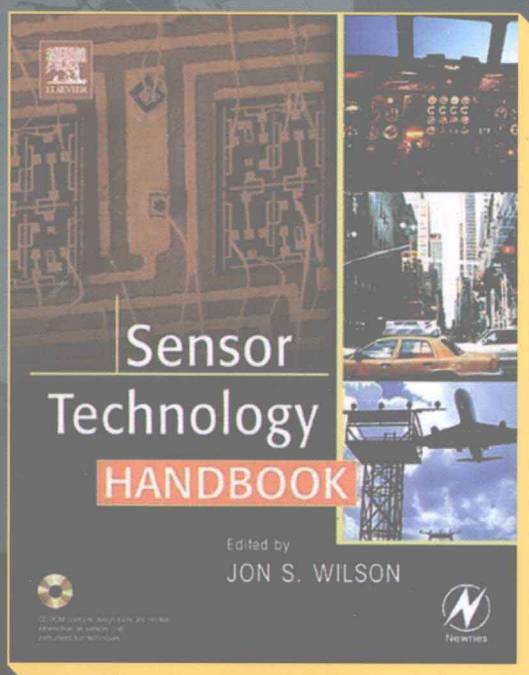


传感器技术手册

Sensor Technology Handbook

[美] Jon S. Wilson 主编
林龙信 邓彬 等译
张鼎 刘齐军



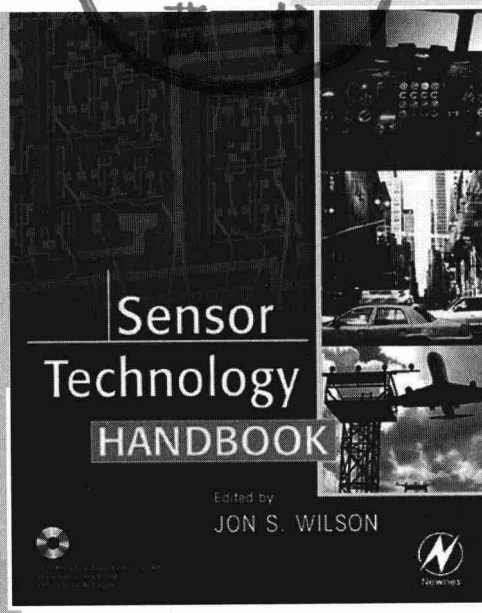
TURING

图灵电子与电气工程丛书

传感器技术手册

Sensor Technology Handbook

[美] Jon S. Wilson 主编
林龙信 邓彬 等译
张鼎 刘齐军



人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

传感器技术手册/(美)威尔逊(Wilson, J. S.)主编;
林龙信等译. —北京:人民邮电出版社, 2009.2

(图灵电子与电气工程丛书)

书名原文: Sensor Technology Handbook

ISBN 978-7-115-19041-3

I. 传… II. ①威… ②林… III. 传感器—技术手册
IV. TP212-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第165560号

内 容 提 要

本书从实用角度出发,全面讲述各类传感器的工作原理和设计应用。本书内容涉及机电工程、物理学、化学和生物学等领域的数十种传感器,对于每一种传感器,重点介绍它的应用方法和接口设计,既有具体的电路实例,又有完整的理论分析,还包括许多珍贵的使用技巧。

本书内容详实,图表丰富,既是广大电子电气设计师案头必备的实践参考手册,也适合大学教师和高年级本科生、研究生阅读。

图灵电子与电气工程丛书

传感器技术手册

-
- ◆ 主 编 [美] Jon S. Wilson
译 林龙信 邓彬 张鼎 刘齐军 等
责任编辑 舒 立
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 32.5
字数: 692千字 2009年2月第1版
印数: 1—3000册 2009年2月北京第1次印刷
著作权合同登记号 图字: 01-2007-3614

ISBN 978-7-115-19041-3/TP

定价: 89.00元

读者服务热线: (010)88593802 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

版 权 声 明

Sensor Technology Handbook by Jon S. Wilson, ISBN: 0-7506-7729-5.

