

IEEE WILEY

智能传感技术丛书



Smart Sensor Systems:
Emerging Technologies and Applications

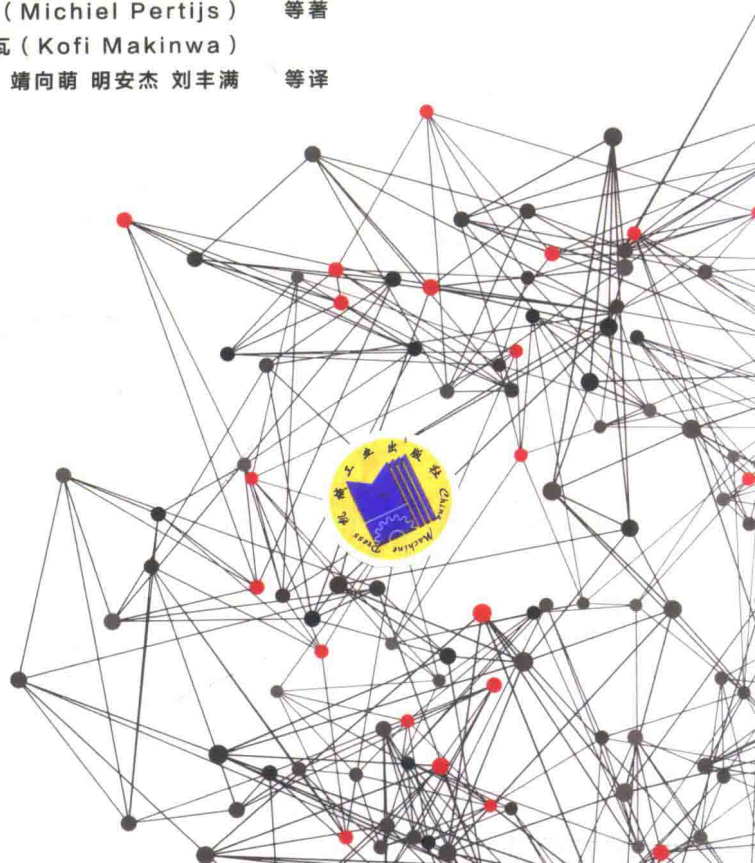
智能传感器系统 新兴技术及其应用

杰拉德·梅杰 (Gerard Meijer)

[荷兰] 米切尔·珀提斯 (Michiel Pertijs) 等著

科菲·马金瓦 (Kofi Makinwa)

靖向萌 明安杰 刘丰满 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

智能传感技术丛书

智能传感器系统： 新兴技术及其应用

Smart Sensor Systems: Emerging Technologies and Applications

杰拉德·梅杰 (Gerard Meijer)

[荷兰] 米切尔·珀提斯 (Michiel Pertijs) 等著

科菲·马金瓦 (Kofi Makinwa)

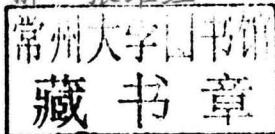
靖向萌 明安杰 刘丰满 庄越宸 陈海亮

王琪翔 杨卓青 苟冠鹏 梁冰 陈强

宋其峰 刘煜 赫然 梁华征 李贵才

明安涛 关子华 刘祥翀 张维红

译



机械工业出版社

传感器系统不断地要求小型化、低成本、低功耗，同时又要求更高的性能和可靠性，于是一些新的传感原理和技术应运而生，而将这些新原理和技术变为成熟的产品将需要更大的努力。除了提高传感器本身的性能外，传感器外围的系统同样重要，这些系统包括与传感器相连接的电路接口、保护传感器的系统封装、保证传感器性能的校准程序等。本书正是一本从系统角度全面介绍传感器及其相关电路设计的书，详细介绍了一些典型的传感器系统，内容实用并具有一定深度，是一本具有新颖性和基础性的微型传感器领域专业书籍。

本书适合作为微机电系统（MEMS）相关专业高年级本科生和研究生的教材，以及传感器相关专业人员的参考用书。

Copyright © 2014 John Wiley & Sons Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Smart Sensor Systems: Emerging Technologies and Applications, ISBN 978-0-470-68600-3, by Gerard Meijer, Michiel Pertijs, Kofi Makinwa, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 独家授权机械工业出版社出版。未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2015-0852 号。

