机电控制基础理论及应用

王田苗　丑武胜　编著

清 华 大 学 出 版 社
北　京

内 容 简 介

机电一体化技术是学科交叉的产物，并已逐渐成为一个新兴的热点研究领域，在国防建设和国民经济发展中起着越来越重要的作用。本书从工程科学的角度出发，介绍机电控制系统的分析、综合和设计方法，在理论和实际应用之间架起一座桥梁，使读者对机电控制系统的基本构成、设计与选型原则、常用控制算法及实现手段等有系统的、全面的认识和了解，并能将这些方法应用到实践中去解决实际工程问题，为今后设计、开发新的机电控制系统或装备奠定必要的技术基础。

本书内容丰富、深浅适度，叙述深入浅出，既可作为相关专业高年级本科生或研究生的教材，也可供从事机电一体化的工程技术人员参考。

版权所有，翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签，无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

机电控制基础理论及应用/王田苗，丑武胜编著. -北京：清华大学出版社，2003

ISBN 7-302-06283-8

Ⅰ.机… Ⅱ. ①王… ②丑… Ⅲ.机电一体化-控制系统 Ⅳ.TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 006342 号

出 版 者：清华大学出版社（北京清华大学学研大厦，邮编 100084）

http://www.tup.tsinghua.edu.cn

责任编辑：钟志芳

印 刷 者： 印刷厂

发 行 者：新华书店总店北京发行所

开 本：787×1092 1/16 印张：15.5 字数：352 千字

版 次：2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

书 号：ISBN7-302-06283-8/TH・110

印 数：0001～4000

定 价：23.00 元

前　言

机电一体化已逐渐成为一个新兴的热点研究领域。机电一体化技术以机械工程学科和电子工程学科为支撑，是交叉学科的产物，这种多学科交叉的特点也对新时期工程技术人员和工科大学的学生提出了新的要求，即要求他们不但既懂机械又懂控制，而且能将机和电有机结合起来，从而满足社会发展对从事机电一体化工作人才的需要。

本书的目的就在于从工程科学的角度出发，在理论和实际应用之间架起一座桥梁，通过介绍机电控制系统的分析、综合和设计方法，使读者对机电一体化系统（产品）的基本构成、分析设计与选型原则、常用控制算法及实现手段等有系统的、全面的认识和了解，并能举一反三地将这些方法应用到实践中去解决实际工程问题，提高读者综合应用所学知识的能力，为今后设计、开发新的机电控制系统或装备奠定必要的技术基础。

本书注重系统性，书中内容涵盖了整个机电系统所涉及的各个知识点，并通过大量实例分析，使读者能对相关知识融会贯通。本书同时吸收了近年来机电控制领域的最新研究成果，注重先进性与实用性。

全书由 4 部分 10 章构成。第 1 部分为（第 1、2 章）基础知识，主要介绍机电控制的基本概念，系统构成及机电系统的动、静态特性；第 2 部分（第 3、4 章）介绍机电控制系统中常用的检测元件和驱动元件；第 3 部分（第 5、6、7、8 章）介绍机电控制常用的控制算法及微机实现；第 4 部分（第 9、10 章）通过两个典型机电系统的设计和实现例子，帮助读者深刻理解机电系统的设计过程，将理论和实践有机联系起来。

本书可作为高等院校机械电子、自动化、计算机应用等有关专业高年级本科生和研究生在教学、课题设计时的教材或参考书，也可供从事机电一体化系统（产品）开发、维护的广大科技人员阅读。

由于水平有限，疏漏或不当之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作者

2002 年 5 月

目　　录

第 1 章　概述 1
1.1　机电控制系统的概念和发展概况 1
1.1.1　控制的基本概念 1
1.1.2　机械与控制 2
1.1.3　机电控制系统的发展概况 2
1.1.4　机电一体化系统（产品） 3
1.2　机电控制系统的一般构成 4
1.3　机电控制系统的基本控制方式 5
1.3.1　反馈控制方式 5
1.3.2　开环控制方式 7
1.3.3　复合控制方式 8
1.4　对机电控制系统的基本要求 8