Copyright © 2005 by Elsevier Inc. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-981-259-908-7

Copyright © 2009 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

3 Killiney Road

#08-01 Winsland House I

Singapore 239519

Tel: (65)6349-0200

Fax: (65)6733-1817

First Published 2009

2009年初版

Printed in China by POSTS & TELECOM PRESS under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授权人民邮电出版社出版。本版仅限在中华人民共和国（不包括香港特别行政区和台湾地区）出版及标价销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

译者序

传感器是现代控制系统的重要部件，几乎任何电子设备都少不了它。传感器能将力、温度、位移、加速度、湿度、磁通等各种非电学物理量转换为电信号以便处理，因此种类繁多、层出不穷。特别是近年来数字信号处理技术、微型制造技术的蓬勃发展，促使传感器向着微型化、一体化方向快速革新。本书与时俱进地介绍了传感器方面的最新技术，涵盖了适用于机电工程、物理学、化学和生物学等领域的各类传感器。本书从实际应用出发，深入浅出地介绍了各类传感器的基本原理、接口设计及信号调理等方面的知识，是广大电气工程师的理想参考书。

本书由多位工业界和学术界的专家共同撰写，他们长期从事传感器相关技术的研究工作，具有深厚的理论功底和实践经验，书中介绍的设计方法都经过了多年的实践检验，实用性很强。书中采用的电路实例大多是作者的原创成果，既有完整的理论分析，也包含珍贵的应用技巧，这在其他相关图书中是很难见到的。

尽管本书涉及的内容有些庞杂，但是经过作者的精心组织，很方便阅读。全书共分为两大部分，第一部分包括第1章~第4章，主要介绍传感器原理和应用技术基础。系统地介绍了传感器的指标和使用注意事项，深入探讨了接口电路设计，这些内容是各种传感器应用中都面临的共性问题，也是任何从事电子工程和电路设计领域工作的人们不可或缺的基础知识，需要仔细地阅读、认真地领悟。第二部分由第5章~第22章组成，广泛讨论了各种类型传感器的基本原理及设计方法，内容涉及机械位移测量、加速度测量、振动测量、磁场测量、生物和化学检测、流量和液位检测、力和载荷测量、应变力检测、温度测量、人体检测、光与辐射检测以及声学测量，并介绍了最新的纳米传感器和无线传感器网络。这部分各章的内容是相互独立的。每章在介绍检测原理时都尽可能地简化理论，因此即使没有相关背景知识也很容易阅读。每章几乎都用电路实例讲述传感器的接口电路，既有电路分析，也有性能测试，还有使用技巧。读者可以根据自己的需要和兴趣进行有选择的阅读。值得一提的是，本书还介绍了各类传感器的适用工业标准以及生产厂家，极大地方便了工程化设计。

面对一部英文的专业工具书的翻译工作，首先就是力求准确、避免出现外行话。本书涉及的领域极为广泛，原书就是由多位各领域专家合著而成，因此在组织翻译时，我们也联合了各个对口专业的多位译者共同完成。即便如此，很多“新鲜”的词汇由于国内还没有统一称谓，因此我们遵从了主流叫法。

本书主要由林龙信、邓彬、张鼎翻译，刘齐军（第6章、第7章）、张乐锋（第

18章)参与了部分翻译。此外,参与翻译的人还有:胡季红、岳虹、林龙信、李晋文、肖枫涛、张聪、韩智文、马蓉、焦贤龙、邝祝芳、奚丹、陈钢、宋锐、石志广、唐玲艳、唐扬斌、叶俊、薄建禄、杨明军、张杰良、肖国尊等。Be Flying工作室负责人肖国尊(http://blog.csdn.net/be_flying)对本书的翻译和出版做了大量的协调和规范工作,特别是在翻译思想的指导、进度和质量的把关方面,在此予以衷心感谢。

译 者

2008年5月

前 言

人们把21世纪的头10年称为“传感器的10年”。与20世纪80年代发生的微机革命相似，随着过去15年间传感器研发和应用的迅猛增加，传感器无疑也面临着一场革命。仅就汽车而言，对传感器的需求就呈跳跃式增加，随着具体应用的不同所采用的传感器技术也多种多样。传感器领域已经取得了巨大的进步，不久更大的进展将会如雨后春笋般地出现。

