

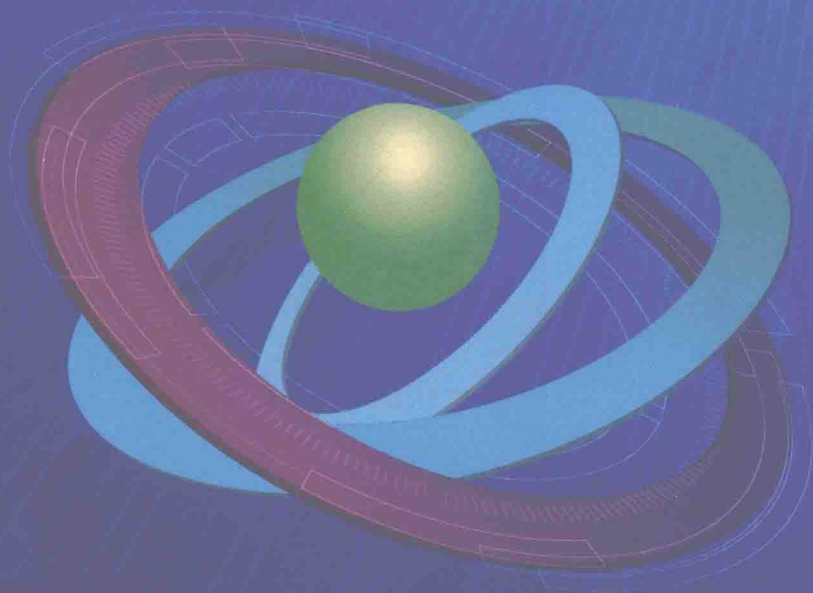


国家科学技术学术著作出版基金资助出版

磁悬浮陀螺 寻北原理与测量应用

North Seeking Principle and Measurement Application of
Magnetically Suspended Gyroscope

杨志强 石震 杨建华 著



测绘出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

磁悬浮陀螺寻北原理与测量应用

North Seeking Principle and Measurement Application of
Magnetically Suspended Gyroscope

杨志强 石震 杨建华 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 杨志强 2017

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

本书是中国第一本针对磁悬浮陀螺全站测量系统的专著。全书简要介绍了陀螺惯导技术的发展历程和陀螺寻北基本理论,系统论述了现代磁悬浮陀螺寻北的原理、系统构建、测量模式、数据处理、误差特征、精度评定等理论与关键技术,比较分析了磁悬浮陀螺仪与传统悬挂带陀螺仪技术的优劣与发展趋向,最后列举了磁悬浮陀螺全站仪若干工程应用案例及技术工作流程。

本书可供从事精密工程测量、地铁隧道测量、地下矿山测量、惯导定向测量、室内定位测量等领域的科技工作者参考,也可作为相关专业本科生、研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

磁悬浮陀螺寻北原理与测量应用/杨志强,石震,杨建华
著. —北京:测绘出版社,2017.7

ISBN 978-7-5030-3407-7

I. ①磁… II. ①杨… ②石… ③杨… III. ①激光陀螺仪—研究 IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 075092 号

责任编辑	田力	执行编辑	侯杨杨	封面设计	李伟
责任校对	石书贤	责任印制	陈超		
出版发行	测绘出版社	电 话	010-83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010-68531609(门市部)		
邮政编码	100045		010-68531363(编辑部)		
电子邮箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司	经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm	彩 插	6		
印 张	11	字 数	213 千字		
版 次	2017 年 7 月第 1 版	印 次	2017 年 7 月第 1 次印刷		
印 数	0001-1000	定 价	59.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3407-7

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

序

长安大学杨志强教授所领导的课题组与中国航天科技集团公司合作成功研制的高精度磁悬浮陀螺全站仪,是中国测绘界测绘仪器和工程测量专业的一件大事,是特种高精度专用仪器研制和创新的典范。高精度陀螺全站仪是许多大型地下工程需要使用的特种仪器,对加快工程进度、提高工程质量、节省工程投资具有重要作用。该仪器采用现代磁悬浮支承技术代替传统的悬带悬挂技术,解决了悬带扭力矩和悬挂零位误差等瓶颈问题;还采用了双位置回转技术、无接触式光电力矩反馈控制、数据模拟仿真和数据滤波建模等关键技术,实现了快速、自动化和精确的寻北定向测量,整个测量过程不需要人工干预,几分钟内即可完成大数据量采集和精度优于 $5''$ 的精确定向。高精度磁悬浮陀螺全站仪不仅填补了我国高精度特种测量仪器的空白,还赶超了国外高精度陀螺经纬仪 Gyromat 2000/3000 的先进水平。该仪器于 2008 年首次投入使用,目前已投入系列化生产和销售,成功应用于四十余项重大工程,如特长铁路山岭隧道、输水隧洞、矿山巷道和地铁的贯通工程等,取得了良好的效果,得到了广大用户的好评。

