



信息技术和电气工程学科国际知名教材 中译本 系列

传感器和信号调节 (第2版)

SENSORS AND SIGNAL CONDITIONING
(Second Edition)

Ramon Pallàs-Areny 著
John G. Webster

张 伦 译
吴常津 校



清华大学出版社

传感器和信号调节 (第2版)

SENSORS AND SIGNAL CONDITIONING
(Second Edition)

Ramon Pallàs-Areny 著
John G. Webster

张 伦 译
吴常津 校

清华大学出版社
北 京

Sensors and Signal Conditioning, Second Edition

Ramon Pallàs-Areny, John G. Webster

Copyright © 2001 by John Wiley & Sons.

Original language published by John Wiley & Sons. All Rights reserved.

Tsinghua University Press is authorized by John Wiley & Sons to publish and distribute exclusively this Simplified Chinese edition. 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.

本书中文简体字翻译版由 John Wiley & Sons 授权清华大学出版社独家出版发行。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。

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

传感器和信号调节:第2版/阿雷尼,韦伯斯特著;张伦译. —北京:清华大学出版社,2003

书名原文: Sensors and Signal Conditioning, Second Edition

(信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列)

ISBN 7-302-07305-8

I. 传… II. ①阿… ②韦… ③张… III. ①传感器 ②信号—调制技术 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 085854 号

出 版 者: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦

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

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 王一玲

文稿编辑: 魏艳春

版式设计: 肖 米

印 刷 者: 北京鑫丰华彩印有限公司

装 订 者: 三河市李旗庄少明装订厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 175×245 印张: 31.25 字数: 606 千字

版 次: 2003 年 12 月第 1 版 2003 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-07305-8/TN·146

印 数: 1~3000

定 价: 49.00 元

《信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列》

出版说明

三年多以前,2000年10月,为了系统地参考和借鉴国外知名相关大学教材,推进我国大学的课程改革和我国大学教学的国际化进程,清华大学出版社策划、出版了《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》,至今已经出版了30多种,深受高等院校信息技术与电气工程及相关学科师生和其他科技人员的欢迎和好评,在学术界和教育界产生了积极的影响。现在这个系列中的大部分教材都已经重印,并曾获得《2001年引进版优秀畅销丛书奖》。在此期间,我们曾收到来自各地高校师生的很多反映,期望我们选择这个系列中的一些较为基础性和较为前沿性的教材译成中译本出版,以为更广大的院校师生和科技人员所选用。正是基于这种背景和考虑,清华大学出版社决定进一步推出《信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列》。

这套国际知名教材中译本系列所选书目的范围,限于信息技术和电气工程学科所属各专业的技术基础课和主要专业课。教材原版本除了选自《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》外,还将精选其他具有较大影响的国外知名的相关领域教材或教学参考书。教材内容适于作为我国普通高等院校相应课程的教材或主要教学参考书。

本国际知名教材中译本系列按分期分批的方式组织出版。为了便于使用这套国际知名教材中译本教材系列的相关师生和科技人员从学科和教学的角度对其在体系和内容上的特点和特色有所了解,在每种中译本教材中都附有我们约请的相关领域资深教授撰写的推荐说明,其中的一些直接取自于《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》中的影印版序。

本国际知名教材中译本系列的读者对象为信息技术和电气工程学科所属各专业的本科生或研究生,同时兼顾其他工程学科专业的本科生或研究生。既可采用作为相应课程的教材,也可作为相应课程的教学参考书。此外,本国际知名教材中译本系列也可提供作为工作于各个技术领域的工程师和技术人员的自学读物。

感谢使用本国际知名教材中译本系列的广大师生和科技人员的支持。期望广大读者提出意见和建议。

郑大钟 教授

清华大学信息科学技术学院

译者序

传感器是信息时代的关键技术之一，它是获取准确可靠信息的重要手段。在现代工业过程控制、自动化生产、基础科学研究、宇宙开发、海洋探测、环境测控、石油化工、生物工程、桥梁建筑等许多方面，传感器已获得越来越广泛的应用。因此，了解和掌握传感器技术，尤其是传感器与高性能信号调节电路结合使用的新技术，便为推动电子技术的迅速发展及其在上述各个领域的高效能应用奠定了良好的基础。

