



装备科技译著出版基金

# GNSS与惯性 及多传感器组合导航系统原理 (第二版)

Principles of GNSS, Inertial, and  
Multisensor Integrated Navigation Systems  
(Second Edition)



[英] Paul D. Groves 著

练军想 唐康华 潘献飞 张开东 等译

吴美平 审校



国防工业出版社  
National Defense Industry Press





装备科技译著出版基金

# GNSS 与惯性及多传感器组合导航系统原理 (第二版)

**Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor  
Integrated Navigation Systems**  
(Second Edition)

【英】 Paul D. Groves 著

翻译 练军想 唐康华 潘献飞 张开东  
李 涛 逯亮清 曹聚亮 吴文启

审校 吴美平

国防工业出版社

· 北京 ·

# 著作权合同登记 图字:军-2013-173号

## 图书在版编目(CIP)数据

GNSS与惯性及多传感器组合导航系统原理 / (英) 格鲁夫(Groves, P. D.) 著; 练军想等译. —2版. —北京:国防工业出版社, 2015. 3

书名原文: Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems (second edition)

ISBN 978-7-118-09871-6

I. ①G... II. ①格... ②练... III. ①卫星导航-全球定位系统-惯性传感器-惯性导航系统 IV. ①TN967.1②P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第268647号

Translation from the English language edition:

*Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems (Second Edition)* by Paul D. Groves.

Copyright © 2013 Paul D. Groves.

All Rights Reserved.

Authorized translation from English language edition published by Artech House.

本书简体中文版由 Artech House 授权国防工业出版社独家出版发行  
版权所有,侵权必究。

※

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100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 45 1/4 字数 864 千字

2015年3月第2版第1次印刷 印数1—2000册 定价168.00元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 译者序

2014年元旦前夕,在教研室组织的一次春联征集活动中,我撰写的春联有如下的句子:“从业知仅惯性,人生行需导航”。人生导航,这是社会学方面的用语。但由此也可以折射出起源于工程领域的“导航”一词的涵义流传之远、影响之大。纵观世界科学技术发展脉络,二战之后的近七十年,是自然科学和工程技术飞速发展的七十年。近七十年自然科学不仅进步的速度快,相比于四百年前伽利略开创近代科学以来的发展进程而言,借用惯性导航领域的专业用语来说,近七十年自然科学发展的加速度也很快。导航技术,作为现代科学技术的一个细小分支,近年来也不断的创新,取得了长足的进步。

导航,虽然只是控制学科下属的二级学科,但是追根溯源,可以与伽利略、牛顿时代提出的运动学、动力学原理找到密切联系。比如,基于牛顿力学的惯性导航技术,时至今日仍在不断地发展完善、推陈出新。约一百年前,伟大的科学家爱因斯坦及其同时代的玻尔、海森堡等人,修正了仅适用于低速、宏观尺度下的古典力学体系,提出全新的量子力学理论。狭义相对论更是颠覆了人们对传统时空观念的理解,首次肯定了电磁场是一种独立的物质存在形式。这些物理学上的新发现,均大大推动了导航技术的后续发展。基于量子力学对于光波的全新解释,1913年,法国科学家 Georges Sagnac 首次验证了 Sagnac 效应,这成为现代惯性导航中光学陀螺仪的基石;基于电磁场理论的无线电传播技术,在二战中诞生了无线电导航,随着卫星技术的成熟,又衍生出当前应用极其广泛、几乎无所不在的卫星导航技术。本书就是囊括了卫星导航、惯性导航及多传感器组合导航相关知识的一本力作。

各位从事导航领域的同仁应该深感庆幸,我们所从事的专业工作,与科学史上牛顿和爱因斯坦两大高峰,都是如此靠近;我们所从事的研究,与现实世界的时间、空间、惯性系等一系列基础性的本真概念,也并不遥远。时间与空间是物理世界的基本属性,因而对时间和空间关系的测量,就在现实世界中扮演着基础性、关键性的作用。导航技术是测量时间基准和空间坐标的技术。随着科学技术的发展,除了前述的卫星导航、惯性导航之外,各种导航定位技术,如航迹推算、陆基无线电导航、天文导航、匹配导航、组合导航等,已经并必将更加深入地影响生活的各个方面。