本书系统讲述了磁悬浮陀螺的寻北原理和磁悬浮陀螺全站仪研制中的关键技术,给出了磁悬浮陀螺寻北数据的特征和处理方案,论述了陀螺全站仪的精度评定方法,总结了磁悬浮陀螺全站仪的使用操作流程。通过多个大型地下工程应用实例,验证了仪器的精度、可靠性和自动化,以及其使用的简便性。本书的出版对方向测量仪器的教学也是一大贡献,对磁悬浮技术应用和其他测量仪器的研制有推动借鉴作用,并能促进磁悬浮陀螺全站仪的推广应用。

张正禄
长安大学

前 言

陀螺仪作为惯性导航技术发展的重要产物在矿山、隧道、地铁工程及航天、航空、国防建设中占据着不可替代的重要地位。基于国防安全与国家建设需要,发达国家将陀螺寻北作为核心技术加以研究,并对中国实行封锁禁运。因此研制具有中国自主知识产权的高精度陀螺惯性仪器,具有重要意义。

陀螺全站仪是一种通过感知地球自转角动量,自主测定任意目标地理北方位的全能型惯性仪器。陀螺全站仪作为在测绘领域中陀螺寻北技术的重要产品,在城市地铁、矿山开采等大型地下工程中发挥着不可或缺的重要作用。

当前中国正处于大规模基础设施建设时期,城市地铁、江底与海底隧道、高速铁路公路的穿山隧道、引水输水隧洞、城市地下管廊及大型矿山等各类大型地下与隐蔽工程相继建设。正是基于此背景,长安大学与中国航天第十六研究所联合开发研制了中国首台高精度磁悬浮陀螺全站仪。该仪器采用磁悬浮替代传统陀螺仪的悬挂带支承技术,克服了传统陀螺仪悬挂带易断裂、扭力矩和悬挂零位误差大等技术瓶颈;通过磁悬浮力矩耦合与解耦、无接触光电力矩反馈等技术,实现了数分钟六万组海量原始方位值的精准与自动采集,改善了传统陀螺仪有限原始观测数据的限制;通过逐次多位置寻北、双位置回转、多环境滤波识别、自适应轴系改正、多层磁屏蔽等关键技术,提高了仪器系统的自动化、智能化、可靠性水平;通过环境适应性、产业化集成、配套软件开发等技术,实现了仪器系统的稳定性及工程适应能力。

本书从陀螺寻北的基本原理出发,系统论述了磁悬浮陀螺寻北定向理论,磁悬浮陀螺系统结构,磁悬浮陀螺寻北关键技术、数据处理、精度评定及工程应用。本书由杨志强、石震、杨建华合著,杨志强负责全书的规划与统稿。全书共分为8章,第1章与第2章主要介绍了陀螺定向技术的基本理论及发展历史,由杨志强、石震执笔;第3章主要介绍了磁悬浮陀螺的系统结构及寻北关键技术,由石震、杨志强执笔;第4章与第5章论述了磁悬浮陀螺定转子数据特征及其处理方法,由杨建华、石震、杨志强执笔;第6章主要针对如何客观真实地评价陀螺全站仪定向精度的问题进行了探讨,由石震执笔;第7章与第8章主要对磁悬浮陀螺全站仪的应用情况及相关问题进行了介绍,由石震、杨志强执笔。参加本书写作讨论的还有万彦辉、屈孝池、李光春、田永瑞、周志易、王涛、张宝雷、杨帅、杜伟吉、张喆、马骥、时丕旭等同志。

本书得到国家科学技术学术著作出版基金、国家自然科学基金(41074006)、国家自然科学基金青年基金(41504001)、中央高校基本科研项目(310826151047)、国

家测绘地理信息局矿山空间信息技术重点实验室项目(KLM201207)、国家测绘局精密工程测量重点实验室项目(ES-SBSM-07)等资助。同时,得到长安大学地测学院、中国航天科技集团第十六研究所等单位的大力支持,在此表示诚挚的感谢!对十余年来为磁悬浮陀螺全站仪研发提供工程实验及指导帮助的中铁、中交、中水、中建、中煤、中油及中国矿业大学、武汉大学、同济大学、辽宁工程技术大学、山东科技大学、河南理工大学、西安科技大学、太原理工大学、安徽理工大学等单位的领导和专家表示衷心的感谢!

