

惯性/天文/卫星 组合导航技术

INS/CNS/GNSS Integrated
Navigation Technology



全伟 刘百奇 宫晓琳 房建成 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

全 伟 刘百奇 宫晓琳 房建成 著

惯性/天文/卫星组合 导航技术

INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Technology

Introduction

Working Principles of INS, GNSS and CNS

Filters in Navigation System

Modeling and Calibration of INS and The High Dynamic Strapdown Inertial Algorithm

INS/GNSS Integrated Navigation Method

INS/CNS Integrated Navigation Method

INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Method

Study on Real-time Ability of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Method

Semi-physical Simulation Technology of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation

Prospect of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Technology



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

惯性、天文、卫星组合导航技术/全伟等著. —北京:
国防工业出版社, 2011. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 07404 - 8

I. ①惯... II. ①全... III. ①组合导航 - 研究
IV. ①TN967. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 042656 号

惯性/天文/卫星组合导航技术

著 者 全 伟 刘百奇 宫晓琳 房建成
责 任 编 辑 王 华
出 版 发 行 国防工业出版社(010 - 68428422 010 - 68472764)
地 址 邮 编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号, 100048
经 售 新华书店
印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
开 本 710 * 960 1/16
印 张 21¼
印 数 1 - 3000 册
字 数 300 千字
版 印 次 2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

定 价 86.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致读者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题

和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委员（按姓氏笔画排序）

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参 李德毅

杨星豪 吴有生 何新贵 佟玉民 宋家树

张立同 张鸿元 陈冀胜 周一宇 赵凤起

侯正明 常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

前 言

高精度、高可靠性、强自主性的导航系统,能够为各种运动体及运载体提供高精度的运动参数信息,是实现其准确航行的前提,也是发展精确制导技术的基础。目前,航空航天领域中常用的导航手段主要有惯性导航、卫星导航和天文导航,但它们在应用中各有其优缺点。惯性导航的优点是全自主、可连续提供全部运动参数,短时精度高;其缺点是误差随工作时间积累。卫星导航能全天时、全天候提供误差不随时间积累的高精度位置和速度信息,但难以直接提供姿态信息且易被干扰。天文导航能提供姿态和位置信息,误差不随时间积累,但受天气条件限制且位置精度不高。因而,单独一种导航手段难以满足远程战略导弹、舰艇、远程轰炸机及长航时无人侦察机长时间高精度导航的要求。惯性/天文/卫星组合导航系统可充分利用各导航子系统之间优势互补的特点,大大提高导航系统的精度和可靠性,已成为实现精确定位导航的有效手段,一直是导航技术领域的研究重点和热点。

本书是作者所在研究团队十多年来完成的十几项相关科研课题所取得研究成果的基础上,并参考国内外组合导航技术领域的最新研究成果撰写而成。全书共分 10 章。第 1 章主要介绍了惯性/天文/卫星组合导航的历史与现状;第 2 章介绍了惯性、卫星、天文这三个导航系统的工作原理及其误差特性分析;第 3 章主要介绍了导航系统中常用的 Unscented 卡尔曼滤波、Unscented 粒子滤波、预测滤波等先进滤波方法;第 4 章主要介绍了陀螺仪误差建模、测试与补偿,捷联惯性测量单元的标定方法以及高动态捷联惯性导航系统算法等;第 5 章至第 8 章是本书的重点内容,其中,第 5 章介绍了惯性/卫星组合导航系统的原理与建模方法,高精度和微小型、低成本的惯性/卫星组合导航方法以及机载 SAR 成像运动补偿用惯性/卫星组

