

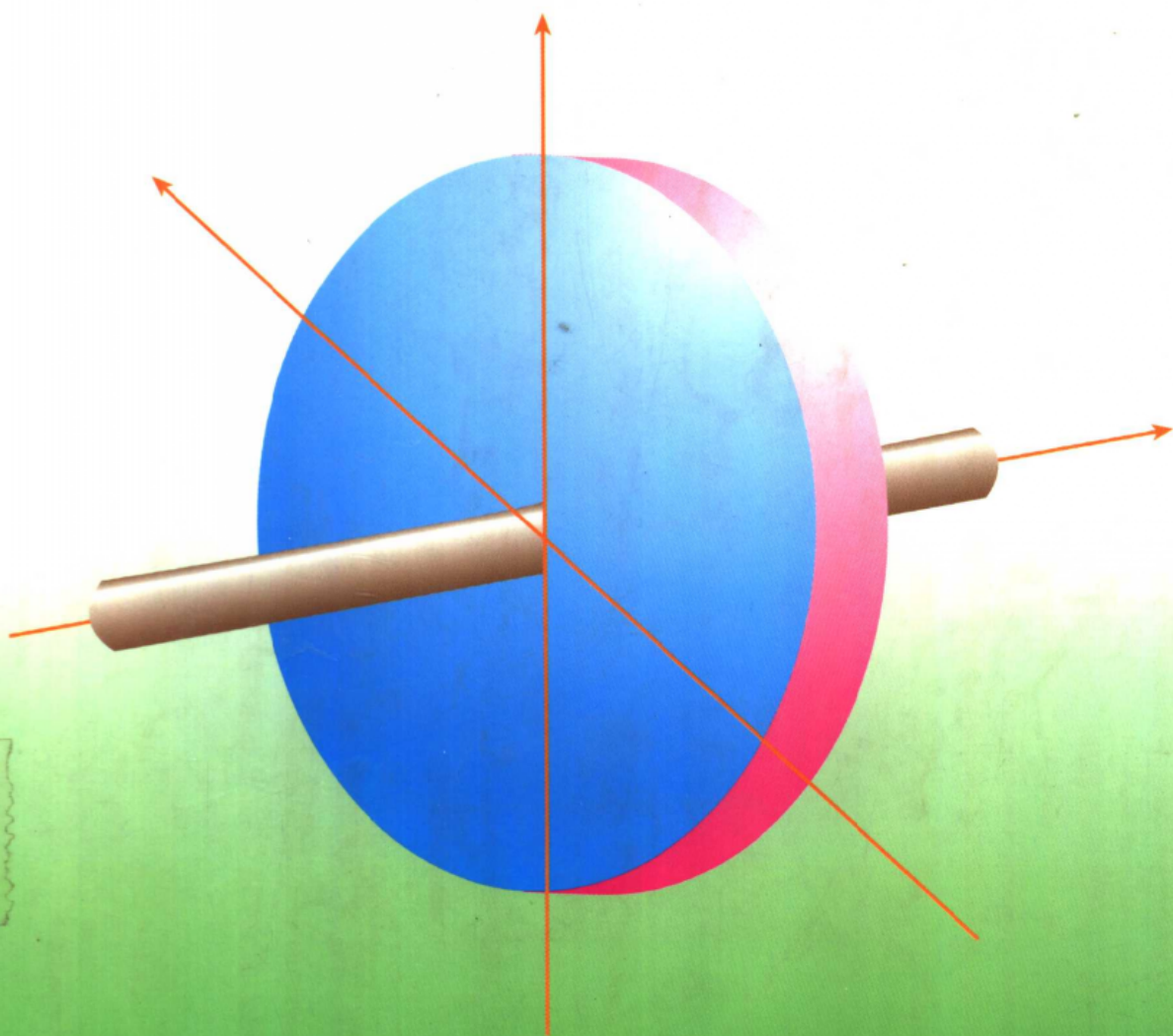


高等学校统编教材

符合 STCW 公约要求  
航海类专业教学指导委员会推荐  
交通部科技教育司审定  
中华人民共和国海事局认可

# 航海仪器

杨在金 主编  
袁安存 主审



大连海事大学出版社

# 海洋船舶驾驶专业统编教材

- 船舶结构与设备
- 船舶避碰与值班
- 航海气象与海洋学
- GMDSS 通信业务 (GMDSS Communications Services)
- GMDSS 船用通信设备 (上、下)
- 船舶信号与 VHF 通信
- 航海学
- 轮机概论
- 船舶原理
- 航运业务与海商法
- 船舶操纵
- 船舶货运
- 船舶安全与管理
- 航海仪器
- 雷达与 ARPA

ISBN 7-5632-1163-2



9 787563 211630 >

ISBN 7-5632-1163-2  
U·277 定价 38.00 元

高等学校统编教材

# 航 海 仪 器

杨在金 主编  
袁安存 主审

大连海事大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

航海仪器/杨在金主编. —大连:大连海事大学出版社,1998

ISBN 7-5632-1163-2

I. 航… I. 杨… III. 航海仪器-高等学校-教材 N. U666.15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 14492 号

### 大连海事大学出版社出版

(大连市凌水桥 邮政编码 116026 电话 0411-4727996)

大连海事大学印刷厂印刷

