



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

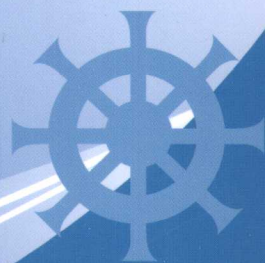
航海类专业精品系列教材

航海仪器

(上册：船舶导航设备)

关政军 主编

刘彤 副主编



大连海事大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
航海类专业精品系列教材

航海仪器

(上册:船舶导航设备)

关政军 主 编
刘 彤 副主编

大连海事大学出版社

©关政军 2009

内容简介

《航海仪器》为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和航海类专业精品系列教材。本教材分为上、下两册,上册为船舶导航设备,下册为船舶导航雷达。

上册主要介绍了陀螺罗经、船用磁罗经、船用回声测深仪、船用计程仪、卫星导航系统、自动识别系统、船载航行数据记录仪、综合驾驶台系统等导航设备及系统的基本工作原理、系统组成、在航海中的应用及其局限性。教材内容符合《STCW 公约》的相关要求和《中华人民共和国海船船员适任考试和评估大纲》,既注重反映船舶导航设备在技术上的最新发展,又贴近航海应用实践,可以作为高等航海院校航海技术专业、海事管理专业本科和专科“航海仪器”课程的教学指定用书,又可以成为驾驶员和从事航海专业技术的相关人员常备的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

航海仪器. 上册,船舶导航设备 / 关政军主编. —大连: 大连海事大学出版社, 2009. 9
(航海类专业精品系列教材)
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5632-2348-0

I. 航… II. 关… III. ①航海仪器—高等学校—教材②船舶导航—导航设备—高等学校—教材 IV. U666.15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 163898 号

大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路 1 号 邮政编码:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连华伟印刷有限公司印装 大连海事大学出版社发行

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

幅面尺寸:185 mm × 260 mm 印张:14.25

字数:354 千 印数:1 ~ 3000 册

责任编辑:史洪源 版式设计:海 韵

封面设计:王 艳 责任校对:高 炯

ISBN 978-7-5632-2348-0 定价:25.00 元

前 言

海上运输是交通运输的重要组成部分,在促进外贸运输发展和推动对外贸易增长等方面以其他运输方式不可比拟的优势发挥出越来越重要的作用。

大连海事大学作为我国唯一的国家重点航海类专业院校,多年来为我国乃至国际海上运输业培养了大量的航海类专业高级人才,对促进航运业的发展起到了重要作用。近年来,随着科学技术的进步和交通运输业的发展,学校针对航海类专业的鲜明特色,在人才培养方案、教学内容及课程体系改革等方面进行了一系列的研究和实践。在此基础上,我校组织编写出一套与新的培养方案、教学内容及课程体系相适应的航海类专业精品系列教材,旨在加强航海类专业建设,提高航海类人才培养的质量和水平,进一步推动高等航海教育的发展。

为了保证航海类专业精品系列教材顺利出版,学校在人力、物力和财力等方面予以充分保证。组织校内航海类专业的资深专家、骨干教师和管理干部做了大量工作,从筹备、调研、编写、评审直至正式出版,历时三载有余。2005年5月,学校先后组织召开了两次航海类专业教学改革研讨会,来自交通部海事局、辽宁海事局、中国远洋运输(集团)总公司、中国海运(集团)总公司、中国船级社等单位的专家为教材编写的筹备工作提出了中肯的意见和建议。2006年初,教材编写工作正式启动,确定重新编写航海类专业教材22种,其中航海技术专业教材13种、轮机工程专业教材9种。教材编写大纲先后征求了中国远洋运输(集团)总公司、中国海运(集团)总公司及大连海事大学等单位10多位专家的意见。学校组织教材主要编写人员分赴北京、天津、青岛、上海、广州、武汉及厦门等多家航运企事业单位进行调研,收集了大量的最新技术资料,同时听取了有关领导和专家的意见。2007年我校先后召开了五次评审会,来自交通部海事局、驻英大使馆海事处、中国海事服务中心考试中心、辽宁海事局、山东海事局、中国远洋运输(集团)总公司、中国海运(集团)总公司、大连港引航站、上海海事大学、海军大连舰艇学院、大连水产学院、集美大学、青岛远洋船员学院及大连海事大学等单位的多位专家对22种教材的初稿就内容、文字及体例等方面逐一评审,反复推敲,几易其稿,逐步完善,反复审核,最终正式出版。该套教材中共有16种教材入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

这套航海类专业精品系列教材以履行修订后的STCW公约为前提,结合海上运输业发展的国际性和信息性等特点,以更新教学内容为重点,对原有教材做了大量的增删与修改,注重理论基础及内容阐述的逻辑性和准确性,力求反映国内外航海科技领域的新成就与新知识,适应21世纪海上运输业对航海类人才的知识、能力和素质结构的要求,兼顾各教材内容之间的衔接与整合,避免重复与遗漏。我衷心地希望,通过全体编写人员的不懈努力,这套精品系列教材,能够进一步加强我校航海类专业的建设,为国内兄弟院校航海类专业的发展提供有益的借鉴,为我国高等航海教育发展尽微薄之力。

