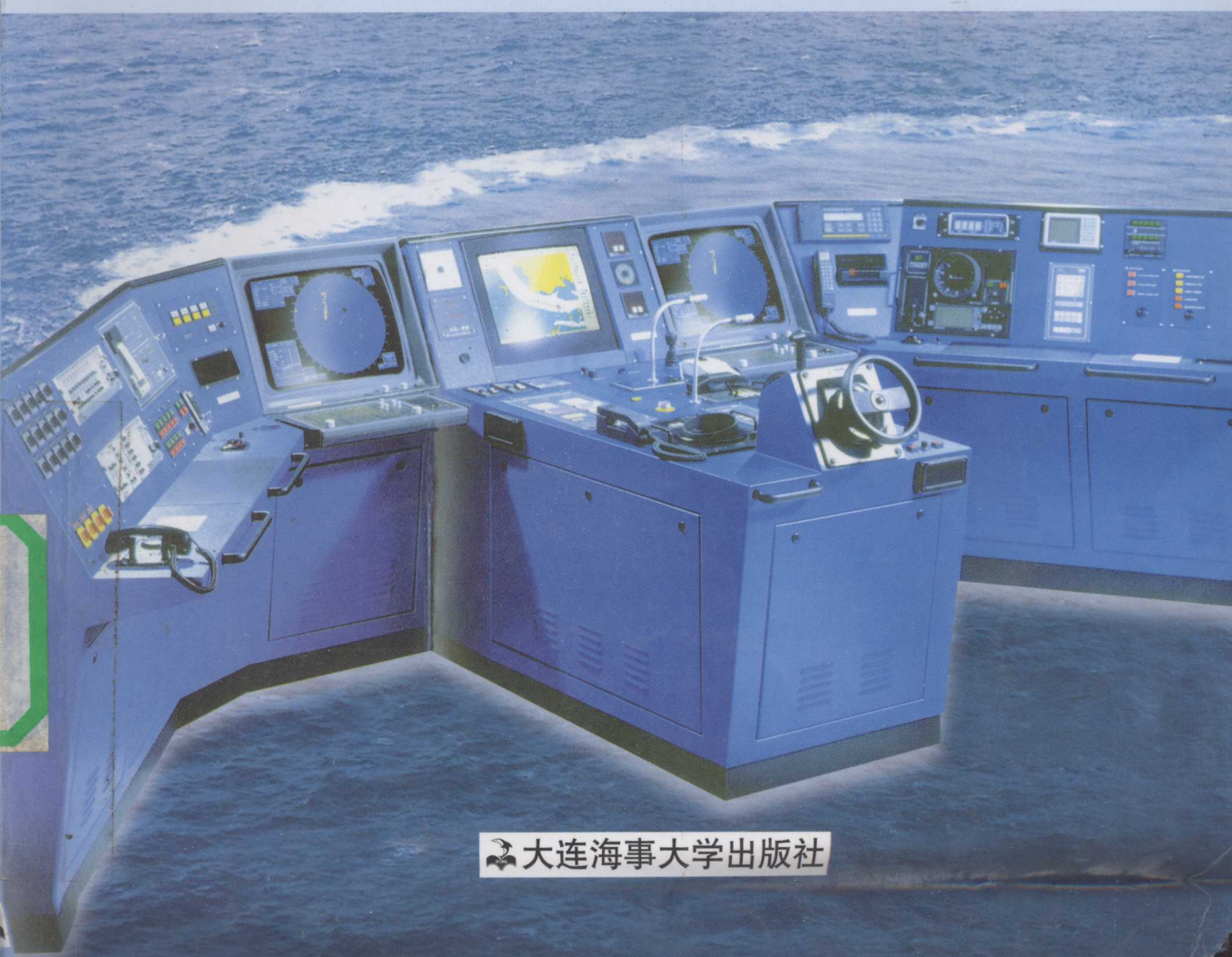



高等学校教材

航海仪器

洪德本 主编
张淑芳 主审



 大连海事大学出版社

© 2003 年版

高等学校教材

航海仪器

洪德本 主编
张淑芳 主审



NLIC2970298366

大连理工大学出版社

© 洪德本 2003

林殊科学著作

航海仪器

图书在版编目(CIP)数据

航海仪器 / 洪德本主编. —大连: 大连海事大学出版社, 2003. 10(2006. 12 重印)
(高等学校教材)

ISBN 7-5632-1708-8

I. 航… II. 洪… III. 航海仪器 IV. U666.15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 087685 号



大连海事大学出版社出版

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

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

锦州市兴达印务有限公司印装 大连海事大学出版社发行

2003 年 11 月第 1 版 2006 年 12 月第 2 次印刷

幅面尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 12.75

字数: 318 千 印数: 3501 ~ 4500 册

责任编辑: 时培育 史洪源 版式设计: 海 韵

封面设计: 王 艳 责任校对: 海 风

定价: 19.00 元

内容提要

本书介绍了船用罗经、船用回声测深仪、船用计程仪、罗兰 C 导航系统、卫星导航系统、自动识别系统、航行数据记录仪与组合导航系统的设置、工作原理及导航仪器。本书共分 5 篇 12 章,主要内容有:第一篇为船用罗经,包括陀螺罗经指北原理、陀螺罗经误差及其消除、双转子陀螺罗经、单转子陀螺罗经、磁罗经 6 章;第二篇为水声导航仪器,包括船用回声测深仪和计程仪 2 章;第三篇为无线电导航系统,包括罗兰 C 导航系统和卫星导航系统 2 章;第四篇为自动识别系统与航行数据记录仪;第五篇为组合导航系统。