大连海事大学出版社发行

1998年10月第1版

1999年12月第2次印刷

开本:787×1092

1/16 印张:20.75

字数:518千字

印数:4001~7000册

责任编辑:郭有润

封面设计:王艳

责任校对:书严

版式设计:王瑞国

定价:38.00元

## 内 容 提 要

全书共分四篇十一章。第一篇航海陀螺罗经,第二篇水声导航仪器(船用回声测深仪和计程仪),第三篇船用磁罗经,第四篇无线电导航系统(无线电测向系统、双曲线导航系统和卫星导航系统)。

本书对上述系统和仪器的基本工作原理、组成及结构、电路原理、误差产生原因及消除方法、使用维护和定位方法等予以较详细的叙述。

本书为交通部高等航海院校统编教材。适合于海洋船舶驾驶专业本科和专科教学使用,也可作为海船船员适任证书考试的教科书以及供船舶驾驶人员和仪器检修人员参考。

## 前 言

本书是交通部高等学校航海类专业教学指导委员会指定的统编教材。本教材系根据海洋船舶驾驶专业本科和专科教学计划中的课程教学大纲、STCW 公约对航行管理级的要求和海船船员适任证书考试大纲的基本要求而编写的。本教材适合于海洋船舶驾驶专业本科和专科教学使用,亦可作为海船船员适任证书考试的教科书,还可供船舶驾驶人员和仪器检修人员参考。

本书由上海海运学院杨在金教授任主编,大连海事大学袁安存教授任主审。

本书分四篇,十一章。第一篇第一、二、三、五章由上海海运学院杨在金教授编写。第一篇第四章和第二篇第六、七章由集美航海学院高涛副教授编写。第三篇第八章和第四篇第十章由上海海运学院孔凡汀副教授编写。第四篇第九、十一章由大连海事大学洪德本副教授编写。编审者均依据航海类专业教学指导委员会教材编审组所审的大纲进行编写和审定。