毕业于牛津大学的 Paul D. Groves 博士,以其在导航领域坚实宽广的理论

基础为背景,凭借工程领域专业丰富的实践知识,着力撰写了这本专著。细读之后发现,这是一本内容翔实、前沿,表达深入浅出、实用性好的优秀作品。该书主要有三个特点:其一,全面。涵盖了与导航相关的各个方面知识。其二,新颖。本书时效性好,导航领域诸多最新研究成果,均在书中得以准确体现。第二版的出版时间,相比于第一版之间隔了不到五年,但是在内容上,第二版要比第一版多出 50% 以上。第二版有八章是全新的内容,其余的章节则都在第一版的基础上进行了修订和扩充。其三,实用。本书包含有配套光盘,例程丰富,既易于初学者入门,又可为研究生、专业人士作参考。

国防科学技术大学机电工程与自动化学院导航技术教研室的几位老师,合作翻译了本书。具体分工如下:第 1 章(吴文启),第 2、3 章(曹聚亮),第 4、5 章及前言、符号、缩略语、光盘目录及 MATLAB 仿真软件指南(练军想),第 6、13 章(潘献飞),第 7~9 章(唐康华)、第 10~12 章(逯亮清),第 14~17 章(李涛),第 18 章(张开东)。练军想还对全部译稿进行了认真的校译,全书由练军想统稿。

Paul D. Groves 专著的翻译出版,将是国内导航学界的一件幸事。感谢独具慧眼的李涛副教授及时发现,并向大家推荐了这本高水平的专著;衷心感谢国防科技大学自动控制系导航技术教研室各位同事的辛勤付出,历时一年有余、累计七百多页,每字每句均力求准确、流畅,实属不易;感谢吴美平教授高校博士点基金的资助。在此,也要衷心感谢国防工业出版社肖志力编辑的大力帮助。我们希望本书的出版,对我国从事导航领域的同仁们有所裨益。

由于时间和水平有限,翻译过程中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

练军想

2014 年 8 月 3 日于长沙

## 关于作者

保罗 D. 格鲁夫(Paul D. Groves)拥有物理学学士学位(一级荣誉生)、硕士学位(牛津郡)和原子与激光实验物理方面的哲学博士学位。上述这些学位都是在牛津大学获得的。自从1997年1月加入防务评估与研究署后,他在导航系统的研究和开发领域表现活跃。在2001年7月QinetiQ Ltd成立时,他又转到QinetiQ Ltd工作。2009年10月,他成为伦敦大学学院讲师(学术系成员),领导一个项目组开展鲁棒定位和导航的研究。

Groves 博士对所有的导航定位技术均感兴趣。曾经对步行导航、道路车辆、飞机、制导武器、舰船、水下无人潜航器等应用开展过相关工作。他是 GNSS 阴影匹配技术的发明者,而且对多项导航技术创新均有贡献,这包括:地形参考导航、视觉导航、AM(调幅)无线电广播定位、各种特征匹配、GNSS 非视线方向接收及多路径干扰的检测等。他还开发了多种算法,这包括:针对各种 INS/GNSS 的组合、多传感器组合、传递对准、准静态对准、零速修正、步行推算、GNSS 载噪比测量、惯性导航等。同时,他在 GNSS 和 IMU 软件仿真方面也有丰富的经验。

Groves 博士是皇家导航学会的会士,服务于该学会的技术及 R&D 小组、NAV 会议委员会,并定期担任 R&D 委员会的秘书和主席。他是导航学会的积极会员,同时也是物理学会的发起人。他担任了专业杂志“Navigation: Journal of the ION”及“IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems”副编辑,而且是多家期刊的审稿人。



# 前 言

本书的主要目的如下:

(1) 既从定性的角度、又从数学的角度,描述全球导航卫星系统(GNSS)、惯性导航、以及其他许多导航定位技术,关注于它们的工作原理、性能指标、以及如何将各种导航技术组合起来的方法;

(2) 提供一种关于导航系统的清晰的、易于接受的介绍,适合于事先没有任何导航基础知识的读者;

