



国外电子信息经典教材

THOMSON

Industrial Control Electronics
Devices, Systems, and Applications

Second Edition

工业控制电子学

——设备、系统与应用

(第2版)

(美) Terry Bartelt 著
姜绍龙 富晓静 张剑 译



清华大学出版社

国外电子信息经典教材

工业控制电子学

——设备、系统与应用

(第2版)

(美) Terry Bartelt 著
姜绍龙 富晓静 张剑 译

清华大学出版社

北 京

Terry Bartelt

Industrial Control Electronics: Devices, Systems, and Applications

EISBN: 0-7668-1974-4

Copyright © 2002 by Delmar, a division of Thomson Learning.

Original language published by Thomson Learning (a division of Thomson Learning Asia Pte Ltd).

All Rights reserved.

本书原版由汤姆森学习出版集团出版。版权所有，盗印必究。

Tsinghua University Press is authorized by Thomson Learning to publish and distribute exclusively this Simplified Chinese edition. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本中文简体字翻译版由汤姆森学习出版集团授权清华大学出版社独家出版发行。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾地区)销售。未经授权的本书出口将被视为违反版权法的行为。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

981-265-378-3

北京市版权局著作权合同登记号 图字 01-2003-2242 号

版权所有，翻印必究。举报电话：010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术，用户可通过在图案表面涂抹清水，图案消失，水干后图案复现；或将表面膜揭下，放在白纸上用彩笔涂抹，图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

工业控制电子学——设备、系统与应用(第2版)/(美)巴泰尔特(Bartelt, T.)著；姜绍龙，富晓静，张剑译。
—北京：清华大学出版社，2005.4

书名原文：Industrial Control Electronics: Devices, Systems, and Applications

(国外电子信息经典教材)

ISBN 7-302-09149-8

I. 工… II. ①巴… ②姜… ③富… ④张… III. 工业电子学-高等学校-教材 IV. TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第076743号

出版者：清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机：010-62770175

组稿编辑：曹康

封面设计：康博

印刷者：北京市通州大中印刷厂

发行者：新华书店总店北京发行所

开本：185×260 印张：42 字数：1075千字

版次：2005年4月第2版 2005年4月第1次印刷

书号：ISBN 7-302-09149-8/TM·51

印数：1~4000

定价：79.80元

地址：北京清华大学学研大厦

邮编：100084

客户服务：010-62776969

文稿编辑：侯彧

版式设计：康博

装订者：三河市新茂装订有限公司

出版说明

电子信息产业是一项新兴的高科技产业，有“朝阳产业”之称，有着巨大的潜力和广阔的发展前景。近年来，我国电子信息产业的飞速发展，大大推动了对电子信息类人才的需求，迫切需要我国的高等院校能够培养出大批符合企业要求的电子信息类人才。

教育与教材的关系始终是密不可分的，教材的合适与否会直接影响到培养人才的质量好坏。虽然目前我国高校中现行的电子信息类教材曾经对我国电子信息类人才的培养做出了非常重要的贡献，但是确实普遍存着一些问题，如“课程系统老化”、“内容落伍”、“惯性大，更新速度慢”、“针对性差”、“缺乏原创精品”等等，教学内容和课程体系的改革已经成为目前教学改革过程中的当务之急。

基于这种背景，我们决定在国内引进并推出一套“国外电子信息经典教材”，通过系统地研究和借鉴国外一流大学的相关教材，为我国高校的课程改革和国际化教学进程提供参考和推动作用。

为了组织该套教材的出版，我们在国内聘请了一批资深的专家和教授，共同成立了教材编审委员会。由编委会结合目前国内高校电子信息类专业的课程体系和教学内容，从 McGraw-Hill Education、Thomson Learning、John Wiley & Sons 和 Springer 等一批国际著名的教育出版集团，精选出一套“国外电子信息经典教材”。列选的每本教材都经过了国内相应领域的资深专家推荐和审读，对于一些基础类的专业课程，我们列选了多种不同体系、不同风格和不同层次的教材，以供不同要求和不同学时的同类课程使用。为了确保该套教材的质量，我们聘请了高校相应专业的资深教师和相应领域的专家担纲译者，加强了该套教材各个出版环节的编审力量和质量控制。另外，为了丰富国内的教学资源，我们在引进教材的同时也积极引进了教材配套的教学资源。

该套教材的读者对象为电子信息与电气工程类专业的本科生，同时兼顾相关工程学科各专业的本科生或研究生。该套教材既可作为相应课程的教材或教学参考书，也适于相应技术领域的工程师和技术人员参考或自学。