教材在编写和出版过程中,得到了方方面面领导、专家和同仁的大力支持和热心帮助(具体名单附后)。我谨代表大连海事大学及教材编写全体成员对以上单位和个人致以最诚挚的谢意。各位专家和同仁渊博的专业知识、严谨的治学态度、精益求精的学术风范以及细致入微

的工作作风为教材的顺利出版作出了卓越的贡献,在很大程度上可以说,这套教材的成功出版,是全体编写人员,各港航企事业单位的领导、专家和同仁共同努力的成果。

航海类专业精品系列教材的编写是一项繁重而复杂的工作,鉴于时间和人力等方面的因素,这套教材在某些方面还不是十分完善,缺点和不妥之处在所难免,希望同行专家不吝指正。同时,希望以此为契机,吸引更多航海技术领域的专家、学者参与到这项工作中来,为我国航海教育献计献策,为我国乃至国际海上运输事业培养出大量高素质的航海类专业人才。

大连海事大学校长



2008 年 3 月

对教材出版给予大力支持和帮助的单位及个人如下:(以姓氏笔画为序)

于晓利	教授	大连水产学院
于智民	高级船长、高工	中远散货运输有限公司
马文华	高工	大连远洋运输公司
方伟江	轮机长	中海国际船舶管理有限公司上海分公司
王 阳	高工	中海国际船舶管理有限公司大连分公司
王 健	高工、高级引航员	大连港引航站
王国荣	高级轮机长	中远散货运输有限公司
王征祥	船长	中远集装箱运输有限公司
王新全	高工、总轮机长	中国远洋运输(集团)总公司
车 毅	船长	大连远洋运输公司
叶依群	高级船长	中远散货运输有限公司
田喜林	高工	中海国际船舶管理有限公司大连分公司
石爱国	教授	海军大连舰艇学院
任辰西	高级船长	中远散货运输有限公司
刘 屹	高工	大连远洋运输公司
刘世长	船长	日照海事局
孙 广	高工	辽宁海事局
安 彬	高级船长	大连远洋运输公司
邢 钺	高工	中远散货运输有限公司
吴 恒	教授、博导	大连海事大学
吴万千	副教授	青岛远洋船员学院
张仁平	教授	驻英大使馆海事处
张文浩	高工	中远散货运输有限公司
张均东	教授、博导	大连海事大学
张秋荣	教授	上海海事大学
李 录	高级轮机长	广州远洋船员管理公司

李志华	副教授	大连海事大学
李忠华	高工	珠海海事局
李恩洪	船长、高工	交通部海事局
李新江	副教授	大连海事大学
杜荣铭	教授	大连海事大学
杨君浩	轮机长	中海国际船舶管理有限公司上海分公司
沈毅	工程师	辽宁海事局
邱文昌	教授	上海海事大学
邱铁卫	高级轮机长	大连远洋运输公司
邵哲平	教授、船长	集美大学
邹文生	高级轮机长	大连远洋运输公司
陈志强	高级轮机长	中远集装箱运输有限公司
陈建锋	高工、高级船长	中远散货运输有限公司
周邱克	高工、高级船长	中海客轮有限公司
房世珍	大副	青岛远洋对外劳务合作有限公司
易金华	指导船长、高级船长	中海国际船舶管理有限公司广州分公司
林长川	教授	集美大学
金松	教授级高工	中国船级社大连分社
金义松	船长、高工	中海国际船舶管理有限公司
姚杰	教授	大连水产学院
姜勇	教授级高工	山东海事局
洪碧光	教授、船长	大连海事大学
赵金文	高工、轮机长	大连远洋运输公司
赵晓玲	副教授	青岛远洋船员学院
赵爱屯	高级船长	中海国际船舶管理有限公司大连分公司
夏国忠	教授	大连海事大学
徐波	高工	中远集装箱运输有限公司
敖金山	高级船长	枫叶海运有限公司
殷传安	高级轮机长	中海国际船舶管理有限公司大连分公司
郭子瑞	教授	辽宁海事局
郭文生	高级船长	广州远洋船员管理公司
顾剑文	高工	大连国际船员培训中心
崔保东	船长	青岛远洋对外劳务合作有限公司
黄党和	轮机长	中国海事服务中心
蔡振雄	教授	集美大学
魏茂苏	轮机长	青岛远洋对外劳务合作有限公司

编者的话

航海仪器的发展和进步往往标志着航海技术现代化进程的里程碑。随着计算机网络技术、信息处理技术、通信导航技术和卫星定位技术等新技术的不断涌现和发展,船舶操控正在向自动化、信息化和智能化方向发展。传统单一独立的航海仪器设备或系统,如无线电导航系统、船舶导航雷达、卫星导航系统、电子海图和信息显示系统、自动识别系统等,已经成为综合驾驶台智能管理控制系统中的必要组成部分。现代航海仪器在实现船舶自动驾驶,提高船舶的营运效益、保障海上人命安全、保护海洋环境等方面发挥着日益重要的作用。