本书力图选讲实用的、最新的知识并寻求广度与深度的平衡。鉴于传感器涉及电气工程、机械工程、物理学、化学和生物学等学科，理解传感器的设计和工作过程需要跨学科的知识背景。本书由工业界和学术界的专家撰写，汇集了传感器系统设计者和各种传感器使用者所必需的重要知识。尽管不可能涉及目前使用的所有传感器，但本书尽量涵盖传感器的各种类型和应用。我们讨论了从压电材料到微传感器、纳米传感器再到无线传感器网络的最新传感器技术，以及经过多年实践检验正确的设计方法。此外，我们还介绍了每类传感器的设计、接口和信号调理知识。

本书主要根据传感器应用来组织结构。我们力图为读者提供一部深入浅出讲解技术的实用手册。随着技术的发展，我们还将对本书的内容不断更新。

Jon S. Wilson

亚利桑那州钱德勒市

2004年10月

目 录

第1章 传感器基础	1	4.1.4 电桥的驱动	30
1.1 传感器技术基础	1	4.1.5 参考文献	34
1.1.1 传感器数据手册	1	4.2 信号调理放大器	35
1.1.2 传感器性能特征定义	2	4.2.1 概述	35
1.1.3 示例器件的传感器性能 特征	3	4.2.2 精密运放的特性	36
1.1.4 传感器电子元器件简介	4	4.2.3 放大器直流误差的 预算分析	47
1.1.5 传感器类型	4	4.2.4 单一电源运放	48
1.1.6 传感器的局限性	6	4.2.5 仪表放大器	55
1.1.7 滤波器	7	4.2.6 斩波稳零型放大器	68
1.1.8 运放	9	4.2.7 隔离放大器	70
1.2 传感器系统	10	4.2.8 参考文献	73
第2章 应用上的考虑	14	4.3 用于信号调理的A/D转换器	74
2.1 传感器特性	15	4.3.1 逐次逼近型A/D转换器	74
2.2 系统特性	15	4.3.2 多路输入的SAR型A/D 转换器	79
2.3 仪器选型	15	4.3.3 片上完整数据采集系统	81
2.3.1 传感器	15	4.3.4 Sigma-Delta ($\Sigma\Delta$)型A/D 转换器	82
2.3.2 电缆	16	4.3.5 高分辨率的低频Sigma-Delta 型A/D转换器	86
2.3.3 电源	17	4.4 高阻抗传感器的信号调理	87
2.3.4 放大器	18	4.4.1 光电二极管前置放大器 设计	87
2.4 数据采集与读取	19	4.4.2 高速光电二极管I/V转换器的 补偿	98
2.5 安装	19	4.4.3 高阻抗电荷输出传感器	102
2.5.1 传感器	19	4.4.4 CCD/CIS图像处理	106
2.5.2 黏固粉涂敷	20	4.4.5 参考文献	111
2.5.3 电缆	20	第5章 加速度、冲击与振动 传感器	112
2.5.4 电源、放大器和读出器	20	5.1 概述	112
第3章 测量问题和测量准则	22	5.2 技术基础	112
第4章 传感器信号调理	23		
4.1 调理电桥	23		
4.1.1 概述	23		
4.1.2 电桥	23		
4.1.3 电桥输出的放大与线性化	27		