第 2 章　机电控制系统的静、动态特性 10
2.1　机电控制系统的数学模型 10
2.1.1　数学模型的概念 10
2.1.2　机电控制系统数学模型的种类 11
2.1.3　微分方程 11
2.1.4　传递函数 12
2.1.5　系统结构图 14
2.1.6　频率特性 16
2.1.7　状态变量与状态方程 22
2.2　机电控制系统的动态性能和稳态性能 25
2.2.1　典型输入信号 25
2.2.2　动态性能与稳态性能 26
2.2.3　对数频率稳定判据与稳定裕量 27
2.3　机械特性 31
2.3.1　恒转矩型机械特性 32
2.3.2　离心式通风机型机械特性 32
2.3.3　直线型机械特性 33
2.3.4　恒功率型机械特性 33
2.4　机电控制系统稳定运行的条件 34

第 3 章 机电控制系统中的检测元件 36
3.1 检测传感器的分类及对传感器的基本要求 36
3.1.1 传感器的分类 36
3.1.2 对传感器的基本要求 37
3.2 常用的位移测量传感器 38
3.2.1 电位计 38
3.2.2 电涡流传感器 39
3.2.3 差动变压器式位移传感器 40
3.2.4 光电脉冲发生器 41
3.2.5 感应同步器 43
3.2.6 CCD 46
3.2.7 光栅式数字位移传感器 49
3.3 常用的速度测量传感器 50
3.3.1 测速发电机 50
3.3.2 利用位移测量传感器测速度 52

第 4 章 机电控制系统中的驱动元件 54
4.1 驱动元件的种类及特点 54
4.1.1 机电控制系统对执行元件的基本要求 56
4.1.2 常用的控制用电动机 56
4.2 步进电动机的驱动与控制 57
4.2.1 步进电动机工作原理 57
4.2.2 步进电动机基本特性 58
4.2.3 步进电动机的驱动 59
4.3 直流伺服电动机与驱动 61
4.3.1 直流伺服电动机工作原理 61
4.3.2 直流伺服电动机的驱动 63
4.4 交流伺服电动机及其驱动 70
4.4.1 交流伺服电动机工作原理 70
4.4.2 交流伺服电动机驱动与控制 72
4.5 SMA 作为驱动器的研究 75

第 5 章 机电伺服系统的常规设计方法 79
5.1 随动系统的典型结构及稳定特性 79
5.2 随动系统频率法设计 80
5.2.1 串联校正 80
5.2.2 反馈校正（并联校正） 86
5.3 复合控制法设计 90

5.3.1 复合控制的概念及不变性原理 90
5.3.2 复合控制设计法 91
5.4 PID 数字控制器的设计 94
5.4.1 PID 控制算法 94
5.4.2 数字 PID 控制算法的改进 97
5.4.3 数字 PID 控制器的参数整定 100

第 6 章 微机控制系统 105
6.1 微型计算机的组成 105
6.1.1 计算机的基本结构 105
6.1.2 微型计算机软件 107
6.2 机电控制系统中常用微处理器简介 110
6.2.1 MCS 系列单片机简介 110
6.2.2 MCS-51 单片机 111
6.2.3 MCS-96 系列单片机简介 113
6.2.4 DSP 简介 115
6.2.5 面向电动机数字控制的 DSP 芯片——TMS320F240 简介 119
6.2.6 PLC 简介 128

第 7 章 汇编语言程序设计知识 132
7.1 编程的步骤、方法和技巧 132
7.1.1 编程的步骤 132
7.1.2 编程的方法和技巧 134
7.2 汇编语言程序的基本结构 135
7.3 汇编语言源程序的编辑和汇编 137
7.3.1 源程序的编辑 137
7.3.2 源程序的汇编 138
7.3.3 伪指令 138
7.4 Franklin C51 和 A51 函数的相互调用 141
7.4.1 C 语言与汇编语言 141
7.4.2 Franklin C51 和 A51 接口所涉及的几个主要问题 141
7.4.3 应用举例 144

第 8 章 机电控制系统中的通信技术 157
8.1 串行通信基本知识 157
8.1.1 数据通信 157
8.1.2 串行通信的传输方式 157
8.1.3 异步通信和同步通信 158