在此,还要特别感谢武汉大学张正禄教授为本书作序!

限于作者水平,书中难免有不妥与错误之处,敬请各位读者批评指正。

张正禄
2016.6于长安大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 陀螺定向技术的发展	1
1.2 陀螺仪的分类	6
1.3 磁悬浮技术与磁悬浮陀螺全站仪	12
第 2 章 陀螺寻北测量基本理论	15
2.1 陀螺运动的物理基础	15
2.2 地球自转对陀螺轴向运动的影响分析	19
2.3 摆式陀螺仪的寻北运动	21
2.4 悬挂带式陀螺经纬仪寻北定向原理	25
第 3 章 磁悬浮陀螺寻北关键技术	30
3.1 磁悬浮陀螺仪寻北定向的理论基础	30
3.2 磁悬浮陀螺全站仪的基本结构及其工作原理	31
3.3 磁悬浮支承技术	34
3.4 数据的采样计算与实时模拟仿真技术	42
3.5 多位置寻北技术	47
3.6 陀螺仪模块化程序设计	51
3.7 系统硬件的集成连接	53
3.8 软件一体化设计	58
第 4 章 磁悬浮陀螺定子及转子寻北数据的特征分析	66
4.1 寻北数据的相关性分析	67
4.2 转子电流数据平稳化	71
4.3 转子及定子数据白噪声检验	73
4.4 转子电流数据滤波分析	74
4.5 定子电流数据滤波分析	80
第 5 章 磁悬浮陀螺定子及转子寻北数据的处理	83
5.1 定子电流数据的处理	83

5.2	转子电流数据处理	85
5.3	磁悬浮陀螺仪数据处理方法研究与算例分析	88
第6章	陀螺全站仪的精度评定	95
6.1	陀螺全站仪理论精度的评定	95
6.2	寻北绝对精度与相对稳定性精度评定	97
6.3	基于多测回观测数据的精度评定方法	104
第7章	地下导线加测陀螺边的方案及其平差计算	107
7.1	导线加测陀螺边的方案	107
7.2	加测陀螺边后的导线平差及其贯通误差预计	112
7.3	GAT 磁悬浮陀螺全站仪贯通误差预计模拟软件	118
第8章	磁悬浮陀螺全站仪工程应用及相关问题研究	124
8.1	陀螺全站仪定向测量的相关问题研究	125
8.2	磁悬浮陀螺全站仪在轨道交通工程中的应用	130
8.3	磁悬浮陀螺全站仪在大型矿山贯通测量中的应用	140
8.4	磁悬浮陀螺全站仪在超长及沉管隧道贯通中的应用	145
8.5	工程应用小结	156
8.6	陀螺仪在地球自转参数监测中的拓展应用研究	158
参考文献		162
附录	子午线收敛角系数表	164

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Directional Gyro Technology Development	1
1.2 Classification of Gyroscope	6
1.3 Magnetic Suspension Technology and Magnetic Levitation Gyro Total Station	12
Chapter 2 Basic Theory of Gyro North-Seeking Measurement	15
2.1 Physical Basis of Gyro Movement	15
2.2 Analysis of the Influence of the Earth Rotation on the Axial Movement of the Gyro	19
2.3 Pendulous Gyro North-Seeking Movement	21
2.4 North-Seeking Orientation Principle of Hanging Belt Type Gyro Theodolite	25
Chapter 3 Maglev Gyroscope North of Key Technologies	30
3.1 Theoretical Basis of North-Seeking Orientation of Magnetic Suspension Gyro	30
3.2 Basic Structure and Working Principle of Magnetic Suspension Gyro Total Station	31
3.3 Magnetic Suspension Supporting Technology	34
3.4 Sampling and Calculation of Data and the Real Time Simulation Technology	42
3.5 Multi-Position North-Seeking Technology	47
3.6 Gyroscope Modular Program Design	51
3.7 Integrated of System Hardware	53
3.8 Software Integration Design	58
Chapter 4 Characteristics Analysis of the Maglev Gyro Stator and Rotor North-Seeking Data	66
4.1 Correlation Analysis of North-Seeking Data	67
4.2 Rotor Current Data Stabilization	71
4.3 White Noise Test of Rotor and Stator Data	73
4.4 Rotor Current Data Filtering Analysis	74
4.5 Stator Current Data Filtering Analysis	80

