

现代电子信息技术丛书

# 传感器技术

—— 信息化武器装备的神经元

主编 范茂军



国防工业出版社

National Defense Industry Press

现代电子信息技术丛书

# 传感器技术

——信息化武器装备的神经元

主编 范茂军

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书重点介绍现代武器装备中应用的传感器。第1章传感器技术基础,介绍了传感器在武器装备中的地位与作用、传感器的概念及定义、传感器分类、传感器在军事上的应用、传感器的结构原理、传感器的性能及其评价方法,以及传感器技术的现状与发展趋势;其他章分别介绍了加速度传感器和位移传感器,力传感器,压力传感器,触觉传感器,液体参数传感器,毒气传感器,特种用途传感器、模块与系统,无线传感器网络,微机电系统传感器,智能传感器,并结合具体实例,对每一种传感器的应用,进行了比较详细的介绍和分析。

读者对象:从事电子信息、特别是传感器技术研制和应用的工程技术人员、研究人员及高等学校的师生。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器技术 / 范茂军主编. —北京:国防工业出版社,  
2008.7

(现代电子信息技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 05738 - 6

I. 传... II. 范... III. 传感器 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 068875 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 17½ 字数 428 千字

2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 《现代电子信息技术丛书》

## 编审委员会

|       |     |     |     |     |     |  |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 名誉主任  | 陈炳德 |     |     |     |     |  |
| 主任    | 李安东 |     |     |     |     |  |
| 常务副主任 | 童志鹏 | 张弛  | 王志刚 |     |     |  |
| 副主任   | 刘成海 | 王小谟 | 熊群力 | 王峰  | 许建峰 |  |
|       | 程洪彬 |     |     |     |     |  |
| 委员    | 蔡镭  | 彭华良 | 王政  | 毕克允 | 夏乃伟 |  |
|       | 张光义 | 刘兴  | 雷厉  | 张冬辰 | 黄月江 |  |
|       | 李跃  | 胡爱民 | 范茂军 | 瞿兆荣 | 张学孝 |  |
|       | 李立功 | 梅遂生 | 廖复疆 | 程辉明 | 骆光明 |  |
|       | 汪继强 | 许西安 | 陈洁  |     |     |  |

## 总编委

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 总编  | 童志鹏 |     |
| 副总编 | 王晓光 |     |
| 委员  | 张雅丽 | 线珊珊 |

# 《传感器技术》

## 编委名单

主 编 范茂军  
编 委 王 平 吴亚林 李慧敏 陈丽洁 王劲松  
张洪泉 迟晓珠 王世清 高成臣 董新平  
于海超

编著人员 (按姓氏笔画排序)

王 辉 亢春梅 刘光辉 刘曼丽 张 鹏  
邵宪辉 秦 雪 韩 伟 雷 垒 鲁德双

## 总 编

总 编 王 平  
副 编 王 平  
编 委 王 平

# Preface

## 序

《现代电子信息技术丛书》(以下简称《丛书》)自1999年首次出版,至今已8年了。《丛书》综合地反映了20世纪90年代电子信息技术的进展,受到广大科技工作者、大专院校师生和部队官兵的欢迎。进入新世纪以来,鉴于国内外电子信息技术的飞速发展,世界与局部形势发生了许多新的变化,电子技术循着摩尔定律预计的发展速度得到了持续的增长与进步。我国电子技术不论在基础层次还是在系统层次也取得了许多世界先进的成果,例如突破了纳米级的金属氧化物场效应器件(MOSFET)的设计与制造技术,研制成功了数十万亿次运算速度的巨型计算机,实现了计算栅格的研制与试验,成功地开发出世界级的第三代数字蜂窝移动通信系统,研制出空中预警与控制机系统和区域级一体化综合电子信息系统等。国际上,美国等发达国家在电子信息技术发展上处于领先地位,成功地研制出45nm的微处理器并进行批量生产,正向20nm及以下迈进。美国启动了从工业时代到信息时代的军事转型,提出从平台中心战(PCW)向网络中心战(NCW)的转型,并以全球信息栅格(GIG)为基础。GIG是美国所构想的、正在研发的国防信息基础设施,预计在2015年可形成初始作战能力。它以面向服务的结构(SOA)为体系构架,向联网的实体提供成套的、安全的信息服务与电信服务,以加强信息共享、决策优势与异构协同。GIG包括多模态数据的传递媒介,如陆上电路、空间单元和无线电台等,其所组成的互联网络可动态地、透明地将信息从发源处路由至目的地。以GIG为依托,美国军队加速向网络中心化演进,如陆军的未来战斗系统(FCS),海军的兵力网(Forcenet),空军的指挥控制星座( $C^2$  constellation)等。这里涉及十分巨大(Herculean)的技术挑战,必须通过从基础到系统的多层次创新和突破,才能在未来有限的时间内实现超越前15年Web网发明以来的发展。凡此种种,都是我们在编著《丛书》第1版时只能预测而无法探知的。然而今日,这些高新技术的面貌已逐渐清晰并迅速渗入人们的生活和竞争。这使《丛书》的作者们意识到进行再一次创作的必要性;同时,热心的读者们也期盼我们能及时对第1版进行



