非线性系统。

2. 定常系统和时变系统

系统中所有元件的参数都是不随时间变化的常数 该系统称为定常系统 或称时不变系统 这样的系统输入输出关系可用常系数的微分或差分方程表示 否则称为时变系统。实际中遇到的系统多少都有一些非线性和时变性 但多数都可在一定的条件下合理地近似成线性定常系统处理。经典控制理论研究的对象主要是单输入单输出的线性定常控制系统。

3. 连续控制系统和离散控制系统

系统中各处信号均为时间的连续函数时 该系统称为连续控制系统 其只要有一处信号是离散时间序列或数字序列则称为离散控制系统。离散控制系统一般有采样控制系统和数字控制系统两种 其主要特征是系统中含有采样开关或数模(D/A)、模数(A/D)转换装置。

4. 确定系统和不确定系统

系统各组成部分的参数及它们之间的连接关系是确定的、已知的 可用图表或解析式确切

表示,系统的全部输入信号也都是时间的确定函数,这样的系统称为确定系统。系统中上述两个方面只要有一个不确定,系统的输出就无法确定,即为不确定系统或称随机系统。当输入信号中含有不确定的随机量(负载的随机变化、电源的随机波动、量测噪声等)时,由于随机信号及其响应都不能用一定的时间函数来描述,它们只具有数学统计特性,所以随机系统要应用数理统计理论加以研究。当被控对象本身不确定时,就需要在运行过程中提取被控对象的输入输出信息,一边辨识对象的特性,一边自动修改控制器的参数,以维持系统良好的运行状态,这就是现代控制工程中的自校正或自适应控制系统。

除此之外,还可按参数特征将系统分为集中参数系统和分布参数系统,按系统的被控量将系统分为液位控制系统、转速控制系统、流量控制系统、温度控制系统、角位移控制系统等。

第三节 对自动控制系统的基本要求

反馈控制的给定输入即为被控量的目标值(或与目标值相对应的物理量),自动控制的目的是使被控量在任何情况下都能按照目标值的要求变化。理想情况下,自动控制系统输出应不受任何扰动因素的影响,始终保持与给定输入的正比关系如图 1-9a 所示。但由于惯性的存在,实际系统不可能有这样理想的输出响应。