本书系根据美国 John Wiley & Sons 出版公司 2001 年出版的《传感器和信号调节电路》(Sensors and Signal Conditioning, 第 2 版)一书翻译而成。有关本书的内容安排和主要特点已在序言中作了详细说明，故不再赘述。这里仅着重指出，与目前国内已出版的多种同类书籍相比，本书具有以下几个显著特点。

首先，书中不仅对传感器本身，而且将传感器在测量系统中的应用结合在一起进行论述，并对电路设计及满足设计所提出的技术要求的途径作了深入分析。这对于更有效地实际应用传感器无疑很有启发和帮助。

其次，为了使读者系统了解测量系统的基本原理，书中以较大篇幅对所述问题进行了数学分析，同时列举出典型应用实例，因而易于为读者理解和接受。

最后，书中每章都附有相当数量的参考文献，以帮助读者进一步查阅和钻研思考。

与国内近年出版的同类书籍相比，本书题材较为新颖、内容较为丰富，因而也具有较大的启发性。本书对从事传感器研制和电子测量技术工作的科技人员及高等院校相关专业大学生是一本有用的参考书，而且对电子技术其他领域工作的人员也会有所帮助。

承蒙电子科技集团 12 研究所吴常津博士细心校对了本书的译文，赵颖同志对译文的誊清进行了校核，在此译者谨向他们表示衷心感谢。

译者对原书中的一些印刷错误已作了补正。鉴于本书涉及的范围十分广泛，译者水平有限，译文中不妥和错误之处在所难免，切望读者不吝批评指正。

张 伦

2003 年 3 月于北京

前言

在工业过程控制、测量和自动化中，我们已经习惯使用传感器进行温度、压力、流量和液位测量。如今，在数字电子学发展的推动下，传感器已能进入包括对汽车、飞机、医疗产品、办公机器、个人电脑、消费类电子设备、家用电器及污染控制中的多个物理量和化学量进行测量的众多应用场合。

传感器的许多新应用领域并不要求任何苛刻的工作条件，且拥有大量的消费需求。它使得这些应用成为半导体传感器，特别是可以由微机械加工技术大规模生产的传感器（微传感器）的应用方向。汽车工业中加速度传感器和压力传感器的年销售量以及医用设备中血压传感器的年销售量达到数千万个。气体传感器、流量传感器、CMOS图像传感器和生物传感器也得到了相类似的迅速发展。

传统传感器（或宏传感器）并没有被新型微传感器所取代。许多普通传感器在一些专业应用场合仍有需求，因此，在可以预见的将来，它们并不会被取代。尽管如此，在信号调节中常用的一些集成电路的性能已获得改进，并允许用更为简单的电路进行设计。此外，还出现了一些用于普通传感器，如热电偶、电阻式温度检测器（RTD）、电容式传感器和线性可调差接变压器（LVDT）的信号调节专用集成电路。微控制器在低成本、低分辨率模数连接中已成为廉价的资源。再者，数字计算的低成本已将一部分计算和补偿转移到更靠近传感器。与中央控制器交换数据的数字通信手段日益普及，智能传感器正在一些新建的工厂中装配。

本书的第2版沿用了与第1版相同的思路来反映上述新的现实，它所面向的读者群包括电子工程系大学生以及对利用市场可提供的传感器和集成电路来设计测量系统感兴趣的专业人员。我们将

介绍每种传感器的工作原理、优点、局限性、类型、等效电路和相关应用。为了说清楚传感器的类型和材料,新增加了介绍传感器材料的 1.8 节和有关微传感器工艺的 1.9 节。可用于不同场合的微传感器将在相应的章节中论述。传感器是根据以下原则来分类的:(1)它们是否是可变电阻器、电感器、电容器;(2)它们是否产生电压、电荷或电流;或者(3)它们是否是数字传感器、利用半导体结的传感器或利用某种形式的辐射。这种分类方法能简化将有助于把传感器置入任何电子系统的信号调节器的研究。对常用物理量的基本测量方法和初级传感器亦采用较大的篇幅加以介绍。更多的资料可以在 J. G. Webster 所著“The Measurement, Instrumentation and Sensor Handbook (测量、仪表和传感器手册), CRC Press, 1999”一书中查到。