修改以便与时俱进。

基于以上原因,在各级领导机关的大力支持下,《丛书》各分册的原作者与新分册的新作者们在从事繁重业务工作的同时,废寝忘食、辛勤耕耘,对《丛书》各分册进行了精心修订、编撰,为第2版的问世做出了卓越的贡献。我谨代表《丛书》编审委员会向他们致以衷心的感谢与感谢。

第2版承袭了第1版的编写宗旨、编写特色及服务对象。在维持原结构不变的基础上,对内容进行了大幅度更新,并明显加大了军事科技的比重,增、删了7个分册,总册数由17分册变为18分册,总字数由800万字增加到1400万字。新版《丛书》仍以先进的综合电子信息系统为龙头,分层次、全方位地介绍各项先进信息技术,具体包括以下分册:

#### 系统性技术分册

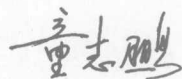
- 综合电子信息系统(第2版)
- 综合电子战(第2版)
- 侦察与监视
- 军事通信(第2版)
- 雷达与探测(第2版)
- 数据链
- 导航与定位(第2版)
- 计算机技术(第2版)
- 计算机软件技术(第2版)
- 信息安全与保密(第2版)

#### 基础性技术分册

- 微电子技术(第2版)
- 光电子技术(第2版)
- 真空电子技术(第2版)
- 传感器技术
- 微声电子器件
- 化学与物理电源(第2版)
- 现代电子测试技术(第2版)
- 先进电子制造技术(第2版)

这两个系统分别从横向、纵向对众多先进的信息技术形成了有机的集成。

《丛书》的编写出版得到总装备部、中国电子科技集团公司及其有关研究所的领导的大力支持,得到国防工业出版社领导及编辑们的积极推动与努力,谨对他们表示由衷的感谢。



2007年8月26日

# Preface

## 第1版序

信息技术是一个复杂的多层次多专业的技术体系,粗略地可以分为系统和基础两个层次。属于系统层的一般按功能分,如信息获取、通信、处理、控制、对抗(简称为5C技术,即Collection, Communication, Computing, Control, Countermeasure五个词的第一个字母)等;基础层技术一般按专业分,如微电子、光电子、微波真空电子等。

信息技术革命的火炬是由微电子技术革命点燃的,它促进了计算机技术、通信技术及其他电子信息技术的更新换代,迄今,尚未有尽期。信息技术革命推动产业革命,使人类社会经历了农业、工业社会后进入了信息社会。