本书编写过程中,得到天津远洋运输公司徐浩华及其他有关方面的同志的大力帮助,在此表示感谢。

因编撰需要,在本书中引用了多位本专业同行专家著作中的一些内容和插图,恕不一一列出,仅在此向诸位同仁表示衷心的感谢。

编 者

1998年4月

## 目 录

绪论	(1)
第一篇 航海陀螺罗经	(2)
第一章 陀螺罗经指北原理	(2)
第一节 陀螺仪及其特性	(2)
第二节 陀螺仪的运动方程	(5)
第三节 位于地球上的自由陀螺仪的视运动及其分析	(7)
第四节 变自由陀螺仪为陀螺罗经的方法	(12)
第五节 摆式罗经的等幅摆动	(17)
第六节 摆式罗经的减幅摆动	(23)
第七节 电磁控制式陀螺罗经原理简介	(34)
复习思考题	(35)
第二章 陀螺罗经误差及其消除	(36)
第一节 纬度误差	(36)
第二节 速度误差	(37)
第三节 冲击误差	(45)
第四节 摇摆误差	(51)
第五节 基线误差	(52)
复习思考题	(53)
第三章 安许茨系列陀螺罗经	(54)
第一节 概述	(54)
第二节 主罗经结构	(56)
第三节 电路系统	(64)
第四节 使用与保养	(74)
第五节 安许茨标准 20 型陀螺罗经	(80)
复习思考题	(101)
第四章 斯伯利系列陀螺罗经	(103)
第一节 概述	(103)
第二节 主罗经结构	(105)
第三节 电路系统	(107)
第四节 使用与保养	(111)
第五节 TG-5000 型陀螺罗经	(115)
复习思考题	(121)

<b>第五章 阿玛—勃朗系列陀螺罗经</b> .....	(122)
第一节 概述.....	(122)
第二节 主罗经结构.....	(122)
第三节 电路系统.....	(128)
第四节 使用与保养.....	(139)
第五节 SGB1000 型陀螺罗经 .....	(141)
第六节 陀螺罗经传向系统模数转换原理.....	(145)
<b>复习思考题</b> .....	(147)
<b>第二篇 水声导航仪器</b> .....	(149)
<b>第六章 船用回声测深仪</b> .....	(149)
第一节 声波在水中的传播.....	(149)
第二节 回声测深仪基本原理.....	(151)
第三节 回声测深仪各部分的功能.....	(154)
第四节 回声测深仪误差.....	(162)
第五节 扬子江型回声测深仪.....	(164)
第六节 SKIPPER ED-162 型回声测深仪 .....	(168)
<b>复习思考题</b> .....	(172)
<b>第七章 船用计程仪</b> .....	(174)
第一节 概述.....	(174)
第二节 电磁计程仪.....	(175)
第三节 多普勒计程仪.....	(179)
第四节 声相关计程仪.....	(185)
<b>复习思考题</b> .....	(189)
<b>第三篇 船用磁罗经</b> .....	(191)
<b>第八章 船用磁罗经自差校正</b> .....	(191)
第一节 磁的基础知识.....	(191)
第二节 船用磁罗经及方位仪.....	(199)
第三节 船用磁罗经自差原理.....	(205)
第四节 船用磁罗经自差测定与自差校正.....	(216)
<b>复习思考题</b> .....	(230)
<b>第四篇 无线电导航系统</b> .....	(231)
<b>第九章 无线电测向系统</b> .....	(231)
第一节 概述.....	(231)
第二节 无线电测向原理.....	(233)
第三节 无线电测向仪.....	(237)
第四节 无线电测向仪自差.....	(240)



第五节 测向定位方法.....	(243)
<b>复习思考题</b> .....	(246)
<b>第十章 双曲线导航系统</b> .....	(248)
第一节 概述.....	(248)
第二节 罗兰导航系统.....	(254)
第三节 台卡导航系统.....	(267)
<b>复习思考题</b> .....	(277)
<b>第十一章 卫星导航系统</b> .....	(278)
第一节 概述.....	(278)
第二节 GPS 卫星导航系统 .....	(284)
第三节 GPS 卫星导航定位原理 .....	(290)
第四节 GPS 卫星导航仪 .....	(295)
第五节 GPS 卫星导航仪定位误差 .....	(300)
第六节 差分 GPS 卫星导航系统 .....	(304)
第七节 GLONASS 卫星导航系统 .....	(312)
<b>复习思考题</b> .....	(318)
<b>参考文献</b> .....	(322)

