

普通高等学校“十二五”规划教材

机械工程控制基础

宋 强 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等学校“十二五”规划教材

机械工程控制基础

宋 强 主 编
吴耀春 师会超 副主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 提 要

本书主要讲述机械控制工程基础的基本概念和基础知识以及 MATLAB 软件在控制系统分析和设计中的应用,内容包括控制系统的数学模型、时域分析、控制系统的频率特性、控制系统的稳定性分析以及控制系统的设计和校正等部分。

本书还注重在机械工程、电气工程领域的应用,并以适当的机械系统实例加以分析,运用控制理论以及 MATLAB 软件,对控制系统进行分析和设计,以增强教材的实用性和先进性。

本书适合作为高等学校机械设计制造及其自动化、机械电子工程、机电一体化等专业的规划教材,也可供控制系统设计、MATLAB 软件应用以及相关专业的工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程控制基础/宋强主编. —北京:中国铁道出版社, 2014. 6

普通高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 113 - 17844 - 4

I. ①机… II. ①宋… III. ①机械工程 - 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 (2013) 第 302171 号

书 名: 机械工程控制基础
作 者: 宋 强 主编

策 划: 张宇富
责任编辑: 马洪霞
编辑助理: 耿京霞
封面设计: 路 瑶
封面制作: 白 雪
封面校对: 汤淑梅
责任印制: 李 佳

读者热线: 400 - 668 - 0820

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址: <http://www.51eds.com>

印 刷: 北京海淀五色花印刷厂

版 次: 2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷

开 本: 787 mm × 1 092 mm 1/16 印张: 13.75 字数: 312 千

书 号: ISBN 978 - 7 - 113 - 17844 - 4

定 价: 27.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书, 如有印制质量问题, 请与本社教材图书营销部联系调换。电话: (010) 63550836

打击盗版举报电话: (010) 51873659

前 言

机械工程控制基础不仅是机械设计制造及其自动化专业的一本专业基础课,而且在机械化工、制造业等非电类工程专业中也占有重要地位。书中内容的编写,着重拓宽基础知识面,加强工程背景知识,以培养学生创新能力和工程实践能力为原则,尽可能减少在理论和原理性内容上与先修课程的重复,通过对应用实例的分析提高学生创新实践能力。本教材系统讲解系统建模、分析与设计的原理和方法。为帮助读者理解掌握各章内容,书中有针对性地设置了一定量的习题。

在编写过程中注意突出以下几个方面:

1. 注重基本理论与基本概念的阐述。通过严谨的数学推导得出清晰的物理概念,并应用仿真工具分析工程中的实际系统;力求深入浅出和突出重点,使学习者能够基于厚实的理论而非止于复杂的数学过程,进一步学习有关专门文献和控制理论。

2. 注重启发性。本书在内容编写风格上,从贴近学习者的角度,尝试用轻松活泼的问题启发专业问题和引出解决思路,培养学习者主动学习和创新能力。此外,还对每章的主要内容给出了思考题,使学习者能够容易接受。

3. 注重实用性。本书是作为普通高等教育应用型本科教材编写的,在取材和体系编排上注重理论原理和应用技术相结合,突出应用性和针对性,以有限的篇幅尽量拓宽知识领域,书中有面向工程实践的详细举例。本教材除介绍传统基本内容外,还介绍了现代新原理和新方法。

4. 将 MATLAB 软件的全面应用贯穿其中。

5. 内容叙述、公式推导详尽,以便于自学;着重基本概念和方法;公式推导既做到严谨,又略去某些不必要的、繁杂的纯数学过程。

本书内容新颖、丰富、全面,具有一定的深度和广度。叙述简明,深入浅出。适合作为高等学校的机械设计制造及其自动化、机械电子工程、自动控制技术、机电一体化等专业的教材。也可供控制系统设计、MATLAB 软件应用以及相关专业的工程技术人员使用和参考。

本书是在编者教学团队多年教学实践与经验积累基础上,参考很多相关教材集体编写的。由安阳工学院宋强任主编,安阳工学院吴耀春、师会超任副主编,参加编写的还有陈晓。其中,安阳工学院宋强编写了绪论、第5章;安阳工学院吴耀春编写了第3章、第4章;安阳工学院师会超编写了第2章;安阳工学院陈晓编写了第1章。