大规模集成电路的集成度是微电子技术革命的重要标志,它遵循摩尔(Moore)定律,每18个月翻一番,预计可延伸到2010年。届时,每个芯片可包含100亿( $10^{10}$ )个元件,面积可达到 $10\text{cm}^2$ ,作为动态存储器的存储量可达64Gb(吉比特),接近理论极限 $10^{11}$ 个元件和256Gb存储量。微处理器芯片的运算速度每5年提高一个数量级,到本世纪末,每个芯片运算速度可达 $10\sim 100$ 亿次每秒,有人认为,实现2000亿次的单片微处理器在技术上是可能的。与此相适应,每芯片比特存储量与每MIPS(兆指令每秒)运算量的成本将呈指数式下降,现在一个100兆指令/s专用数字信号处理芯片只售5美元。如果飞机的价格也像微电子那样呈指数式下降的话,70年代初买1块比萨饼的费用在90年代就可以买1架波音747客机。3年内1部电话机将只用1块芯片,5年内1台PC机的全部功能可在1个芯片上实现,6年内1部ATM交换机的核心功能也可用1个单片完成。由于微处理器芯片价格持续不断地下降,构成了它广泛应用的基础。现在,在一般家庭、汽车和办公室中,就有100多个微处理器在工作,不仅是PC机,而且在电话机、移动电话机、电视机、洗衣机、烘干机、立体声音响、家庭影院中也有。1辆高档汽车中包含20多种可编程微处理器,1架波音777客机含有100多万行的计算机程序代码。

通信技术的进步还得力于光子技术的进步。光通信速率(比



特每秒)每两年翻一番,现在实验室中已可做到  $10^{12}$  b/s,即可将全世界可能传输的全部通信量于同一时刻内在 1 根光纤中传送,或相当于 1s 内传输 1000 份 30 卷的百科全书。通信速率的提高和通信容量的增大,使光通信成本也不断降低,与 80 年代相比,降低了两个数量级。

因特网是全球信息基础设施的雏形,其发展速度惊人。现在每 0.4s 增加一个用户,每 4min 增加一个网络。1996 年联网数大于 10 万,联网主机数大于 1000 万,用户数大于 7000 万(预计到本世纪末,将大于 2 亿),PC 机总量将达 5 亿,联网主机达 3000 万,信息量每 5 年翻一番。越来越多的公司、团体、机关、个人通过信息网络相互联接,其应用范围从单纯的电子函件通信扩大到远程合作(包括教育、诊断、办公、会议、协作等)、按需点播、多媒体文娱、电子商务、银行、支付等,人类社会生存与发展的另一维空间,即信息空间或称为赛博空间(Cyberspace)正在形成。如果说工业社会是建筑在汽车与高速公路上的话,信息社会则是建筑在信息与信息高速公路上的。政府、军队、经济、金融、电力、交通、电信等关键部门都要依赖于信息基础设施的正常运行。信息技术和信息产业的水平已成为综合国力的重要标志,也是国际竞争力的焦点与热点。

信息技术的飞跃发展及其渗透到各行各业的广泛应用,不仅推动了产业革命,而且也深刻地改变了人们的工作、学习和生活的方式。信息技术不仅扩展了人的视觉、听觉等感知能力,而且还渗透到思维领域,减轻或部分地替代人的脑力劳动,提高思维的效率和质量,实现人的思维能力的延伸,增强人的认知能力。信息作为事物的属性与相互关系的状态的表达是客观存在的,但不是显在的,很多是潜在的,有的是深埋的,有待挖掘与提炼。信息技术大大地丰富了信息采集的内容,提高了信息处理的能力,为人们对客观事物及其规律的认识提供了创新的工具,也为人们正确认识与有效改造主观世界和客观世界提供了源泉,将使社会的物质文明与精神文明建设得到极大的发展。

信息、能源与物质是人类社会赖以生存与发展的三大支柱。在信息社会中,信息是最重要的支柱和最重要的产业,它影响着其他两个支柱的健康发展,包括生产、传输、分配、运行、减少损耗、改善管理、提高效率、降低成本等等;同时,它还能不断地培育与发展新物质和新能源的发明与生产,不断地改善生态环境,从而使人类社会进入可持续发展的健康轨道。