(3) 对导航和定位的技术发展水平进行综述,引入新思想的同时,也提供成熟技术的介绍。

本书面向的读者,是工业领域、学术机构和政府部分的专业工程师和科学家,以及学生群体,主要是硕士研究生和博士研究生。本书涵盖了空中、陆地、海洋、水下以及太空领域各类载体的导航,既包含有人驾驶的载体,也包含自主航行的载体,还包括步行导航。本书的内容,也与其他定位应用相关,包括移动测绘、机器控制和车辆测试。

本书一开始,对导航的主要原理做了基础性的介绍,对不同的技术进行了概述。接下来,介绍了坐标系统、姿态表征、多坐标系运动学、地球模型、基于卡尔曼滤波的估计技术等数学基础知识。然后,分别描述了各种不同的导航和定位技术。对于每一种主要技术,都是先解释基本原理,再深入分析技术细节。除了详细阐述 GNSS 技术和惯性导航技术之外,本书还介绍了陆基无线电导航、近程定位、环境特征匹配,以及推算导航技术。其中,推算导航技术包括里程计推算、步行推算(pedestrian dead reckoning, PDR)和多普勒雷达/声纳推算。GPS 和其他的 GNSS 系统一并予以介绍。在本书的最后五章,介绍了惯性导航系统(INS)/GPS 及多传感器组合导航;INS 对准、零速修正和运动约束;故障检测、完好性监测和测试;以及导航的应用。

全书的重点,在于提供一种对导航系统如何工作的理解,而不是具体的工程细节。本书聚焦于各种导航系统所基于的物理原理、如何得出导航结果、如何将它们合理组合、误差的起源和抑制等。后述章节的内容,建立在前述章节的基础之上,包含了详细的交叉索引。

第二版的内容,要比第一版的内容多出 50% 以上,以便有更多的篇幅构筑基本原理、详细探究更多的主题。其中有八章是全新的内容,或者说基本上是重

新撰写的;其余的章节则都进行了修订和扩充。第二版更深入地涵盖了以下内容:地图匹配、基于图像的导航、姿态确定、INS/GNSS 深耦合、声学定位、PDR、较差接收环境中的 GNSS 处理技术以及大量的陆基和近程无线电定位技术,包括超宽带(ultrawideband, UWB)定位。第二版中的新内容,则包括 UKF、粒子滤波、GNSS 阴影匹配、运动约束、场景定位、合作/协同、非完整惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)、系统设计和测试。

还介绍了随书配送的 DVD 光碟。DVD 的内容包括:经过加工的例题(Microsoft Excel 格式)、习题、MATLAB 软件,以及包含附属资料的 11 个附录。



## 致 谢

我要感谢 Artech House 的出版团队,感谢许多针对本书给予我有益意见和建议的人们。特别的感谢,要献给那些对新版的书稿提出建议的人士,包括: Ramsey Faragher, Simon Julier, Naomi Li, Sherman Lo, Bob Mason, Philip Mattos, Washington Ochieng, Alex Parkins, Andrey Soloviev, Toby Webb, Paul Williams, 以及 Artech House 出版机构中匿名的审阅者;感谢对第一版书稿提出建议的人士(名单在第一版中已列)。还要感谢 QinetiQ,允许我再次使用我自己为“组合导航原理”课程撰写的资料。这些内容出现在第 2、第 3 和第 5 章,以脚注的方式标明了 QinetiQ 的版权。最后,我要感谢我的家人、朋友以及同事,谢谢他们的耐心和支持。

