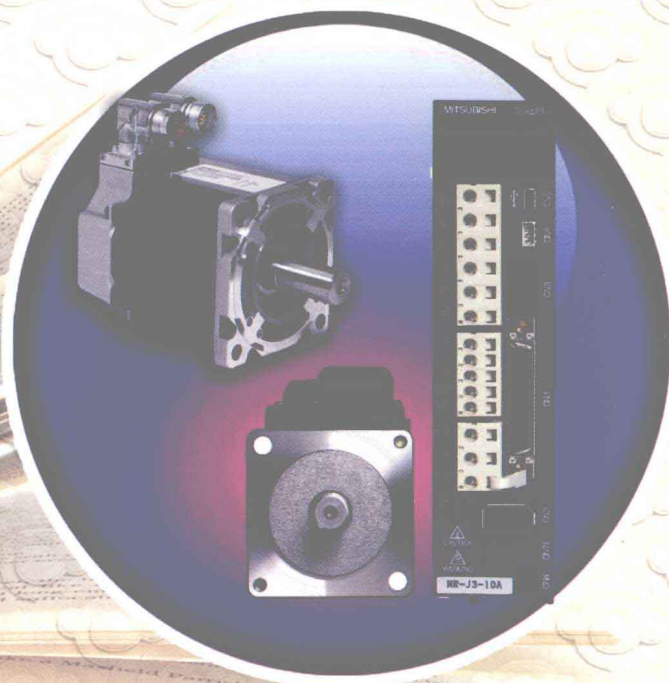


技师培训教程系列

机电控制系统原理 及工程应用

实操指导书

彭旭昀 吴启红 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



技师培训教程系列

机电控制系统原理及工程应用 实操指导书

彭旭昀 吴启红 编著

机械工业出版社

本书根据中华人民共和国职业技能鉴定规范,并参考了深圳市电工技能职业标准编写。本书以实践操作为重点,理论叙述为实践操作服务。全书共分3章,第1章介绍了机电控制系统建模和仿真技术,重点介绍机电控制的建模、仿真和操作,配有经典控制理论分析等相关项目实训。第2章介绍了机电控制检测技术,讲述了常用传感器的工作原理、选用等,并配有大量传感器的特性测量和应用实训。第3章介绍了机电系统执行装置的控制技术,重点讲述了伺服电动机和步进电动机的控制应用技术,并配置了机电控制应用技术实训项目。附录中介绍了三菱FR-A700变频器的操作技术。

本书可供技工学校、高职院校电气类、机电一体化专业或自动化专业使用,也可作为电工、电梯、制冷类技师培训及考核前的技能训练。同时也是工控技术人员非常难得的一本参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机电控制系统原理及工程应用实操指导书/彭旭昀,吴启红编著 —北京:机械工业出版社,2010.7

(技师培训教程系列)

ISBN 978-7-111-31227-7

I. ①机… II. ①彭…②吴… III. ①机电系统:自动控制系统-技术培训-自学参考资料 IV. ①TH-39②TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第130854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:罗莉 责任编辑:罗莉

版式设计:霍永明 责任校对:姜婷

封面设计:陈沛 责任印制:李妍

北京外文印刷厂印刷

2010年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14印张·342千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-31227-7

定价:30.00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

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

序

随着我国经济的不断发展和产业结构的转型升级，以及经济全球化的发展，我国已逐步成为世界的“制造中心”，但符合市场、满足企业需求的高技能人才严重不足，正在成为影响我国经济进一步发展的瓶颈。为此国家人力资源和社会保障部全面推进技能振兴和高技能人才培养工程，实施 50 万新技师培养计划。

深圳技师学院是深圳市高技能人才培养的主要基地和主要力量，年培养技能人才 20000 人次。在高技能人才的培养过程中，探索模块化和分段培养模式，教材作为课程体系设计的核心，处于基础地位，我们以市场为导向、以企业需求依据和自动化技术的发展情况，精心策划了这套《技师培训教程系列》，本系列教材的主要特色体现在如下几个方面：

（1）书中内容突出一个“新”字，结合当前企业的生产实际，力求教学内容能反映本工种新技术、新工艺的应用和新设备的使用，具有一定的广度和深度。

（2）内容编排上，注重努力做到理论与实践紧密结合，侧重实践操作，理论知识以够用为度，技能实训以培养掌握复杂操作和新技术应用的技能，并以培养增强分析、判断、排除各种实际故障能力为重点。

（3）培养目标明确，强化应用。教学中注重培养学员的职业能力，坚持高技能人才的培养方向，我们把相关知识点的学习与专业技能实训有机地结合起来，摒弃以往“就知识讲知识”的传统做法。

（4）根据人力资源和社会保障部相关技能鉴定规范，同时结合深圳市电工、电梯、制冷专业技师（模块化）工种职业标准，力求教学内容能覆盖相应技能鉴定的要求。

本系列教材的编者来自深圳技师学院从事培训教学的一线教师和企业的一部分专家，书中内容基本反映了深圳技能培训教学和社会化考核的方向，相信本书会受到中、高职类院校广大师生和广大青年读者的欢迎。

