

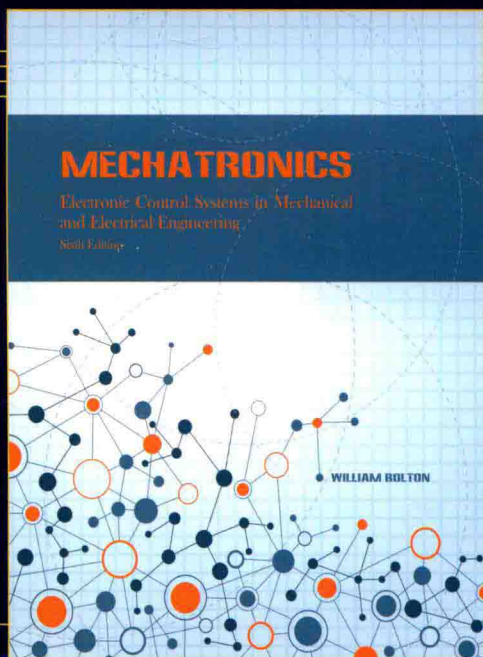
机械电子学

机械和电气工程中的电子控制系统

(原书第6版)

[美] 威廉·博尔顿 (William Bolton) 著
付庄 等译

Mechatronics
Electronic Control Systems in
Mechanical and Electrical Engineering
Sixth Edition



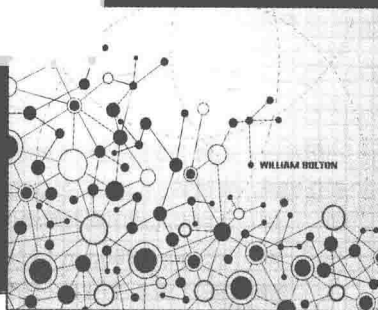
机械电子学

机械和电气工程中的电子控制系统

(原书第6版)

[英] 威廉·博尔顿 (William Bolton) 著
付庄 等译

Mechatronics
Electronic Control Systems in
Mechanical and Electrical Engineering
Sixth Edition



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

机械电子学: 机械和电气工程中的电子控制系统 (原书第 6 版)/(英) 威廉·博尔顿 (William Bolton) 著; 付庄等译. —北京: 机械工业出版社, 2018.5

(国外工业控制与智能制造丛书)

书名原文: *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering, Sixth Edition*

ISBN 978-7-111-59955-5

I. 机… II. ①威… ②付… III. 机电一体化 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 102262 号

本书版权登记号: 图字 01-2017-6464

Authorized translation from the English language edition, entitled *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*, Sixth Edition, ISBN 9781292076683 by William Bolton. Copyright © Pearson Education Limited 2015 (print and electronic).

This Translation of *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering* is published by arrangement with Pearson Education Limited.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from **Pearson Education Limited**.

Chinese simplified language edition published by China Machine Press. Copyright © 2018.

本书中文简体字版由 Pearson Education Limited (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

这是一本为工科学生写的教科书, 可以作为机械电子学领域的综合性教材。本书详尽地论述了传感器与信号调理、数字信号、数字逻辑、数据显示系统、气动和液压驱动系统、机械驱动系统、电气驱动系统、微处理器、汇编语言、C 语言、输入/输出系统、PLC、通信系统、故障检测、系统模型、系统的动态响应、系统传递函数、频率响应、闭环控制系统、人工智能、机电系统设计案例等方面的相关知识。

本书内容丰富, 实用性强, 不仅可作为高等院校机械、电气、控制工程等专业本科生和研究生的教材, 也可作为广大工程技术人员的参考书。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 张锡鹏

责任校对: 殷虹

印刷: 北京市兆成印刷有限责任公司

版次: 2018 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 32.5

书号: ISBN 978-7-111-59955-5

定价: 129.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

出版者的话

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出Alan V. Oppenheim、Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气工程技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科、自动化、人工智能等建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息类、控制类、智能制造类等相关教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzsj@hzbook.com

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译者序

本书是 William Bolton 先生编写的机械电子学国际通用教材，内容涵盖传感器与信号调理、数字信号、数字逻辑、数据显示系统、气动和液压驱动系统、机械驱动系统、电气驱动系统、微处理器、汇编语言、C 语言、输入/输出系统、PLC、通信系统、故障检测、系统模型、系统的动态响应、系统传递函数、频率响应、闭环控制系统、人工智能、机电系统设计案例等，是一本多学科交叉融合的综合教材。该教材理论讲解深入浅出，体系结构完整，机械电子结合充分，习题丰富，一直被国外各大学采用，获得了非常好的评价。