尽管我们作了种种努力，但该套教材书目选择的恰当性，内容的合理性，都还有待于通过教学实践来检验。首先感谢选用该套教材的广大教生对我们的支持，同时期待广大读者积极为该套教材提出意见或建议。

前 言

本书读者对象

本书旨在用作基于电子学的工业技术教材，适合两到四年学制的技术类专业使用，涉及专业包括电子技术、电子工程技术、仪表技术、工业维护、电机技术以及自动制造系统，同时本书还适合四年制大学技术教程。

本书全面介绍了工业自动化系统的组成、电路、仪表以及控制技术，重点在于实际的运用，对其数学设计原理及概念并不深究。教程的内容分为若干部分，分别针对几个不同的专业，如电动机、调速器、可编程逻辑控制器、伺服机构、传感器、各种检测仪表及过程控制类。为了更好地理解本书的内容，希望读者预先对直流/交流基本原理、固态器件和数字电路等方面的知识有所掌握。

内容的安排

本书主要是根据工业控制系统的结构图按其逻辑顺序来组织的，同时还详细介绍了每一部分的功能。

第 1 篇：工业控制综述

第 1 章：工业控制系统概述——介绍了运动控制和过程控制中常用的开、闭环系统的基本概念。

第 2 章：接口设备——文中讲述了固态器件和集成电路的操作。

第 2 篇：控制器

第 3 章：控制器的操作——讲述了一个闭环系统中控制模块的各种控制方式，包括开关控制、比例控制、积分控制、微分控制(PID)以及模糊逻辑操作等。

第 3 篇：电动机

第 4 章：直流电动机——介绍了直流电动机的基本原理，还介绍了串联、并联及复合电机等。

第 5 章：交流电动机——阐述了交流电动机的基本原理，还介绍了各种单相和三相电机的操作。

第 6 章：伺服电动机——讲述了运动控制操作中的几种电机的操作。

第 4 篇：调速驱动装置

第 7 章：直流调速器——对直流调速器的内部电路和控制参数进行阐述和说明。

第 8 章：交流调速器——讲述了交流调速器的转换器、中间部件及变频电路，包括控制参数和调整。

第 5 篇：过程控制及仪表

第 9 章：压强系统——阐述了压强的科学原理，以及压强测量仪器的用法和操作。

第 10 章：温度控制——阐述了温度的科学原理，以及温度测量仪器的用法和操作。

第 11 章：流量控制——阐述了流量的科学原理，以及流量测量仪器的用法和操作。

第 12 章：物位控制系统——阐述物位的科学原理，以及测量仪器的用法和操作。

第 13 章：分析仪表——介绍了一些溶液的化学性质，如 pH 值、导电率、可燃性、湿度以及对它们进行测量的仪器。

第 14 章：工业过程技术与仪表——提供了生产过程的信息以及用于对过程变量(如压强、温度、液位和流量等)进行监控、控制和操作的仪器设备。

第 15 章：过程控制方法——介绍了多种控制技术，如开关控制、PID 控制、前馈控制、比例控制、串级控制以及自适应控制等。

第 6 篇：检测传感器

第 16 章：工业检测传感器及接口技术——介绍了接近传感器和光传感器的使用操作，它们在运动控制和过程控制应用中通常用来检测某种对象的存在。

第 7 篇：可编程控制器

第 17 章：可编程控制器概述——介绍了梯形逻辑电路中的控制组件和线路构造，包括可编程逻辑控制器的硬件和配置。

第 18 章：PLC 的基本设计原理——阐明了在基础 PLC 应用中的基本原理和用法，这种应用包括校验开关、定时器、计数器、闭锁装置、数据处理等指令，以及算术运算功能。

第 19 章：高级编程，PLC 接口连接和故障检修——讲述了如顺序、跳转、子程序等高级编程技术。还介绍了如何将现场设备连接到 I/O 模块，也包括如何对 PLC 系统及它们连接的设备进行故障检修。

第 8 篇：运动控制

第 20 章：运动控制反馈装置——阐述了在运动控制应用中用来控制速度和位移的传感器。

第 21 章：运动控制单元——详细介绍了运动控制应用中用到的多种仪器和设备。

第 22 章：伺服装置的基本原理——介绍了各种伺服电路的操作及被控参数。

第 23 章：功能性工业系统——阐述了在第 22 章里提到的装置、电路和仪器在实际中的应用。

本书特点

- 系统地介绍了工业控制系统。内容是从工业控制系统的结构框图开始，扩展到每个结构部分的详细功能。书中讨论了闭环网络的组成元素，并对每个元素的功能进行了讲解。
- 对过程控制和各种仪表进行了全面广泛的介绍，也介绍了伺服器系统。有助于读者对工业控制的整体概念有一个更好的理解。
- 深入地介绍了接近型和光型传感器、传感器接口连接以及传感器故障诊断与修复程序。
- 通过对普通可编程逻辑控制器的介绍，介绍了 PLC 的编程和应用，其中以 Allen-Bradley SLC 500 型控制器作为例子。