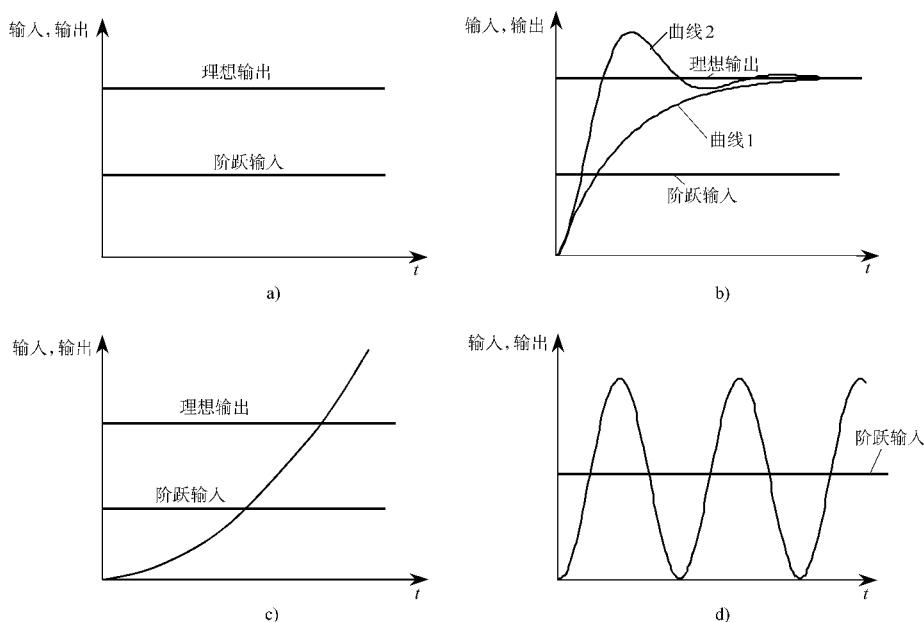


图 1-9 自动控制系统的输出响应

a)理想阶跃响应特性 b)稳定系统阶跃响应 c)不稳定系统阶跃响应 d)临界稳定系统阶跃响应

一、动态系统及其单位阶跃响应

储能元件的存在使得系统中一些变量不能突变,纯滞后环节或元件的存在使得输出对输入响应有时间延迟,这样就使系统从一种平衡状态到达另一种平衡状态不能瞬时完成,要经过一个过渡过程,这样的系统称为动态系统。严格说来,实际系统均为动态系统。动态系统在

单位阶跃输入信号作用下,可能呈现图 1-9b 所示的输出响应形式。由于惯性,系统突加给定输出不会立刻变化,系统在很大的偏差信号作用下被控量迅速增加,使得偏差减小,被控量上升速度趋缓,当偏差为零时,被控量与要求值一致(曲线 1),系统达到新的平衡状态,称为稳态。也有可能偏差虽然为零,但在惯性作用下,被控量实际值将超出目标值,产生反向的偏差,该偏差使输出实际值减小,形成振荡的过程,经过一定的时间被控量最终将与目标值保持一致(曲线 2),系统达到稳态。我们称这类系统是稳定的系统,系统到达新的稳态经历的过程称为动态过程或过渡过程、瞬态过程。不稳定的系统在单位阶跃输入作用下,输出随时间逐渐增加,实际输出离要求值愈来愈远,如图 1-9c 所示,这样的系统是不能完成控制任务的。当输出响应为如图 1-9d 所示的等幅振荡时,系统处于临界稳定状态,这样的系统也是不能正常工作的。

二、对自动控制系统的基本要求

根据自动控制的目的及工程中系统的实际情况,归纳出对自动控制系统的基本要求为:

1)稳定性要求。稳定是自动控制系统能够正常工作的前提条件,只有稳定且有一定稳定裕量的系统才能很好地完成控制任务。

2)准确性要求。系统进入稳态时,应满足一定的精度要求,一般用稳态误差来描述控制系统的稳态性能,称为稳态性能指标。

3)对瞬态过程的要求。一般要求过渡过程时间愈短、响应愈平稳愈好,因此有快速性和振荡性两方面的性能指标。

一般来说,在同一个系统中,上述三个方面要求是相互制约的。例如,强调系统的稳定性,就应减小系统的放大倍数,但减小放大倍数又会降低系统的稳态精度。反之要求系统的快速性和稳态精度,就应增大系统的放大倍数,而增大系统的放大倍数,又会使系统的动态性能变坏,甚至不稳定。设计一个控制系统时,必须在稳定的前提条件下同时兼顾对系统稳态性能和瞬态性能的要求。

第四节 控制工程基础研究的主要内容

控制工程基础是自动控制系统分析和综合的理论依据,研究的对象以单输入单输出线性定常控制系统为主,研究内容涵盖系统分析和系统综合两个方面,包括线性定常控制系统分析和校正装置综合的方法(时域法、根轨迹法和频率特性法等),非线性系统的分析法和线性定常离散控制系统的分析、设计方法。

系统分析是在控制系统给定的条件下,建立物理系统的数学模型,在此基础上定性或定量地分析控制系统的性能,主要内容有:①稳定性判别、动静态性能指标计算;②确定性能和系统参数之间的关系;③提出改善系统性能的途径。

控制系统的整体设计是一个综合性任务,是在被控对象及控制目标确定的情况下,选择执行机构、传感器和放大器构成反馈控制系统的基本部分。一般来讲只有基本部分的控制系统是很难满足性能指标的要求的,还需要在系统中引入一个具有控制作用的附加装置,用以改善系统的性能,使控制系统满足性能指标的要求,称此为校正装置。控制系统中有时将校正装置与放大器合并在一起,称为控制器。系统综合指的是控制系统校正装置或控制器的综合,是在系统基本部分和性能指标已知的情况下,求取校正装置或控制器数学模型的过程,是控制系统