5.2.1 压电式加速度计	112
5.2.2 压阻式加速度计	116
5.2.3 电容性加速度计	118
5.2.4 伺服式或力平衡式 加速度计	120
5.3 加速度计的选型和说明	121
5.4 适用标准	123
5.5 接口与设计	125
5.5.1 螺栓安装	125
5.5.2 黏合剂安装	125
5.5.3 磁性安装	125
5.5.4 探针	126
5.5.5 接地隔离、大地噪声和 接地回路	126
5.5.6 电缆及连接	127
5.5.7 最新进展和未来展望	127
参考文献	128
第6章 生物传感器	129
6.1 概述	129
6.2 生物传感器的应用	131
6.2.1 健康护理	131
6.2.2 工业过程控制	134
6.2.3 军事和国家安全应用	134
6.2.4 环境监测	134
6.3 生物传感器的起源	135
6.4 生物受体分子	135
6.5 生物传感器中的传导机制	137
6.6 生物传感器的应用范围	139
6.7 最新进展和未来展望	142
参考文献	143
第7章 化学传感器	145
7.1 技术基础	145
7.1.1 鼻子	145
7.1.2 特定分子探测器	145
7.1.3 电化学探测技术	149
7.2 应用	150
7.2.1 汽车	150
7.2.2 其他化学传感器技术和 应用	151
7.2.3 CHEMFET	152
7.3 总结	153
第8章 电容式和电感式位移传感器	154
8.1 概述	154
8.2 电容式传感器	154
8.2.1 电容技术基础	155
8.2.2 目标考虑	155
8.3 电感式传感器	156
8.3.1 电感技术基础	156
8.3.2 目标考虑	157
8.4 电容式和电感式传感器类型	158
8.5 电容式和电感式传感器的选型 和说明	159
8.5.1 物理结构	159
8.5.2 术语	159
8.6 电容式和电感式传感器的 比较	161
8.7 应用	162
8.7.1 传感器的典型工作原理	162
8.7.2 线性或模拟	162
8.7.3 输出说明	162
8.7.4 多通道系统	163
8.7.5 电容式或电感式传感器的 应用	163
8.7.6 电容式传感器的应用	167
8.7.7 仅能使用电感式传感器的 应用	170
8.7.8 结合使用电容式和电感式 传感器的应用	172
8.7.9 最大效率考虑	173
8.8 最新进展和未来展望	174
8.9 总结	174
资源	174
第9章 传感技术中的电磁学	175
9.1 概述	175
9.2 电磁学和电感	175
9.3 传感器应用	177
9.4 磁场传感器	180
9.5 总结	182
第10章 流量和液位传感器	183
10.1 流量测量方法	183

10.1.1 热风速计	183	12.3 湿度传感器的选型和说明	209
10.1.2 差压测量	183	12.3.1 湿度传感器的选型	210
10.1.3 涡街流量传感器	186	12.3.2 电容式RH传感器的选型	210
10.1.4 容积式流量传感器	186	12.3.3 电阻式RH传感器的选型	211
10.1.5 涡轮流量传感器	186	12.3.4 热导式湿度传感器的选型	212
10.1.6 质量流量计	186	12.4 适用标准	212
10.1.7 电磁式流量传感器	187	12.4.1 标准组织	212
10.1.8 超声流量传感器	188	12.4.2 工业组织	213
10.1.9 激光多普勒流量测量	188	12.5 接口与设计信息	214
10.2 流量传感器的选型	190	12.5.1 温度和湿度影响	214
10.3 安装和维护	190	12.5.2 电压输出	214
10.3.1 校准	191	12.5.3 冷凝和受潮	215
10.3.2 维护	191	12.5.4 集成信号调理	216
10.4 流量传感器的新发展	192	参考文献与资源	217
10.5 液位传感器	192	第13章 机械振动监测传感器	218
10.5.1 液位传感器的类型	192	13.1 概述	218
10.5.2 液位测量技术的选择	195	13.2 技术基础	221
10.6 适用标准	195	13.3 加速度计类型	223
第11章 力、称重和重量传感器	196	13.3.1 用于固定安装的低成本工 业级ICP加速度计	223
11.1 概述	196	13.3.2 低频工业级ICP加速度计	223
11.2 石英传感器	196	13.3.3 高频工业级ICP®加速 度计	224
11.2.1 技术基础	196	13.3.4 4mA~20mA振动感应 传感器	224
11.2.2 传感器类型	197	13.3.5 直流响应、工业级电容式 加速度计的应用	225
11.2.3 选型和说明	199	13.4 工业级加速度计选型	225
11.2.4 适用标准	201	13.5 适用标准	232
11.2.5 最新进展和未来展望	201	13.6 最新进展和未来展望	232
11.2.6 主要制造商	201	13.7 传感器制造商	233
11.3 应变计传感器	201	参考文献与资源	233
11.3.1 技术基础	201	第14章 光学和辐射传感器	235
11.3.2 传感器类型	202	14.1 光传感器	235
11.3.3 分类	203	14.1.1 量子检测器	235
11.3.4 选型和说明	203	14.1.2 热检测器	239
11.3.5 适用标准	204	14.1.3 光敏晶体管的应用实例	241
11.3.6 最新进展和未来展望	205	14.2 热红外检测器	242
参考文献与资源	205	第15章 位置和运动传感器	244
第12章 湿度传感器	206	15.1 接触式和非接触式位置	
12.1 湿度	206		
12.2 传感器类型与技术	206		
12.2.1 电容式RH传感器	206		
12.2.2 电阻式湿度传感器	208		
12.2.3 热导式湿度传感器	209		