8.2 串行通信标准接口总线 159
8.2.1 RS-232C 159
8.2.2 信号电气特性与电平转换 161
8.2.3 RS-232C 的应用 162
8.2.4 RS-422A 标准总线 164
8.3 单片机与 PC 机通信的接口电路 165
8.3.1 采用 1488 和 1489 电平转换芯片实现 8031 与 PC 机通信 165
8.3.2 采用 MAX232 芯片实现 MCS-51 单片机与 PC 机的 RS-232C 标准接口通信电路 166
8.4 基于 PComm Pro 的串口通信编程 168
8.5 PC 机与多个单片机间的通信 172
8.5.1 采用 MAX232 芯片的 RS-232C 接口的通信电路 173
8.5.2 多个单片机与 PC 机通信协议的约定 173
8.5.3 PC 机的通信软件 173
8.5.4 单片机的通信软件 175
8.6 USB 总线和 IEEE1394 总线简介 175
8.6.1 USB 总线简介 176
8.6.2 IEEE1394 总线简介 176
8.7 现场总线 176
8.7.1 现场总线产生背景 176
8.7.2 现场总线的要求及特点 177
8.7.3 CAN 总线 178
8.7.4 LonWorks 控制网络 183

第 9 章 机电控制系统设计实例之一 187
9.1 技术要求 187
9.2 方案设计 187
9.2.1 有关尺寸计算 188
9.2.2 机械本体的设计 189
9.2.3 电气系统设计 191
9.3 系统控制结构介绍 195
9.4 负载情况分析及系统的整体建模 197
9.5 控制算法 199
9.5.1 对前馈环节的分析 199
9.5.2 库仑摩擦问题 200
9.5.3 积分饱和问题 204
9.6 控制系统软件设计 205
9.6.1 软件设计思想 205

9.6.2 上位软件结构及程序流程 206
9.6.3 控制卡下位软件 209

第 10 章 机电控制系统设计实例之二 212
10.1 多指灵巧手 212
10.2 控制系统要求 214
10.3 控制系统构成 215
10.4 基于 DSP 的伺服运动控制器硬件设计 215
10.4.1 DSP 核心系统设计 216
10.4.2 DSP 接口电路设计 219
10.4.3 电动机光电码盘四倍频及可逆计数器设计 223
10.5 控制系统软件构成 227
10.5.1 上层软件结构 228
10.5.2 伺服控制器软件设计 231
10.6 灵巧手控制实验及实验结果 233

参考文献 235

第 1 章　概　述

1.1　机电控制系统的概念和发展概况

1.1.1　控制的基本概念

“控制（control）”这一词，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。

在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，叫做被控对象。对于想实现控制的目标量，比如电动机的转速、储水容量水位、油压缸中活塞的位置、炉内温度等叫做控制量，而把所希望的转速、水位、位置、温度等叫做目标值或参据量。

根据产生控制作用的主体的不同，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叫做手动控制。例如汽车的驾驶，司机为到达目的地，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的。

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，例如温度、压力、液位等，也可要求按照某个给定规律运行，例如飞行航线、记录曲线等；而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。它的发展初期，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用自动驾驶仪、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。

1.1.2 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，在各个方面都给我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，机械的广泛深入的应用，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 世纪后半叶麦克斯韦提出了系统特性以及劳斯·胡尔维兹发现了系统稳定工作的条件（稳定性判据）后上述问题才得以解决，这也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愈来愈高的要求，为达到工作目的，使得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百分之几毫米，甚至几微米，重型镗床为保证加工精度和光洁度，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。

1.1.3 机电控制系统的发展概况

机电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、停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；时隔不久，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（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，而且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（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（CAD）与计算机辅助制造（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（CIMS）。

1.1.4　机电一体化系统（产品）

机电控制技术是机电一体化系统（产品）的重要支撑技术，那么，什么是机电一体化系统（产品）呢？

“机电一体化”（Mechatronics）是各相关技术有机结合所形成的一个新概念，其中的“Mechatronics”是 Mechanics（机械学）与 Electronics（电子学）组合而成的英语，是由日本《机械设计》杂志于 1971 年提出的。对于机电一体化，目前尚无公认的、统一的定义。几个较能反映机电一体化性质的定义如下：

日经产业新闻：“电子技术的电子学与机械技术的机械学相结合的技术进步的总称。”

富士通法纳克公司：“将机械学和电子学有机结合而提供的更为优越的技术。”

日本机械振兴协会经济研究所：“机电一体化乃是在机械的主功能、动力功能、信息功能和控制功能上引进微电子技术，并将机械装置与电子装置用相关软件有机结合而构成系统的总称。”