编委会主任 黎德良

前 言

随着我国经济的不断发展和产业结构的不断调整,机电控制、检测和执行等机电一体化技术广泛用于各行各业。为帮助工厂自动化技术从业人员、技工学校和职业院校学生顺利通过电工及相关工种的技能鉴定,提高高学历人员的自动化技术实践技能水平,参考了相关工种的职业标准,我们编写了《机电控制系统原理及工程应用实操指导书》。本书不但可供机电类技师培训及考证训练时使用,而且可供职业院校自动化技术专业实训用,又可作为自动化工程技术人员在生产一线解决问题的参考指南。

本书编写目的旨在帮助读者学会工厂自动化技术应用和设计能力,尤其是机电控制系统的建模、传感器的应用为主体的工厂自动化技术综合应用技术能力。

本书编写内容有如下几点特色:

(1) 理论知识以够用为度,努力做到理论与实践紧密结合,侧重实践操作。

(2) 技能实践增加了大量的实训项目,以培养掌握复杂操作和新技术操作的技能和增强分析、判断、排除各种实际故障的能力为重点。力求所有实训项目能满足企业生产的实际需要,同时能反映本职业工种新技术的应用,还能体现自动化技术人员的实际工作经验和技能水平,并且具有很强的可操作性,都能在实训(或实验)室里完成,便于进行培训与考核。

(3) 文字叙述尽量做到深入浅出,通俗易懂。每章都配有考核项目,做到有训有考,学以致用。为读者全面掌握自动化技术的实践技能打下坚实基础。

全书共分3章,第1章介绍了机电控制系统建模和仿真技术。第2章介绍了机电控制检测技术。第3章介绍了机电系统执行装置的控制技术。附录中介绍了三菱FR-A740变频器的操作技术。

彭旭昀编写了本书第1章的1.1~1.4节、第2章的2.1~2.3节和第3章的3.1~3.3节,吴启红编写了第1章1.5、1.6节、第2章的2.4、2.5节和第3章的3.4~3.8节和附录部分。全书由彭旭昀统稿。在编写过程中得到了岳庆来、刘遥生、周烨、陈立香、胡洪等老师的大力帮助,并得到了华南理工大学宋健教授的精心指点,在此一并表示衷心的感谢!

由于编写时间仓促,加之编者水平有限,书中的错误和不当之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见,请将意见反馈至邮箱 qhongw@126.com,为谢!

编 者
于深圳技师学院

技师培训教程系列 编委会名单

主 任：黎德良

副主任：王 德 彭旭昀

委 员：乔建伟 郭昕文 涂爱云 吴启红 邵 纯 陈 芸
王跃军 黄志昌 程瑞端 欧成友 郭 强 鄂永雄
岳庆来 张大明 谭 斌 黄太平 胡 洪 刘振鹏

推 荐 书 目

技师培训教程系列

序号	书 名	书 号	定价	出版时间
1	变频器、可编程序控制器及触摸屏综合应用技术实操指导书（第2版）	978-7-111-30672-6	44	201008
2	电梯现代智能控制技术	978-7-111-27119-2	58	200908
3	变频器、可编程序控制器及触摸屏综合应用技术	978-7-111-18581-9	65	200906
4	电器-PLC 控制技术的应用	978-7-111-20652-1	33	200806

从校园到职场系列

序号	书 名	书 号	定价	出版时间
1	电气工程及其自动化专业大学生到工程师的历程	978-7-111-29252-4	29	201001
2	电气工程及其自动化专业技术技能入门与精通	978-7-111-28661-5	49	201003
3	电气工程及其自动化专业技术管理入门与精通	978-7-111-28721-6	39.8	201001
4	变压器应用与维修——专业技能入门与精通	978-7-111-29577-8	30	201002
5	印制电路板工程设计——专业技能入门与精通	978-7-111-27887-0	58	201001
6	PIC 单片机原理与应用——专业技能入门与精通	978-7-111-27894-8	58	201001
7	单片机开发上岗培训教程	978-7-111-21662-9	25	200708
8	单片机原理与应用技术实践	978-7-111-26411-8	30	200906
9	常用电工电子技术精要	978-7-111-24637-4	38	200807
10	精讲电气工程制图与识图	978-7-111-23670-2	28	200805
11	珍惜大学时光 践行人生规划	978-7-111-28173-3	20	200911