图书在版编目（CIP）数据

智能传感器系统：新兴技术及其应用 /（荷）杰拉德·梅杰（Gerard Meijer）等著；靖向萌等译. —北京：机械工业出版社，2018.3

（智能传感技术丛书）

书名原文：Smart Sensor Systems: Emerging Technologies and Applications
ISBN 978-7-111-59412-3

I. ①智… II. ①杰…②靖… III. ①智能传感器 IV. ①TP212.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 050084 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：付承桂 责任编辑：朱林

责任校对：张薇 封面设计：马精明

责任印制：张博

三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 17 印张 · 320 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-59412-3

定价：79.00 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

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

译者序

我们生活在一个智能化的时代，随着科技不断发展，越来越多的智能传感器系统正走进我们的生活，影响着我们的生活。当我们看到这些小型化的智能传感器时，常常被新的传感原理、更小的尺寸和更强大的功能所吸引，而忽略了“微系统”这个概念。作为一个传感器系统，不仅需要传感器自身灵敏度高，相应的处理电路也要量身定做，这样才能达到最佳的性能效果。长期以来，微传感器系统或者微机电系统（Micro Electro Mechanical System, MEMS）专业是分离的，专注于传感器设计和制造的人对相应的读出和处理电路不熟悉；做电路设计的人对传感器方面不够了解，而真正的传感器系统中传感器与读出电路是相辅相成、缺一不可的。本书的特色之处在于，根据 MEMS 传感器特点，从整体系统角度给读者介绍传感器及其系统的概念。

微传感器系统的领域非常广，覆盖了多个学科且相互交叉。在本书的翻译过程中，我们深深感到个人知识的局限和理解方面的不足，但是这也成为翻译本书的动力，希望让读者能够通过这本书对微传感器系统有更全面的了解、更深的认识。微传感器系统还是一个不断发展的学科，通过一本书很难覆盖整个 MEMS 领域，本书着重于介绍一些典型的 MEMS 传感器及其电路，对于其他 MEMS 传感器系统的研究和开发都具有理论和实用价值，读者可以结合具体的应用场景，设计和应用 MEMS 传感器系统。

本书是荷兰代尔夫特理工大学“智能传感器系统”课程的教材，同样适合作为 MEMS 领域高年级本科生和研究生的教材，以及传感器相关专业人员的参考用书，希望越来越多的人加入到这个朝气蓬勃的领域中来。

在本书翻译过程中，国内外很多专家、老师和学生参与了本书的翻译和校对工作，在此一并表示感谢。同时，由衷感谢机械工业出版社付承桂编辑在本书翻译期间给予的帮助，让这本书最终与读者见面。最后，感谢家人一直以来的理解和支持。

由于译者水平有限，不当之处在所难免，敬请广大读者指正。

靖向萌
2018 年初春
于北京

原书前言

本书旨在给传感器及其系统的设计人员和使用者一个参考，或者作为一个灵感启发的源泉，来激发一些新的想法。本书的主体是基于一门跨学科的课程——“智能传感器系统”课程的教材，这门课程自从1995年以来每年都在代尔夫特理工大学开设。课程的目标是给那些更大范围的、跨学科的学生和老师介绍智能传感器系统的基本原理，来发展共同的语言和科学背景，去探讨设计这些系统带来的挑战，并且增进相互之间的合作。从这个意义上来说，我们希望能够促进这个人群的持续扩大，共同加入到智能传感器系统这个激动人心的领域中来。

当今智能传感器层出不穷，这个领域的研发工作还远远没有完成。它始终被更低成本、更小尺寸、更小功耗和更高性能、更好的可靠性这些需求驱动着。另一方面，新传感原理、新技术不断涌现，仍需要巨大的努力使这些原理和技术走向成熟。通常这个过程不仅仅包含提升传感器自身的性能，而且传感器周围的系统扮演着同样重要甚至更重要的角色。这个系统包含了传感器的接口电子电路、保护传感器不受环境影响的封装，以及确保能够满足一定性能指标的校准程序。

本书聚焦在这些系统中最重要方面，特别是聚焦在设计那些智能传感器系统。系统中传感器与电路部分结合在一个封装体内，甚至是一个芯片上，以提供更好的功能、性能和可靠性。这些传感器系统的基础知识在之前的《智能传感器系统》一书中已经介绍了，因此本书在该书的基础上补充了一些新技术、新应用，以及从系统层面更深入地探讨智能传感器的设计。

