

卫星定位与导航系列丛书

WILEY

GNSS 惯性导航组合

(第3版) Global Navigation Satellite Systems,
Inertial Navigation, and Integration
Third Edition

- [美] Mohinder S. Grewal
Angus P. Andrews 著
Chris G. Bartone
- 陈 军 余金峰 纪学军 等译
- 高晓滨 主审



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

卫星定位与导航系列丛书

GNSS 惯性导航组合

(第3版)

Global Navigation Satellite Systems,
Inertial Navigation, and Integration

[美] Mohinder S. Grewal

Angus P. Andrews 著

Chris G. Bartone

陈军 余金峰 纪学军 安新源 孙吉 赵彬 云超 译

高晓滨 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了全球导航卫星系统 (GNSS)、惯性导航系统 (INS) 及两种导航系统的组合应用等方面的内容。书中首先详细介绍了卫星导航和惯性导航的基本知识; 然后, 对卫星导航的信号结构特征、天线和接收机设计、数据误差及差分 GNSS 等内容进行了细致分析; 接着, 作为卫星导航和惯性导航组合应用的黏合剂, 书中对卡尔曼滤波进行了深入阐述; 最后, 在对惯性导航系统误差进行了深入分析之后, 系统研究了 GNSS/INS 组合的原理及数学建模、性能分析等内容。此外, 书中还包含了 GPS 现代化、卫星导航增强系统的新发展、卫星系统信号完好性、相关处理的 MATLAB 仿真软件介绍, 以及坐标系统及其变换等内容。

本书可作为高等院校全球导航卫星系统 (GNSS) 技术专业的课程教材, 也可作为 GNSS、INS 和卡尔曼滤波理论及应用领域工程技术人员和科研人员的自学参考书。

Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration, Third Edition 978-1-118-44700-0
Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, and Chris G. Bartone

Copyright© 2013 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved Published by John Wiley & Sons, Inc.,
Hoboken, New Jersey Published simultaneously in Canada

All rights reserved. This translation published under license.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

本书中文简体中文字版专有翻译出版版权由美国 John Wiley & Sons, Inc. 公司授予电子工业出版社。未经许可, 不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2013-4134

图书在版编目 (CIP) 数据

GNSS 惯性导航组合: 第3版 / (美) 格雷瓦尔 (Grewal, M.S.), (美) 安德鲁斯 (Andrews, A.P.), (美) 巴托尼 (Bartone, C.G.) 著; 陈军等译. —北京: 电子工业出版社, 2016.1

(卫星定位与导航系列丛书)

书名原文: Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration

ISBN 978-7-121-27875-4

I. ①G… II. ①格… ②安… ③巴… ④陈… 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 (2015) 第 307488 号

策划编辑: 宋 梅

责任编辑: 韩玉宏

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 29.75 字数: 761.6 千字

版 次: 2016 年 1 月第 1 版 (原著第 3 版)

印 次: 2016 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 88.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系电话: (010) 68279077; 邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

出版说明

对定位和导航的需求伴随着人类文明的发展史,进入 21 世纪以来,人类社会对这种需求却从未像今天这样迫切。定位和导航技术在国防和军事上的重要性不言而喻,同时在民用领域也已经展现了巨大的应用前景和广阔的商业市场,势必在不远的将来改变我们每个人的思维方式和生活习惯。随着现代科学技术的发展,尤其是通信、航天和半导体技术的飞速发展,基于卫星的无线电导航系统已经成为目前主流的定位和导航系统的系统架构。目前,全世界已经投入运行的卫星定位和导航系统有美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS,正在发展的有欧盟的伽利略系统和中国的北斗卫星导航系统。从系统构成的角度分析,基于卫星的定位和导航系统主要由空间卫星网络、地面控制中心和用户终端构成;从技术的角度分析,卫星定位和导航系统包括卫星姿态控制、卫星通信、原子钟技术、控制理论、微电子技术、系统状态参数估计和测绘测量等诸多现代科技分支。总体而言,基于卫星的定位和导航系统是现代科技多分支的有机结合,体现了一个国家的综合技术实力,是当前世界大国和主要利益集团之间竞相发展和竞争的热点科技领域。