本教材已被列为“十一五”国家级规划教材及航海类专业精品系列教材。为了使教材能够满足航海技术专业人才培养的需求,我们深入研究了近代航海仪器的发展特点,在国内的港航企事业单位和航海院校间进行了广泛调研,确定了教材编写思路和编写方向。在教材中我们除了系统地阐述各种航海仪器的基本工作原理、系统组成、在航海中的应用及其局限性等基本内容外,还注重反映了船舶导航设备在技术上的最新发展,力求使教材在紧跟现代科技飞速发展的同时,又能贴近航海应用实践。鉴于航海教育体系和航海仪器学科内容的特点,本教材在编写过程中还参照了《中华人民共和国海船船员考试和评估大纲》以及国际海事组织(IMO)颁布和修订的《STCW 公约》和国际电工委员会(IEC)等有关国际组织和机构制定的相关技术法规和标准,力求使教材的内容能够做到领先、实用。

本教材由关政军主编,刘彤副主编,洪德本主审。本教材分为上、下两册,上册为船舶导航设备,下册为船舶导航雷达。上册主要介绍了船用陀螺罗经、船用磁罗经、船用回声测深仪、船用计程仪、卫星导航系统、自动识别系统、船载航行数据记录仪、综合驾驶台系统等导航设备及导航系统的组成设置、工作原理及其在航海中的应用等内容。上册第一章陀螺罗经由陈铎编写,第二章船用磁罗经由关政军编写,第三章船用回声测深仪、第四章船用计程仪和第五章卫星导航系统由但高勇编写,第六章自动识别系统和第七章船载航行数据记录仪由刘彤编写,第八章综合驾驶台系统由董华编写。

本教材主要作为高等航海院校航海技术专业、海事管理专业本科和专科“航海仪器”课程的教材,也可作为无限航区、近洋航区和沿岸航区船长/大副和二/三副适任考试培训用书,以及作为船舶电子电气工程专业、船舶通信工程专业、船舶和港口电气自动化专业和海商法等相关海事专业的教材和教学参考书,还可作为地质石油勘探、航空及国防等部门从事航海仪器的工程技术人员参考书。

本教材在编写过程中,得到了中远集团和中海集团等航运企业导航专家和国内航海院校资深专家和学者的鼎力支持,并提出了许多宝贵的意见。大连海事大学教务处对本教材的编写进行了精心组织并提供了经费支持。为了保证国家级精品教材出版质量,大连海事大学出版社严把质量关,力争做到精益求精。对于本教材编写,大连海事大学航海学院航海仪器教研室的全体教师责无旁贷地给予了大力帮助。各位专家学者和同仁渊博的专业知识、严谨的治学态度和精益求精的学术风范为本教材的顺利出版作出了卓越的努力,在此一并

表示感谢。

值此教材出版之际,恰逢中国高等航海教育暨大连海事大学建校百年庆典,举国期盼航运盛世。作者在感怀欣喜之余,更深知“学汇百川·德济四海”之重任在肩。当代航海正以恢弘磅礴之气势全面迈入信息航海新纪元,航海仪器发展日进千里。限于作者学识疏浅,虽付出艰辛努力,但教材中不当之处亦在所难免。恳请读者及同行专家不吝赐教,作者表示衷心感谢!

关政军
2009年6月

目 录

第一章 陀螺罗经	(1)
第一节 陀螺罗经指北原理	(1)
第二节 陀螺罗经的误差	(17)
第三节 双转子陀螺罗经	(24)
第四节 单转子陀螺罗经	(42)
第二章 船用磁罗经	(53)
第一节 有关磁的基本知识	(53)
第二节 磁罗经设备	(57)
第三节 磁罗经的检查、保管与安装	(60)
第四节 船正平时的自差理论	(62)
第五节 倾斜自差理论	(70)
第六节 罗经自差校正	(71)
第七节 自差测定和自差表计算	(79)
第八节 固态电子磁罗经	(82)
第三章 船用回声测深仪	(87)
第一节 回声测深仪工作原理	(87)
第二节 回声测深仪误差	(91)
第三节 ED-162 型回声测深仪	(93)
第四节 GDS101 型回声测深仪	(96)
第四章 船用计程仪	(101)
第一节 电磁计程仪	(101)
第二节 多普勒计程仪	(104)
第三节 声相关计程仪	(108)
第五章 卫星导航系统	(112)
第一节 卫星导航系统概述	(112)
第二节 GPS 卫星导航系统定位原理	(116)
第三节 GPS 定位误差及美国 GPS 政策	(120)
第四节 DGPS 卫星导航系统	(124)
第五节 GPS 卫星导航仪在船舶导航上的应用	(129)
第六节 GPS 在航海测量中的应用	(135)
第七节 北斗卫星导航系统	(137)
第八节 格罗纳斯和伽利略卫星导航系统	(141)
第六章 自动识别系统	(145)
第一节 自动识别系统概述	(145)