编写中参考了很多优秀教材和习题集,编者向收录的参考文献中的各位作者表示诚挚的谢意。由于机械工程控制基础涉及的学科众多、发展迅速,又是一个全新的课程,而作者的水平有限,加之时间仓促,书中难免存在错误和不足,书中的疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2014 年 5 月

目 录

绪论	1
0.1 控制系统的概念和发展概况	1
0.2 自动控制系统的基本概念	3
0.3 控制系统的基本控制方式	6
0.4 对控制系统的基本要求	10
0.5 自动控制简史	12
0.6 MATLAB 语言简介	13
习题	15
第 1 章 控制系统的数学模型	17
1.1 数学模型的基本概念	17
1.2 系统的动态微分方程	18
1.3 拉普拉斯变换与拉普拉斯反变换	21
1.3.1 复数与复变函数	22
1.3.2 拉氏变换	23
1.3.3 拉氏反变换	30
1.3.4 用拉氏变换解线性定常微分方程	34
1.4 传递函数	35
1.4.1 传递函数的定义	35
1.4.2 传递函数的基本性质	37
1.5 典型环节	38
1.5.1 典型环节的分类	38
1.5.2 典型环节传递函数示例	39
1.6 系统方框图	44
1.6.1 系统方框图的组成	44
1.6.2 系统方框图的基本连接形式	45
1.6.3 系统方框图的建立	46
1.6.4 系统方框图的等效变换	47
1.7 信号流程图	56
1.7.1 信号流程图的基本概念	56
1.7.2 方框图与信号流图的对应关系	57
1.7.3 梅逊公式	57

1.8	控制系统的传递函数	61
1.9	数学模型的 MATLAB 描述	62
1.9.1	传递函数 (Transfer Function, TF) 模型	62
1.9.2	系统数学模型之间的转换	64
	习题	65
第 2 章	时域分析	68
2.1	典型输入信号	68
2.2	线性系统的时域性能指标	70
2.3	一阶系统的时间响应	71
2.3.1	单位阶跃响应	72
2.3.2	单位速度响应	72
2.3.3	单位加速度响应	73
2.3.4	单位脉冲响应	73
2.4	二阶系统的时间响应	74
2.4.1	二阶系统的单位阶跃响应	74
2.4.2	二阶系统的动态性能指标	78
2.5	高阶系统的时间响应	82
2.6	系统的稳态误差	84
2.6.1	系统的误差 $e(t)$ 及偏差 $\varepsilon(t)$	84
2.6.2	系统的稳态误差	85
2.6.3	稳态误差系数	86
2.6.4	干扰信号作用下的稳态误差	90
2.6.5	减小或消除稳态误差的措施	91
2.7	用 MATLAB 对线性系统进行时域响应分析	93
	习题	98
第 3 章	控制系统的频率特性	102
3.1	频率特性的基本概念	102
3.1.1	频率特性的物理意义	102
3.1.2	频率特性的数学意义	104
3.1.3	频率特性的表示方法	105
3.2	幅相频率特性	105
3.2.1	比例环节 K	105
3.2.2	积分环节	106
3.2.3	理想微分环节	107
3.2.4	惯性环节	108
3.2.5	一阶微分环节	110

3.2.6 振荡环节	111
3.2.7 二阶微分环节	113
3.2.8 延迟环节	114
3.3 系统的开环频率特性图	116
3.3.1 系统开环 Nyquist 图	116
3.3.2 系统开环 Bode 图	120
3.4 最小相位系统和非最小相位系统	122
3.5 系统频域性能指标	124
3.6 用 MATLAB 进行控制系统频域分析	127
3.6.1 基于 MATLAB 的线性系统的频域分析基本知识	127
3.6.2 基于 MATLAB 的线性系统的频域分析的其他实例	141
习题	144
第 4 章 控制系统的稳定性分析	148
4.1 稳定性的基本概念	148
4.1.1 稳定性的定义	148
4.1.2 系统稳定的充要条件	148
4.2 劳斯 (Routh) 判据	150
4.2.1 系统稳定的必要条件	150
4.2.2 劳斯 (Routh) 稳定判据	150
4.2.3 劳斯稳定判据特殊情况处理	153
4.3 奈奎斯特稳定判据	154
4.3.1 基本原理	155
4.3.2 奈奎斯特 (Nyquist) 稳定判据	156
4.4 Bode 稳定判据	160
4.4.1 系统开环 Bode 图与开环奈氏图的对应关系	160
4.4.2 Bode 稳定判据的描述	160
4.4.3 系统的相对稳定性	162
4.4.4 Bode 稳定判据的应用	163
第 5 章 控制系统的设计与校正	166
5.1 PID 简介	166
5.1.1 PID 控制基本原理	166
5.1.2 增量式 PID 控制算法	167
5.1.3 PID 控制器的参数整定	169
5.2 校正的基本概念	171
5.2.1 校正的概念	171
5.2.2 校正的方式	172