PLC 系列

序号	书 名	书 号	定价	出版时间
1	PLC 及 I/O 设备应用教程	978 - 7 - 111 - 27870 - 2	33	200909
2	松下 PLC 编程与应用	978 - 7 - 111 - 27217 - 5	40	200908
3	三菱 Q 系列 PLC 原理与应用设计	978 - 7 - 111 - 28475 - 8	66	201001
4	自学自会 PLC 指令——三菱 FX2N 编程技术及应用	978 - 7 - 111 - 27872 - 6	30	200911
5	三菱 PLC 基础与系统设计	978 - 7 - 111 - 27268 - 7	40	200908
6	三菱 FX 系列 PLC 设计与开发——原理、应用与实训	978 - 7 - 111 - 26538 - 2	40	201001
7	三菱 FX 系列 PLC 应用系统设计指南	978 - 7 - 111 - 23932 - 1	48	200807
8	西门子 S7 系列 PLC 的应用与维护	978 - 7 - 111 - 23439 - 5	50	200912
9	西门子 S7 - 200/300/400 PLC 基础与应用技术	978 - 7 - 111 - 25898 - 8	34	200907
10	S7 - 200 PLC 原理与实用开发指南	978 - 7 - 111 - 25157 - 6	39	200901
11	西门子 S7 - 200 PLC 的使用经验与技巧	978 - 7 - 111 - 25003 - 6	35	200809
12	S7 - 200 PLC 编程设计与案例分析	978 - 7 - 111 - 28311 - 9	68	201001
13	S7 - 300/400 PLC 编程设计与案例分析	978 - 7 - 111 - 27976 - 1	79	201001
14	S7 - 300/400 PLC 梯形图与语句表编程	978 - 7 - 111 - 26146 - 9	40	200904
15	S7 - 300/400 PLC 原理与实用开发指南	978 - 7 - 111 - 24871 - 2	36	200810
16	S7 - 300/400 PLC 实用开发指南	978 - 7 - 111 - 20286 - 8	50	200802
17	欧姆龙 CJ1 系列 PLC 原理与应用	978 - 7 - 111 - 25027 - 2	39	200901
18	图解欧姆龙 PLC 入门	978 - 7 - 111 - 20862 - 4	26	200908
19	施耐德电气可编程序控制器原理及应用 (1CD)	978 - 7 - 111 - 19576 - 4	55	200807
20	PLC 编程理论、算法及技巧 (第 2 版) (1CD)	978 - 7 - 111 - 26319 - 7	88	201001
21	PLC 编程设计与实例	978 - 7 - 111 - 27567 - 1	33	200909
22	PLC 编程实用指南 (1CD)	978 - 7 - 111 - 19297 - 8	68	200901
23	PLC 梯形图设计方法与应用实例	978 - 7 - 111 - 24320 - 5	38	200808
24	可编程序控制器选用与系统设计实例	978 - 7 - 111 - 29421 - 4	49	201001
25	可编程序控制器选择、设计与维护	978 - 7 - 111 - 11084 - 2	26	200802
26	可编程序控制器应用教程	978 - 7 - 111 - 26071 - 4	48	200905
27	可编程序控制器原理、应用与实训	978 - 7 - 111 - 22894 - 3	26	200906
28	可编程序控制器原理及应用 (第 3 版)	978 - 7 - 111 - 27774 - 3	50	200909
29	电气控制与可编程序控制器的原理及应用	978 - 7 - 111 - 14478 - 6	43	200807
30	可编程序控制器与工业自动化系统 (1CD)	978 - 7 - 111 - 18054 - 8	36	200807