所涉及的一些新型传感器有卓越的磁敏电阻式传感器、电阻式气体传感器、液体电导率传感器、磁致伸缩传感器、超导量子干涉器件(SQUID)、磁通门磁强计、威甘德(Wiegand)传感器和脉冲导线传感器、对位置灵敏的检测器(PSD)、半导体核辐射探测器、CMOS 图像传感器和生物传感器。自第 1 版问世以来,这些传感器中有几种已从研究阶段过渡到商品化阶段。速度传感器、光纤传感器和化学传感器由于其应用较广泛,故通常有更多的报道。

信号调节器所使用的新型集成电路在性能参数上有了很大改善,往往能为电路设计提供新途径。一些新的论题包括单端放大器、电流反馈放大器、组合放大器和集成电路电流积分器的误差分析。在第 2 版中,论述噪声的章节还包括噪声基础知识、互阻抗放大器和电荷放大器的噪声分析,以及电阻器中的噪声和漂移。论述数字传感器和智能传感器的第 8 章增加了论述包含传感器的可变振荡器、微控制器的直接连接、传感器通信和智能传感器的几节而使内容更加充实。

由于对传感器的选择会影响测量系统的灵敏度、精确度和稳定度,所以我们介绍了各种各样的传感器,并在书中以表格形式列出若干市售传感器的实际技术指标。我们还以表格形式汇总了供信号调节用的普通集成电路的若干相关技术指标。新增加的章节涉及测量结果的基本统计分析和可靠性。书中给出了 68 个成功的例子和列在每章结尾总共 103 个习题,许多习题都来自实际设计实践。书中最后给出了习题的注释答案。每章结尾处的参考文献已进行了更新。为了便于查找,实例和插图前分别加注 E 和 P。除非用圆点标明,全书图中的交叉线都不连接。

在研究任何知识领域时,了解一些重要事件的日期是极有意义的。因此,本书列出了在传感器中应用的各项物理定律的发现者和大致发现日期。这也有助于避免给专业人员造成这样的印象,即传感器是继晶体管(1947)、运算放大器(1963)或微处理器(1971)之后出现的。某些传感

器在所有上述发明之前早已存在。电子工程师的任务就在于应用集成电路的全部功能,由传感器提供的信息为认识能力尽管有一定局限性但却拥有无与伦比的智慧和创造能力的人类造就更加经济、可靠和高效的系统。

Ramon Pallàs-Areny

John G. Webster

2000年8月

目 录

译者序	III
前言	V
第 1 章 利用传感器的测量系统简介	1
1.1 一般概念和术语	1
1.1.1 测量系统	1
1.1.2 换能器、传感器和执行器	2
1.1.3 信号调节和显示	3
1.1.4 接口、数据域和变换	4
1.2 传感器的分类	5
1.3 通用输入-输出配置	9
1.3.1 干扰输入和调整输入	9
1.3.2 补偿技术	10
1.4 测量系统的静态特性	11
1.4.1 精确度、精密度和灵敏度	11
1.4.2 其他特性:线性和分辨率	14
1.4.3 系统误差	15
1.4.4 随机误差	16
1.5 动态特性	18
1.5.1 零阶测量系统	19
1.5.2 一阶测量系统	19
1.5.3 二阶测量系统	22
1.6 传感器的其他特性	26

1.6.1 输入特性:阻抗	27
1.6.2 可靠性	28
1.7 初级传感器	30
1.7.1 温度传感器:双金属传感器	31
1.7.2 压力传感器	32
1.7.3 流速和流量传感器	34
1.7.4 液位传感器	41
1.7.5 力和转矩传感器	42
1.7.6 加速度和倾斜传感器	43
1.7.7 速度传感器	44
1.8 传感器使用的材料	45
1.8.1 导体、半导体和电介质	47
1.8.2 磁性材料	50
1.9 微传感器工艺	52
1.9.1 厚膜工艺	52
1.9.2 薄膜工艺	53
1.9.3 微机械加工工艺	54
习题	57
参考文献	59
第2章 电阻式传感器	61
2.1 电位器	61
2.2 应变计	67
2.2.1 基本原理:压阻效应	67
2.2.2 类型和应用	71
2.3 电阻式温度检测器	74
2.4 热敏电阻	79
2.4.1 模型	79
2.4.2 热敏电阻的类型和应用	86
2.4.3 线性化	90
2.5 磁敏电阻	92
2.6 光敏电阻(LDR)	96
2.7 电阻式湿度计	101
2.8 电阻式气体传感器	103
2.9 液体电导率传感器	107