整体设计的重要组成部分。

小 结

自动控制是在没有人直接参与的情况下,利用自动控制装置使被控对象自动地按某种规律运行或使被控量自动地按照预定的要求变化。自动控制装置由检测、比较、执行和控制器四个职能元件组成。

1. 自动控制系统是具有被控量负反馈的闭环控制系统。
2. 自动控制系统的工作原理是:不断检测被控量,将其与给定输入比较,产生偏差信号并按偏差产生控制作用,使被控量朝着要求值变化。
3. 对自动控制系统的基本要求是稳定性、快速性和准确性。
4. 自动控制理论研究的主要内容是单输入单输出、线性定常连续系统的分析与综合,线性定常离散控制系统的分析与综合以及非线性定常连续系统的分析。

习 题 一

- 1-1 用框图表示自动控制系统的组成及各部分之间的连接关系。说明自动控制系统采用负反馈的原因。
- 1-2 试说明开环控制和闭环控制系统的主要特征,并比较它们的优缺点。
- 1-3 试比较反馈和补偿两种控制方式,说明它们的特点。
- 1-4 如图 1-10 所示温度控制系统,试指出其输入量和输出量,画出系统结构框图。说明:
 - (1)系统属于哪种类型?
 - (2)若要改变恒温箱的温度,应如何操作?
 - (3)系统是如何克服扰动使温度保持恒定的?

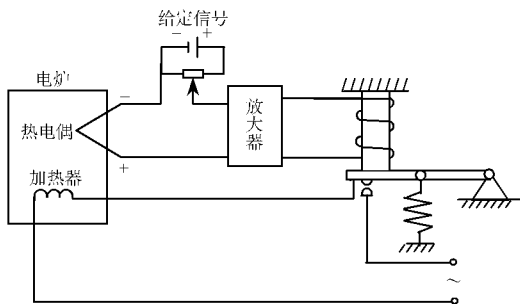


图 1-10 题 1-4 图

- 1-5 画出图 1-8 所示的火箭方位控制系统的结构框图,试述其工作原理。

第二章 自动控制系统的数学模型

分析和设计一个控制系统,仅仅了解系统的工作原理是不够的,还应该掌握系统中各物理量的变化规律,这就需要建立系统的数学模型。

所谓数学模型是指描述系统各变量之间相互关系的数学表达式。例如在时域中,描述系统输入量与输出量之间关系的微分方程就是系统的数学模型。如果已知输入作用和变量的初始条件,就可以对微分方程进行求解,得出系统输出量的时域解。对系统输出量的时域解进行定性或定量分析,又可以确定系统的基本性能。由此可见,建立控制系统的数学模型是分析和设计控制系统的必要前提。

控制系统数学模型的形式较多,在经典控制理论中主要包括微分方程、传递函数、频率特性、结构图和信号流图等。其中,时域中的微分方程是最基本的数学模型,复域中的传递函数和频域中的频率特性也都是常用的数学模型,而后两种以图示的形式表达了系统各物理变量之间的相互作用与联系,是比较直观的数学模型。

第一节 控制系统微分方程的建立

一、建立数学模型及其步骤

由于一个实际的物理系统是由许多复杂的物理环节组成的,如果用数学方程去描述输入和输出变量之间的关系,就应考虑与所要研究的系统性能密切相关的主要因素,而忽略掉系统中一些次要的固有物理特性,从而使所得到的数学模型既能反映事物内在的本质,具有足够的准确性,同时又可降低计算的难度和模型的复杂性,所以要在模型的简化与精确性之间进行折中考虑。例如,条件允许的情况下可以忽略物理系统中存在的非线性参数和分布参数等。如果这些被忽略的因素对系统的影响极小,那么由数学模型得到的分析结果就会和物理实验研究的结果比较一致。相反,当分布参数的特性成为系统动态特性中不可忽略的因素时,采用集中参数的数学模型研究系统就不合适了。因此模型的简化是有条件的。

