

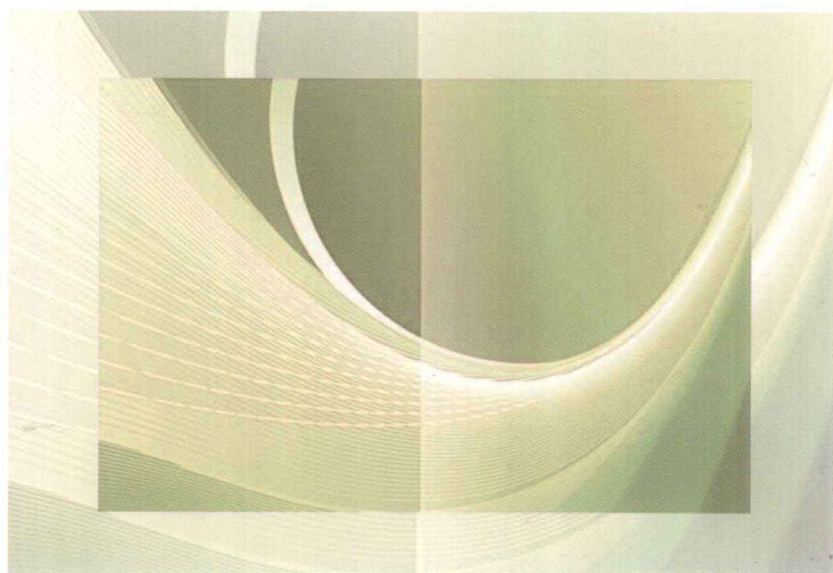


普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

机电工程控制基础

主 编 吴炳胜
副主编 荀 杰



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

机电工程控制基础

主 编 吴炳胜

副主编 荀 杰

北 京

冶金工业出版社

2011

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十二五”规划教材，主要作为机械设计制造及自动化专业基础课教材使用。全书共分9章。第1章对机电工程控制理论进行介绍，通过实例讲述控制技术在工程实践中的应用；第2章讲述传递函数的定义及典型环节的传递函数以及系统传递函数方框图的绘制方法；第3章讨论了系统在典型输入信号作用下的时间响应，介绍了提高系统快速性的方法；第4章对误差与偏差进行分析，介绍了求取系统稳态误差的方法；第5章介绍了频率特性的基本概念，详细讨论了各典型环节的极坐标图及对数坐标图的绘制；第6章介绍了两种判据形式和稳定性储备的定义以及求取方法；第7章根据时域和频域性能指标分析了系统性能，并介绍了系统校正的方法；第8章对非线性系统的特性进行了介绍，提出了非线性系统性能的改善方法以及非线性的应用；第9章讲述了线性离散系统的构成以及开闭环系统的脉冲传递函数的建立方法。本书附录中的拉氏变换、 z 变换内容可供读者阅读时查询。

本书也可作为机械设计制造及自动化专业大专师生的参考书，同时可供相关专业科研与技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

机电工程控制基础/吴炳胜主编. —北京: 冶金工业出版社, 2011. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5704-4

I. ①机… II. ①吴… III. ①机电工程—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(2011)第167222号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjpbs@cnmip.com.cn

责任编辑 李梅 于昕蕾 美术编辑 李新 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5704-4

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011年8月第1版, 2011年8月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 13.5印张; 323千字; 204页

29.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

随着现代科学技术的发展，机电液产品已经越来越多地应用到了工程实践中，而作为主要技术之一的控制技术则在其中起着越来越重要的作用。机电工程控制基础作为机械工程类专业一门重要的专业基础课，其内容需要随着技术进步不断地更新。本书针对于普通高校本科生的理解能力，对机电工程控制的内容进行了适当调整，对重点内容进行了细化，删除了非线性的内容，增加了拉氏变换的环节，特别是在如何把控制论使用在机电工程生产过程的问题上进行了详细的阐述，使学生能够清楚地理解控制技术的作用及如何使用控制技术。

机电工程控制作为一门重要学科，它的形成、发展以及对该理论的论述过程本身体现了科学的方法论。为了培养学生客观、理性和实证的科学精神，本书强调基本概念和基本方法，注重方法论的逻辑性和严谨性。实践教学对于现代本科学生来说是必不可少的环节，本书在论述过程中根据工科学生的具体情况，紧密结合控制理论与机电工程实际，增加了工程实践中的机械和电气例题来解释说明相应的基本理论和基本方法，以使其能很好地在理论学习和实践应用之间起到桥梁的作用。