第二节	自动识别系统设施及其基本原理	(146)
第三节	自动识别系统船载设备基本操作	(162)
第四节	自动识别系统船载设备安装与检验	(166)
第五节	自动识别系统船载设备应用可靠性分析	(167)
第七章	船载航行数据记录仪	(173)
第一节	船载航行数据记录仪相关国际法规	(173)
第二节	船载航行数据记录仪组成及功能	(175)
第三节	船载航行数据记录仪的操作、检验与管理	(180)
第八章	综合驾驶台系统	(184)
第一节	综合驾驶台系统概述	(184)
第二节	综合驾驶台系统的配置和功能	(189)
第三节	综合导航系统的配置	(191)
第四节	综合导航系统的功能	(193)
第五节	综合导航系统的航行管理系统	(198)
第六节	综合导航系统的接口技术	(202)
第七节	Sperry Marine VISION FT 综合驾驶台系统	(207)
参考文献		(216)

第一章 陀螺罗经

第一节 陀螺罗经指北原理

一、概述

陀螺罗经(gyro compass)是利用陀螺仪(gyroscope)的特性,在地球自转运动的影响下,借助于力矩器使陀螺仪主轴自动地找北,并精确地跟踪地理子午面的指向仪器。它可用来指示船舶的航向(heading)和测定物标的方位(bearing),还可作为自动舵、雷达、ECDIS、AIS 和 VDR 等船用设备的航向传感器。

1852 年,法国物理学家福科首先提出陀螺仪作为指向仪器的设想。20 世纪初,安许茨和斯伯利采用了福科的设想研制出可供船用的陀螺罗经。

随着现代电子技术和计算机技术的发展,现代陀螺罗经设备正向自动化、数字化、小型化和多功能化方向发展。

二、陀螺仪及其特性

陀螺罗经是把陀螺仪的特性和地球自转运动联系起来,借助于力矩器,使陀螺仪主轴自动地找北和指北的指向仪器。因此,陀螺仪是陀螺罗经的核心部件。

(一)陀螺仪的定义与结构

工程上将高速旋转的对称刚体(转子)及其悬挂装置的总称叫做陀螺仪。在结构上,陀螺仪由转子、内环、外环和基座组成,如图 1-1 所示。

转子的自转轴 OX 轴叫做陀螺仪的主轴。主轴作为指示空间方向的指向轴,能够绕与主轴相互垂直的两个转轴——水平轴 OY 轴和垂直轴 OZ 轴旋转。当转子和内环绕 OY 轴旋转时,主轴轴端将上升或下降,引起主轴在高度上发生改变;当转子、内环及外环绕 OZ 轴旋转时,将引起主轴在方位上的变化。由此可见,陀螺仪可借助于悬挂装置使其主轴指示空间任意方向。

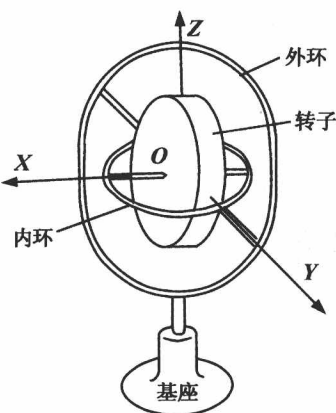


图 1-1 陀螺仪的结构

当陀螺仪的转子、内环及外环的几何结构和质量相对主轴、水平轴以及垂直轴都是对称时, OX 、 OY 和 OZ 三个转轴的交点称为陀螺仪的几何中心,如图 1-1 中 O 点所示。陀螺仪的重心与其几何中心相重合的陀螺仪称为平衡陀螺仪。不受任何外力矩作用的平衡陀螺仪称为自由陀螺仪。因陀螺仪的转子可绕主轴、水平轴和垂直轴旋转,则具有三个自由度,称为三自由度陀螺仪。

陀螺仪的转子由陀螺马达驱动作高速旋转。陀螺仪的悬挂装置用来保证使陀螺仪主轴可以指向空间任意方向。陀螺罗经中悬挂装置常用的方式有以下几种:

液浮方式——将陀螺转子密封到金属球体中,并将陀螺球浸浮在支承液体里,利用液体的浮力支承陀螺球,由于陀螺球悬浮在液体当中,陀螺转子主轴可以指向空间任意方向,即构成三自由度陀螺仪。

轴承方式——将陀螺转子封装在陀螺球(房)中,如图 1-3 所示。用垂直轴将陀螺球支承在垂直环上,陀螺球可绕垂直轴旋转;垂直环与水平环相连,陀螺球和垂直环绕水平轴旋转,水平环支承在基座上。陀螺转子轴、垂直轴和水平轴承构成了三个转轴,则陀螺仪主轴可以指向空间任意方向,形成三自由度陀螺仪。

扭丝方式——陀螺球分别由水平和垂直扭丝连接如图 1-4 所示,扭丝刚性固定了陀螺球的中心位置,其弹性构成了陀螺球绕水平轴和垂直轴的转动。陀螺转子轴、水平和垂直扭丝构成了三个转轴,形成了三自由度陀螺仪。

