

普通高等教育“十二五”规划教材

自动控制原理

孙炳达 主编

第3版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

自动控制原理

第3版

主编 孙炳达
参编 谢莉萍 王明诚 张 祺



机械工业出版社

本书是工院校“自动控制原理”(经典控制部分)课程的教材或参考书。为了更好地体现本教材的特色,对第2版的内容进行了部分调整、补充,对基本概念和分析方法增加了相关例题,既方便教学,也方便学习。

本教材涵盖了线性定常系统、非线性系统和线性离散系统三部分内容。重点对线性定常系统的时域分析法、频率特性分析法、非线性系统的描述函数分析法和线性离散系统内容作了全面的阐述。对线性定常系统的根轨迹分析法、非线性系统相平面分析法的主要内容作了简要介绍。

本书内容层次分明、概念清晰、重点突出、理论联系实际、例题贴切、应用性强。本书可作为工院校电气工程类、自动化类各专业的本科或非控制工程学科类硕士研究生的教材。主要章节(未带*号)内容也适合作为机电类、信息类及计算机应用专业或高职院校、成人教育及电视大学的相近专业学生学习控制技术的教材,也可供有关从事控制工程应用的技术人员参考。

本书备有电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册后下载。

本书有配套的《自动控制原理学习指导、例题及习题解答》辅导学习参考书,已由机械工业出版社出版。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/孙炳达主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2011.5(2011.8重印)

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-33924-3

I. ①自… II. ①孙… 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(2011)第052834号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤

版式设计:霍永明 责任校对:肖琳

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2011年8月第3版第2次印刷

184mm×260mm·16.5印张·404千字

标准书号:ISBN 978-7-111-33924-3

定价:34.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是工科院校“自动控制原理”(经典控制部分)课程的教材或参考书。可作为电气工程类、自动化类各专业本科或非控制工程学科类硕士研究生的教材。教材的主要内容(未带*号)也适合机电类、信息类及计算机应用等专业的学生或高职高专、成人教育类的学生学习经典控制技术。

本教材自2000年第1版出版以来,在全国普通高等院校中被广泛使用,已重印30余次,得到了广大教师、同学和工程技术人员的充分肯定。为了更好地体现本教材的特色,对第2版的内容进行了部分调整、补充,对基本概念和分析方法增加了相关例题,既方便教学,也方便学习。

本教材涵盖了线性定常系统、非线性系统和线性离散系统三部分的内容。重点对线性定常系统的时域分析法、频率特性分析法、非线性系统的描述函数分析法及线性离散系统分析方法作了全面的阐述。对线性定常系统的根轨迹分析法、非线性系统的相平面分析法的主要内容作了介绍。考虑到目前MATLAB/SIMULINK数字仿真方法,已经成为国际上控制理论与系统的辅助分析及设计的最流行软件工具,因此,增加了该软件在自动控制原理应用方面的相关内容。

修订时仍保持“应用为重点,三基(基本概念、基本原理和基本的分析方法)为主线”的原则。一方面,删除了那些与后续专业课程无关的内容,以及在现代控制工程中对培养学生处理问题能力方面基本上起不了帮助作用的内容;另一方面,考虑到保持经典理论的系统与完整性,对非重要的内容,仅作简要介绍。

修订后全书为九章。第一至六章介绍线性定常连续控制系统;第七章介绍非线性控制系统;第八章介绍线性定常离散系统;第九章介绍MATLAB软件在自动控制原理中的应用。其中,第一、三、五及八章的第一、二、八、九节的内容由孙炳达修订;第二、九章由张祺修订;第四、七章由王明诚修订;第六及第八章的第三、四、五、六、七节由谢莉萍修订。孙炳达教授负责全书修订的制定及统稿工作。

本书涵盖了比较全面的经典控制理论内容,其中,第一、二、三、五、六、八章的内容(未带*号)为重点,其他章节内容可少讲、选讲或不讲。对于高职高专或成人教育类的学生可只学未带*号的内容。

本书的编写及修订过程中,曾得到广东省重点学科及重点课程资金资助,参考或吸收了部分同类教材的内容,得到了广东工业大学自动化学院、广东技术师范学院自动化学院的领导和教师们的大力支持。特别是,梁志坤老师、张森老师还参与了前两版的部分章节编写或修订工作,在此,向上述相关单位、有关同志表示衷心的感谢!

为了方便教师教学需要,本教材配有电子课件。使用本书的教师,可登录 www.cmpedu.com 注册后下载。

为了方便学生学习需要,本教材有配套的《自动控制原理学习指导及习题解答》辅导参考书。已由机械工业出版社出版。该书紧扣主教材内容。每章包含4方面内容:知识结构、重点内容、例题精选及主教材每章后的习题解答方法。

由于编者水平有限,书中可能会有不足之处,殷切期望读者及同行给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 自动控制系统的基本概念 ····· 1