# 目 录

第1章 绪论 .....	1	2.1.5 载体坐标系 .....	26
1.1 基本概念 .....	1	2.1.6 其他坐标系 .....	27
1.2 航位推算 .....	5	2.2 姿态、旋转和投影轴系 变换 .....	28
1.3 直接定位 .....	6	2.2.1 欧拉角姿态 表示 .....	30
1.3.1 直接定位方法 .....	6	2.2.2 坐标转换矩阵 .....	32
1.3.2 基于信号的 定位 .....	10	2.2.3 四元数姿态 表示 .....	36
1.3.3 环境特征匹配 .....	12	2.2.4 旋转矢量 .....	38
1.4 导航系统 .....	14	2.3 运动学 .....	39
1.4.1 需求 .....	14	2.3.1 角速度 .....	40
1.4.2 场景 .....	15	2.3.2 笛卡儿位置 .....	42
1.4.3 组合 .....	16	2.3.3 速度 .....	43
1.4.4 辅助 .....	16	2.3.4 加速度 .....	44
1.4.5 协助与协同 .....	17	2.3.5 相对于旋转参考 坐标系的运动 .....	45
1.4.6 故障检测 .....	17	2.4 地球表面形状和重力 模型 .....	47
1.5 本书概要 .....	18	2.4.1 地球表面椭球 模型 .....	48
参考文献 .....	20	2.4.2 曲线坐标系位 置表示 .....	50
第2章 坐标系,运动学和地球 .....	21	2.4.3 位置变换 .....	54
2.1 坐标系 .....	21	2.4.4 大地水准面、 垂线高度和地球 潮汐 .....	56
2.1.1 地心惯性坐 标系 .....	23	2.4.5 投影坐标系 .....	57
2.1.2 地心地固坐 标系 .....	24	2.4.6 地球自转 .....	59
2.1.3 当地导航坐 标系 .....	25		
2.1.4 当地切平面坐 标系 .....	26		

2.4.7	比力、地心引力和重力 .....	59	3.2.7	序贯观测更新 .....	92
2.5	坐标系变换 .....	64	3.3	卡尔曼滤波实现中的问题 .....	93
2.5.1	惯性系和地球系间转换 .....	64	3.3.1	参数调整和算法稳定性 .....	93
2.5.2	地球系和当地导航坐标系间转换 .....	65	3.3.2	算法设计 .....	95
2.5.3	惯性系和当地导航坐标系间转换 .....	66	3.3.3	数值计算问题 .....	97
2.5.4	地球和当地切平面坐标系 .....	66	3.3.4	时间同步 .....	98
2.5.5	导航结果的转换 .....	67	3.3.5	卡尔曼滤波设计过程 .....	101
参考文献	.....	68	3.4	卡尔曼滤波的扩展 .....	101
参考书目	.....	69	3.4.1	扩展和线性化卡尔曼滤波 .....	101
<b>第3章 卡尔曼滤波</b> .....	<b>70</b>		3.4.2	UKF .....	104
3.1	介绍 .....	70	3.4.3	时间相关噪声 .....	106
3.1.1	卡尔曼滤波的要素 .....	71	3.4.4	自适应卡尔曼滤波 .....	107
3.1.2	卡尔曼滤波的流程 .....	73	3.4.5	多假设滤波 .....	108
3.1.3	卡尔曼滤波的应用 .....	74	3.4.6	卡尔曼平滑 .....	111
3.2	算法和模型 .....	75	3.5	粒子滤波 .....	113
3.2.1	定义 .....	75	参考文献	.....	116
3.2.2	卡尔曼滤波算法 .....	79	<b>第4章 惯性传感器</b> .....	<b>118</b>	
3.2.3	系统模型 .....	83	4.1	加速度计 .....	120
3.2.4	观测模型 .....	86	4.1.1	摆式加速度计 .....	121
3.2.5	卡尔曼滤波特性和状态可观测性 .....	89	4.1.2	振梁式加速度计 .....	123
3.2.6	闭环卡尔曼滤波 .....	91	4.2	陀螺仪 .....	124
			4.2.1	光学陀螺 .....	124
			4.2.2	振动陀螺 .....	128
			4.3	惯性测量单元 .....	129
			4.4	误差特性 .....	132
			4.4.1	零偏 .....	133
			4.4.2	比例因子和交叉	