习题	109
参考文献	111
第3章 电阻式传感器的信号调节	113
3.1 电阻的测量	113
3.2 分压器	118
3.2.1 电位器	120
3.2.2 用于热敏电阻	123
3.2.3 动态测量	125
3.2.4 分压器用的放大器	126
3.3 惠斯登电桥:平衡测量	128
3.4 惠斯登电桥:偏转测量	130
3.4.1 灵敏度和线性	130
3.4.2 电阻式传感器电桥的模拟线性化	133
3.4.3 传感器电桥的校准和平衡	134
3.4.4 差值测量、平均值测量和补偿	135
3.4.5 惠斯登电桥的电源	139
3.4.6 惠斯登电桥的检测方法	142
3.5 差动放大器和仪表放大器	143
3.5.1 差动放大器	143
3.5.2 利用两个运算放大器的仪表放大器	148
3.5.3 利用三个运算放大器的仪表放大器	150
3.6 干扰	155
3.6.1 干扰的类型和抑制	155
3.6.2 信号电路接地	158
3.6.3 屏蔽接地	159
3.6.4 隔离放大器	163
习题	165
参考文献	173
第4章 变电抗式传感器和磁电式传感器	174
4.1 电容式传感器	174
4.1.1 可变电容器	174
4.1.2 差动电容器	181
4.2 电感式传感器	184
4.2.1 变磁阻式传感器	184

4.2.2	涡流式传感器	189
4.2.3	线性可调差接变压器(LVDT)	192
4.2.4	可调变压器:自动同步器、分解器和感应同步器	199
4.2.5	磁弹性传感器和磁致伸缩传感器	210
4.2.6	威甘德(Wiegand)传感器和脉冲-合金线传感器	213
4.2.7	饱和磁心(磁通闸门)传感器	215
4.2.8	超导量子干涉器件(SQUID)	216
4.3	磁电式传感器	218
4.3.1	基于法拉第定律的传感器	218
4.3.2	霍耳式传感器	223
	习题	227
	参考文献	229
第5章	变抗式传感器的信号调节	232
5.1	问题和解决方案	232
5.2	交流电桥	236
5.2.1	灵敏度和线性	236
5.2.2	电容性电桥的模拟线性化	239
5.2.3	交流放大器和电源去耦	240
5.2.4	静电屏蔽和有源屏蔽	245
5.2.5	交直流信号变换器	247
5.3	载波放大器和相干检波	251
5.3.1	载波放大器的工作原理和结构	251
5.3.2	相敏检波器	257
5.3.3	在线性可调差接变压器中的应用	261
5.4	供电容式传感器使用的特殊信号调节器	263
5.5	分解器-数字变换器和数字-分解器变换器	266
5.5.1	自动同步器-分解器变换器	266
5.5.2	数字-分解器变换器	269
5.5.3	分解器-数字变换器	270
	习题	271
	参考文献	275
第6章	有源传感器	277
6.1	热电式传感器:热电偶	277

6.1.1	可逆的热电效应	277
6.1.2	常用的热电偶	281
6.1.3	实用的热电偶定律	284
6.1.4	热电偶回路中的冷端补偿	287
6.2	压电式传感器	290
6.2.1	压电效应	290
6.2.2	压电材料	293
6.2.3	应用	294
6.3	热电式传感器	300
6.3.1	热电效应	300
6.3.2	热电材料	302
6.3.3	辐射定律、普朗克定律、维恩定律和斯忒藩-玻尔兹曼定律	302
6.3.4	应用	304
6.4	光电式传感器	306
6.4.1	光电效应	306
6.4.2	材料和应用	307
6.5	电化学传感器	308
	习题	311
	参考文献	314
第7章	有源传感器的信号调节	316
7.1	斩波放大器和低漂移放大器	316
7.1.1	运算放大器中的失调和漂移	316
7.1.2	斩波放大器	322
7.1.3	自动调零放大器	323
7.1.4	组合放大器	325
7.1.5	仪表放大器的失调和漂移	326
7.2	静电计放大器和互阻抗放大器	327
7.2.1	互阻抗放大器	328
7.2.2	通过积分进行电流测量	331
7.2.3	设计静电计电路时的注意事项	332
7.3	电荷放大器	333
7.4	放大器的噪声	338
7.4.1	噪声的基础知识	339
7.4.2	运算放大器的噪声	342