第一节 自动控制的基本方式 ····· 1

第二节 闭环控制系统的基本组成 ····· 4

第三节 自动控制系统的分类 ····· 6

第四节 对控制系统的基本要求 ····· 7

习题 ····· 8

第二章 线性连续系统的数学模型 ····· 10

第一节 动态微分方程的编写 ····· 10

* 第二节 非线性数学模型的线性化 ····· 15

第三节 传递函数 ····· 18

第四节 系统动态结构图 ····· 25

* 第五节 信号流程图 ····· 34

第六节 脉冲响应函数 ····· 38

* 第七节 系统状态方程的描述 ····· 38

习题 ····· 46

第三章 控制系统的时域分析法 ····· 49

第一节 典型输入信号和时域性能指标 ····· 49

第二节 一阶系统分析 ····· 51

第三节 二阶系统分析 ····· 55

第四节 高阶系统分析 ····· 64

第五节 稳定性分析及代数判据 ····· 66

第六节 稳态误差分析及计算 ····· 70

习题 ····· 78

第四章 控制系统的根轨迹分析法 ····· 82

第一节 根轨迹的基本概念 ····· 82

第二节 绘制根轨迹的基本条件和基本规则 ····· 83

第三节 系统根轨迹的绘制 ····· 89

第四节 参量根轨迹 ····· 90

第五节 系统性能的根轨迹分析 ····· 92

习题 ····· 95

第五章 控制系统的频率特性分析法 ··· 97

第一节 频率特性的基本概念 ····· 97

第二节 频率特性的表示方法 ····· 100

第三节 典型环节的频率特性 ····· 101

第四节 系统开环频率特性绘制 ····· 110

第五节 用频率法分析系统的稳定性 ····· 115

第六节 用频率法分析系统的稳态性能 ··· 122

第七节 用开环频率特性分析系统的动态性能 ····· 124

* 第八节 用闭环频率特性分析系统性能 ··· 129

第九节 传递函数的实验求取 ····· 132

习题 ····· 134

第六章 频率法校正 ····· 138

第一节 频率法校正的基本概念 ····· 138

第二节 串联超前校正 ····· 139

第三节 串联滞后校正 ····· 143

第四节 相位滞后-超前校正 ····· 146

* 第五节 期望串联校正 ····· 151

* 第六节 并联校正 ····· 154

第七节 PID 控制器 ····· 158

习题 ····· 160

第七章 非线性系统分析 ····· 162

第一节 控制系统中的典型非线性特性 ··· 162

第二节 描述函数法 ····· 164

第三节 用描述函数法分析非线性系统 ··· 169

第四节 改善非线性系统性能的方法 ····· 174

* 第五节 相平面分析法 ····· 178

* 第六节 非线性系统的相平面分析 ····· 183

习题 ····· 186

第八章 线性离散控制系统的分析与综合 ····· 188

第一节 离散控制系统概述 ····· 188

第二节 连续信号的采样与复现 ····· 189

第三节 Z 变换及 Z 反变换 ····· 193

第四节 线性离散系统的数学模型 ····· 197

第五节 离散控制系统稳定性分析 ····· 202

第六节 离散控制系统的稳态误差分析 ···	204	第四节 线性控制系统仿真 ·······	236
第七节 离散控制系统的动态性能分析 ···	207	第五节 非线性控制系统仿真······	247
第八节 数字控制器的模拟化设计 ·····	212	第六节 离散控制系统仿真 ·······	249
第九节 数字控制器的离散化设计 ·····	215	习题 ·························	251
习题 ·························	218	附录 ·······················	253
*第九章 MATLAB 在自动控制		附表-1 常用函数拉普拉斯变换表 ·····	253
原理中的应用 ···········	220	附表-2 拉普拉斯变换的主要定理 ·····	254
第一节 MATLAB 软件界面 ·······	220	附表-3 常用 Z 变换表 ···········	254
第二节 MATLAB 程序基础 ·······	222	参考文献 ···················	256
第三节 Simulink 操作简介 ·······	228		

第一章 自动控制系统的基本概念

在工程和科学的发展中，自动控制技术起着极其重要的作用。“自动控制原理”是自动控制技术的基础理论，是研究自动控制共同规律的理论性较强的一门技术学科。根据自动控制技术发展的不同阶段，目前自动控制原理一般分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。经典控制理论以传递函数为基础，主要研究单输入、单输出线性定常系统的控制及综合问题。在工程实践中，经典控制理论已得到许多成功的应用，而且今后还将继续发挥其理论的指导作用。现代控制理论是20世纪60年代初为适应宇航技术发展需要而出现的新理论。它是以状态方程为基础，主要研究具有高性能的多输入、多输出、变参数系统的控制和综合问题。现代控制理论能解决经典控制理论难以解决的一些问题，而且随着计算机技术和现代应用数学研究的发展，目前现代控制理论正向大系统和人工智能理论等方面深入发展。

本教材仅涉及经典控制理论内容，主要介绍其基本概念、基本原理和分析、综合系统的基本方法。

第一节 自动控制的基本方式

自动控制，就是在没有人的直接参与的情况下，利用控制装置使某种设备、工作机械或生产过程的某些物理量或工作状态能自动地按照预定的规律或数值运行或变化。通常，把控制的装置称为**控制器**；把被控制的设备或工作机械称为**被控对象**；被控对象内要求实现自动控制的物理量称为**被控量**或系统的**输出量**；控制器和被控对象的总体，称为**自动控制系统**。在控制系统中，把影响系统输出量的外界输入称为**系统的输入量**。系统的输入量，通常指两种，即**给定输入量**和**扰动输入量**。给定输入，又称为**参考输入**，它决定系统输出量的变化规律或要求值。扰动输入是系统不希望但又客观存在的外作用。例如电源电压的波动、环境温度、压力的变化、电动机拖动负载的变化等，都是实际系统中存在的扰动作用。扰动输入影响给定输入对系统输出量的控制。