通过翻译引进该教材，可借鉴国外机械电子教学的先进经验，有利于推动国内大学机械电子课程教学与国外大学的接轨，进而推动我国本科生和研究生课程的国际化建设。

本书不仅可以作为高等院校的机械、电气、控制工程等工科专业本科生和研究生的教材，还可作为广大工程技术人员的参考书。

本书第 3~5、9~12、14、16~19、21、23、24 章和索引由付庄翻译，第 1 章由付庄、管恩广翻译，第 2 章由付庄、蔡雄风翻译，第 6 章由宋阳翻译，第 7 章由郑望望翻译，第 8 章由邓文昊翻译，第 13 章由钱欢翻译，第 15 章由翟嘉心翻译，第 20 章由汤智诚翻译，第 22 章由刘基昊翻译。附录 A 由周航飞翻译，附录 B、C 由杨淞翻译，附录 D、F 由刘文红翻译，附录 E 由薛美风翻译，附录 G 由魏振红翻译。

第 2、4、7、10、11、13、20 章和附录由付庄初校，第 3 章由魏振红初校，第 5 章由盛致愉初校，第 6 章由邓文昊初校，第 9 章由俞港初校，第 17 章由周航飞初校，第 1、16、18、21、23 章由管恩广初校，第 8、19 章由詹世涛初校，第 22 章由曹峰初校，第 12 章由李爽初校，第 24 章由郑望望初校。付庄进行了全书的总审校，编写了原书的勘误表，并修正了书中的错误和疏漏之处。本书的翻译还得到了上海交通大学“机电一体化系统设计”研究生公共基础课建设项目的支持和许多老师、同学的帮助，并参考了相关的资料，在此对这些资料的作者以及相关的老师和同学表示衷心的感谢。

由于译者水平有限，本书错译漏译等不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

译者

2018 年 2 月

前 言

机械电子学（或称机电一体化，mechatronics）一词最早由日本工程师于1969年提出。机械电子学是将机械结构学和电子学结合而成的一门新学科。到了今天，这个词有了更为广泛的含义，一般可以认为它是一种新的解决工程技术问题的思想。这种思想具体表现为在产品的设计制造和加工过程中，对机械工程、电子技术及计算机智能控制的有效并行集成。通过应用这种思想，很多原本由机械结构实现具体功能的产品都可以由包含微控制器的产品替代。而这种可替代性将使生产过程更具灵活性，重复设计和重复编程更为简单，进而可以让系统具有自动化数据收集及报告的能力。

机械电子学理论要求工程技术人员在解决工程问题时要有运用多学科、综合方法的能力。因此，工程技术人员不能仅限于掌握一个领域的技术知识，还需要有能力运用多学科知识并将它们联系起来。这就需要更多的特殊技巧。本书在介绍机械电子学的基本背景之外，还给出了上文所提到的特殊技巧的关联方法。

为了满足国家高等教育对技术人员的毕业认证要求，本书的第1版囊括了英国商业与技术委员会（BTEC）关于机械电子学的单元。同时本书的编写还包含介绍了许多机械电子学方面的特殊要求，如应用机械电子学方法解决问题时，需要注意的设计、生产和维护方面的问题。本书在英国及美国被广泛应用于本科生和研究生教学。结合英国和美国用书教师的反馈信息，本书第2版对内容进行了扩充和加深，使得本书不但对原有的读者具有参考意义，而且更适合作为本科生教材使用。本书第3版简化了其中的部分解释内容，对微控制器及其编程给出了更详细的讨论，增加了对机电一体化系统模型的介绍，并且就关键内容在附录中给出了索引。第4版对本书的内容及文字表达形式进行了全面的调整，包括重组了部分章节；将更多材料添加到附录中，以避免扰乱行文的流畅性；引入了诸如人工智能等新内容；给出了更多的实例分析；简化了不必要的章节。同时，在每一章添加了学习目的及关键点目录。第5版基本保持了原有的结构，只是通过与本书采用者的交流，对书中的一些内容进行了相应的增删。

由于一些教师感觉各章的排序不符合一般的教学顺序，第6版进行了重组。因此，新版本把系统模型部分移到微处理器系统之后。其他变化包括添加了关于Arduino的资料，还在第24章中添加了更多的题材。

本书的主要目的是帮助技术人员和在校生成全面地理解机械电子学内容。本书可以在以下几方面帮助读者：

- 掌握理解和设计机电一体化系统所必需的机械工程、电子学和计算机科学方面的知识技巧。
- 掌握机械电子学中多学科知识的交叉应用。
- 学习设计机电一体化系统。

本书的每一章都包含：本章目的、本章小结、详尽的实例说明及习题。习题的答案可以在本书的结尾部分找到。第24章中的系统研究和设计作业的提示也在本书的结尾给出。

本书的结构为：

- 第1章是关于机械电子学的通识介绍。
- 第2~6章主要介绍传感器方面的知识及信号调理。
- 第7~9章介绍驱动系统。
- 第10~16章介绍微处理器/微控制器系统。
- 第17~23章介绍系统模型方面的内容。
- 第24章总结设计机电一体化系统时需要注意的问题。