机电一体化具有“技术”和“产品”两方面的内容。机电一体化技术主要包括机电控制技术和机械设计等技术、原理，使机电一体化产品（或系统）得以实现、使用和发展；

机电一体化“产品”主要是指机械系统（或部件）与以微型计算机为代表的微电子系统（或部件）相互置换或有机结合而构成的新“系统”，且被赋予了新的功能和性能。

由此可见，传统的机械制造技术与控制技术和信息技术的有机结合，不仅促使生产经营模式的发展和变革，而且促进开发性能优越的、机电相结合的机械产品，创造新的制造工艺和加工手段，使系统（产品）高附加值化，即多功能、高效率化、高可靠性、节省能源，提高产品的质量和性能，增强企业的市场竞争力。机电一体化技术在机械制造业中的应用，大致经历了参数数显、硬件数控（NC 控制）、计算机数控（CNC 控制）、柔性生产系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）、虚拟制造系统（VMS）等过程，使加工制造技术与生产经营模式紧密结合，形成现代制造技术和系统。

1.2 机电控制系统的一般构成

机电控制系统一般由 8 个部分组成，如图 1-1 所示。图中，“○”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。

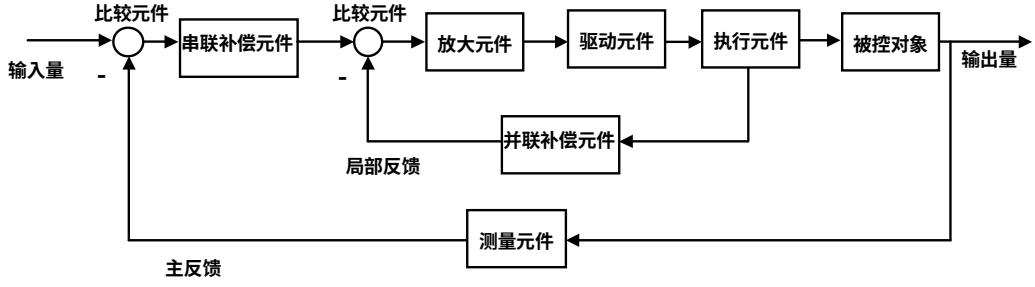


图 1-1 机电控制系统的组成框图

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。

补偿元件也叫校正元件，它是结构或参数便于调整的元件，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），例如机床、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。

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。

1.3　机电控制系统的基本控制方式

1.3.1　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 1-2 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。

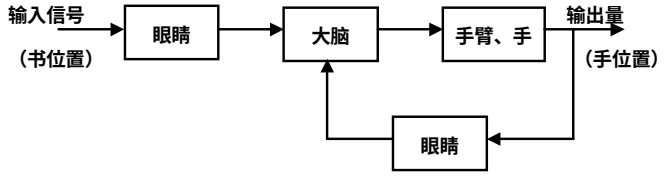


图 1-2　人取书的反馈控制系统方块图

通常，我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 1-3 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 1-3 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。函数记录仪结构图见图 1-4，图中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。