信息革命在带动产业革命的同时也带动军事革命,使得军事技术、武器装备、作战思想、作战方式、战争形态、军事原则、军事条令与部队编成等都将发生深刻的变化。如果农业社会是冷兵器时代,工业社会是热兵器时代,那么信息社会则是信息兵器时代。信息、信息系统与信息化平台、武器与弹药成为战场上的主战兵器。信息优势成为传统的陆地、海洋、空中、空间优势以外的新的争夺领域,并深刻地制约着传统领域的战斗胜负,从而构成信息化战争的新形态。在这种战争中,战争胜负决定于敌对双方掌握信息与信息技术的广度与深度。信息不仅是兵力倍增器,它本身就是武器和目标,是双方必争的制高点。1991 年初的海湾战争,被称为硅片战胜钢铁的战争,即源于这样的认识。它开启了赛博空间战、网络战、信息战等簇新的作战方式。

以信息优势为核心的军事革命是建筑在先进的指挥、控制、通信、计算机、情报、监视、侦察及其一体化的信息战能力的基础上的,这个众系之系(系统的系统)我国称为综合电子信息系统,与美军后来提出的 C<sup>4</sup>ISR/IW 相当,它由以下 6 部分组成。

1. 鲁棒的多探测器信息栅格网络。为作战部队提供作战空间感知优势。
2. 先进的指挥控制与作战管理栅格网络。为部队提供作战的先期规划、胜敌一筹的作战部署,执行作战指挥控制与一体化兵力管理能力。
3. 从探测器到射击器的栅格网络。为部队提供精确制导武器的动态目标管理、分配与

引导,协同作战,一体化防空,快速战损评估和再打击能力。

4. 联合的通信、导航与定位栅格网络。提供可靠、安全、大容量与高精度的信息,以支持部队的机动行动,确保全面优势。

5. 信息进攻能力。采取侵入、操纵与扰乱等手段,阻碍敌人作战空间感知、认知与有效用兵能力。

6. 信息防护能力。保证我方信息系统的安全,防护敌方对我信息网络的利用、干扰和破坏。

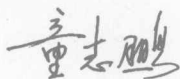
这个系统的系统涉及众多先进的信息技术的横向与纵向的有机集成,它包括雷达和光电的有源与无源探测技术、有线和无线及固定和移动通信技术、计算机硬件和软件技术、精确导航定位技术、航天航空测控技术、信息安全保密技术、电子战技术等横向专业技术的集成;也涉及微电子技术、光子与光电子技术、真空电子技术、压电与传感器技术等先进元器件技术,电子材料技术、电源技术、测试技术、先进制造技术等纵向基础技术的集成。当代军事革命要求在创新的军事思想指引下,发展有层次多专业的纵横集成的信息技术;同时,又要求在先进的信息技术驱动下,培育与发展新的军事思想,并在此基础上推动作战原则、军事条令与部队编成的变革,形成军事革命与信息革命的有机结合。

我们正处于世纪之交,党的第十五次代表大会的胜利召开,启动了有中国特色的社会主义事业在邓小平理论的指引下全面进入21世纪。我国的国防与军队现代化建设的跨世纪历史进程已经开始。为了适应军事革命环境下的高新技术军事斗争的需要,我军必须拥有信息优势,必须拥有以先进的综合电子信息系统为基础结构的性能优良的武器装备,必须提高部队素质,把人才培养推上新的台阶。

江泽民总书记非常重视人才的培养,他多次指示,要用高新技术知识武装全军头脑。在未来的信息化战场上,知识将成为战斗力的主导因素,敌对双方的较量将更突出地表现为高素质人才的较量。本丛书的编写出版就是为贯彻这个伟大号召提供系统基础知识。全书以先进的综合电子信息系统为龙头,多层次、全方位地介绍相关的各项先进信息技术,既包括系统技术,也包括基础技术,共17个方面,荟萃成17个分册。丛书的编写以普及先进信息技术知识为目标,以中专以上文化程度,从事军、民用电子信息技术有关业务的技术人员和管理干部为主要对象,努力做到深入浅出,雅俗共赏,图文并茂,引人入胜,文字简练,语言流畅,学术严谨,论述准确,使其具有可读性、可用性、先进性、系统性与权威性。参加丛书各分册撰写的作者都是长期从事现代信息技术研究与发展的专家,他们在繁重的业务工作的同时,废寝忘食,长期放弃节假日的休息,辛勤耕耘,鞠躬尽瘁,为本丛书做出了卓越的贡献。他们以自己的模范行动,“努力成为先进思想的传播者、科学技术的开拓者、‘四有’公民的培育者和优秀精神产品的生产者”。我谨代表总编委向他们致以衷心的敬意!