本书在开篇讨论了通过传感器与电子电路结合带来的令人激动的机会：弱传感器信号的准确处理（第1章）；自校准技术的采用（第2章）；精密仪表放大器的集成（第3章）。随后介绍了一些传感器系统，其中系统层面起着重要作用：通过测量阻抗方式感知物理和化学参量（第4章）；采用反馈和背景校准技术的低功率角速度感应（第5章）；探测DNA等生物分子的传感器系统（第6章）；以CMOS图像传感器形式的片上光学传感系统（第7章）；能够与人类神经系统交互的智能传感器（第8章）。最后，本书还描述了产生和存储能量的新兴技术，因为这对于真正实现无人传感系统非常重要（第9章）。

在撰写本书期间，我们得到了很多人的大力帮助。我们非常感谢审稿人给予的反馈和建议，他们是：代尔夫特理工大学的 Reinoud Wolffenbuttel，弗劳恩霍夫微电子电路与系统研究所的 Michael Kraft，不来梅大学的 Michiel Vellekoop，Teledyne DALSA 公司的 Jan Bosiers，欧洲微电子中心的 Firat Yazicioglu，以及那

些同时作为审稿人的本书作者。我们非常感谢 John Wiley & Sons, Ltd. 公司，责任编辑 Richard Davies、Liz Wingett 和 Laura Bell 给予的支持、鼓励和帮助，以及出版编辑 Genna Manaog 和 Sangeetha Parthasarathy 在整个出版期间给予的帮助。此外，感谢那些允许我们使用其照片和图表的大学、研究所和公司，以使本书能够更加吸引读者。最后，感谢我们的家人：Rumiana、Hannah 和 Abi，感谢她们一如既往的爱和支持。

Gerard Meijer、Michiel Pertijs 和 Kofi Makinwa
代尔夫特，荷兰

目 录

译者序

原书前言

第1章 智能传感器设计	1
1.1 引言	1
1.2 智能传感器	2
1.2.1 接口电路	3
1.2.2 校准和微调	5
1.3 智能温度传感器	6
1.3.1 电路原理	6
1.3.2 接口电路设计	7
1.3.3 近期研究进展	8
1.4 智能风速传感器	8
1.4.1 工作原理	9
1.4.2 接口电路	10
1.4.3 近期研究进展	11
1.5 智能霍尔传感器	11
1.5.1 电路原理	11
1.5.2 接口电路	12
1.5.3 近期研究进展	13
1.6 本章小结	14
参考文献	15
第2章 智能传感器的校准与自校准	17
2.1 引言	17
2.2 智能传感器的校准	18
2.2.1 校准术语	18
2.2.2 校准有效性的局限	19
2.2.3 智能传感器校准的特性	20
2.2.4 传感器中校准数据的存储	20
2.2.5 生产过程中的校准	22
2.2.6 智能传感器校准的机遇	24

2.2.7 案例分析:一种智能温度传感器	24
2.3 自校准	26
2.3.1 自校准的局限性	26
2.3.2 通过结合多个传感器的自校准	26
2.3.3 自校准传感激励器	29
2.3.4 案例分析:一种智能磁场传感器	30
2.3.5 零位平衡传感激励器	32
2.3.6 案例分析:一种智能风速传感器	33
2.3.7 其他自校准方法	35
2.4 总结和未来趋势	37
2.4.1 总结	37
2.4.2 未来趋势	38
参考文献	39
第3章 精密仪表放大器	41
3.1 引言	41
3.2 仪表放大器的应用	42
3.3 三运放仪表放大器	43
3.4 电流反馈仪表放大器	44
3.5 自动调零运算放大器和仪表放大器	47
3.6 斩波运算放大器和仪表放大器	50
3.7 斩波稳零运算放大器和仪表放大器	55
3.8 斩波稳零及自动调零协同运算放大器和仪表放大器	60
3.9 总结与展望	64
参考文献	65
第4章 专用阻抗传感器系统	67
4.1 引言	67
4.2 采用方波激励信号的电容式传感器接口电路	70
4.2.1 单元素测量	70
4.2.2 基于周期调制的高能效接口电路	71
4.2.3 电容式传感器的高速高分辨测量	74
4.2.4 接地电容测量:前馈有源保护	75
4.3 专用测量系统:微生物检测	77
4.3.1 新陈代谢引起的电导改变特性	77
4.3.2 张弛振荡器阻抗测量	80
4.4 专用测量系统:含水量的测量	82
4.4.1 背景	82
4.4.2 电容值与含水量的关系	83