本书是为海运高等院校航海技术专业、海事管理专业大学本科和专科“航海仪器 1”(“电航仪器”)和“航海仪器 2”(“无线电导航仪器”)两门课程编写的教材。本书的内容符合中华人民共和国海事局 1998 年颁布的《海船船员适任考试和评估大纲》航海学科目的要求,适用于无限航区、近洋航区和沿岸航区船长/大副和二/三副考试培训用书。本书也可作为电子信息工程专业、通信工程专业、电子信息科学与技术专业、电气工程及其自动化专业、船舶电气专业、港口电气工程专业、自动化专业以及法学专业等专业的教科书或教学参考书;也可作为海船驾驶人员,无线电通信、导航人员,航空、宇航测绘,石油勘探及国防等部门从事航海仪器的工程技术人员参考书。

序

众所周知,人们对海洋的探索是推动生产力发展的重要因素之一。古代历史的强国无同时也是航海强国。航海的发展史也是人类文明的发展史。在现代社会,航海也是世界经济发展的重要支柱产业之一。早期的航海主要是依靠磁罗经、六分仪、天文钟 3 件古老的航海仪器为船舶提供航向和确定船位。在现代航海中,因为船队的增加和交通的繁忙和战争的需求,为了安全准确而实时地进行船舶导航,古老的航海仪器及其功能已不能满足要求,各种电子和无线电导航仪器(陀螺罗经、测深仪、计程仪、雷达与 ARPA、无线电测向系统、罗兰导航系统、台卡导航系统、奥米伽导航系统、卫星导航系统、船舶自动识别系统(AIS)、船载航行数据记录仪(VDR)、组合导航系统等)相继出现,并且由分立设置走向组合,又不断更新换代,航海事业的发展促进了航海仪器的发展;而这些航海仪器和导航系统的发展又为船舶导航提供了更加可靠的安全保障,从而又促进了航海事业的发展。

在现代航海仪器中,越来越多地利用了电子技术、计算机技术和程序控制技术。嵌入式的 CPU 已经广泛地应用于各种航海仪器中,可以不夸张地说,一台航海仪器就是一台微型计算机。利用一台主计算机,将各种船舶导航计算机、船舶主机、船舶辅机、船舶机电设备、船内外的通信设备、船内外的各种系统和设备等组合起来,组合成船舶组合导航系统使船舶导航具有了定位、导航、自动靠离港、自动装载、航线优选、自动驾驶、自动避碰、通信、消防、救生、遥控指挥与调度等多种功能,使得航海仪器趋于综合多功能和智能化。

随着信息处理技术、电子技术、计算机技术、现代多媒体通信技术与机械等各种其他技术的结合,使得高智能船舶和无人驾驶船舶的组合导航必将成为现实。这就要求船舶驾驶人员和相关技术人员应具备与之相适应的高科技知识,通过本书和有关课程的学习,必将会为此打下坚实的理论和技術基础。本书是按照大连海事大学重新制定的航海技术专业、海事管理专业本科“航海仪器 1”(“电航仪器”)和“航海仪器 2”(“无线电导航仪器”)两门课程的教学大纲进行编著的。本书综合了现代船舶广泛使用和最新投入使用的各种无线电导航系统和航海仪器,以新技术和新内容奉献给读者。

本书作为航海仪器教科书具有全面性和先进性,在本技术领域具有代表性。它不仅作为航海技术及相关专业本科的教科书和作为国际有关船员适任考试的培训教材,而且可以作为相关技术人员的参考书。本书主编从事 30 多年的航海仪器教学和研究工作,曾多次出版《航海仪器》教材,具有丰富的教学经验。

本书的出版是编著者在长期教学和科研的基础上,不断跟踪导航新技术发展前沿的结果,是编著者呕心沥血工作在教学研究第一线的成果。愿本书能给读者带来丰厚的收益。

张淑芳

2003 年 10 月

编者的话

本书是根据航海技术专业“航海仪器 1”(“电航仪器”)和“航海仪器 2”(“无线电导航仪器”)两门课程的教学大纲、《1978 年海员培训、发证和值班标准国际公约》1995 年修正案(STCW78/95 公约)、《海船船员适任考试和评估大纲》、SOLAS 公约、国际技术标准与法规、船舶航海仪器的现状与发展以及教学和海上实践而编著的,是为高等航海学校航海技术专业、海事管理专业本科和专科“航海仪器”课程编著的教材。本书也可作为无限航区、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;电子信息工程专业、通信工程专业、电子信息科学与技术专业、电气工程及其自动化专业、船舶电气专业、港口电气工程专业、自动化专业以及法学专业等专业的教科书或教学参考书,也可作为海、陆、空、宇航通信、导航人员,测绘、勘探及国防等部门从事航海仪器的工程技术人员参考书。

本书分 5 篇 12 章。第一章和第二章分别介绍了陀螺罗经指北原理、误差及其消除。第三、四章分别介绍了双转子和单转子陀螺罗经的结构、使用及保养。第五章在磁的基本概念基础上,介绍了船用磁罗经的结构、安装检查、自差的测定与校正。第六章在水声学基础上介绍了回声测深仪原理与误差。第七章介绍了电磁计程仪、多普勒计程仪和声相关计程仪。第八章介绍了罗兰 C 导航系统的设置、工作原理、定位操作及精度。第九章介绍了 GPS、北斗和 GLONASS 三种卫星导航系统的设置、工作原理、应用、定位与误差。第十章介绍了自动识别系统的岸台系统、船台设备、应用、国际公约和国际技术标准。第十一章介绍了船载航行数据记录仪(VDR)的配备要求和相关法规。第十二章介绍了组合导航系统的组成、功能、管理和接口技术。

本书第一、二章由陈铎编著;第三、四章由洪刚编著;第五章由关政军编著;第六、七章由但高勇编著;第八章由刘彤编著;第九、十章由洪德本编著;第十一章由张繁盛编著;第十二章由董华编著。本书由洪德本主编,由张淑芳主审。本书作者均在大连海事大学多年从事教学、科研和航海仪器的维修管理工作,具有丰富的理论和实际的教学、航海实践和航海仪器的维修管理的经验。