- 不深究数学原理，对工业控制技术做了很多介绍，例如开关控制、PID 控制、比例控制、串级控制、前馈控制、自适应控制以及模糊逻辑控制。
- 各种应用实例贯穿全书，使读者可以对所学的知识有更直观的理解。本书的最后一章专门给出了功能性工业系统的应用实例。

本版新增加的内容

- 扩展了直流调速器、交流调速器和可编程逻辑控制器等方面的内容。
- 增加了有关传感器、传感器接口连接以及故障诊断和修复方面的新内容。
- 新增了三章的内容，分别是检测仪表与过程控制、过程控制方法和分析控制。
- 在介绍可编程控制器的章节中改用 Allen-Bradley SLC 500 型产品作为实例来说明该章的主题。

目 录

第 1 篇 工业控制综述

第 1 章 工业控制系统概述	3
1.1 工业控制分类	4
1.1.1 运动控制和过程控制	4
1.1.2 开环、闭环系统	6
1.2 开环、闭环系统的组成	8
1.3 反馈控制	9
1.4 反馈的实际应用	11
1.5 闭环系统的动态响应	12
1.6 前馈控制	12
1.7 习题	14
第 2 章 接口设备	16
2.1 放大器	16
2.1.1 晶体管	17
2.1.2 运算放大器	20
2.2 信号处理器	23
2.2.1 积分运算放大器	24
2.2.2 微分运算放大器	25
2.2.3 波形施密特触发器	26
2.3 比较器	27
2.3.1 运放比较器	27
2.3.2 差分运算放大器	28
2.3.3 数字数值比较器	30
2.4 半导体控制器件	31
2.4.1 晶体管开关	32
2.4.2 半导体闸流管	33
2.5 光电连接设备	39
2.5.1 光敏二极管	39
2.5.2 光敏晶体管	40

2.5.3	光敏 SCR	40
2.5.4	光敏双向晶闸管	41
2.5.5	光电插件	41
2.6	数/模转换器	42
2.7	模/数转换器	45
2.8	定时器	49
2.8.1	555 非稳态多谐振荡器	50
2.8.2	555 单稳态多谐振荡器	52
2.9	习题	54

第 2 篇 控 制 器

第 3 章	控制器的操作	59
3.1	控制模式	59
3.2	开关控制	60
3.3	比例控制	63
3.3.1	控制器放大	65
3.3.2	静态误差	66
3.4	比例-积分控制	69
3.5	比例积分微分控制	71
3.6	模糊控制概论	75
3.7	模糊集合	75
3.8	隶属函数	76
3.9	模糊逻辑的应用	77
3.10	模糊逻辑微控制器	84
3.11	小结	85
3.12	习题	85

第 3 篇 电 动 机

第 4 章	直流电动机	89
4.1	运行原理	89
4.2	旋转运动	91
4.3	实用直流电动机	94
4.4	磁场控制	94
4.5	反电动势	94

4.6	电枢反应	95
4.7	电动机的选择	96
4.7.1	调速	96
4.7.2	转矩	97
4.7.3	功	99
4.7.4	马力	99
4.7.5	电机的功率消耗	100
4.7.6	电机效率	100
4.8	相互影响	101
4.9	电动机的基本构造	102
4.10	电动机的分类	103
4.10.1	并励式电动机	103
4.10.2	串励式电动机	106
4.10.3	复励式电动机	107
4.10.4	双向直流电动机	109
4.11	线圈端识别	109
4.12	习题	109
第 5 章	交流电动机	112
5.1	基本原理	112
5.1.1	交流磁场	113
5.1.2	旋转磁场	114
5.2	结构与操作	115
5.2.1	定子结构	115
5.2.2	转子结构	117
5.2.3	操作原理	119
5.3	单相感应电机	121
5.4	电阻启动感应电动机	122
5.5	电容启动感应电动机	123
5.6	罩极式电动机	125
5.7	自检修分相型交流电动机	127
5.8	通用式电动机(交直流两用电机)	127
5.9	三相电动机	128
5.10	感应电动机	128
5.11	绕线转子式电动机	130
5.11.1	启动	131
5.11.2	速度控制	131
5.12	同步电机	132

