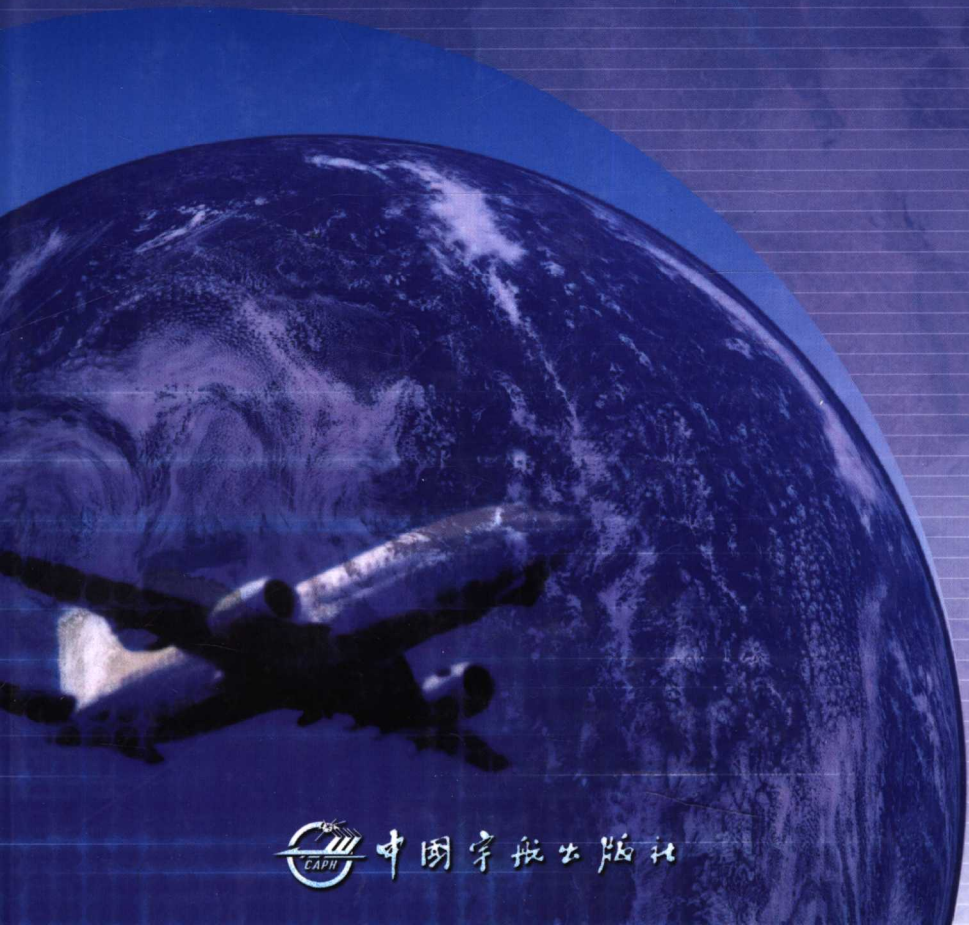


PRECISION NAVIGATION SYSTEMS

# 高精度导航系统

章燕申 著



中国宇航出版社

# 高精度导航系统

PRECISION NAVIGATION SYSTEMS

章燕申 著



中国宇航出版社

· 北京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

高精度导航系统/章燕申著. —北京:中国宇航出版社,2005.9

ISBN 7-80144-999-1

I. 高... II. 章... III. 陀螺仪—导航  
IV. TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 099195 号

出版发行 **中国宇航出版社**  
社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830  
(010)68768548  
网址 [www.caphbook.com](http://www.caphbook.com) / [www.caphbook.com.cn](http://www.caphbook.com.cn)  
经销 新华书店  
发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)  
(010)68768541 (010)68767294(传真)  
零售店 读者服务部 北京宇航文苑  
(010)68371105 (010)62529336  
承印 北京智力达印刷有限公司  
版次 2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷  
规格 880×1230 开本 1/32  
印张 13 字数 383 千字  
书号 ISBN 7-80144-999-1  
定价 50.00 元

本书如有印装质量问题,可与发行部调换

## 内 容 简 介

这本专著主要介绍了作者在清华大学长期从事“静电陀螺仪”和“光学陀螺定位定向系统”等科研项目的成果。此外,书中还介绍了惯性/卫星组合导航系统理论、最优估计理论以及导航系统中误差实时控制方法等基础知识。

作者曾多次结合科研工作访问加拿大、美、俄、德、法等国的一些高校和研究所。在本书中,介绍了他们在导航系统关键技术研究中所取得的一些成果。作为高精度导航系统工程应用的一个实例,本书还详细介绍了大地惯性测量系统的精度保证方法。