本书主要叙述船舶无线电导航系统及船用仪器的基本原理、使用方法及有关新技术与新进展。本书在阐述各种航海仪器的基本工作原理、组成与结构、误差产生的原因与消除方法及使用方法的同时,反映卫星导航技术、组合导航技术、自动识别技术、船载航行数据记录技术、光纤罗经等新技术与新方法。全书内容安排详略得当,重点突出,理论联系实际,满足了高等航海学校航海技术专业、海事管理专业本科和专科“航海仪器 1”(“电航仪器”)和“航海仪器 2”(“无线电导航仪器”)两门课程教学大纲的要求;符合《海船船员适任考试和评估大纲》航海学科目的要求。

在本书编著过程中,得到北京北斗星通卫星导航技术有限公司邵博及其他有关方面的同志的大力帮助,在此一并表示感谢。由于航海仪器发展极其迅速,又由于编著者水平有限,书中不足和错误之处在所难免,恳切地希望使用本书的师生与其他读者批评指正。

洪德本

2003 年 10 月

目 录

第一篇 船用罗经

第一章 陀螺罗经指北原理	(1)
第一节 陀螺仪及其特性	(1)
第二节 自由陀螺仪在地球上的视运动	(6)
第三节 变自由陀螺仪为陀螺罗经的方法	(9)
第四节 摆式罗经等幅摆动和减幅摆动	(13)
第五节 电磁控制式陀螺罗经	(19)
第六节 光纤陀螺罗经	(20)
复习思考题	(22)
第二章 陀螺罗经误差及其消除	(23)
第一节 纬度误差	(23)
第二节 速度误差	(24)
第三节 冲击误差	(27)
第四节 其他误差	(29)
复习思考题	(30)
第三章 双转子陀螺罗经	(31)
第一节 安许茨 20 型陀螺罗经	(31)
第二节 北辰 CMZ500 型陀螺罗经	(37)
第三节 安许茨 4 型陀螺罗经	(40)
复习思考题	(48)
第四章 单转子陀螺罗经	(49)
第一节 斯伯利 MK37 型陀螺罗经	(49)
第二节 ES-110 型陀螺罗经	(52)
第三节 阿玛-勃朗 10 型陀螺罗经	(54)
第四节 SGB1000 型陀螺罗经	(59)
复习思考题	(60)
第五章 磁罗经	(61)
第一节 磁的基本概念	(61)
第二节 船用磁罗经	(64)
第三节 磁罗经的检查、保管与安装	(66)
第四节 船正平时的自差理论	(68)
第五节 倾斜自差理论	(75)
第六节 罗经自差校正	(77)
第七节 自差的测定和自差表计算	(83)

复习思考题	(85)
-------------	------

第二篇 水声导航仪器

第六章 回声测深仪	(86)
第一节 水声学基础	(86)
(1) 第二节 回声测深仪原理	(87)
(1) 第三节 回声测深仪误差	(89)
(6) 第四节 IES-10 型回声测深仪	(91)
(6) 复习思考题	(93)
第七章 船用计程仪	(94)
(01) 第一节 电磁计程仪	(94)
(05) 第二节 多普勒计程仪	(96)
(55) 第三节 声相关计程仪	(99)
(6) 复习思考题	(101)

第三篇 无线电导航系统

第八章 罗兰 C 导航系统	(102)
(05) 第一节 罗兰 C 导航系统的设置与工作原理	(102)
(08) 第二节 罗兰 C 导航仪和罗兰 C 定位	(105)
(11) 第三节 罗兰 C 定位精度	(108)
(1) 复习思考题	(110)
第九章 卫星导航系统	(111)
(04) 第一节 卫星导航系统概述	(111)
(84) 第二节 GPS 卫星导航系统的设置	(114)
(44) 第三节 GPS 卫星导航仪	(117)
(44) 第四节 GPS 卫星导航仪定位误差	(120)
(52) 第五节 DGPS 卫星导航系统	(123)
(42) 第六节 GPS 在导航中的应用	(128)
(20) 第七节 GPS 在测量中的应用	(132)
(60) 第八节 北斗卫星导航系统	(136)
(10) 第九节 GLONASS 卫星导航系统	(139)
(16) 复习思考题	(141)

第四篇 自动识别系统与航行数据记录仪

第十章 自动识别系统	(143)
(25) 第一节 AIS 概述	(143)
(35) 第二节 AIS 的岸台系统	(146)
(83) 第三节 AIS 的船台设备	(149)

第四节 AIS 的应用	(153)
第五节 AIS 的国际公约和国际技术标准	(155)
复习思考题	(159)
第十一章 车载航行数据记录仪	(161)
第一节 VDR 概述	(161)
第二节 VDR 的主要功能及技术指标	(162)
第三节 VDR 的配备要求和相关法规	(166)
复习思考题	(168)

第五篇 组合导航系统

第十二章 组合导航系统	(169)
第一节 组合导航系统概述	(169)
第二节 组合导航系统的组成	(170)
第三节 组合导航系统的功能	(172)
第四节 组合导航信息的综合处理	(177)
第五节 组合导航航行管理系统	(179)
第六节 组合导航系统的接口技术	(183)
第七节 Litton Marine System VISION 2100 型组合导航系统	(186)
复习思考题	(191)
参考文献	(193)

第一篇 船用罗经

第一章 陀螺罗经指北原理

陀螺罗经是船舶上指示方向的航海仪器。其基本原理是把陀螺仪的特性和地球自转运动联系起来,自动地找北和指北。描述陀螺罗经指北原理所涉及的内容用式(1-1)表示:

$$\text{陀螺罗经} = \text{陀螺仪} + \text{地球自转} + \text{控制设备} + \text{阻尼设备} \quad (1-1)$$

本章主要介绍陀螺仪及其基本特性、自由陀螺仪在地球上的视运动、变自由陀螺仪为陀螺罗经的方法、摆式陀螺罗经的等幅摆动和减幅摆动、电磁式陀螺罗经的工作原理与特点以及光纤陀螺罗经的工作原理与特点。