目 录

序

前言

第1章 机电控制系统建模和仿真 1

1.1 机电控制系统的基本概念 1

1.1.1 常见机电控制系统 1

1.1.2 机电控制系统的一般构成 2

1.1.3 基本控制方式 3

1.1.4 机电控制系统的性能要求和评价指标 5

1.2 机电控制系统的建模和仿真 7

1.2.1 建模 7

1.2.2 传递函数 8

1.2.3 仿真和框图模型 10

1.2.4 典型环节及其传递函数 13

1.3 控制器的基本操作 16

1.3.1 控制模式 16

1.3.2 开关控制 17

1.3.3 比例控制 18

1.3.4 比例-积分控制 20

1.3.5 比例微分调节(PD) 21

1.3.6 模拟PID调节器 22

1.4 控制器的设计 23

1.5 机电控制实训平台 26

1.5.1 硬件资源 26

1.5.2 软件资源 28

1.6 机电控制应用实训 32

实训1 典型环节及其阶跃响应 32

实训2 二阶系统阶跃响应 39

实训3 控制系统的稳定性分析 42

实训4 数字PID控制 44

实训5 PID在温控炉控制中的应用 46

实训6 闭环控制系统实训 50

第2章 机电控制检测技术 57

2.1 传感器的组成及分类 57

2.1.1 传感器的构成 57

2.1.2 传感器的分类 57

2.1.3 机电系统常用传感器 58

2.1.4 传感器主要指标 59

2.2 测控系统 61

2.2.1 非电量电测法 61

2.2.2 自动测控系统 61

2.2.3 传感器总线 62

2.2.4 传感器的选用 64

2.3 常用传感器及应用 65

2.3.1 线位移传感器 65

2.3.2 速度传感器 77

2.3.3 霍尔式传感器 80

2.3.4 力传感器 83

2.3.5 红外、图像与光纤传感器 90

2.4 传感器实训平台 98

2.4.1 CSY10A 传感器实训平台简介 98

2.4.2 CSY10A 传感器实训平台的使用 101

2.5 传感器特性测量及应用实训 102

实训7 电容式传感器特性测量实训 102

实训8 气敏传感器特性测量实训 104

实训9 相敏检波器特性测量实训 106

实训10 压电加速度式传感器特性测量实训 109

实训11 霍尔传感器直流特性测量实训 110

实训12 霍尔传感器应用实训——电子秤 111

实训13 光纤传感器应用实训1——位移测量 112

实训14 光纤传感器应用实训2——转速测量 115

实训15 风压变送器在流量调节阀控制中的应用 117

实训16 温度传感器在流量调节阀控制中的应用 125

第3章 机电系统的执行装置的控制技术 130

3.1 执行器的分类及特点 130

3.1.1 执行器的分类	130	SETUP154C 的使用	167
3.1.2 机电控制系统常用执行器	130	3.5.1 软件的基本设置	168
3.1.3 执行器的基本要求和选择	132	3.5.2 软件调试运行功能	168
3.2 常用伺服电动机及其驱动	133	3.6 定位控制技术	171
3.2.1 概述	133	3.6.1 定位控制产品简介	171
3.2.2 直流伺服电动机	133	3.6.2 定位模块的参数	174
3.2.3 交流伺服电动机	139	3.6.3 定位控制系统的构成	176
3.3 步进电动机及其驱动	145	3.6.4 定位控制指令	178
3.3.1 概述	145	3.7 三菱定位控制软件包 SWD05 - FXVPS 的使用	182
3.3.2 步进电动机工作原理	145	3.7.1 软件包的使用	182
3.3.3 步进电动机的技术指标	147	3.7.2 定位程序的编写	184
3.3.4 步进电动机的驱动和控制	148	3.7.3 定位程序的下载与运行	186
3.3.5 步进电动机的微机控制	151	3.8 机电控制执行装置应用实训	187
3.3.6 步进电动机的选用	152	实训 17 步进电动机 PLC 控制	187
3.4 三菱伺服电动机控制技术	154	实训 18 伺服电动机软件设置及调试操作 实训	190
3.4.1 伺服系统功能概述	154	实训 19 定位模块控制伺服电动机 运行	194
3.4.2 伺服放大器型号意义	155	实训 20 PLC 控制伺服电动机运行	196
3.4.3 伺服控制系统的接线	157	实训 21 定位模块在二维零件数控加工 系统的应用	205
3.4.4 伺服电动机控制参数	157	附录 FR - A740 变频器基本操作	209
3.4.5 伺服放大器控制操作	163	参考文献	214
3.4.6 伺服系统试运行	163		
3.4.7 伺服系统故障处理	163		
3.4.8 伺服系统通信	167		
3.5 伺服电动机计算机设置调试软件			

第1章 机电控制系统建模和仿真

机械技术是一门古老的学科，从机械的发展史可以看到，机械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。随着社会的进步，特别是生产工艺的发展，人们对机械系统也提出了越来越高的要求，如一些精密机床的加工精度要求达到百分之几毫米，甚至几微米，人们认识到有些问题单从机械角度进行解决是越来越不容易了。

20 世纪 60 年代以来，随着微电子、信息、自动化、生物、光纤通信等高新技术的飞速发展，同时新材料、新能源的运用，也使得高新技术逐渐向传统产业渗透，引起传统产业的深刻变革。为了实现各种复杂的任务，机械系统已不再是单纯的机械结构了，机械技术更多的是与电子技术、信息技术、自动控制技术等结合在一起，组成一个有机总体，逐渐形成了以控制技术为支撑的机电系统，这就是机电控制系统。

1.1 机电控制系统的基本概念

1.1.1 常见机电控制系统

在机电系统中，我们希望机器的生产过程按照预定的要求运行。例如，要想使数控机床加工出高精度的零件，就必须保证其刀架的位置准确地跟随指令进给；要想使发电机正常供电，就必须保持其输出电压恒定，尽量不受负载变化和原动机转速波动的影响；要想使热处理炉提供合格的产品，就必须严格地控制炉温等。其中发电机、机床、热处理炉就是工作的机器设备；电压、刀架位置、炉温是表征这些机器设备工作状态的物理参量；而额定电压、进给的指令、规定的炉温，就是对物理参量在运行过程中的要求。

通常，把这些工作的机器设备称为被控对象或被控量，对于想实现控制的目标量，如电压、刀架位置、炉温等叫做控制量，而把所希望的额定电压、规定的炉温、电动机的转速等叫做目标值或希望值（或参考输入）。则控制的基本任务可概括为使被控对象的控制量等于目标值。

在机电控制系统中，主要采取自动控制技术。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）操纵被控对象，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。

机电控制系统根据其控制对象的不同，一般分为过程控制系统和运动控制系统两种。

1. 过程控制系统

在过程控制系统里，控制着产品生产过程中的一个或多个变量，如温度、湿度、压力、速度、液体高度等，过程控制系统的响应一般较慢。控制系统根据生产流程进行设备的状态数据采集与巡回检测，然后根据预定的控制规律对生产过程进行控制，过程控制在轻工、食品、制药、机械等行业得到了广泛应用。

