



航天科技图书出版基金资助出版

光纤陀螺惯性系统

王 巍 主编



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

光纤陀螺惯性系统

王 巍 主编



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

光纤陀螺惯性系统/王巍主编. —北京: 中国宇航出版社,
2010. 12

ISBN 978 - 7 - 80218 - 892 - 1

I. ①光… II. ①王… III. ①光学陀螺仪—惯性系统
IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 259116 号

责任编辑 曹晓勇 责任校对 陈琳 封面设计 03 工舍

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/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 北京画中画印刷有限公司

版次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230 开本 1/32

印张 18.375 字数 526 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 80218 - 892 - 1

定价 88.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次,资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登陆中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010) 68767205, 68768904

《光纤陀螺惯性系统》

编写人员

主 编	王 巍		
副主编	蔡春龙	张志鑫	杨清生
编 写	王 巍	蔡春龙	王颂邦
	黄继勋	王学锋	朱红生
	何小飞	张 红	向 政

序

惯性技术是建立在应用力学、自动控制、精密仪器、计算机及微电子等技术基础上的一门现代技术学科，一般涉及惯性仪表、惯性稳定、惯性导航、惯性制导及惯性测量等相关技术。惯性导航系统是目前唯一同时具备完全自主，高度隐蔽，强抗干扰，导航信息全面、实时且连续等重要特性的导航系统，因而惯性导航已成为当今在陆、海、空、天众多领域得到广泛应用的一种导航方式，成为各种制导武器及武器平台必备的关键设备之一。惯性导航系统是现代武器装备的基准信息源，在现代信息化战争中具有重要的地位。

惯性系统具有测量分辨率高、数据输出频率高、短期精度高、动态频带宽等特点，使其成为运载火箭、卫星、飞船等各类运载器和航天器控制系统中的关键测量和控制设备，在石油勘探、矿井开采、大地及地球物理测量、深海探测、铁路自动化检测、智能交通、隧道挖掘、大坝形变测量等诸多民用领域也有十分广泛的应用价值。

光纤陀螺是一种全固态结构的光学惯性仪表，由于没有活动部件，它具有高可靠、长寿命、轻小型、低功耗、动态响应快、精度覆盖面宽、启动快速、直接数字量输出、结构相对简单等许多特点，在各类惯性系统产品中不断得到应用和推广。


光纤陀螺与不同类型的加速度计配合使用，可方便地设计出不同的精度等级及用途的捷联式惯性系统。从整体性能而言，光纤陀螺捷联惯性系统在对恶劣环境的适应性、参数长期稳定性、仪表冗余配置性、生产工艺性等方面都具有技术优势，也便于按照不同应用领域及要求设计成通用化、系列化产品。

《光纤陀螺惯性系统》是本书作者在从事光纤陀螺及其惯性系统方面长期技术研究及工程产品研制与应用的基础上编写而成的。全

书论述了光纤陀螺惯性系统所涉及的光纤陀螺及加速度计技术、光纤陀螺捷联惯性测量装置技术、光纤陀螺惯性系统设计实现技术、光纤陀螺惯性系统环境适应性设计与试验技术、光纤陀螺捷联惯性导航与组合导航系统及其初始对准技术、光纤陀螺捷联航姿系统技术、光纤陀螺寻北及定位定向系统技术、光纤陀螺惯性系统在空间及其他相关领域的应用技术等相关内容。

本书内容较为全面，涵盖了现有光纤陀螺惯性系统主要的产品类型，并分别对各类系统级产品的结构组成、技术与应用特点、相关设计方法等进行了较为深入的探讨和论述，各章节的技术内容与工程化产品的设计及实际应用紧密结合，全书具有较强的工程实用特色，对从事光纤陀螺惯性系统技术研究、产品设计与制造、产品应用与管理的科技人员、管理人员，以及高等院校师生等都有较大的参考价值。