自动控制系统的种类繁多、形式多样、任务不一。但从控制的基本方式看，可分为**开环控制**、**闭环控制**和**复合控制**。

一、开环控制

开环控制是指系统输出端与输入端之间不存在反馈回路，或者说，系统的输出量不对系统的控制产生任何作用的控制过程。

图1-1所示的直流电动机调速系统是开环控制的一个例子。电动机拖动生产机械或其他部件运转，生产机械是被控对象，转速

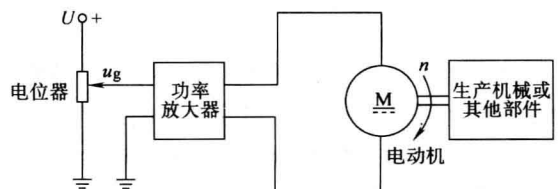


图 1-1 直流电动机开环调速系统

n 是系统的被控量或输出量。电压 u_g 是系统的给定输入量。当改变电位器滑动端的位置时，相应地改变了给定输入量和电动机电枢两端的电压。由于电动机具有恒定的励磁电流，因此，随着电枢电压不同，电动机便以不同的转速带动生产机械运转。对应电位器滑动端的一个固定位置，换句话说，一个固定的给定输入量，生产机械就以一个相对应的转速要求值运转，从而达到了控制目的。

可以看出，上述控制系统的输出端与输入端之间没有反馈回路。系统只是根据给定输入量 u_g 进行控制，而输出量 n 在整个过程中对控制作用都没有影响。由定义可知，它属于开环控制的系统。开环控制系统的职能框图可用图 1-2 表示。

值得指出，当出现外部扰动输入或内部扰动作用时，若没有人的直接干预，开环控制系统的输出量将不能按照给定输入量所对应的希望值或状态运行。例如，在上例中当输入量 u_g 不变时，若功率放大器的供电电压突然下降或电动机负载突然上升，电动机的转速即系统的输出量都会下降。输出量的下降使它偏离了给定输入量 u_g 对应的期望值。这时，若要维持原输出值，操作人员就必须重新调整电位器滑动端位置，增加给定输入电压值后才能达到。

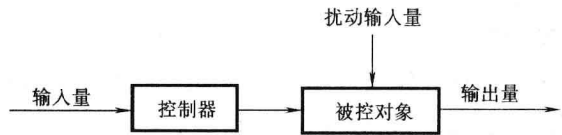


图 1-2 开环控制系统职能框图

二、闭环控制

闭环控制是指系统输出端与输入端之间存在反馈回路，或者说，系统的输出量直接或间接地参与了系统的控制作用。

图 1-3 所示的直流电动机调速系统，是闭环控制的一个例子。实际上，它是在开环调速系统的基础上引入一台测速发电机(TG)构成的。测速发电机起着检测系统输出量即转速 n 并把它转换成与给定电压 u_g 物理量相同的反馈电压 u_f 。反馈电压 u_f 与给定输入电压 u_g 相比较后产生一偏差电压 $\Delta u (= u_g - u_f)$ ，再经过放大器放大后去控制直流电动机的转速。当电位器滑动端处在某一位置时，电动机就以一个相对应的希望转速值带动生产机械运转。当出现外部或内部扰动时，例如，功率放大器的输出电压下降，或者电动机的拖动负载突然增加，电动机的转速就会下降。电动机转速的变化会被测速发电机检测出来，相应地使反馈电压 u_f 的值下降。这时，反馈电压与给定输入电压比较后使偏差电压值 Δu 增大，经放大器放大后，电动机电枢电压增加使转速回升。从而减小或消除了由于系统外部或内部的各种扰动所造成的输出量转速的偏差。

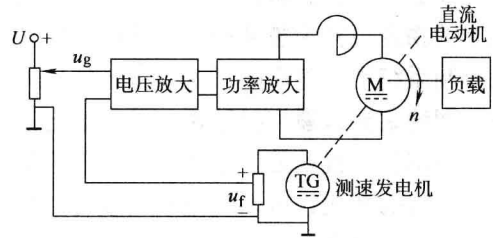


图 1-3 直流电动机闭环调速系统

从上述分析看出，闭环控制实际上是根据负反馈原理，按偏差量进行控制的。系统中无论是内部还是外部扰动引起输出量偏离期望值而产生偏差时，就会有相应的控制作用产生去消除偏差，使输出量重新恢复到希望值上。因此，闭环控制也称为反馈控制或偏差控制。闭环控制系统框图如图 1-4 所示。

闭环控制系统广泛地应用于各工业部门。图 1-5 所示的发电机励磁控制系统，是闭环控

制的又一实例。

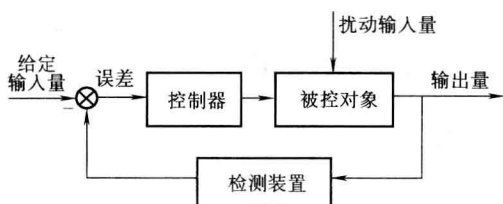


图 1-4 闭环控制系统框图

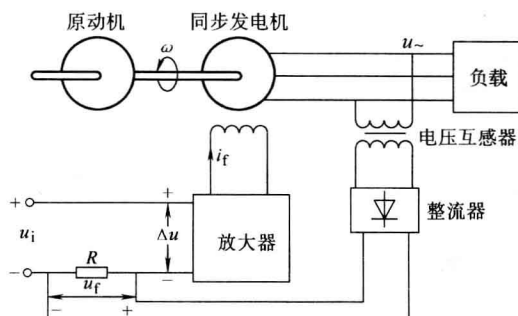


图 1-5 发电机励磁控制系统

图 1-5 中，三相交流同步发电机由原动机带动作恒速旋转，并向负载供电。系统的被控对象是发电机，系统的输出量是发电机端电压 u_{\sim} 。电压 u_i 是系统的给定输入量。电压互感器检测发电机端电压 u_{\sim} ，经整流后获得与发电机端电压 u_{\sim} 成比例的直流反馈电压 u_f 。输入电压 u_i 与反馈电压 u_f 相减后产生偏差电压 Δu ， Δu 经放大器放大去控制发电机的励磁电流。通过改变发电机的励磁电流去控制发电机的机端电压，使机端电压在系统受到各种干扰时，例如负载波动，都能使它维持在输入电压 u_i 对应的希望值上。