本书的主要内容包括：绪论、系统数学模型的建立、系统的时域和频域分析、系统稳定性分析、系统校正、非线性系统、离散系统初步及拉普拉斯变换 z 变换等，其中标*的章节为选学或自学内容。

本书由吴炳胜任主编，荀杰任副主编，王蕊、商德勇、吴迪参编。具体分工为：第1章、第8章由商德勇执笔，第2章、第3章、附录由荀杰执笔，第5章由吴炳胜执笔，第6章、第9章由王蕊执笔，第4章、第7章由吴迪执笔，最后由吴炳胜、荀杰定稿。

限于编者的水平，不足之处在所难免，希望读者提出批评建议，我们衷心地表示感谢！

编 者

2011年6月于河北工程大学

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 自动控制系统的基本概念	1
1.2.1 自动控制系统工作原理	2
1.2.2 开环控制与闭环控制	3
1.2.3 反馈控制系统的基本组成	6
1.2.4 自动控制系统的分类	7
1.3 对控制系统的基本要求	8
1.4 自动控制简史	8
1.5 控制工程实践	10
1.5.1 电压调节系统	10
1.5.2 函数记录仪	10
1.5.3 火炮方位角控制系统	11
1.5.4 飞机—自动驾驶仪系统	12
1.6 本课程的特点与学习方法	13
思考题及习题	13
2 控制系统的数学模型	15
2.1 物理系统动态描述	15
2.1.1 列写微分方程的一般方法	15
2.1.2 机械系统的微分方程	15
2.1.3 电气系统的微分方程	17
2.2 非线性系统及其数学模型的线性化	18
2.2.1 非线性系统	18
2.2.2 线性化方法——泰勒级数展开法	20
2.3 系统的传递函数	21
2.3.1 传递函数的定义	22
2.3.2 传递函数的性质	23
2.3.3 典型环节的传递函数	23
2.4 系统框图及其简化	27
2.4.1 方框图结构要素	27
2.4.2 方框图构成方式	28

2.4.3	方框图的等效简化	28
2.4.4	相加点与分支点的移动法则	30
2.5*	系统信号流图及梅森公式	33
2.5.1	信号流图	33
2.5.2	梅森公式	33
2.6	干扰作用下的反馈控制系统的传递函数	34
	思考题及习题	36
3	系统的时间响应与快速性分析	39
3.1	系统的时域性能指标	39
3.1.1	动态性能	40
3.1.2	稳态性能	40
3.2	时间响应和典型输入信号	40
3.2.1	时间响应的概念	40
3.2.2	典型输入信号	41
3.3	一阶系统的时间响应	44
3.3.1	数学模型	44
3.3.2	单位脉冲响应	44
3.3.3	单位阶跃响应	45
3.3.4	单位斜坡响应(速度响应)	46
3.3.5	应用举例	46
3.3.6*	线性定常系统的重要特征	47
3.4	二阶系统的时间响应	48
3.4.1	数学模型	48
3.4.2	单位阶跃响应	49
3.4.3	单位斜坡响应	50
3.4.4	单位脉冲响应	51
3.4.5	二阶系统的性能指标	52
3.4.6	二阶系统计算举例	56
3.5*	高阶系统的时间响应	57
3.5.1	数学模型	57
3.5.2	单位阶跃响应	58
	思考题及习题	59
4	稳态误差与准确性分析	61
4.1	误差与稳态误差	61
4.1.1	误差与偏差	61
4.1.2	稳态误差与稳态偏差	62
4.2	输入引起的稳态误差的计算	62
4.2.1	终值定理法	62

4.2.2 静态误差系数法	63
4.3 干扰引起的稳态误差	67
4.4 减小系统误差的途径	68
4.4.1 按干扰补偿	68
4.4.2 按输入补偿	69
思考题及习题	70
5 控制系统的频域分析	71
5.1 频率特性概述	71
5.1.1 频率特性的基本概念	71
5.1.2 频率特性的求取及表示方法	74
5.2 频率特性的极坐标 (Nyquist) 图描述	76
5.2.1 $[G(j\omega)]$ 复平面	76
5.2.2 典型环节的 Nyquist 图	76
5.2.3 绘制 Nyquist 图的一般规律	81
5.3 频率特性的对数坐标 (Bode) 图描述	84
5.3.1 概述	84
5.3.2 典型环节的 Bode 图	85
5.4 控制系统闭环频率特性的 Bode 图	93
5.4.1 由开环频率特性估计闭环频率特性	93
5.4.2 闭环频域性能指标	93
5.4.3 最小相位系统	95
思考题及习题	96
6 控制系统的稳定性	98
6.1 系统稳定性概念及其条件	98
6.1.1 稳定性定义	98
6.1.2 线性系统稳定性条件	100
6.2 控制系统的稳定判据	102
6.2.1 代数稳定判据	102
6.2.2 结构不稳定系统	107
6.2.3 几何稳定判据	108
6.3 控制系统的稳定性储备	116
6.3.1 相位裕度 γ	116
6.3.2 幅值裕度 K_g	117
6.3.3 稳定性储备量要求	118
6.3.4 稳定裕度的计算	119
思考题及习题	120