希望本书的出版，对我国光纤陀螺及新型惯性系统技术的发展，对相关领域技术人才的培养都能起到促进作用。



2010年12月

前 言

光纤陀螺诞生于1976年，是一种基于Sagnac效应的全固态惯性仪表，自问世以来，就以其突出的性能特点和良好的应用前景引起世界各大国的普遍重视。基于光纤陀螺的捷联式惯性系统具有可靠性高、寿命长、启动快、功耗低、生产工艺相对简单等多方面的优势，因而在军事装备及民用领域都有十分重要的使用价值和推广前景。

由于光纤陀螺在工作原理、结构组成、制造方式、性能指标及其测试与评估等方面与其他类型的陀螺仪表都存在明显差异，因而在光纤陀螺捷联惯性系统的设计、研制、生产、测试与试验等过程中也有其值得关注的不同技术途径与实现方法。《光纤陀螺惯性系统》一书旨在对不同类型、不同用途的光纤陀螺惯性系统产品在工程设计与实现过程中的技术内容、设计方法及其特点等进行较全面而深入的论述与探讨。本书第1章至第3章简略介绍了光纤陀螺惯性系统及其常用的光纤陀螺与加速度计，第4章介绍了较基础的光纤陀螺捷联惯性测量装置，第5章、第6章对光纤陀螺惯性系统中核心硬件和软件的工程设计与实现及其环境适应性设计与试验等技术进行了论述。以此为基础，在第7章至第11章中依次探讨了光纤陀螺捷联惯性导航与组合导航系统及其初始对准技术、光纤陀螺捷联航向姿态参考系统技术、光纤陀螺寻北及定位定向系统技术等，重点介绍了其设计与实现方案、误差模型、环境适应性设计与试验等内容，第12章、第13章对光纤陀螺惯性系统在空间领域及其他领域的具体应用进行了介绍。

本书的主要内容是基于作者对多年来在该技术领域的科研成果与实践经验的总结，同时也参阅了近年来国内外同行学者发表的许

多文献资料。本书可供光纤陀螺惯性系统技术研究、产品研制与应用等方面的工程技术人员及相关专业的高等院校师生参阅。

本书由王巍主编，第1章由王巍、蔡春龙负责撰写，第2章由王巍、王学锋负责撰写，第3章由王巍、朱红生负责撰写，第4章至第6章由王巍、王颂邦负责撰写，第7章由何小飞、蔡春龙负责撰写，第8章由黄继勋、蔡春龙负责撰写，第9章由黄继勋、王巍负责撰写，第10章由蔡春龙、王巍负责撰写，第11章由张红、蔡春龙负责撰写，第12章由王巍、向政负责撰写，第13章由蔡春龙、王巍负责撰写，张志鑫、杨清生参加了本书相关技术研究、内容策划及编审等工作。全书由王巍、蔡春龙完成统稿。

本书在编写和审稿过程中，陆元九院士、丁衡高院士、吴宏鑫院士、包为民院士、张维叙教授、张树侠教授、吕振铎研究员、孙凝生研究员、孙肇荣研究员、杨立溪研究员、陈水华研究员、杨畅研究员、赵采凡研究员、吕应祥研究员、吴其钧研究员等都提出了许多宝贵意见和修改建议。另外，张东旭、黄磊、孟祥涛、隋丽娜、丁东发、胡常青、盖永辉、刘振林、兰春云、吴海仙、白雪峰、周斌、蒋欢、邢朝洋、陈北鸥、秦伟亮、魏丽萍等同志参与了本书相关内容的研讨或部分素材的整理工作。作者谨向以上各位专家及同事对本书的大力支持与帮助深表感谢。

本书的相关研究成果得到了总装备部、国防科工局、中国航天科技集团公司、中国航天电子技术研究院，以及国家863计划和国防基础科研项目的大力支持，本书的出版得到了航天科技图书出版基金的资助，中国航天科技集团公司科技委主任包为民院士为本书作序，作者一并谨表衷心的感谢！