在以上研究和访问的基础上,作者提出了静电、激光和光纤等三种高精度陀螺仪的工程设计方法,内容包括:(1)总体结构的分析;(2)关键零部件的结构与工艺;(3)误差分析、测试与模型建立;(4)在导航系统中,主要误差的静态和动态校准。

本书的内容具有工程性、实用性和前瞻性。对于从事研究、开发和应用高精度导航系统的工程技术人员和高校师生具有参考价值。

# PRECISION NAVIGATION SYSTEMS

Yanshen Zhang

## ABSTRACT

In this monograph, the successes achieved by the author working with Tsinghua University on the research projects "Electrostatic Gyro", "Position and Azimuth Determining System Using Optical Gyro" and others are presented. Besides, in the book the basic theories related to the design of precision navigation systems are introduced.

With the research projects mentioned above, the author has visited related universities and research institutes in Canada, USA, Russia, Germany and France. In the book, their successes obtained in the above mentioned fields are presented.

Based on the above practice, the author has established the engineering design methods for developing electrostatic gyro, ring laser gyro and fiber optical gyro. These methods consist of: (1) Analysis of system configuration; (2) Design of key elements and their technologies; (3) Error analysis, testing and modeling; (4) Static and dynamic calibration of error coefficients in navigation system.

The contents of the book are practical, applicable and perspective. As a reference, it might be helpful for technical staffs and students being involved in research, development and application of precision navigation systems.

20世纪70年代,在核潜艇和远程飞机等运载工具中,以静电陀螺仪为核心的平台式惯性导航系统得到了应用,成为批量生产的型号产品。在长时间航行中,它们不仅达到了所要求的定位精度,而且可以保证从载体上发射武器。可以认为,静电陀螺仪的成功应用标志着导航技术进入了高精度的时代。

20世纪80年代,激光陀螺捷联式惯性导航系统在民航机、战斗机、远程火炮和战术导弹发射车等载体中得到了广泛应用。从物理上讲,光学陀螺仪没有与加速度有关的误差,而且它的优点是启动快,不需要预热和温度控制;测量速度范围没有限制,标度因数的线性度和稳定性高。因此,和机械陀螺仪相比较,光学陀螺仪在低成本和小型化等方面具有优势,可以预期它们将会有进一步的发展。

惯性技术的发展历史表明,在它的产品中需要充分利用高新技术的成果。目前,“纳米技术”已经在传感器、新材料等多种工程领域中得到应用,出现了多种“微光机电系统”(MOEMS)的新型光电子器件。例如,“多量子阱超辐射发光管”、“多功能集成光路相位调制器”等。它们为光学陀螺仪提供了集成光路的器件。

本书的特点是对工程实际研究成果的系统性总结。在本书作者负责的科研项目静电陀螺仪、激光陀螺定位定向系统,以及集成光学陀螺仪中,清华大学和国内外的有关单位紧密合作,研制成功了相应的工程样机和实验装置。在实验研究的基础上,获得了有关设计方法、精度测试、误差分析以及模型建立等多方面的研究成果。

在本书中,作者还介绍了在国外访问中获得的有关科研成果,主要是:美国 Stanford 大学的“GP-B”型相对论静电陀螺仪和德国宇航院飞行制导研究所的激光陀螺试验样机。这些国外的研究成果具有重要的参考价值。

中国惯性技术学会愿意向从事研究、生产及使用导航产品的广大技术人员推荐这本专著。对于高等学校“自动控制”和“精密仪器”等专业的教师、研究生和本科生,这本专著也可作为学习有关专业课程的参考书。

丁衡高

2005年6月

## 前 言

---

在国防和国民经济中,导航与控制对舰船、飞机和火箭等运载体具有十分重要的作用。冷战期间,美国和苏联等国高度重视研究和开发各种战略和战术武器中的导航系统,取得了以下重大成果:

(1) 静电陀螺仪保证了核潜艇发射战略武器所需要的定位精度。

(2) 在航空、航海、车辆导航以及大地测量等领域中,激光陀螺捷联式惯性导航系统得到了普遍应用。与此同时,在各种战术武器和机器人中,光纤陀螺导航与控制系统也得到了实际应用。

