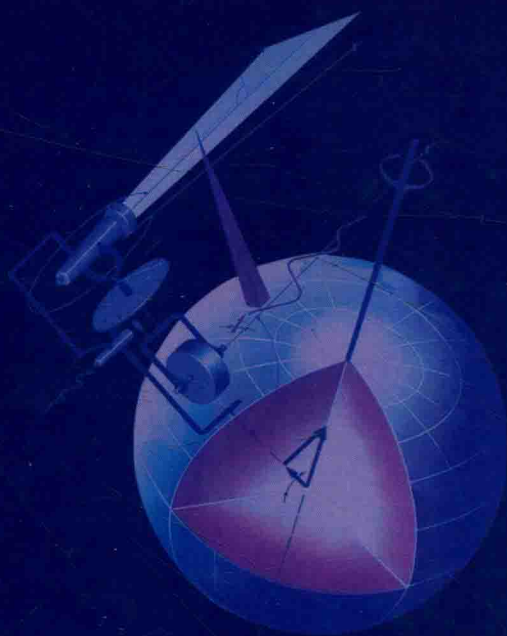




航天科技图书出版基金资助出版

陀螺寻北技术

夏 刚 主编



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

陀螺寻北技术

夏 刚 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

陀螺寻北技术 / 夏刚主编. --北京: 中国宇航出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-5159-0552-5

I. ①陀… II. ①夏… III. ①航空仪表-陀螺仪-研究 IV. ①V241.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 247454 号

责任编辑 阎 列

责任校对 祝延萍

封面设计 宇星文化

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号
(010)60286808

邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)60286888
(010)60286887

(010)68371900
(010)60286804(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2015 年 10 月第 1 版

2015 年 10 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230

开本 1/32

印张 11

字数 317 千字

书号 ISBN 978-7-5159-0552-5

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。可以登录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

《陀螺寻北技术》

编 委 会

主 编 夏 刚

副主编 陈东生 杨功流 高延滨
万彦辉 闵跃军

编 者 严小军 武俊勇 张沛晗
王丽芬 马瑞萍 李光春

序 一

伴随着我国经济的高速发展，中国正迈步在从一个航天大国向一个航天强国发展的道路上。这个过程中，航天技术对国民经济发展的巨大贡献有目共睹，它通过开拓性的先进技术手段改变了诸多产业部门较传统的生产方式，或是通过自身对相关技术产业的需求，带动了基础科学和应用科学的进步。航天技术及其产业这种跨多学科、多领域的综合性和自身技术研究的持续开拓性，决定了它蕴藏着巨大的直接或间接的经济效益与社会效益。它将不断地拓展人类生存的活动空间，推动各种资源的开发利用。

方位地理信息的获取是航天惯性技术中的重要分支，陀螺寻北技术是一种不依赖外部条件就能够测定真北方向的定向技术，在军事、航天、矿山、铁路、森林、建筑、海洋和测绘等部门及远程武器发射等领域日益得到广泛的应用。随着科学技术、经济建设和国防建设的迅速发展，对陀螺定向技术的需求愈来愈多。本书正是为适应上述形势而编写的，它从基础知识介绍开始，深入浅出地逐步论述了各种原理的寻北装置和系统设计的理论和方法、寻北系统的观测方法、应用实例等内容。

本书作者是我国航天领域和相关高校较早一批从事惯性寻北技术研究的专家和学者，在该领域从事研究工作多年。他们在阅读大量国内外文献的基础上，结合自己的研究成果撰写了这本学术专著。由于陀螺寻北技术有着广泛的应用前景，技术的发展还处在不断深

入的阶段，因此还需要广大读者在阅读的过程中不吝批评指正，继续推动陀螺寻北技术在我国的研究、开发与应用，为提高我国航天技术的持续发展而共同奋斗。

包为民

中国科学院院士

序 二

“夫乘舟而惑者，不知东西，见斗极则悟矣”，寻北活动早已成为人类生活的重要组成部分。1852年法国物理学家傅科首次将高速回转体称作陀螺仪（gyroscope），并预言其可用于指示地球子午线；德国的安修茨和美国的斯佩里分别于1906年和1911年研制了舰船陀螺罗经，陀螺寻北由此进入实用阶段。第二次世界大战后，制导武器的发展推动了陀螺仪的进步，液浮、气浮、磁悬浮、动力调谐以及静电陀螺等应运而生；20世纪40年代后，基于Sagnac效应的激光和光纤陀螺及MEMES陀螺相继问世，陀螺寻北技术也不断得到进步。其中，以1949年德国克劳斯塔矿矿业学院研制的第一台电磁定中液浮单转子陀螺房寻北系统MW1型为标志，彻底掀开了陀螺寻北技术发展的历史篇章。