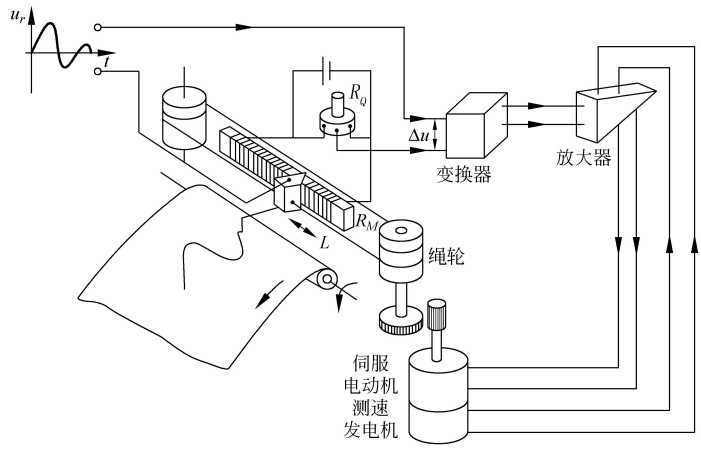


图 1-3　函数记录仪原理示意图

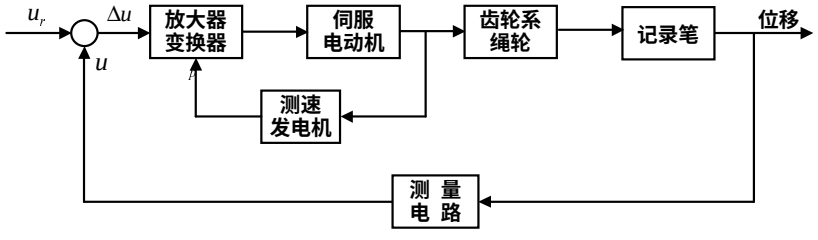


图 1-4　函数记录仪结构图

1.3.2　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。

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。

1.3.3 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。

1.4 对机电控制系统的基本要求

尽管机电控制系统有不同的类型，而且每个系统也都有不同的特殊要求，但对于各类系统来说，在已知系统的结构和参数时，我们感兴趣的都是系统在某种典型输入信号下，其被控量变化的全过程。例如，对恒值控制系统是研究扰动作用引起被控量变化的全过程；对随动系统是研究被控量如何克服扰动影响并跟随参据量的变化过程。但对每一类系统中被控量变化全过程提出的基本要求都是一样的，且可以归结为稳定性、快速性和准确性，即稳、准、快的要求。

稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。一个稳定的控制系统，其被控量偏离期望值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小或趋于零。具体来说，对于稳定的恒值控制系统，被控量因扰动而偏离期望值后，经过一个过渡过程的时间，被控量应恢复到原来的期望值状态：对于稳定的随动系统，被控量应能始终跟踪参据量的变化。反之，不稳定的控制系统，其被控量偏离期望值的初始偏差将随时间的增长而发散，因此，不稳定的控制系统无法实现预定的控制任务。

线性自动控制系统的稳定性是由系统结构所决定，与外界因素无关。这是因为控制系统中一般含有储能元件或惯性元件，如绕组的电感、电枢转动惯量、电炉热容量、物体质量等，储能元件的能量不可能突变，因此，当系统受到扰动或有输入量时，控制过程不会立即发生，而是有一定的延缓，这就使得被控量恢复期望值或跟踪参据量有一个时间过程，称为过渡过程。例如，在反馈控制系统中，由于被控对象的惯性，会使控制动作不能及时纠正被控量的偏差，控制装置的惯性则会使偏差信号不能及时转化为控制动作。具体来说，在控制过程中，当被控量已经回到期望值而使偏差为零时，执行机构本应立即停止工作，但由于控制装置的惯性，控制动作仍继续向原来方向进行，致使被控量超过期望值又产生符号相反的偏差，导致执行机构向相反方向动作，以减小这个新的偏差；另一方面，当控制动作已经到位时，又由于被控对象的惯性，偏差并未减小为零，因而执行机构继续向原来方向进行，使被控量又产生符号相反的偏差，如此反复进行，致使被控量在期

望值附近来回摆动，过渡过程呈现振荡形式。如果这个振荡过程是逐渐减弱的，系统最后可以达到平衡状态，控制目的得以实现，我们称为稳定系统；反之，如果振荡过程逐步增强，系统被控量将失控，则称为不稳定系统。

为了很好地完成控制任务，控制系统仅仅满足稳定性要求是不够的，还必须对其过渡过程的形式和快慢提出要求。例如，对用于高射炮射角随动系统，虽然炮身最终能跟踪目标，但如果目标变动迅速，而炮身跟踪目标所需过渡过程时间较长，就不可能击中目标；对自动驾驶仪系统，当飞机受阵风扰动而偏离预定航线时，具有自动使飞机恢复预定航线的能力，但在恢复过程中，如果机身摇晃幅度过大，或恢复速度过快，就会使乘客感到不适；又如函数记录仪记录输入电压时，如果记录笔移动很慢或摆动幅度过大，不仅使记录曲线失真，而且还会损坏记录笔，或使电器元件承受过大电压。因此，对控制系统过渡过程的时间（即快速性）和最大振荡幅度（即超调量）一般都有具体要求。

理想情况下，当过渡过程结束后，被控量达到的稳态值（即平衡状态）应与期望值一致。但实际上，由于系统结构、外作用形式以及摩擦、间隙等非线性因素的影响，被控量的稳态值与期望值之间会有误差存在，称之为稳态误差。稳态误差是衡量控制系统控制精度的重要标志，在技术指标中一般都有具体要求。

在同一机电控制系统中，准、稳、快是相互制约的，快速性好，可能会有强烈的振荡；改善稳定性，控制过程可能又减慢，精度也可能降低。这些问题是机电控制所必须解决的重要课题。基本指标以能满足用户的使用要求为度，以能加工制造出合格的工件为标准，不是越高越好，因为有时基本指标的提高，将导致投资的增加。