三、复合控制

复合控制是开环和闭环控制相结合的一种控制方式。实际上，它是在闭环控制基础上再引入一条由给定输入信号或扰动作用所构成的顺馈通路。顺馈通路相当于开环控制。复合控制通常有两种典型结构，分别称为按输入信号补偿结构和按扰动作用补偿结构，如图 1-6 所示。

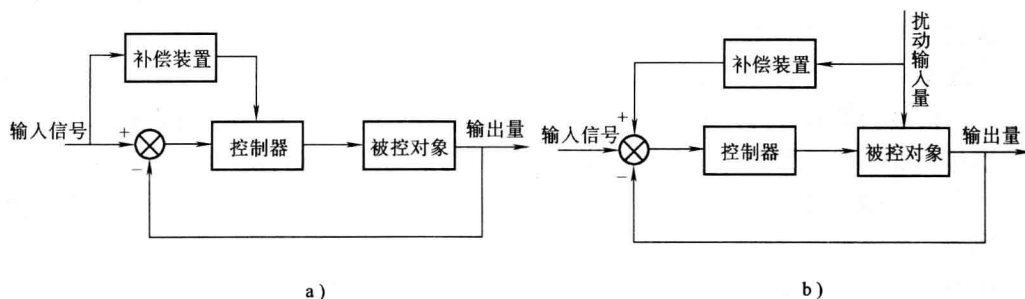


图 1-6 复合控制结构框图

a) 按输入信号补偿结构 b) 按扰动作用补偿结构

按输入信号补偿的复合控制系统，其补偿装置提供了一条顺馈控制信号，此信号与原控制信号一起对被控对象进行控制以提高系统跟踪输入信号的能力(精度)。按扰动作用补偿的复合控制系统，其补偿装置利用干扰信号产生一控制作用以补偿或抵消干扰信号对被控量的影响，增强系统的抗干扰能力。两种补偿的原理及设计方法详见第三章。

上面介绍了三种基本的控制方式。实际上目前许多新型的控制系统的都是在三种基本的控制方式上发展而成的。对于这三种控制方式，一般来说，开环控制的结构简单、成本低廉、调试容易，但控制精度较差，抗干扰能力不强，只适用于性能要求不高的控制系统；闭

环控制的结构较复杂，成本相对较高，调试较困难，但具有自动修正系统输出量偏差的能力，能克服系统内部元部件参数变化或外界扰动所引起的误差，其控制精度较高。闭环控制系统最广泛地应用于工业的各个部门；若要求实现较复杂且精度更高的控制任务，可采用复合控制结构或其他新型的控制策略。

第二节 闭环控制系统的基本组成

根据被控对象和使用的元部件不同，闭环控制系统有各种不同的形式，但是就其职能来看，一般均由以下的基本环节组成。

(1) **被控对象** 是指要进行控制的设备或过程。

(2) **测量装置** 对系统输出量进行测量。因为测量元件的精度直接影响系统精度，所以应尽可能采用精度高的测量元件和合理的测量线路。

(3) **给定环节** 产生系统给定输入信号。给定环节的精度对系统的控制精度会有较大影响，因此应采用高精度元件构成给定环节。

(4) **比较环节** 对系统输出量与输入量进行比较，产生偏差信号，起信号的综合作用。在大多数控制系统中，比较环节常常是和测量环节或其线路结合在一起的，往往并不单独存在。

(5) **放大环节** 对偏差信号进行放大并进行能量形式的转换，使之适合于控制执行机构工作的信号。

(6) **执行机构** 对被控对象进行控制的装置或元件。

(7) **校正装置** 用于改善系统的性能。校正环节可以加在由偏差信号至输出信号之间的通道内。这种校正方式，又称为串联校正；校正装置也可以加在某一局部反馈通道内，这种校正方式，也称为反馈校正或并联校正。某些情况下，可以同时应用串联校正及并联校正以进一步提高控制系统的性能。

由上述基本环节组成的闭环控制系统职能框图如图 1-7 所示。图中，系统的基本元部件用框表示；信号的传输方向，用箭头表示；信号的综合，用带“×”的圆圈表示，“+”号表示两信号相加，即正反馈。正反馈只能在系统中的某局部环节间使用。“-”号表示两信号相减，即负反馈。信号从输入端沿箭头方向到达系统输出端的传输通道，称它为前向通路或正向通道。系统输出量经由测量装置反馈到系统输入端的传输通道，称它为主反馈通路或主反馈通道，而其他的反馈通道，称为副反馈或局部反馈通道。只有一个反馈通道的系统，