	耦合误差	135		更新	166
4.4.3	随机噪声	137	5.5.4	传感器采样周期和振动的影 响	167
4.4.4	深层误差源	138	5.5.5	折中设计	172
4.4.5	振动导致的误差	140	5.6	初始化和对准	173
4.4.6	误差模型	141	5.6.1	位置和速度初 始化	174
	参考文献	142	5.6.2	姿态初始化	174
<b>第5章</b>	<b>惯性导航</b>	<b>144</b>	5.6.3	精对准	179
5.1	惯性导航介绍	145	5.7	惯性导航系统误差 传播	180
5.2	惯性系导航方程	148	5.7.1	短时间直线运动 误差传播	182
5.2.1	姿态更新	149	5.7.2	中、长时间导航 误差传播	186
5.2.2	比力坐标转 换	150	5.7.3	与机动相关的 误差	190
5.2.3	速度更新	151	5.8	旋转调制 IMU	192
5.2.4	位置更新	151	5.9	非完整 IMU	193
5.3	地球系导航方程	152		参考文献	193
5.3.1	姿态更新	153	<b>第6章</b>	<b>航位推算,姿态和高度 测量</b>	<b>195</b>
5.3.2	比力坐标转 换	153	6.1	姿态测量	195
5.3.3	速度更新	154	6.1.1	地磁定向	195
5.3.4	位置更新	154	6.1.2	航海陀螺罗 经	199
5.4	当地导航系导航方程	155	6.1.3	捷联偏航轴 陀螺	200
5.4.1	姿态更新	155	6.1.4	由轨迹确定 航向	201
5.4.2	比力坐标转 换	157	6.1.5	组合航向确 定	202
5.4.3	速度更新	157	6.1.6	加速度计调平和 倾斜传感器	203
5.4.4	位置更新	158	6.1.7	地平线敏感	
5.4.5	游动方位导航 实现	159			
5.5	导航方程的优化	161			
5.5.1	精确姿态更 新	162			
5.5.2	精确比力坐标转 换	165			
5.5.3	精确速度和位置				

法·····	204	7.3 用户设备·····	250
6.1.8 姿态航向参考 系统·····	205	7.3.1 结构·····	250
6.2 高度和深度测量·····	206	7.3.2 信号的同步测 量·····	251
6.2.1 气压高度计·····	206	7.3.3 基于测距信息 的定位计算·····	253
6.2.2 深度压力传感 器·····	207	7.4 传播、误差源和定位 精度·····	257
6.2.3 雷达高度计·····	208	7.4.1 对流层、电离层和地 面传播影响·····	257
6.3 里程计·····	209	7.4.2 衰减、反射、多路 径和散射·····	259
6.3.1 线性里程计·····	210	7.4.3 分辨率、噪声和跟 踪误差·····	260
6.3.2 差分里程计·····	213	7.4.4 发射机位置和时 间误差·····	262
6.3.3 里程计和非完 整 IMU 组合·····	214	7.4.5 信号几何分布的 影响·····	262
6.4 步行航位推算·····	215	参考文献·····	267
6.5 多普勒雷达和声纳·····	219	<b>第 8 章 GNSS 基本原理、信号及     星座·····</b>	269
6.6 其他航位推算技术·····	223	8.1 卫星导航的基础·····	269
6.6.1 基于相关的速 度测量·····	223	8.1.1 GNSS 的结构·····	270
6.6.2 大气数据·····	223	8.1.2 信号与测距·····	272
6.6.3 船速仪·····	223	8.1.3 定位·····	276
参考文献·····	224	8.1.4 误差源和性能 的限制·····	278
<b>第 7 章 无线电定位原理·····</b>	228	8.2 系统·····	280
7.1 无线电定位的结构 和方法·····	228	8.2.1 全球定位系统 GPS·····	281
7.1.1 自身定位和遥 测定位·····	228	8.2.2 GLONASS·····	282
7.1.2 相对定位·····	230	8.2.3 Galileo·····	282
7.1.3 邻近定位·····	231	8.2.4 “北斗”导航系统 (Beidou)·····	283
7.1.4 测距定位·····	232	8.2.5 区域导航系	
7.1.5 测角定位·····	241		
7.1.6 模式匹配·····	243		
7.1.7 多普勒定位·····	246		
7.2 定位信号·····	247		
7.2.1 调制类型·····	248		
7.2.2 无线电频谱·····	249		

