

机械工程控制基础 — **MATLAB** 工程应用

JIXIE GONGCHENG KONGZHI JICHU - MATLAB GONGCHENG YINGYONG

© 宋志安 徐瑞银 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

机械工程控制基础

— MATLAB 工程应用

机械工业出版社 (北京) 出版

ISBN 7-111-00000-0



机械工业出版社
北京

TH-39/104

2008

机械工程控制基础

——MATLAB 工程应用

宋志安 徐瑞银 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了机械控制工程与 MATLAB 相结合的应用成果。

全书共 7 章,第 1 章主要介绍了机械控制理论的一些基础内容和 MATLAB 的应用特点;第 2 章是 MATLAB 基础;第 3 章介绍了多种物理系统的数学模型的建模实例,补充了拉普拉斯变换和拉普拉斯反变换的 MATLAB 方法,介绍了基于 MATLAB 的传递函数描述和 Simulink 方框图的构造方法和相似性等;第 4 章介绍了在时域分析中针对理论表达式的 MATLAB 编程和 MATLAB 函数应用,实现了时域分析曲线的生成和相关重要参数的获取;第 5 章介绍了基于 MATLAB 的 Nyquist 图和 bode 图的自动生成方法;第 6 章介绍了 Routh 稳定判据、基于 MATLAB 的 Nyquist 和 bode 稳定规则和几个稳定性工程应用实例。第 7 章通过实例讲授了利用 MATLAB 编程实现针对真实系统的 PID 校正和串联校正方法。

该书供“机械设计制造及自动化”专业学生使用,同时也适合其他与机械有关专业学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程控制基础:MATLAB 工程应用/宋志安,徐瑞银
编著. —北京:国防工业出版社,2008.8

ISBN 978-7-118-05785-0

I. 机... II. ①宋...②徐... III. 机械工程—控制系
统—计算机辅助计算—软件包, MATLAB IV. TH—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 086649 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 372 千字

2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 29.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

撰写本书的念头由来已久,在初次为本科生讲授“机械控制基础”时,当看到书中的表达式和不知怎么产生的图形,真是不知所措,当时就尝试用 QuickBasic 编程去实现时域分析曲线和 bode 图等计算机辅助生成的工作。实际上,可以用高级语言去解决这类问题,只是实现起来很困难。MATLAB 语言的语法规则更简单,编程特点更贴近人的思维方式,写程序就像在便笺上列写公式和求解,一小段程序就能完成高级语言几页程序所完成的内容。因此在讲授控制理论的同时,在多媒体教室给学生展示一些复杂的理论表达式是怎样用 MATLAB 编程实现它的求解、实现结果自动获取和图形可视化等方面的内容。这样,计算机辅助分析取代了手工绘制各种曲线以及 Nyquist 图和 bode 图,实现了参数求取和图解结果的自动获取,既改变了枯燥乏味的课堂环境,增加了学生学习知识的趣味性,也提高了学习控制工程的积极性,达到了良好的学习效果。通过本课程的学习,不但使学生懂得了机械控制原理及应用,而且也掌握了 MATLAB。

本书总结了作者在教学实践中将机械控制基础与 MATLAB 结合的一些经验和体会,以 MATLAB 为主线,按照控制理论由浅入深的顺序进行编写。全书共分 7 章,第 1 章主要介绍了机械控制理论的一些基础内容和 MATLAB 的应用特点;第 2 章是 MATLAB 基础知识;第 3 章介绍了多种物理系统的数学模型的建模实例,补充了拉普拉斯变换和拉普拉斯反变换的 MATLAB 方法,介绍了基于 MATLAB 的传递函数描述和 Simulink 方框图的构造方法和相似性等;第 4 章介绍了在时域分析中针对理论表达式的 MATLAB 编程和 MATLAB 函数应用,实现了时域分析曲线的生成和相关重要参数的获取;第 5 章介绍了基于 MATLAB 的 Nyquist 图和 bode 图的自动生成方法;第 6 章介绍了 Routh 稳定判据、基于 MATLAB 的 Nyquist 和 bode 稳定规则、几个工程稳定性应用实例;第 7 章通过实例讲授了利用 MATLAB 编程实现针对真实系统的 PID 校正和串联校正方法。书中的 MATLAB 源代码是在 MATLAB 的 m 文件编辑器中编辑运行完毕后粘贴到 Word 文档中去的,因而保证了书中每一条 m 文件语句的准确性,读者可放心使用。本书既可供“机械设计制造及其自动化”专业学生使用,也可供其他与机械相关专业学生参考,授课 40 学时。在使用过程中,教师可根据教学的需要、学时多寡、学生的基础进行取舍,第 2 章内容可由学生自学。