5.12.1	启动同步电机	133
5.12.2	实现同步速度	133
5.12.3	功率因数校正	135
5.13	习题	136
第 6 章	伺服电动机	138
6.1	直流伺服电动机	138
6.2	绕线电枢永磁式电动机	139
6.3	动圈式电机	139
6.4	无刷式直流电动机	141
6.5	步进电机	143
6.6	永磁式步进电机	144
6.7	可变磁阻式步进电机	145
6.7.1	步进电机相关术语	147
6.7.2	微步进	147
6.8	交流伺服电动机	148
6.9	习题	149

第 4 篇 调速驱动装置

第 7 章	直流调速器	153
7.1	直流调速器的基本原理	153
7.2	可变电电压直流调速器	155
7.2.1	电机速度控制	156
7.2.2	速度调节	157
7.2.3	IR 补偿	158
7.2.4	电流限制	159
7.2.5	高速/低速调节	159
7.2.6	加速/减速调节	160
7.2.7	参数调节的方法	160
7.2.8	励磁电流速度控制	161
7.2.9	负载特性	161
7.3	电机制动	163
7.3.1	动态制动	164
7.3.2	再生制动	165
7.4	习题	166

第 8 章 交流调速器	168
8.1 交流调速器的基本原理	169
8.2 交流调速系统	170
8.3 可调电压变频器	171
8.3.1 组成部分	171
8.3.2 变频器的操作	175
8.3.3 控制电路的操作	177
8.3.4 基极驱动器	178
8.3.5 电压/频率比	179
8.4 脉宽调制驱动	184
8.5 磁束向量驱动	188
8.6 由交流调速器驱动的电机	192
8.7 控制面板的输入及驱动功能	193
8.7.1 输入项	194
8.7.2 驱动功能	195
8.8 变频器的自保护功能	196
8.9 电机制动	197
8.10 习题	198

第 5 篇 过程控制及仪表

第 9 章 压强系统	203
9.1 压强定律	204
9.2 液体的特性	204
9.2.1 高度	204
9.2.2 重量	204
9.2.3 温度	206
9.2.4 大气压强	206
9.2.5 机械设备	207
9.3 气体的特性	207
9.3.1 气体的温度	207
9.3.2 气体容器的体积	207
9.3.3 从容器中抽出气体	208
9.4 压强的度量	208
9.4.1 表压的度量	208
9.4.2 绝对压强的度量	209
9.4.3 差压度量	211

9.4.4	真空度的度量	211
9.5	压强测量仪器	212
9.6	非电子式压强传感器	212
9.6.1	液柱定标	212
9.6.2	机械定标	215
9.7	电子压强传感器	217
9.7.1	半导体应变计	217
9.7.2	横向电压应变计	218
9.7.3	可变电容压强计	218
9.8	压强控制系统	219
9.8.1	液压系统	219
9.8.2	气压系统	220
9.8.3	真空系统	221
9.8.4	静压系统	222
9.8.5	蒸汽系统	222
9.9	习题	223
第 10 章	温度控制	225
10.1	关于温度的基本理论	225
10.2	热控制系统	226
10.3	热传递	226
10.4	热源	227
10.4.1	工业炉	227
10.4.2	冷却系统	228
10.5	温度测量	230
10.6	温度指示装置	230
10.6.1	蜡笔	231
10.6.2	油漆	231
10.6.3	圆球	231
10.6.4	标签	231
10.6.5	液晶指示器	231
10.6.6	充液温度计	232
10.7	电子传感器	233
10.7.1	电热调节器	233
10.7.2	电阻式温度检测器	236
10.7.3	热电偶	237
10.7.4	探头组合件	242
10.7.5	辐射测温法	243

10.8	习题	246
第 11 章	流量控制	248
11.1	系统概念	248
11.2	流量的度量单位	250
11.2.1	体积流量	250
11.2.2	质量流量	250
11.3	固体流的测量	251
11.4	流体流的测量	252
11.4.1	管流法则	252
11.4.2	雷诺数	253
11.4.3	流体流量计的分类	253
11.5	电子传感器	258
11.5.1	科里奥利流量计	258
11.5.2	转子流量探测器	258
11.5.3	电磁流量探测器	259
11.5.4	热式流量计	259
11.5.5	涡流流量计	260
11.5.6	超声波流量计	261
11.5.7	飞行时间流量计	262
11.6	流量计的安装	262
11.7	流量计的选取	263
11.8	习题	263
第 12 章	物位控制系统	265
12.1	一个物位控制系统	266
12.1.1	动力源	266
12.1.2	传送系统	267
12.2	测量方法	267
12.2.1	点物位测量	267
12.2.2	连续物位测量	268
12.3	物位测量方法	268
12.3.1	目测法	268
12.3.2	漂浮和排量法	269
12.4	电子传感器	274
12.4.1	电导探针	274
12.4.2	电容探针	275
12.4.3	超声波传感器	276
12.5	物位传感器的选取	276

