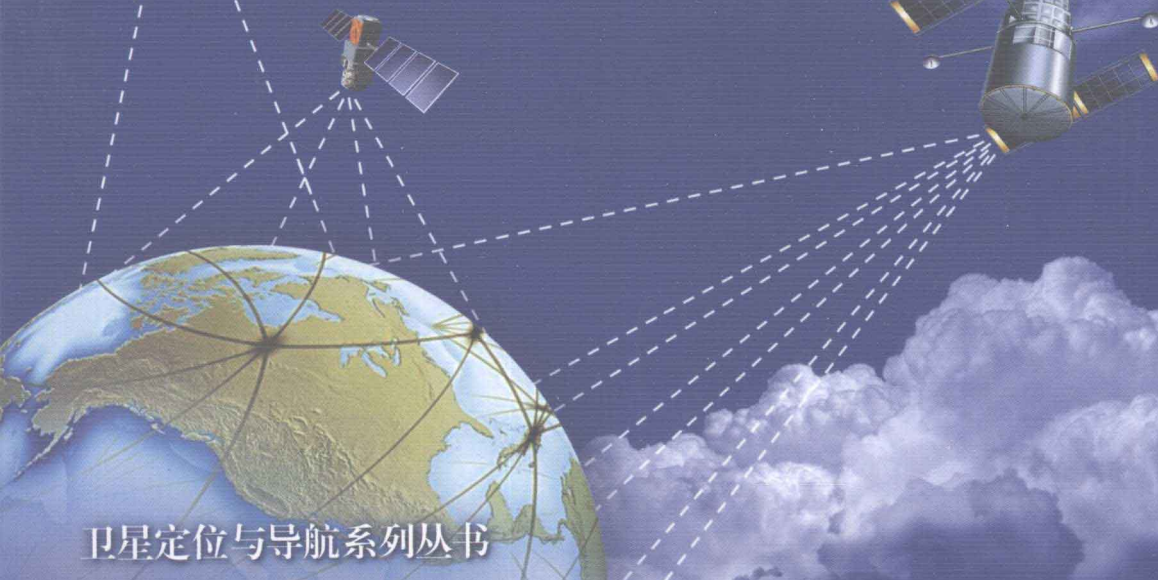




Education



卫星定位与导航系列丛书

高速传感器辅助导航

Aided Navigation:
GPS with High Rate Sensors

- [美] Jay A. Farrell 著
- 陈 军 安新源 纪学军 等译
- 李艳斌 审校



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书主要介绍设计和分析辅助导航系统的方法,以及应用该方法所采用的基本原理。全书包含两部分,共12章。第I部分讲解一些必要的理论、概念和工具,涉及参照系、确定性系统、随机过程、最佳状态估计、性能分析、导航系统设计等内容;第II部分将理论应用于几个特殊的导航应用中,介绍全球定位系统、基于编码器的GPS辅助航位推测法、AHRS、辅助惯性导航、LBL和多普勒辅助INS。此外,本书还附有关于符号、线性代数的回顾、GPS卫星位置和速度的计算、四元数的附录,有助于读者对基础理论和概念的理解。

本书可作为卫星导航专业本科高年级或研究生课程的教科书,也可作为辅助导航及其应用领域工程技术和科研人员的自学参考书。

Jay A. Farrell

Aided Navigation:GPS with High Rate Sensors

ISBN: 978-0-07-149329-1

Copyright © 2008 by The McGraw-Hill Companies.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in China Mainland.

Copyright © 2012 by McGraw-Hill Education (Asia), a division of the Singapore Branch of The McGraw-Hill Companies, Inc. and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权©2012由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与电子工业出版社所有。

●本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2011-6848

图书在版编目(CIP)数据

高速传感器辅助导航 / (美) 法雷尔(Farrell, J.A.) 著; 陈军等译. —北京: 电子工业出版社, 2012.6

(卫星定位与导航系列丛书)

书名原文: Aided Navigation:GPS with High Rate Sensors

ISBN 978-7-121-17306-6

I. ①高… II. ①法… ②陈… III. ①传感器—导航 IV. ①TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 120795 号

策划编辑: 宋 梅

责任编辑: 谭丽莎

印 刷:

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

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 字数: 599 千字

印 次: 2012 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 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, 联系及邮购电话: (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