合导航系统;第6章介绍了惯性/天文组合导航系统的原理与建模方法,导弹、月球车的惯性/天文组合导航新方法以及卫星的惯性/天文组合定姿方法;第7章介绍了惯性/天文/卫星组合导航系统的基本原理、组合模式与建模方法,基于联邦UKF、优化信息分配因子的联邦滤波、衰减因子卡尔曼滤波以及多模自适应滤波的惯性/天文/卫星组合导航新方法;第8章介绍了PWCS可观测性分析理论与方法,利用改进可观测度分析理论,提高惯性/天文、惯性/卫星、惯性/天文/卫星组合导航系统实时性的方法,以及惯性/天文/卫星组合导航算法的优化方法;第9章主要介绍了惯性/天文/卫星组合导航的半物理仿真系统的原理、组成、实现与实验;第10章对惯性/天文/卫星组合导航技术未来的发展趋势进行了展望。

本书系统性强、观点新颖、理论联系实际,可供从事导航与制导技术研究的工程技术人员参考,也可作为高等学校相关专业研究生和高年级本科生的教材或教学参考书。惯性/天文/卫星组合导航技术涉及多门学科前沿,内容较新,作者水平有限,难免存在不足之处,恳请各位专家和广大读者批评指正。

这里,要特别感谢房建成教授的悉心指导、大力支持和热心帮助,他对本书提出了许多方向性的建议和具体修改意见;感谢俞文伯副教授、钟麦英教授,他们校对了本书大部分章节的内容,并对本书提出了许多很好的建议;感谢徐帆博士、曹娟娟博士、宁晓琳博士、李建利博士、捷木思·阿里博士、耿延睿博士、杨胜博士、张霄博士、张海鹏博士、孙宏伟博士,他们先后参加了本书部分内容的编写和校对工作;感谢李艳华、吴海仙、林敏敏、张瑜、王子亮、于延波、沈忠、郭恩志、谭丽伟等同学;感谢“新型惯性仪表与导航系统技术”国防重点学科实验室和“新型惯性仪表与系统技术”教育部长江学者创新团队给予的大力支持和帮助。此外,本书部分内容还参考了国内外同行专家、学者的最新研究成果,在此一并向他们致以诚挚的谢意!

感谢国防科技图书出版基金、国防工业出版社在本书出版过程中给予的大力支持,感谢北京航空航天大学在科研工作中给予的支持和帮助。最后感谢在本书撰写过程中所有给予关心、支持和帮助的人们!

作者

2010年1月于北京航空航天大学

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1	Chapter 1 Introduction	1
参考文献	7	References	7
第 2 章 惯性、卫星和天文导航系统工作原理	9	Chapter 2 Working Principles of INS, GNSS and CNS	9
2.1 引言	9	2.1 Introduction	9
2.2 导航中常用的坐标系及地球参考模型	9	2.2 Coordinates Systems and The Earth Model in Navigation	9
2.2.1 导航中常用的坐标系	9	2.2.1 Coordinates Systems in Navigation	9
2.2.2 坐标系的转换	11	2.2.2 Coordinates Frame Transformation	11
2.2.3 地球参考模型	14	2.2.3 Earth Model	14
2.3 惯性导航系统	18	2.3 Inertial Navigation System	18
2.3.1 惯性导航系统工作原理	18	2.3.1 Working Principles of INS	18
2.3.2 捷联惯性导航系统误差方程与误差传播特性	21	2.3.2 Error Models and Error Propagation Characteristics of INS	21
2.4 卫星导航系统	28	2.4 Global Navigation Satellite System	28
2.4.1 卫星导航系统工作原理	28	2.4.1 Working Principles of GNSS	28
2.4.2 卫星导航系统误差特性分析	30	2.4.2 Error Analysis of GNSS	30
2.5 天文导航系统	32	2.5 Celestial Navigation System	32
2.5.1 自主天文定位原理	33	2.5.1 Principles of Positioning	33
2.5.2 天文定姿原理	40	2.5.2 Principles of Attitude Determination	40
2.5.3 天文导航系统中的恒星敏感器及其误差特性分析	42	2.5.3 Star Sensors in Celestial Navigation System and Its Error Characteristics	42