5.2.3 校正装置	173
5.3 串联校正	174
5.3.1 三频段对系统性能的影响	174
5.3.2 串联校正方法	174
5.4 反馈校正	178
5.4.1 反馈校正的方式	178
5.4.2 反馈校正的作用	178
5.5 复合校正	179
5.5.1 按输入补偿的复合校正	179
5.5.2 按扰动补偿的复合校正	180
5.6 串联超前校正方法	180
5.7 串联迟后校正	183
5.8 串联迟后 - 超前校正	186
5.9 复合控制方法	190
5.9.1 按输入补偿的复合控制	190
5.9.2 按扰动补偿的复合控制	193
5.10 系统设计校正的 MATLAB 实现	194
习题	209
参考文献	210

绪 论

0.1 控制系统的概念和发展概况

1. 自动控制的基本概念

“控制 (control)”一词,如今已相当广泛地应用在各行各业,如温度控制、微机控制、人口控制等。所谓控制,其定义是:“为达到某种目的,对某一对象施加所需的操作”。含有“调节、调整”“管理、监督”“运用、操作”等意思。

上述定义中所说的对象,是指物体、机器、过程或经济、社会现象等一般广泛的系统,称为被控对象。对于想实现控制的目标量,如电动机的转速、储水容量水位、油压缸中活塞的位置、炉内温度等称为控制量,而把所希望的转速、水位、位置、温度等称为目标值或参据量。

根据产生控制作用的主体不同,控制可分为手动控制和自动控制。由人本身通过判断和操作进行的控制称为手动控制。例如,司机驾驶汽车为到达目的地,需要根据路况和车况不断地操纵方向盘;又如人的行走、抓放物品等行为也都可称为手动控制。所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称控制装置或控制器)使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。

自动控制技术在现代科学技术的许多领域中起着越来越重要的作用,例如,数控车床按照预定程序自动地切削工件,化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定,雷达和计算机组成的导弹发射和制导系统自动地将导弹引导到敌方目标,无人驾驶飞机按照预定航线自动升降和飞行,人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收等,这一切都是以高水平的自动控制技术为前提。

另一方面,为了实现各种复杂的控制任务,首先要将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来,组成一个有机总体,这就是自动控制系统。在自动控制系统中,被控对象的输出量,即被控量是需要严格加以控制的物理量,它可以要求保持为某一恒定值(如温度、压力、液位等),也可要求按照某个给定规律运行(如飞行航线、记录曲线等);控制装置则是对被控对象施加控制作用的机构的总体,它可以采用不同的原理和方式对被控对象进行控制。

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。其发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节原理,并主要用于工业控制。第二次世界大战期间,为了设计和制造飞机及船舶自动驾驶仪、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,而进一步促进并完善了自动控制理论的发展。到战后,已形成完整的自动控制理论体系,这就是以传递函数为基础的经典控制理论,它主要研究单输入—单输出、线性定常系统的分析和设计问题。

20 世纪 60 年代初期,随着现代应用数学新成果的推出和电子计算机技术的应用,为适应宇航技术的发展,自动控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论。它主要研究具有高性能、高精度的多变量变参数系统的控制问题,采用的方法是以状态方程为基础的时域法。目前,自动控制理论还在继续发展,并且已跨越学科界限,正向以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论深入。