人类生存实践，经历了从点到面、从简单一维到今天海陆空天全方位的跨越。载体速度，从每小时十余千米，到每小时上百千米，到如今声速、超声速、第一/二/三宇宙速度，乃至希望飞越银河系的第四/五宇宙速度；人类生存安居，从地下洞穴、窝棚、地面民居院落的向阳散居到高楼村镇；人类探索活动，也从地表海面到地下涵洞海下深潜、上万里距离的挖掘对接，从短距离航行到长时间伏潜。这些不断演变的生产、生活实践，无不需要寻北技术。古人依赖相对不变、公认的明显而易于识别的天体、物、像，作为活动参照物。而现代，寻北已成为人类生存生活的重要组成部分，陀螺寻

北技术更成为航天、航空、航海、兵器、通信、运输、能源等诸多领域的重要技术，是现代信息化多维战争精确对准、快速攻防、机动打击的核心技术，以及国民经济建设、能源矿产探寻、水文地质资源测量、桥梁涵洞开凿的关键技术。陀螺寻北的确是一门既古老又年轻的技术。

从专业属性讲，陀螺寻北技术又是一门光、机、电结合技术，涵盖数学、物理、试验、工程应用等多学科理论和制造、测试，与一般基础科学有着较大差别，但有关这方面的专著一直匮乏。

本书正是为适应上述形势，较全面地介绍了陀螺寻北技术的研究意义、基本原理、相关概念和国内外发展趋势，介绍了与陀螺寻北技术相关的数学、力学基础知识，介绍了捷联和摆式原理的陀螺寻北仪的各项技术以及应用知识。希望本书能推动我国陀螺寻北技术基础理论和应用技术的深化、突破、创新、提高，能成为国内陀螺寻北技术专业领域最有工程实用价值的专业工具书，对从事陀螺寻北技术研究设计、测试标定、试验制造、教学测量、工程应用工作的工程技术工程师、管理工程师，以及高等院校相关专业师生、部队官兵起到一定的指导和借鉴作用。

任德民

2012年冬月于北京

目 录

第 1 章 方位信息与寻北技术	1
1.1 方位信息与北向基准	1
1.1.1 方位信息及其意义	1
1.1.2 地理上各种北向基准与参照物	2
1.2 寻北技术的发展历程	4
1.2.1 指南针	5
1.2.2 磁罗经	5
1.2.3 磁通门传感器与磁通定向	7
1.2.4 无线电测向	8
1.2.5 双 GPS 定向	9
1.2.6 天文定向	10
第 2 章 陀螺寻北技术概述	11
2.1 陀螺寻北技术研究的意义	11
2.2 惯性寻北技术的分类	12
2.2.1 基本分类	12
2.2.2 基本原理	15
2.3 陀螺寻北系统的发展历史、现状与趋势	16
2.3.1 历史与现状	16
2.3.2 未来发展趋势	19
2.3.3 各厂商产品情况汇总	20
第 3 章 陀螺寻北技术基础	22
3.1 常用度量与单位制	22

3.1.1 地理坐标	22
3.1.2 角的量度及其单位制	23
3.2 数学与力学基础	26
3.2.1 矢量、欧拉角坐标系	26
3.2.2 刚体的转动、力矩和转动惯量	27
3.3 陀螺基本特性	29
3.3.1 进动性	29
3.3.2 定轴性	31
3.3.3 陀螺仪的视运动	32
3.4 寻北用惯性器件	33
3.4.1 陀螺仪	34
3.4.2 加速度计	53
3.5 典型陀螺寻北系统简介	64
3.5.1 陀螺罗经/陀螺罗盘	65
3.5.2 陀螺经纬仪	66
3.5.3 捷联式陀螺寻北仪	70
3.6 各种陀螺寻北系统的比较	71
3.6.1 各类陀螺寻北系统的共同特征	71
3.6.2 各类陀螺寻北系统的差异分析	71
第4章 捷联式陀螺寻北仪	76
4.1 捷联式寻北原理	76
4.2 捷联式寻北系统组成	77
4.2.1 惯性测量组件	77
4.2.2 调平与转位机构	78
4.2.3 温控与外围电路	79
4.2.4 装置支架	79
4.3 捷联寻北方案综述	79
4.3.1 单轴陀螺寻北方案	80
4.3.2 双陀螺寻北方案	99