研究生郑珊珊和徐瑞银老师完成了第 2 章的编写,其余章节由宋志安执笔。解放军海军 4308 工厂高级工程师周连全博士审阅了第 3 章和第 4 章,其余章节由徐瑞银审阅。全书由宋志安统稿。本书由山东科技大学机电学院副院长杨前明教授主审。

由于水平有限,书中有不当之处,敬请读者提出宝贵意见,在此深表谢意!

songzhan 2005@sdust.edu.cn

宋志安

2008 年 4 月于青岛

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 自动控制系统的一般概念	2
1.1.1 系统的描述	2
1.1.2 控制和控制系统的概念	3
1.2 开环控制系统与闭环控制系统	6
1.3 自动控制系统的分类	7
1.3.1 线性控制系统和非线性控制系统	7
1.3.2 恒值控制系统和随动系统	7
1.3.3 连续控制系统和离散控制系统	8
1.4 自动控制系统的品质要求	8
1.5 自动控制系统的常用研究方法	9
1.6 自动控制系统的数学模型及 MATLAB 描述方法	9
习题	10
第 2 章 MATLAB 基础知识	12
2.1 引言	12
2.1.1 MATLAB 发展历程	12
2.1.2 MATLAB 系统构成	13
2.1.3 MATLAB 工具箱	13
2.1.4 MATLAB 7.0/Simulink 6.0 最新特点	14
2.2 MATLAB 桌面操作环境	16
2.2.1 MATLAB 启动和退出	16
2.2.2 MATLAB 主菜单及功能	17
2.2.3 MATLAB 命令窗口	21
2.2.4 MATLAB 工作空间	21
2.2.5 MATLAB 文件管理	22
2.2.6 MATLAB 帮助使用	23
2.3 MATLAB 数值计算	23
2.3.1 MATLAB 数值类型	23
2.3.2 矩阵运算	25
2.4 关系运算和逻辑运算	30

2.5	符号运算	30
2.5.1	符号运算基础	31
2.5.2	常用符号运算	31
2.5.3	控制系统中常用的符号运算	33
2.6	MATLAB 常用绘图命令	34
2.7	MATLAB 程序设计	37
2.7.1	MATLAB 程序类型	37
2.7.2	MATLAB 程序流程控制	38
2.7.3	MATLAB 程序基本设计原则	41
	习题	41
第 3 章	控制系统的数学模型	43
3.1	系统的微分方程	43
3.1.1	概述	43
3.1.2	列写微分方程的一般方法	44
3.2	数学模型建模实例	45
3.3	系统按数学模型分类	48
3.4	控制系统的线性化数学模型	49
3.5	拉普拉斯变换	50
3.6	拉普拉斯反变换	52
3.7	系统的传递函数	55
3.7.1	传递函数的定义与性质	55
3.7.2	传递函数的零点、极点和放大系数	56
3.8	典型环节及其传递函数	58
3.8.1	环节的概念	58
3.8.2	环节的分类	59
3.9	相似原理	62
3.10	MATLAB 的仿真集成环境 Simulink	63
3.10.1	传递函数方框图	63
3.10.2	仿真工具 Simulink	66
3.11	系统模型连接	71
3.11.1	模型串联	71
3.11.2	模型并联	72
3.11.3	反馈连接	73
3.11.4	系统扩展	74
3.12	状态空间法建模	74
3.13	系统模型的转换	80
	习题	81