上述三种方式都不能独立地达到理想的支承状态。实际中,通常采用组合支承方式,如液浮加电磁上托,如图 1-2 所示;轴承加吊钢丝;轴承加液浮,如图 1-3 所示;扭丝加液浮;水银液浮加定位轴针等。

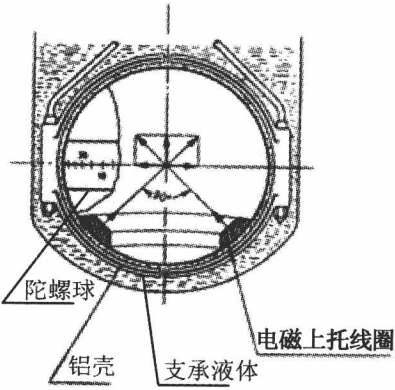


图 1-2 液浮加电磁上托支承方式

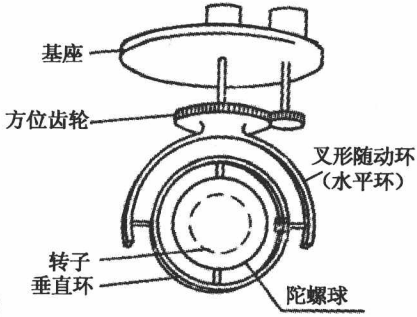


图 1-3 轴承加液浮支承方式

当然,把陀螺仪定义为转子及其悬挂装置的总体是经典的定义,是有局限性的。有许多物理现象都可以用来保持给定的方向,并能够测量载体的转动,即能产生陀螺效应。因此,广义地说,凡能产生陀螺效应的装置都可称为陀螺仪,如挠性陀螺和光纤陀螺等。

(二)陀螺仪的特性

陀螺仪变成陀螺罗经,是利用了陀螺仪独特的动力学特性,即定轴性和进动性。

描述陀螺仪转动性能的物理量是动量矩 H ,它表明转子高速旋转运动的强弱状态与方向。因为主轴动量矩的大小与转子的转动惯量及角速度成正比($H = J\Omega$),在转动惯量不变的情况下,角速度越大动量矩越大,所以,为获得较大的动量矩,陀螺仪转子转速都设计得很高,其转速可达每分钟上万转。主轴动量矩的方向与转子旋转方向有关,满足右手定则。

描述陀螺仪转动性能的另外一个物理量是外力矩 M 。外力矩方向也符合右手定则:

如图 1-5 所示,伸开右手,掌心对着陀螺仪几何中心,四指沿着力的作用方向,则大拇指所

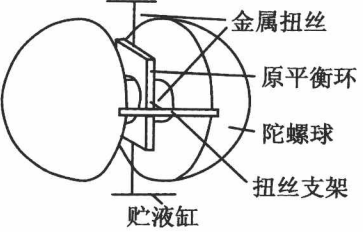


图 1-4 扭丝加液浮支承方式

指的方向便是外力矩 M 的方向。在图中,力 F 平行于 OZ 轴作用于 OX 轴上,外力矩 M_Y 作用于 OY 轴正向。

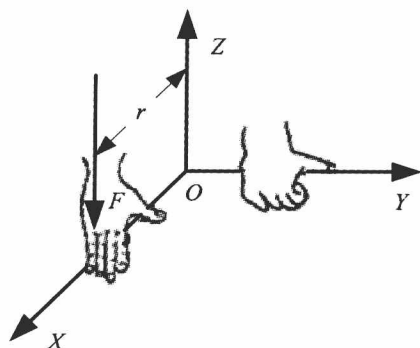


图 1-5 力矩方向的判断

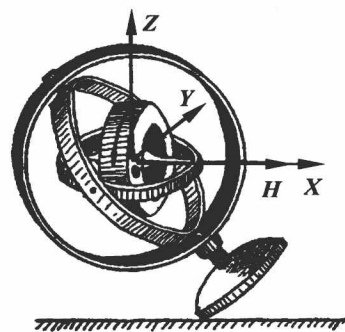


图 1-6 陀螺仪定轴性

若图 1-6 所示的自由陀螺仪主轴(OX 轴)动量矩 H 初始水平指空间某一方向,并将基座倾斜或旋转,则动量矩 H 仍然水平的指示原来的方向,没发生任何变化。这体现了陀螺仪的定轴性(gyroscopic inertia):当陀螺仪不受任何外力矩作用时,它的主轴将保持其空间初始指向不变。

若在图 1-7 所示的陀螺仪主轴 OX 轴施加一个外力 F ,由 F 产生的力矩 M_Y 作用于 OY 轴正向,此时,陀螺仪主轴动量矩 H 矢量矢端将绕着 OZ 轴转动,以捷径向 M_Y 方向旋转。这说明了陀螺仪的进动性(gyroscopic procession),即在外力矩作用下,陀螺仪主轴的动量矩 H 矢端以捷径向外力矩 M 转动,这种转动称为进动,可记为 $H \rightarrow M$ 。