Chapter 5	Maglev Gyroscope Stator and Rotor North-Seeking	
	Data Processing	83
5.1	Processing of Stator Current Data	83
5.2	Processing of Rotor Current Data	85
5.3	Maglev Gyroscope Data Processing Methods and Examples	88
Chapter 6	Precision Evaluation of Gyro Total Station	95
6.1	Evaluation of Theoretical Precession Gyro Station	95
6.2	Absolute Precision and Relative Stability Precision Evaluation of North-Seeking Data	97
6.3	Precision Evaluation Method of Observed Values for Several Times	104
Chapter 7	Underground Traverse after Gyro Edges Program and Its Adjustment Calculation	107
7.1	Scheme Design of Gyro Edge Numbers in Traverses	107
7.2	Traverses Adjustment and Transfixion Error Estimation after It Added Gyro Edges	112
7.3	GAT Maglev Gyro Total Station Transfixion Error Estimation Software	118
Chapter 8	Maglev Gyro Total Station Engineering Applications and Related Research Questions	124
8.1	Research on Gyro Total Station Orientation Measurement	125
8.2	Application of Maglev Gyro Total Station in Rail Transit Engineering	130
8.3	Application of Magnetic Levitation Gyro Total Station in the Large Mining Transfixion Measurement	140
8.4	Application of Magnetic Levitation Gyro Total Station in the Super-Long and Immersed Tube Tunnel Transfixion Measurement	145
8.5	Summary of Engineering Applications	156
8.6	Research on Gyroscope in the Earth Rotation Parameters Monitoring	158
References		162
Appendix	Coefficient Table of Meridian Convergence Angle	164

第1章 绪论

坐标方位信息作为空间信息的重要组成部分,在人类的生产、生活中起着不可或缺的重要作用。早在六千年前人类就已经对方位有所认知,在中国西安半坡氏族村落遗址中发现的住宅区已有完整、准确的定位方向。千百年来人们研究了许许多多方位测量的方法:早期的人类通过观测日月星辰的变化来辨认方位;后来人们发明了指南针,开始利用地球的磁场确定方向等。但这些定向方法极易受到气象、局部重力异常等外界观测条件的影响,精度也比较粗糙,只能满足一些简单生产、生活的需要。

随着科学技术的发展,人们研制了专门用于观测天体运动变化的天文测量仪器,并通过观测天体中恒星(北极星等)的位置来测定地面点的天文经纬度及地面定向边的天文方位角,其测量成果可达到很高的精度,常用于参考椭球体定位及为大地测量计算提供精确的起算数据。但是这种方法需要较长的观测时间,且容易受气象等外界条件的限制而无法实施。目前,以全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)为代表的诸多空间对地观测技术凭借其强大的地空联测平台,实现了对地面任意方位全天候、全天时、高精度、快速的测量,在某些领域中弥补了天文方位测量的不足,但这些空间对地观测技术大多需要依赖于GNSS等外部观测信息,且在无法接收卫星信号的封闭空间实现自主定向方面显得无力。

相比之下,陀螺仪作为惯性定向技术的重要代表,有着不可替代的技术优势。由于陀螺是通过感知地球自转角动量实现其寻北定向测量,无需任何外部辅助信息,具有较好的自主性和灵活性,观测时间较短,不受气象等外部因素的影响,因此,对陀螺寻北定向技术的研究,一直以来都是定位、定向技术领域中的重要课题,并且由于陀螺定向技术在军事和空间技术等方面应用的不可替代性,以及其在国民经济建设中所发挥的重要作用,世界上许多国家都将该技术列为国家的核心研究领域之一,并取得了长足的进步。目前陀螺定向技术已经是一个国家科技实力的重要代表。

1.1 陀螺定向技术的发展

陀螺全站仪(经纬仪)是一种将陀螺仪与全站仪(经纬仪)集成于一体,通过灵敏感知地球自转角动量独立测定任意测线真北方位角的敏感型寻北定向仪器。由于其具有全天候、全时无依托自主定向的功能,而被广泛应用于矿山、隧道、城市地铁等地下工程的建设及国防建设领域。

人类对于陀螺寻北定向技术的研究可以追溯到 19 世纪。早在 1852 年,法国物理学家傅科(Foucault)就通过实验验证了回转定理,首次正式提出了“陀螺”这个术语,并设计了陀螺仪方案,制成了世界上首台陀螺仪——傅科陀螺仪。他还大胆地设想:根据陀螺仪的观测,就可以得出地面上任意点的子午线位置。但是由于受到当时科学技术条件的限制,傅科的这一假设未能通过实验得到验证。直到 20 世纪初,德国的安休兹博士研制出世界上第一台用于航海的陀螺罗经,从此人们对陀螺从单纯的理论研究开始转变为应用型研究。这种陀螺罗经在设计时有意识将陀螺灵敏部的物理重心下移,与其几何中心相互分离,使之能够在重力矩分量的影响下产生绕子午线运动的进动力矩,从而实现自动寻北的功能,这种“重心分离”的结构设计理念被一直沿用至今。在测绘定向技术领域广泛应用的悬挂带式陀螺经纬仪就是根据这种结构理念设计制造的。后来随着航空、航天事业的发展,陀螺又被用来指示航天器的飞行姿态,为飞行器提供稳定的惯导平台系统。与此同时,陀螺仪在地质勘探、海洋资源开发等领域的应用也越来越广泛。