第 4 章 控制系统的时域分析	84
4.1 控制系统的典型输入信号	84
4.2 MATLAB/Simulink 在时域分析中的应用	86
4.2.1 时域分析中 MATLAB 函数的应用	86
4.2.2 MATLAB 在时域分析中的应用实例	87
4.3 一阶系统的时域分析	88
4.3.1 单位阶跃响应	88
4.3.2 单位斜坡响应	89
4.3.3 单位脉冲响应	91
4.4 二阶系统	92
4.4.1 二阶系统的单位脉冲响应	94
4.4.2 二阶系统的单位阶跃响应	96
4.4.3 二阶系统响应的性能指标	99
4.5 高阶系统	110
4.6 系统误差分析与计算	114
4.6.1 系统的误差 $e(t)$ 与偏差 $\epsilon(t)$	114
4.6.2 误差 $e(t)$ 的一般计算	116
4.6.3 系统的稳态误差与稳态偏差	117
4.6.4 与输入有关的稳态偏差	117
4.6.5 与干扰有关的稳态偏差	120
习题	122
第 5 章 系统的频率响应法	124
5.1 频率特性	124
5.1.1 频率响应	124
5.1.2 频率响应的定义	126
5.2 Nyquist 图示法	130
5.2.1 典型环节的 Nyquist 图	130
5.2.2 开环系统的 Nyquist 图	135
5.2.3 用 MATLAB 函数绘制 Nyquist 图	138
5.3 bode 图示法	141
5.3.1 频率特性的对数坐标图	141
5.3.2 典型环节的 bode 图	142
5.3.3 利用 MATLAB 函数绘制 bode 图	153
5.4 频率特性与时域响应的关系	155
5.5 最小相位系统与非最小相位系统	160
习题	161

第 6 章 系统的稳定性	163
6.1 系统稳定性的初步概念	163
6.1.1 系统不稳定现象的发生	163
6.1.2 系统稳定的定义和条件	165
6.1.3 关于稳定性的一些提法	167
6.2 Routh 稳定判据	168
6.2.1 Routh 稳定判据的一般情况	168
6.2.2 Routh 稳定判据的特殊情况	172
6.3 Nyquist 稳定判据	173
6.3.1 幅角原理(Cauchy 定理)	174
6.3.2 Nyquist 稳定判据	175
6.3.3 Nyquist 判据应用举例	177
6.4 bode 稳定判据	183
6.4.1 Nyquist 图和 bode 图的对应关系	183
6.4.2 穿越的概念	184
6.4.3 bode 判据	184
6.5 系统的相对稳定性	185
6.5.1 相位裕度 γ	186
6.5.2 幅值裕度 K_g	186
6.6 稳定性计算举例	188
6.6.1 实例 1: 仿形刀架	188
6.6.2 实例 2: 电液位置伺服控制系统	192
6.6.3 实例 3: 计算机控制的电液伺服位置控制系统	197
习题	203
第 7 章 系统的性能指标与校正	206
7.1 系统的性能指标	206
7.1.1 时域性能指标	206
7.1.2 频域性能指标	207
7.1.3 综合性能指标(误差准则)	207
7.2 系统的校正	208
7.3 PID 校正	209
7.3.1 基于 MATLAB 的比例控制	210
7.3.2 基于 MATLAB 的 PD 调节器	212
7.3.3 基于 MATLAB 的 PI 调节器	214
7.3.4 基于 MATLAB 的 PID 调节器	216
7.4 串联校正	217
7.4.1 基于 MATLAB 的相位超前校正	218

7.4.2 基于 MATLAB 的相位滞后校正	227
7.4.3 基于 MATLAB 的相位滞后—超前校正	237
7.5 关于系统校正的一点讨论.....	248
习题	249
参考文献.....	251

第1章 绪 论

人类文明是从第一把石刀开始的。与此同时，也就开始了“制造工艺工程”，开始了对制造工艺过程的“控制”。这时对劳动着的原始人而言，手是执行装置，用以操作生产工具——石刀，感觉器官是检测装置，感受着制造过程中的各种信息，人脑是中枢控制装置，对获得的信息进行分析、比较，作出判断、决策。由此可以看出：即使在极为原始的制造工艺过程中，也已经有了执行、检测、控制环节，它们构成了一个闭环的自动控制系统。