4.4 捷联式寻北仪误差分析	103
4.4.1 单陀螺寻北方案误差分析	103
4.4.2 双陀螺寻北方案误差分析	130
4.5 捷联式寻北仪的设计要素	136
4.5.1 惯性器件选择	136
4.5.2 总体结构设计	138
4.5.3 采集与控制电路设计	138
4.5.4 温控与磁屏蔽设计	139
4.5.5 系统软件设计	139
第5章 悬丝摆式陀螺经纬仪	144
5.1 下挂式与上架式结构	144
5.1.1 下挂式结构	144
5.1.2 上架式结构	147
5.2 摆式陀螺寻北仪工作原理	151
5.2.1 基于陀螺摆运动的基本原理	151
5.2.2 陀螺房运动的欧拉方程	153
5.2.3 地球自转对摆式陀螺仪的影响	155
5.2.4 摆式陀螺仪的运动方程	157
5.2.5 陀螺轴摆动方程的实用形式	161
5.3 温度、振动和磁场对陀螺寻北的影响分析	167
5.3.1 环境温度变化对仪器的影响	167
5.3.2 陀螺仪内部温度变化对仪器的影响	172
5.3.3 振动对陀螺定向的影响	173
5.3.4 磁场强度变化对陀螺北方向的影响	175
5.4 摆式陀螺经纬仪的设计	175
5.4.1 总体结构设计	176
5.4.2 测控电路设计	177
5.4.3 光路设计	182
5.4.4 系统软件设计	185

5.5 后端数据处理	188
5.5.1 粗寻北算法	188
5.5.2 不跟踪式观测	194
5.5.3 精寻北算法	207
第6章 磁悬浮陀螺寻北仪	210
6.1 工作原理简介	210
6.2 系统组成	214
6.3 各分系统的设计实现	217
6.3.1 陀螺电机稳速控制系统	217
6.3.2 高精度测角及回转控制系统	229
6.3.3 光电反馈控制系统	241
6.3.4 悬浮支承系统	252
6.3.5 计算机采集与控制	258
6.4 磁悬浮摆式陀螺寻北仪的误差分析	273
6.4.1 输出轴的干扰力矩 M_f 带来的误差	273
6.4.2 相关参数标定的误差	274
6.4.3 寻北方案带来的误差	276
6.4.4 采样带来的误差	277
6.4.5 角度回转系统带来的误差分析	277
6.4.6 闭路静差的补偿	278
第7章 陀螺寻北系统观测快速性的优化	280
7.1 观测操作的自动化	280
7.1.1 CCD 传感器的引入	280
7.1.2 锁放陀螺的自动化	281
7.1.3 快速的初始寻北与对准	282
7.2 陀螺房的优化控制	284
7.2.1 步进控制	284
7.2.2 阻尼控制	285

7.3 快速性的寻北算法	289
7.3.1 不完整周期的中天算法	289
7.3.2 $1/4$ 周期的积分法	291
7.3.3 数据库法	292
第8章 陀螺寻北系统环境适应性设计	294
8.1 抗动基座扰动方法	294
8.1.1 传统方法抗干扰	295
8.1.2 小波变换法抗干扰	296
8.1.3 B-小波分析法抗干扰	300
8.1.4 神经网络法抗干扰	303
8.2 磁屏蔽设计	305
8.2.1 磁屏蔽的必要性	305
8.2.2 磁性材料及其性能	305
8.2.3 屏蔽体的设计	308
8.2.4 屏蔽体厚度的计算	309
8.2.5 屏蔽体的生产工艺	310
8.2.6 磁屏蔽设计的其他要点	311
8.2.7 寻北系统磁屏蔽的退化与校验	312
第9章 陀螺寻北系统的应用	313
9.1 各类典型寻北应用	313
9.1.1 隧道工程中心线的测量	313
9.1.2 测绘存在通视障碍时方向角的获取	313
9.1.3 建筑日影计算所需的真北测定	315
9.1.4 军事中武器系统的瞄准	315
9.1.5 国防工业设备测试需要	315
9.2 方位信息的瞄准与传递	316
9.2.1 方位基准与方位基准装置	316
9.2.2 自准直技术	317