陀螺仪的广泛应用为陀螺经纬仪的发展奠定了基础。1920 年德国的舒勒研制出第一台用于测量领域的陀螺仪——舒勒陀螺经纬仪,该仪器并没有完成陀螺仪与经纬仪之间的上下对接,而是将经纬仪与陀螺仪架设在同一水平,通过经纬仪观测与陀螺房相固联的反射镜,从而完成寻北测量。整台陀螺仪安置在玻璃罩中,重量约为 318 kg,下方设有整平用的三脚螺旋,在室内测试其摆动平衡位置的中误差约为 $21''$ 。这表明舒勒陀螺经纬仪可以满足测量定向的精度要求,但由于其体积过于笨重、设备安置过程比较复杂,因此其实用性显得有些不足。

从 20 世纪 30 年代至今,随着测绘理论与技术的不断发展,各种新型的陀螺全站仪(经纬仪)相继涌现,根据这些仪器的结构特点,陀螺全站仪(经纬仪)的发展大致可以分为以下四个阶段:

第一阶段,在 20 世纪 50 年代,生产研制出了液体漂浮式陀螺经纬仪,如德国克劳斯塔矿工业学院研制的 MW 型液浮式陀螺系列,苏联全苏矿山测量科学研究院研制的 M-1 陀螺仪等。这一阶段的陀螺经纬仪在陀螺仪与经纬仪的集成方面已经有了成熟的改进,形成了陀螺仪与经纬仪上下对接、共轴同心的连接方式;陀螺灵敏部多使用单转子陀螺球,采用液浮支承技术。全套仪器重量可达几百千克,一次定向时间需要几个小时,陀螺方位角一次测定中误差为 $1' \sim 2'$ 。

第二阶段,在 20 世纪 60 年代,生产研制出了下架式悬挂带式陀螺经纬仪,如西德芬奈尔厂生产研制的 KT-1 悬挂带式陀螺经纬仪,匈牙利莫姆厂生产的 GI-B1 悬挂带式陀螺经纬仪等。这一阶段的陀螺经纬仪已经在支承技术上有了较大的改进,由液浮支承技术逐步发展为悬挂带支承技术,陀螺马达的供电系统也由三相交流电机供电改为采用导电游丝直接供电,仪器的整体重量有所减轻(一般为几十千克),工作效率也有所提高(一测回定向时间缩短至几十分钟),一测回的定

向中误差提高至十几秒。

第三阶段,研制出了上架悬挂带式陀螺经纬仪。这一阶段的陀螺经纬仪主要采用了分体式结构设计,将陀螺仪作为经纬仪的附加装置,在进行寻北定向测量时将陀螺仪安置于经纬仪上方,当寻北定向测量结束后即可将陀螺仪取下,与经纬仪分别存放。此外,由于这一阶段陀螺经纬仪的核心部件陀螺马达实现了小型化设计,因此仪器的重量也有所减轻,体积也变得十分小巧。中国矿山测量领域使用最为广泛的瑞士 GAK-1 型陀螺经纬仪及中国矿业学院与徐州光学仪器厂合作生产的 JT-15 型陀螺经纬仪都是这一阶段最具代表性的产品,如图 1.1 所示。