(3) 建立了全球卫星定位系统。卫星和惯性系统互相组合,构成了组合导航系统。

(4) 在与卫星定位信号相组合的情况下,中、低精度的微型机械陀螺仪和加速度计在精确制导武器中得到了大量应用。与此同时,微型光学陀螺仪的研究也取得了显著的进展。

1954—2004年,作者在莫斯科包曼技术大学和北京清华大学先后参加了以下有关导航系统的研究项目:

- (1) 液浮陀螺仪关键零件的工艺;
- (2) 静电陀螺仪;
- (3) 惯性测量系统;
- (4) 光学陀螺定位定向系统;



### (5) 集成光学陀螺仪。

结合以上项目,1983—2001年作者先后访问了加拿大、美、德、俄、法等国的有关高校和研究所。作为访问学者,作者深入研究了他们的有关成果和实验样机,并和有关教授建立了良好的科研合作关系。

本书介绍了高精度导航系统中的主要关键技术,全书由以下三部分组成。在第一部分中,全面介绍了惯性导航系统、卫星定位系统、组合导航系统以及最优估计理论。作为这些理论在工程应用中的实例,作者详细介绍了在加拿大研究惯性测量系统的收获。

在本书的第二和第三部分中,作者遵循理论与实际密切结合的原则,介绍了静电陀螺仪、激光陀螺仪以及光纤陀螺仪的工程设计方法,内容包括:

- (1) 陀螺仪系统结构的分析和比较;
- (2) 陀螺仪关键零部件的结构和工艺;
- (3) 陀螺仪误差的分析、测试和模型建立;
- (4) 在导航系统中,对陀螺仪误差的静态和动态校准等。

作者在少年时代饱受日本侵略者之害,曾颠沛流离,家破人亡。在高中和大学时期,作者的不少同窗好友投笔从戎,奔向了保卫祖国的第一线。为此,作者深感旧中国“有国无防”的痛苦,决心从事国防科学技术的研究。

1959年以来,作者结合上述科研项目在清华大学培养了多届“自动控制”和“精密仪器”专业的本科毕业生、30余名硕士以及10余名博士。

作者特别感谢以下单位的有关人员,他们为研制中国的第一台静电陀螺仪作出了巨大的贡献:

- (1) 原第六机械工业部;
- (2) 原国防科委第三研究院;
- (3) 上海交通大学精密仪器系;
- (4) 常州航海仪器厂;
- (5) 清华大学自动控制系、精密仪器系以及电子工程系。

1995年以来,作者转向研究集成光学陀螺仪及其光电子器件,目的是开发具有国际先进水平和自主知识产权的产品。作者深信,微型

光学陀螺仪的研究和开发必将促进中国国民经济产业结构向“微米—纳米”等高新技术的方向转型。

对于从事导航系统研究、开发、使用的工程技术人员和高校师生,本书具有参考价值。

对于中国惯性技术学会在本书出版过程中给予的关心和帮助,作者致以诚挚的谢意。

本书可能存在一些错误和不恰当之处。此外,作者的有些学术观点也有待继续探讨。欢迎读者给以指正,并提出改进意见。

作者于清华大学

2005年8月

# 目 录

---

---

引论	(1)
第1章 惯性导航系统的误差分析与计算	(9)
1.1 引言	(9)
1.2 导航计算中的坐标系	(10)
1.3 Foucault 陀螺仪	(13)
1.4 摆式陀螺罗经	(15)
1.5 Schuler 周期	(17)
1.6 惯性导航系统闭环控制的特点	(18)
1.7 液浮积分陀螺仪	(20)
1.8 静电陀螺仪	(22)
1.9 挠性陀螺仪	(25)
1.10 激光陀螺仪	(26)
1.11 光纤陀螺仪	(29)
1.12 平台式惯性导航系统	(32)
1.13 惯性导航系统的机械编排方程	(34)
1.14 平台式惯性导航系统的误差传播方程	(36)
1.15 惯性导航系统误差的传播特性	(38)
1.16 捷联式惯性导航系统	(39)
1.17 本章小结	(41)
参考文献	(43)