VIII 智能传感器系统：新兴技术及其应用

4.4.3 趋肤效应和邻近效应	83
4.4.4 测定含水量的专用接口电路系统	85
4.5 专用测量系统：血液阻抗表征测量系统	87
4.5.1 血液及其电路模型的特征	87
4.5.2 有机体内血液分析系统	90
4.5.3 实验结果	93
4.6 本章小结	95
参考文献	96
第5章 低功耗振动式陀螺仪读出电路	99
5.1 引言	99
5.2 节能的科里奥利传感技术	99
5.2.1 振动式陀螺仪简介	99
5.2.2 电子接口电路	100
5.2.3 接口读出电路	101
5.2.4 提高接口读出电路功效	102
5.2.5 利用感应谐振	103
5.3 模式匹配	105
5.3.1 评估失配	105
5.3.2 调节失配	109
5.3.3 关闭调谐回路	110
5.3.4 实际考虑	111
5.4 力反馈	114
5.4.1 模式匹配考虑	114
5.4.2 初始系统架构和模型稳定性分析	115
5.4.3 适应寄生谐振	117
5.4.4 正反馈架构	120
5.5 实验样机	126
5.5.1 实施	127
5.5.2 实验结果	130
5.6 总结	136
参考文献	136
第6章 基于CMOS工艺的DNA生物芯片	138
6.1 引言	138
6.2 DNA芯片的基本工作原理和应用	138
6.3 芯片修饰	142
6.4 CMOS集成	143

6.5 电化学读出技术	146
6.5.1 探测原理	146
6.5.2 电位法装置	152
6.5.3 读出电路	155
6.6 其他读出技术	157
6.6.1 基于标记方法	157
6.6.2 无标记方法	158
6.7 封装集成附注	160
6.8 总结和展望	161
参考文献	162
第7章 CMOS 图像传感器	165
7.1 CMOS 尺寸效应对图像传感器的影响	165
7.2 CMOS 像素结构	167
7.3 光子散粒噪声	171
7.4 应用于 CMOS 图像传感器的模-数转换器	172
7.5 光灵敏度	175
7.6 动态范围	176
7.7 全局快门	177
7.8 结论	178
参考文献	179
第8章 智能传感器探索之神经接口	181
8.1 引言	181
8.2 动态神经控制系统设计技术要点	183
8.3 动态控制框架中基于智能传感器的治疗设备：闭环心脏起搏器案例	186
8.4 “间接”智能传感方法的应用实例：一个针对慢性疼痛的 姿态响应脊髓刺激案例研究	188
8.4.1 姿态响应型控制系统概述	188
8.4.2 设计的挑战：定义病人预期状态	189
8.4.3 物理传感器：三轴加速度计	192
8.4.4 三轴加速度计的具体设计	192
8.4.5 采用状态评估使传感器“智能化”：位置检测算法和刺激算法	195
8.4.6 “闭环”：将惯性信息映射到基于姿态的自适应治疗的刺激参数	196
8.5 神经状态的直接感知：智能传感器用于测量神经状态和 实现闭环神经系统的案例研究	198
8.5.1 植入式双向脑机接口系统设计	199
8.5.2 斩波稳零 EEG 仪表放大器设计概述	200

X 智能传感器系统：新兴技术及其应用

8.5.3 大脑的神经智能感知探索：动物样本原型试验	208
8.5.4 展示大脑中智能传感的概念：实时大脑状态评估和刺激法	214
8.6 神经系统智能检测的未来趋势和机遇	220
参考文献	222
第9章 微能源产生：原理和应用	226
9.1 引言	226
9.2 能量存储系统	229
9.2.1 简介	229
9.2.2 超级电容器	230
9.2.3 锂离子电池	230
9.2.4 薄膜锂离子电池	232
9.2.5 能量存储系统应用	233
9.3 热电能量采集	234
9.3.1 简介	234
9.3.2 最新技术	235
9.3.3 转化效率	239
9.3.4 电源管理	240
9.3.5 小结	240
9.4 振动与运动能量采集	241
9.4.1 简介	241
9.4.2 机械环境：谐振系统	242
9.4.3 人类环境：非谐振系统	246
9.4.4 电源管理	248
9.4.5 小结	248
9.5 远场 RF 能量采集	249
9.5.1 简介	249
9.5.2 基本原理	249
9.5.3 分析和设计	252
9.5.4 应用	253
9.6 光伏	254
9.7 总结和未来趋势	255
9.7.1 总结	255
9.7.2 未来趋势	256
参考文献	257