2. 机械与控制

有史以来,机械可以代替人类从事各种有益的工作,弥补了人类体力和能力的不足,在各个方面都给人们的生活带来了极大的帮助。从机械的发展史可看到,机械的发展和进步与控制是密不可分的。一方面,机械运转本身,广义地讲也可称为控制,只有配备一定的控制装置才可以达到某种较复杂的工作目的(尽管这种控制装置最初是通过纯机构来实现的)。另一方面,机械广泛深入的应用,也促进了控制科学的产生和发展。例如,作为工业革命象征的蒸汽机当时主要用于各种机械驱动,为了消除蒸汽机因负荷变化而对转速造成的影响,19 世纪末,詹姆斯·瓦特(James Walt)发明了离心调速器。但离心调速器在某种使用条件下,蒸汽机的转速和调速器套筒的位置依然会周期性地发生很大变化,形成异常运转状态。蒸汽机和调速器能单独地各自稳定地工作,为什么在组合的情况下就出现不稳定状态呢?这一问题促使人们展开了相关研究和探索。直到 19 世纪后半叶,詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell)提出了系统特性以及劳斯·胡尔维茨(Routh Hurwize)发现了系统稳定工作的条件(即稳定性判据)后上述问题才得以解决,这可以说是控制理论的开始。

生产工艺的发展对机械系统也提出了越来越高的要求,为达到工作目的,机械已不再是纯机械结构了,更多的是与电气、电子装置结合在一起,形成了机电控制系统。例如,一些精密机床要求加工精度达到百分之几毫米,甚至几微米,重型镗床为保证加工精度和表面粗糙度,要求在极慢的稳速下进给,即要求在很宽的范围内调速;为了提高效率,由数台或数十台设备组成的生产自动线,要求统一控制和管理等。这些要求都是靠驱动装置及其控制系统和机械传动装置的有机结合来实现的。

由此也可得出机电控制和自动控制的关系:自动控制是以一般系统为对象,广泛地使用控制方法进行控制系统的理论设计;而机电控制就是应用自动控制工程学的研究结果,把机械作为控制对象,研究怎样通过采用一定的控制方法来适应对象特性变化从而达到期望的性能指标。

3. 控制系统的发展概况

机械控制系统的发展按所用控制器件来划分,它主要经历了四个阶段:最早的机电控制系统出现在 20 世纪初,它仅借助于简单的接触器与继电器等控制电器,实现对被控对象的启动、停止以及有级调速等控制,它的控制速度慢,控制精度也较差;20 世纪 30 年代控制系统从断续控制发展到连续控制,连续控制系统可随时检查控制对象的工作状态,并根据输出量与给定量的偏差对被控对象自动进行调整,它的快速性及控制精度都大大超过了最初的断续控制,并简化了控制系统,减少了电路中的触点,提高了可靠性,使生产效率大为提高;20 世纪 40 ~ 50 年代出现了大功率可控水银整流器控制;20 世纪 50 年代末期出现了大功率固体可控整流元件——晶闸管,很快晶闸管控制就取代了水银整流器控制,后来又出现了功率晶体管控制。由于晶体管、晶闸管具有效率高、控制特性好、反应快、寿命长、可靠

性高、维护容易、体积小、重量轻等优点，它的出现为机电自动控制系统开辟了新纪元。

随着数控技术的发展，计算机的应用特别是微型计算机的出现和应用，又使控制系统发展到一个新阶段——计算机数字控制，它也是一种断续控制，但是和最初的断续控制不同，它的控制间隔（即采样周期）比控制对象的变化周期短得多，因此在客观上完全等效于连续控制，它把晶闸管技术与微电子技术、计算机技术紧密地结合在一起，使晶体管与晶闸管控制具有强大的生命力。20 世纪 70 年代初，计算机数字控制系统应用于数控机床和加工中心，这不仅加强了自动化程度，还提高了机床的通用性和加工效率，在生产上得到了广泛应用。工业机器人的诞生，为实现机械加工全面自动化创造了物质基础。20 世纪 80 年代以来，出现了由数控机床、工业机器人、自动搬运车等组成的统一由中心计算机控制的机械加工自动线——柔性制造系统（Flexible Manufacture System, FMS），它是实现自动化车间和自动化工厂的重要组成部分。机械制造自动化的高级阶段是走向设计和制造一体化，即利用计算机辅助设计（Computer Aided Design, CAD）与计算机辅助制造（Computer Aided Manufacturing, CAM）形成产品设计与制造过程的完整系统，对产品构思和设计直至装配、试验和质量管理这一全过程实现自动化，以实现制造过程的高效率、高柔性、高质量，实现计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing System, CIMS）。