授课者的教师指南、测验材料和 Powerpoint 幻灯片可从如下网站下载：www.pearsoned.co.uk/bolton[⊖]。

感谢书中涉及仪器的生产制造商提供的出版方面的支持。还要感谢那些仔细阅读了第5版并提出了改进建议的审稿人。

William Bolton

⊖ 关于本书教辅资料，只有使用本书作为教材的教师才可以申请，需要的教师请联系机械工业出版社华章公司，电话：13601156823，邮箱：wanguang@hzbook.com。——编辑注

目 录

出版者的话
译者序
前言

第一部分 概述

第1章 机械电子学导论	1
1.1 什么是机械电子学	1
1.1.1 机电一体化系统实例	1
1.1.2 嵌入式系统	2
1.2 设计流程	2
1.2.1 传统的机械电子学设计	3
1.3 系统	4
1.3.1 系统建模	4
1.3.2 连接系统	5
1.4 测量系统	5
1.5 控制系统	6
1.5.1 反馈	6
1.5.2 开环与闭环系统	7
1.5.3 闭环系统的基本要素	8
1.5.4 模拟和数字控制系统	11
1.5.5 顺序控制器	14
1.6 可编程逻辑控制器	15
1.7 机电一体化系统的例子	16
1.7.1 数码相机与自动对焦	16
1.7.2 发动机管理系统	17
1.7.3 MEMS 和汽车安全气囊	18
本章小结	18
习题	19

第二部分 传感器与信号调理

第2章 传感器和变送器	21
2.1 传感器和变送器简介	21
2.1.1 智能传感器	21

2.2 性能术语	22
2.2.1 静态和动态特性	24
2.3 位移、位置和接近	25
2.3.1 电位器传感器	25
2.3.2 应变片	26
2.3.3 电容元件	27
2.3.4 差动变压器	29
2.3.5 涡流式接近传感器	30
2.3.6 电感式接近开关	30
2.3.7 光学编码器	30
2.3.8 气动传感器	32
2.3.9 接近开关	32
2.3.10 霍尔效应传感器	33
2.4 速度和运动	34
2.4.1 增量式编码器	34
2.4.2 测速发电机	34
2.4.3 热释电传感器	35
2.5 力	36
2.5.1 应变式称重传感器	36
2.6 流体压力	36
2.6.1 压电传感器	38
2.6.2 触觉传感器	39
2.7 液体流动	39
2.7.1 孔板	39
2.7.2 涡轮流量计	40
2.8 液位	40
2.8.1 浮块	40
2.8.2 压差	40
2.9 温度	40
2.9.1 双金属片	41
2.9.2 电阻温度检测器	41
2.9.3 热敏电阻	41
2.9.4 热敏二极管和晶体管	42
2.9.5 热电偶	42
2.10 光敏传感器	44

2.11 传感器的选择	45	4.4.2 时分多路复用	78
2.12 通过开关输入数据	45	4.5 数据采集	78
2.12.1 消抖	46	4.5.1 数据精度	79
2.12.2 键盘	47	4.5.2 错误检测的奇偶校验方法	79
本章小结	47	4.6 数字信号处理	80
习题	47	本章小结	81
第3章 信号调理	50	习题	81
3.1 信号调理简介	50	第5章 数字逻辑	82
3.1.1 信号调理流程	50	5.1 数字逻辑简介	82
3.2 运算放大器	51	5.2 逻辑门	82
3.2.1 反相放大器	51	5.2.1 AND 门	82
3.2.2 同相放大器	52	5.2.2 OR 门	83
3.2.3 加法放大器	52	5.2.3 NOT 门	84
3.2.4 积分和微分放大器	53	5.2.4 NAND 门	84
3.2.5 差分放大器	54	5.2.5 NOR 门	85
3.2.6 对数放大器	56	5.2.6 XOR 门	85
3.2.7 比较器	57	5.2.7 逻辑门的组合	86
3.2.8 实际放大器	58	5.2.8 逻辑系列与集成电路	87
3.3 保护	59	5.3 逻辑门的应用	88
3.4 滤波	60	5.3.1 校验位发生器	88
3.5 惠斯通电桥	61	5.3.2 数字比较器	88
3.5.1 温度补偿	62	5.3.3 编码器	89
3.5.2 热电偶补偿	64	5.3.4 译码器	89
3.6 脉冲调制	64	5.4 时序逻辑	93
3.7 与信号相关的问题	65	5.4.1 触发器	93
3.7.1 接地	65	5.4.2 同步系统	94
3.7.2 电磁干扰	66	5.4.3 JK 触发器	95
3.8 功率输送	67	5.4.4 D 触发器	96
本章小结	67	5.4.5 寄存器	97
习题	68	5.4.6 555 定时器	97
第4章 数字信号	69	本章小结	98
4.1 数字信号简介	69	习题	98
4.1.1 二进制数	69	第6章 数据显示系统	100
4.2 模拟信号和数字信号	69	6.1 显示方式	100
4.2.1 采样定理	71	6.1.1 负载效应	100
4.2.2 数模转换	71	6.2 数据显示元件	101
4.3 数模转换器和模数转换器	71	6.2.1 模拟仪表和数字仪表	101
4.3.1 DAC	71	6.2.2 模拟图记录仪	101
4.3.2 ADC	73	6.2.3 阴极射线示波器	101
4.3.3 采样和保持放大器	76	6.2.4 视觉显示单元	102
4.4 多路复用器	77	6.2.5 打印机	103
4.4.1 数字多路复用器	77	6.3 磁记录	104