第 1 章 智能传感器设计[⊖]

Kofi Makinwa

电子仪器实验室，代尔夫特理工大学，代尔夫特，荷兰

1.1 引言

传感器已经成为当今世界不可或缺的一部分。现代汽车中已经采用了数十种传感器，其应用范围从简单的位置传感器到多轴 MEMS 加速度计和陀螺仪。这些传感器在增强了汽车发动机的性能以及稳定性的同时，也保证了汽车发动机符合环保标准，并且提升了汽车乘用者的舒适度与安全性。另外一个例子，现代家庭中也使用了多种传感器，其范围包括简单的温度控制器到红外运动传感器以及热式流量传感器。而最能体现传感器普遍性的例子或许就是移动电话了，其已经从单一的通信设备逐步发展成为名副其实的传感器应用平台。一部典型的手机包含了多种传感器，如触摸传感器、送话器、一个或两个图像传感器、惯性传感器、磁性传感器和可以感知环境温度、压力甚至湿度的传感器。这些传感器连同 GPS (Global Positioning System, 全球定位系统) 定位接收器一起，一方面使得移动电话的操作更简易，同时也大大拓展了移动电话的功能用途，使其所扮演的角色已远远超过最初的手提电话功能。

如今，手机中大部分传感器与大多数用于普通消费类电子产品中的传感器一样，都是由硅材料制造的。这主要是因为硅基传感器可以利用大型半导体代工厂进行低成本的大规模量产。另一个使用硅基的原因是容易实现为传感器提供偏置或处理传感器输出信号的电路系统与传感器的单片集成或者至少同一封装集成。此外，半导体级硅是一种高纯度的材料，具有特定的物理性质，有些可以通过掺杂来调控性能，还有些可以实现纳米尺度的微细加工。

硅是一种用途广泛的材料，具有较为多样的物理性质，因此可以被用来制造很多种类的传感器^[1]。例如，通过霍尔效应感测磁场，通过塞贝克效应感测温差，通过压阻效应感测机械应力，以及通过光电效应检测光的传感器。除此以外，一些无法通过硅基材料直接测得的物理量可以通过与硅兼容的材料间接感测到。例如，湿度能通过吸湿性聚合物测得^[2]，同时气体浓度可以通过测量相应

⊖ 本章是在本章参考文献 [7] 基础上扩展和更新后的版本。

的吸附性金属氧化物的电阻获得^[3]。因此，尽管硅基传感器或许无法获得同类最佳的性能，但基于其小尺寸、低成本以及与电路系统易于协同集成的特点，硅基传感器更加实用并被普及推广。

传感器可为更大的系统提供信息，并基于其所提供的信息运行工作，作为大系统的一部分最能体现它们的价值。因此，由传感器提供的信息必须采用可靠且标准化的方式传输到系统的其他部分。然而，由于传感器输出的均为较弱的模拟信号，信号传输工作需要额外的电路系统来完成，所以接口电路越靠近传感器越好，以便减小信号干扰、避免信号传输损耗。当把接口电路与传感器组合在一起，即协同集成在同一封装体内时就是我们所称的智能传感器系统^[4]。

除了向外界提供可靠的信号，智能传感器系统的接口电路还可被用来实现例如滤波、线性化和压缩等传统的信号处理功能。并且该电路系统还可以通过自检和校准功能来提升传感器的稳定性（将在本书第2章中详细讨论）。传感器之间的互相融合是近年来的一种趋势，集成在同一封装体中的多种传感器输出信号经过协同处理以期获得更为可靠的信号输出。例如，将陀螺仪、加速度计和磁性传感器的输出信号进行协同处理可以获得可靠的方位预测信息，因此可以使移动设备具备室内导航功能。