第一节 陀螺仪及其特性

一、陀螺仪的定义与结构

凡是能绕回转体的对称轴高速旋转的刚体都可称为陀螺。所谓回转体是物体相对于对称轴的质量分布有一定的规律,是对称的。常见的陀螺是一个高速旋转的转子。回转体的对称轴叫做陀螺转子主轴,或称极轴。转子绕这个轴的旋转称为陀螺转子的自转。陀螺转子主轴相当于一个指示方向的指针,如果这个指针能够稳定地指示真北,陀螺仪就成了陀螺罗经。

如图 1-1 所示,一个陀螺用一个内环(水平环)支承起来,在自转轴(主轴)水平面内,与主轴相垂直的方向上,用水平轴将内环支承在外环(垂直环)上,而外环则用与水平轴相垂直的垂直轴支承在固定环及基座上。把高速旋转的陀螺安装在这样一个悬挂装置上,使陀螺主轴在空间具有一个或两个转动自由度,就构成了陀螺仪。可以看出,高速旋转的转子及其支承系统是构成陀螺仪的两个要素。

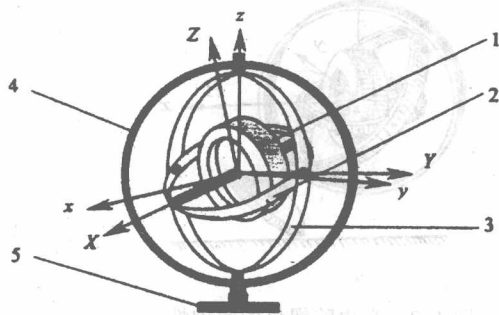


图 1-1 陀螺仪

1-转子;2-内环;3-外环;4-固定环;5-基座

实用罗经中,陀螺仪转子的转速都是每分钟几千转到每分钟几万转。陀螺仪的支承系统应具有这样的特点,即它应保证主轴在方位上指任何方向,在高度上指示任何高度,总之,能指,空间任何方向。由此,我们可以将陀螺仪概述为:陀螺转子借助于悬挂装置可使其主轴指向空间任意方向,这种仪器就叫陀螺仪。

实用陀螺仪的转子、内环及外环等相对主轴、水平轴以及垂直轴都是对称的,无论几何形体或质量都是对称的。重心与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

用的陀螺仪称为自由陀螺仪。工程上应用的陀螺仪都是自由陀螺仪。陀螺仪的转子能绕一个轴旋转,它就具备了一个旋转自由,也就是具有一个自由度。如图 1-1 所示的陀螺仪,具有三个自由度,一是转子绕 Ox 轴作自转运动,一是转子连同内环绕 Oy 轴(水平轴)转动,一是转子连同内环和外环绕 Oz 轴(垂直轴)转动。这种结构使转子主轴可指空间任意方向。三轴交点 O 为陀螺仪中心点,陀螺仪的重心位于 O 点。它具有三个自由度,称为三自由度陀螺仪。应当明确地指出,把陀螺仪定义为陀螺及其悬挂装置的总体是经典的定义,是有局限性的。科学技术发展表明,有许多物理现象可以用来保持给定的方位,并能够测量载体的转动,即能产生陀螺效应。这就是说产生陀螺效应不一定要有高速旋转的刚体。因此,广义地说,凡能产生陀螺效应的装置都可称为陀螺仪。

二、陀螺仪的特性

(1) 陀螺仪能制成指向仪器——陀螺罗经,是因为陀螺仪有着自己的、独特的动力学特性,这些特性就是定轴性和进动性。

1. 自由陀螺仪的定轴性

表明陀螺仪性能的主要物理参数是主轴动量矩 H ,它说明了转子高速旋转运动的强弱状态与方向。设图 1-1 所示的陀螺仪主轴动量矩 H 即 Ox 轴正向水平指空间某一方向;现将基座倾斜,则出现的现象如图 1-2 所示: H 即 Ox 轴正向仍指原来方向没变;如将基座旋转,也可看到同样的结果, H 仍然水平地指示原方向,没发生任何变化。这说明,当一个自由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的特性,称作陀螺仪的定轴性。

2. 陀螺仪的进动性

若图 1-1 所示的陀螺仪的转子不转,这就是一般的刚体系统了。在自转轴上,如 Ox 轴正端作用一个力 F (如图 1-3,为清楚展示转子位置的变化,图中未画出支架系统),根据右手

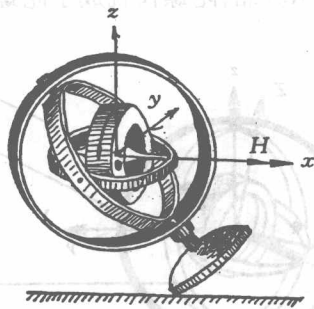


图 1-2 自由陀螺仪的定轴性

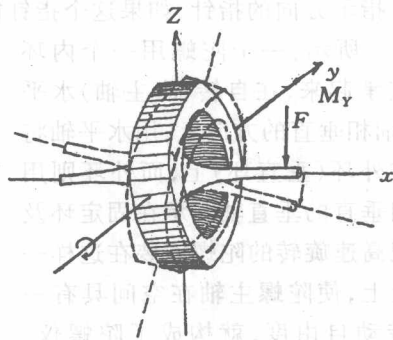


图 1-3 转子不转的陀螺仪

法则, F 产生的力矩应作用于 Oy 轴正向,以 M_y 表示。可以看到,转子在 F 力作用下,将绕 Oy 轴转动,转动角速度为 ω_y ,与 M_y 同向,说明转子是沿着外力方向转动的,这不是进动。

使上述系统转子高速旋转,则成为真正陀螺仪,当陀螺仪受外力矩 M_y 作用时,转子动量矩 H 矢量端点(矢端)将绕着 Oz 轴转动了,转的方向符合这一规律: H 矢端向 M_y 矢量方向,不是沿着 270° 角方向,而是沿着 90° 角方向向 M_y 转,我们称这是以捷径向外力矩 M_y 转动(如图 1-4)。这种运动称之为进动,这就是陀螺仪的进动特性。

陀螺仪的特性可概括为以下两点:

(1)定轴性(gyroscopic inertia):在不受外力矩作用时,自由陀螺仪主轴保持它的空间的初始方向不变。

(2)进动性(gyroscopic precession):在外力矩作用下,陀螺仪主轴的动量矩 H 矢端以捷径趋向外力矩 M 矢端,作进动运动或称旋进运动,可记为 $H \rightarrow M$ 。

陀螺仪的定轴性和进动性是可以互相转化的,其转化条件就看有无外力矩的作用。无外力矩作用时,陀螺仪主轴相对于空间保持定轴;有外力矩作用时,陀螺仪主轴则相对于空间做进动运动。在陀螺罗经中,当需要应用陀螺仪的定轴性时,则应尽一切努力设法减少有害外力矩的影响;当需要陀螺仪按一定规律运动时,则应对它施加相应的外力矩。

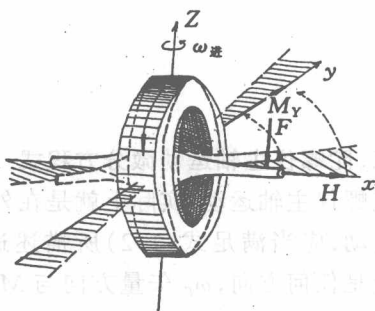


图 1-4 陀螺仪的进动特性

3. 进动公式

陀螺仪主轴的动量矩 H 矢端进动快慢,用进动角速度 ω_p 表示。在外力矩 M_Y 作用下的进动角速度应是作用在 OZ 轴上的矢量 ω_{pZ} (因进动是绕 OZ 轴), ω_{pZ} 的方向用右手法则确定,如图 1-5 所示,右手四指沿着 H 矢端进动方向握住 OZ 轴(进动时绕着转的轴),伸开大拇指,则大拇指指示的方向就是 ω_p 的矢量方向。若外力矩作用在陀螺仪的 OZ 轴正向,即有 $+M_Z$,如图 1-6 所示,则所产生的进动是绕 OY 轴的, ω_{pY} 作用于 OY 轴的负向,即有 $-\omega_{pY}$ 。

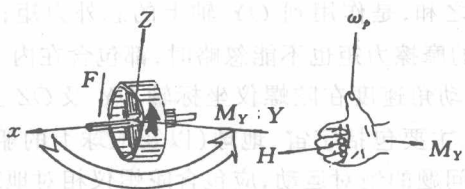


图 1-5 判断 ω_p 右手法则

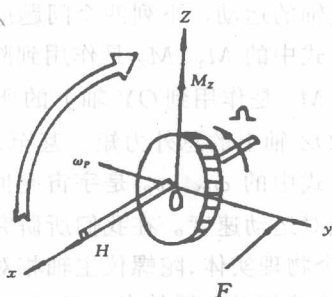


图 1-6 M_Z 产生绕 OY 轴的进动

进动角速度的大小与什么有关呢?下面公式阐明动量矩 \bar{H} 、外力矩 \bar{M} 与进动角速度 $\bar{\omega}_p$ 三者之间的关系:

$$\bar{\omega}_p = \frac{\bar{M}}{H} \quad (1-2)$$

式(1-2)称为陀螺仪的进动公式。它的物理意义是很明显的。一个陀螺仪,当 H 为常数时,在外力矩 M 作用下,发生进动,显然当 M 越大,进动越快,明显地表现出陀螺仪的进动特点;当 M 比较小时,进动就慢了;当 $M = 0$ 时, $\omega_p = 0$,说明它不进动了,表现出它的定轴性。从另一个角度说,当 M 为常数时,比如仅作用有很小的常值干扰力矩,则陀螺仪的 H 越大,进动角速度越小,表明主轴越不易改变空间指向,即主轴容易稳定。

利用式(1-2),写出陀螺仪在 $+M_Y$ 和 $+M_Z$ 作用下的进动角速度分别为(如图 1-7):

$$\begin{cases} \omega_{pz} = \frac{M_Y}{H} \\ -\omega_{py} = \frac{M_Z}{H} \end{cases} \quad (1-3)$$

三、陀螺仪主轴运动微分方程式

陀螺仪主轴运动,实际上就是在外力矩作用下,它在空间的进动,应当满足式(1-2)所描述进动关系,式中的 M 矢量应是任何方向, ω_p 矢量方向与 M 、 H 矢量方向满足右手法则。在直角坐标系中,为方便,一般可用它们的分量形式,即都投影到3个坐标轴上去,为简便, M 的分量都取正值,即取 M_X 、 M_Y 、 M_Z 。因为 M_X 是作用陀螺仪的主轴上,与主轴动量矩 H 的夹角是 0° ,不是 90° ,所以它的进动角速度为零,即 M_Y 力矩不引起进动。 M_Y 和 M_Z 所引起的进

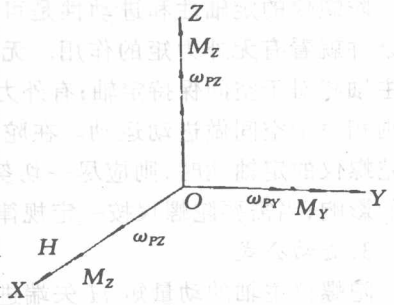


图 1-7 ω_p 、 M 在各轴的投影

$$\begin{cases} H\omega_{pz} = M \\ -H\omega_{py} = M_Z \end{cases} \quad (1-4)$$

这组方程是从陀螺仪的进动原理导出的。今后,我们就用式(1-4)来讨论陀螺仪在外力矩作用下,主轴的运动。下列两个问题应当明确:

第一,式中的 M_Y 、 M_Z 是作用到陀螺仪上的所有外力矩之和分别在 OY 、 OZ 轴上的投影,换句话说, M_Y 是作用到 OY 轴上的所有外力矩之和,是作用到 OY 轴上的总外力矩;而 M_Z 是作用到 OZ 轴上的总外力矩。甚至,当轴承中的摩擦力矩也不能忽略时,都包含在内。