6.3.1 磁记录码	105	习题	137
6.3.2 磁盘	107	第8章 机械驱动系统	139
6.4 光学记录	107	8.1 机械系统	139
6.5 显示器	108	8.2 运动类型	139
6.5.1 发光二极管	109	8.2.1 自由度和约束	140
6.5.2 液晶显示器	110	8.2.2 负载	141
6.6 数据采集系统	111	8.3 运动链	141
6.6.1 计算机与插件板	111	8.3.1 四杆链	141
6.6.2 数据记录器	113	8.3.2 滑块曲柄机构	142
6.7 测量系统	114	8.4 凸轮	143
6.7.1 用于检测提起重量的称重 传感器	114	8.5 齿轮	145
6.7.2 温度警报系统	115	8.5.1 齿轮系	146
6.7.3 滑轮的角位置	115	8.5.2 转动和平动的转换	147
6.7.4 温度测量的二进制输出	116	8.6 棘轮和棘爪	147
6.8 测试和校准	116	8.7 带传动和链传动	147
6.8.1 校准	117	8.7.1 带的类型	148
本章小结	118	8.7.2 链传动	149
习题	118	8.8 轴承	149
		8.8.1 径向滑动轴承	149
		8.8.2 球轴承和滚柱轴承	150
		8.8.3 轴承的选择	151
		本章小结	151
		习题	151
		第9章 电气驱动系统	153
		9.1 电气系统	153
		9.2 机械开关	153
		9.2.1 继电器	153
		9.3 固态开关	154
		9.3.1 二极管	155
		9.3.2 晶闸管和两端双向可控硅元件	155
		9.3.3 双极型晶体管	157
		9.3.4 MOSFET	159
		9.4 螺线管	159
		9.5 直流电动机	160
		9.5.1 有刷直流电动机	161
		9.5.2 含励磁线圈的有刷直流电动机	162
		9.5.3 有刷直流电动机的控制	163
		9.5.4 无刷永磁直流电动机	165
		9.6 交流电动机	167
		9.7 步进电动机	168
		9.7.1 步进电动机技术参数	169
		9.7.2 步进电动机控制	170
第三部分 驱动			
第7章 气动与液压驱动系统	121		
7.1 驱动系统	121		
7.2 气动与液压系统	121		
7.2.1 液压系统	121		
7.2.2 气动系统	123		
7.2.3 阀	124		
7.3 方向控制阀	124		
7.3.1 阀的符号	125		
7.3.2 先导阀	126		
7.3.3 单向阀	127		
7.4 压力控制阀	127		
7.5 缸体	128		
7.5.1 缸的顺序控制	130		
7.6 伺服和比例控制阀	132		
7.7 过程控制阀	132		
7.7.1 阀体和阀芯	133		
7.7.2 控制阀的尺寸计算	135		
7.7.3 流体控制系统举例	135		
7.8 旋转驱动器	136		
本章小结	136		