参考文献	46	References	46
第3章 导航系统的先进滤波方法	49	Chapter 3 Filters in Navigation System	49
3.1 引言	49	3.1 Introduction	49
3.2 卡尔曼滤波	50	3.2 Kalman Filter	60
3.3 扩展卡尔曼滤波	52	3.3 Extended Kalman Filter	52
3.4 Unscented 卡尔曼滤波	56	3.4 Unscented Kalman Filter	56
3.5 粒子滤波	58	3.5 Particle Filter	58
3.6 Unscented 粒子滤波	60	3.6 Unscented Partical Filter	60
3.7 预测滤波	61	3.7 Predictive Filter	61
3.8 联邦滤波	64	3.8 Federal Filter	64
参考文献	66	References	66
第4章 捷联惯性导航系统建模标定方法及高动态捷联算法	69	Chapter 4 Modeling and Calibration of INS and The High Dynamic Strapdown Inertial Algorithm	69
4.1 引言	69	4.1 Introduction	69
4.2 陀螺仪误差建模、测试与补偿	70	4.2 Error Modeling, Testing and Compensation of Inertial Sensors	70
4.2.1 陀螺仪误差模型	70	4.2.1 Error Models of Gyroscopes	70
4.2.2 陀螺仪标度因数与输入轴失准角的解耦测试方法	72	4.2.2 Test Method of Decoupling Gyro Scale Factors and Input Axis Misalignment Angle	72
4.2.3 陀螺仪标度因数误差分析及分段插值补偿方法	76	4.2.3 Error Analysis of Gyroscope Scale Factors and Its Piecewise Interpolation Compensatory Method	76
4.2.4 硅 MEMS 陀螺仪温度误差建模	80	4.2.4 Temperature Error Modeling of Silicon Mems Gyroscope	80
4.3 捷联惯性测量单元的标定方法	82	4.3 Inertial Measurements Units Calibration	82
4.3.1 动静结合的混合标定方法	83	4.3.1 Calibration Combing Dynamic and Static Methods	83
4.3.2 低精度 MIMU 六位置正反转标定方法	90	4.3.2 Reversible Six Positions Calibration Method for Low Accuracy MIMU	90

4.3.3	基于神经网络的MIMU 标度因数误差补偿 方法	94	4.3.3	Error Compensation Method for Scale Factor of MIMU Based on Neural Network	94
4.4	高动态捷联惯性导航系统算法	102	4.4	High Dynamic Strapdown Inertial Algorithm	102
4.4.1	圆锥运动分析及圆锥 误差补偿算法评价 准则	103	4.4.1	The Analysis of Cone Motion and Evaluation Criterion of Cone Compensation Algorithm	103
4.4.2	一种改进的单子样的 旋转矢量姿态算法	104	4.4.2	A New Attitude Determination Algorithm Using Improved Single- Subsample Rolling Vector	104
参考文献		112	References		112
第5章	惯性/卫星组合导航方法	116	Chapter 5	INS/GNSS Integrated Navigation Method	116
5.1	引言	116	5.1	Introduction	116
5.2	惯性/卫星组合导航原理	117	5.2	Principles of INS/GNSS Integrated Navigation	117
5.2.1	惯性/卫星组合导航 组合模式	117	5.2.1	Integrated Modes of INS/CNS Integrated Navigation	117
5.2.2	惯性/卫星组合导航 基本原理	118	5.2.2	Principles of INS/GNSS Integrated Navigation	118
5.3	惯性/卫星组合导航系统的 建模方法	120	5.3	Modeling of INS/GNSS Integrated Navigation	120
5.3.1	基于 Φ 角的惯性/卫星 组合导航系统线性 建模方法	120	5.3.1	Linear Modeling Method Based on Φ Angle	120
5.3.2	基于四元数误差的惯性/ 卫星组合导航系统非 线性建模方法	123	5.3.2	Nonlinear Modeling Method Based on Quaternion Error	123
5.4	高精度惯性/卫星组合导航 方法	129	5.4	High Accuracy INS/GNSS Integrated Navigation Method	129
5.4.1	基于混合校正的惯性/ 卫星组合导航方法	130	5.4.1	SINS/GNSS Integrated Navigation Method Based on Mixed Correction	130
5.4.2	基于可观测度归一化 处理方法的自适应反馈 校正滤波方法	133	5.4.2	Adaptive Feed-Back Filter Based on Observability Normalization	133