<b>第 2 章 卫星/惯性组合导航系统</b> .....	(45)
2.1 引言.....	(45)
2.2 全球导航卫星系统.....	(47)
2.3 卫星导航的定位方法.....	(52)
2.4 计程仪的定位精度.....	(57)
2.5 无线电导航的定位精度.....	(58)
2.6 惯性导航系统的定位精度.....	(60)
2.7 不同组合深度的 GPS / INS 导航系统 .....	(61)
2.8 本章小结.....	(67)
参考文献 .....	(68)
<b>第 3 章 最优估计理论与导航系统的误差控制</b> .....	(70)
3.1 引言.....	(70)
3.2 Weiner 滤波理论与积分方程 .....	(72)
3.3 连续的 Kalman 滤波方程 .....	(75)
3.4 离散的 Kalman 滤波方程 .....	(80)
3.5 Kalman 滤波器的稳定性 .....	(83)
3.6 Kalman 滤波器的发散 .....	(84)
3.7 防止 Kalman 滤波器发散的方法 .....	(86)
3.8 平方根滤波器.....	(87)
3.9 自适应的 Kalman 滤波器 .....	(90)
3.10 自适应 Kalman 滤波器的计算方程 .....	(91)
3.11 Kalman 滤波器的工程设计方法.....	(93)
3.12 简化的自适应 Kalman 滤波器 .....	(97)
3.13 本章小结 .....	(98)
参考文献.....	(100)
<b>第 4 章 惯性测量与定位定向系统</b> .....	(102)
4.1 引言 .....	(102)
4.2 惯性测量系统的技术要求 .....	(104)
4.3 液浮陀螺定位定向系统 .....	(106)
4.4 清华大学“GWX-1”型快速定位定向系统 .....	(113)
4.5 静电陀螺大地测量系统 .....	(117)

4.6	激光陀螺定位定向系统 .....	(121)
4.7	惯性测量系统的动态校准 .....	(122)
4.8	重力测量与重力梯度仪 .....	(128)
4.9	惯性测量系统的误差模型及 Kalman 滤波器 .....	(129)
4.10	本章小结 .....	(131)
	参考文献 .....	(133)
<b>第 5 章</b>	<b>静电陀螺仪的结构、工艺与支承系统 .....</b>	<b>(135)</b>
5.1	引言 .....	(135)
5.2	静电陀螺仪的结构与关键技术 .....	(136)
5.3	真空环境中电场的击穿强度 .....	(138)
5.4	转子的结构 .....	(140)
5.5	转子的工艺 .....	(143)
5.6	空心转子与实心转子的比较 .....	(146)
5.7	支承电极的结构 .....	(148)
5.8	支承电极的工艺 .....	(149)
5.9	测量转子位移的电容电桥 .....	(150)
5.10	具有变模式控制的静电支承系统 .....	(152)
5.11	本章小结 .....	(158)
	参考文献 .....	(159)
<b>第 6 章</b>	<b>静电陀螺仪漂移误差的测试与模型辨识 .....</b>	<b>(161)</b>
6.1	引言 .....	(161)
6.2	在导航系统中静电陀螺仪漂移误差模型的 辨识方法 .....	(162)
6.3	船用监控器中静电陀螺仪的漂移误差模型 及其辨识方法 .....	(165)
6.4	静电干扰力矩产生的机理 .....	(165)
6.5	静电陀螺仪漂移误差的数学模型 .....	(168)
6.6	双轴伺服转台测试系统与实验设计 .....	(169)
6.7	采用曲线啮合法计算静电陀螺仪的各项漂移 误差系数 .....	(170)
6.8	静电陀螺仪的力矩测量系统 .....	(172)

6.9	静电陀螺仪伺服法测试的研究 .....	(180)
6.10	静电陀螺仪随机性误差模型的初步研究 .....	(184)
6.11	本章小结 .....	(189)
	参考文献 .....	(191)
<b>第7章</b>	<b>静电陀螺导航系统与空间定向系统 .....</b>	<b>(193)</b>
7.1	引言 .....	(193)
7.2	中国 721 型静电陀螺航姿系统的结构 .....	(195)
7.3	721 型静电陀螺平台的稳定回路 .....	(198)
7.4	721 型静电陀螺航姿系统的飞行试验 .....	(203)
7.5	美国 SPN 型静电陀螺平台的结构 .....	(203)
7.6	SPN 型静电陀螺平台的稳定回路 .....	(206)
7.7	SPN 型静电陀螺导航系统 .....	(208)
7.8	美国 Stanford 大学的 GP-B 型静电陀螺仪 .....	(214)
7.9	GP-B 型卫星的结构与控制 .....	(220)
7.10	俄国的实心转子静电陀螺仪 .....	(222)
7.11	本章小结 .....	(228)
	参考文献 .....	(230)
<b>第8章</b>	<b>精密组合机床的光学调整方法 .....</b>	<b>(232)</b>
8.1	引言 .....	(232)
8.2	技术要求 .....	(233)
8.3	双轴组合机床的光学调整方法 .....	(235)
8.4	#1 型同心度光学调整仪的研制与实验研究 .....	(238)
8.5	#2 型同心度光学调整仪的研制与实验研究 .....	(241)
8.6	四轴组合机床光学调整仪的研制与实验研究 .....	(244)
8.7	本章小结 .....	(246)
	参考文献 .....	(247)
<b>第9章</b>	<b>激光陀螺仪的误差分析与控制技术 .....</b>	<b>(248)</b>
9.1	引言 .....	(248)
9.2	无源腔 Sagnac 干涉仪 .....	(250)
9.3	美国 Sperry 公司的激光陀螺仪实验装置 .....	(252)
9.4	有源腔 Sagnac 干涉仪 .....	(253)