“机械控制工程”是阐明和研究自动控制共同规律的一门技术科学，它以自动控制系统为研究对象。机械控制工程技术是自动化技术的主要分支，各种自动控制系统是工业生产设备自动化不可缺少的组成部分，机械控制系统的性能好坏直接关系到产品质量和生产效率的提高。同时“机械控制工程基础”这门课也是以后学习机器人工程技术基础、测试技术和机电一体化技术等课程的必修课程，它是一门十分重要的专业基础课。

目前，控制理论在机械制造领域中应用最为活跃的有下面的几个主要方面。

(1) 在机械制造过程自动化方面。现代生产向机械制造过程的自动化提出了越来越多、越来越高的要求：一方面是所采用的生产设备与控制设备越来越复杂；另一方面是所要求的技术经济指标越来越高。这就必然导致“自动化”、“可靠性”和“最优化”的结合，从而使得机械制造过程的自动化技术从一般的自动机床、自动生产线发展到数控机床、多维计算机控制设备、柔性自动生产线、无人化车间乃至设计、制造、管理一体化的计算机集成制造系统（CIMS）。还可以预期，伴随着制造理论、计算机网络技术和智能化以及管理科学的发展，还将发展到网络环境下的智能制造系统，包括网络化的制造系统的组织与控制，当然也包括智能机器人、智能机床，以及其中的智能控制，乃至发展到全球化制造。

(2) 在对加工过程的研究方面，现代生产一方面是生产效率越来越高，例如，高速切削（磨削）、强力切削（磨削）、高速工程等日益获得广泛应用；另一方面是加工质量特别是加工精度越来越高，使加工过程中的“动态效应”不容忽视。这就要求把加工过程如实地作为一个动态系统加以研究。

(3) 在产品的设计方面，同上述两点密切相关，正在突破而且还在不断突破以往的经验设计、试凑设计、类比设计的束缚，在充分考虑产品与设备的动态特性的条件下，密切结合其工作过程，探索建立它们的数学模型，采用计算机及其网络进行设计。

(4) 在动态过程或参数的测试方面，以往的测量一般是建立在静态基础上的（特别是几何测量），而现在以控制理论作为基础与以信息技术作为手段的动态测试技术发展十分迅速。动态误差、动态位移、振动、噪声、动态力与动态温度等动态物理量的测量，从基本概念、测试方法、测试手段到测试数据的处理方法无不同控制理论息息相关。

总之，控制理论、计算机技术，尤其是信息技术，同机械制造技术的结合，将促使机械制造领域中的构思、研究、实验、设计、制造、诊断、监控、维修、组织、销售、服务、管理等各个方法发生巨大乃至根本性的变化，目前的这种变化还只是开始不久而已。

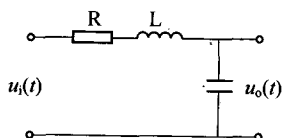
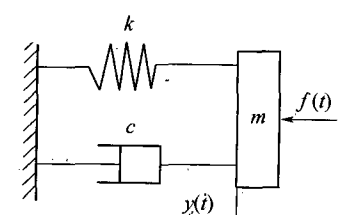
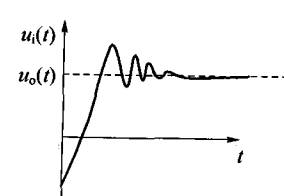
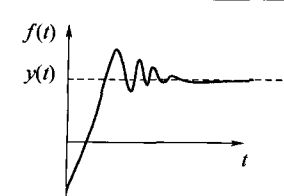
1.1 自动控制系统的一般概念

1.1.1 系统的描述

系统是指完成某些预定任务或目标的相互联系有相互作用的对象的集合。“系统”这一名词已经广泛地应用于社会、经济、工业等各个领域。通常系统可分为非工程系统和工程系统。非工程系统的范围十分广泛，如社会、国民经济、生态系统、交通管理系统等。工程系统覆盖了机电、机械、化工、热力、流体等工程应用领域。