7 系统的性能分析与校正	123
7.1 频域性能指标与时域性能指标关系	123
7.1.1 时域性能指标	124
7.1.2 频域性能指标	124
7.1.3 频域指标与时域性能指标的相互关系	125
7.1.4 误差准则	127
7.2 利用开环频率特性分析系统的性能	129
7.2.1 $20\lg GH $ 低频渐近线与系统稳态误差的关系	130
7.2.2 $20\lg GH $ 中频段特性与系统动态性能的关系	130
7.2.3 $20\lg GH $ 高频段对系统性能的影响	133
7.3 系统校正	134
7.3.1 系统的校正方式及特点	134
7.3.2 校正装置的设计方法	135
7.4 串联校正	135
7.4.1 超前校正	135
7.4.2 滞后校正	138
7.4.3 滞后—超前校正	141
7.5 反馈校正	142
7.6 PID 校正	145
7.6.1 PI 校正	145
7.6.2 PD 校正	147
7.6.3 PID 校正	149
思考题及习题	151
8 非线性控制系统	153
8.1 非线性控制系统概述	153
8.1.1 控制系统中的典型非线性特性	153
8.1.2 非线性控制系统的特殊性	155
8.1.3 非线性控制系统的分析方法	156
8.2 描述函数法	156
8.2.1 描述函数的基本概念	156
8.2.2 典型非线性元件的描述函数	158
8.2.3 用描述函数法分析系统的稳定性	161
8.3 机电控制系统中的非线性环节分析举例	163
8.3.1 传动链的间隙	163
8.3.2 传动链影响分析	164
8.4 改善非线性系统性能的措施及非线性特性的利用	168
8.4.1 改变线性部分的参数或针对线性部分进行校正	168

8.4.2 改变非线性特性	168
8.4.3 非线性特性的利用	169
思考题及习题	169
9 线性离散系统初步	171
9.1 离散系统	171
9.1.1 采样控制系统	171
9.1.2 数字控制系统	171
9.2 信号采样与保持	172
9.2.1 信号采样	172
9.2.2 信号复现	176
9.3 离散系统的数学模型	177
9.3.1 线性常系数差分方程及其解法	177
9.3.2 脉冲传递函数	178
9.3.3 开环系统脉冲传递函数	179
9.3.4 闭环系统脉冲传递函数	182
9.4 离散系统的稳定性分析	183
9.4.1 s 域到 z 域的映射	184
9.4.2 线性定常离散系统稳定的充分必要条件	185
9.4.3 离散系统的稳定性判据	186
思考题及习题	187
附 录	189
附录 I 拉普拉斯 (Laplace) 变换	189
附录 II z 变换	200
参考文献	204

1 绪 论

1.1 概 述

在科学技术飞速发展的今天，自动控制技术和理论已经成为现代化社会不可缺少的组成部分。自动控制技术及理论已经广泛地应用于机械、冶金、石油、化工、电子、电力、航空、航海、航天、核反应堆等各个领域。近年来，控制学科的应用范围还扩展到交通管理、生物医学、生态环境、经济管理、社会科学和其他许多社会生活领域，并为各学科之间的相互渗透起到了促进作用。自动控制技术的应用不仅使生产过程实现自动化，从而提高了劳动生产率和产品质量，降低生产成本，提高经济效益，改善劳动条件，使人们从繁重的体力劳动和单调重复的脑力劳动中解放出来，而且在人类征服大自然、探索新能源、发展空间技术和创造人类社会文明等方面都具有十分重要的意义。

自动控制理论是研究关于自动控制系统组成、分析和设计的一般性理论，是研究自动控制共同规律的技术科学。学习和研究自动控制理论是为了探索自动控制系统中变量的运动规律和改变这种运动规律的可能性和途径，为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论根据。作为现代的工程技术人员和科学工作者，都必须具备一定的自动控制理论知识。

在机电工程问题上，机械、电气、液压和计算机被广泛采用，而且常常互相渗透、相互配合，这就需要结合机电液系统阐述工程上共同遵循的基本控制规律，即“机电工程控制基础”。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，机床的数字控制可以实现工件的自动加工，导弹能够击中正在运动的目标，这些都离不开自动控制。