统·····	283	端·····	320
8.2.6 增强系统·····	283	9.1.4 基带信号处	
8.2.7 系统的兼容		理·····	323
性·····	285	9.2 测距处理器·····	334
8.3 GNSS 信号·····	286	9.2.1 捕获·····	334
8.3.1 信号类型·····	287	9.2.2 码跟踪·····	339
8.3.2 全球定位系		9.2.3 载波跟踪·····	344
统 GPS·····	289	9.2.4 跟踪锁定检	
8.3.3 GLONASS·····	292	测·····	350
8.3.4 Galileo·····	293	9.2.5 导航电文解	
8.3.5 北斗·····	296	调·····	351
8.3.6 区域导航系		9.2.6 载波功率噪声密	
统·····	296	度比测量值·····	352
8.3.7 增强系统·····	297	9.2.7 伪距、伪距率及载波	
8.4 导航电文信息·····	297	相位测量值·····	352
8.4.1 GPS·····	298	9.3 测距误差源·····	354
8.4.2 GLONASS·····	299	9.3.1 星历预测和卫星	
8.4.3 Galileo·····	299	时钟误差·····	355
8.4.4 SBAS·····	300	9.3.2 电离层和对流层	
8.4.5 时间基准同		传播误差·····	356
步·····	300	9.3.3 跟踪误差·····	360
8.5 卫星轨道和几何分布·····	300	9.3.4 多路径、非视线	
8.5.1 卫星的轨道·····	301	和衍射·····	365
8.5.2 卫星位置和速		9.4 导航处理器·····	370
度·····	303	9.4.1 单点导航定位	
8.5.3 距离、距离率		解算·····	372
及视线矢量·····	309	9.4.2 滤波的导航定	
8.5.4 仰角和方位		位解算·····	376
角·····	313	9.4.3 信号的几何分	
参考文献·····	314	布和导航定位	
<b>第9章 GNSS:用户设备信号处理和</b>		解精度·····	387
<b>误差·····</b>	<b>317</b>	9.4.4 定位误差预	
9.1 接收机硬件及天线·····	318	算·····	392
9.1.1 天线·····	318	参考文献·····	394
9.1.2 参考晶振·····	319	<b>第10章 卫星导航先进技术·····</b>	<b>398</b>
9.1.3 接收机的前		10.1 差分GNSS·····	398

10.1.1	GNSS 误差的空间 与时间相关	399	10.4.1	天线技术	418
10.1.2	局域和区域 DGNSS	399	10.4.2	接收机技术	418
10.1.3	广域 DGNSS 与精 密单点定位	401	10.4.3	导航处理器技 术	419
10.1.4	相对 GNSS	401	10.5	辅助、协助与轨道预 测	420
10.2	动态实时载波相位 定位与定姿	402	10.5.1	捕获辅助与速度 辅助	421
10.2.1	距离增量累积观测 定位原理	403	10.5.2	辅助的 GNSS	422
10.2.2	利用双差 ADR 进行单历元导 航解算	406	10.5.3	轨道预报	422
10.2.3	基于几何的整周 模糊度解算	407	10.6	阴影匹配	423
10.2.4	多频整周模糊 度解算	408	参考文献	424	
10.2.5	GNSS 姿态确 定	409	<b>第 11 章 中远程无线电导航</b>	431	
10.3	干扰抑制与弱信号 处理	411	11.1	航空导航系统	431
10.3.1	干扰源、干扰 与衰减	411	11.1.1	距离测量设 备	431
10.3.2	天线系统	412	11.1.2	距离 - 方位系 统	436
10.3.3	接收机前端滤 波	413	11.1.3	全向信标	438
10.3.4	扩展距离跟 踪	413	11.1.4	JTIDS/MIDS 相 对导航	438
10.3.5	接收机敏感 性	414	11.1.5	未来航空导航 系统	438
10.3.6	联合捕获与跟 踪	415	11.2	增强型罗兰	439
10.3.7	矢量跟踪	415	11.2.1	信号	439
10.4	多径干扰抑制与非视 线接收	417	11.2.2	用户设备与定 位	441
			11.2.3	误差源	443
			11.2.4	差分罗兰	444
			11.3	手机定位	445
			11.3.1	邻近与模式匹 配	446
			11.3.2	测距	446
			11.4	其他系统	447
			11.4.1	铱星定位	447



