

清华大学学术专著

Inertial Navigation System Technology

惯性导航系统技术

高钟毓 著
Gao Zhongyu



清华大学出版社

清华大学学术专著

Inertial Navigation System Technology

惯性导航系统技术

高钟毓 著

Gao Zhongyu



清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书论述惯性导航系统技术及相关基础知识。全书内容分为12章,分别为坐标系及坐标变换、地球参考模型、线性系统最优估计与随机控制、惯性测量组合、陀螺稳定平台、惯性导航系统机械编排方程、惯性导航系统误差模型、惯性导航系统误差传播特性、旋转调制式惯性系统、系统初始对准与标定、水平阻尼与系统重调,以及系统误差系数标校。

本书不仅对从事惯性导航系统设计、制造、试验及应用的工程技术人员具有重要参考价值,而且可作为高等学校惯性技术相关专业的研究生教材。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

惯性导航系统技术/高钟毓著.--北京:清华大学出版社,2012.10
ISBN 978-7-302-29178-7

I. ①惯… II. ①高… III. ①惯性导航系统 IV. ①TN966

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第142888号

责任编辑:庄红权 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm 印张:31.5 插页:1 字 数:515千字

版 次:2012年10月第1版

印 次:2012年10月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:65.00元

产品编号:047178-01

作者简介



高钟毓 籍贯江苏省南通县，1955年考入清华大学自动控制系学习，1959年留校任教，1984年与1988年作为访问学者，分别赴加拿大渥太华大学和德国斯图加特大学进修，现任清华大学导航技术工程中心主任，精密仪器与机械学系教授，中国惯性技术学会常务理事，中国惯性技术学报副主编。编著《机电控制工程》、《机电一体化系统设计》及《工程系统中的随机过程——随机系统分析与最优滤波》等教材，参编《应用惯性技术验证广义相对论》和《现代制造技术手册》，专著《静电陀螺仪技术》。在国内外学术刊物及会议上发表论文120余篇。培养博士生20余名。1999年和2007年分获北京市和教育部科技进步一等奖各一项。1995年获国家计委、国防科工委、国家科委及国家经贸委授予的国防军工协作配套先进工作者，2001年获北京市授予的技术创新先进工作者。

Abstract

In this book, inertial navigation system technology with relevant basic knowledge is dissertated. The contents of whole book are divided into twelve chapters. Each chapter is respectively entitled to coordinate frames and transformation, earth reference model, optimal estimation and stochastic control for linear systems, inertial measurement units, gyro stabilized platforms, inertial navigation system mechanization equations, error models of inertial navigation systems, system error propagation property, rotating modulation inertial systems, initial alignment and calibration, velocity damping and system reset, adjusting of system error coefficients.

This book does not only have significant reference worthiness for engineers and technicians who are engaged in design, manufacture, test and application of inertial navigation systems, but also becomes a teaching material for graduate students studying in colleges or universities, whose speciality is relative to the inertial technology.

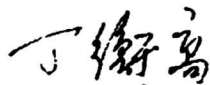
序 言

本书论述惯性导航系统技术及相关基础知识。全书内容分为 12 章,分别为坐标系及坐标变换、地球参考模型、线性系统最优估计与随机控制、惯性测量组合、陀螺稳定平台、惯性导航系统机械编排方程、惯性导航系统误差模型、惯性导航系统误差传播特性、旋转调制式惯性系统、系统初始对准与标定、水平阻尼与系统重调,以及系统误差系数标校,前三章介绍相关的基础知识,第 4 章和第 5 章阐述惯性敏感元部件及其误差特性,第 6~8 章讨论惯性导航系统原理与误差分析,最后四章论述与高精度惯性导航系统相关的误差控制技术。

本书作者长期从事高精度惯性仪表及其惯性导航系统的研究、试制及试验工作。2004 年出版了《静电陀螺仪技术》一书,今年又完成了这本专著。本书反映了作者及其团队多年来取得的科研成果,既有联系实际的理论分析,又有试验验证。例如,对惯性导航系统的初始对准技术、标定技术、水平阻尼和重调技术等进行了深入的创新性研究。

作者及其团队在理论和实践两方面熟悉高精度静电陀螺仪和惯性导航系统技术,因此这本书对惯性导航系统的研究与设计做出了比较全面、系统、深入、严谨的阐述,是一本很有价值的专著。

本书对从事惯性技术的工程技术人员具有重要参考价值,还可作为高等学校惯性技术相关专业的研究生教材。



2012 年 1 月 13 日

前 言

本书是作者从事惯性技术学科教学与科研数十年工作的总结,着重叙述了作者及其团队多年来在惯性技术方面所做过的工作和取得的进展。全书分12章,包括4部分:第1~3章介绍相关基础知识;第4章和第5章阐述惯性测量装置,包括常用陀螺仪、加速度计及陀螺稳定平台;第6~8章讨论惯性导航系统原理与误差分析;第9~12章论述高精度惯性导航系统的误差控制技术。