0.2 自动控制系统的基本概念

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（如温度、压力、位置、速度等）或工作状态准确地按照预期规律变化或运行，例如空调能保持恒温，数控机床能加工出预期的几何形状，火炮控制系统能准确击中目标等。一般来说，如何使被控制量按照给定量的变化规律而变化，这是控制系统所要完成的基本任务。学习机械程控制基础主要解决两个问题：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。前者主要是分析系统，后者是对控制系统设计与综合处理。无论解决哪一类问题，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. 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。为了满足这种需要，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。这种操作通常被称为控制，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 0-1（a）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，称为被控量。水池设备是控制的对象，称为被控对象。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作出决策，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 0-1 (b) 所示为水池水位自动控制系统的一种简单形式。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。整个过程中无须人工直接参与，控制过程是自动进行的。

图 0-1 (b) 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。

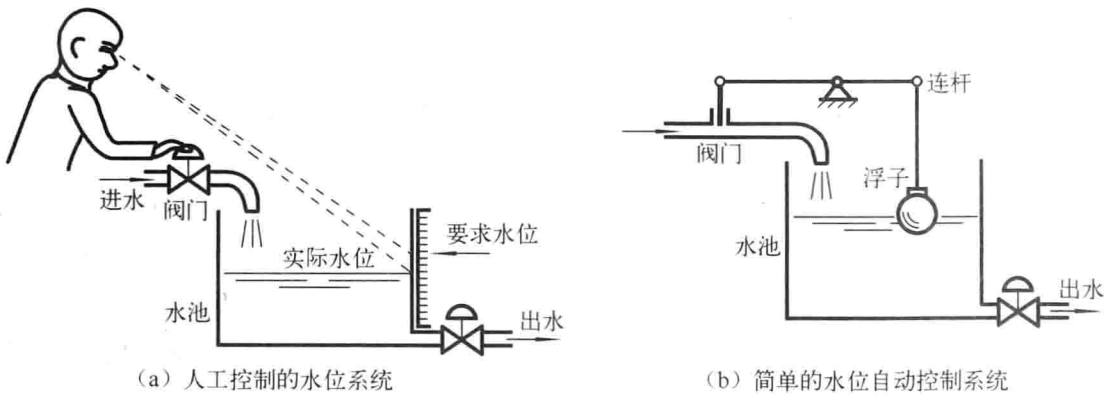


图 0-1 水位控制系统

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 0-2 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。

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， $u_e = 0$ 。当出水量增大时，浮子下降，带动电位器滑臂向上移动， $u_e > 0$ ，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， $u_e = 0$ ，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，系统就要进行调节，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

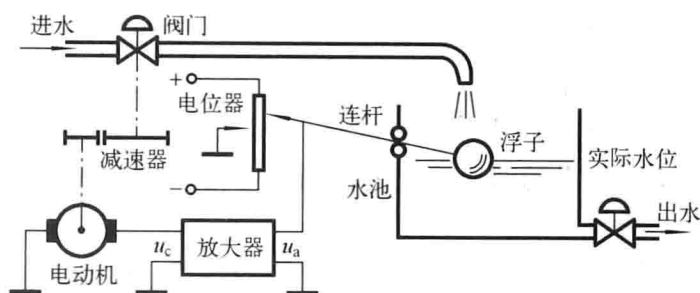


图 0-2 水位控制系统

差是通过反馈建立起来的。给定信号称为激励，给定量称为控制系统的输入量；被控制量称为系统的输出量，输出信号称为响应。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称为偏差。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。

2. 控制系统的一般构成

机电控制系统一般由 7 个部分组成，如图 0-3 所示。“○”代表比较元件，它将测量元件检测到的被控量与输入量进行比较；“-”号表示两者符号相反，即负反馈；“+”号表示两者符号相同，即正反馈。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称前向通路；系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外，还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含一个主反馈通路的系统称单回路系统；有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。各个部分的功能和作用如下：

测量元件职能是检测被控制的物理量，如执行机构的运动参数、加工状况等。这些参数通常有位移、速度、加速度、转角、压力、流量、温度等。如果这个物理量是非电量，一般再转换为电量。

比较元件职能是把测量元件检测的被控量实际值与给定元件的输入量进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。