传感器	244	16.1.6 最新进展和未来展望	326
15.1.1 概述	244	16.1.7 参考文献与资源	327
15.1.2 位置传感器的类型	244	16.2 压电式压力传感器	327
15.1.3 限位开关	245	16.2.1 技术基础	328
15.1.4 电阻式位置传感器	249	16.2.2 传感器设计及应用	333
15.1.5 磁性位置传感器	251	16.2.3 传感器选型	340
15.1.6 超声位置传感器	259	16.2.4 制造商链接	342
15.1.7 接近传感器	263	16.2.5 最新发展和未来展望	342
15.1.8 光电传感器	273	16.2.6 参考文献与资源	343
15.1.9 最新进展和未来展望	279	第17章 机械冲击传感器	344
15.1.10 参考文献与资源	279	17.1 技术基础	344
15.2 弦线电位计与弦线编码器	280	17.1.1 冲击测量	344
工程导论	280	17.1.2 速度冲击	344
15.2.1 概述	281	17.1.3 振荡冲击	344
15.2.2 CPT的优势	281	17.1.4 大幅度冲击	345
15.2.3 其他设计要素	285	17.1.5 高频、短上升时间型冲击	345
15.2.4 结论	286	17.1.6 传感器需在大应力条件下 工作	345
15.2.5 资料	286	17.2 各种传感器及其优缺点	345
15.3 线位置、旋转位置和运动 传感器	286	17.2.1 压电型加速度计	345
15.3.1 线性可调差分变压器	287	17.2.2 电荷模式压电型加速度计	345
15.3.2 霍尔效应电磁传感器	291	17.2.3 低阻抗电压输出型加速 度计	346
15.3.3 光学编码器	293	17.2.4 压阻型加速度计	346
15.3.4 旋转变压器与同步机	294	17.2.5 激光多普勒速度计	346
15.3.5 感应同步器	297	17.2.6 应变计	346
15.3.6 矢量交流感应电机控制	299	17.3 选型与指标	347
15.3.7 加速度计	300	17.3.1 期望的幅度	347
15.3.8 参考文献	302	17.3.2 期望的频率成分	348
15.4 位置与位移传感器的选型	304	17.3.3 低频	348
15.4.1 基本术语	304	17.3.4 高频	348
15.4.2 参数	304	17.3.5 故障类型	349
15.4.3 需求核对	307	17.3.6 结构性谐振	351
15.4.4 后续步骤	308	17.3.7 环境的影响	351
15.4.5 参考文献与资源	309	17.4 适用标准	355
第16章 压力传感器	311	17.5 接口技术	355
16.1 压阻式压力测量	311	17.5.1 机械接口及安装	355
16.1.1 压力测量技术基础	311	17.5.2 电气接口和信号调理	357
16.1.2 压力测量类型	313	17.6 设计方法、技巧及实例	358
16.1.3 压力传感器的选型与说明	315	17.6.1 高机械谐振频率	358
16.1.4 适用标准	322	17.6.2 耐振	358
16.1.5 接口和设计信息	323		