本丛书的编写出版得到原国防科工委与原电子工业部领导的大力支持,得到国防工业出版社领导及责任编辑们的积极推动与努力,借此之机,向他们表示由衷的感谢!

中国工程院院士  
原电子工业部科技委常务副主任



# Preface

## 前言

---

传感器技术是现代科技的前沿技术,其水平高低是衡量一个国家科技发展水平的重要标志之一。传感器技术不仅是国民经济优先发展的重点技术,也是现代战争武器装备的基础。

在国防和军事领域,随着微电子技术、通信技术和计算技术,特别是 MEMS 技术的快速发展,军用传感器技术水平以惊人的速度在不断提升。在现代军事理论和新式战争模式的影响和推动下,传感器在军事和国防领域的应用正在不断深入和扩展。

传感器在近期发生的高技术局部战争中显示出特殊功效,例如在 2003 年的伊拉克战争中,美军采用了无线传感器网络,配合其他侦察手段,全面掌握战场态势,加强控制战争的主动权;又例如美国在阿富汗曾采用让战场机器人钻进山洞,通过传感器搜寻恐怖分子的方法。小型惯性测量装置、微全分析系统、RF 传感器、网络传感器、无人值守传感器、生化战剂探测器等传感器已广泛应用于军事航天领域中的卫星、航天运载系统、战机、舰船、导弹及其发射系统等武器装备和系统中。

20 世纪 90 年代以来,军事力量的构成和发展正经历着一场深刻变革。世界军事强国的武器中传感器更新换代的速度与武器平台相比已明显加快,美军明确提出“要更加重视传感器”,并建立了“传感器到射手”的作战模式,这种作战模式基于一个无缝传输的一体化 C<sup>4</sup>ISR 信息系统网络,将传感器探测的目标信息迅速通过该网络传输到武器系统,由武器系统的指控系统接收目标信息后迅速指挥和控制武器系统作战的过程;由此大力提倡发展智能武器,把传感器、智能计算机应用于各种武器装备上,武器装备不用人直接操作,具有更大的杀伤和制胜效能。正在探索和发展中的定向能武器、动能武器、高超声速武器、计算机网络攻防武器、微型无人作战平台和非致命武器等典型新概念武器为武器装备的发展开辟了崭新的领域。在发展这些新型武器装备中传感器的重要作用十分显著,所以,传感器被人们誉为信息化武器装备的神经元。

作者在汇集了大量传感器相关资料的基础上,通过分析和整理,

结合当前我国武器装备的发展和改进,进行了认真的编撰。

本书没有专一对传感器技术进行系统的基础知识介绍,而是重点介绍与军用相关的传感器的原理和应用,同时兼顾对相关基础知识的介绍。本书专设章节介绍了某些新型传感器,如微机电系统和智能传感器等。

书中介绍的传感器,一部分已经在武器装备中应用,虽然这部分传感器无论从原理、制作工艺,或者是性能方面都是人们所熟悉的,但是,它们的军事用途十分广泛,在武器装备中起到了直接影响武器装备效能的关键作用;另外一部分是涉及多学科领域和多种技术的新型传感器,本书重点阐述了新型传感器的原理、制作工艺以及传感器的特点和应用,并对市场和技术发展趋势作了适当介绍。

在本书编著过程中,中国电子科技集团公司第四十九研究所所长范茂军在百忙中亲自承担了全书的组织和审核工作,参加编著的科研人员在担负繁重科研任务的情况下,利用休息、业余时间,为本书的出版付出了辛勤的劳动。本书的主要编写人员分工为:第1章,范茂军、刘光辉、雷垒;第2章,李慧敏、邵宪辉;第3章,高成臣;第4章,张鹏、王辉;第5章,鲁德双、刘光辉;第6章,亢春梅、刘光辉;第7章,迟晓珠、王劲松;第8章,刘光辉、王劲松;第9章,鲁德双、刘光辉;第10章,韩伟。审核:范茂军。秦雪和刘曼丽参加了组织、部分章节的编写及审核排版工作。