与其他学科一样,惯性技术的诞生和发展总是离不开需求牵引和技术推动。惯性技术最近半个多世纪的发展历程表明:性能、价格及可靠性等三大要素始终是人们努力追求的主题。本书内容主要是讨论与系统精度相关的技术,因为这是当前需求的“瓶颈”和研究的热点。在惯性测量组合和系统分类组成方面,涉及了系统繁简和价格贵贱的内容。关于惯性导航系统可靠性设计,本书只对陀螺稳定平台相关的设计要点作了简短介绍,没有专门进行论述,待进一步积累经验后予以补充。

展望惯性技术未来发展方向,其主题还是离不开性能、价格及可靠性。中、低精度的惯性导航系统重点应该是进一步降低价格,便于推广应用。高精度系统在着重提高精度的同时应注意降低成本。所有各类系统都应删繁就简,加强环境适应性,进一步提高工作可靠性。

在本书初稿完成后,承蒙丁衡高院士、冯培德院士、汪顺亭院士,以及杨功流教授认真评阅,提出了非常宝贵和中肯的意见与建议,以及鼓励,并一致推荐本书正式出版。丁衡高院士还为本书写了序言。特此表示衷心感谢。

借此机会,还要感谢多年来与作者亲密合作的所有老师和研究生,他

(她)们的贡献,虽然在本书的参考文献中已有提及。但是他(她)们的实际工作远远超出了论文的范畴。其中,李海霞博士、胡佩达博士及在读博士生何虔恩还利用假期对本书清样的主要公式进行了全面校核和验算。

由于作者水平有限,本书难免存在错误与不足,热忱欢迎阅读本书的老师、研究生以及工程技术人员批评指正。

高钟毓

2012年5月8日

目 录

第 1 章 坐标系及坐标变换	1
1.1 坐标系定义	1
1.2 坐标变换矩阵	5
1.3 矢量和位置坐标变换.....	12
1.3.1 矢量坐标变换	12
1.3.2 位置坐标变换	13
1.4 四元数.....	15
1.5 旋转参考坐标系.....	17
1.5.1 欧拉角微分方程	17
1.5.2 方向余弦矩阵微分方程	19
1.5.3 四元数微分方程	21
1.6 旋转矢量微分方程.....	24
1.7 方向余弦矩阵与四元数解算.....	27
1.8 比力积分增量计算.....	35
第 2 章 地球参考模型	39
2.1 地球形状.....	39
2.2 地心位置矢量.....	42
2.3 地球引力模型.....	44
2.3.1 地球引力位	44
2.3.2 地球引力加速度	49
2.4 地球重力加速度.....	52
2.5 异常重力.....	54
第 3 章 线性系统最优估计与随机控制	58
3.1 确定性系统.....	58

3.1.1	确定性系统模型	59
3.1.2	线性系统微分方程的解	60
3.1.3	线性系统等价离散化	61
3.2	随机系统	62
3.2.1	随机系统模型	62
3.2.2	随机线性微分方程的解	63
3.2.3	等价离散化系统	66
3.3	线性系统的基本特性	67
3.4	系统分析与设计实例	71
3.5	卡尔曼滤波器	76
3.5.1	随机线性系统模型	76
3.5.2	卡尔曼滤波器方程	77
3.5.3	卡尔曼滤波器特性	79
3.6	随机线性系统的最优控制	81
3.6.1	二次高斯问题与分离定理	81
3.6.2	闭环系统稳定性	84
3.7	分离定理在惯性导航系统中的应用	85
第 4 章	惯性测量组合	91
4.1	机电陀螺仪	91
4.1.1	基本原理	92
4.1.2	单自由度液浮陀螺	93
4.1.3	挠性陀螺	94
4.1.4	静电陀螺	96
4.1.5	机电陀螺漂移误差模型	97
4.2	光学陀螺仪	100
4.2.1	基本原理	100
4.2.2	激光陀螺	100
4.2.3	光纤陀螺	103
4.3	振动陀螺仪	106
4.3.1	基本原理	106
4.3.2	石英音叉陀螺	107
4.3.3	微机械硅陀螺	108