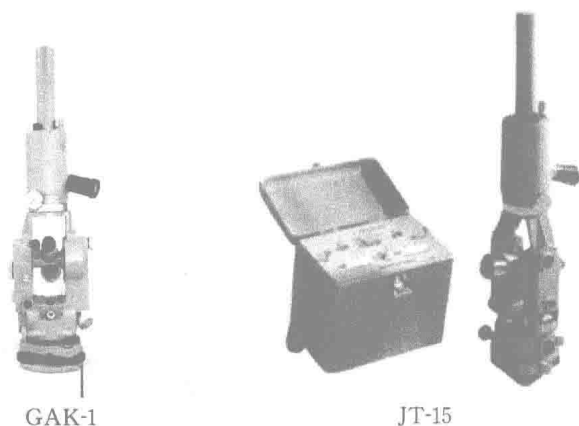


图 1.1 GAK-1 型陀螺经纬仪与 JT-15 型陀螺经纬仪

第四阶段,研制出了高精度陀螺全站仪。陀螺全站仪是陀螺经纬仪向智能化、全自动化迈进的重要标志性产物。在这一阶段随着测绘仪器机电化水平的不断提高,系统中的经纬仪部分逐步被全站仪所取代。图 1.2 为日本索佳测量仪器公司生产的 GP-1 型陀螺全站仪,该仪器从结构上继续沿用 GAK-1、JT-15 上架式陀螺经纬仪的集成方式,其中陀螺系统依然采用传统的悬挂带支承结构和测量模式,而将原有的经纬仪置换为全站仪,并通过全站仪的智能操作系统实现了部分寻北操作过程的程序化,减小了传统“逆转点法”和“中天法”人为读数误差。因此,在一定程度上该仪器的自动化程度、定向精度和定向效率均有所提高。

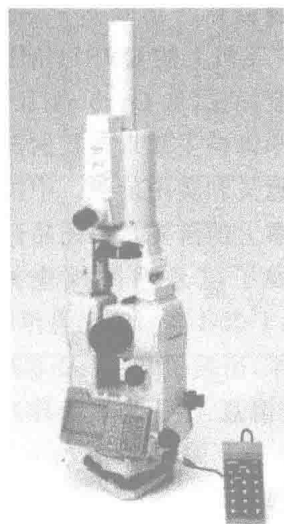


图 1.2 GP-1 型陀螺全站仪

德国 Gyromat 系列陀螺全站仪被认为是目前世界上寻北自动化程度相对高且定向精度最好的陀螺全站仪,如图 1.3 所示。从整体结构上,该仪器采用了下架式集成连接方式,但是这种

下架式的集成连接方式与前期下架悬挂带式陀螺经纬仪的结构有着本质的差别。首先,该仪器的陀螺仪与全站仪分属两套系统,系统之间只是进行简单的数据传递与计算;其次,由于陀螺仪定向精度的提高,其内部结构变得更加复杂,陀螺仪的体积与重量也相应地有所增加,采用下架式的集成连接方式有利于提高仪器整体的稳定性。在仪器的自动化方面,Gyromat2000/3000系列陀螺全站仪虽然仍采用悬挂带的支承技术,但陀螺灵敏部的下放、托起及陀螺摆动过程中数据的采集均不需要人工干预,实现了陀螺全站仪寻北过程的全自动化。

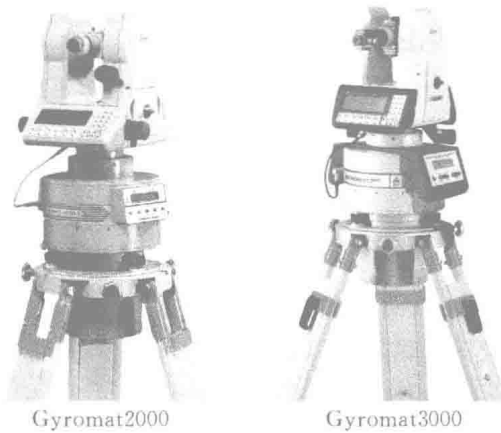


图 1.3 Gyromat2000/3000 系列陀螺全站仪

由于陀螺技术的军事敏感性,在高精度陀螺技术方面相关国家对中国实施技术封锁和产品禁运(2003年10月美国军方通知波音公司不得将安装于波音737飞机上的QRS11 MEMS陀螺芯片出口到中国),而能够进口的少量高精度陀螺全站仪(如Gyromat2000/3000系列),购买和维护成本也相当昂贵,因此研制具有中国自主知识产权的高精度陀螺全站仪并实现其国产化生产具有十分重要的战略意义和实用价值。中国从20世纪60年代开始研制陀螺经纬仪,主要是为满足军事上的需要。在民品开发方面,2001年长安大学与中国航天第十六研究所先后开展了磁悬浮陀螺全站仪的开发研究工作,2008年4月推出了中国首台GAT-05B高精度磁悬浮陀螺全站仪;2012年长安大学与中国航天第十五研究所合作,研发了GAT-D系列全自动智能陀螺全站仪;解放军1001厂在与总参测绘所、信息工程大学合作研制Y/JTG-1半自动陀螺经纬仪基础上,近年推出了HG系列陀螺全站仪;天津中船重工707所在多年研究船舶惯导的基础上开发了民用GT-3系列陀螺全站仪。表1.1列举了国内外部分陀螺全站仪的相关信息。