## 绪 论

众所周知,早期航海主要依靠磁罗经、六分仪和天文钟三件古老的航海仪器。磁罗经为船舶提供地理方位,并可用于测量陆标和天体的方位而确定船位。运用六分仪测量天体的高度,通过天文钟确定观测时间并通过计算而得到船位。随着航海事业的迅速发展,船舶数量的增加,吨位的增大,海上交通日益拥挤和繁忙,便要求航海仪器能够快捷地提供更加准确的方位指示、更加精确的定位精度和多种用途的导航数据。由于古老的航海仪器已不能满足这些要求,于是相继出现了雷达与 ARPA,陀螺罗经,回声测深仪,计程仪,无线电测向系统,罗兰 A 和罗兰 C 导航系统,台卡导航系统,奥米伽导航系统和卫星导航系统等。这些航海仪器和导航系统为船舶提供了全天候的航海保证。可以说,航海事业的发展,刺激了航海仪器的发展。反过来,航海仪器的发展又促进了航海技术的发展和提高。

随着计算机技术的发展和在航海上的日益广泛应用,装备自动控制、自动避让、自动驾驶等系统的智能化船舶已越来越多的投入使用,未来船舶的高科技含量必将会越来越高,从这个意义上讲,船舶驾驶技术在很大程度上会偏重于对航海仪器和计算机的使用和管理。因此,作为新型船舶驾驶人员应具备与之相适应的高科技知识。通过航海仪器等相关课程的学习,必然会为此而打下坚实的理论和技術基础。

# 第一篇 航海陀螺罗经

## 第一章 陀螺罗经指北原理

### 第一节 陀螺仪及其特性

陀螺罗经(gyrocompass)是不依赖于地磁而能准确指示地理真北的仪器,其基本原理是把陀螺仪(gyroscope)的特性和地球自转运动巧妙地联系起来,使之能够自动寻找地理真北,并最后稳定地指示地理真北。

陀螺罗经的核心是一个3自由度的陀螺仪。

实验室常见的陀螺仪如图1-1所示。它是由转子,以及内环、外环和基座组成的悬挂装置构成的。转子做成厚重轮缘的对称圆盘,绕自转轴(亦称主轴)高速旋转。若转子绕主轴旋转的等角速度为 $\bar{\Omega}$ ,转子的转动惯量为 $J$ ,则转子的动量矩 $\bar{H}$ 可表示为

$$\bar{H} = J\bar{\Omega} \quad (1-1)$$

动量矩是矢量,它的方向与转子旋转等角速度 $\bar{\Omega}$ 的方向一致。即观察者沿主轴方向观察,若转子为逆时针旋转时,动量矩的正方向指向观察者。

转子的自转轴通过主轴承支承在内环上,转子相对于内环作高速旋转。内环又称水平环,通过水平枢轴支承在外环上,内环连同转子一起可以绕此水平轴在高度上作俯仰运动。外环又称垂直环,通过垂直枢轴支承在基座上,外环连同内环和转子一起可以绕此垂直轴在方位上运动。

由上述结构可知,转子能绕三个轴旋转,即具有3个自由度,故称这样的陀螺仪为具有3自由度的陀螺仪。3自由度陀螺仪的主轴可以指空间任意方位。

为研究方便起见,选择右手坐标系 $OXYZ$ 与陀螺仪内环相固连,称为陀螺坐标系。令 $OX$ 轴与转子自转轴相重合, $OY$ 轴与内环水平轴相重合, $OZ$ 轴与 $OX$ 、 $OY$ 轴组成的平面相垂直,三轴交点 $O$ 为坐标原点。由于转子能同时绕三个轴旋转,显然它是一个绕定点运动的刚体,其定点即为 $O$ 点,亦称为转子的支架点或陀螺仪的中心点。

从理论上讲,陀螺仪可以理解为任何绕定点转动的刚体,但在技术应用上仅限于高速旋转的对称陀螺仪,故在工程技术上把陀螺仪定义为:高速旋转的对称转子及保证转子自转轴(主轴)能指空间任意方向的悬挂装置。