2. 运动控制系统

运动控制系统控制的是机械对象的位置、速度、加速度，其被控对象的运动和位置是可

测的，响应一般较快。如控制系统输出信号能够稳定、快速、准确地复现输入信号的变化规律，也常称为伺服系统。

1.1.2 机电控制系统的一般构成

机电控制系统是把机械作为控制对象，研究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。机电控制系统的构成可以用人体来模拟，如图 1-1 所示，可分成 4 个部分：

1. 控制部分

控制部分（或称控制器）是机电控制系统的中枢部分和控制核心，相当于人类的大脑和神经系统，是机电控制系统的中枢部分，实现对机电系统的控制信息和来自传感器的反馈信息进行运算处理和判断，并向执行装置发出动作指令。

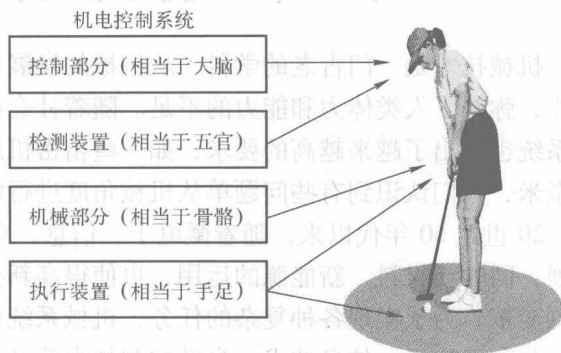


图 1-1 机电控制系统的构成

由于微电子和计算机技术的发展，计算机技术在机电控制系统中起着越来越重要的作用。目前机电系统的控制装置较多采用计算机技术，计算机的强大信息处理能力使得控制技术提高到一个新的水平，计算机的引入对控制系统的性能、结构以及控制理论都产生了深刻的影响。

自 20 世纪 70 年代以来，单片机（Single Chip Microcomputer）发展很快，由于单片机优越的控制性能，同模拟控制器相比，单片机能够实现更加复杂的控制理论和算法，具有更好的柔性和抗干扰能力，实现了机电的有机结合。单片机的种类繁多，常见的有 MCS-51 系列、MCS-96 系列、MOTOROLA 系列、ATMEL MSP430 系列等。在工业控制中应用较为普遍的可编程序控制器（Programmable Logic Controller, PLC），其核心也是由一个单片机构成，自 1969 年第一台可编程序控制器面世以来，经历了 40 多年的发展，可编程序控制器已经成为一种最重要、最普及、应用场合最多的工业控制计算机。现在可编程序控制器已进入包括过程控制、位置控制等场合在内的所有控制领域，在许多场合只需可编程序控制器即可构成包括逻辑控制、过程控制、数据采集及控制和图形工作站的经济合算、体积小、设计调试方便的综合控制系统。

2. 检测装置

检测装置（传感器）的作用类似于人的感觉器官，将机电控制系统中被检测对象的状态、性质等信息转换为一定的物理量或者化学量的装置，如将位置、位移、速度、压力、流量、温度等信息进行采集和处理，供控制系统分析处理之用。

从信号的获取、变换、加工、传输、显示和控制等方面来看，以电量形式表示的电信号最为方便；对计算机控制系统来说，也就是将待测物理量通过传感器转换成电压或电流信号，送到控制计算机的输入接口，再由计算机进行分析处理，因此，机电控制系统中的传感器一般将被测信号转换为电信号。传感器的种类繁多，按被测对象可分为位移传感器、位置传感器、速度传感器、力传感器、转矩传感器等。

3. 执行装置

机电控制系统的执行装置亦可称为执行元件，将来自控制部分的电信号转换为机械能，

以驱动机械部分进行运动，相当于人类的手足。该元件是处于机电控制系统中的能量转换元件，能在控制装置的指令下，将输入的各种形式的能量转换为机械能。根据使用能量的不同，可以将执行装置分为电气式、液压式和气压式 3 大类。

(1) 电气式执行装置

电气式执行装置是将电能变成电磁力，并用该电磁力驱动运行机构运动。常用的电气式执行装置件包括控制用电动机（步进电动机、直流和交流伺服电动机）、静电电动机、磁致伸缩器件、压电元件、超声波电动机以及电磁铁等。对控制用电动机的性能除了要求稳速运转性能之外，还要求具有良好的加速、减速性能和伺服性能等动态性能以及频繁使用时的适应性和便于维修性能。

(2) 液压式执行装置

液压式执行装置是先将电能变换为液压能并用电磁阀改变压力油的流向，从而使液压执行元件驱动运行机构运动。液压执行机构的功率 - 重量比和扭矩 - 惯量比大，加速性好，结构紧凑、尺寸大，在同样输出功率下，液压驱动装置具有重量轻、惯量小、快速性好等优点。但液压系统也有它固有的一些缺点，如液压系统易受环境温度变化的影响，对整个油路的防止污染及维护等性能都要求较高；另外液压能源的获得、贮存和输送也不如电能方便。因此，在中小规模的机电系统中更多地使用电动驱动装置。