9.7.3 步进电动机的选择	172	11.5.1 步进电动机的控制延时	218
9.8 电动机选择	173	11.6 嵌入式系统	220
9.8.1 惯量匹配	173	11.6.1 嵌入式程序	220
9.8.2 转矩要求	174	本章小结	222
9.8.3 功率要求	175	习题	223
本章小结	175	第12章 C语言	224
习题	176	12.1 为什么选择C语言	224
第四部分 微处理器系统			
第10章 微处理器和微控制器	177	12.2 程序结构	224
10.1 控制	177	12.2.1 主要特征	224
10.2 微处理器系统	177	12.2.2 一个C程序的示例	228
10.2.1 总线	177	12.3 分支和循环	228
10.2.2 微处理器	179	12.4 数组	231
10.2.3 存储器	181	12.5 指针	232
10.2.4 输入/输出	183	12.5.1 指针的算术运算	232
10.2.5 系统示例	184	12.5.2 指针和数组	233
10.3 微控制器	186	12.6 程序开发	233
10.3.1 摩托罗拉 M68HC11	187	12.6.1 头文件	233
10.3.2 Intel 8051	191	12.7 程序的示例	234
10.3.3 Microchip 微控制器	193	12.7.1 电动机的起动与停止	234
10.3.4 Atmel AVR 微控制器和 Arduino	198	12.7.2 读ADC通道	234
10.3.5 选择微控制器	200	12.8 Arduino 编程	235
10.4 应用	200	本章小结	238
10.4.1 温度测量系统	201	习题	238
10.4.2 家用洗衣机	201	第13章 输入/输出系统	240
10.5 编程	202	13.1 接口	240
10.5.1 伪代码	202	13.2 输入/输出寻址	240
本章小结	203	13.2.1 输入/输出寄存器	241
习题	204	13.3 接口要求	242
第11章 汇编语言	205	13.3.1 缓冲器	243
11.1 语言	205	13.3.2 握手	243
11.2 指令集	205	13.3.3 轮询和中断	244
11.2.1 寻址	208	13.3.4 串行接口	247
11.2.2 数据移动	209	13.4 外设接口适配器	247
11.3 汇编语言程序	210	13.4.1 PIA 初始化	249
11.3.1 汇编语言程序的范例	211	13.4.2 通过PIA连接中断信号	250
11.4 子程序	215	13.4.3 与PIA接口的例子	251
11.4.1 延时子程序	215	13.5 串行通信接口	251
11.5 查找表	217	13.5.1 微处理器的串行接口	253
		13.6 接口的示例	254
		13.6.1 通过译码器控制七段数码管	254
		13.6.2 模拟接口	256
		本章小结	257

习题	257	15.4 协议	282
第14章 可编程逻辑控制器	258	15.5 开放系统互连通信模型	283
14.1 简介	258	15.5.1 网络标准	284
14.2 PLC基本结构	258	15.6 串行通信接口	285
14.2.1 输入/输出	258	15.6.1 RS-232	285
14.2.2 输入程序	260	15.6.2 20mA 电流环	287
14.2.3 PLC的形式	260	15.6.3 I ² C总线	287
14.3 输入/输出处理	261	15.6.4 CAN总线	288
14.3.1 持续更新	261	15.6.5 USB	289
14.3.2 大规模输入/输出复制	261	15.6.6 相线	290
14.3.3 输入/输出地址	261	15.7 并行通信接口	290
14.4 梯形图编程	261	15.7.1 其他总线	292
14.4.1 逻辑函数	263	15.8 无线协议	293
14.5 指令列表	264	本章小结	293
14.5.1 指令列表和逻辑函数	265	习题	294
14.5.2 指令列表和分支程序	265	第16章 故障检测	295
14.6 自锁和内部继电器	266	16.1 故障检测技术	295
14.6.1 内部继电器	266	16.2 看门狗定时器	296
14.7 顺序控制	268	16.3 奇偶校验与误码检测	296
14.8 定时器与计数器	269	16.4 常见的硬件故障	298
14.8.1 定时器	269	16.4.1 传感器	298
14.8.2 计数器	270	16.4.2 开关和继电器	298
14.9 移位寄存器	271	16.4.3 电动机	298
14.10 主控指令和跳转指令控制	272	16.4.4 液压和气动系统	298
14.10.1 跳转	273	16.5 微处理器系统	298
14.11 数据处理	273	16.5.1 故障检测技术	299
14.11.1 数据移动	274	16.5.2 系统故障定位方法	301
14.11.2 数据比较	274	16.5.3 自测试系统	301
14.11.3 算术运算	274	16.6 仿真和模拟	301
14.11.4 代码转换	275	16.6.1 模拟	302
14.12 模拟输入/输出	275	16.7 PLC系统	302
本章小结	276	16.7.1 程序测试	302
习题	276	16.7.2 输入/输出测试	303
第15章 通信系统	279	16.7.3 PLC作为系统的监视器	303
15.1 数字通信	279	本章小结	304
15.2 集中式、分层式与分布式 控制	279	习题	305
15.2.1 并行与串行数据传输	280		
15.2.2 串行数据通信方式	280		
15.3 网络	281		
15.3.1 网络访问控制	282		
15.3.2 宽带与基带	282		
		第五部分 系统模型	
		第17章 基本系统模型	307
		17.1 数学模型	307
		17.2 机械系统模块	308