1.2 自动控制系统的基本概念

所谓自动控制，是指在无人直接参与的情况下，利用控制装置使被控对象（如机器、设备或生产过程等）的某些物理量（或工作状态）（如温度、压力、位置、速度等）准确地按照预期规律变化（或运行），如使空调能保持恒温；使数控机床能加工出预期的几何形状；使火炮控制系统能准确击中目标等。一般地说，如何使被控制量按照给定量的规律而变化，是控制系统所要完成的基本任务。学习机电工程控制基础要解决两个问题：一是如何分析某个给定控制系统的工作原理、稳定性和过渡过程品质；二是如何根据实际需要来进行控制系统的设计，并用机、电、液、光等设备来实现这一设计系统。前者主要涉及分析系统，后者是对控制系统的设计与综合实现。无论解决哪类问题，都必须具有丰富的控制理论知识，同时能以系统的而不是孤立的、动态的而不是静态的观点和方法来处理问

题，才能实现预期的控制目的。

1.2.1 自动控制系统工作原理

在许多工业生产过程或生产设备运行中，为了保证正常的工作条件，往往需要对某些物理量（如温度、压力、流量、液位、电压、位移、转速等）进行控制，使其尽量维持在某个数值附近，或使其按一定规律变化。要满足这种需要，就应该对生产机械或设备进行及时的操作，以抵消外界干扰的影响。这种操作通常称为控制，用人工操作称为人工控制；用自动装置来完成称为自动控制。

图 1-1a 所示为人工控制水位保持恒定的供水系统。水池中的水位是被控制的物理量，简称被控量。水池这个设备是被控制的对象，简称被控对象。当水位在给定位置且流入、流出量相等时，它处于平衡状态。当流出量发生变化或水位给定值发生变化时，就需要对流入量进行必要的控制。在人工控制方式下，工人用眼观看水位情况，用脑比较实际水位与期望水位的差异并根据经验做出决策，确定进水阀门的调节方向与幅度，然后用手操作进水阀门进行调节，最终使水位等于给定值。只要水位偏离了期望值，工人便要重复上述调节过程。

图 1-1b 所示为水池水位自动控制系统的一种简单形式。图中用浮子代替人的眼睛，用来测量水位高低；另用一套杠杆机构代替人的大脑和手的功能，用来进行比较、计算误差并实施控制。杠杆的一端由浮子带动，另一端则连向进水阀门。当用水量增大时，水位开始下降，浮子也随之降低，通过杠杆的作用将进水阀门开大，使水位回到期望值附近。反之，若用水量变小，水位及浮子上升，进水阀关小，水位自动下降到期望值附近。整个过程中无需人工直接参与，控制过程是自动进行的。

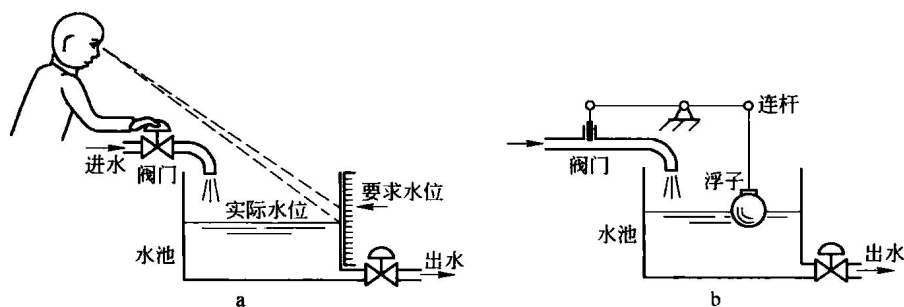


图 1-1 水位控制系统

a—人工控制的水位系统；b—简单的水位自动控制系统

图 1-1b 所示的系统虽然可以实现自动控制，但由于结构简陋而存在缺陷，主要表现在被控制的水位高度将随着出水量的变化而变化。出水量越多，水位就越低，偏离期望值就越远，误差越大。控制的结果，总存在着一定范围的误差值。这是因为当出水量增加时，为了使水位基本保持恒定不变，就得开大阀门，增加进水量。要开大进水阀，唯一的途径是浮子要下降得更多，这意味着实际水位要偏离期望值更多。这样，整个系统就会在较低的水位上建立起新的平衡状态。

为克服上述缺点，可在原系统中增加一些设备而组成较完善的自动控制系统，如图 1-2 所示。这里，浮子仍是测量元件，连杆起着比较作用，它将期望水位与实际水位两者

进行比较, 得出误差, 同时推动电位器的滑臂上下移动。电位器输出电压反映了误差的性质(大小和方向)。电位器输出的微弱电压经放大器放大后驱动直流伺服电动机, 其转轴经减速器后拖动进水阀门, 对系统施加控制作用。