任何系统都存在三个方面的内容，即实体、属性和活动。组成系统的具体对象或单元称为实体，如机电液控制系统中的电液伺服阀、伺服缸、放大器、控制器。实体的特性（状态和参数）称为属性，如位移、速度、电流、电压等，可用来描述系统中各实体的性能。活动是对象随时间推移而发生的状态变化，活动含有明显的时间概念，如表 1-1 所列。

表 1-1 简单的电系统和机械系统的实例

	电系统	机械系统
系统实体		
系统描述	$LC \frac{d^2 u_0}{dt^2} + RC \frac{du_0}{dt} + u_0 = u_1(t)$	$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = f(t)$
系统的属性	电压: $u_1(t), u_0(t)$ 电感: L 电容: C 电阻: R	位移: $y(t)$ 力: $f(t)$ 弹簧刚度: k 阻尼系数: c 质量: m
系统的活动		

研究系统除了研究系统的实体、属性和活动外，还需要研究系统的环境，考察环境和系统之间的相互作用及对系统活动的影响。因此研究系统首先应确定系统实体，即包括哪些对象，确定系统与环境的边界，这样可以清楚地了解环境的变化对系统的影响。

例如，在研究恒温系统时，往往要考虑环境温度的影响；研究电系统时，常常要考虑电压波动；在研究机械系统时，常常把温度、摩擦力等其他非线性因素当做干扰来考虑对系统的影响。研究系统的重要内容是探讨系统、环境、输入和输出之间的动态关系。系统、环境、输入和输出之间的关系如图 1-1 所示。

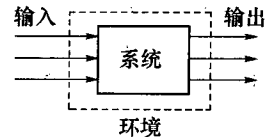


图 1-1 系统与环境

1.1.2 控制和控制系统的概念

所谓“控制”，是指由人或控制装置使被控对象按照一定目的来动作所进行的操作。“动作”是指被控对象的“状态”的变化，“状态”是用物理量来表征的。“按照一定目的来动作”就是指被控对象状态的物理量的变化符合为某种目的而给定的规律。

控制的任务如果是由人来完成，则称为人工控制；如果人不经常直接参与，而是用控制装置来完成，则称为自动控制。控制装置和被控对象的结合称为自动控制系统。例如，人造卫星按制定的轨道运行，并始终保持正确的姿态，使它的太阳能电池一直朝向太阳，无线电天线一直指向地球；电网的电压和频率自动地维持不变；金属切削机床的速度在电网电压或负载变化时，能自动保持近似地不变。以上这些都是自动控制的结果。

现代数字计算机的迅速发展，为自动控制技术的应用开辟了广阔的前景。使它不仅大量应用于空间技术、科技、工业、交通、环境卫生等领域，而且它的概念和分析问题的方法也向其他领域渗透。例如，政治、经济、教学等领域中的各种体系；人体的各种功能；自然界中的各种生物学系统，都可视为是一种控制系统。

自动控制是一门理论性很强的科学技术，一般泛称为“自动控制技术”。把实现自动控制所需的各个部件按一定的规律组合起来，去控制被控对象，这个组合体叫做“控制系统”。分析与综合自动控制系统的理论称之为“控制理论”。

在工业生产过程中，为了生产正常进行，提高产品的质量和劳动生产率，必须按照预定的要求对机器、设备或生产过程进行操作。例如，必须使连轧机的各个轧辊的既定转速保持不变；必须使机床的工作台或刀架的位置准确地跟踪进给指令；使热处理的炉温保持某个恒定值或按一定规律变化等。其中轧辊、工作台或刀架、热处理炉就是被控对象，而转速、位置、炉温分别表征这些机器设备的物理量，称为被控量。要求这些被控量所应保持的数值或变化规律，称为这些被控量的希望值（或希望的被控量）。而操作或控制的任务就是使被控对象的被控量等于或按一定精度符合希望值。