12.6	习题	277
第 13 章	分析仪表	279
13.1	pH 值的测量和控制	279
13.1.1	pH 值的测量	282
13.1.2	控制 pH 值	284
13.2	导电率	286
13.2.1	导电率电极探测器	287
13.2.2	导电率电感探测器	288
13.2.3	导电率应用和控制	289
13.3	燃烧分析和控制	290
13.3.1	可燃气体	290
13.3.2	烃类气体	291
13.3.3	控制燃烧	293
13.4	湿度	293
13.4.1	湿度的定量测量	293
13.4.2	绝对湿度传感器	294
13.4.3	相对湿度传感器	295
13.4.4	露点测量	297
13.4.5	湿度控制	299
13.5	采样测量系统	299
13.6	习题	300
第 14 章	工业过程技术与仪表	301
14.1	分批过程	302
14.1.1	控制要求	302
14.1.2	分批过程的种类	303
14.2	连续过程	304
14.3	仪器测量	307
14.4	测量装置(传感器)	308
14.4.1	动态	309
14.4.2	静态	309
14.5	反馈回路接口设备	312
14.5.1	发送器	312
14.5.2	换能器	313
14.6	控制器	316
14.6.1	气动控制器	316
14.6.2	安装式面板控制器	316
14.6.3	个人电脑	317

14.6.4	可编程逻辑控制器	318
14.6.5	离散控制系统(DCS)	318
14.7	监控设备	318
14.7.1	指示器	318
14.7.2	警报器	319
14.7.3	记录器	320
14.8	操作设备(终端控制元件)	320
14.9	仪表符号表示	328
14.9.1	通用仪器符号	328
14.9.2	标签编码	329
14.9.3	线条符号	331
14.9.4	阀门和执行器符号	332
14.9.5	解读一个回路	334
14.9.6	信息模块	335
14.10	习题	336
第 15 章	过程控制方法	338
15.1	开环控制	339
15.2	闭环控制	339
15.3	单变量控制回路	341
15.3.1	仪器的响应时间	341
15.3.2	被控变量的纯延迟	342
15.3.3	死区时间	343
15.4	控制器的选取	344
15.5	开关控制	344
15.6	连续控制	348
15.6.1	比例模式	348
15.6.2	积分模式	353
15.6.3	微分模式	355
15.7	控制器的整定	358
15.7.1	试错整定方法	359
15.7.2	Ziegler-Nichols 整定方法	360
15.7.3	Ziegler-Nichols 连续振荡法	361
15.7.4	Ziegler-Nichols 反应曲线整定法	366
15.7.5	直接合成法	370
15.7.6	控制器自整定	374
15.8	先进控制技术	374
15.8.1	串级控制	374

15.8.2	前馈控制	377
15.8.3	比值控制	379
15.8.4	自适应控制	380
15.9	习题	381

第 6 篇 检测传感器

第 16 章	工业检测传感器及接口技术	389
16.1	限位开关	390
16.2	接近检测器	390
16.3	电感式接近开关	391
16.3.1	电感式接近开关的组件	391
16.3.2	电感式接近开关的操作	393
16.4	电容式接近开关	397
16.5	霍尔效应传感器	401
16.5.1	线性霍尔效应传感器	402
16.5.2	数字式霍尔效应传感器	403
16.5.3	运作模式	404
16.5.4	应用	404
16.6	光电传感器	405
16.6.1	光源	405
16.6.2	光敏元件	406
16.6.3	感应电路	406
16.7	检测方式	408
16.7.1	对置感应方式	408
16.7.2	回射感应方式	409
16.7.3	散射感应法	411
16.7.4	聚焦感应方式	411
16.7.5	镜面感应法	412
16.7.6	色彩标记感应法	412
16.8	光电传感器封装形式	414
16.9	操作说明	416
16.9.1	灵敏度	416
16.9.2	额外增益	417
16.9.3	对比度	418
16.9.4	视角	418
16.9.5	传感器响应	419