对于定位和导航的需求伴随着人类文明的发展史一直是一个重要的问题,进入 21 世纪以来,人类社会对于这种需求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一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,即将投入运行的有欧盟的 Galileo 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了卫星姿态控制、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书人的心血和汗水。从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的不同需求,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学生、研究生,以及所有对卫星定位和导航技术感兴趣的人们。

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，丛书的制作、译者们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，或推荐其他好的选题（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
2010年1月

译者序

这是一本以设计为导向的教科书,指导读者如何为智能汽车、武器、无人驾驶飞机、机器人等设备设计辅助导航系统。本书运用最优状态估计方法来描述确定性系统和随机系统,从基础理论引向实际设计方法的高级应用。本书对先验理论和实现细节的描述有巧妙的构思,令人耳目一新。

全书分为理论和应用两部分。第 I 部分包含 7 章,介绍一些基本的理论、概念和方法,在整个介绍过程中包含大量的简单实例。第 1 章介绍辅助导航系统的设计方法,并通过简单例子的比较来阐明这种方法。第 2 章定义参照系、参照系的变换和旋转参照系之间的转换方法。第 3、4 章重点介绍系统模型的建立。第 5 章介绍并推导最优状态估计方法。第 6 章讨论对系统各种性能进行分析的方法。第 7 章采用第 2 章~第 6 章提供的工具对实例进行严格的定量分析。第 II 部分包含 5 章,深入讨论几个特殊的导航应用,并对每一个特定设计方法都给出了连贯的推导和证明,给人的感觉是作者所建立的系统是在真实环境中实际运行的而不只是“纸上谈兵”。第 8 章介绍基本 GPS 解、差分 GPS、多普勒处理和各种载波相位处理技术。第 9 章~第 12 章重点讨论特殊的辅助导航应用。

本书提供了分析现代导航系统设计所需的工具,对导航技术人员设计导航系统具有指导意义。

同时,本书也是一本优秀的自学教材,全篇行文清晰、可读性强,通篇使用线性代数的思想将 GPS 与各种传感器联系在一起,并且包含许多极好的习题和可从网站上下载的 MATLAB/SIMULINK 代码。本书对卡尔曼滤波器及其现代衍生方法的应用也有较强的指导作用。此外,附录中包含了对欧拉方程和四元数方程的精彩讨论,这在同类教科书中很少见到。

本书主要由陈军、安新源、纪学军、张凤伟、韩慧、李琨、焦海松翻译,李艳斌对全书进行了认真审校。此外,贾红新、盛兴、刘义、耿志辉、褚家旭、许世平、李运宏、李飞等同志也参与了翻译和校对工作,在此对他们的付出表示深深的感谢。

由于译者水平有限,对书中的某些技术术语难免把握不准,译文中难免存在一些错误,敬请读者批评指正。

译者

作者简介

Jay A. Farrell 在爱荷华州立大学获得物理学和电子工程学士学位（1986 年），在 Notre Dame 大学获得电子工程硕士（1988 年）和博士学位（1989 年）。在 Charles Stark Draper 实验室（1989—1994 年），Jay A. Farrell 是自动交通工具智能学习控制系统方案设计的主要负责人。1990 年，Jay A. Farrell 被授予工程学首席会长最佳技术发行奖；1991 年和 1993 年，他因突出的成绩和成就获得荣誉奖。Jay A. Farrell 是加州大学电子工程系教授和荣誉主席，任 IEEE 管理系统学会首席财政会长和首席技术执行会长，是 IEEE（2008）学会特别会员，出版的技术刊物超过 150 部；Jay A. Farrell 是 Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors（McGraw-Hill, 2008）一书的作者，并且是以下这几本书的联合作者：The Global Positioning System and Interital Navigation（McGraw-Hill, 1998）、Adaptive Approximation Based Control: Unifying Neural, Fuzzy and Traditional Adaptive Approximation Approaches（John Wiley, 2006）。

前 言

近几十年来,随着新技术的发展,很大程度上使得一系列价格不太昂贵、精度较高的辅助导航系统越来越多地应用于科研项目、科研试验平台,以及商业和军事领域。这些新技术包括:小型、低成本、小功率传感器;GPS 技术;高性能、低成本、嵌入式处理计算设备。