7.4.3	互阻抗放大器的噪声	349
7.4.4	电荷放大器的噪声	350
7.4.5	仪表放大器的噪声	352
7.5	电阻器的噪声和漂移	354
7.5.1	固定电阻器的漂移	354
7.5.2	可调电阻器(电位器)的漂移	356
7.5.3	电阻器的噪声	357
	习题	358
	参考文献	363
第8章	数字式传感器和智能传感器	365
8.1	位置编码器	365
8.1.1	增量位置编码器	365
8.1.2	绝对位置编码器	372
8.2	谐振式传感器	376
8.2.1	基于石英谐振器的传感器	377
8.2.2	表面声波(SAW)传感器	382
8.2.3	振动金属丝应变计	383
8.2.4	振动圆筒传感器	384
8.2.5	数字式流量计	385
8.3	可变振荡器	387
8.3.1	正弦振荡器	388
8.3.2	张弛振荡器	389
8.3.3	可变CMOS振荡器	391
8.3.4	可变振荡器的线性	393
8.4	变换成频率、周期或持续时间	395
8.4.1	电压-频率变换	395
8.4.2	检测量-频率直接变换	397
8.4.3	检测量-持续时间直接变换	400
8.5	传感器-微控制器直接连接	402
8.5.1	频率测量	402
8.5.2	周期和时间间隔测量	404
8.5.3	计算和补偿	407
8.5.4	速度测量——数字式转速计	408
8.6	传感器的通信系统	409

8.6.1 电流遥测术:4mA~20mA 电流环路	411
8.6.2 同时进行模拟和数字通信	412
8.6.3 传感器总线:现场总线	413
8.7 智能传感器	415
习题	417
参考文献	420
第9章 其他检测方法	422
9.1 基于半导体结的传感器	422
9.1.1 基于半导体结的温度计	422
9.1.2 磁敏二极管和磁敏晶体管	428
9.1.3 光电二极管	428
9.1.4 位置灵敏探测器(PSD)	436
9.1.5 光电晶体管	437
9.1.6 半导体结核辐射探测器	438
9.2 基于 MOSFET 的传感器	440
9.3 电荷耦合式传感器和 CMOS 图像传感器	442
9.3.1 工作原理	442
9.3.2 CCD 和 CMOS 图像传感器的类型及应用	446
9.4 光纤传感器	449
9.4.1 光纤的基础知识	449
9.4.2 光纤传感器技术和应用	450
9.5 超声波传感器	454
9.5.1 超声波传感器的基础知识	454
9.5.2 基于超声波的检测方法和应用	456
9.6 生物传感器	458
习题	460
参考文献	463
习题答案	465

第 1 章

利用传感器的测量系统简介

在我们的生活中到处都能遇到测量。工业、商业、医学和科学研究工作均离不开测量。传感器由于能提供具有被测对象所包含信息的电信号而使测量成为可能。电子电路对电信号进行处理,以提取所包含的信息。因此,传感器是测量系统的基础。本章将介绍传感器的基础知识、它们的静态特性和动态特性、用于测量普通物理量的主要传感器以及传感器的材料和工艺。

1.1 一般概念和术语

1.1.1 测量系统

系统是指用来完成一个或多个功能所需两个或多个元件、子系统和部件的组合。测量系统的作用是以客观和实验方式对客体或事件的特性或品质加以定量描述。也就是说,测量结果必须不依赖于观察者(具有客观性)并以实验为依据(通过实验方式获取)。数值大小必须与所描述的特性遵循相同的规律。例如,若某一给定客体具有超过另一个客体的同一特性,则对第一个客体进行测量的数值结果必须超过对第二个客体进行测量的数值结果。

测量的目的之一可以是过程监测,例如,环境温度测量、气体和水体积测量以及临床监测。另一个目的可以是过程控制,例如,研究不规则形状物体内部的温度分布或确定汽车碰撞时仿真模型驾驶员各部位的力分布。由于所需信息及其数量的固有属性,计算机辅助设计(CAD)还无法给出这些实验的完整数据。因此,为了验证计算机模拟的结果是否正确,也需要进行样机测量。

图 1.1 示出一个测量和控制系统的功能和数据流。通常,除由传感器完成信息采集之外,测量还需对有关信息进行处理并显示结果,以使结果能被人的感官所察觉。这些功能中的任何一种可能是本地功能或远地功能,但远地功能需要进行信息传输。现代测量系统实际上不是按照图 1.1 中的数据流来布置,而是按照数