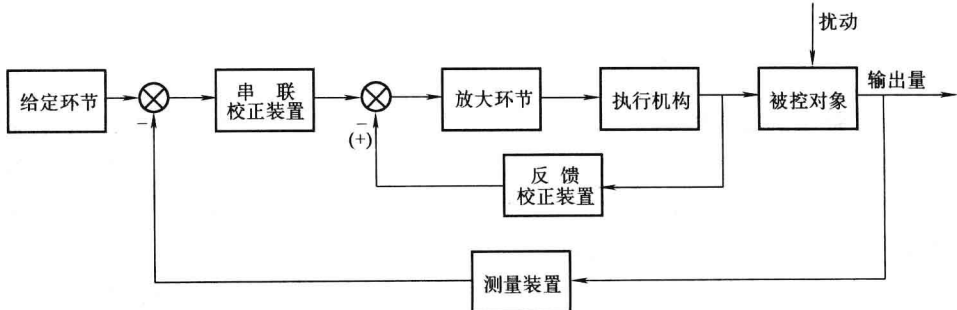


图 1-7 典型闭环系统框图

称为单回路系统，有两个以上反馈通道的系统，称为多回路系统。

例 1-1 根据图 1-8 所示的电动机速度控制系统工作原理图，完成：

- (1) 将 a 、 b 与 c 、 d 用线连接成负反馈方式。
- (2) 画出系统框图。

解 (1) 负反馈连接方式应为： $a \leftrightarrow d$ 相接； $b \leftrightarrow c$ 相接。因为，放大器输入端的电压应为给定电压与反馈电压两者之差，产生偏差电压，从而构成负反馈产生控制作用。根据基尔霍夫回路电压定律，应 $a \leftrightarrow d$ 相接； $b \leftrightarrow c$ 相接。

(2) 首先，系统中的每个部件各用一方框表示，各方框内写入该部件的名称；然后，根据系统信号的流向，方框间用带箭头的线段连接。图 1-8 所示系统的工作原理框图如图 1-9 所示。

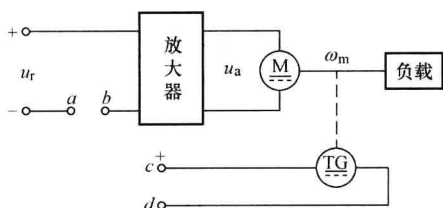


图 1-8 电动机速度控制系统工作原理图

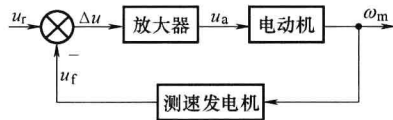


图 1-9 电动机速度控制系统的工作原理框图

例 1-2 图 1-10 为工业炉温自动控制系统的工作原理图。分析系统的工作原理，指出被控对象、被控量和给定量，画出系统框图。

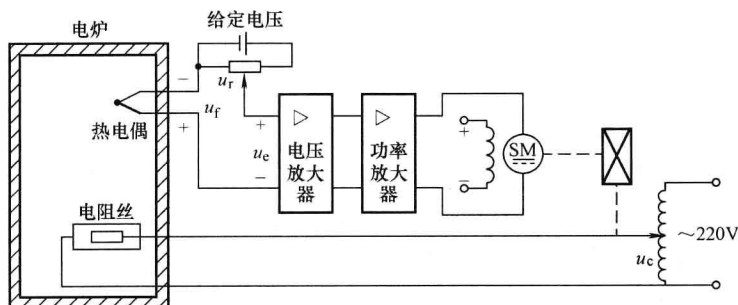


图 1-10 工业炉温控制系统工作原理图

解 加热炉采用的是电加热的方式。电热器产生的热量与调压器输出电压 u_e 的平方成正比， u_e 增加，炉温就上升，反之，炉温就下降， u_e 的高低与调压器滑动触点的位置有关，而该滑动触点由可逆转的直流电动机驱动。

炉子的实际温度用热偶测量，测量电压经放大后的输出电压为 u_f 。 u_f 作为系统的反馈电压与给定电压 u_r 进行比较，得出偏差电压 u_e ，经电压放大器、功率放大器放大后，作为电动机的电枢电压驱动电动机转动。

当炉温等于某个给定电压相对应的期望温度值 (T) 时，反馈电压 u_f 等于给定电压 u_r 。此时，偏差电压 $u_e = u_r - u_f = 0$ ，电动机的电枢电压也为 0，可逆电动机不转动，调压器的滑动触点停留在某个合适的位置上，使 u_e 保持在相对应的电压值上。这时，炉子散失的热量正好等于从加热器吸取的热量，形成稳定的热平衡状态，炉温就保持在与给定电压 u_r 对应的期

望温度值(T)上。

当炉膛温度由于某种原因突然下降(例如炉门打开造成的热量流失)时,则反馈电压 u_f 也会跟着下降,由于给定电压 u_r 不变,此时,偏差电压不为0,电动机的电枢电压也不为0,电动机的转动带动滑动触点上移使加热电压 u_c 上升,使炉膛温度回升,直至炉膛温度的实际值等于期望温度值(T)为止。