辅助导航有两类传感器。一类传感器利用的是系统运动学模型,其输出信号是综合信号,提供一个参考轨道。例如,运动学输入传感器包括惯性测量设备、多普勒雷达或声纳、轴译码器。另一类传感器主要用于估计参考轨道和交通工具实际轨道之间的误差。在估计过程中,这些辅助传感器也能确定各种标准参量来改进系统未来的性能。GNSS 的出现为一些导航系统的野外应用提供了一个精确可靠的辅助测量源。一个用于辅助操作的 GNSS 传感器的典型例子是 GPS。

当一个应用,如自动交通工具,需要以高采样速率可靠地获取该交通工具状态的准确带宽信息时,就激发了辅助导航的引入。辅助传感器能够满足精度需求,但不能满足可靠性、带宽和高采样速率等要求。运动学输入传感器计算出的参考轨道能够满足可靠性、带宽和高采样速率的要求;然而,由于其一体化的特点,随着时间累积的误差最终导致独立系统不能满足精确要求。

辅助传感器和运动学输入传感器计算出来的参考轨道具有互补特性;因此,自然可以考虑将两者在一个组合方法中实现。

目的

编写本书的主要目的是为教学使用的辅助导航系统的设计提供一个独立的参考。这里介绍的方法是工业标准方法,它已经被许多人在多方面非常成功地应用。

作者期望本书适用于有高级知识背景的学者,从事于工程计划的理学士。作者特别在意向 BS 级别提供材料。例如,最优滤波主题起源于最小二乘和随机处理背景。涉及理论概念背景和应用的范例贯穿全书,这些范例可以促进读者对特殊概念意义的理解,阐明可选技术之间的折中。此外,书中还包括详细的推导。这本书的读者将包括:工程师、学者、研究人员、科学家,以及在一个指定应用中对设计或使用辅助导航系统感兴趣的工程管理人员。

概要

本书介绍了一种设计和分析辅助导航系统的系统方法,以及应用该方法所采用的基本原理。本书分为两部分。

第 I 部分包含 7 章。第 1 章讲述设计分析方法。本章通过简单的例子及比较来阐明这种方法,并培养对第 2 章~第 6 章介绍的理论知识的兴趣。第 2 章定义参照系、参照系的变换和支持旋转参照系之间转换的方法。第 3、4 章重点介绍模型开发。在设计过程中,一种精确的数学模型是精确定量描述导航系统性能的必要前提。第 3 章介绍系统理论(确定性)的各种概念。第 4 章介绍随机过程理论的一些必要概念。第 5 章介绍并推导最优状态估计方法(也就是说卡尔曼滤波)。最优和次优状态估计知识对导航系统的实现和性能分析很重要。第 6 章讨论性能分析方法。第 7 章重新讨论第 1 章提出的性能分析方法,而且采用第 2 章~第 6 章提供的工具对相同的例子进行严格的定量分析,这些例子广泛应用于 1~7 章。

第 II 部分深入讨论几个特殊的导航应用。第 8 章介绍基本 GPS 解、差分 GPS、多普勒处理和各种载波相位处理技术。几种 GPS 技术的介绍使用统一的标准符号,便于理解这些技术及相关的折中。为了清楚介绍和对比这些方法,第 8 章介绍的技术仅采用点数据处理(也就是说不是卡尔曼滤波)。这里讨论的 GPS 可作为目前或不久将用到的各种 GNSS 的原型。第 9 章~第 12 章重点讨论特殊的辅助导航应用,且每章都要推导运动学模型,介绍基于运动学模型的导航机械方程;推导并分析导航误差状态动态模型;介绍预测辅助测量和建模残差辅助测量的方程。每一章中还包括协方差分析、可观性分析、应用或仿真数据分析等不同形式的性能分析。第 9 章讨论辅助的基础编码的绝对估计。第 10 章讨论姿态和航向参考系统,它使用陀螺仪作为输入运动学模型及加速器作为重力传感器来进行误差修正。第 11 章讨论辅助惯性导航。第 12 章讨论辅助惯性系统的一种特殊应用。所有这些章节都给出了适合这些方法的例子,读者可以调整这些方法以适应他们的特殊应用需求。

本书有 4 个附录。附录 A 定义了书中使用的符号和常量。附录 B 列出了书中应用的线性代数概念。附录 C 介绍了 GPS 接口规定的资料,它对处理 GPS 伪距、相位和多普勒测量非常必要。附录 D 是一个关于四元数的简短手册,讨论了它的定义、运算和运动学模型。每个附录中都有实例计算。