在这样的背景下,为了推进祖国卫星定位和导航技术的快速发展,同时共享世界上已经成熟的相关理论和应用,我们携手业界知名专家和相关技术人员,借鉴了在学术界和工业界都已经成熟的卫星定位和导航理论,注重实际经验的总结与提炼,策划出版了这套面向 21 世纪的“卫星定位与导航系列丛书”。本套丛书中除了有国内专家、学者创作的技术专著外,还包括我们精挑细选从国外引进的一些精品图书。丛书的作、译者都是当今站在卫星定位和导航技术前沿的专家、学者及相关技术人员,丛书凝聚了他们在理论研究和实践工作中的大量经验和体会,以及电子工业出版社编辑的心血和汗水。丛书立足于卫星定位和导航系统中所涉及的最新和成熟技术,以实用性、工具性、可读性强为特色,注重读者在实际工作和学习中关心的问题,涵盖了从初学者到具有一定水平的工程技术人员和学术研究人员不同需求,对卫星定位和导航技术的基本概念、多学科的技术细节和实现,以及未来技术展望进行了深入浅出的翔实论述。其宗旨是将卫星定位和导航技术中最实用的知识、最经典的技术应用奉献给业界的广大读者,使读者通过阅读本套丛书得到某种启示,在日常工作中有所借鉴。

本套丛书的读者定位于卫星定位和导航相关产业的工程技术人员、技术管理人员,高等院校相关专业的高年级本科生、研究生,以及所有对卫星定位和导航技术感兴趣的人。

在本套丛书的编辑出版过程中,我们得到了业界许多专家、学者的鼎力相助,丛书的作、译者为之付出了大量的心血,对此,我们表示衷心感谢!同时,也热切欢迎广大读者

对本套丛书提出宝贵意见和建议,或推荐其他优秀的选题(E-mail: mariams@phei.com.cn),以帮助我们在未来的日子里,为广大读者及时推出更多、更好的卫星定位和导航技术类优秀图书。

电子工业出版社
2015 年 12 月

译者序

导航是保障人类交通及军事活动的重要手段。从 19 世纪中期开始,惯性导航技术经历 100 多年的时间,目前已发展成为一种涉及多学科的综合性尖端技术。卫星导航从 20 世纪 60 年代出现后,展现了巨大的优越性,加速发展的势头至今不减。两种导航的组合应用能够充分发挥两者的优势,是当前导航领域的一个研究热点,也是译者所在的导航技术实验室非常感兴趣的一个技术方向。

对导航技术感兴趣的众多科技人员和院校学生非常需要一些提供导航基础理论并关注技术应用设计方面的参考书籍。我们是一群从事导航技术研究、应用与测试的技术人员。在学习和工作过程中,我们确实感觉到参考与交流的重要性,找到合适的技术参考资料,学习和工作的效率会大大提高。因此,我们将自己在科研试验中的工作经验和研究成果进行总结归纳,撰写出版了《通信对抗装备试验》(含卫星导航干扰内容)、《卫星导航定位与抗干扰技术》等涉及导航技术的著作。同时,结合自身的应用感受,我们将自己参考过的一些外文技术书籍进行了翻译,包括《GPS 软件接收机基础》、《高速传感器辅助导航》和《GPS 惯性导航组合》等,这些都是我们认为比较有特色的书籍。它们被实验室用作进行导航技术学习和训练的系列教材,反应较好;同时,这些书籍出版后,得到了广大读者的肯定和鼓励,这也成为我们翻译本书的重要动力来源。

本书的特点在于其基础理论知识讲述透彻,技术应用方法思路清晰。对卫星导航基础知识的书籍而言,有关惯性导航基础知识的书籍要少得多,本书恰恰对卫星导航和惯性导航的基本原理都讲述得非常清楚。在技术应用方面,原书作者对卫星导航和惯性导航误差进行了深入分析,对卡尔曼滤波及实现组合导航的若干技术问题进行了建模分析,对应用理论知识解决实际问题时的技术思路具有示范意义。本书是一本适合高等院校相关专业师生教学参考和相关领域科研人员阅读的书籍。