自动控制系统的种类很多，被控制的物理量有各种各样，如温度、压力、流量、电压、转速、位移和力等。组成这些控制系统的元部件虽然有较大的差异，但是系统的基本结构却相类同，且一般都是通过机械、电气、液压等方法来代替人工控制。为了了解自动控制系统的结构，首先分析图 1-2 所示的液面控制系统，人若参与了该系统的控制，应起到哪些作用。

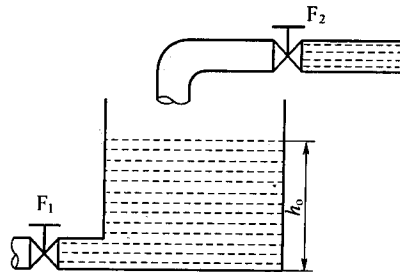


图 1-2 水池液面控制系统

图中 F_1 为放水阀、 F_2 为进水阀，控制要求液面的希望高度等于 h_0 ，当人参与控制时，就要不断地将实际液面与希望液面的高度作比较，根据比较结果，决定进水阀 F_2 的开度增大还是减少，以达到维持液面高度不变的目的。图 1-3 为人工参与该系统控制的框图。

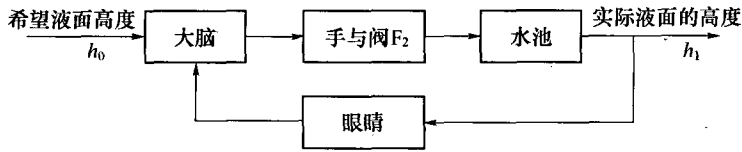


图 1-3 液面人工控制系统的框图

由该图可见，人在参与控制中起了三方面的作用。

- (1) 测量实际液面的高度 h_1 ——用眼睛。
- (2) 将测得实际液面的高度 h_1 与希望的液面高度 h_2 相比较——用脑。
- (3) 根据比较的结果，即按照偏差的正负去决定控制的动作——用手。

显然，如果用自动控制去代替上述的人工控制，那么在自动控制系统中必须具有上述 3 种职能机构，即测量机构、比较机构和执行机构。不言而喻，人工控制既不能保证系统所需的控制精度，也不能减轻人的劳动强度。如果将图 1-2 改为图 1-4 所示的自动控制系统，就可以实现不论放水阀 F_1 输出的流量如何变化，系统总能自动维持其液面高度在允许的偏差范围之内。假设水池液面因阀 F_1 开度的增大而稍有降低时，则系统立即产生一个与降落液面高度成比例的误差电压 u ，该电压经放大后供电给进水阀的拖动电动机，使阀 F_2 的开度也相应地增大，从而使水池的液面恢复到所希望的高度。

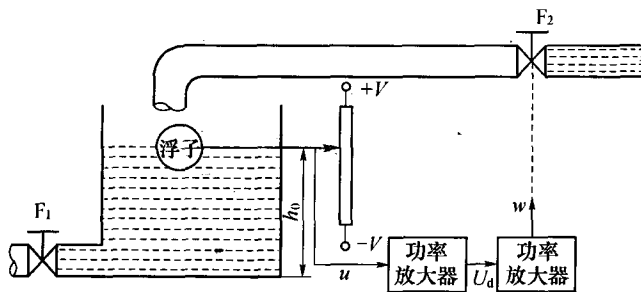


图 1-4 液面自动控制系统

图 1-4 所示的液面自动控制系统是由以下五部分组成。

- (1) 被控对象——水池；
- (2) 测量元件——浮子；
- (3) 比较机构——求浮子的希望位置与实际位置之差；
- (4) 放大机构——当测量元件测得的信号与给定信号比较后得到的误差信号不足以使执行机构动作时，一般都需要加放大元件，以提高系统的控制精度；

(5) 执行元件——它的职能是直接驱动被控对象，以改变被控量。

据此，可把图 1-4 所示的液面控制系统的原理图改为图 1-5 所示的框图来表示。显然，后者的表示不仅比前者简单，而且在系统中的传递也更为清晰。因此在以后的讨论中，控制系统一般均以框图的形式表示。