本书的编辑和出版得到了国防工业出版社的大力支持,王晓光编审、贾艳编辑和孙汝忠编辑根据出版要求和标准,做了大量规范化工作,为此,对他们付出的劳动和工作热情表示诚挚的谢意。同时,还要感谢所内外专家对本书的出版提供的技术咨询和帮助。

本书在编著过程中参考了相关著作和文献,在此向有关作者表示衷心感谢。

由于编者水平所限,编写时间仓促,存在不足在所难免,希望读者批评指正。

作 者

# Contents

## 目 录

|                       |          |
|-----------------------|----------|
| <b>第1章 传感器技术基础</b>    | <b>1</b> |
| 1.1 传感器在武器装备中的地位与作用   | 1        |
| 1.1.1 传感器的概念          | 2        |
| 1.1.2 传感器的定义          | 3        |
| 1.1.3 传感器的分类          | 4        |
| 1.2 传感器在军事上的应用        | 5        |
| 1.2.1 传感器在航天、航空中的应用   | 6        |
| 1.2.2 传感器在火控系统中的应用    | 10       |
| 1.2.3 传感器在军用智能机器人中的应用 | 12       |
| 1.3 传感器中的物理定律         | 14       |
| 1.4 传感器的结构原理          | 15       |
| 1.4.1 传感器的基本功能单元      | 15       |
| 1.4.2 传感器的信号转换方式      | 16       |
| 1.5 传感器的性能及其评价方法      | 18       |
| 1.5.1 传感器数学模型的一般形式    | 18       |
| 1.5.2 传感器的静态特性及其评价    | 20       |
| 1.5.3 传感器的动态特性及其评价    | 21       |
| 1.5.4 传感器的标定          | 25       |
| 1.6 国内外传感器的发展趋势       | 26       |
| 1.6.1 传感器的重要地位和作用     | 26       |
| 1.6.2 传感器技术的发展趋势      | 26       |
| 1.7 传感器的选用原则          | 31       |
| 1.7.1 传感器的选择方法        | 31       |
| 1.7.2 传感器应用中的注意事项     | 31       |
| 参考文献                  | 32       |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| <b>第2章 加速度、速度、位移传感器</b> | 33 |
| <b>2.1 加速度传感器</b>       | 33 |
| 2.1.1 压电石英加速度传感器        | 34 |
| 2.1.2 压电陶瓷加速度传感器        | 34 |
| 2.1.3 硅微压阻式加速度传感器       | 35 |
| 2.1.4 硅微电容式加速度传感器       | 36 |
| 2.1.5 气体摆式线性加速度传感器      | 38 |
| <b>2.2 角加速度传感器</b>      | 39 |
| 2.2.1 压阻式角加速度传感器        | 39 |
| 2.2.2 压电射流角加速度传感器       | 40 |
| <b>2.3 速度传感器</b>        | 40 |
| 2.3.1 振动速度传感器           | 40 |
| 2.3.2 角速度传感器            | 41 |
| <b>2.4 转速传感器</b>        | 42 |
| 2.4.1 磁电式转速传感器          | 42 |
| 2.4.2 光电式转速传感器          | 43 |
| 2.4.3 霍尔元件转速传感器         | 44 |
| <b>2.5 位移传感器</b>        | 45 |
| 2.5.1 线位移传感器            | 45 |
| 2.5.2 角位移传感器            | 46 |
| <b>2.6 倾角仪及水平传感器</b>    | 47 |
| 2.6.1 气体摆式倾角传感器         | 47 |
| 2.6.2 水平姿态传感器           | 48 |
| 2.6.3 变面积式电容倾角传感器       | 49 |
| <b>参考文献</b>             | 51 |
| <b>第3章 力、压力与触觉传感器</b>   | 52 |
| <b>3.1 力传感器</b>         | 52 |
| 3.1.1 电阻应变式荷重传感器        | 52 |
| 3.1.2 光纤式荷重传感器          | 53 |
| <b>3.2 压力传感器</b>        | 53 |
| 3.2.1 硅压阻式压力传感器         | 54 |
| 3.2.2 电容式压力传感器          | 55 |
| <b>3.3 差压传感器</b>        | 56 |
| <b>3.4 高温压力传感器</b>      | 57 |
| 3.4.1 多晶硅压力传感器          | 57 |