写作动机

这本书是基于读者对我之前的书的反馈信息而编写的^[48]。这些反馈信息要求我进行两个方面的重要调整。第一,重新调整材料以适合学校的教材使用。第二,将主题内容扩展到辅助导航。尽管本书从文献[48]借鉴了很多重要的原始资料,但是本书的目的非常明显并且使用了大量的新材料,因此,有必要采用新的书名形成一本新书。

本书论述辅助导航系统设计的综合主题。第 1 章和第 7 章提出辅助导航系统的设计方法。第 2 章~第 6 章介绍必需的理论素材来理解和实现这种方法。第 8 章提供一个详细的 GPS 论述。第 9 章~第 12 章介绍辅助导航系统设计的详细论述和分析方法。

本书可作为大学本科高年级或研究生课程的教科书使用,因此包含延伸的例子和第

I 部分的章末习题。作为一本教科书，其讲稿可以覆盖第 I 部分，以让学生在学科结束时能设计和实现辅助导航系统。第 9 章、第 10 章和第 11 章的方法非常适合于设计高级方案。

许多工程计划要求高水平学者去完成一个真实的设计方案。研究者在指导这样一个工程时遇到的挑战是带领研究团队对规范进行定量定义，并分析与规范有关的系统性能。目前在商业和军事应用中广泛使用本书介绍的辅助导航系统设计和分析方法的原因是它易于对与规范有关的性能进行定量分析。第 6 章讨论性能分析。

网站

本书的辅助材料可以参见出版者的站点。该站点涉及许多与本书有关的资源：

- 使用 MATLAB 产生例子的源程序；
- 支撑例子的数据集；
- 读者要求且对作者来说是可提供的数据；
- 一张勘误表；
- 读者要求的澄清。

本书的官方网站地址是

www.mhprofessional.com

然后可以对国际标准书号、标题或作者进行搜索，网站搜索的结果将包括上述材料的下载部分。

勘误表

尽管作者做了大量工作来确保这本书没有错误，但是早先的经历已经告诉我这是不太可能的。出版社站点和我的大学主页上有一张勘误表，现在我的大学主页为

www.ee.ucr.edu/~farrell

发现勘误表上没有列出的错误的读者可以通过电子邮件通知作者。作者的 E-mail 地址是

Farrell@ee.ucr.edu

非常感谢您对错误的识别，或额外材料（如例子、习题或主题）的建议。

致谢

首先，感谢参考文献[48]的读者与我沟通了有趣的想法、修正和有用的提议。这些交流有助于本书的启发和定义。接着，感谢我的学生和同事在写作和修正本书时的帮助与协作。最初的一批审核人包括 Anning Chen, Licheng Luo, Angello Pozo 和 Arvind Ramanandan。第二批审核人包括 Jinrong Cheng, Wenjie Dong, Yu Lu, Paul Miller, Rolf

Rysdyk 和 Peng Xie。此外，Wenjie Dong 合作编写了 4.9.1 节；Arvind Ramanandan 合作编写了 4.9.2 节；Yunchun Yang 提供了第 10 章材料的信息要点；Yu Lu 合作编写了 C.4 节，并提供了编写第 9 章的有用的原始材料；Paul Miller 提供了第 12 章材料的信息要点；当然，我对本书包含的所有材料的最后陈述的任何错误或遗漏负责。然后，我感谢出版组的帮助和支持，主要是 Wendy Rinaldi 和 Jean Bodeaux。最后，我感谢整个过程中我的家庭的付出和支持。

Jay A. Farrell

加州大学河畔工程学院电机工程系

2008 年 2 月 23 日

目 录

第 I 部分 理论	1
概述	2
第 1 章 绪论	3
1.1 方法综述	5
1.1.1 方法范例	5
1.1.2 方法概要	7
1.2 第 I 部分概述：理论	8
1.2.1 参考坐标系	8
1.2.2 确定性系统	9
1.2.3 随机过程	9
1.2.4 最优状态估计	10
1.2.5 技术性能分析	10
1.2.6 辅助导航系统设计和分析	11
1.3 第 II 部分概要：应用	11
1.3.1 GPS	11
1.3.2 辅助导航系统	12
1.4 附录概要	12
第 2 章 参照系	13
2.1 参照系特性	14
2.2 参照系定义	15
2.2.1 惯性坐标系	15
2.2.2 地心地固 (ECEF) 坐标系	16
2.2.3 地理坐标系	16
2.2.4 地心坐标系	17
2.2.5 本地大地坐标系或切平面坐标系	17
2.2.6 体坐标系	18
2.2.7 平台坐标系	18
2.2.8 仪器坐标系	19
2.2.9 小结	19
2.3 ECEF 坐标系	20
2.3.1 ECEF 直角坐标系	20