9.2.3 方位的对准与传递	323
9.2.4 典型应用	326
附录 A GYROMAT 2000/3000 型陀螺经纬仪简介	329
参考文献	333
后记	335

第1章 方位信息与寻北技术

寻北技术的不断发展，其内在动力源于人类在生产、生活中对地理方位信息的持续需求。寻北技术的发展历程，伴随着人类对地面、海洋、空间各个领域不断探索的过程。

1.1 方位信息与北向基准

1.1.1 方位信息及其意义

在人类的生活、生产实践中，地理方位是不可缺少的信息，因此，研究指示地理方位信息的技术及装置意义重大。辨别方向，这是地球上任何生活在三维空间中的生物都避免不了的必行之事。人类在进行日常的生产、生活活动时，哪怕是最原始的狩猎和采集也必须保证不能迷失方向。从古至今，人类建立方位基准的方法和技术，随着对客观世界不断深入的了解和认识也一直在不断发生着变化。最初，人类本身的器官，如眼睛可以帮助完成一般的辨向功能。但这种辨向导航系统是以外界参考物为方位基准的（比如以地面上的其他物体或日月星辰在天空中的位置为参考系），如果得不到可靠的参考基准就会出问题。指南针的发明是人类导航工具的一大进步，它以地球磁场为参考基准，不受人的器官感觉影响，也不受气候和时间的影响。以后，在指南针的基础上，又相继制成了磁罗盘等。它们使人类的活动范围从陆地扩大到了海洋。无线电技术的发展，使人们利用人造卫星和电磁波也可以获得方位基准，如无线电导航等，并且还达到了相当高的精度。

所谓寻北就是要找出相对地球的北向方位。早在古代人类就有

依靠北斗星定向定位的历史,也出现了依靠恒星太阳定时定位的日晷这样的装置,还有依靠地球磁场找北的指南针等。现代导航领域中所提到的北向信息,常称作真北,是指北极与观测者相对位置的信息,确切是指观测者子午面与当地真地平面交线指向北极的方向。

1.1.2 地理上各种北向基准与参照物

进行方位信息度量的重要手段,就是建立相应的参照系和方位基准。在地球上,常见的可以用来作为参照物的基准特征主要有以下几种。

(1) 北极

北极是指地球自转轴的北端,也就是北纬 90° 的那一点。广义的北极也指北极地区,是指北极附近北纬 $66^{\circ}34'$ 北极圈以内的地区。北冰洋是一片浩瀚的冰封海洋,周围是众多的岛屿以及北美洲和亚洲北部的沿海地区。

一个世纪以前,英国政府为了奖励北极探险者,曾拨出一笔资金,准备奖给第一个到达北极的探险家。资金虽然不多,但是却起到了很大的激励作用,许多探险家跃跃欲试,想摘到第一个到达北极点的桂冠,获得这一令人心驰神往的荣誉。这顶桂冠最终被美国海军中校、探险家罗伯特·皮尔里所获得。为了这顶桂冠,他几度向北极冲刺,才取得了成功。2010年,中国的雪龙号极地科学考察船也在第四次北极科考活动中成功抵达了北极点。

(2) 子午线

子午线也叫经线,是指在地面上连接两极的线,可以用来表示南北方向。经线与垂直它的纬线构成了地球上的坐标,即经纬网。地球上任意一点的位置都可以用一条经线和纬线的交叉点来表示。所有经线的长度都是相等的。

本初子午线,即零度经线,也称格林威治子午线或格林尼治子午线,是位于英国格林尼治天文台的一条经线。本初子午线的东西两边分别定为东经和西经,于 180° 相遇。