系统中,加热炉是被控对象,炉温是被控量(又称系统输出量),给定量(又称系统输入量)是由给定电位器设定的电压 u_r (表征炉温的期望值)。

系统中的每个部件各用一方框表示,各方框内写入该部件的名称,根据系统信号的流向,方框间用带箭头的线段连接。工业炉温控制系统框图如图1-11所示。

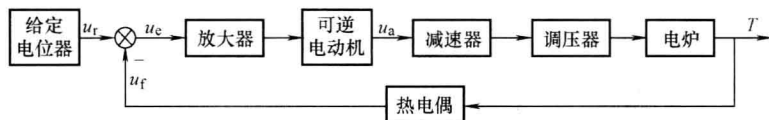


图 1-11 工业炉温控制系统框图

第三节 自动控制系统的分类

控制系统的分类方法不少。但是,通常人们很难确切地对自动控制系统进行分类,一是因为同一系统按不同的分类方法,其属性不同;二是由于控制技术发展很快,各式各样的新系统不断产生和发展。这里仅介绍常见的两种分类方法。

一、按使用的数学模型分类

1. 线性系统和非线性系统

(1) 线性系统 系统输入量与输出量之间的关系可用线性微分方程或线性差分方程描述的系统。若方程的系数与时间 t 无关即为定常数,则该系统又称为**线性定常系统**。若方程的系数值随时间 t 变化而变化,则称该系统为**线性时变系统**。

线性系统有两个重要特性:**叠加性和齐次性**。

1) 叠加性 当系统同时存在几个输入量作用时,其输出量等于各输入量单独作用时所产生的输出量之和。

2) 齐次性 当系统的输入量增大或缩小若干倍时,系统输出量也按同一倍数增大或缩小。齐次性又称为均匀性。

(2) 非线性系统 系统输入量与输出量之间的关系可用非线性微分方程或非线性差分方程描述的系统。

应注意,在自动控制系统中,即使只含有一个非线性环节,这一系统也是属于非线性的;其次,目前对于非线性系统的理论研究远不如线性系统那样完整和完善;严格来说,任何物理系统的特性,都是非线性的,但在一定的条件下若可以将某些非线性特性线性化,近似地用线性微分方程去描述,这样就可以按照线性系统来处理。

2. 连续系统和离散系统

(1) 连续系统 若系统中各元件的输入量和输出量均为时间 t 的连续函数时,称该系统

为连续系统。连续系统的运动规律可用微分方程描述，系统中各部分信号都是模拟量。

(2) 离散系统 系统中某一处或几处的信号是以脉冲系列或数码的形式传递的系统，称为离散系统。离散系统的运动规律可用差分方程描述。计算机控制系统就是典型的离散系统。

二、按给定输入信号特征分类

(1) 恒值系统 给定输入为恒值，要求系统在任何扰动作用下，系统输出量能以一定精度接近给定希望值的系统，称为恒值系统。如生产过程中的温度、压力、流量、液位高度、电机转速等自动控制系统属于恒值系统。

(2) 随动系统 给定输入量是未知的的时间函数，要求系统输出量跟随输入量变化的系统，称为随动系统。如雷达天线跟踪系统、卫星跟踪、自动火炮自动控制系统等属于随动系统。

(3) 程序控制系统 给定输入量是按照已知的时间函数变化的系统，称为程序控制系统。如程序控制车床、热处理炉温度的升温、保温、降温过程等都是按照预先设定的规律进行控制的，它们都属于程序控制系统。

第四节 对控制系统的基本要求

在分析和设计系统时，需要有评价系统的标准，这个标准通常用性能指标来表示。不同的被控对象，不同的控制任务，对性能的要求往往有所不同。但是，总体上来说，对任何控制系统的基本要求，集中体现在系统性能的“稳定性”、“动态特性”和“稳态特性”三个方面，或简称为“稳”、“快”、“准”。

一、稳定性

控制系统“稳定性”的定义，有多种表达。较通常的表达是，一个处于静止或某一平衡工作状态的系统，在受到任何输入(给定信号或扰动)作用时，系统的输出会离开静止状态或偏离原来的平衡位置；当作用消除后，若系统能回到原来的静止状态或平衡位置，则称系统是稳定的。否则称系统是不稳定的。

对于线性定常系统，也可表达为，在阶跃信号作用下，若系统输出有一个确定值相对应，则称系统是稳定的；若系统输出值越来越大，则称系统是不稳定的，如图 1-12 所示。

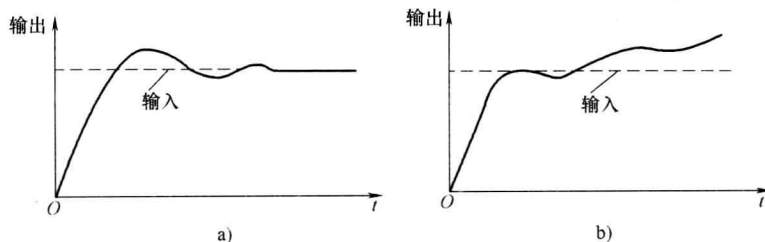


图 1-12 线性定常系统稳定性

a) 稳定系统 b) 不稳定系统

稳定性，是系统能否工作的前提条件，也是对系统最起码的要求。要想使系统能正常工作，系统必须是稳定的，而且往往要求有一定的“稳定裕量”。

二、动态特性

稳定的控制系统，当受到阶跃输入信号作用后，由于系统内部机械部件的质量和惯性的作用，内部电路中存在的电容、电感等储能元件的原因，使系统的输出要经历一过程才能达到某一稳定值。系统输出随时间 t 变化的这一过程称为系统的响应过程。响应过程常常又以调节时间 T_s (或称过渡过程时间) 为界，分为动态过程 (又称暂态过程) 和稳态过程 (又称静态过程)，如图 1-13 所示。动态特性就是反映系统在动态过程中，跟踪输入或抑制干扰的能力。动态特性好的系统，表现为动态过程具有较好的平稳性、调节时间短且振荡次数少。