4.4	力平衡加速度计	110
4.4.1	测量原理	110
4.4.2	石英挠性摆式加速度计	112
4.4.3	力平衡微机械加速度计	113
4.5	振动弦(梁)加速度计	114
4.5.1	基本原理	114
4.5.2	石英振梁加速度计	116
4.5.3	微机械振动加速度计	120
4.6	随机误差模型与艾伦方差	123
4.6.1	随机误差模型	123
4.6.2	艾伦方差分析法	127
4.7	捷联式惯性测量组合及其误差模型	137
4.7.1	三轴速率陀螺组合件误差模型	137
4.7.2	三轴加速度计组合件误差模型	140
4.7.3	非惯性坐标系中的加速度计测量误差	141
第5章	陀螺稳定平台	144
5.1	基本工作原理	144
5.2	三轴陀螺稳定平台	147
5.2.1	欧拉动力学方程	147
5.2.2	基座和框架的绝对角速度	148
5.2.3	力矩-角加速度方程	151
5.2.4	陀螺仪测量信号	154
5.2.5	平台伺服系统	155
5.3	四环空间稳定平台	157
5.3.1	基座与框架的绝对角速度	158
5.3.2	各框架组合件的力矩-角加速度方程	160
5.3.3	陀螺仪测量信号	166
5.3.4	平台伺服系统控制方案	167
5.4	四环空间稳定平台运动微分方程	176
5.5	四环空间稳定平台标称运动轨迹	182
5.6	标称轨迹坐标与框架角的等价变换关系	186
5.7	陀螺稳定平台设计要点	189

第 6 章 惯性导航系统机械编排方程	191
6.1 概述	191
6.2 惯性导航系统通用解算方程	192
6.2.1 加速度计输出方程	192
6.2.2 导航解算方程	194
6.3 本地水平指北平台式系统	196
6.4 舒拉回路	200
6.5 本地水平游移方位平台式系统	203
6.6 空间稳定平台式系统	208
6.7 捷联式系统	212
6.7.1 本地水平指北坐标系中的机械编排方程	214
6.7.2 本地水平游移方位坐标系中的机械编排方程	216
6.8 捷联式系统计算	217
第 7 章 惯性导航系统误差模型	224
7.1 坐标系与误差角矢量	225
7.2 Ψ 角误差模型	227
7.2.1 Ψ 角方程	227
7.2.2 位置和速度误差方程	227
7.3 Φ 角误差模型	230
7.3.1 Φ 角误差方程	231
7.3.2 位置误差方程	231
7.3.3 速度误差方程	232
7.4 本地水平指北系统误差模型	233
7.4.1 Ψ 角系统误差模型	233
7.4.2 Φ 角系统误差模型	236
7.5 本地水平游移方位系统误差模型	240
7.6 空间稳定系统误差模型	242
7.6.1 惯性坐标系 i 中的基本误差模型	242
7.6.2 地球坐标系 e 中的基本误差模型	244
7.6.3 输出导航信息误差	245
7.6.4 空间稳定纯惯性导航系统误差模型框图	247

7.6.5	系统误差模型等价性	248
7.7	捷联式系统误差模型	250
7.7.1	Φ 角方程	250
7.7.2	Ψ 角方程	251
7.7.3	捷联式系统 Ψ 角误差模型	252
7.7.4	捷联式系统扰动误差模型	253
第8章	惯性导航系统误差传播特性	256
8.1	纯惯性导航系统误差传播特性	257
8.1.1	垂直通道不稳定性	257
8.1.2	水平通道振荡特性	258
8.1.3	短时间间隔误差传播特性	260
8.2	高度阻尼机械编排	263
8.3	水平速度阻尼机械编排	266
8.4	长时间导航误差分析	271
8.4.1	Ψ 角方程的解	271
8.4.2	位置和方位误差解	273
8.5	空间稳定系统误差传播特性	274
8.5.1	纯惯性系统误差分析	274
8.5.2	阻尼系统机械编排	275
8.5.3	阻尼空间稳定系统误差模型	277
8.5.4	长时间导航误差表达式	279
8.5.5	长时间导航误差解算	282
第9章	旋转调制式惯性系统	290
9.1	引言	290
9.2	陀螺壳体连续旋转与断续翻滚	291
9.2.1	壳体连续旋转	291
9.2.2	壳体多位置断续翻滚	295
9.3	捷联式IMU单轴与双轴翻滚	299
9.3.1	捷联式IMU单轴分度翻滚	300
9.3.2	捷联式IMU双轴分度翻滚	305
9.4	旋转调制的局限性	316