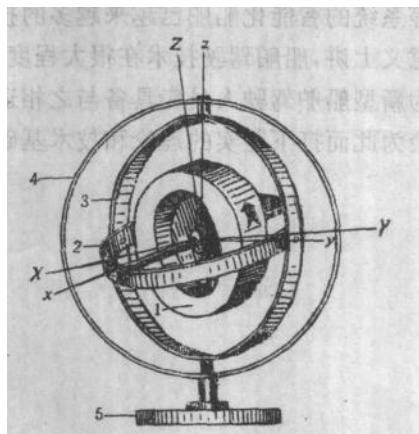


图 1-1

1-转子;2-内环;3-外环;4-固定环;5-基座

应当指出,上述陀螺仪的定义是经典的定义,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。

若3自由度陀螺仪的重心与中心点相重合,则称为平衡陀螺仪。不受任何外力矩作用的平衡陀螺仪,称为自由陀螺仪(*free gyroscope*)。

由于陀螺仪具有特殊的结构,即转子绕自转轴作高速旋转,并具有3个自由度,因此主轴在运动形式上与一般刚体相比较有其特异之处。

现从玩具陀螺的运动现象来着手研究。

首先,当玩具陀螺不转或转动缓慢时,它是无法“站立”在地面上的,如图1-2(a)所示。当玩具陀螺的自转轴与地面垂直且快速旋转时,因为其重心与支点的连线亦与地面垂直,所以它能靠一个支点直立于地面上,如图1-2(b)所示。即使给予沉重的抽打,也只会使其晃动而不致倒下,这便是陀螺稳定现象的表现。倘若玩具陀螺的转轴发生倾斜,因其重心与支点的连线不与地面垂直,重力便对支点形成力矩,陀螺在力矩的作用下在空间作圆锥运动,但并不倒下,如图1-2(c)所示。这种现象即是陀螺进动现象的表现。

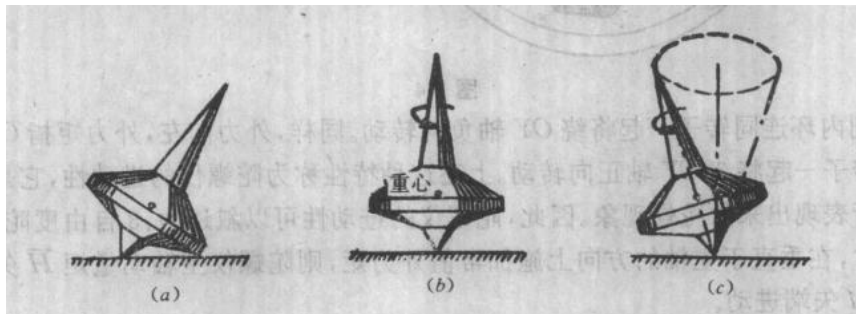


图 1-2

下面对3自由度陀螺仪的基本特性予以研究。

### 1. 定轴性(*gyroscopic inertia*)

当上述陀螺仪的转子不作高速旋转时,若转动其基座,则主轴将随基座一起转动而改变其指向,与一般刚体没有区别。

当转子绕主轴高速旋转时,若再转动其基座,则可发现主轴  $OX$  不再随基座一起转动,而是保持其原有的空间指向不变,如图1-3所示。无论将陀螺仪放在任何运动基座上观察。只要转子不受任何外力矩作用,都会出现同样的结果。这种现象称为陀螺仪的定轴性。因此,陀螺仪的定轴性可以叙述为:3自由度平衡陀螺仪,当转子高速旋转时,若不受任何外力矩作用,则其主轴将保持初始空间方位不变。