当前,陀螺全站仪正向着高精度、智能化、自动化、小型化的方向发展,国内外相关厂家正在提高陀螺全站仪的定向精度、成果稳定性及定向工作效率等方面努力攻关。

表 1.1 国内外部分陀螺全站仪相关技术指标

序号	仪器	国家	厂家	研制单位	技术特征	一测回观测中误差	定向时间	陀螺支承方式
1	Gyromat3000	德国	德国 DMT 公司	德国 DMT 公司	工作模式:全自动 工作原理:积分法 工作温度: $-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 陀螺仪架置模式:陀螺下置式	$\pm(3.0'' \sim 5.0'')$	9~12 min	悬挂带
2	索佳 GYRO X 系列	日本	日本索佳测量仪器公司	日本索佳测量仪器公司	工作模式:半自动 工作原理:逆转点法 陀螺仪架置模式:陀螺上置式	$\pm 15''$	>19 min	悬挂带
3	GAK-1	瑞士	瑞士 WILD 厂	瑞士 WILD 厂	工作模式:人工 工作原理:逆转点法、中天法 工作温度: $-30^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 陀螺仪架置模式:陀螺上置式	$\pm 20''$	>30 min	悬挂带
4	GAT 磁悬浮系列	中国	航天 7171 厂	长安大学 航天十六所	工作模式:全自动 工作原理:静态力矩闭环反馈 工作温度: $-40^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 陀螺仪架置模式:陀螺下置式	$\pm(3.5'' \sim 5.0'')$	8 min	磁悬浮
5	GAT-D 系列 (BTJ 系列)	中国	航天发射所	长安大学 航天十五所	工作模式:全自动 工作原理:积分法 工作温度: $-40^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 陀螺仪架置模式:陀螺下置式	GAT-D5: $\pm 5''$ GAT-D8: $\pm 8''$ GAT-D15: $\pm 15''$	9 min	悬挂带
6	1001 厂 HG 系列	中国	解放军 1001 厂	解放军 1001 厂	工作模式:全自动 工作原理:积分法 工作温度: $-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 陀螺仪架置模式:陀螺下置式	HGG-05: $\pm 5''$ HGT-07: $\pm 7''$ HGK-15: $\pm 15''$	9~20 min	悬挂带
7	天津中船重工 GT-3 系列	中国	中船 707 所	中船 707 所	工作模式:半自动 工作原理:拟合法+改化时差法 工作温度: $-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 陀螺仪架置模式:陀螺下置式	GT3-3: $\pm 15''$ TJ9000: $\pm 30''$	9~15 min	悬挂带

注:表中所列参数指标来源于各厂家资料。

1.2 陀螺仪的分类

陀螺仪的种类繁多,如静电陀螺、光纤陀螺、挠性陀螺及磁悬浮陀螺等,根据结构特点和工作原理的不同,常见的分类方法有以下四种。

1.2.1 按陀螺仪转子主轴所具有的进动自由度数目分类

按陀螺仪转子主轴所具有的进动自由度数目可分为二自由度陀螺仪和单自由度陀螺仪。图 1.4 为二自由度陀螺仪。该陀螺仪主轴与框架内环连接,可通过内环进行俯仰运动,而内环与外环相连接,并通过外环可进行水平方向自由转动,因此其具有两个方向的自由度,故称为二自由度陀螺仪。若把二自由度陀螺仪的外环去掉,而把内环轴直接支承在基座上,则转子主轴对底座只有一个进动自由度,就成为如图 1.5 所示的单自由度陀螺仪。