5.4.3	基于卡尔曼滤波新息正交性的惯性/卫星抗野值组合导航方法	137	5.4.3	SINS/GNSS Integrated Navigation Method Based on Kalman Filtering Orthogonality of Innovation for Restraining Outliers	137
5.4.4	基于可观测度分析与杆臂误差补偿的空中机动对准方法	140	5.4.4	A New In-flight Alignment Method Based on Observability Analysis and Level-arm Error Compensation	140
5.5	微小型、低成本惯性/卫星组合导航方法	144	5.5	Micro-low Cost INS/GNSS Integrated Navigation Method	144
5.5.1	基于 UKF 的微小型、低成本惯性/卫星组合导航方法	145	5.5.1	Low Cost INS/GNSS Integrated Navigation Method Based on UKF	145
5.5.2	大失准角下惯性/卫星组合导航系统的空中机动对准方法	146	5.5.2	The In-flight Alignment Method of INS/GNSS Integrated Navigation System in Big Misalignment Angle	146
5.5.3	基于微惯性测量单元/磁强计的组合导航方法	150	5.5.3	The Integrated Navigation Method Based on IMU/Magnetometer	150
5.6	机载 SAR 成像运动补偿用惯性/卫星组合导航系统	161	5.6	INS/GNSS Integrated Navigation System in Motion Compensation System for Airborne SAR Imaging	161
5.6.1	机载 SAR 成像运动补偿用惯性/卫星组合导航系统原理	161	5.6.1	Principle of INS/GNSS Integrated Navigation System	161
5.6.2	机载惯性/卫星组合导航系统设计与实现	162	5.6.2	INS/GNSS Integrated Navigation System Design and Implementation	162
5.6.3	机载 SAR 成像运动补偿用惯性/卫星组合导航系统试验	166	5.6.3	INS/GNSS Integrated Navigation Experiments	166
	参考文献	172		References	172
第 6 章 惯性/天文组合导航方法			Chapter 6 INS/CNS Integrated Navigation Method		
6.1	引言	176	6.1	Introduction	176
6.2	惯性/天文组合导航基本原理	177	6.2	Principles of INS/CNS Integrated Navigation	177

6.2.1	惯性/天文组合导航系统的工作模式	177	6.2.1	Working Modes of INS/CNS Integrated Navigation System	177
6.2.2	惯性/天文组合导航系统的组合方式	179	6.2.2	Integrated Modes of INS/CNS Integrated Navigation System	179
6.2.3	基于天文量测信息的惯性器件误差修正原理	180	6.2.3	Correction of Inertial Sensor Errors Employing Celestial Information	180
6.3	惯性/天文组合导航系统建模方法	181	6.3	Modeling of INS/CNS Integrated Navigation System	181
6.3.1	惯性/天文组合导航系统状态方程	181	6.3.1	State Equations	181
6.3.2	惯性/天文组合导航系统量测方程	183	6.3.2	Measurement Equations	183
6.4	弹道导弹惯性/天文组合导航新方法	184	6.4	New INS/CNS Integrated Method for Missile	184
6.4.1	基于天文量测信息的导弹发射点初始位置误差校正原理	184	6.4.1	Correction of The Emission Point Position Error Based on The Celestial Information	184
6.4.2	基于 UKF 的弹道导弹惯性/天文组合导航方法	185	6.4.2	INS/CNS Integrated Navigation Method Based on UKF	185
6.5	月球车的惯性/天文组合导航方法	189	6.5	INS/CNS Integrated Navigation Method for Lunar Rover	189
6.5.1	月球车的捷联惯性导航方法	190	6.5.1	Strapdown Inertial Navigation Method for Lunar Rover	190
6.5.2	一种基于 UPF 的月球车惯性/天文组合导航方法	190	6.5.2	SINS/CNS Integrated Navigation Method for Lunar Rover Based on UPF	190
6.6	卫星的惯性/天文组合定姿方法	195	6.6	INS/CNS Integrated Attitude Determination Method for Satellites	195
6.6.1	卫星定姿系统方程	195	6.6.1	System Equations of Attitude Determination System for Spacecrafts	195
6.6.2	一种基于 EKF 的分段信息融合的惯性/天文组合定姿方法	197	6.6.2	SINS/CNS Integrated Attitude Determination Method Based on EKF and Sectional Information Fusion	197