2.3.2	地球大地水准面和重力模型	20
2.3.3	ECEF 转换	24
2.4	参照系转换	25
2.4.1	方向余弦矩阵	25
2.4.2	点转换	28
2.4.3	向量转换	29
2.4.4	矩阵转换	30
2.5	特殊向量转换	30
2.5.1	平面旋转	31
2.5.2	转换: ECEF 到切平面	31
2.5.3	转换: ECEF 到地理坐标	33
2.5.4	转换: 运载体到导航坐标系	35
2.5.5	转换: 正交小角	38
2.6	旋转参照系	39
2.6.1	方向余弦运动学	39
2.6.2	旋转坐标系中的导数计算	40
2.7	方向余弦的计算	42
2.7.1	方向余弦导数	42
2.7.2	欧拉角导数	44
2.8	参考文献和深入阅读	45
2.9	习题	46
第 3 章	确定性系统	50
3.1	连续时间系统模型	50
3.1.1	常微分方程	50
3.1.2	转移函数	51
3.1.3	状态空间	52
3.2	状态增广	54
3.3	线性化状态空间	57
3.4	离散时间状态空间表示法	59
3.5	状态空间分析	59
3.5.1	相似变换	60
3.5.2	状态空间到转移函数	61
3.5.3	状态转移矩阵特性	63
3.5.4	线性时不变系统	64
3.5.5	离散时间等效模型	65

3.6 状态估计	66
3.6.1 可观性	68
3.6.2 极点配置法估计器设计	70
3.6.3 可观子空间	73
3.7 参考文献和深入阅读	77
3.8 习题	77
第4章 随机过程	85
4.1 随机过程的基本概念	85
4.1.1 例子	86
4.1.2 研究计划	88
4.2 标量随机变量	89
4.2.1 基本属性	89
4.2.2 高斯分布	90
4.2.3 标量随机变量的转换	91
4.3 多维随机变量	93
4.3.1 基本性质	93
4.3.2 统计学和统计特性	94
4.3.3 高斯随机变量向量	97
4.3.4 随机变量向量的变换	97
4.4 随机过程	98
4.4.1 统计和统计特性	98
4.4.2 白噪声和有色噪声	100
4.5 具有随机输入的线性系统	101
4.6 随机过程的状态模型	105
4.6.1 标准模型	106
4.6.2 随机系统和状态增广	107
4.6.3 高斯-马尔可夫过程	108
4.6.4 均值时间传播	112
4.6.5 方差时间传播	113
4.7 离散时间等价模型	114
4.7.1 由 $F(t)$ 计算 Φ_k	114
4.7.2 由 $Q(t)$ 计算 Qd_k	115
4.8 线性状态估计	118
4.9 详细实例	119
4.9.1 系统性能指标	119

4.9.2	仪器技术规范	126
4.9.3	一维 INS	128
4.9.4	一维位置辅助 INS	131
4.10	互补滤波器	132
4.11	参考文献和深入阅读	133
4.12	习题	134
第 5 章	最优状态估计	139
5.1	状态估计回顾	139
5.2	最小方差增益推导	141
5.2.1	卡尔曼增益的推导	142
5.2.2	卡尔曼增益: 后向协方差	142
5.2.3	总结	143
5.3	从 WLS 到卡尔曼滤波	143
5.3.1	加权最小二乘法 (WLS)	143
5.3.2	加权最小二乘解	144
5.3.3	递归最小平方 (RLS)	148
5.3.4	卡尔曼滤波	152
5.4	卡尔曼滤波推导的总结	153
5.4.1	等价的测量更新	154
5.4.2	等价的协方差测量更新	155
5.4.3	卡尔曼滤波的例子	155
5.5	卡尔曼滤波的属性	157
5.6	应用的问题	159
5.6.1	标量测量的处理	159
5.6.2	相关测量	161
5.6.3	有害的或者缺失的数据	161
5.7	执行顺序	162
5.8	异步测量	163
5.9	数值问题	163
5.9.1	协方差矩阵的对称性	163
5.9.2	协方差矩阵的正定性	164
5.10	次最优滤波	164
5.10.1	删除状态	164
5.10.2	施密特-卡尔曼滤波	166
5.10.3	去耦	168