三、稳态特性

系统在过渡过程结束后，其输出量的状态值，一般用稳态误差来描述。稳态误差的大小反映了系统控制的精确程度。稳态误差值越小的系统，说明系统的控制精度越高，稳态特性越好。

值得注意的是，对于同一个系统体现稳定性、动态特性和稳态特性的稳(定)、快(速)、准(确)这三个要求是互相制约的。提高响应的快速性，可能会引起系统的强烈振动；改善系统相对稳定性，则又可能会使控制过程时间延长，反应迟缓以及精度变差；提高系统的稳态精度，则可能会引起动态特性(平稳性及过渡过程时间)变坏。分析和解决这些矛盾，将是本学科讨论的重要内容。

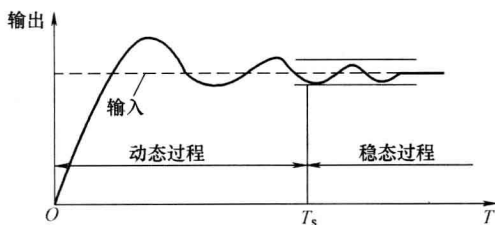


图 1-13 稳定系统的典型阶跃响应

习 题

1-1 有一水位控制装置如图 1-14 所示。试分析它的控制原理，指出它是开环控制系统还是闭环控制系统？说出它的被控量、输入量及扰动输入量是什么？绘制出其系统框图。

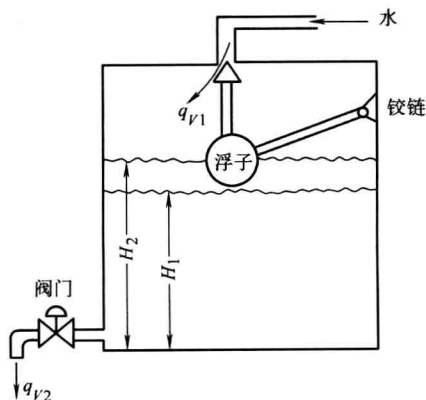


图 1-14 题 1-1 图

q_{v1} —输入流量 q_{v2} —输出流量
 H_1 —实际水位 H_2 —希望水位

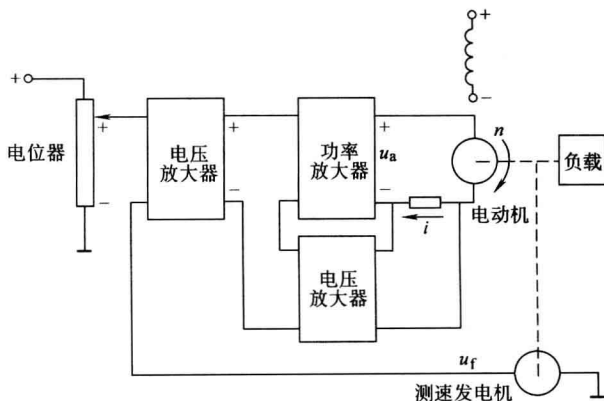


图 1-15 题 1-2 图

1-2 某生产机械的恒速控制系统原理如图 1-15 所示。系统中除速度反馈外，还设置了电流正反馈以补偿负载变化的影响。试标出速度负反馈、电流正反馈的信号的正、负号并画出框图。

1-3 图 1-16 是船舶驾驶角位置跟踪系统的原理图。给定值 θ_r 表示命令的角位置，被控量 θ_c 为船舵角位置。说明系统的工作原理，画出系统框图。

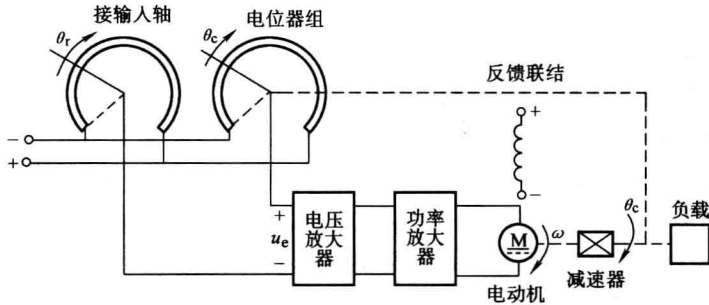


图 1-16 题 1-3 图

1-4 洗衣机控制系统框图如图 1-17 所示。试设计一个闭环控制的洗衣机系统框图。



图 1-17 题 1-4 图

1-5 两台汽轮发电机组转速调节系统如图 1-18 所示。试分析它们的控制原理，并指出它们是开环控制还是闭环控制系统？画出系统框图。

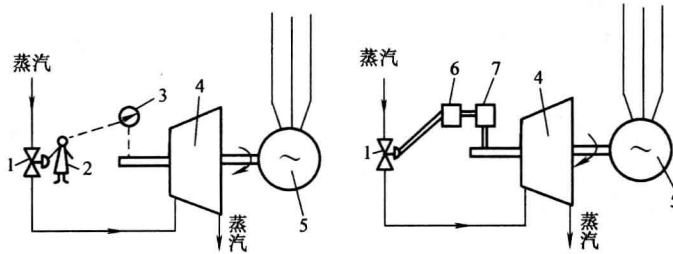


图 1-18 题 1-5 图

- 1—进气阀 2—操作人 3—转速表 4—汽轮机
- 5—同步发电机 6—调节器 7—转速检测元件

第二章 线性连续系统的数学模型

控制系统的种类很多，如物理的，生物的，社会经济的等。对于一个具体的系统来讲，其最终目的是能够完成某些规定的任务，达到一定的要求，例如建造一个室内恒温系统，是为了保持室内温度的恒定。人们在设计或检验一个控制系统性能时，主要从动态性能和稳态性能两方面来考虑。为了能较好地利用控制系统为我们服务，就必须掌握其内在规律。为了便于分析，人们常将描述系统工作状态的各物理量随时间变化的规律用数学表达式或图形表示出来，这种描述系统各个物理量之间关系的数学表达式或图形称为系统的数学模型。