本书内容主要围绕卫星导航与惯性导航的原理及其组合导航技术展开,注重从理论基础引向系统设计方法。书中主要介绍了 GNSS 和 INS 的基本理论,详细分析了如何对 GNSS 和 INS 组合实施有效的卡尔曼滤波,从而提高导航定位精度,提供了 INS 运行所必需的数学模型、卡尔曼滤波的 MATLAB 实现算法及 GNSS/INS 组合仿真的 MATLAB 实现。

本书以《GPS 惯性导航组合》为基础,并根据 GNSS/INS 技术的重要进步和审阅者及读者的一些建议,增加了 GNSS 系统的升级和其他当前正在开发的系统的有关进展及 GNSS/INS 组合等方面的内容。

本书由陈军、余金峰、纪学军、安新源、孙吉、赵彬和云超翻译。李飞、王大明、

崔建勇、芦秀伟、商向永、余辉、窦赛、李星、张耀春、黄静华、郭伟峰、黄璞和李鹏等对本书的校对做了大量工作，中国电子科技集团第五十四所副所长高晓滨研究员对译稿进行了仔细审阅并提出了许多宝贵意见，在此谨致深切谢意。

原书所配光盘中的内容，读者可以登录华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）注册后免费进行下载。

由于译者水平有限，书中难免存在错误和不足之处，恳请读者批评指正。

译 者

致 谢

我们感谢克莱尔蒙特研究生大学的 John Angus 教授、加利福尼亚大学河滨分校的 Jay A. Farrell 和 New Brunswick 大学的 Richard B. Langley 在本书的编写和出版过程中所给予的帮助。感谢 Raytheon 公司的 Laura A. 女士在第 8 章（差分 GNSS）和 MATLAB 程序代码方面提供的专业性帮助。特别要感谢加利福尼亚州立大学的 Larry Weill 博士在第 7 章抗多径算法方面所做的贡献。

A. P. A. 感谢莫斯科航空研究院的 Andrey Podkorytov 对施密特-卡尔曼滤波器的修改；感谢来自 Northrop Grumman 的 Randall Core 和来自 C. S. Draper 实验室的 Michael Ash 对惯性传感器技术 IEEE 初步标准方面的工作；感谢 GPSofit 公司的 Michael Braasch 博士提供的 GPSofit INS 和 GPS MATLAB 工具箱的评估版；感谢 Jeff Schmit 博士和 Robert F. Nease 博士，他们分别作为工程部原副总裁和自动控制部首席科学家，提供了关于早期惯性导航的相关信息；感谢 Edward H. Martin 提供了关于 GPS/INS 组合导航早期历史的相关信息；感谢 Helen Boltinghouse 女士提供了关于其已故丈夫 Joseph C. Boltinghouse 的个人回忆录。

C. G. B. 感谢俄亥俄大学及其优秀教职员和学生们，在这些年中，作者和他们在教学和研究中进行了愉快的互动交流。在这样良好的环境下，他能够开展广泛的研究，并将这些研究成果撰写出版。还要感谢 NovAtel 公司的 Pat Fenton 和 Samantha Poon、Sensor Systems 公司的 Dave Brooks、Roke 公司的 James Horne 及 u-blox 公司的 Herbert Blaser，感谢他们提供了天线方面的信息。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 导航	1
1.1.1 与导航相关的技术	1
1.1.2 导航模式	2
1.2 GNSS 综述	3
1.2.1 GPS	3
1.2.2 全球轨道导航卫星系统 (GLONASS)	4
1.2.3 伽利略 (Galileo) 系统	5
1.2.4 北斗 (BeiDou-2) 卫星导航系统	7
1.3 惯性导航综述	8
1.3.1 理论基础	8
1.3.2 惯性传感器技术	9
1.4 GNSS/INS 组合综述	23
1.4.1 卡尔曼滤波器的作用	23
1.4.2 实现	24
1.4.3 应用	24
习题	25
参考文献	25
第 2 章 卫星导航系统基础	28
2.1 导航系统研究	28
2.1.1 不同于 GNSS 的系统	28
2.1.2 比较准则	28
2.2 卫星导航	29
2.2.1 卫星轨道	29
2.2.2 导航解算 (二维实例)	30
2.2.3 卫星选择和精度因子	32
2.2.4 DOP 的计算实例	35
2.3 时间与 GPS	37
2.3.1 协调世界时 (UTC) 的产生	37
2.3.2 GPS 系统时	37