17.6.3 带阻尼的谐振响应	358	19.1.5 应用	379
17.6.4 机械滤波	358	19.1.6 压阻式悬臂的计算示例	379
17.6.5 电子滤波	359	19.2 基于应变计的测量	381
17.7 最新进展和未来展望	359	19.2.1 压力传感器	383
参考文献	359	19.2.2 电桥信号调理电路	384
19.2.3 参考文献	387	19.3 应变计传感器的安装	388
第18章 测试与测量传声器	361	19.3.1 一般应力分析安装的胶结 薄片应变计	388
18.1 测量传声器的特性	361	19.3.2 精密传感器的安装	389
18.2 常用传声器类型	362	19.3.3 高温安装	390
18.3 传统电容器传声器设计	362	19.3.4 其他安装方法	392
18.4 预极化或驻极体传声器设计	363	第20章 温度传感器	394
18.5 频率响应	363	20.1 传感器类型和技术	394
18.5.1 声波入射角度的影响	363	20.1.1 机电型	394
18.5.2 压强传声器	364	20.1.2 电子型	395
18.5.3 自由场传声器	365	20.1.3 阻性器件	396
18.5.4 随机入射传声器	367	20.2 温度传感器的指标与选型	397
18.6 测量范围限制	367	20.3 适用标准	406
18.6.1 下限声级限制	367	20.3.1 标准机构	406
18.6.2 上限声级限制	368	20.3.2 工业组织	407
18.6.3 振动膜张力的影响	368	20.3.3 适用标准和指标	407
18.7 环境条件的影响	368	20.4 接口和设计信息	409
18.8 传声器标准	369	20.4.1 双金属型、球状型和毛细 管型恒温器	409
18.9 专用传声器类型	370	20.4.2 电阻和精度	409
18.9.1 声强传声器	370	20.4.3 测温电路	412
18.9.2 阵列传声器	371	20.4.4 热传导方程和RTD的 自发热	413
18.9.3 探针传声器	371	20.5 最新进展和未来展望	415
18.10 校准	372	参考文献与资源	415
18.10.1 声级校准器	372	第21章 纳米技术传感器：可能性、 现实性与应用	417
18.10.2 活塞话机校准器	372	21.1 可能性	417
18.10.3 插入电压校准	372	21.1.1 日益集成化技术	418
18.10.4 场校准	373	21.1.2 生产进步	419
18.10.5 互易校准	373	21.1.3 运算设计	419
18.11 测试与测量传声器的主要 制造商	373	21.2 现实性	419
参考文献与资源	374	21.3 应用	420
第19章 应变计	375	21.4 总结	423
19.1 概述	375		
19.1.1 压阻式应变计	375		
19.1.2 薄膜应变计	377		
19.1.3 微型器件	378		
19.1.4 应变计的精度	379		

参考文献	423	22.8 结论	434
进一步阅读	424	22.9 致谢	434
参考文献	434		
第22章 无线传感器网络：原理及 应用	425	附录A 传感器寿命成本分析与计算	436
22.1 概述	425	附录B 智能传感器和传感器电子 数据表 (TEDS) 问答	439
22.2 单个无线传感器节点结构	425	附录C 单位和换算	442
22.3 无线传感器网络体系结构	426	附录D 物理常量	448
22.3.1 星形网	426	附录E 介电常数	456
22.3.2 网状网	427	附录F 折射率	459
22.3.3 星形—网状混合型网	427	附录G 工程材料性质	460
22.4 无线传感器网络物理层无线 协议方案	428	附录H 发射源电阻系数	467
22.4.1 IEEE802.11x	428	附录I 一些典型液体的物理性质	478
22.4.2 蓝牙	428	附录J 不同介质中的声速	479
22.4.3 IEEE802.15.4	429	附录K 电池	480
22.4.4 ZigBee	429	附录L 温度	481
22.4.5 IEEE1451.5	430	传感器供应商	482
22.5 传感器网络的功率考虑	430		
22.6 无线传感器网络应用	431		
22.6.1 结构健康监测的智能结构	431		
22.6.2 工业自动化	431		
22.6.3 典型应用的土木结构监测	432		
22.7 最新进展和未来展望	434		

第1章 传感器基础

Tom Kenny博士 斯坦福大学机械工程系

1.1 传感器技术基础

传感器 (sensor) 是一种把物理量转换成电信号的器件。可以说, 传感器代表了物理世界与电气设备 (如计算机) 世界接口的一部分。这种接口的另一部分由把电信号转换成物理量的执行器 (actuator) 表示。

为什么我们这么关心这个接口? 近年来, 电子行业拥有了巨大的信息处理能力。其中最明显的例子是个人计算机。此外, 价格低廉的微处理器的使用对汽车、微波炉、玩具等嵌入式计算产品的设计产生了重大影响。最近几年, 使用微处理器进行功能控制的产品越来越多。在汽车行业, 为满足污染限制要求必须利用微处理器的这种信息处理能力。而在其他行业, 这种能力又带来了降低产品成本、提高产品性能的优势。

所有这些微处理器都需要输入电压以接收指令和数据。因此, 随着廉价微处理器的出现, 传感器在各种产品中的应用也越来越多。此外, 由于传感器输出的是电信号, 因而传感器也就能按电子设备的描述方式来描述。同电子产品数据手册一样, 很多传感器数据手册也都遵照某种格式撰写。