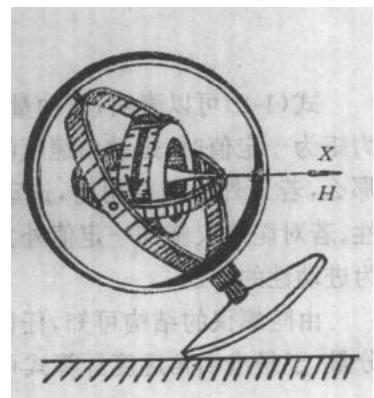


图 1-3

还需指出,即使在瞬时打击力的作用下,若不计主轴相对于初始位置的微小偏离并围绕其初始平衡位置作快速摆动运动(章动),陀螺仪主轴实际上仍保持其初始空间指向不变。

## 2. 进动性(gyrosopic precession)

若陀螺仪转子不作高速旋转,在受到外力作用时,与一般刚体是一样的。例如,在陀螺仪内环上主轴端点处作用一垂直向下的力,则内环将连同转子一起绕内环水平轴向下转动。同样,外力向上则出现向上的转动。若在内环上主轴端点处作用一水平向右的外力,则外环连同内环和转子一起绕外环垂直轴向右转动。同样,外力向左则出现向左的转动。

当转子绕主轴高速旋转时,转子动量矩  $\vec{H}$  指  $OX$  轴正向,若在内环上主轴端点处作用一垂直向下的外力  $\vec{F}$ ,外力矩  $\vec{M}$ ,指  $OY$  正向,此时陀螺仪内环不再绕  $OY$  轴向下转动,而是外环连同内环和转子一起绕  $OZ$  轴转动,转动的方向是试图使动量矩  $\vec{H}$  以最短的路径向外力矩  $\vec{M}$  靠拢,即绕  $OZ$  轴正向转动,如图 1-4 所示。同样,若外力向上,外力矩指  $OY$  轴负向,则外环连同内环和转子一起绕  $OZ$  轴负向转动。若在内环上主轴端点处作用一水平向右的外力,外力矩指

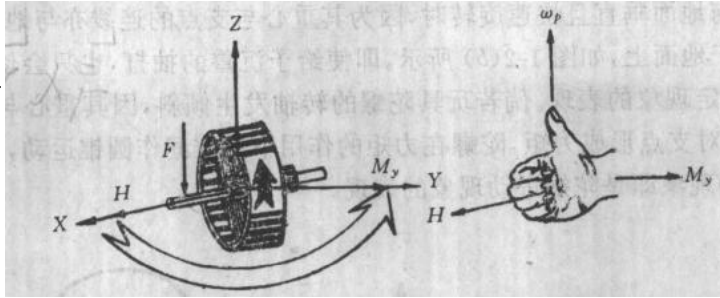


图 1-4

$OZ$  轴正向,则内环连同转子一起将绕  $OY$  轴负向转动。同样,外力向左,外力矩指  $OZ$  轴负向,则内环连同转子一起将绕  $OY$  轴正向转动。上述这种特性称为陀螺仪的进动性,它是在外力矩作用条件下所表现出来的陀螺现象。因此,陀螺仪的进动性可以叙述为:3 自由度陀螺仪,当转子高速旋转时,在垂直于主轴的方向上施加常值外力矩,则陀螺仪主轴动量矩  $\vec{H}$  矢端将以捷径向外力矩  $\vec{M}$  矢端进动。

这种绕与外力矩方向相垂直方向的转动运动称陀螺仪的进动运动或简称进动。其转动角速度称进动角速度,通常以  $\omega_p$  表示之。陀螺仪进动所绕的轴称进动轴。

由图 1-4 可知,进动角速度、动量矩和外力矩三者是相互垂直的,也就是说,进动角速度的方向取决于动量矩和外力矩的方向。进动角速度的大小,取决于动量矩和外力矩的大小,其计算式可写为:

$$\omega_p = \frac{M}{H} \quad (1-2)$$

式(1-2)可以表明,当动量矩为一定值时,进动角速度的大小与外力矩的大小成正比。当外力矩为一定值时,进动角速度的大小与动量矩的大小成反比。通常陀螺仪的动量矩为一定值。那么,若无外力矩作用时,进动角速度为零,主轴不改变空间指向,陀螺仪表现为定轴性的特性。若对陀螺仪施加一定值外力矩,则进动角速度亦为一定值,主轴改变空间指向,陀螺仪表现为进动性的特性。