6.6.3 基于 UKF 的卫星最小参数姿态矩阵估计方法	201	6.6.3 Estimation Method for Satellite Minimal Parameter Attitude Matrix Based on UKF	201
6.6.4 一种基于 QUEST + UKF + 最优 REQUEST 的自适应分段信息融合定姿方法	206	6.6.4 An Adaptive Segmented Information Fusion Attitude Determination Method Based on QUEST + UKF + Optimal Request	206
参考文献	212	References	212
第 7 章 惯性/天文/卫星组合导航方法	215	Chapter 7 INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Method	215
7.1 引言	215	7.1 Introduction	215
7.2 惯性/天文/卫星组合导航原理	216	7.2 Principles of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation	216
7.2.1 惯性/天文/卫星组合导航基本原理	216	7.2.1 Basic Principles of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation	216
7.2.2 惯性/天文/卫星组合导航的组合模式	216	7.2.2 Integrated Modes of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation System	216
7.2.3 惯性/天文/卫星组合导航系统的建模	221	7.2.3 System Modeling of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation System	221
7.3 基于联邦 UKF 的惯性/天文/卫星组合导航方法	222	7.3 INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Method Based on Federal UKF Filter	222
7.4 基于优化信息分配因子的联邦滤波惯性/天文/卫星组合导航方法	225	7.4 INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Method Based on Federal Filter With Optimal Information Distribution factor	225
7.4.1 联邦滤波方程及信息分配过程	226	7.4.1 Federal Filter Equations and Process of Information Distribution	226
7.4.2 基于信息分配因子优化的联邦滤波惯性/天文/卫星组合导航方法	227	7.4.2 The SINS/CNS/GNSS Integrated Navigation Federal Filter Method Based on The Optimized Information Distribution Factor	227
7.4.3 基于遗传算法优化信息分配因子的联邦滤波惯性/天文/卫星组合导航方法	228	7.4.3 The SINS/CNS/GNSS Integrated Navigation Federal Filter Method Based on The Information Distribution Factor Optimized by Genetical Algorithm	228

7.5 一种基于衰减因子卡尔曼滤波的 惯性/天文/卫星组合导航方法	234	7.5 INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Methods Based on Fading Factor	234
7.5.1 状态方程与量测方程	234	7.5.1 State Equations and Measurement Equations	234
7.5.2 一种新的衰减因子自适应 滤波器	235	7.5.2 A New Adaptive Filter Based on Fading Factor	235
7.5.3 基于新的衰减因子自适应 滤波的惯性/天文/卫星 组合导航方法	238	7.5.3 SINS/CNS/GNSS Integrated Navigation Based on New Adaptive Filter	238
7.6 基于多模型自适应滤波的惯性/ 天文/卫星组合导航方法	240	7.6 The SINS/CNS/GNSS Integrated Navigation Based on Multimode Adaptive Kalman Filter	240
7.6.1 基于递归型交互式多模型 自适应滤波的惯性/天文/ 卫星的组合导航方法	241	7.6.1 The SINS/CNS/GNSS Integrated Navigation Based on Recursive Interactive Multimode Adaptive Kalman Filter	241
7.6.2 基于遗传多模型自适应滤波 的惯性/天文/卫星组合 导航方法	246	7.6.2 The SINS/CNS/GNSS Integrated Navigation Based on Genetic Algorithm Multimode Adaptive Kalman Filter	246
参考文献	250	References	250
第8章 惯性/天文/卫星组合导航 方法的实时性研究	252	Chapter 8 Study on Real-time Ability of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Method	252
8.1 引言	252	8.1 Introduction	252
8.2 分段线性定常系统可观性分析 理论与方法	253	8.2 Observability Analysis Method	253
8.2.1 分段线性定常系统可观 性分析理论	253	8.2.1 The Principle of PWCS Observability Analysis	253
8.2.2 一种改进的基于奇异值 分解的系统状态可观测 度分析方法	257	8.2.2 An Observability Analysis Based on Improved Singular Value Decomposition	257
8.3 基于改进可观测度分析的惯性/ 天文组合导航系统降维 滤波器设计	259	8.3 The Design of Dimensionality Reduction Filter Based on Improved Observability Analysis for SINS/CNS Integrated Navigation	259
8.4 基于改进可观测度分析的惯性/ 卫星组合导航系统降维 滤波器设计	263	8.4 The Design of Dimensionality Reduction Filter Based on Improved Observability Analysis for SINS/GNSS Integrated Navigation	263