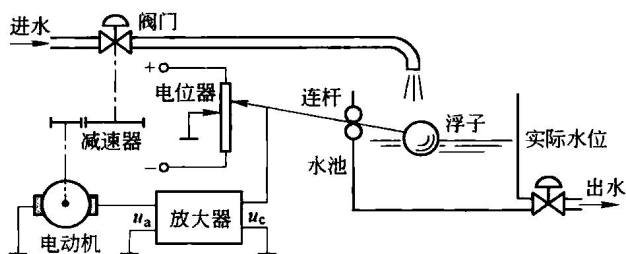


图 1-2 水位控制系统

在正常情况下, 实际水位等于期望值, 此时, 电位器的滑臂居中, $u_c = 0$ 。当出水量增大时, 浮子下降, 带动电位器滑臂向上移动, $u_c > 0$, 经放大后成为 u_a , 控制电动机正向旋转, 以增大进水阀门开度, 促使水位回升。当实际水位回复到期望值时, $u_c = 0$, 系统达到新的平衡状态。

可见, 该系统在运行时, 无论何种干扰引起水位出现偏差, 系统都要进行调节, 最终总是使实际水位等于期望值, 大大提高了控制精度。

上述人工控制系统和自动控制系统是极其相似的, 执行机构类似于人手, 测量装置相当于人的眼睛, 控制器类似于人脑。另外, 它们还有一个共同的特点, 就是都要检测偏差, 并根据检测到的偏差去纠正偏差, 可见没有偏差便没有调节过程。在自动控制系统中, 这一偏差是通过反馈建立起来的。给定信号也称为激励, 给定量也叫控制系统的输入量; 被控制量称为系统的输出量, 输出信号也称为响应。反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号全部或部分返回输入端, 并与之同时作用于系统的过程。反馈量与输入量的比较结果叫偏差。因此, 基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”的原理又称为反馈控制原理。利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。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最基本的方法。

1.2.2 开环控制与闭环控制

工业上用的控制系统, 根据有无反馈作用又可分为两类: 开环控制系统与闭环控制系统。

(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 1-3 表示了开环控制系统输入量与输出量之间的关系。

(2) 闭环控制系统。反馈控制系统也叫做闭环控制系统。这种系统的特点是系统的输出端和输入端之间存在反馈回路, 即输出量对控制作用有直接影响。闭环的作用就是应用反馈来减少偏差。闭环控制突出的优点是精度高, 不管出现什么干扰, 只要被控制量的实际值偏离给定值时, 闭环控制就会产生控制作用来减小这一偏差。图 1-4 表示了闭环控制系统输入量、输出量和反馈量之间的关系。

图 1-3a 所示的他励直流电动机转速控制系统就是一个开环控制系统。它的任务是控制直流电动机以恒定的转速带动负载工作。系统的工作原理是：调节电位器 R 的滑臂，使其输出给定参考电压 u_r 。 u_r 经电压放大和功率放大后成为 u_a ，送到电动机的电枢端，用来控制电动机转速。在负载恒定的条件下，他励直流电动机的转速 ω 与电枢电压 u_a 成正比，只要改变给定电压 u_r ，便可得到相应的电动机转速 ω 。

在本系统中，直流电动机是被控对象，电动机的转速 ω 是被控量，也称为系统的输出量或输出信号。把参考电压 u_r 通常称为系统的给定量或输入量。

就图 1-3a 而言，只有输入量 u_r 对输出量 ω 的单向控制作用，而输出量 ω 对输入量 u_r 却没有任何影响和联系，称这种系统为开环控制系统。

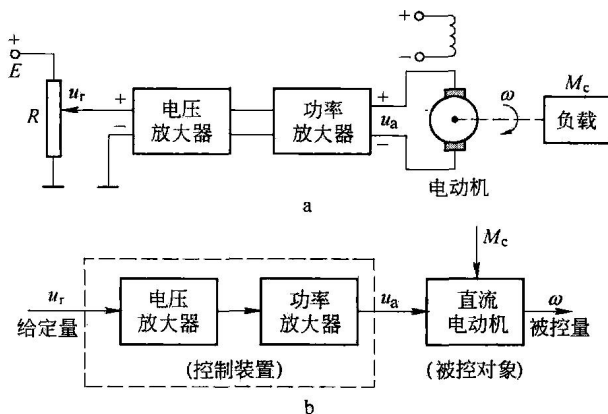


图 1-3 直流电动机转速控制系统

a—直流电动机转速开环控制系统；b—直流电动机转速开环控制系统方框图

直流电动机转速开环控制系统可用图 1-3b 所示的方框图表示。图中用方框代表系统中具有相应职能的元部件；用箭头表示元部件之间的信号及其传递方向。电动机负载转矩 M_c 的任何变动，都会使输出量 ω 偏离希望值，这种作用称之为干扰或扰动，在图 1-3b 中用一个作用在电动机上的箭头来表示。