由于作者的水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

作 者

2010年12月

目 录

第 1 章 光纤陀螺惯性系统技术概述	1
1.1 惯性技术概述	1
1.1.1 惯性技术的原理与特点	1
1.1.2 惯性技术的发展历程	3
1.2 惯性系统中常用坐标系	8
1.2.1 惯性导航技术的物理学基础	8
1.2.2 常用坐标系	9
1.2.3 对地球相关特征的描述	13
1.3 光纤陀螺惯性系统的类型与特点	21
1.3.1 光纤陀螺惯性系统的类型	21
1.3.2 光纤陀螺惯性系统的特点	22
1.4 光纤陀螺惯性系统的应用及发展	23
1.4.1 光纤陀螺惯性系统的典型应用	23
1.4.2 光纤陀螺惯性系统的产业化及发展趋势	32
第 2 章 光纤陀螺技术概述	35
2.1 光纤陀螺工作原理	35
2.1.1 Sagnac 效应	35
2.1.2 光纤陀螺原理	36
2.1.3 光纤陀螺的主要光电子器件	38
2.2 光纤陀螺的类型、特点及性能指标	41
2.2.1 光纤陀螺类型	41
2.2.2 光纤陀螺的主要特点	44
2.2.3 光纤陀螺的主要性能指标	45

2.3 干涉型开环光纤陀螺	47
2.3.1 正弦波相位调制	48
2.3.2 方波相位调制	49
2.3.3 开环光纤陀螺基本结构	51
2.3.4 开环光纤陀螺检测原理	53
2.4 干涉型闭环光纤陀螺	55
2.4.1 闭环光纤陀螺方案	56
2.4.2 偏置调制和反馈方法	58
2.4.3 闭环光纤陀螺的输出	61
2.4.4 闭环光纤陀螺的故障分析	63
2.5 光纤陀螺误差模型及误差机理	64
2.5.1 光纤陀螺的误差模型	64
2.5.2 光纤陀螺零偏误差及机理	67
2.5.3 光纤陀螺标度因数误差及机理	72
第3章 光纤陀螺惯性系统中应用的加速度计	77
3.1 加速度计概述	77
3.1.1 加速度计工作原理与分类	77
3.1.2 光纤陀螺惯性系统对加速度计的要求	79
3.2 石英挠性加速度计	80
3.2.1 石英挠性加速度计工作原理	81
3.2.2 石英挠性加速度计结构及伺服电路	83
3.2.3 石英挠性加速度计的主要误差	86
3.3 悬丝支承摆式加速度计	90
3.3.1 悬丝支承加速度计工作原理与结构组成	90
3.3.2 涡流传感器原理、结构及测量电路	93
3.4 石英振梁加速度计	97
3.4.1 振梁加速度计工作原理	97
3.4.2 石英双端音叉与石英晶体振荡器	100

3.4.3	振梁加速度计信号的处理	102
3.4.4	振梁加速度计的主要误差	104
3.5	摆式硅微加速度计	106
3.5.1	微机电加速度计概述	106
3.5.2	摆式硅微加速度计工作原理	107
3.5.3	摆式硅微加速度计的伺服电路	111
3.5.4	摆式硅微加速度计的主要误差	117
3.6	其他类型的微机电加速度计	120
3.6.1	叉指式硅微加速度计	120
3.6.2	振梁式硅微加速度计	122
3.6.3	隧道电流式硅微加速度计	125
3.7	新型光学加速度计	126
3.7.1	光纤加速度计	126
3.7.2	微光机电加速度计	129
第4章	光纤陀螺捷联惯性测量装置	132
4.1	光纤陀螺捷联惯性测量装置概述	132
4.2	光纤陀螺惯性测量装置总体设计	133
4.2.1	一般设计流程	133
4.2.2	系统总体方案确定及精度分配	134
4.2.3	系统电路及电气接口方案设计	135
4.2.4	系统机械结构方案设计	136
4.2.5	寿命与可靠性、安全性、维修性设计	136
4.2.6	系统试验和验证方案设计	137
4.2.7	典型光纤陀螺惯性测量组合设计举例	137
4.3	冗余配置型光纤陀螺惯性测量装置设计	139
4.3.1	陀螺冗余配置技术概述	139
4.3.2	冗余配置方案与可靠性评估	141
4.3.3	冗余配置方案最优化分析	143