8.5 基于降维滤波的惯性/天文/卫星组合导航系统联邦滤波器设计	267	8.5 The Design of Federal Filter Based on Dimensionality Reduction Filter for SINS/CNS/GNSS Integrated Navigation	267
8.6 一种惯性/天文/卫星组合导航算法的优化方法	271	8.6 An Optimal Method for SINS/CNS/GNSS Integrated Navigation	271
参考文献	275	References	275
第9章 惯性/天文/卫星组合导航半物理仿真系统	277	Chapter 9 Semi-physical Simulation Technology of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation	277
9.1 引言	277	9.1 Introduction	277
9.2 惯性/天文/卫星组合导航半物理仿真系统原理与组成	278	9.2 Principles of Hybrid Simulation of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation	278
9.2.1 惯性/天文/卫星组合导航半物理仿真系统原理	278	9.2.1 Principles of Semi-physical Simulation of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation	278
9.2.2 惯性/天文/卫星组合导航半物理仿真系统组成	280	9.2.2 Compositions of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation System	280
9.3 惯性/天文/卫星组合导航半物理仿真系统的实现与试验	294	9.3 Implementations and Experiments of Semi-physical INS/CNS/GNSS Integrated Navigation System	294
9.3.1 惯性/天文/卫星组合导航半物理仿真系统的实现	295	9.3.1 Implementations of Semi-physical INS/CNS/GNSS Integrated Navigation System	295
9.3.2 惯性/天文/卫星组合导航半物理仿真系统的试验	303	9.3.2 Experiments of Semi-physical INS/CNS/GNSS Integrated Navigation System	303
参考文献	305	References	305
第10章 惯性/天文/卫星组合导航技术展望	307	Chapter 10 Prospect of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Technology	307
10.1 组合导航技术的发展与展望	307	10.1 Development and Prospect of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation	307
10.1.1 惯性/天文/卫星组合导航系统的精确建模技术	307	10.1.1 Accurate Modeling of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation System	307
10.1.2 惯性/天文/卫星组合导航系统的信息融合与先进滤波方法	308	10.1.2 Information Fusion and Advanced Filters in INS/CNS/GNSS Integrated Navigation System	308

10.1.3	基于先进控制理论的 惯性/天文/卫星组合 导航方法	309	10.1.3	Advanced Control Theories in INS/CNS/GNSS Integrated Navigation System	309
10.1.4	基于集成一体化的惯性/ 天文/卫星组合导航 系统技术	312	10.1.4	INS/CNS/GNSS Integrated Navigation System Technology Based on Integration Technology	312
10.1.5	惯性/天文/卫星组合 导航技术的应用	312	10.1.5	Applications of INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Technology	312
10.2	结束语	313	10.2	Summary	313
	参考文献	314		References	314