放大元件职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大，用来推动执行元件去控制被控对象。电压偏差信号可用电子管、晶体管、集成电路、晶闸管组成的电压放大级和功率放大级加以放大。

执行元件职能是直接推动被控对象，使其被控量发生变化，完成特定的加工任务，如零件的加工或物料的输送。执行机构直接与被加工对象接触。根据不同的用途，执行机构具有不同的工作原理、运作规律、性能参数和结构形状，如车床、铣床、送料机械手等，结构上千差万别。

驱动元件与执行机构相连接，给执行机构提供动力，并控制执行机构启动、停止和换向。驱动元件的作用是完成能量的供给和转换。用来作为执行元件的有阀、电动机、液压马达等。

补偿元件又称校正元件，它是结构或参数便于调整的元素，用串联或反馈的方式连接在

系统中，其作用是完成加工过程的控制，协调机械系统各部分的运动，具有分析、运算、实时处理功能，以改善系统的性能。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的则用 STD 总线工业控制机、工业微机（PC）、单片微机等组成。

控制对象是控制系统要操纵的对象。它的输出量即为系统的被调量（或被控量），如机床、工作台、设备或生产线等。

机电控制系统各组成部分之间的连接匹配部分称为接口。接口分为两种，机械与机械之间的连接称为机械接口，电气与电气之间的连接称为接口电路。如果两个组成部分之间相匹配，则接口只起连接作用。如果不相匹配，则接口除起连接作用外，还需起某种转换作用，如连接机床主轴和电动机的减速箱，连接传感器输出信号和模数转换器的放大电路，这些接口既起连接又起匹配的作用。

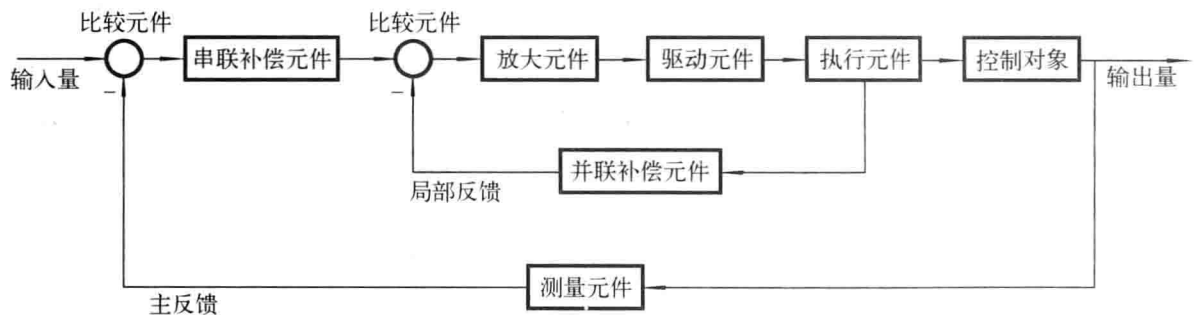


图 0-3 机电控制系统的组成框图

机电控制系统的基本工作原理是操作人员将加工信息（如尺寸、形状、精度等）输入到控制计算机，计算机发出启动命令，启动驱动元件运转，带动执行机构进行加工。测量元件实时检测加工状态，将信息反馈到计算机，经计算机分析、处理后，发出相应的控制指令，实时地控制执行机构运动，如此反复进行，自动地将工件按输入的加工信息完成加工。

0.3 控制系统的基本控制方式

1. 反馈控制方式

反馈控制是机电控制系统最基本的控制方式，也是应用最广泛的一种控制系统。在反馈控制系统中，控制装置对被控对象施加的控制作用，是取自被控量的反馈信息，用来不断修正被控量的偏差，从而实现对被控对象进行控制的任务，这就是反馈控制的原理。

其实，人的一切活动都体现出反馈控制的原理，人本身就是一个具有高度复杂控制能力的反馈控制系统。例如，人用手拿取桌上的书，汽车司机操纵方向盘驾驶汽车沿公路平稳行驶等，这些日常生活中习以为常的平凡动作都渗透着反馈控制的深奥原理。下面，通过解剖手从桌上取书的动作过程，透视一下它所包含的反馈控制机理。如图 0-4 所示，书的位置是手运动的指令信息，一般称为输入信号（或参据量）。取书时，首先人要用眼睛连续目测手相对于书的位置，并将这个信息送入大脑（称为位置反馈信息），然后由大脑判断手与书之间的距离，产生偏差信号，并根据其大小发出控制手臂移动的命令（称控制作用或操纵量），逐渐使手与书之间的距离（即偏差）减小。只要这个偏差存在，上述过程就要反复进行，直到偏差减小为零，手便取到了书。可以看出，大脑控制手取书的过程，是一个利用偏