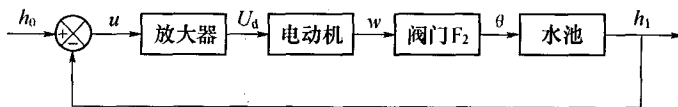


图 1-5 液面自动控制系统的框图

自动控制系统有各种不同的形式，但是概括起来，一般均可以由以下基本环节组成，如图 1-6 所示。

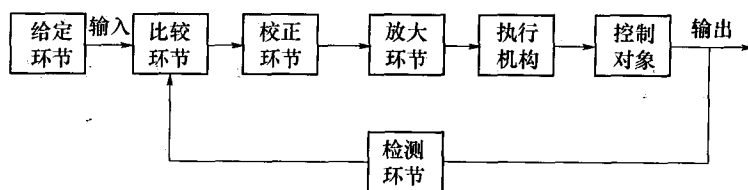


图 1-6 自动控制系统结构图

(1) 给定环节：它是设定被控量的给定值的装置，如电位器等，给定环节的精度对被控量的控制精度有较大影响，现代控制系统一般采用控制精度高的数字给定装置。

(2) 比较环节：比较环节将所检测的被控量和给定量比较，确定两者之间的偏差量。该偏差量由于功率较小或者物理性质不同，还不能直接作用于执行机构，所以在执行机构与比较环节之间还有中间放大环节。

(3) 中间环节：一般是放大元件，将偏差信号变换成适于控制执行机构工作的信号。根据控制要求，中间环节可以是一个简单的功率放大环节，或者是将偏差信号变换为适于执行机构工作的物理量，如自动放大器。常常除了要求中间环节将偏差信号放大外，还希望它能按某种规律对偏差信号进行运算，用运算的结果去控制执行机构，以改善被控量的稳态和瞬态性能，这种中间环节常称为校正环节。

(4) 执行机构：一般由传动装置和调节机构组成，执行机构直接作用于控制对象，使被控量达到所要求的数值。

(5) 控制对象：是指进行控制的设备或过程。相反地，控制系统所控制的某个物理量就是系统的输出量或被控量，自动控制系统的任务就是控制这些系统输出量的变化规律，以满足生产工艺的要求。

(6) 检测环节（检测装置或传感器）：用于检测被控量，并将其转换为与给定量统一的物理量。检测装置的精度和特性控制系统的控制品质，是构成自动控制系统的关键元件，所以一般应要求检测装置的测量精度高、反映灵敏、性能稳定等。

在控制系统中，通常把比较环节、校正环节和放大环节合在一起称为控制装置。

1.2 开环控制系统与闭环控制系统

如果控制系统的输出量对系统的输出没有控制作用，则这种系统称为开环控制系统。图 1-7 表示了开环控制系统输入量与输出量之间的关系。

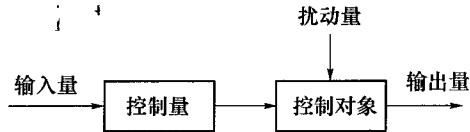


图 1-7 开环控制系统示意图

这里，给定量直接经过控制器作用于控制对象，不需要将输出量反馈到输入端与给定量进行比较，所以只有给定量影响输出量。当出现外部扰动或内部扰动时，若没有人的干预，输出量将不能按照给定量所希望的状态去工作。

闭环控制是把输出量检测出来，经过物理量的转换，再反馈到输入端与给定量进行比较（相减），并利用比较后的偏差信号，经过控制器或调节器对控制对象进行控制，抑制内部或外部扰动对输出量的影响，从而减少输出量的误差。图 1-8 所示为闭环控制系统输入量、输出量和反馈量之间的关系。