(3) 气动式执行装置

气动式执行装置与液压式执行装置的原理相同，只是将介质由油改为气体而已。气动控制系统由于工作介质是空气，来源方便，不需回气管道，不污染环境。因此在近些年得到大量的应用，气动式执行装置的主要特点是动作迅速、反应快、维护简单、成本低，同时由于空气黏度很小，压力损失小，节能高效，适用于远距离输送。工作环境适应性好，特别在易燃、易爆、多尘、强振、辐射等恶劣环境中工作安全可靠。但气动式执行装置由于空气可压缩性较大，负载变化时系统的动作稳定性较差，也不易获得较大的输出力或力矩，同时需对气源中杂质和水分进行处理，排气时噪声较大。

由于现代控制技术，电子、计算机技术与液压、气动技术的结合，使液压、气动控制也在不断发展，并大大地提高了它的综合技术指标。液压式、气动式和电气式执行装置一样，由于各自的特点，在不同的行业和技术领域得到了广泛应用。

4. 机械部分

机械部分相当于人类的骨骼，是能够实现某种运动的机构。对于绝大多数的机电系统及机电产品来说，机械部分在质量、体积等方面都占有绝大部分，因此机械部分是机电系统的基本支撑，它主要包括机械传动、机身、框架、连接等。

1.1.3 基本控制方式

机电控制系统的控制过程如图 1-2 所示，其基本任务为使被控对象的控制量等于目标值。在控制过程中，观察的任务由系统的传感装置来完成，比较分析的任务由系统的控制部分来完成，执行则由各类执行装置来完成。从图 1-2 可知，控制信号来自 3 条通道，即给定值、干扰量、被控量。

1. 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，信号由给定值至被控量是单向传递的，这种控制方式称为开环控制，其特点是系统的输出量

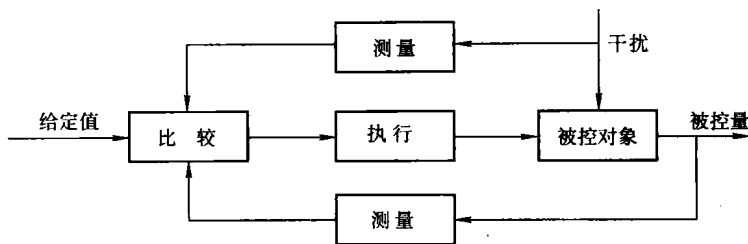


图 1-2 控制过程框图

不会对系统的控制作用产生影响，如图 1-3 所示。

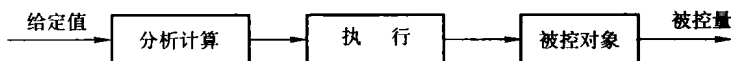


图 1-3 开环控制系统

在开环控制系统中，无须将输出量与参考输入量进行比较，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。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，常采用此类控制方式，如自动洗衣机，洗衣的浸湿、洗涤、甩干和漂清过程都是按照一种时基顺序进行，洗衣机不必对输出信号，即衣服的清洁程度进行测量。需要指出，沿时基运行的控制系统一般均是开环系统，如按时基信号运行的交通灯系统。

因此，这种开环控制方式的特点是控制较简单、没有纠偏能力、控制精度难以保证、抗扰动性较差，因为无论系统是受到外部干扰或工作过程中特性参数发生变化，都会直接波及被控量，使被控量不等于给定值，而系统无法自动修正偏差。

2. 闭环控制方式

按偏差调节的闭环控制方式，是应用最为广泛的一种控制系统，如图 1-4 所示。在反馈控制系统中，反馈回来的信号与给定值相减，即根据偏差进行控制，只要被控量偏离给定值，系统就会自行纠偏，不断修正被控量的偏差，故称这种控制方式为按偏差调节的闭环控制。

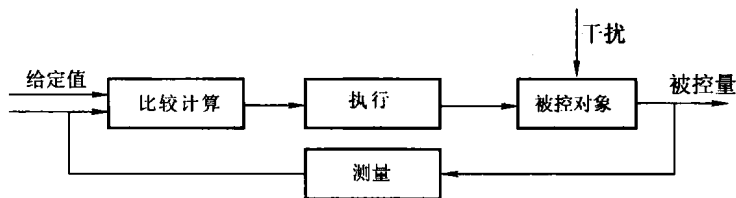


图 1-4 闭环控制系统

负反馈控制方式的控制精度较高，因为无论是干扰的作用，还是系统结构参数的变化，只要被控量偏离给定值，系统就会自行纠偏。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。但这种系统元件多、线路复杂，如果参数匹配得不好，会造成被控量有较大的摆动，甚至系统无法正常工作。尽管如此，闭环控制是机电控制系统中一种重要的并被广泛应用的基本控制方式。