差（手与书之间距离）产生控制作用，并不断使偏差减小直至消除的运动过程。显然，反馈控制实质上是一个按偏差进行控制的过程，因此，它也称为按偏差的控制，反馈控制原理就是按偏差控制的原理。

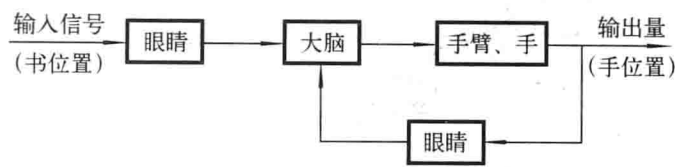


图 0-4 人取书的反馈控制系统方块图

通常，人们把取出的输出量送回到输入端，并与输入信号相比较产生偏差信号的过程，称为反馈。若反馈的信号是与输入信号相减，使产生的偏差越来越小，则称为负反馈，反之，则称为正反馈。反馈控制就是采用负反馈并利用偏差进行控制的过程，而且，由于引入了被控量的反馈信息，整个控制过程成为闭合的，因此反馈控制也称闭环控制。其特点是不论什么原因使被控量偏离期望值而出现偏差时，必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差，使被控量与期望值趋于一致。可以说，按反馈控制方式组成的反馈控制系统，具有抑制任何内、外扰动对被控量产生影响的能力，有较高的控制精度。但这种系统使用的元件多，线路复杂，特别是系统的性能分析和设计也较麻烦。尽管如此，它仍是一种重要的并被广泛应用的控制方式，自动控制理论主要的研究对象就是用这种控制方式组成的系统。

采用反馈控制方式的一个例子是函数记录仪。函数记录仪是一种通用的自动记录仪，它可以在直角坐标上自动描绘两个电量的函数关系。同时，记录仪还带有走纸机构，用以描绘一个电量对时间的函数关系。

函数记录仪通常由变换器、测量元件、放大元件、伺服电动机—测速机组、齿轮系及绳轮等组成，采用负反馈控制原理工作，其原理如图 0-3 所示。系统的输入是待记录电压，被控对象是记录笔，其位移即为被控量。系统的任务是控制记录笔的位移，在记录纸上描绘出待记录的电压曲线。

在图 0-5 中，测量元件是由电位器 R_Q 和 R_M 组成的桥式测量电路，记录笔就固定在电位器 R_M 的滑臂上，因此，测量电路的输出电压 u_p 与记录笔位移成正比。当有变化的输入电压 u_r 时，在放大元件输入口得到偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p$ ，经放大后驱动伺服电动机，并通过齿轮系及绳轮带动记录笔移动，同时使偏差电压减小。当偏差电压 $\Delta u = 0$ 时，电动机停止转动，记录笔也静止不动。此时 $u_p = u_r$ ，表明记录笔位移与输入电压相对应。如果输入电压随时间连续变化，记录笔便描绘出随时间连续变化的曲线。函数记录仪结构图如图 0-6 所示，测速发电机反馈的信号是与电动机速度成正比的电压，用以增加阻尼，改善系统性能。

2. 开环控制方式

开环控制方式是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程，按这种方式组成的系统称为开环控制系统，其特点是系统的输出量不会对系统的控制作用发生影响。开环控制系统可以按给定量控制方式组成，也可以按扰动控制方式组成。