本章将大致论述有关智能传感器设计的内容，特别是基于标准集成电路技术（如 CMOS）的智能传感器设计。我们将给出采用上述现今最先进的制造技术进行设计的智能传感器系统的例子，比如用于测量温度、风速和磁场的传感器。尽管标准的 CMOS 技术限制了实际传感器的性能，但其降低了传感器的制造成本。与此同时，我们也会阐述通过充分利用协同集成接口电路，传感器系统总体性能将被显著提高。

1.2 智能传感器

智能传感器采用了系统级封装技术，该技术实现了将传感器和专用接口电路集成在了同一封装体中。该系统可能只有一颗芯片，通常智能的温度传感器、图像传感器和磁传感器是这种情况。而某些情况下，传感器与其接口电路无法通过同一制备技术实现时，将采用双芯片方案予以解决。双芯片方案的另外一个好处是，通过分别加工传感器和电路芯片，可以提高加工良率，使双芯片方案更具成本优势，这也就是为什么有时候即使能够实现单芯片集成也会采用双芯片方案。双芯片传感器的例子大多为力学传感器，例如 MEMS 加速度计、陀螺仪和送话器。这些传感器通常采用体硅微加工技术制备。

由于硅基芯片特别是芯片与外部的连接处较为脆弱，智能传感器必须采用某些特定的封装加以保护。合适的封装结构设计极具挑战性，因为其必须满足两个

互相矛盾的要求：一方面要保证传感器与外界环境能够交互作用，另一方面还要保护传感器（包括接口电路）免受外部环境的破坏。对于温度和磁性传感器，我们可以采用近似典型集成电路封装的结构。典型封装结构也可以用于惯性传感器器件，这时候需要利用采用盖帽（capping）芯片或保护膜层来保护该器件中可移动的结构。然而通常来说，大部分传感器都需要采用定制化的封装结构，这就显著增加了其制造成本，并且经常要在传感器性能和稳健性之间采取折中的方案。

正如前文所提到的，硅基传感器未必是最优性能的方案，但是，可以通过协同集成的接口电路提高整体系统的性能，或者使传感器在最佳模式下工作，或者能够在某些非理想状态下进行补偿。要实现这个目标需要对传感器特性有较深的理解。例如，电子电路可以与 MEMS 惯性传感器结合在一起形成电-机反馈回路，通常来说，这样的系统回路会提升系统线性度及带宽^[5]。此系统实例将会出现在本书第5章中，在该章中将主要阐述利用反馈和补偿电路来增强 MEMS 陀螺仪的性能。对于补偿处理，例如环境温度与封装体应力之间的交叉敏感干扰等问题，深入理解传感器特性是必要的。因此，智能传感器设计包括对整个系统的优化，以及考虑系统级设计的实际应用。

1.2.1 接口电路

为了与外部世界通信，尽管占空比调制信号或者调频信号也与微处理器相兼容，并且可在某些情况下使用，但是智能传感器的输出信号最好是数字信号。现今智能传感器设计的趋势是将传感器的输出信号尽可能早地转换成数字信号，然后在数字信号领域对其进行信号处理，例如滤波、线性化、交叉敏感补偿等信号处理。这种方法便于通过一条数字总线实现多种传感器之间的信号互连，并且充分利用了集成电路的灵活性和不断提高的数字信号处理能力的优势。我们已经注意到，在无线信号接收器设计方面也有相似的趋势，其中的模-数转换器已经越来越靠近天线，并且因此使用了越来越多的数字信号处理器^[6]。

然而，大部分传感器输出的是幅度微小的模拟信号。特别是热电堆、霍尔元件和压阻应变计等硅基传感器的输出信号仅有微伏量级。造成这种情况的其中一个原因是硅材料本身的换能机制特性所致，另一个原因是这些传感器的尺寸较小，从而限制了其从所处的环境中获得足够的信号能量。虽然，从外界提取能量信息是传感器的理想特征，但此特征不应破坏其所应当遵守的物理过程，这就使得“透明（transparent）”接口电路的设计变得极具挑战性。应当将大量的注意力集中于电路非理想特性，例如热噪声和偏置上面来，以保证这些特性不会限制智能传感器的性能。