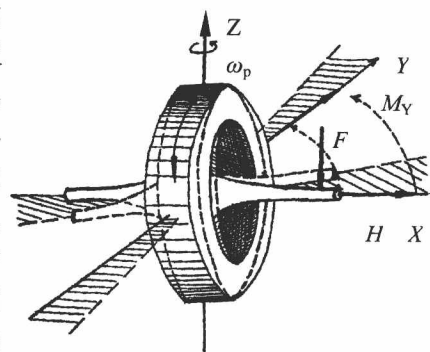


图 1-7 陀螺仪的进动

综上所述,陀螺仪不受外力矩作用时,主轴相对宇宙空间是稳定的,陀螺仪主轴表现为定轴性;受外力矩作用时,主轴相对宇宙空间产生了进动。陀螺仪主轴则表现为进动性。

陀螺仪的定轴性和进动性的转化条件是有无外力矩的作用。在陀螺罗经中,当需要陀螺仪主轴稳定时,则应尽量减少有害力矩的影响;当需要陀螺仪主轴按一定规律运动时,则应对它施加相应的外力矩。

陀螺仪主轴的动量矩 H 矢端进动快慢,可用进动角速度 ω_p 来表示。如图 1-7 所示,在外力矩 M_Y 的作用下,主轴进动角速度为 ω_{pz} ,作用在 OZ 轴上。

当 H 、 M_Y 和 ω_p 相互垂直时,可用下面公式表明三者之间的关系。

$$\omega_p = \frac{M}{H} \tag{1-1}$$

式(1-1)为陀螺仪的进动公式,即当 H 为常数时,陀螺仪在外力矩 M 作用下,发生进动,显然 M 越大,进动越快。当 $M=0$ 时, $\omega_p=0$,陀螺仪不发生进动。实际应用中,为克服常值干扰力矩影响,陀螺仪应提高转子的转速,以获得更大的动量矩,使主轴保持稳定。

在外力矩 M 作用下,主轴进动时,作用在主轴上各点的线速度 u_p 等于

$$u_p = \omega_p \cdot r \quad (1-2)$$

式中: r 是主轴上某点到陀螺仪中心的距离。随着距离 r 的增加, 线速度 u_p 也成比例地增大, 如图 1-8 所示。在动量矩矢量 H 的末端, 即主轴上这一点与陀螺仪中心的距离 r 正好等于矢量 H 。因为 $r = H$, 所以 $u_p = \omega_p \cdot H$, 又因为 $\omega_p = \frac{M}{H}$, 所以

$$u_p = \frac{M}{H} \cdot H = M \quad (1-3)$$

上式说明, 此点的进动线速度 u_p 在数值上正好等于外力矩 M 。

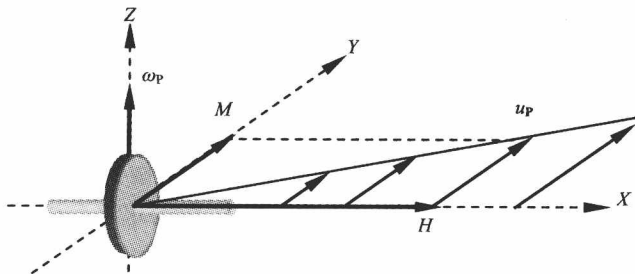


图 1-8 进动线速度与外力矩的关系

从图 1-8 中还可以看出, 进动线速度 u_p 的方向垂直于主轴, 力矩 M 矢量方向也垂直于主轴, 两者又都在同一平面内, 所以这两个矢量方向是相同的, 故可以表示为

$$\overline{u_p} = \overline{M} \quad (1-4)$$

上式称为赖柴尔定理。它表示动量矩矢量末端的进动线速度的大小与方向同外力矩矢量的大小与方向相等。

三、陀螺仪主轴的运动坐标系

为研究宇宙、地球和陀螺仪间的运动, 可建立三个坐标系: 空间坐标系、地理坐标系和陀螺坐标系。

空间坐标系 $O\xi\eta\zeta$: 是相对惯性空间固定不动的坐标系, 它代表宇宙空间, 坐标系原点 O 取在地球表面某点, 如图 1-9 所示。三个坐标轴分别指向三颗恒星, 构成右手直角坐标系。研究陀螺仪运动时, $O\xi\eta\zeta$ 坐标系可以不画出来, 但应始终记住, 陀螺仪的运动是相对宇宙空间的绝对运动。

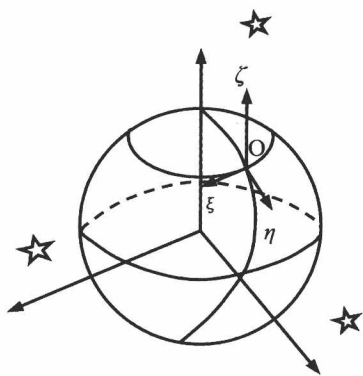


图 1-9 宇宙空间坐标系

地理坐标系 $ONWZ_0$: 是随船运动的地理坐标系。三个坐标轴分别指向正北、正西和天顶, 如图 1-10 所示, 构成右手直角坐标。该坐标系的特点是, 不管随船运动到哪里, 各坐标轴与地球的关系始终不变, 即 ON 始终水平指北, OW 始终水平指西, OZ_0 始终指向天顶。