然而, 目前存在很多种格式, 而且传感器规格说明的国际标准还没有制订。这样, 传感器系统设计师就会遇到对同一传感器性能参数存在不同的解释, 这常常令人混淆。这种混淆并非由于这些术语的含义无法理解, 而是在于传感器界不同的人群习惯于使用不同的术语。认识到这一点至关重要。

1.1.1 传感器数据手册

为了解决上述术语使用的差异问题, 有必要首先介绍数据手册的功用。数据手册主要是一份营销文件, 用来突出某一传感器的优点, 强调其潜在的应用, 但是有可能忽视该传感器的不足。很多情况下, 传感器是设计用来满足特定用户的特定性能要求的, 而数据手册就集中了该用户最感兴趣的性能参数。这种情况下, 传感器制造商和客户就有可能越来越习惯于使用某种约定的传感器性能参数定义, 而这种定义却未必通用。这样, 这种传感器未来的新用户必须认清这种情形以便恰当地理解这些参数。人们常常遇到不同的定义。此外, 大多数传感器数据手册都缺少对特定应用有用的信息。

1.1.2 传感器性能特征定义

下面是一些较重要的传感器性能特征。

1. 传递函数

传递函数表示物理输入信号与电输出信号之间的函数关系。通常，这种关系以输入输出信号关系图来表示，具体的关系构成了对传感器性能特点的完整描述。对需逐个较准、价格昂贵的传感器，可以采用厂方出具的校准曲线形式。

2. 灵敏度

灵敏度按照输入物理信号与输出电信号之间的关系定义。通常，它就是电信号微小变化量与物理信号微小变化量之比。这样，灵敏度可以用传递函数关于物理信号的导数表示。灵敏度单位通常为伏特/开尔文、毫伏/千帕等。对于温度计而言，如果较小的温度变化能够带来较大的电压输出，则称其灵敏度高。

3. 量程或动态测量范围

量程（动态测量范围）是指能够被传感器转换成电信号的输入物理信号范围。该范围外的信号可能会带来难以接受的、很大的不精确性。当超出传感器供应商允许的传感器动态测量范围时，则需要参考传感器数据手册中的专门说明。单位通常为开尔文、帕斯卡和牛顿等。

4. 精度或不确定度

不确定度一般定义为实际信号与理想输出信号之间的最大期望误差。单位通常为开尔文。有时，不确定度以满量程输出（Full Scale Output, FSO）的分数或者读数的分数表示。例如，温度计的输出应确保精确到满量程输出的5%之内。计量学家一般把精度看作定性的术语，而把不确定度看作定量的术语。举例来说，若两个传感器的不确定度分别为1%和3%，那么前者可能具有更高的精度。

5. 迟滞

某些传感器在输入激励周期性变化时，不同周期中相同的激励对应的输出值并不相同。迟滞定义为被测量的期望误差的宽度范围。单位通常为开尔文或满量程输出的百分比。

6. 非线性度

非线性度（又常称线性度）指在某一特定的动态范围内，传感器实际传递函数相对于某一线性传递函数的最大偏离程度。对该偏离误差的几种衡量方法中，最常见的是把实际传递函数与这样一条“最佳直线”比较，该直线位于能够包围传感器量程内传递函数的两条平行线的中间。这种比较方法能使大部分传感器的性能达到最优，因而较为流行。另外也可能采用其他参考直线，因此用户在使用相同的参考直线时需仔细比较。

7. 噪声

任何传感器除产生输出信号外，还会产生输出噪声。某些情况下，传感器噪声小于电子装置中传感器后接电子元器件的噪声，或小于物理信号的波动，这时的传

感器噪声可以忽略。而在多数其他情况下，传感器噪声限制了基于传感器的系统的性能。噪声一般分布在频谱中。很多常见的噪声源产生的噪声为白噪声，也就是说其在所有频率上的噪声谱密度都相同。例如，电阻中的Johnson噪声就是这种白噪声。白噪声功率谱密度的单位可用“电压单位/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ”表示。测量数据中加入的这种白噪声的幅度与测量带宽的平方根成正比。由于带宽和测量时间存在反向关系，因此可以说噪声随测量时间平方根的增加而减小。