更深层次的设计挑战来自大部分传感器的信号带宽，包括直流电信号。由此

产生的后果是“透明”接口电路的设计，特别是采用当今主流的 CMOS 技术，会遇到诸如信号偏移和 $1/f$ 噪声产生的随机误差和由组件失配、电荷注入、漏电流引起的系统误差的双重挑战。

幸运的是，大部分传感器的开关速度与晶体管相比是非常慢的。因此，动态误差修正技术可以被用来修正系统误差，其本质是使得计算速度或带宽更加精确^[7]。正如“动态”一词所示，这些技术会不断地减少系统误差，因此减轻了由信号偏移和 $1/f$ 噪声引起的低频随机误差的影响。总而言之，动态误差修正技术可以被分为两类：取样 - 修正技术以及调制 - 滤波技术。

一个取样 - 修正技术的例子是自动调零电路（见图 1.1），在此电路中放大器的输入是周期性短路的，同时其输出反馈给一个消除偏置的积分器^[8]。在电路正常运行时积分器是断开的，因此积分器的输出被截止，且消除了放大器的瞬态偏置（包括 $1/f$ 噪声）。自动调零电路的主要缺点是需要短路放大器的输入端，这一要求降低了其实用性。然而，这个缺陷可以在一种称之为“乒乓球”型配置、采用两个互相交替的自动调零放大器予以解决^[9]。

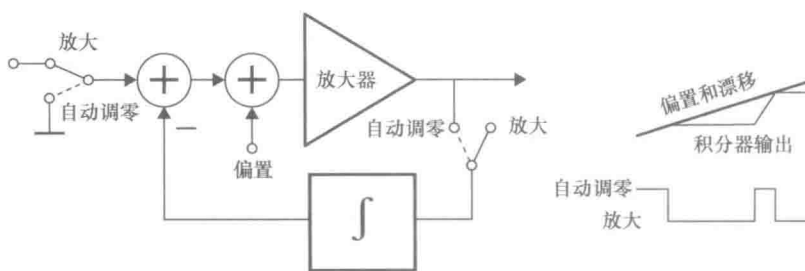


图 1.1 自动调零放大器简化框图

另一种减小放大器偏置的方法称之为斩波，这是调制 - 滤波技术的一个实例。输入信号被调制成交变信号后放大，之后再解调成原始信号^[8]。如图 1.2

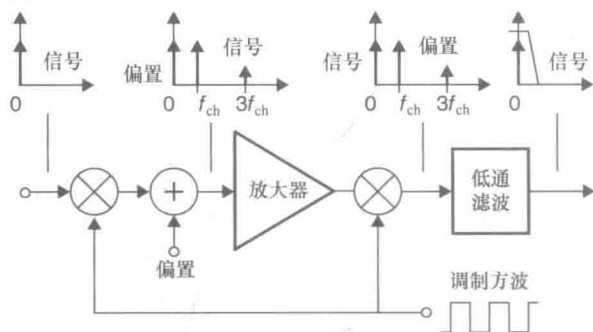


图 1.2 斩波放大器简化框图

所示, 电路信号运行的方式是将放大器的偏移调制 (和 $1/f$ 噪声) 到斩波频率 f_{ch} , 这便于通过低通 (均值) 滤波器促进偏移信号的消除。然而, 滤波器同时也限制了放大器的可用带宽。这一缺陷可以通过采用斩波稳定放大器来避免, 在此放大器中, 斩波放大器主要用来提升宽波段主放大器的低频特性^[10]。拥有多种斩波和自动调零放大器组合的高精度放大器电路设计将在本书第3章中详细讨论。

高分辨率模-数转换器可以通过采用一种称之为 sigma-delta ($\Sigma-\Delta$) (或 delta-sigma, $\Delta-\Sigma$) 的调制方法获得, 该电路由一个低通滤波器、一个模-数转换器和一个数-模转换器构成一个反馈回路^[11]。如图 1.3 所示, 当模-数转换器的量化误差 (通常被建模成随机噪声) 涉及回路的输入信号时, 其将被高通滤波去除。这类回路的噪声整形特性使得 sigma-delta 调制器能够在窄带宽的条件下获得非常高的信号分辨率。在特定带宽外的量化噪声将被随后的数字低通滤波器移除 (未显示在图 1.3 中)。通过综合使用 sigma-delta 调制和各种动态误差修正技术, 已经实现了拥有超过 20bit 分辨率和 18bit 线性度的模-数转换器^[12,13]。