开环控制系统精度不高和适应性不强的主要原因是缺少从系统输出到输入的反饋回路。若要提高控制精度，必须把输出量的信息反馈到输入端，通过比较输入值与输出值，产生偏差信号，该偏差信号以一定的控制规律产生控制作用，逐步减小以至消除这一偏差，从而实现所要求的控制性能。

在图 1-3a 所示的直流电动机转速开环控制系统中，加入一台测速发电机，并对电路稍作改变，便构成了如图 1-4a 所示的直流电动机转速闭环控制系统。

图 1-4a 中，测速发电机由电动机同轴带动，它将电动机的实际转速 ω （系统输出量）测量出来，并转换成电压 u_f ，再反馈到系统的输入端，与给定值电压 u_r （系统输入量）进行比较，从而得出电压 $u_e = u_r - u_f$ 。由于该电压能间接地反映出误差的性质（即大小和正负方向），通常称之为偏差信号，简称偏差。偏差 u_e 经放大器放大后成为 u_a ，用以控制电动机转速 ω 。

直流电动机转速闭环控制系统可用图 1-4b 的方框图来表示。通常，把从系统输入量到输出量之间的通道称为前向通道；从输出量到反馈信号之间的通道称为反馈通道。方框

图中用符号“ \otimes ”表示比较环节，其输出量等于各个输入量的代数和。因此，各个输入量均须用正、负号表明其极性。图中清楚地表明，由于采用了反馈回路，信号的传输路径形成闭合回路，输出量反过来直接影响控制作用。这种通过反馈回路使系统构成闭环，并按偏差产生控制作用以减小或消除偏差的控制系统，即为闭环控制系统，或称为反馈控制系统。

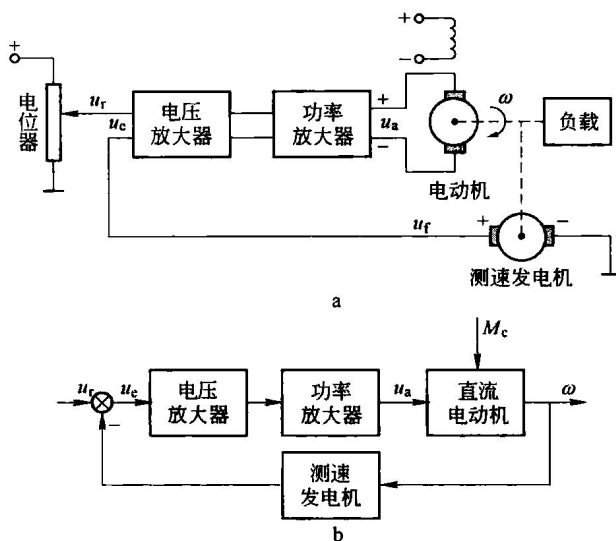


图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统

a—直流电动机转速闭环控制系统；b—直流电动机转速闭环控制系统方框图

反馈分为正反馈和负反馈。正反馈是指扩大对系统的干扰，导致系统失稳。典型的正反馈的例子如：多年前，美国有人设计了一个别出心裁的游戏。他安排了一串多米诺骨牌，其中每一块是前一块的 1.5 倍。只要第一块多米诺骨牌倒翻，它马上撞击比它大的骨牌使其相继倒塌。他证明，只要按这种程序排列 32 块多米诺骨牌，最后一块将如纽约世界贸易中心的一座摩天大楼那么大。前一块多米诺骨牌的倒塌是对后一块骨牌的干扰，多米诺骨牌的机制是干扰的传递，当这种传递逐级放大时，就产生了干扰的放大，这就是正反馈机制了。在生产、生活中，正反馈的例子虽然没有负反馈多，但却也是常见的。一般所谓“恶性循环”导致系统的破坏，大都是由于正反馈的作用。