8. 分辨率

传感器的分辨率定义为传感器可检测到的最小的信号波动。由于信号波动是瞬时现象，故波动的时间范围与最小可检测幅度应该存在某种关系。因此，这种分辨率定义无疑包含了被测量特性的信息。很多传感器都受白噪声限制。这些情况下，分辨率的单位可以用“物理信号的单位/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ”表示。对于特定的被测量，实际分辨率可由这个量与测量带宽的平方根之积获得。传感器数据手册中一般会给出分辨率，单位为“物理信号的单位/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ”，或给出针对特定测量的最小可检测信号。如果还给出了噪声分布的形状，就有可能把这些结果推广到任何测量中。

9. 带宽

任何传感器对物理信号瞬时变化的响应均为有限长时间响应。另外，很多传感器都存在衰减时间，即物理信号阶跃变化后传感器的输出衰减到初始值的时间。这两个时间的倒数分别对应于上截止频率和下截止频率。二者之间的频率范围即为传感器带宽。

1.1.3 示例器件的传感器性能特征

作为一个例子，我们将给出Analog Devices公司的现成产品ADXL150加速度计的性能参数值。

1. 传递函数

电压与加速度的函数关系为

$$V(\text{Acc}) = 1.5\text{V} + \left(\text{Acc} \times 167 \frac{\text{mV}}{\text{g}} \right)$$

该表达式包含传感器输出的灵敏度和失调信息，可用来预测传感器的性能。

2. 灵敏度

传感器的灵敏度由输出电压对初始工作点的加速度的导数给出。该设备的灵敏度为167mV/g。

3. 动态范围

ADXL322标定动态范围为 $\pm 2\text{g}$ 。当输入信号超出此范围时，传感器输出将继续变化，但生产商不能保证这时的灵敏度满足167mV/g。该传感器可承受的加速度达3 500g。

4. 迟滞

该器件不存在基本的迟滞源。数据手册没有对迟滞进行说明。

5. 温度系数

该传感器的灵敏度随温度变化，灵敏度变化确保不超过0.025%/C。无加速度时的失调电压（标称值为1.5V）也会变化，最大变化达2mg/C。当以电压表示时，失调变化不超过0.3mV/C。

6. 线性度

线性度为实际传递函数与特定工作范围内最佳直线的差别。数据手册表明，该传感器的线性度小于满量程输出的2%。数据手册给出了线性度预期偏差。

7. 噪声

噪声以噪声密度表示，且不超过 $300\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。将其与灵敏度（167mV/g）相乘得到以电压表示的噪声密度为 $0.5\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。那么对于10Hz的低通滤波应用来说，噪声的有效值约为1.5μV，且其加速度误差约为0.001g。

8. 分辨率

数据手册中所标的分辨率为 $300\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

9. 带宽

该传感器的带宽取决于外部的电容和电阻。

1.1.4 传感器电子元器件简介

对整个设备而言，电子元器件与物理传感器元件同样重要。传感器电子元器件会限制传感器性能、成本和应用范围。合理设计传感器电子元器件可以实现噪声信号中信息的最佳提取。

大多数传感器本身不产生电压，而是像电阻这种无源器件那样工作：当施加外部激励时，其输出值作为对外部激励的响应而发生变化。为生成符合微处理器和A/D转换器（ADC）的输入的信号，需要对电阻进行“偏置”并对传感器输出信号进行“放大”。

1.1.5 传感器类型

1. 电阻式传感器电路

$$V_s = \frac{R_s}{R_l + R_s} V_{in}$$

$$\text{当 } R_l \gg R_s, V_s = \frac{R_s}{R_l} V_{in} \text{ 时}$$

电阻器件服从欧姆定律，即电阻上的电压等于流过该电阻的电流与电阻的乘积。另外，电路中流入某节点的电流必须从同一节点流出。这两条合在一起称为基尔霍夫定律，可以用来确定电路中的电流和电压。

可以直接对图1-1-1所示的例子进行分析。首先，我们知道，感应电阻两端的电

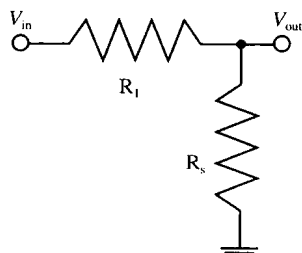


图1-1-1 分压器