2.3.3 接收机 UTC 的计算	37
2.4 例子: 无误差时用户位置计算	38
2.4.1 用户位置计算	38
2.4.2 用户速度计算	40
习题	41
参考文献	42
第 3 章 惯性导航基础	44
3.1 本章重点	44
3.2 基本术语	44
3.3 惯性传感器误差模型	47
3.3.1 零均值随机误差	48
3.3.2 固定型误差	49
3.3.3 传感器误差稳定性	50
3.4 传感器校准和补偿	50
3.4.1 传感器偏差、尺度因子和错位	51
3.4.2 其他校准参数	52
3.4.3 校准参数的不稳定性	54
3.4.4 GNSS 之前的辅助传感器	54
3.4.5 传感器性能范围	55
3.5 地球模型	55
3.5.1 陆地导航坐标系	56
3.5.2 地球旋转	56
3.5.3 重力模型	57
3.6 硬件实现方法	62
3.6.1 平衡环系统的实现方法	63
3.6.2 浮台系统的实现方法	65
3.6.3 旋转木马及分度法	65
3.6.4 捷联系统	66
3.6.5 捷联系统的旋转木马及分度	66
3.7 软件实现方法	67
3.7.1 一维的例子	67
3.7.2 九维的初始化	68
3.7.3 平衡环姿态的实现	71
3.7.4 平衡环导航的实现	72

3.7.5	捷联姿态的实现	73
3.7.6	捷联导航的实现	79
3.7.7	导航计算机和软件的需求	81
3.8	INS 性能标准	82
3.8.1	自由惯性运行	82
3.8.2	INS 性能度量	82
3.8.3	性能级别	83
3.9	测试和评估	83
3.9.1	实验室测试	84
3.9.2	现场测试	84
3.10	总结	84
	习题	85
	参考文献	87
第 4 章	GNSS 信号结构特征及信息利用	88
4.1	原有 GPS 信号的成分、用途和特征	88
4.1.1	原有 GPS 信号的数学信号模型	88
4.1.2	导航数据格式	91
4.1.3	GPS 卫星位置的计算	94
4.1.4	C/A 码及其性能	99
4.1.5	P(Y)码及其特性	104
4.1.6	L1 和 L2 载波	105
4.1.7	发射功率电平	106
4.1.8	自由空间及其他损耗因子	106
4.1.9	接收信号功率	106
4.2	GPS 的现代化	107
4.2.1	从现代化中受益的领域	107
4.2.2	GPS 现代化改进的基本内容	108
4.2.3	L2 民用 (L2C) 信号	109
4.2.4	L5 信号	109
4.2.5	M 码	111
4.2.6	L1C 信号	112
4.2.7	GPS 卫星系列	113
4.2.8	GPS III	113
4.3	GLONASS 信号结构和特征	113

4.3.1	频分多址 (FDMA) 信号	114
4.3.2	CDMA 现代化	115
4.4	Galileo 系统 (Galileo)	115
4.4.1	星座和服务等级	116
4.4.2	导航数据和信号	116
4.5	北斗系统	117
4.6	准天顶卫星系统 (QZSS)	118
	习题	119
	参考文献	120
第 5 章	GNSS 天线设计与分析	123
5.1	应用	123
5.2	GNSS 天线性能特点	123
5.2.1	尺寸和成本	123
5.2.2	频率和带宽	123
5.2.3	辐射图特性	124
5.2.4	天线极化和轴比	125
5.2.5	GNSS 天线的指向、效率和增益	127
5.2.6	天线阻抗、驻波比和回波损耗	128
5.2.7	天线带宽	129
5.2.8	天线噪声系数	130
5.3	GNSS 天线设计的电磁计算模型 (CEM)	131
5.4	GNSS 天线技术	132
5.4.1	偶极子 GNSS 天线	132
5.4.2	GNSS 贴片天线	132
5.4.3	勘测级/参考 GNSS 天线	139
5.5	自适应相控阵天线原理	141
5.5.1	数字波束形成自适应天线阵公式	143
5.5.2	STAP	145
5.5.3	SFAP	145
5.5.4	自适应相控阵天线的结构	145
5.5.5	自适应相控阵天线的优点	146
5.6	校准/补偿的应用考量	146
	习题	148
	参考文献	149