建立数学模型有两种基本方法：机理分析法和实验辨识法。机理分析法是通过理论推导得出，这种方法是各环节所遵循的物理规律（如力学、运动学、电磁学、热学等）来编写；实验辨识法是由实验求取，即根据实验数据通过整理编写出来。在实际工作中，这两种方法是相辅相成的。由于理论推导是基本的常用方法，本章着重讨论这种方法。

第一节 动态微分方程的编写

编写系统的微分方程，其目的在于通过该方程确定被控量与给定量及扰动量之间的函数关系，为分析或设计系统创造条件。具体步骤是：

首先，要确定系统的输入量和输出量；其次，通过分析研究，根据力学、运动学、电磁学、热学等规律列出描述系统运行规律的一组微分方程；最后，消去中间变量，求出描述系统输入与输出关系的微分方程。

一般情况下，用机理分析法建立系统微分方程时，由于系统的部件或环节较多，因此通常会先把系统划分为若干个独立的环节（部件），分别求出每个环节（部件）的动态微分方程，然后再合并各环节（部件），得到整个系统的微分方程。

1. 建立环节（部件）的微分方程 环节（部件）由若干个元器件组成，能够实现一定的功能。

下面通过举例说明用机理分析法建立部件微分方程的方法和步骤。

例 2-1 编写如图 2-1 所示 RC 电路的微分方程式，步骤如下：

解 (1) 确定电路的输入量和输出量 由图 2-1 可知，当电压 u_i 变化时，将引起电路中电流 i 和电压 u_o 的变化。在这里，取电路的 u_i 为输入量，取 u_o 为输出量，则回路中电流 i 为联系输入和输出的中间变量。

(2) 列出原始微分方程式 根据电路理论得

$$u_i = Ri + u_o$$

$$i = C \frac{du_o}{dt}$$

(3) 消去中间变量 联立以上两个方程式，消去中间变量 i ，可得电路微分方程式：

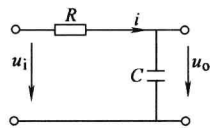


图 2-1 RC 电路原理图

$$RC \frac{du_o}{dt} + u_o = u_i \quad (2-1)$$

式(2-1)表达了 RC 电路的输入量 u_i 与输出量 u_o 之间的关系。

例 2-2 图 2-2 所示为一弹簧阻尼部件, 图中质量为 m 的物体受到外力 F 的作用, 产生位移 y , 求该系统以外力 F 为输入, y 为输出的微分方程。

解 (1) 确定电路的输入量和输出量 由已知条件可得, 系统外力 F 为输入量, 位移 y 为输出量。

(2) 根据力学、运动学原理列写方程式 根据牛顿定律, 由图 2-2 所示部件可得, 部件的外力 F 与部件的弹簧阻力 F_s 及阻尼器的粘性摩擦阻力 F_f 应满足方程:

$$ma = F - F_s - F_f \quad (2-2)$$

式中 m ——物体质量;

a ——物体的加速度。

而且

$$a = \frac{d^2 y}{dt^2}$$

$$F_s = ky$$

$$F_f = f \frac{dy}{dt}$$

式中 k ——弹簧系数;

f ——阻尼器的阻尼系数。

(3) 消去中间变量得出微分方程 将以上三式代入式(2-2), 可得

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + f \frac{dy}{dt} + ky = F \quad (2-3)$$

式(2-3)即为描述该弹簧阻尼部件输入与输出关系的微分方程。

例 2-3 他励式直流电动机是控制系统中常用的执行机构或控制对象。当电枢电压 u_d 发生变化时, 则其转速 n 以及角位移 θ 产生相应的变化。

解 (1) 确定输入量和输出量 取输入量为电动机的电枢电压 u_d , 输出量为电动机的转速 n 。

(2) 列写微分方程式 根据回路电压定律由图 2-3 可得电枢回路的微分方程式:

$$e_d + i_d R_d + L_d \frac{di_d}{dt} = u_d \quad (2-4)$$

式中 e_d ——电动机电枢反电动势;

R_d ——电动机电枢回路电阻;

L_d ——电动机电枢回路电感;

i_d ——电动机电枢回路电流。

因为反电动势 e_d 与电动机的转速 n 成正比, 可取

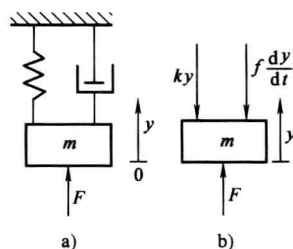


图 2-2 弹簧阻尼部件

a) 原理图 b) 受力图

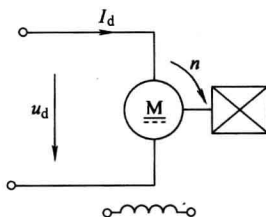


图 2-3 直流电动机电枢回路