第二,式中的 ω_{pY} 、 ω_{pZ} 是宇宙空间的绝对运动角速度在陀螺仪坐标轴 OY 及 OZ 上的投影,它是绝对运动速度。在我们所研究的体系中,主要包括宇宙、地球(以及地球上的船舶)和陀螺仪 3 个物理实体,陀螺仪主轴相对宇宙类似问题的绝对运动,应包含陀螺仪相对地球的对运动和地球相对空间的牵连运动。绝对运动速度等于牵连运动速度加相对运动速度。

为研究 3 个物理实体间的运动,就应建立 3 个坐标系:空间坐标系、地理坐标系和陀螺坐标系。研究 3 个坐标系间的运动关系。

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 取在地球表面某一点,如图 1-8 所示。3 个坐标轴分别指向 3 颗恒星,构成右手直角坐标系。 $O\xi\eta\zeta$ 在地球表面只能平移,不跟地球一起运动,即不管原点 O 转动到哪里,它们永远指 3 颗恒星不变。研究罗经、陀螺仪时, $O\xi\eta\zeta$ 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,其方程式是绝对运动方程式。

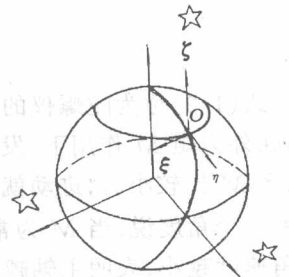


图 1-8 空间坐标系

地理坐标系 $ONWZ_0$: O 点(原点)选在地球表面,与陀螺仪的中心相重合,在子午面内选水平指北轴 ON (图 1-9);在水平面内选指正西轴 OW , OW 实际也是该处纬度圈的切线;过 O 点选

OZ_0 轴垂直水平面指向天顶, OZ_0 。这样就构成了一个代表地球的右手直角坐标, 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 始终指天顶。

陀螺坐标系 $OXYZ$: 是用来表示陀螺仪运动的坐标系。坐标系原点也取在陀螺仪的几何中心点 O , OX 轴与陀螺仪主轴重合, OY 轴必须与内环轴重合, 如图 1-10 所示, OZ 轴在转子平面内且与 XOY 平面相垂直, 构成右手直角坐标系。动量矩是与 OX 轴重合的, 我们的着眼点是 OX 轴的运动规律。显然 $OXYZ$ 坐标系与 $ONWZ_0$ 坐标系有这样的关系: 当 OX 轴与 ON 轴重合指北, OY 轴与 OW 轴重合指西时, OZ 与 OZ_0 轴重合指天顶。

仅有坐标系还不够, 还应有确定主轴运动状态的参量。主轴 OX 相对地理坐标系的运动有两个: 方位的变化和高度的变化, 用方位角 α 和高度角 θ 表示。

方位角 α (azimuth angle): 它是陀螺仪主轴在地平面上的投影, 与地平面上真北线 ON 之间的夹角, 以子午面为基准, 主轴偏在子午面西边时, 方位角为正; 主轴偏在子午面东边时, 方位角为负。

高度角 θ (tilt angle): 它是主轴 OX 与主轴在地平面投影线之间的夹角, 以水平面为基准, 主轴上仰于地平面之上时, 高度角为负; 主轴下俯于地平面之下时, 高度角为正。

在后面讨论罗经运动时, 为了能简单明了地用图形表示陀螺仪主轴在地球上所指的方向, 以及它的运动情况, 我们在陀螺仪的正北方向, 竖立一个投影面, 可以把主轴指北端的端点投影到这个平面上, 用讨论投影点运动的方法来观察罗经主轴的运动状况。为此, 引用可描述罗经主轴在方位 α 和高度 θ 上变化的投影图示法。

图 1-11 的投影面是这样表示的: 在地理坐标系的北端竖立一东西向的垂直平面, 称为投影面, 子午面与投影面的交线为 MM' , 即真北线; 水平面与投影面的交线为 HH' , 即水平线, 并在 HH' 上注明东和西。在投影面上, MM' 与 HH' 的交点 N 即为水平指北点, 投影面上的 MM' 线与 HH' 线组成一组直角坐标, 罗经主轴的方位角 α 和高度角 θ 可分别用横坐标与纵坐标表示之。欲确定 α 和 θ , 可将罗经主轴的延长线与投影面相交, 其交点即为罗经主轴指北端在投影面上的投影点。

例如 P 点为投影点, 其横坐标和纵坐标则分别表示罗经主轴指北端偏离子午面的方位角与偏离水平面的高度角 θ 之大小。

附录 1: 确定外力作用产生外力矩方向的方法——右手法则。今后讨论罗经指北原理, 经常要判定外力矩的方向。下面介绍这个右手法则的运用, 一定要牢记。

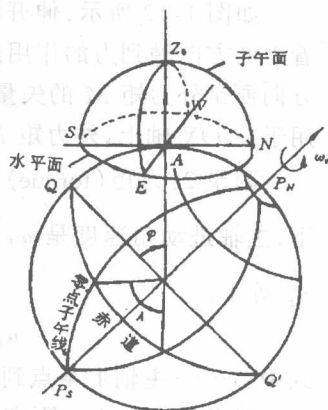


图 1-9 地理坐标系

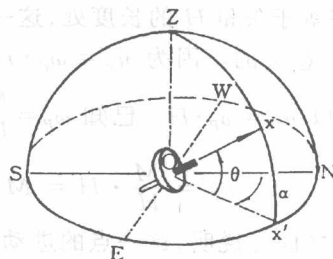


图 1-10 主轴相对地理坐标系的运动

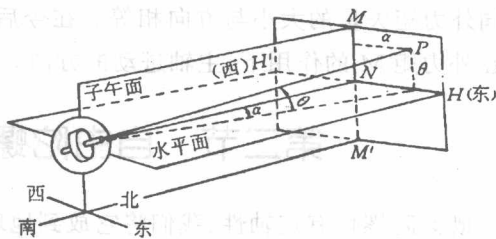


图 1-11 投影图

如图 1-12 所示,伸开右手,掌心正对着支点 O ,四指沿着力的方向触到力的作用点上,伸开大拇指,则大拇指所指的方向便是外力矩 M 的矢量方向。图示,力 F 平行于 OZ 轴作用于在 OX 轴上,外力矩 M_Y 作用于 OY 轴正向。