陀螺坐标系 $OXYZ$: 是用来表示陀螺仪主轴运动的右手直角坐标系, 如图 1-11 所示。陀螺仪主轴的运动即是陀螺坐标系相对地理坐标系的运动。

主轴 OX 相对地理坐标的运动参量有两个: 方位角 α 和高度角 θ 。

方位角 α (azimuth angle): 是陀螺仪主轴在地平面上的投影与真北 ON 之间的水平夹角, 以子午面为基准, 主轴偏在子午面西边时, 方位角为正; 主轴偏子午面东面时, 方位角为负。

点,使其主轴位于子午面内(指向北极 P_N)并指恒星 S ,由于地球自西向东转,经过一段时间后,到达 B 点,由于定轴性,陀螺仪主轴仍将指恒星 S 方向,但相对 B 点子午面来说,主轴指北端在方位上已向东偏过了 α 角。

自由陀螺仪主轴相对地球不但有方位上的变化,而且还有高度上的变化。人们在地球上感受不到地球的自转,却能看到自由陀螺仪主轴的相对运动。生活中所看到太阳的东升西降运动,也是同样道理,故将陀螺仪主轴的这种运动称为视运动。自由陀螺仪的视运动速度与地球真运动速度大小相等、方向相反。

为了使陀螺仪主轴能稳定指北,应先找出陀螺仪视运动的规律,然后再采取相应措施。

(一) 地球自转角速度的分解

陀螺仪主轴相对地球的运动,可分解为相对地球子午面和水平面的运动。

在北纬任意纬度 φ_N 处,如图 1-14 所示,将地球自转角速度 ω_e 分解到 ON 轴和 OZ_0 轴上,得到两个分量 ω_1 和 ω_2 ,在 ON 轴上的 ω_1 称为水平分量,在 OZ_0 轴上的 ω_2 称为垂直分量。显然,在北纬

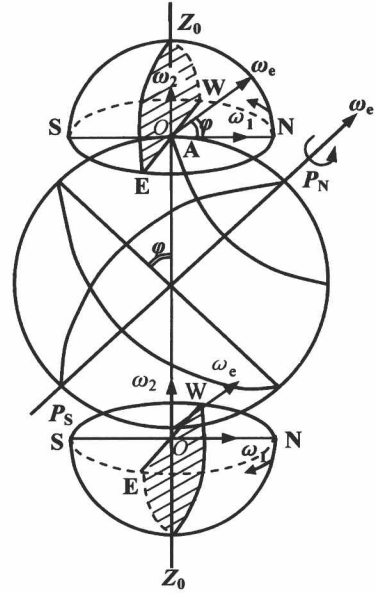


图 1-14 地球自转角速度的分解

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_e \cos \varphi \\ \omega_2 = \omega_e \sin \varphi \end{cases} \quad (1-5)$$

而在南纬应为

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_e \cos \varphi \\ \omega_2 = -\omega_e \sin \varphi \end{cases}$$

因为南纬时,分解得到的 ω_2 矢量指向地心,即指 OZ_0 轴的负半轴,所以 ω_2 为负值。

在北纬,由于垂直分量 ω_2 的影响,陀螺仪所在地的子午面以 OZ_0 轴为转轴,北点 N 不断的向西偏转,旋转角速度是 ω_2 。显然,由于南纬的 ω_2 指向相反,南纬的子午面北点 N 不断地向东偏转。

由于水平分量 ω_1 的影响,以 ON 轴为自转轴的水平面,东半平面不断下降,西半平面不断上升,旋转角速度为 ω_1 。显然,因为南北纬的 ω_1 都是指 ON 轴正向,所以南北纬水平面旋转方向是相同的。

(二) 陀螺仪的视运动规律

将自由陀螺仪主轴置于子午面内,当地球自转时,在北纬子午面北点 N 向西偏转,由于陀螺仪的定轴性,主轴空间指向不变,随地球一起运动的观察者看到主轴指北端在不断地向东偏转。同理,在南纬,由于 ω_2 反向,子午面北点 N 向东偏转,陀螺仪主轴的指北端向西偏转。主轴方位视运动角速度的大小都是 ω_2 。

陀螺仪主轴的动量矩 H 矢端的线速度 $v_2 = H\omega_2$ 。 v_2 称为由 ω_2 引起的主轴方位视运动线速度。纬度不变时, v_2 的大小是不变的,如图 1-15 所示。

当陀螺仪主轴的指北端偏离子午面以东时,受 ω_1 的影响,水平面东半平面下降,陀螺仪主轴的指北端相对水平面,产生上升的视运动;当陀螺仪主轴的指北端偏离子午面以西时,由于