第 6 章 GNSS 接收机设计与分析	153
6.1 接收机设计的选择	153
6.1.1 GNSS 所支持的应用	153
6.1.2 单频或多频支持	153
6.1.3 通道数	154
6.1.4 码型选择	155
6.1.5 差分性能	155
6.1.6 辅助输入	156
6.2 接收机结构	157
6.2.1 射频 (RF) 前端	157
6.2.2 下变频及中频放大	159
6.2.3 模数转换与自动增益控制	160
6.2.4 基带信号处理	161
6.3 信号捕获与跟踪	161
6.3.1 对用户位置的假定	162
6.3.2 关于可视卫星的假定	162
6.3.3 信号多普勒估计	162
6.3.4 在频率和 C/A 码相位范围内搜索信号	163
6.3.5 信号检测与确认	166
6.3.6 码跟踪环	168
6.3.7 载波相位跟踪环	172
6.3.8 位同步	175
6.3.9 数据位解调	175
6.4 用户解算所需信息的提取	176
6.4.1 信号发射时间信息	176
6.4.2 卫星位置和速度的星历数据	176
6.4.3 利用码相位的伪距测量公式	177
6.4.4 利用载波相位的测量	178
6.4.5 载波多普勒测量	179
6.4.6 积分多普勒测量	180
6.5 伪距、载波相位和频率估计的理论考虑	181
6.5.1 码相位测量的理论误差限	182
6.5.2 载波相位测量的理论误差限	182
6.5.3 频率测量的理论误差限	183
6.6 高灵敏度 A-GPS 系统	185

6.6.1 辅助数据如何改进接收机性能	185
6.6.2 高灵敏度接收机的影响因素	188
6.7 软件无线电 (SDR) 方法	190
6.8 伪卫星的考虑	190
习题	191
参考文献	193
第 7 章 GNSS 数据误差	197
7.1 数据误差	197
7.2 电离层传播误差	197
7.2.1 电离层延迟模型	198
7.2.2 GNSS SBAS 电离层算法	200
7.3 对流层传播误差	207
7.4 多径问题	208
7.5 多径抑制方法	210
7.5.1 空间处理技术	210
7.5.2 时域处理技术	212
7.5.3 多径消除技术	215
7.5.4 时域方法的性能	222
7.6 多径消除的理论极限	224
7.6.1 估计理论方法	224
7.6.2 MMSE 估计器	225
7.6.3 多径建模误差	225
7.7 星历数据误差	225
7.8 星载时钟误差	226
7.9 接收机时钟误差	227
7.10 选择可用性误差	228
7.11 误差预估计	228
习题	229
参考文献	230
第 8 章 差分 GNSS	233
8.1 简介	233
8.2 局域差分 GNSS (LADGNSS)、广域差分 GNSS (WADGNSS) 和 天基增强系统 (SBAS)	233
8.2.1 LADGNSS	233