附录 2:力矩(torque)与进动线速度。在外力矩 M 作用下,主轴进动角速度是 $\omega_p = \frac{M}{H}$ 。这时,主轴上各点的线速度 u_p 等于:

$$u_p = \omega_p \cdot r \quad (1-5)$$

式中: r ——主轴上某点到陀螺仪中心的距离。

随着该点与中心距离的增加,线速度 u_p 的值也正比例地增大,如图 1-13。但是,在动量矩矢量 H 的末端,也就是主轴上这一点与陀螺仪中心的距离 r 正好等于矢量 H 的长度处,这一点的线速度是很有意义的。因为 $u_p = \omega_p \cdot r$,而现在 $r =$

H ,所以 $u_p = \omega_p \cdot H$ 。已知 $\omega_p = \frac{M}{H}$,所以:

$$u_p = \frac{M}{H} \cdot H = M \quad (1-6)$$

式(1-6)说明,这一点的进动线速度 u_p 在数值上正好等于力矩 M 的值。

另外,从图中可以看出,进动线速度 u_p 的方向是垂直于主轴的,力矩矢量方向也垂直于主轴,两者又都在同一平面内,故这两个矢量是平行的。大小相等方向相同的两个矢量,可以用矢量等式来表示,即:

$$\vec{u}_p = \vec{M} \quad (1-7)$$

式(1-7)在力学中称为赖柴尔定理。它表示动量矩矢量末端的进动线速度,它的大小与方向同外力矩矢量的大小与方向相等。在今后讨论主轴的运动中,常用进动线速度 u_p 表示主轴在外力矩 M 的作用下,主轴进动的方向。

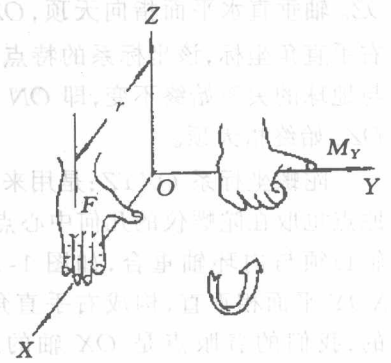


图 1-12 判断力矩的右手法则

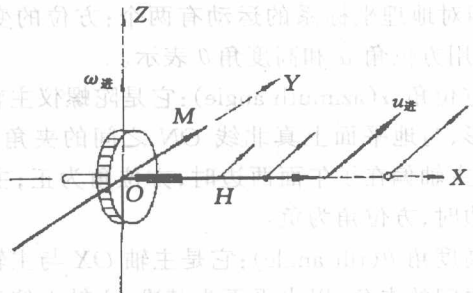


图 1-13 进动线速度与 M 的关系

第二节 自由陀螺仪在地球上的视运动

既然陀螺仪有定轴性,我们将它放到地球上,只要把转子主轴 OX 对准地球的真北,那么主轴 OX 不就保持其方向不变而一直指真北了吗?构成陀螺罗经不是很简单吗?

实际上,在地球上的陀螺仪,它的基座随着地球一起转动,它的主轴 OX 在空间所指的方向不变,相对地球而言是改变方向的。如图 1-14 所示,是地球北半球,若将自由陀螺仪放在 A 点,使其主轴位于子午面内并指恒星 S ,由于地球自西向东转,经过一段时间后,它转到 B 点,由于定轴性,陀螺仪主轴仍将指恒星 S 方向,但相对子午面来说,主轴指北端已向东偏过了 α 角。如图 1-15 所示,是在赤道处,将陀螺仪主轴 OX 水平东西向放置(A 点),随着地球自转,它将转到 $B、C、D\dots$,同样由于它有定轴性,无论转到哪里,主轴都将永远保持空间原来的

指向不变。但是它相对地平面来说,却在不断地变化方向,如 a 端,开始时是指东,因地球自转不断抬高,6h后, a 端就指天顶了,再过6h它就指西了……,这说明主轴相对地球不但有

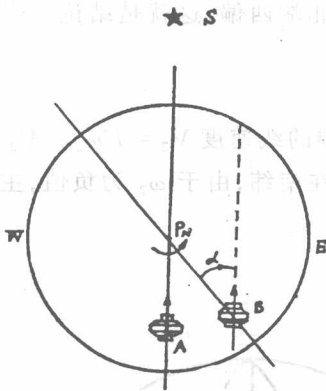


图 1-14 主轴在方位上的变化

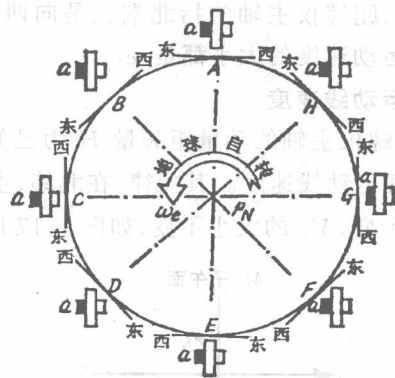


图 1-15 主轴在高度上的变化

方位上的变化,而且也有高度上的变化。人们在地球上看不到地球的自转,但却能看到陀螺仪主轴的这种运动,称为陀螺仪的视运动,地球自转才是真运动。人们生活中所看到旭日东升、夕阳西下,实际上是太阳视运动,就是这个道理。从图 1-15 的实例中,不难看出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、地球自转角速度的水平分量和垂直分量

在北纬,如图 1-16 所示,将地球自转角速度分解到 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:

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_e \cos \varphi \\ \omega_2 = \omega_e \sin \varphi \end{cases} \quad (1-8)$$

而在南纬应为:

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_e \cos \varphi \\ \omega_2 = -\omega_e \sin \varphi \end{cases} \quad (1-9)$$