9.5	平台在翻滚条件下的漂移角速度	318
9.5.1	壳体翻滚失准角	318
9.5.2	陀螺坐标系与平台坐标系	319
9.5.3	平台漂移角速度	323
9.6	调制平均后平台坐标系中的比力计算	324
9.7	旋转调制系统的 C_p 微分方程	327
9.8	旋转调制系统的姿态角及其误差计算	329
9.8.1	姿态角计算	329
9.8.2	姿态角误差分析	331
9.9	静电陀螺监控器原理与分析	333
9.9.1	基本工作原理	333
9.9.2	空间稳定平台标称运动轨迹	336
9.9.3	平台漂移误差角计算	337
9.9.4	误差分析	345
第 10 章	系统初始对准与标定	347
10.1	基本原理	347
10.2	自动调平技术	351
10.3	陀螺罗经法方位对准	355
10.4	空间稳定平台粗对准	359
10.5	捷联式系统解析法初始对准	368
10.6	本地水平系统最优初始对准和标定	373
10.6.1	系统误差模型	373
10.6.2	观测变量为平台水平倾角	376
10.6.3	观测变量为速度误差	379
10.6.4	观测变量为位置误差	382
10.7	空间稳定系统精对准与标定	385
10.7.1	系统误差模型	385
10.7.2	能观性分析	386
10.7.3	卡尔曼滤波器设计	388
10.7.4	对准误差分析	390
10.8	捷联式系统传递对准	392
10.8.1	导航方程	393

10.8.2	卡尔曼滤波器	394
10.8.3	校正指令生成	399
10.8.4	杆臂效应和运载体振动影响	400
第 11 章	水平阻尼与系统重调	401
11.1	水平速度阻尼回路设计	401
11.2	舒拉阻尼回路特性	404
11.2.1	稳态误差	405
11.2.2	频率响应	406
11.3	匹配滤波与变阻尼技术	407
11.4	本地水平系统确定性重调方法	413
11.4.1	系统重调误差模型	414
11.4.2	GPS 三点校方案	416
11.4.3	星光跟踪器两点校方案	419
11.5	本地水平系统最优重调	420
11.5.1	重调滤波器设计	420
11.5.2	重调控制指令生成	422
11.6	空间稳定系统重调	423
11.6.1	系统重调误差模型	423
11.6.2	GPS 二点校方案	423
11.6.3	星光跟踪器一点校方案	425
11.6.4	外参考速度校方案	426
第 12 章	系统误差系数标校	429
12.1	误差系数标校的重要性	429
12.2	框架角零位与加速度计粗标定	430
12.2.1	框架角传感器零位标定	430
12.2.2	加速度计组合件测量方程	431
12.2.3	平台 18 位置旋转次序表	432
12.2.4	加速度计标度因数和偏置计算	434
12.2.5	框架角零位误差计算	436
12.2.6	加速度计安装误差计算	437
12.3	加速度计组合件误差精标定	439

12.4	陀螺仪安装误差标定	443
12.4.1	极轴陀螺安装误差标定	443
12.4.2	赤道陀螺安装误差标定	448
12.5	陀螺壳体翻滚失准角标定	452
12.5.1	姿态角误差标定法	453
12.5.2	扰动比力标定法	454
12.6	系统级误差系数标定	457
12.6.1	比力误差法	457
12.6.2	姿态角误差法	461
12.6.3	经纬度位置误差法	463
12.6.4	加速度计误差与平台误差分离算法	464
中英文对照索引		470
参考文献		480

第 1 章

坐标系及坐标变换

惯性导航系统要求精确定义一系列参考坐标系,并在不同坐标系之间进行测量和计算量的变换。这些参考坐标系共计有 9 个。其中,5 个与地球几何形状相关,并涉及惯性参考系;第 6 个是运载体坐标系。这 6 个参考坐标系都是右手正交坐标系。还有 3 个附加坐标系分别用来定义平台、陀螺仪及加速度计的一组轴。其中,平台坐标系是正交右手坐标系,而陀螺仪和加速度计的坐标轴由它们各自物理上的敏感轴定义,通常是非正交的。因此,将陀螺仪和加速度计非正交坐标系与正交的平台坐标系相联系,需要进行特殊处理。

在这一章中,首先,参考文献[71,1,2],将定义这些需要的参考坐标系和介绍各种变量在不同坐标系之间变换的必要算法;其次,讨论描述动坐标系之间几何关系的运动微分方程,包括欧拉角微分方程、方向余弦矩阵微分方程及四元数微分方程;最后,介绍旋转矢量微分方程和方向余弦矩阵与四元数的解算方法,以及动坐标系中的比力积分增量计算。

1.1 坐标系定义

1. 惯性坐标系

惯性坐标系是适用牛顿运动定律的参考坐标系。因此,惯性坐标系是无加速度的,但是可能处于匀速直线运动状态。原则上,惯性坐标系的原点可以是任意的,坐标轴指向三个互相垂直的方向。所有惯性传感器都是相对惯性坐标系进行测量,但沿着仪表敏感轴分解。

对于在感兴趣的地球附近导航,惯性坐标系 $X_i Y_i Z_i$ (简记为 i 系) 定义为相对星体无旋转运动的右手坐标系。其原点在地球质心, X_i 轴落在地球