8.2.2	WADGNSS	234
8.2.3	SBAS	234
8.3	GEO LIL5 信号	238
8.3.1	概述	238
8.3.2	GEO 上行链路子系统类型 1 (GUST) 控制环	240
8.4	GUS 时钟控制算法	244
8.4.1	接收机时钟误差的确定	246
8.4.2	时钟驱动控制定律	247
8.5	GEO 轨道的确定 (OD)	249
8.6	地基增强系统 (GBAS)	254
8.6.1	区域增强系统 (LAAS)	254
8.6.2	联合精密进近着陆系统 (JPALS)	254
8.6.3	增强的远距离导航 (eLoran)	255
8.7	基于相对测量的 DGNSS	255
8.7.1	码差分测量	255
8.7.2	载波相位差分测量	256
8.7.3	利用双差测量的定位	258
8.8	GNSS 精确单点定位服务及产品	259
8.8.1	国际 GNSS 服务 (IGS)	259
8.8.2	持续运行的参考站 (CORS)	259
8.8.3	GPS 推断定位系统 (GIPSY) 和轨道分析仿真软件 (OASIS)	259
8.8.4	澳大利亚的在线式 GPS 处理系统 (AUPOS)	260
8.8.5	Scripps 坐标更新工具 (SCOUT)	260
8.8.6	在线定位用户服务 (OPUS)	260
	习题	261
	参考文献	261
第 9 章	GNSS 和 GEO 信号完好性	264
9.1	引言	264
9.1.1	距离比较法	265
9.1.2	最小二乘法	265
9.1.3	等价法	266
9.2	SBAS 和 GBAS 完好性设计	267
9.2.1	SBAS 误差源和完好性威胁	268
9.2.2	与 GNSS 相关的误差	269

9.2.3	与 GEO 相关的误差	271
9.2.4	接收机和测量处理误差	271
9.2.5	估计误差	272
9.2.6	与完好性界限相关的误差	273
9.2.7	GEO 上行链路误差	274
9.2.8	完好性威胁的消除	274
9.3	SBAS 实例	279
9.4	总结	281
9.5	未来: GIC	281
	习题	281
	参考文献	281
第 10 章	卡尔曼滤波	284
10.1	简介	284
10.1.1	什么是卡尔曼滤波器	284
10.1.2	卡尔曼滤波器如何工作	285
10.1.3	如何应用卡尔曼滤波器	286
10.2	卡尔曼滤波器修正更新	287
10.2.1	卡尔曼增益推导	287
10.2.2	利用卡尔曼增益的估计修正	295
10.2.3	用于使用测量值的协方差修正	295
10.3	卡尔曼滤波器预测更新	295
10.3.1	连续时间随机系统	295
10.3.2	离散时间随机系统	300
10.3.3	离散时间状态空间模型	301
10.3.4	动态扰动噪声分布矩阵	302
10.3.5	预测器方程	302
10.4	卡尔曼滤波方程总结	303
10.4.1	基本方程	303
10.4.2	常用术语	303
10.4.3	数据流图	304
10.5	对时间相关噪声的适应性	305
10.5.1	相关噪声模型	305
10.5.2	传感器噪声的经验模型	307
10.5.3	增广状态向量	309

10.6	非线性和自适应的实现	310
10.6.1	线性近似误差的评估	310
10.6.2	非线性动态	315
10.6.3	非线性传感器	315
10.6.4	线性卡尔曼滤波	316
10.6.5	扩展卡尔曼滤波	317
10.6.6	自适应卡尔曼滤波	318
10.7	卡尔曼-布西滤波器 (KALMAN-BUCY FILTER)	319
10.7.1	实现方程	320
10.7.2	卡尔曼-布西滤波器参数	320
10.8	GNSS 主载体跟踪滤波器	321
10.8.1	载体跟踪滤波器	321
10.8.2	信息的动态稀释	321
10.8.3	载体跟踪专用滤波器	323
10.8.4	载体跟踪滤波器比较	332
10.9	其他实现方法	334
10.9.1	斯密特-卡尔曼次优滤波	334
10.9.2	串行测量处理	337
10.9.3	改进数值稳定性	338
10.9.4	卡尔曼滤波器监控	341
10.10	总结	345
	习题	345
	参考文献	347
第 11 章	惯性导航系统误差分析	350
11.1	本章重点	350
11.2	导航解中的误差	351
11.2.1	9 个核心 INS 误差变量	351
11.2.2	用于 INS 误差分析的坐标系	351
11.2.3	模型变量和参数	352
11.2.4	动态耦合机制	356
11.3	导航误差动力学	358
11.3.1	速度积分产生的误差动态	359
11.3.2	重力计算产生的误差动态	360
11.3.3	科里奥利加速度引起的误差动态	361