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。

二、陀螺仪的视运动规律

上述分解得到的 ω_2 ,它的物理意义是什么呢?先看北纬。可以看出 ω_2 表明通过陀螺仪所在地 O 的子午面以 OZ_0 轴为转轴在旋转,旋转角速度就是 ω_2 ,如图 1-16 所示。子午面的旋转方向根据右手法则可以确定。以 O 点为分界点,以北为子午面北半平面, O 点以南为南半平面。

显然,子午面的北半平面不断地向西偏转。如果将陀螺仪主轴置于子午面内,因定轴性主轴不改变空间指向,但由于子午面北半平面向西偏转了,相对而言,主轴指北端自然是向东偏了,主

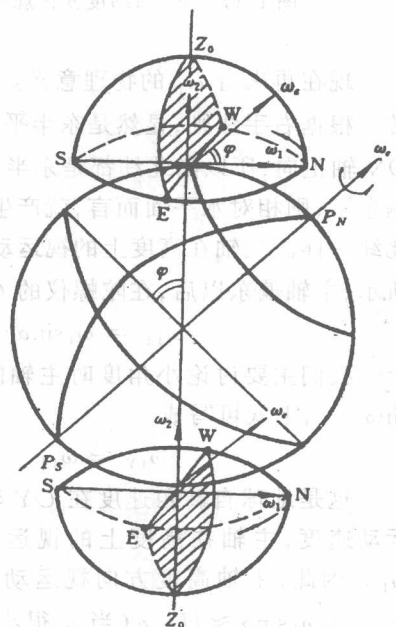


图 1-16 地理自转角速度的分解

轴指北端偏到子午面的东边去了。也就是说,在 北纬,陀螺仪的视运动是逐渐向东偏的。勿需细分析,在南纬,由于 ω_2 反向了,同样 O 点(南纬陀螺仪所在处)以北称北半平面,则北半平面是向东偏的,陀螺仪主轴的指北端就是向西偏了。南纬指北端西偏,这就是结论。不论南北纬,主轴视运动速度的大小都是 ω_2 。

三、视运动线速度

因为陀螺仪主轴的动量矩矢量 H 为已知,所以 H 末端的线速度 $V_2 = H\omega_2$ 。 V_2 称为由 ω_2 引起的视运动线速度。其规律:在 北纬,主轴向东运动;在南纬,由于 ω_2 为负值,主轴向西运动;纬度不变, V_2 的大小不变,如图 1-17 所示。

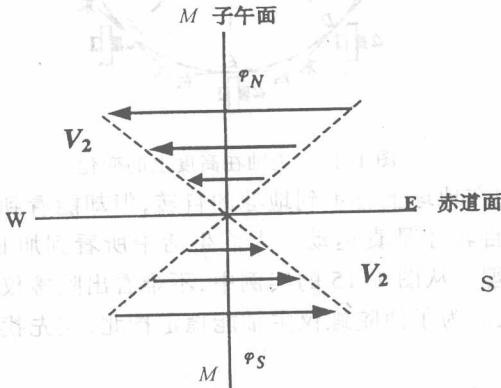


图 1-17 V_2 随纬度变化规律

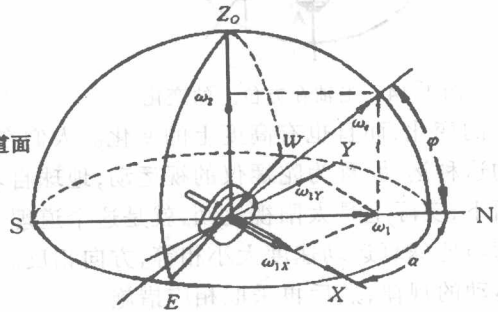


图 1-18 主轴偏东产生高度的变化

现在再来看 ω_1 的物理意义。它表明通过 ON 轴的水平面以 ON 轴为自转轴在不断地旋转。根据右手法则,显然是东半平面不断下降,西半平面不断上升。因为南北纬的 ω_1 都是指 ON 轴正向,所以南北纬都是东半平面下降西半平面上升。当陀螺仪主轴偏离子午面以后,若偏东了,则相对水平面而言,就产生上升的视运动,而偏西了,则为下降的视运动,东升西降,南北纬一样。主轴在高度上的视运动速度不但和 ω_1 有关,而且也方位角 α 有关。如图 1-18 所示,主轴偏东以后,在陀螺仪的 OY 轴上有

$$\omega_{1Y} = \omega_1 \sin \alpha \quad (1-10)$$

我们主要讨论小角度时主轴的变化情况,则有 $\sin \alpha \approx \alpha$, 上式可写成

$$\omega_{1Y} \approx \omega_1 \alpha \quad (1-11)$$

这是地球自转角速度在 OY 轴上的分量,是真运动速度,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可用 $V_1 = H\omega_1 \sin \alpha \approx H\omega_1 \alpha$ (当 α 很小时, $\sin \alpha \approx \alpha$,) 来表示。当陀螺仪主轴偏东 α 角时,主轴北端 V_1 上升;当主轴偏在子午面西 α 角时,主轴北端 V_1 下降,因此自由陀螺仪主轴由于 ω_1 引起的视运动记作“东升西降”。由此可见, V_1 是 α 角的函

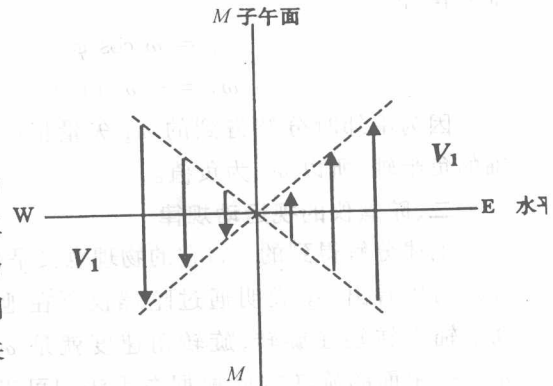


图 1-19 V_1 随 α 变化规律