9.5	德国飞行制导研究所的激光陀螺仪实验装置 .....	(256)
9.6	俄国棱镜式激光陀螺仪的结构与性能 .....	(259)
9.7	光束几何位置变化造成的激光陀螺仪误差 .....	(262)
9.8	谐振腔内光束几何位置与光程长度的控制 .....	(269)
9.9	闭锁阈值造成的激光陀螺仪误差 .....	(272)
9.10	开环抖动偏频的激光陀螺仪 .....	(277)
9.11	闭环抖动偏频的激光陀螺仪 .....	(278)
9.12	抖动偏频激光陀螺仪的高频读出系统 .....	(279)
9.13	激光陀螺仪的性能测试与误差模型 .....	(288)
9.14	激光陀螺仪导航系统的校准 .....	(289)
9.15	本章小结 .....	(294)
	参考文献 .....	(295)
<b>第 10 章</b>	<b>光纤陀螺仪的系统结构与误差分析 .....</b>	<b>(298)</b>
10.1	引言 .....	(298)
10.2	无源腔的谐振型光纤陀螺仪 .....	(299)
10.3	Brillouin 光纤陀螺仪 .....	(302)
10.4	干涉型光纤陀螺仪的“最小互易结构” .....	(307)
10.5	消偏的干涉型光纤陀螺仪 .....	(309)
10.6	开环干涉型光纤陀螺仪的读出系统 .....	(311)
10.7	闭环干涉型光纤陀螺仪的控制回路 .....	(316)
10.8	干涉型光纤陀螺仪的偏振误差 .....	(320)
10.9	干涉型光纤陀螺仪的调制误差 .....	(323)
10.10	干涉型光纤陀螺仪的温度和振动误差 .....	(325)
10.11	光源和探测器噪声造成的光纤陀螺仪误差 .....	(325)
10.12	模块化的干涉型光纤陀螺仪 .....	(327)
10.13	中、低精度的干涉型光纤陀螺仪 .....	(330)
10.14	高精度的干涉型光纤陀螺仪 .....	(332)
10.15	本章小结 .....	(337)
	参考文献 .....	(338)
<b>第 11 章</b>	<b>微型光学陀螺仪的探索性研究 .....</b>	<b>(341)</b>
11.1	引言 .....	(341)

11.2	目前小型化光学陀螺仪产品的水平·····	(342)
11.3	微型光学陀螺仪的研制状况·····	(344)
11.4	集成光路环形腔的设计与工艺研究·····	(345)
11.5	谐振型微型光学陀螺仪系统结构的研究·····	(353)
11.6	干涉型微型光学陀螺仪系统结构的研究·····	(359)
11.7	超短脉冲固态激光陀螺仪的研究·····	(366)
11.8	法国 LETI 研究所的微型光学陀螺芯片·····	(372)
11.9	美国 Sandia 国家实验室的微型光学陀螺集成 光电子芯片·····	(374)
11.10	美国 Honeywell 公司的微型光学陀螺芯片·····	(377)
11.11	本章小结·····	(378)
	参考文献·····	(380)
附录 A	导航技术研究工作 50 年·····	(384)



---

## 导航技术的发展

导航系统(或仪器)的任务是确定载体的位置,并把载体由目前所在的地点按照给定的时间和航线引导到目的地。为此,导航仪器和系统应当提供以下“导航信号”:

(1) 载体质量中心所在地的“定位信号”(所在地的地理经度、纬度和高度);

(2) 载体的“定向信号”(偏离子午面的航向角、偏离水准面的俯仰角和倾侧角,三者合称载体的姿态角);

(3) 载体的“速度信号”(东向速度、北向速度、垂直速度)。

根据以上导航信号,需要调整载体的航行方向和速度,保证载体按照给定的时间和航线到达目的地。

### 罗经导航技术

20世纪以前,导航技术是从航海的需求和实践  
中发展起来的。在舰船上,采用“磁罗盘”可以测定  
舰船的航向角,解决导航中的“定向”问题。采用六