|             |                   |     |
|-------------|-------------------|-----|
| 3.4.2       | SOI 高温压力传感器       | 58  |
| 3.4.3       | SiC 高温压力传感器       | 58  |
| 3.4.4       | 硅—蓝宝石压力传感器        | 60  |
| 3.4.5       | 谐振式石英压力传感器        | 60  |
| 3.4.6       | 陶瓷厚膜高温压力传感器       | 61  |
| <b>3.5</b>  | <b>触觉传感器</b>      | 62  |
| 3.5.1       | 接触觉传感器            | 62  |
| 3.5.2       | 力/力矩觉传感器          | 65  |
| 3.5.3       | 压觉传感器             | 66  |
| 3.5.4       | 滑觉传感器             | 66  |
| <b>3.6</b>  | <b>接近觉传感器</b>     | 67  |
| 3.6.1       | 工作原理              | 67  |
| 3.6.2       | 应用                | 69  |
| <b>参考文献</b> |                   | 70  |
| <b>第4章</b>  | <b>磁与声、光传感器</b>   | 72  |
| <b>4.1</b>  | <b>磁传感器</b>       | 72  |
| 4.1.1       | 磁通门传感器            | 72  |
| 4.1.2       | 霍耳效应传感器           | 74  |
| 4.1.3       | 磁阻传感器             | 76  |
| 4.1.4       | 其他磁传感器            | 78  |
| <b>4.2</b>  | <b>声传感器</b>       | 78  |
| 4.2.1       | 空气声传感器            | 78  |
| 4.2.2       | 水声传感器             | 83  |
| 4.2.3       | 固体声传感器            | 91  |
| 4.2.4       | 超声传感器             | 92  |
| 4.2.5       | 声表面波传感器           | 98  |
| <b>4.3</b>  | <b>光传感器的分类</b>    | 98  |
| 4.3.1       | 固体图像传感器           | 98  |
| 4.3.2       | 红外传感器             | 99  |
| 4.3.3       | 激光传感器             | 99  |
| 4.3.4       | 光纤传感器             | 99  |
| <b>参考文献</b> |                   | 101 |
| <b>第5章</b>  | <b>液体参数、流量传感器</b> | 102 |
| <b>5.1</b>  | <b>液位传感器</b>      | 102 |
| 5.1.1       | 投入式、插入式、法兰式液位传感器  | 102 |
| 5.1.2       | 低温及超低温液位传感器       | 103 |