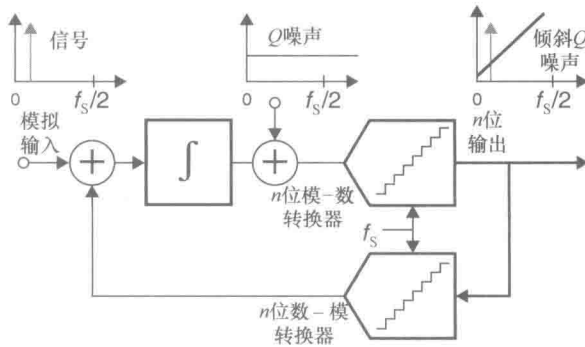


图 1.3 sigma-delta 调制器简化框图

1.2.2 校准和微调

如同所有的传感器一样, 智能传感器系统的精度只能依靠一种已知的标准进行校准, 经过校准后其系统误差就是已知的。而系统误差可以通过之后的微调操作予以减小。从而传感器精度的主要局限变成了器件随时间的稳定性。微调是一项十分强大的技术, 其能够用来修正许多由加工制造容差和工艺参数分布所引起的误差。但是, 传感器制造通常产能巨大, 而相关的校准需要额外的测试设备以及占用宝贵的生产时间, 因此校准和微调仅被当作最后的技术手段。以上这些内容将在后续的章节中更详细地讨论。

1.3 智能温度传感器

在本节中，我们将描述一种基于标准 CMOS 工艺的高精度温度传感器设计^[14]。其传感元件是采用在所有 CMOS 工艺线可用的双极结型晶体管衬底。但是该传感器是一种寄生器件，其性能特点展现出显著的工艺相关差异性。由此导致的结果表明最终的温度传感器必须通过微调来获得 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内的误差。

1.3.1 电路原理

双极结型晶体管的基射极电压 V_{BE} 可以表示为

$$V_{\text{BE}} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{S}}} \quad (1.1)$$

式中， I_{C} 是集电极电流； I_{S} 是一个工艺相关的参数，通常取决于晶体管的尺寸。

如图 1.4 所示， V_{BE} 与温度近似成线性函数关系，其斜率大约为 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。与绝对温度成正比（Proportional To Absolute Temperature, PTAP）的电压可以通过测量两个名义上相同的双极结型晶体管 $Q_{1,2}$ 之间的基射极电压的差值获得，其偏置电流比为 $1:p$

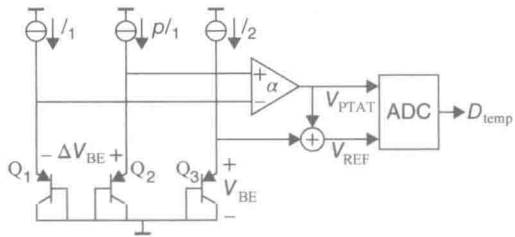


图 1.4 CMOS 智能温度传感器的简化电路原理图

$$\Delta V_{\text{BE}} = \frac{kT}{q} \ln p \quad (1.2)$$

如果电流比 p 能被精确定义，那么 ΔV_{BE} 即是绝对温度的精确函数表达式，因为其不再依赖于 I_{S} 或任何其他取决于工艺的参数。但是， ΔV_{BE} 是一个仅有大约 $140\mu\text{V}/\text{K}$ ($p=5$) 灵敏度的小信号，这就意味着低失调接口电路在设计中是必要的。

为了数字化 ΔV_{BE} 信号，需要设置一个参考电压。如图 1.4 和图 1.5 所示，一种称之为带隙参考电压 V_{REF} ($\sim 1.2\text{V}$) 的量可以通过结合 V_{BE} 与简化的 ΔV_{BE} 获得。这两个电压值均可以应用于模-数转换器中，并且决定了依赖于温度的比例值 μ ：

$$\mu = \frac{\alpha \Delta V_{\text{BE}}}{V_{\text{BE}} + \alpha \Delta V_{\text{BE}}} = \frac{V_{\text{PTAT}}}{V_{\text{REF}}} \quad (1.3)$$

假设接口电路是理想的，则传感器的主要误差来源为工艺差异对 V_{BE} 的影响。根据本章参考文献 [16]，第 7 章中的参考文献 [4] 和图 1.5，当 V_{BE} 在 0K 时