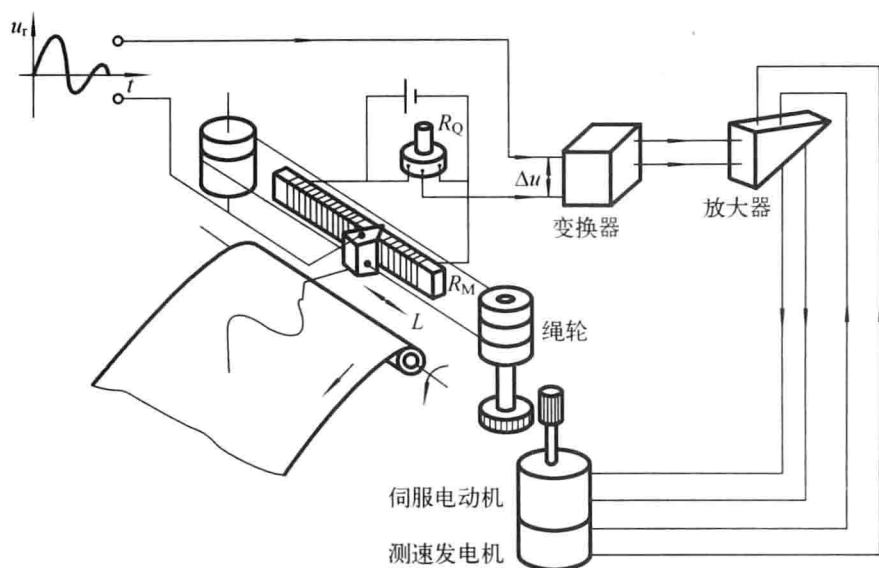


图 0-5 函数记录仪原理示意图

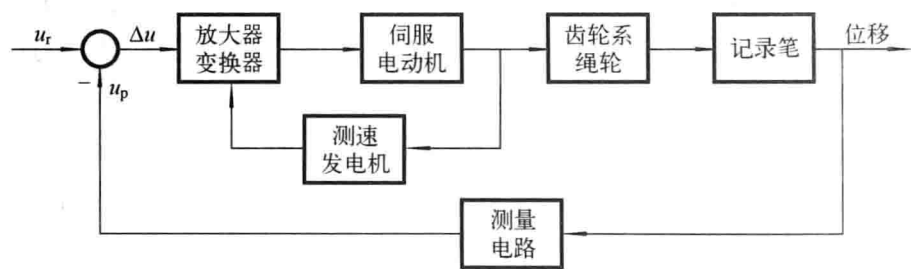


图 0-6 函数记录仪结构图

按给定量控制的开环控制系统，其控制作用直接由系统的输入量产生，给定一个输入量，就有一个输出量与之相对应，控制精度完全取决于所用的元件及校准的精度。因此，这种开环控制方式没有自动修正偏差的能力，抗扰动性较差，但由于其结构简单、调整方便、成本低，在精度要求不高或扰动影响较小的情况下，这种控制方式还有一定的实用价值。目前，用于国民经济各部门的一些自动化装置，如自动售货机、自动洗衣机、产品生产自动线、数控车床以及指挥交通的红绿灯的转换等，一般都是开环控制系统。

按扰动控制的开环控制系统是利用可测量的扰动量，产生一种补偿作用，以减小或抵消扰动对输出量的影响，这种控制方式也称为顺馈控制或前馈控制。例如，在一般的直流速度控制系统中，转速常常随负载的增加而下降，且其转速的下降与电枢电流的变化有一定的关系。如果我们设法将负载引起的电流变化测量出来，并按其大小产生一个附加的控制作用，用以补偿由它引起的转速下降，就可以构成按扰动控制的开环控制系统。这种按扰动控制的开环控制方式是直接从扰动取得信息，并以此来改变被控量，其抗扰动性好，控制精度也较高，但它只适用于扰动是可测量的场合。

3. 闭环控制方式

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,通常所说的控制系统,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、步进电动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,还是系统内部的变化,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。

4. 复合控制方式

反馈控制在外扰影响出现之后才能进行修正工作,在外扰影响出现之前则不能进行修正工作。按扰动控制方式在技术上较按偏差控制方式简单,但它只适用于扰动是可测量的场合,而且一个补偿装置只能补偿一个扰动因素,对其余扰动均不起补偿作用。因此,比较合理的一种控制方式是把按偏差控制与按扰动控制结合起来,对于主要扰动采用适当的补偿装置实现按扰动控制,同时,再组成反馈控制系统实现按偏差控制,以消除其余扰动产生的偏差。这样,系统的主要扰动已被补偿,反馈控制系统就比较容易设计,控制效果也会更好。这种按偏差控制和按扰动控制相结合的控制方式称为复合控制方式。

5. 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) 按数学模型分类

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) 按时间概念分类

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) 按信号的性质分类

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。