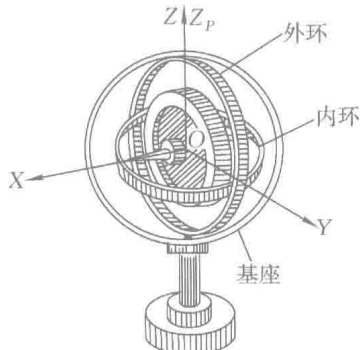


图 1.4 二自由度陀螺仪

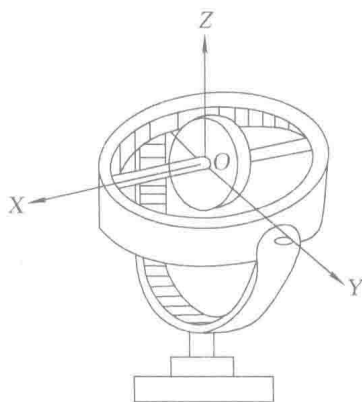


图 1.5 单自由度陀螺仪

1.2.2 按陀螺仪重心的几何位置分类

按陀螺仪重心的几何位置不同可分为平衡陀螺仪和重力陀螺仪。平衡陀螺仪是指陀螺仪重心与支架中心相重合的二自由度陀螺仪,这种陀螺仪的主轴无方位选择性,在任何一个位置都能平衡,因此,这种陀螺仪又称为无定位陀螺仪。重力陀螺仪是指陀螺仪重心与支架中心有某一偏移的二自由度陀螺仪。常用到的重心偏移的几种情况如图 1.6 所示,图中 O 点为陀螺仪的支架中心, G 点为重心,其中图 1.6(a)和图 1.6(b)的主轴水平放置,而图 1.6(c)的主轴是垂直放置。图 1.6(a)和图 1.6(c)的重心沿转子主轴偏离支架中心,图 1.6(b)的重心沿与转子主轴相垂直的赤道轴偏离支架中心。这些陀螺仪可保持其转子主轴在某确定方位,因此又称为定位陀螺仪。

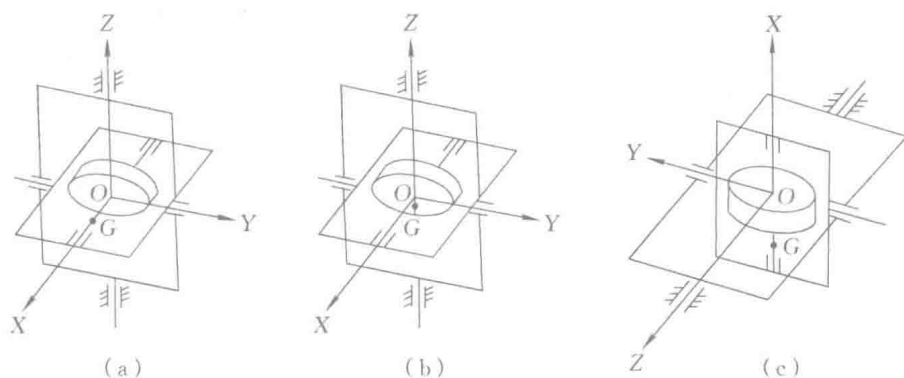


图 1.6 重心偏移的几种情况示意图

1.2.3 按陀螺仪的支承方式分类

按陀螺仪的支承方式不同可分为框架陀螺仪、液浮陀螺仪、气浮陀螺仪、静电陀螺仪和挠性陀螺仪等。框架陀螺仪是指如图 1.4 所示的用万向支架来悬挂陀螺转子的陀螺仪,这种陀螺仪的内外环通常是用滚珠轴承来支承的,由于轴承中存在较大摩擦,使框架陀螺仪的精密度较低。液浮、气浮、静电和挠性陀螺仪就是为了减小支承摩擦所发展起来的的不同支承方式的陀螺仪。

1. 液浮陀螺仪

如图 1.7 所示是一个二自由度液浮陀螺仪的原理图。它的内框架一般为圆柱形或球形的浮筒,陀螺电机则安装在密封并充有惰性气体的浮筒内,浮筒与外壳之间充满了悬浮液,两者之间的间隙很小,整个浮筒的平均密度与悬浮液的密度基本相等,因而整个浮筒的重量都由浮液支承,内框架轴的轴承(通常用宝石轴承)上几乎不受压力,只起定向作用。由此避免了金属表面的直接摩擦,大大减弱了摩擦力矩的影响,且抗振性、冲击性好。但液浮式陀螺仪的加工工艺和装配工艺要求较高,为使浮液不受环境温度的影响,需附加恒温控制装置,因而会使仪器加重。

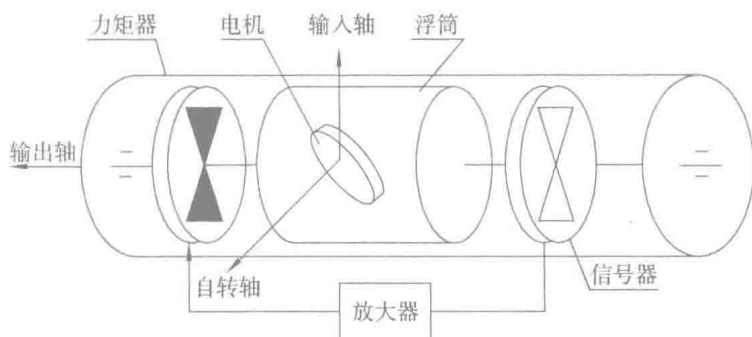


图 1.7 液浮陀螺仪原理