负反馈主要是通过输入、输出之间的差值作用于控制系统的其他部分。这个差值就反映了我们要求的输出和实际的输出之间的差别。控制器的控制策略是不停减小这个差值，以使差值变小。负反馈形成的系统，控制精度高，系统运行稳定。例如：当人打算要拿桌子上的水杯时，人首先要看到自己的手与杯子之间的距离，然后确定自己手的移动方向，手始向水杯移动。同时人的眼睛不停观察手与杯子的距离（该距离就是输入与输出的差值），而人脑（控制器）的作用就是不停控制手移动，以消除这个差值。直到手拿到杯子为止，整个过程也就结束了。从上面的例子可以看出，由负反馈形成的偏差是人准确完成拿杯子动作的关键。如果这个差值不能得到的话，整个动作也就没有办法完成了。负反馈一般是由测量元件测得输出值后，送入比较元件与输入值进行比较而得到的。

必须指出，在系统主反馈通道中，只有采用负反馈才能达到控制的目的。若采用正反馈，将使偏差越来越大，导致系统发散而无法工作。

闭环系统工作的本质机理是：将系统的输出信号引回到输入端，与输入信号相比较，

利用所得的偏差信号对系统进行调节,达到减小偏差或消除偏差的目的。这就是负反馈控制原理,它是构成闭环控制系统的核心。

闭环控制是最常用的控制方式,我们所说的控制系统,一般都是指闭环控制系统。闭环控制系统是本课程讨论的重点。

一般来说,开环控制系统结构比较简单,成本较低。开环控制系统的缺点是控制精度不高,抑制干扰能力差,而且对系统参数变化比较敏感。一般用于可以不考虑外界影响或精度要求不高的场合,如洗衣机、步进电机控制及水位调节等。

在闭环控制系统中,不论是输入信号的变化,或者干扰的影响,或者系统内部的变化,只要是被控量偏离了规定值,都会产生相应的作用去消除偏差。因此,闭环控制抑制干扰能力强,与开环控制相比,系统对参数变化不敏感,可以选用不太精密的元件构成较为精密的控制系统,获得满意的动态特性和控制精度。但是采用反馈装置需要添加元部件,造价较高,同时也增加了系统的复杂性。如果系统的结构参数选取不适当,控制过程可能变得很差,甚至出现振荡或发散等不稳定的情况,因此,如何分析系统,合理选择系统的结构参数,从而获得满意的系统性能,是自动控制理论必须研究解决的问题。

1.2.3 反馈控制系统的基本组成

图 1-5 就是一个典型的反馈控制系统,该图表示了各个环节在系统中的位置及其相互间的关系。由图可以看出,一个典型的反馈控制系统主要包括测量环节、给定环节、比较环节、放大运算环节、执行环节及校正环节等。

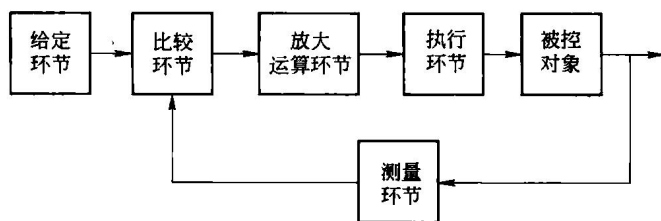


图 1-5 反馈控制系统组成

(1) 给定环节。主要用于产生给定信号或输入信号。

(2) 测量环节。它测量被控量或输出量,产生反馈信号,该信号与输出量存在着确定的函数关系(通常为比例关系),如轮速传感器、光栅传感器等。

(3) 比较环节。它用来比较输入信号和反馈信号之间的偏差。可以是一个差接的电路,它往往不是一个专门的物理元件。而自整角机、旋转变压器、机械式差动装置都是物理的比较元件。

(4) 放大环节。它包括对偏差信号进行放大和功率放大的元件,如同步功率放大器、电液伺服阀等。

(5) 执行环节。它包括直接对控制对象进行操作的元件,如执行电动机、液压马达等。

(6) 控制对象。控制系统所要操纵的对象,它的输出量即为系统的被控制量,如水箱、机床工作台等。

此外，有的控制系统还含有校正环节，或称为校正装置，用以稳定、提高控制系统性能。

1.2.4 自动控制系统的分类

自动控制系统的类型很多，它们的结构类型和所完成的任务也各不相同。

(1) 按数学模型分。

1) 线性控制系统。组成控制系统的元件都具有线性特性。这种系统的输入与输出的关系是线性的，符合叠加原理，一般可以用微分（差分）方程、传递函数、状态方程来描述其运动过程。线性系统的主要特点是满足叠加原理。