11.4.2	航海无线电信 标 .....	448	12.5.3	红外 .....	466
11.4.3	AM(调幅)无 线电广播 .....	448	12.5.4	光学 .....	466
11.4.4	FM(调频)无 线电广播 .....	449	12.5.5	磁 .....	466
11.4.5	数字电视与广 播 .....	449	参考文献 .....		467
11.4.6	通用无线电定 位 .....	450	<b>第 13 章 环境特征匹配</b> .....		
参考文献 .....		450	13.1	地图匹配 .....	472
<b>第 12 章 近距离定位</b> .....		454	13.1.1	数字公路地 图 .....	473
12.1	伪卫星 .....	454	13.1.2	道路路段识 别 .....	473
12.1.1	带内伪卫星 .....	454	13.1.3	道路定位 .....	478
12.1.2	Locata 与 Terralite XPS .....	455	13.1.4	铁路地图匹 配 .....	479
12.1.3	室内消息系 统 .....	455	13.1.5	行人地图匹 配 .....	479
12.2	超宽带 .....	455	13.2	地形参考导航 .....	481
12.2.1	调制方案 .....	457	13.2.1	序贯处理 .....	482
12.2.2	信号对时 .....	458	13.2.2	批处理 .....	483
12.2.3	定位 .....	459	13.2.3	性能 .....	485
12.3	近距离通信系统 .....	460	13.2.4	激光 TRN .....	486
12.3.1	无线局域网 (Wi-Fi) .....	460	13.2.5	声纳 TRN .....	487
12.3.2	无线私人区域 网络 .....	461	13.2.6	气压 TRN .....	487
12.3.3	射频识别 .....	462	13.2.7	地形数据库高 度辅助 .....	487
12.3.4	低功耗蓝牙 .....	462	13.3	基于图像的导航 .....	488
12.3.5	专用近距离通 信 .....	463	13.3.1	图像传感器 .....	489
12.4	水下声学定位 .....	463	13.3.2	图像特征比 较 .....	491
12.5	其他定位技术 .....	465	13.3.3	用单个特征的 位置修正 .....	493
12.5.1	无线电 .....	465	13.3.4	整体图像匹配的 位置修正 .....	495
12.5.2	超声 .....	466	13.3.5	视觉里程计 .....	496
			13.3.6	特征跟踪 .....	497
			13.3.7	恒星导航 .....	498

13.4 其他特征匹配技术.....	499	14.3 测量模型.....	540
13.4.1 重力梯度测		14.3.1 松耦合组合导	
量 .....	500	航 .....	542
13.4.2 地磁场异常 ...	501	14.3.2 紧耦合组合导	
13.4.3 太空 X 射线		航 .....	545
源 .....	501	14.3.3 深耦合组合导	
参考文献.....	502	航 .....	549
<b>第 14 章 INS/GNSS 组合</b>		14.3.4 姿态与仪表误差	
<b>导航.....</b>	<b>507</b>	的估计 .....	556
14.1 组合结构.....	509	14.4 关于 INS/GNSS 组合的进	
14.1.1 惯性导航参数		一步讨论.....	557
校正 .....	509	14.4.1 差分 GNSS ...	557
14.1.2 松耦合组合导		14.4.2 载波相位定	
航 .....	513	位 .....	557
14.1.3 紧耦合 .....	514	14.4.3 GNSS 姿态.....	559
14.1.4 GNSS 辅助.....	515	14.4.4 大航向角误	
14.1.5 深组合 .....	518	差 .....	561
14.2 系统模型与状态		14.4.5 IMU 高级误差	
选择.....	520	建模 .....	562
14.2.1 状态选择与可		14.4.6 平滑 .....	563
观性 .....	520	参考文献.....	563
14.2.2 惯性系中的 INS 误		<b>第 15 章 INS 对准、零速修正与</b>	
差状态传播 ...	523	<b>运动约束.....</b>	<b>568</b>
14.2.3 地球系中的 INS 误		15.1 传递对准.....	568
差状态传播 ...	527	15.1.1 传统测量匹	
14.2.4 当地导航坐标系下		配 .....	570
的 INS 误差状		15.1.2 快速传递对	
态传播 .....	529	准 .....	572
14.2.5 附加的 IMU 误		15.1.3 参考导航系	
差状态 .....	533	统 .....	573
14.2.6 INS 系统噪		15.2 准静态对准.....	574
声 .....	534	15.2.1 粗对准 .....	574
14.2.7 GNSS 状态传播与		15.2.2 精对准 .....	576
系统噪声 .....	537	15.3 零速修正.....	577
14.2.8 状态初始化 ...	538	15.3.1 静止检测 .....	578