|             |                       |            |
|-------------|-----------------------|------------|
| 5.1.3       | 浮球连续(开关式)液位传感器        | 103        |
| 5.1.4       | 超声固体(液体)物位传感器         | 104        |
| <b>5.2</b>  | <b>密度、浓度、浊度传感器</b>    | <b>105</b> |
| 5.2.1       | 在线密度传感器               | 105        |
| 5.2.2       | 悬浮颗粒浓度传感器             | 106        |
| 5.2.3       | 胍类浓度监测传感器             | 106        |
| 5.2.4       | 表面散射浊度传感器             | 107        |
| 5.2.5       | 表面粗糙度传感器              | 107        |
| <b>5.3</b>  | <b>流量传感器</b>          | <b>108</b> |
| 5.3.1       | 气体质量流量传感器             | 109        |
| 5.3.2       | 热线式质量流量传感器            | 110        |
| 5.3.3       | 薄膜式质量流量传感器            | 110        |
| 5.3.4       | 浮子式质量流量传感器            | 111        |
| 5.3.5       | 涡街式流量传感器              | 111        |
| 5.3.6       | 涡轮式流量传感器              | 112        |
| 5.3.7       | 差压式流量传感器              | 114        |
| 5.3.8       | 超声流量传感器               | 115        |
| 5.3.9       | 旋转活塞式流量传感器            | 115        |
| 5.3.10      | 电磁流量传感器               | 116        |
| <b>参考文献</b> |                       | <b>117</b> |
| <b>第6章</b>  | <b>可燃气体、毒气和气象传感器</b>  | <b>118</b> |
| <b>6.1</b>  | <b>可燃气体传感器</b>        | <b>118</b> |
| 6.1.1       | 甲烷传感器                 | 118        |
| 6.1.2       | 乙炔传感器                 | 119        |
| 6.1.3       | 氧气传感器                 | 120        |
| 6.1.4       | 二氧化碳传感器               | 121        |
| <b>6.2</b>  | <b>毒气传感器——一氧化碳传感器</b> | <b>122</b> |
| <b>6.3</b>  | <b>气象传感器</b>          | <b>123</b> |
| 6.3.1       | 气压传感器                 | 123        |
| 6.3.2       | 风速风向传感器               | 124        |
| 6.3.3       | 热 line 式风速传感器         | 125        |
| 6.3.4       | 微风速传感器                | 125        |
| 6.3.5       | 数字式风速/温度传感器           | 126        |
| 6.3.6       | 电阻式温度传感器              | 126        |
| 6.3.7       | 红外测温传感器               | 127        |
| 6.3.8       | 数字式热流传感器              | 128        |
| 6.3.9       | 热电偶式温度传感器             | 128        |
| 6.3.10      | 湿度传感器                 | 130        |

|        |             |     |
|--------|-------------|-----|
| 6.3.11 | 有机高分子式湿度传感器 | 130 |
| 6.3.12 | 陶瓷式湿度传感器    | 131 |
| 6.3.13 | 露点湿度传感器     | 132 |
| 6.3.14 | 红外三波长水分传感器  | 133 |
| 6.3.15 | 微量水分传感器     | 134 |
| 6.3.16 | 油中水分传感器     | 134 |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|  参考文献 | 135 |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>第7章 特种用途传感器、模块与系统</b> | 136 |
|--------------------------|-----|

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|  7.1 特殊用途传感器 | 136 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|       |           |     |
|-------|-----------|-----|
| 7.1.1 | 光电自准直传感器  | 136 |
| 7.1.2 | 烟雾传感器     | 137 |
| 7.1.3 | 紫外火焰传感器   | 139 |
| 7.1.4 | 地震动传感器    | 140 |
| 7.1.5 | 超声波探测器    | 140 |
| 7.1.6 | 光电式接近觉传感器 | 141 |

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|  7.2 传感器模块 | 143 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|       |           |     |
|-------|-----------|-----|
| 7.2.1 | 头盔用方位姿态模块 | 143 |
| 7.2.2 | 数字式磁航向模块  | 144 |
| 7.2.3 | 无线振动声音模块  | 145 |
| 7.2.4 | 集成加速度模块   | 146 |
| 7.2.5 | 微惯性测量组合模块 | 147 |

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|  7.3 传感系统 | 148 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|       |            |     |
|-------|------------|-----|
| 7.3.1 | 三维测量传感系统   | 148 |
| 7.3.2 | 扫描激光成像系统   | 150 |
| 7.3.3 | 合成孔径聚焦成像系统 | 150 |
| 7.3.4 | 光学测距传感系统   | 151 |
| 7.3.5 | 战场侦察传感系统   | 152 |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|  参考文献 | 153 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                    |     |
|--------------------|-----|
| <b>第8章 无线传感器网络</b> | 154 |
|--------------------|-----|

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|  8.1 概述 | 154 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|  8.2 工作原理 | 155 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|       |             |     |
|-------|-------------|-----|
| 8.2.1 | 基本概念        | 155 |
| 8.2.2 | 无线传感器网络结构   | 156 |
| 8.2.3 | 物理层技术       | 157 |
| 8.2.4 | 介质访问控制协议    | 158 |
| 8.2.5 | 无线传感器网络的路由  | 158 |
| 8.2.6 | 无线传感器网络传输协议 | 159 |