2) 非线性控制系统。只要系统中含有一个元件具有非线性特性，系统不能用线性微分方程来描述，则称该系统为非线性控制系统。非线性系统一般不具备叠加性。

(2) 按时间概念分。

1) 定常系统。控制系统中所有的参数都不随时间而变化，这样的系统输入与输出关系可以用常系数的数学模型描述；若为线性系统，则称为线性定常系统。

2) 时变系统。控制系统中的参数随时间的变化而变化。

实际中遇到的系统多少都有一些非线性和时变性，但多数都可以在一定的条件下合理地近似用线性定常系统处理。在经典控制论中研究的对象主要是单输入、单输出的线性定常控制系统。

(3) 按信号的性质分。

1) 连续系统。系统中各个参量的变化都是连续进行的，即系统中各处信号均为时间的连续函数。

2) 离散系统。控制系统的给定量、反馈量、偏差量都是数字量，数值上不连续，时间上也是离散的。这种系统一般有采样控制系统和数字控制系统两种，其测量、放大、比较、给定等信号处理均由微处理器实现，主要特征是系统中含有采样开关或 D/A、A/D 转换装置。现在这种系统已随着微处理器的发展而日益增多。

连续系统中处理的变量为模拟量，如工业过程中出现的压力、流量、温度、位移等。离散系统中处理的变量为开关量或者数字量，如计算机内部处理的变量。在现代的控制形式中，多以计算机控制为主，即以计算机作为控制器，控制模拟量。在控制过程中涉及数模转换和模数转换。

(4) 按给定量的运动规律分。

1) 恒值调节系统。这类系统的输入是不随时间而变化的常数。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值保持一致，如稳压电源、恒温系统、压力、流量等过程控制系统等。对于这类系统，分析重点在于克服扰动对输出量的影响。

2) 程序控制系统。当系统输入量为已知给定的时间函数时，称为程序控制系统。这种系统控制的主要目的是保证被控制量能够按给定的时间函数变化。例如，热处理的升温过程，根据材料特性的要求，温度的升高必须按要求的时间函数进行；汽轮机启动时的升速过程等均需按时间函数进行。近年来，由于微处理器的发展，大量的数字程序控制系统投入了运行。

3) 随动系统。这种系统的给定量是时间的未知函数,即给定量的变化规律事先无法确定,要求输出量能够准确、快速地复现给定量,这样的系统称为随动系统,也称伺服系统,如火炮自动瞄准飞机的系统、液压仿形刀架随动系统等。

除此以外,还可按系统参数特征分为集中参数系统和分布参数系统,按系统组成元件的物理性质又可分为电气控制系统、液压控制系统;按系统的被控量可分为液位控制系统、转速控制系统、流量控制系统等。

1.3 对控制系统的基本要求

自动控制系统根据其控制目标的不同,其要求也往往不一样。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,对控制系统有一个共同的要求,一般可归结为稳定性、准确性与快速性三个方面。

(1) 系统的稳定性。由于系统存在着惯性,当系统的各个参数匹配不妥时,将会引起系统的振荡而失去正常工作的能力。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能力,稳定性的要求是系统工作的首要条件。

(2) 响应的准确性。这是指在调整过程结束后输出量与给定量之间的偏差,或称为静态精度,这也是衡量系统工作性能的重要指标。例如数控机床精度越高,则加工精度也越高。而一般恒温 and 恒速系统的控制精度都可在给定值的1%以内。

(3) 响应的快速性。这是在系统稳定的前提下提出的,快速性是指当系统输出量与给定量之间产生偏差时,消除这种偏差过程的快速程度。

综上所述,对控制系统的基本要求是在稳定的前提下,系统要稳、准、快。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,随动系统对快速性要求较高,而调速系统则对稳定性提出较严格的要求。同一系统的稳、准、快是相互制约的。快速性好,可能会有强烈振荡;改善稳定性,控制过程可能又过于迟缓,精度也可能变坏。分析和解决这些矛盾,也是本学科讨论的重要内容。对于机械动力学系统的要求,首要的也是稳定性,因为过大的振荡将会使部件过载而损坏,此外还要降低噪声、增加刚度等,这些都是控制理论研究的主要问题。

本书将从控制系统的三个特性着手,分别讨论系统的时域和频域响应、稳态误差、稳定性判据等。

1.4 自动控制简史

以“三论”(系统论、信息论、控制论)为代表的科学方法论,是一门新兴的学科,是20世纪以来最伟大的成果。它的崛起为人类认识世界和改造世界提供了新的有力武器。作为“三论”之一的“控制论”中的“控制”的概念,人们并不陌生。控制活动是一种普遍现象,自人类文明始,人类就有控制的尝试。人类文明是从制造第一把石刀开始的。与此同时,也就开始了“制造工艺过程”,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消息;人脑是中枢控制装置,对所得的信息进行分析、比较、做出判断、决