17.2.1 转动系统	309	第 20 章 系统传递函数	352
17.2.2 构建一个机械系统	310	20.1 传递函数	352
17.3 电气系统模块	313	20.1.1 拉普拉斯变换	353
17.3.1 构建电气系统模型	314	20.2 一阶系统	354
17.3.2 电气和机械系统的比较	316	20.2.1 具有阶跃输入的一阶系统	354
17.4 流体系统模块	316	20.2.2 一阶系统的例子	354
17.4.1 构建流体系统模型	319	20.3 二阶系统	356
17.5 热力系统模块	322	20.3.1 具有阶跃输入的二阶系统	356
17.5.1 构建热系统模型	323	20.3.2 二阶系统的例子	357
本章小结	324	20.4 串联的系统	357
习题	324	20.4.1 串联系统的例子	357
第 18 章 工程系统模型	327	20.5 带反馈环的系统	358
18.1 工程系统	327	20.5.1 负反馈系统的例子	358
18.2 转动-平动系统	327	20.6 极点位置对瞬态响应的影响	359
18.3 机电一体化系统	328	20.6.1 s 平面	360
18.3.1 电位器	328	20.6.2 校正	360
18.3.2 直流电动机	328	本章小结	361
18.4 线性度	330	习题	361
18.5 液压机械系统	332	第 21 章 频率响应	363
本章小结	334	21.1 正弦输入	363
习题	334	21.1.1 系统对正弦输入响应	363
第 19 章 系统的动态响应	335	21.2 相量	363
19.1 动态系统建模	335	21.2.1 相量方程	364
19.1.1 微分方程	335	21.3 频率响应	365
19.2 术语	335	21.3.1 一阶系统的频率响应	365
19.2.1 自然响应与受迫响应	335	21.3.2 二阶系统的频率响应	367
19.2.2 瞬态与稳态响应	336	21.4 伯德图	367
19.2.3 输入的形式	336	21.4.1 $G(s) = K$ 的伯德图	367
19.3 一阶系统	337	21.4.2 $G(s) = 1/s$ 的伯德图	368
19.3.1 自然响应	337	21.4.3 一阶系统的伯德图	368
19.3.2 受迫输入响应	338	21.4.4 二阶系统的伯德图	369
19.3.3 一阶系统的例子	339	21.4.5 建立伯德图	369
19.3.4 时间常量	340	21.4.6 系统辨识	372
19.4 二阶系统	341	21.5 性能指标	374
19.4.1 自然响应	342	21.6 稳定性	374
19.4.2 有受迫输入时的响应	344	本章小结	375
19.4.3 二阶系统的例子	345	习题	375
19.5 二阶系统的性能指标	346	第 22 章 闭环控制系统	377
19.6 系统辨识	348	22.1 连续与离散控制过程	377
本章小结	348	22.1.1 开环与闭环控制系统	377
习题	349	22.2 术语	378

22.2.1 滞后	378	23.4 学习	397
22.2.2 稳态误差	378	本章小结	398
22.2.3 控制模式	379	习题	398
22.3 两步控制模式	380		
22.4 比例模式	381	第六部分 总结	
22.4.1 电子比例控制器	381	第 24 章 机电一体化系统	399
22.4.2 系统响应	382	24.1 机电设计	399
22.5 微分控制	382	24.1.1 定时开关	399
22.5.1 比例微分 (PD) 控制	383	24.1.2 刮水器运动	402
22.6 积分控制	383	24.1.3 浴室秤	405
22.6.1 比例积分 (PI) 控制	384	24.2 案例研究	408
22.7 PID 控制器	385	24.2.1 取放机器人	408
22.7.1 运算放大器 PID 电路	385	24.2.2 停车栏杆系统	411
22.8 数字控制器	386	24.2.3 数码相机	412
22.8.1 控制模式的实现	386	24.2.4 汽车控制系统	415
22.8.2 采样速率	387	24.2.5 条形码阅读器	418
22.8.3 计算机控制系统	387	24.2.6 硬盘驱动器	419
22.9 控制系统性能	387	24.3 机器人学	420
22.10 控制器校正	388	24.3.1 机器人学的三大法则	421
22.10.1 阶跃响应法	388	24.3.2 机器人组件	421
22.10.2 临界比例度法	389	24.3.3 机器人应用	422
22.11 速度控制	389	24.3.4 Arduino 机器人	423
22.12 自适应控制	390	本章小结	423
22.12.1 变增益控制	391	习题	423
22.12.2 自校正	391		
22.12.3 模型参考自适应系统	392	第七部分 附录	
本章小结	392	附录 A 拉普拉斯变换	425
习题	392	附录 B 数字系统	432
第 23 章 人工智能	394	附录 C 布尔代数	437
23.1 什么是人工智能	394	附录 D 指令集	445
23.1.1 自我调控	394	附录 E C 库函数	449
23.2 感知和识别	394	附录 F MATLAB 和 SIMULINK	452
23.2.1 识别	394	附录 G 电路分析	457
23.2.2 神经网络	395	进一步的参考信息	464
23.3 推理	395	习题参考答案	468
23.3.1 推理机理	395	索引	482
23.3.2 基于规则的推理	396		