5.10.4 离线的增益计算	169
5.10.5 非线性滤波	170
5.11 参考文献和深入阅读	176
5.12 习题	176
第 6 章 性能分析	181
6.1 协方差分析	181
6.2 蒙特卡罗分析	186
6.3 误差预算	187
6.4 协方差散度	191
6.5 参考文献和深入阅读	194
6.6 习题	194
第 7 章 导航系统设计	196
7.1 方法概述	196
7.2 详细例子	197
7.2.1 增广运动学模型	198
7.2.2 导航机械方程	199
7.2.3 传感器模型	200
7.2.4 误差模型	200
7.2.5 状态估计器设计	201
7.2.6 协方差分析	204
7.3 互补滤波器	208
7.3.1 频域方法	208
7.3.2 卡尔曼滤波器法	209
7.4 一个可选择的方法	210
7.4.1 总体状态: 运动学模型	210
7.4.2 总体状态: 时间更新	211
7.4.3 总体状态: 测量更新	211
7.5 方法比较	212
7.6 警告	213
7.7 参考文献和深入阅读	214
7.8 习题	214
第 II 部分 应用	217
概述	218
第 8 章 全球定位系统	219
8.1 GPS 概述	219

8.1.1	GPS 系统	219
8.1.2	GPS 原始信号	221
8.2	GPS 伪距	221
8.2.1	GPS 的伪距符号	222
8.2.2	GPS 的伪距算法	224
8.2.3	卫星的方位角和俯仰角	228
8.3	GPS 接收机概述	229
8.3.1	载波相位观测量	231
8.3.2	Δ 伪距观测量	232
8.4	GPS 的 URE 特性	233
8.4.1	时钟	234
8.4.2	卫星时钟偏移 ($c\delta t^s$)	235
8.4.3	接收机时钟误差 ($\Delta\tau_r$)	235
8.4.4	大气延迟 ($c\delta t_a^s$)	239
8.4.5	星历误差 (E^s)	244
8.4.6	选择可用性 (SA^s)	245
8.4.7	多径 (M_ρ^s, M_θ^s)	245
8.4.8	接收机噪声 ($\eta_\rho^i, \eta_\theta^i$)	246
8.4.9	载波跟踪和整周模糊度 (N^i)	246
8.4.10	总结	251
8.5	精度的几何衰减	252
8.6	双频接收机	255
8.6.1	宽巷和窄巷观测量	258
8.7	码的载波平滑	259
8.8	差分 GPS	261
8.8.1	相对 DPGS	261
8.8.2	差分 GPS	265
8.8.3	双差	270
8.9	整周模糊度解算	272
8.9.1	减小搜索空间	274
8.9.2	最优整数的选择	276
8.9.3	GPS 信号的现代化	277
8.10	GPS 总结	278
8.11	参考文献和深入阅读	278

第 9 章 基于编码器的 GPS 辅助航位推测法	280
9.1 编码器模型	281
9.2 运动学模型	282
9.3 编码器的导航方程	284
9.3.1 连续时间：原理	284
9.3.2 连续时间：应用	285
9.4 误差状态的动态模型	286
9.5 GPS 辅助	287
9.5.1 接收机时钟模型	287
9.5.2 差分测量	288
9.5.3 比较	289
9.6 性能分析	290
9.6.1 可观性	290
9.6.2 协方差分析	291
9.7 一般三维问题	293
第 10 章 AHRS	295
10.1 运动学模型	296
10.2 传感器模型	297
10.3 初始化	297
10.3.1 状态初始化：方法 1	298
10.3.2 状态初始化：方法 2	299
10.4 AHRS 机械方程	300
10.5 误差模型	301
10.5.1 测量误差模型	301
10.5.2 姿态误差动力学	304
10.5.3 AHRS 状态空间误差模型	306
10.5.4 测量噪声的协方差	306
10.5.5 初始误差协方差矩阵	307
10.6 AHRS 方法总结	309
10.7 可观性和性能分析	310
10.8 俯仰角和滚动角的应用	310
10.9 参考文献和深入阅读	316
第 11 章 辅助惯性导航	317
11.1 引力和比力	317