4.3.4	冗余配置故障判断和定位方法	145
4.3.5	典型冗余配置光纤陀螺惯性系统设计实例	147
4.4	光纤陀螺惯性测量装置输入输出模型系数的标定	149
4.4.1	光纤陀螺与加速度计静态模型及标定	150
4.4.2	四轴冗余光纤陀螺惯性组合静态模型及标定	158
4.4.3	六轴冗余光纤陀螺惯性组合静态模型及标定	159
4.5	光纤陀螺惯性测量装置温度误差建模及标定	161
4.5.1	光纤陀螺温度误差建模概述	161
4.5.2	多元线性回归建模方法的应用	163
4.5.3	光纤陀螺在惯测组合通电启动过程中的 零偏温度误差建模及标定	164
4.5.4	光纤陀螺在惯测组合稳态工作时的零偏 温度误差建模及标定	166
4.5.5	加速度计的零偏和标度因数温度误差建 模及标定	168
第5章 光纤陀螺惯性系统的设计实现		171
5.1	光纤陀螺惯性系统设计概述	171
5.1.1	工程产品研发过程概述	171
5.1.2	典型应用领域对光纤陀螺惯性系统的需求	172
5.2	光纤陀螺惯性系统结构设计	178
5.2.1	系统结构与布局	179
5.2.2	惯性组合及其测试工装结构设计	179
5.2.3	系统结构刚度设计	180
5.2.4	系统结构的热设计	181
5.2.5	系统结构的精度分析及分配	182
5.2.6	结构计算机辅助分析与设计	184
5.3	光纤陀螺惯性系统的减振设计	185
5.3.1	减振技术概述	185

5.3.2	减振设计技术	188
5.4	光纤陀螺惯性系统电气设计	191
5.4.1	供电系统设计	191
5.4.2	信号采集与处理电路设计	194
5.4.3	石英挠性加速度计用模/数转换电路设计	197
5.4.4	电气接口设计	204
5.4.5	典型电气系统设计举例	210
5.5	光纤陀螺惯性系统软件设计	215
5.5.1	光纤陀螺惯性系统软件的功能与特点	215
5.5.2	典型光纤陀螺惯性系统软件设计示例	215
5.5.3	软件工程化研制流程	219
第6章	光纤陀螺惯性系统环境适应性设计与试验	223
6.1	环境适应性设计与试验技术概述	223
6.1.1	产品环境适应性与可靠性	223
6.1.2	环境适应性试验分类	224
6.1.3	环境试验相关标准	225
6.2	力学环境条件适应性设计与试验	226
6.2.1	力学环境适应性概述	226
6.2.2	力学环境适应性设计	227
6.2.3	力学环境适应性试验	228
6.3	温度环境适应性设计与试验	232
6.3.1	温度环境适应性概述	232
6.3.2	温度环境防护设计	233
6.3.3	典型的温度控制方案	234
6.3.4	温度环境适应性试验	236
6.4	电磁兼容性设计与试验	237
6.4.1	电磁兼容性设计概述	237
6.4.2	系统机械结构的电磁兼容性设计	240

6.4.3	系统电气部件的电磁兼容性设计	242
6.4.4	电磁兼容试验	243
6.5	空间环境适应性设计与试验	243
6.5.1	空间辐照环境适应性设计与试验	243
6.5.2	空间热真空环境适应性设计与试验	252
6.6	其他环境适应性设计与试验	254
6.6.1	潮湿环境适应性设计与试验	255
6.6.2	盐雾环境适应性设计与试验	256
6.6.3	霉菌环境适应性设计与试验	257
6.6.4	沙尘环境适应性设计	258
6.6.5	惯性系统结构的三防设计	258
6.7	综合环境适应性试验	260
6.8	老炼与储存试验	262
6.8.1	老炼试验技术	262
6.8.2	储存试验技术	264
6.9	光纤陀螺惯性系统寿命评估与加速寿命试验	265
6.9.1	寿命评估与加速寿命试验概述	265
6.9.2	光纤陀螺惯性系统寿命评估与加速寿命试验	267
6.9.3	光纤陀螺的寿命预计模型及试验预计步骤	272
6.9.4	光纤陀螺主要光电子器件的寿命预计及加速试验	275
6.9.5	典型光纤陀螺惯性系统加速寿命试验设计	279
第7章	光纤陀螺捷联惯性导航系统	281
7.1	惯性导航系统基本原理概述	281
7.1.1	惯性导航系统的基本方程	281
7.1.2	舒拉调谐原理及其实现	283
7.1.3	惯导系统高度通道特性	286
7.2	捷联惯导系统的基本算法	288
7.2.1	惯性导航系统中的时钟基准	288