第一部分 概 述

第 1 章 机械电子学导论

本章目的

通过本章的学习，读者将能够：

- 解释什么是机械电子学，以及领会它与工程设计的关系。
- 解释什么是系统，以及区分测量系统组成部分的意义。
- 描述开环系统和闭环系统中的各种表达形式及组成部分。
- 分析系统模型的需求，预测系统行为。

1.1 什么是机械电子学

机械电子学（或称机电一体化，mechatronics）一词最早由日本工程师于 1969 年提出。机械电子学是将机械结构学和电子学结合而成的一门新学科。到了今天这个词有了更为广泛的含义，一般可以认为它是一种新的解决工程技术问题的思想。这种思想具体表现为在产品的设计制造和加工过程中，将机械工程、电子技术及计算机智能控制有效并行集成。通过应用这种思想，很多原本由机械结构实现具体功能的产品都可以由包含微控制器的产品替代。而这种可替代性将使得生产过程具有更好的灵活性，重复设计和重复编程更为简单，进而可以让系统具有自动数据收集和报告的能力。

机电一体化系统并不是简单地将电子系统和机械系统结合而得到的。而且机电一体化系统比简单的控制系统复杂很多。机电一体化系统在设计过程中遵循统一的设计方法。这种方法将机械、电子和控制系统完整地集成在一起。这种集成化的、多学科交叉的方法被广泛应用于各种工程设计领域，诸如汽车设计、机器人制造、机械工具加工、清洗设备设计、摄像设备设计等。如果需要设计更加廉价、更加可靠、灵活性更高的系统，那么设计在初始阶段就需要对机械工程、电气工程、电子学、控制方面的内容进行集成。在处理多学科交叉集成问题时，机械电子学使用统筹方法，而不是将各个部分分开按照顺序的方式来设计，例如，先设计机械系统再设计电气部分及微处理器部分。因此，机械电子学是一种集成化的工程设计方法，具有独特的设计理念。

机械电子学将多个技术领域融合在一起。如图 1-1 所示，这些领域包括传感器、测量系统、驱动和执行系统、微处理器系统，以及与这些系统相关的控制及行为分析。这一点就是对本书内容本质上的一个概括。本章是机械电子学的引论，同时介绍一些基本概念，并给出其他章节的组织框架。具体的技术内容细节将在后面的章节逐一介绍。

1.1.1 机电一体化系统实例

我们以现代的自动对焦、自动曝光照相机为例。在使用这种照相机的时候，你需要做的只是将它对准要拍摄的物体，然后按下按钮，就可以完成照相了。照相机本身可以自动调节焦距使被照物体位于焦距上，还可以自动调节光圈和快门速度以取得正确的曝光。使用者不需要手

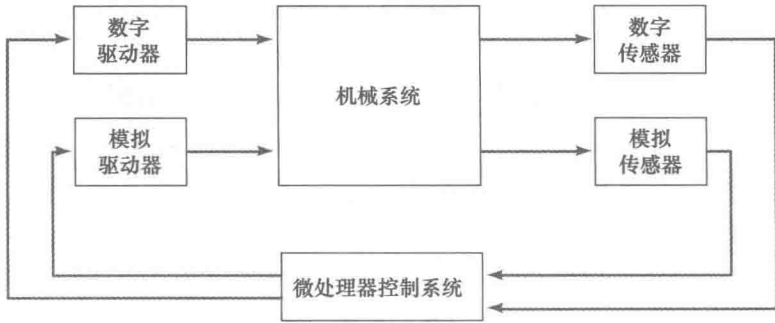


图 1-1 机电一体化系统的基本要素

动调节焦距、光圈和快门速度。再以卡车上使用的智能悬挂系统为例。这种悬挂系统可以在搭载不均匀负载的时候保持车身平衡；可以在转弯、路况较差的情况下，保证驾驶平稳。再以自动化生产线为例。这样的一条生产线可以包含很多的生产过程。这些生产过程按照正确的顺序自动执行，同时这些过程的每一个输出状态都会自动输出到需要的地方。可以说，自动照相机、卡车的悬挂系统和自动化生产线都是机械工程、电气工程及控制系统相互结合的完美实例。

1.1.2 嵌入式系统

嵌入式系统是通过将微处理器嵌入到设计中而形成的系统。在机械电子学领域，我们广泛地关注这种系统。微处理器在本质上可以被认为是逻辑门和存储单元的集合。但是，这些逻辑门和存储单元并不是分别作为个体由导线相互连接。微控制器主要通过软件的编写来实现不同的逻辑功能。作为一个逻辑门表示意义的说明，我们可能需要在输入 A 和输入 B 都有信号的时候得到一个输出信号。这可以通过一个“与”逻辑门来实现。而一个“或”逻辑门则可以保证只要输入 A 和输入 B 有一个通道上有信号，就可以输出一个信号。因此，微处理器的主要功能是观察输入通道的开关状态，依据内部的程序处理观察到的结果，并控制输出通道的开关。关于微处理器的更多细节将在第 10 章介绍。