应当指出，系统输出功率的大小在某种程度上确定了控制系统的成本、重量和体积，闭环控制系统采用元件数量较多，因此闭环控制系统的成本和功率通常比较高，为了减少系统

所需的功率,在可能的情况下,可以采用开环控制,或将开环控制和闭环控制适当结合起来,通常较经济,也即复合控制。

1.1.4 机电控制系统的性能要求和评价指标

1. 性能要求

机电控制系统的控制任务要求被控量跟随给定值的变化而变化,希望被控量在任何时刻都等于给定值。然而,由于实际系统中总是包含具有惯性或储能元件,同时由于能源功率的限制,使控制系统在受到外作用时,其被控量不可能立即变化,而有一个跟踪过程。通常把系统受到外作用后,被控量随时间变化的全过程,称为动态过程或称过渡过程。控制系统的性能,我们可以用动态过程的特性来衡量,即从稳定性、快速性和准确性三个方面来评价。

(1) 稳定性

稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。稳定性是就系统动态过程的振荡倾向和系统重新恢复平衡工作能力而言。

在外加信号的作用下,任何系统都会偏离原来的平衡状态,产生初始偏差。系统在受到外作用后,若控制装置能操纵被控对象,使其被控量随时间的增长而最终与希望值一致,则称系统是稳定的。如果被控量随时间的增长,越来越偏离给定值,则称系统是不稳定的。图 1-5a 所示为一发散振荡系统,被控参数随时间逐渐增大,偏离给定值越来越远;图 b 则为一等幅振荡系统,系统处于临界稳定状态,在实际系统中也是不允许的;图 c、d 是控制系统常见的两种过渡状态,系统趋于一稳定值,故系统是稳定的。

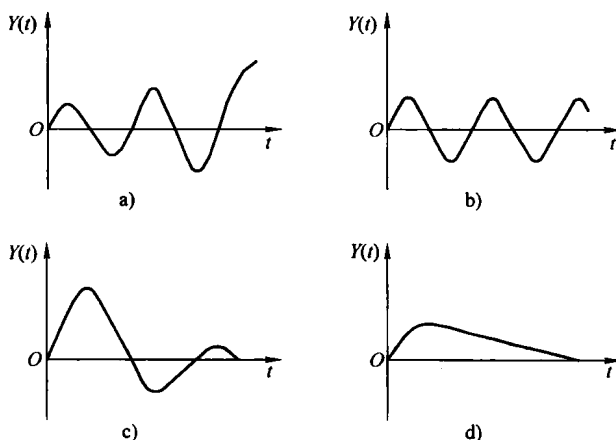


图 1-5 控制系统动态过程曲线图

a) 发散振荡 b) 等幅振荡 c) 衰减振荡 d) 非周期振荡

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。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。

(2) 快速性

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。

快速性是对稳定系统过渡时间的长短而言,即动态过程进行的时间长短。过渡过程时间越短,说明系统快速性越好,过渡过程时间持续越长,说明系统响应迟钝,难以实现快速变化的指令信号。稳和快反映了系统在控制过程中的性能。系统在跟踪过程中,被控量偏离给定值越小,偏离的时间越短,说明系统的动态精度越高。

(3) 准确性

准确性是指系统在动态过程结束后,其被控量(或反馈量)对给定值的偏差而言,这

一偏差称为稳态误差，它是衡量系统稳态精度的指标，反映了动态过程后期的性能。一般控制系统要求被控量与其期望值的偏差是很小的。

同一机电控制系统中，稳定性、快速性、准确性常常是相互矛盾、相互制约的，如提高了系统的快速性，可能会引起系统强烈的振荡；又如改善了系统的稳定性，则控制过程又可能变得迟缓，精度也可能降低。因此，不能片面要求机电控制系统某一方面的性能，而是应该根据被控对象的具体情况不同，对稳、快、准的要求有所侧重，进行综合考虑。

2. 机电控制系统的评价指标

经典控制理论中多用动态时域指标来衡量系统性能的优劣。选择性能指标时，既要考虑到能对系统的性能做出正确的评价，又要考虑到数字上容易处理以及工程上便于实现。

根据对机电系统稳定性、快速性、准确性的要求，相应地用静态指标、动态指标衡量一个系统的优劣。

(1) 静态指标

静态指标是衡量控制系统精度的指标，用静态误差（也称静差）来表征，静态误差是表示输出量 $y(t)$ 的稳态值 y_∞ 与要求值 y_0 的差值，定义为

$$e_{ss} = y_0 - y_\infty \quad (1-1)$$

e_{ss} 表示控制精度，因此希望 e_{ss} 越小越好。静态误差 e_{ss} 与控制系统本身的特性有关，也与系统的输入信号的形式有关。

(2) 动态指标

动态指标能够比较直观地反映控制系统的过渡过程特性，动态指标包括超调量 σ_p ，调节时间 t_s ，峰值时间 t_p ，衰减比 η 和振荡次数 N 。系统的过渡过程特性如图 1-6 所示。