水平面西半平面上升,陀螺仪主轴则产生下降的视运动。

主轴在高度上的视运动线速度不但与 ω_1 有关,而且与方位角 α 有关,如图 1-16 所示,主轴偏东 α 角后,在陀螺仪的 OY 轴上有

$$\omega_{1Y} = -\omega_1 \sin \alpha \tag{1-6}$$

当 α 小角度时,上式可写成

$$\omega_{1Y} \approx -\omega_1 \alpha \tag{1-7}$$

即主轴在高度上的视运动角速度大小为 $\omega_1 \alpha$ 。因此,主轴高度方向视运动线速度大小

$$v_1 = H\omega_1 \sin \alpha \approx H\omega_1 \alpha$$

当陀螺仪主轴指北时, α 角为零,即主轴与 ON

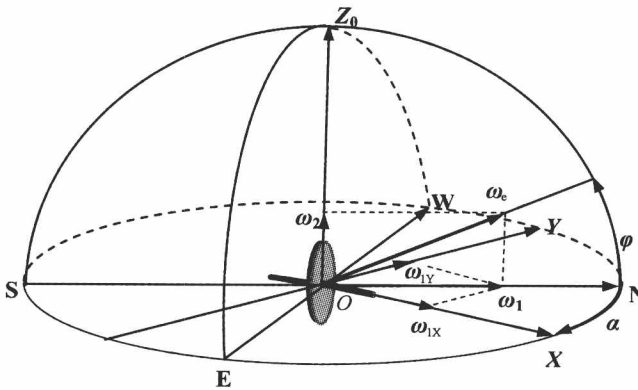


图 1-16 陀螺仪的视运动

速度大小为 $\omega_1 \alpha$ 。

五、变自由陀螺仪为陀螺罗经的方法

(一)变自由陀螺仪为陀螺罗经的原则

通过视运动分析可知,自由陀螺仪主轴指北端不能稳定地指北,是受地球自转角速度的垂直分量 ω_2 和水平分量 ω_{1Y} 的影响。

因 $\omega_{1Y} = \omega_1 \alpha = \omega_e \cos \varphi \cdot \alpha$,若 $\alpha = 0$,使自由陀螺仪主轴指北时, $\omega_1 \alpha = 0$,水平分量 ω_1 将不会影响自由陀螺仪主轴指北端稳定地指北。

又因 $\omega_2 = \omega_e \sin \varphi$,仅当 $\varphi = 0$ 陀螺仪放置在赤道时,垂直分量 ω_2 才不会影响自由陀螺仪主轴指北端稳定地指北。实际上,船舶不可能只航行于赤道上,故自由陀螺仪主轴相对于子午面的视运动影响是经常存在的,即 ω_2 是影响自由陀螺仪主轴不能指北的主要矛盾。要想使陀螺仪稳定指北,必须要克服 ω_2 的影响。

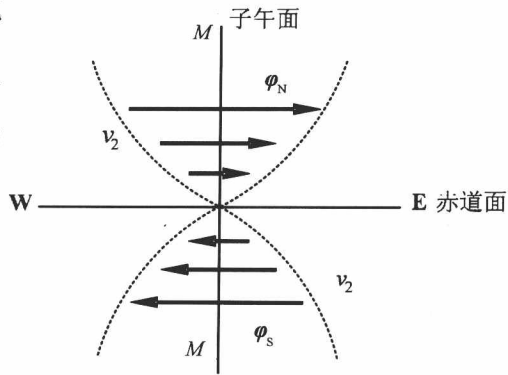


图 1-15 相对子午面的视运动线速度

轴重合,水平面的转动不会影响主轴的指向。当陀螺仪主轴偏东 α 角时,主轴北端上升;当主轴偏西 α 角时,主轴北端向下。主轴高度视运动线速度 v_1 大小与 α 角成正比,如图 1-17 所示。

综上所述,陀螺仪在地球上的视运动规律为:

陀螺仪主轴指北端相对子午面视运动是“北纬东偏南纬西偏”,偏转角速度大小为 ω_2 。

陀螺仪主轴指北端相对水平面视运动是“东升西降,南北一样”,升降角

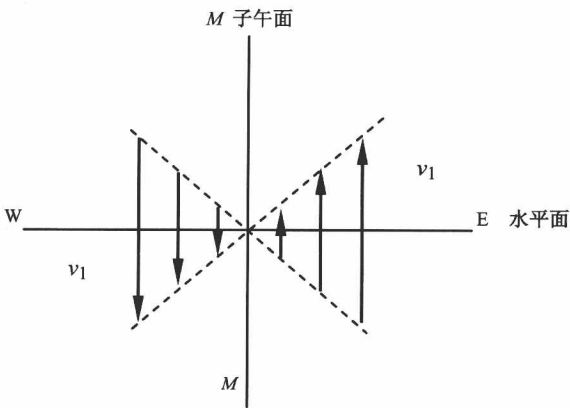


图 1-17 相对水平面的视运动线速度