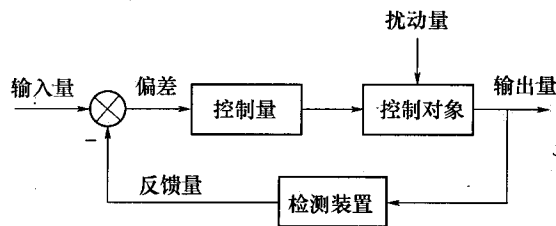


图 1-8 闭环控制系统示意图

这种系统把输出量直接或间接地反馈到输入端形成闭环，参与系统的控制，所以称为闭环控制系统，液压控制系统就是闭环控制系统。由于系统是根据负反馈原理按偏差进行控制的，因此也称为反馈系统或偏差控制系统。

在现代工业生产中，按照偏差控制的闭环系统种类繁多，尽管它们的控制任务不同，具体的结构不完全相同，但是，检测偏差、利用偏差信号对控制对象进行控制，以减少和纠正输出量的偏差这一控制过程都是相同的。

这种系统的特点可归纳为以下几点。

(1) 在开环系统中，只有输入量对输出量产生控制作用；从控制结构上看，只有从输入端到输出端、从左向右的信号传递通道（该通道称为正向通道）。在自动控制系统中，除正向通道外，还必须有从右向左、从输出端到输入端的信号传递通道，使输出信号也参与控制作用，该通道称为反馈通道。自动控制系统就是由正向通道和反馈通道组成的。

(2) 为了检测偏差，必须直接或间接地检测输出量，并将其变换为与输入量相同的物

理量，以便与给定量相比较，得出偏差信号。所以，闭环系统必须有检测环节、给定环节和比较环节。

(3) 自动控制系统是利用偏差量作为控制信号来纠正偏差，因此，系统中必须具有执行纠正偏差这一任务的执行机构。闭环系统正是靠放大的偏差信号来推动执行机构，进一步对控制对象进行控制的。只要输出量与给定量之间存在偏差，就自动纠正输出量与期望之间的误差，因此可以构成精确的控制系统。

反馈控制系统广泛地应用于各个工业部门，如加热炉的温度控制、机械手的控制等。

在有些系统中，将开环控制与闭环控制结合在一起，构成一个开环—自动控制系统，这种系统称为复合控制系统。

本书中涉及的自动控制系统主要是指闭环控制系统。

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统可以从不同的角度进行分类，如按照分析和设计方法，通常可分为线性和非线性，时变和非时变系统；按照系统参考输入信号的变化规律分为恒值控制系统和随动控制系统；按照系统内部传输信号的性质又可分为连续控制系统和离散控制系统。此外，也有的按照组成系统元件的种类来划分，如机电控制系统、液压控制系统和气动控制系统等。若按照被控量的名称来分类，有温度控制系统、转速控制系统和张力控制系统等。这里只介绍下列 3 种常用的分类方法，使在分析和设计这些系统之前，对它们的特征有一个初步的认识。

1.3.1 线性控制系统和非线性控制系统

若组成控制系统的元件都具有线性特性，则称这种系统为线性控制系统。这种系统的输入与输出的关系，一般用微分方程、传递函数模型来描述，也可用状态方程来表示。线性系统的主要特点是具有齐次性和叠加性。如果线性系统中的参数不随时间而变化，则称为线性定常系统；反之，则称为线性时变系统。

在控制系统中，如有一个以上的元件具有非线性特性，则称该系统为非线性控制系统。非线性系统一般不具有齐次性，也不适用叠加性，而且它的输出响应和稳定性与其初始状态有很多关系。

严格地讲，绝对的线性控制系统（或元件）是不存在的，因为所有的物理系统和元件在不同的程度上都具有非线性特性。为了简化对系统的分析和设计，在一定条件下，可以对某些非线性特性作线性化处理。这样，非线性系统就近似为线性系统，从而可以按分析线性系统的理论和方法对它进行研究。

1.3.2 恒值控制系统和随动系统

恒值控制系统的参考输入为常量，要求它的被控量在任何扰动的作用下能尽快地恢复（或接近）到原有的稳态值。图 1-4 所示的液面控制系统属于恒值控制系统。由于这类系统能自动地消除或削弱各种扰动对被控量的影响，故它又称为自镇定系统。

随动系统的参考输入是一个变化的量，一般是随机的，要求系统的被控量能快速准