对于应用于控制系统的微处理器，它需要额外的芯片来提供存储数据的空间及与外界交换信号的接口。**微控制器**就是一种将微处理器功能及上述额外芯片功能集成在一起的微处理器。

嵌入式系统是基于微处理器的系统。这种系统具备一系列的功能，但是这些功能不能像计算机一样可以由最终的使用者通过编程来改变。因此，在使用嵌入式系统的时候，使用者无法通过增加或者替换软件的方式来改变系统的功能。

4

举一个在控制系统中使用微控制器的例子。例如，在现代洗衣机中安装了微控制器控制系统，于是这台洗衣机就可以自动控制洗涤循环、给排水、电动机和水温。在现代汽车工业中，微控制系统主要用来控制防抱死系统及发动机管理系统。除此之外，还有很多其他应用嵌入式系统的例子，包括自动对焦、自动曝光照相机、便携式摄像机、手机、DVD 播放器、电子读卡器、复印机、打印机、扫描仪、电视机和空调。

1.2 设计流程

任何系统的设计流程都可以分为以下几个阶段。

1. 需求

设计过程的开始就是分析消费者或者客户的需求。一般情况下，我们通过对潜在客户的市场调查来预测需求。

2. 问题分析

设计的第一个阶段是找出问题的本质，也就是分析问题。这是一个十分重要的阶段。因为如果问题没有准确地定义，那么设计将变得非常耗时而且得出的设计通常难以满足需求。

3. 创建规格说明文档

在对问题进行分析后就可以开始准备规格说明文档了。准备工作包括陈述问题、介绍选择解决方法时要考虑的约束条件以及判定设计质量的标准。在陈述问题的时候，所有在设计中需要实现的功能及系统特性都要准确地描述出来。因此，规格说明文档一般包含质量、尺寸、所需动作的类型及范围、精度、输入/输出部分的要求、接口、电源要求、工作环境、相关标准及测试代码等。

4. 形成可能的解决方案

这一阶段通常称为概念性设计阶段。为了得到问题解决方法的大体轮廓，我们分析系统必须具备的功能并尽量多地给出实现这些功能所必需的细节条件，诸如近似尺寸、形状、材料和花费。同时，我们也要找出之前类似问题的解决方法。什么事情都从零做起是不必要的。

5. 选择合适的解决方案

我们评估所有可能的解决方案，并选出最优的解决方案。评估通常是指对系统进行重新建模，然后通过仿真预测系统对输入的响应。

6. 完成细节设计

在这一阶段，将完成所有选定方案的细节设计。为了实现设计细节方面的最优，有时候需要生产一些原型机或者实物模型。

7. 工程绘图

在设计选定后，具体的设计就要以工程图、电气连接图等方式表现出来。这样就完成了一个设计流程。

设计过程的各个阶段并不是简单地按照先后顺序一个一个执行。设计者经常需要回到前面的阶段进行更深入的思考。当我们处在形成可能的解决方案的阶段时，就经常需要回到之前的问题分析阶段进行重新思考。

1.2.1 传统的机械电子学设计

工程设计是一个复杂的过程，需要交叉使用多种技巧及多学科的知识。在传统的设计过程中，机械部分由机械工程师设计，控制系统由控制系统工程师设计。这称为顺序设计方式。然而，机械电子学的基本方法是在设计过程中将机械工程、电子学、计算机技术及控制工程这些学科以统筹的方法整合在一起考虑。机械电子学方法的内在统筹性主要依靠系统建模、模型系统对输入响应的仿真和真实系统对真实输入的响应结果分析。

为了说明如何将多学科的方法应用于问题的解决方案设计，我们以磅秤的设计作为一个分析实例。设计磅秤一般只需要考虑如下几个过程：弹簧的压缩形变，一种可以将这种形变转化为轴的转动的机械结构，轴带动指针在刻度盘上的移动。还有一个需要考虑的问题是，磅秤的测量结果不能因被测试者站在磅秤的不同位置而发生改变。但是，如果我们以超出纯粹的机械设计领域的角度来看这个问题，那么我们还可以考虑其他的一些可能性。比如，我们可以用应力测试仪替换原有的弹簧，还可以通过使用微处理器将测试仪输出的重量读数显示在LED电子屏幕上。这样设计出来的磅秤在结构上更为简单，减少了运动部件的使用。原有由机械结构实现的复杂功能都转为由软件来实现。

下面再举一个更复杂的实例。传统的家用中央加热系统的温控设计使用的是一种闭环双金属温度控制系统。由于双金属条的弯曲度会随着温度的变化而发生改变，所以可以用于控制加