总之,要获得一个合理的数学模型,必须对控制系统的工作原理以及各组成元件有一个全面的了解,这要求设计人员除对控制理论有扎实的基础之外,还应具备一定广度的专业知识。

建立数学模型的一般步骤是:

1) 首先将系统划分为若干个单向环节,并确定每一环节的输入和输出信号。所谓单向环节是指此环节的运动状态与后面环节的存在与否没有关系。

2) 列写原始方程式。根据环节的输入、输出信号的物理性质及其相互关系,确定其描述方程。不同的系统有着不同的物理、化学规律,如电路系统的基尔霍夫定律、力学系统的牛顿定律和热力学系统的热力学定律等等。

3) 简化、线性化。忽略方程中一些对系统作用甚微的因素,例如在有的场合下,可以忽略寄生电容、空气阻力等因素。此外,应考虑在工作条件下的非线性函数的线性化。

4) 消除中间变量,最后得到一个描述系统输入输出关系的方程式。

通常还按照惯例把微分方程写成标准形式,即将与输入量有关的各项写在方程的右边,而与输出量有关的各项写在方程的左边,方程两边各导数项均按降幂排列。

二、编写元件及系统微分方程式举例

1. 机械系统

机械系统的基本元件是弹簧、阻尼器(粘性摩擦部分)和质量。在这些元件中,通常是以力与位移分别作为输入和输出变量,而以牛顿定律、虎克定律等物理定律作为建立数学模型的基础。

(1) 机械平移系统

例 2-1 图 2-1 所示是弹簧-质量-阻尼器的机械位移系统。设外作用力 F 为输入量,位移 x 为输出量,试求该系统的微分方程。

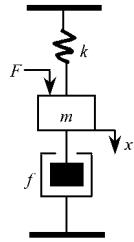


图 2-1 弹簧-质量-阻尼器系统

解:设初始状态时弹簧 k 不受任何压力或拉力,系统处于静止状态,即初始条件为 $x(0)=0$, $\dot{x}(0)=0$, $\ddot{x}(0)=0$ 。在外力 F 的作用下,弹簧产生弹力 F_k 与位移 x 成正比,即 $F_k=kx$;阻尼器产生的阻尼力 F_f 应与质量块的速度 $\frac{dx}{dt}$ 成正比,即 $F_f=f\frac{dx}{dt}$;质量块的惯性力 F_g 应与其加速度 $\frac{d^2x}{dt^2}$ 成正比,即 $F_g=m\frac{d^2x}{dt^2}$ 。根据牛

顿第二定律,外力 F 应该与弹簧的弹力 F_k 、阻尼器的阻尼力 F_f 以及质量块的惯性力 F_g 相平衡,即

$$F_k + F_f + F_g = F \quad (2-1)$$

将 F_k 、 F_f 及 F_g 的计算公式代入式(2-1)中,则得

$$kx + f\frac{dx}{dt} + m\frac{d^2x}{dt^2} = F \quad (2-2)$$

再将式(2-2)整理成

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + f\frac{dx}{dt} + kx = F \quad (2-3)$$

(2) 旋转体运动系统

例 2-2 图 2-2 所示为机械转动系统,设外加扭矩 T 为输入量,角位移 θ 为输出量,求该系统的微分方程。

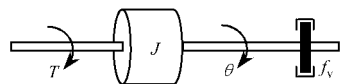


图 2-2 旋转体运动

解:该系统可以看作由一个转动惯量为 J 的转子与弹性系数为 K_s 的弹性轴,以及阻尼系数为 f_v 的阻尼器连接而成。

假设初始平衡状态 $\theta=0$ 。根据机械转动系统的牛顿定律可得

$$T_g + T_f + T_k = T \quad (2-4)$$

式中 T_g ——惯性体所产生的阻力矩, $T_g = J\frac{d^2\theta}{dt^2}$;

T_f ——阻尼器所产生的阻力矩, $T_f = f_v\frac{d\theta}{dt}$;

T_k ——弹性轴所产生的弹性阻力矩, $T_k = K_s\theta$ 。

将 T_1 、 T_2 、 T_3 代入式(2-4),则可得出描述系统输入输出关系的微分方程式