7.2.2	捷联惯导系统基本算法	289
7.2.3	捷联惯导系统的模型编排	297
7.3	光纤陀螺捷联惯导系统误差及其特点	301
7.3.1	光纤陀螺在惯性系统应用中的主要误差	301
7.3.2	光纤陀螺噪声对惯导系统的影响	305
7.3.3	惯导系统误差方程	310
7.3.4	静基座误差传播特性	314
7.3.5	光纤陀螺捷联惯导系统误差特点	318
7.4	光纤陀螺捷联惯导系统的旋转调制技术	322
第 8 章	光纤陀螺捷联惯性组合导航系统	329
8.1	惯性组合导航系统概述	329
8.2	惯性组合导航系统中的滤波技术	330
8.2.1	滤波技术概述	330
8.2.2	惯性组合导航系统中常用的滤波技术	333
8.2.3	卡尔曼滤波在惯性组合导航系统中的应用	334
8.3	典型的光纤陀螺捷联惯性组合导航系统	339
8.3.1	组合导航系统算法编排	339
8.3.2	光纤陀螺捷联惯性组合导航系统中的误差模型	340
8.3.3	光纤陀螺捷联惯性/GPS 组合导航系统	342
8.3.4	光纤陀螺捷联惯性/星光组合导航系统	353
8.3.5	光纤陀螺捷联惯性/地磁匹配组合导航系统	358
第 9 章	光纤陀螺捷联惯性导航系统初始对准技术	362
9.1	惯性导航系统初始对准技术概述	362
9.1.1	初始对准的分类及要求	362
9.1.2	初始对准技术的研究重点	363
9.1.3	光纤陀螺捷联惯导系统初始对准的特点	365
9.2	捷联惯导系统自对准技术	365

9.2.1	罗经法自对准技术	366
9.2.2	光纤陀螺零偏相关误差与对准精度的关系	374
9.3	动基座传递对准技术	375
9.3.1	动基座传递对准概述	375
9.3.2	动基座传递对准算法	377
9.3.3	动基座传递对准误差分析	385
9.4	传递对准试验技术	393
9.4.1	试验室环境的传递对准试验	394
9.4.2	外场环境下的传递对准试验	395
9.4.3	试验精度评定方法	397
第 10 章	光纤陀螺捷联航姿系统	400
10.1	光纤陀螺捷联航姿系统概述	400
10.1.1	航姿系统技术发展概述	400
10.1.2	光纤陀螺航姿系统基本要求及关键技术	401
10.2	光纤陀螺捷联航姿系统水平通道阻尼技术	404
10.2.1	航姿系统的水平通道内阻尼技术	404
10.2.2	航姿系统的水平通道外阻尼技术	412
10.3	光纤陀螺捷联航姿系统高度通道阻尼技术	416
10.4	飞机用光纤陀螺捷联航姿系统	420
10.4.1	机载捷联式航姿系统发展概况	420
10.4.2	机载航姿系统主要的辅助导航设备	422
10.4.3	机载光纤陀螺航姿系统典型设计方案	427
10.5	舰船用光纤陀螺捷联航姿系统	430
10.5.1	国外发展现状	430
10.5.2	船用光纤陀螺捷联航姿系统设计概要	432
10.5.3	典型设计方案举例	436
10.6	光纤陀螺捷联航姿系统发展趋势	437