1) 超调量 σ_p ： σ_p 表示了系统过冲的程度，设输出量 $y(t)$ 的最大值为 y_m ， $y(t)$ 输出量的稳态值为 y_∞ ，则超调量定义为

$$\sigma_p = \frac{|y_m| - |y_\infty|}{|y_\infty|} \times 100\% \quad (1-2)$$

超调量通常以百分数表示，不同的机电系统对 σ_p 有不同的要求，一般机械加工系统中， σ_p 值应限制在 10% ~ 15% 左右。 σ_p 值越大，系统过渡过程越不平稳，往往不能满足生产要求； σ_p 值越小，说明系统过渡过程越平稳，但也说明过渡过程较缓慢。

2) 调节时间 t_s ：调节时间 t_s 是指从系统受到输入量作用开始到系统的输出进入偏离稳定值的 $\pm(2 \sim 5)\%$ 区域所需要的时间。它反映了过渡过程时间的长短， t_s 越短，系统快速性越好。

3) 峰值时间 t_p ：峰值时间 t_p 表示过渡过程到达第一个峰值所需要的时间，它反映了系统对输入信号反应的快速性。

4) 衰减比 η ：衰减比 η 表示了过渡过程衰减快慢的程度，它定义为过渡过程第一个峰值 B_1 与第二个峰值 B_2 的比值，即

$$\eta = B_1/B_2 \quad (1-3)$$

通常，希望衰减比 η 为 4:1 左右。

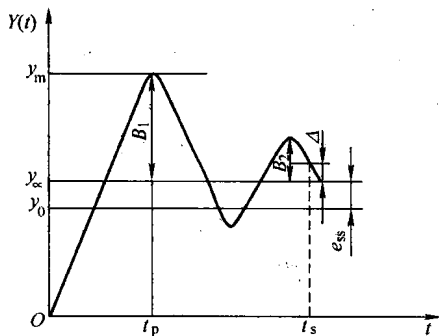


图 1-6 过渡过程特性

5) 振荡次数 N : 振荡次数 N 是指系统在调节时间内, 输出量在稳定值上下摆动的次数。振荡次数 N 反映了控制系统的阻尼特性, N 越小, 系统的稳定性越好。

1.2 机电控制系统的建模和仿真

分析和设计任何一个控制系统, 首要任务是建立系统的数学模型。在实际工程中, 不管是机械的、电气的、液压的、气动的系统, 还是经济学的、生物学的系统等, 它们虽然具有不同的物理特性, 但是都具有最基本的、相当确切的相似性, 即它们的动态行为都可以用微分方程来描述, 不同的物理系统可以具有同一形式的数学模型。

1.2.1 建模

1. 数学模型

机电系统的控制过程是一个动态的过渡过程, 即当系统的输入量发生变化时, 由于系统的能量只能作连续变化, 从而使系统呈现出从初始状态向新的稳定状态过渡的过程。由于在过渡过程中, 系统中的各变量要随时间而变化, 因而在描述系统动态特性的数学模型中不仅会出现各变量本身, 而且也包含这些变量的各阶导数。

因此, 描述系统的输入、输出变量以及系统内部各个变量之间关系的数学表达式, 即微分方程式, 称为系统的数学模型。

2. 简化性和精确性

实际系统往往是很复杂的, 都具有不同程度的非线性、时变甚至还带有分布参数因素, 很难准确地用数学表达式描写各个变量的关系。在工程上为了寻求一种行之有效的方法, 必须对问题进行简化, 忽略一些次要因素, 使其避免数学处理上的困难, 又不影响分析系统的准确性。既不能过分强调准确性而使系统过于复杂, 也不能片面追求简化性而使分析结果与实际出入过大。一个合理的数学模型的建立过程中, 应该在模型的准确性和简化性之间做出折中。

当忽略了非线性因素, 并认为参数是集中、定常时, 描述系统的动态数学模型为线性、定常微分方程。而对应的系统为线性定常系统, 它的特点之一是可以应用叠加原理。

若考虑了非线性因素, 则数学模型为非线性微分方程, 对应的系统为非线性系统。若参数是非定常的, 则对应的系统是时变系统。因此, 求解这些方程是非常困难的, 有时甚至是不可能的。

3. 建模

建立数学模型的方法有解析法和实验法, 所谓解析法即依据系统及元件各变量之间所遵循的物理、化学定律列写出变量间的数学表达式, 并经实验验证。而实验法则是对系统或元件输入一定形式的信号 (阶跃信号、单位脉冲信号和正弦信号等), 根据系统或元件的输出响应, 经过数据处理而辨识出系统的数学模型。前种方法适用于简单、典型、通用常见的系统, 而后者适用于复杂、非常见的系统。实际上常常是把这两种方法结合起来建立数学模型更为有效。目前还有其他建模方法在使用, 如基于能量守恒原理的 Bond Graph 法, 这种方法是为多学科系统建模而发展起来的。

要建立一个控制系统的微分方程, 首先要了解整个系统的组成、工作原理, 然后根据支配各组成元件的物理定律, 列写出整个系统输出变量与输入变量之间关系的动态关系式, 即