由陀螺仪的结构可知,任何作用于陀螺仪上的外力矩,都可以分解为  $OY$  轴和  $OZ$  轴上的分量,于是进动角速度计算式可写为下列一组公式

$$\left. \begin{aligned} \omega_{pz} &= \frac{M_y}{H} \\ -\omega_{py} &= \frac{M_z}{H} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式(1-3)称为陀螺仪的进动公式。式中动量矩  $H$  的正方向指  $OX$  轴正向。若动量矩  $H$  指  $OX$  轴负向,则公式中的  $H$  前应加“-”号。式中  $M_y$  和  $M_z$  分别指  $OY$  轴和  $OZ$  轴正向。公式组第二式中所以出现“-”号,是由于作用在  $OZ$  轴正向的外力矩将使陀螺仪产生  $OY$  轴负向的进动角速度所致。

## 第二节 陀螺仪的运动方程

上一节已对陀螺仪的基本特性予以定性的分析,欲对上述特性作定量分析,则必须通过数学方法,才能找出陀螺仪主轴的运动规律。为此,首先要建立陀螺仪主轴的运动方程式。

### 1. 参考坐标系

一个物体经过正确的抽象,可以用一个直角坐标系来代表,其运动状态也完全可以用坐标系的运动来表示,这样可使分析问题更为简单。讨论陀螺仪的运动,就是要确定陀螺仪主轴的运动状态及其在空间的位置,为此必须建立参考坐标系。常用参考坐标系有:惯性坐标系、地理坐标系和陀螺坐标系。

#### (1) 惯性坐标系 $O\xi\eta\zeta$

惯性坐标系是相对惯性空间固定不动的坐标系,它代表惯性空间。坐标原点  $O$  取在地球表面某一点,如图 1-5 所示。三个坐标轴  $O\xi$ 、 $O\eta$ 、 $O\zeta$  分别指向三颗恒星,构成右手直角坐标系。

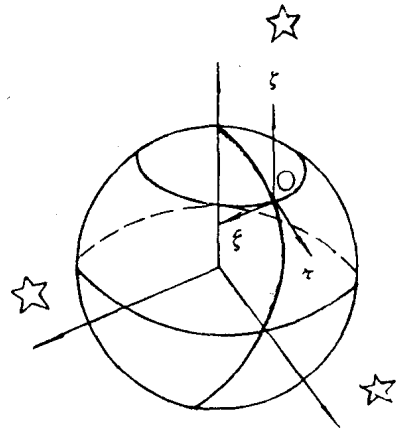


图 1-5

应该指出,惯性坐标系的坐标原点虽然取在地球上,但不管地球如何转动(自转和公转),三个坐标轴的空间指向永远不改变,即使坐标原点在地球表面上移动,也是如此。为使问题简单化,惯性坐标系往往可以不画出来。

#### (2) 地理坐标系 $ONWZ$ 。

地理坐标系是与地球相固连的右手直角坐标系,它代表地球。坐标原点取在陀螺几何中心点  $O$  上,如图 1-6 所示。坐标轴  $ON$  与  $O$  点处子午线的切线相重合,并指向地球的北极; $OW$  轴与  $O$  点处纬度线的切线相重合,指向地球的西方; $OZ$  轴通过地心指向天顶,即与地垂线相重合。

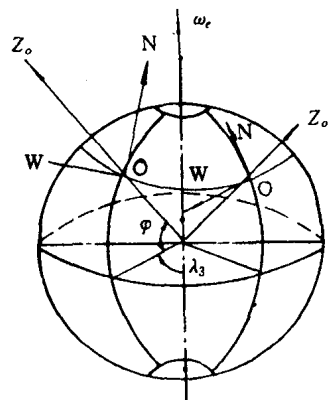


图 1-6

尚需指出,地理坐标系既然代表地球,它自然要跟随地球一起转动,即三个坐标轴的空间指向随时都在改变。同时,船舶在地球表面上运动,坐标原点亦跟随船舶一起运动。由于地球位置改变了,在不同地理位置上的地理坐标系的三个坐标轴的空间指向是不同的。由此可

见,地理坐标系实际上是与船舶相固连的地理坐标系,它代表地球转动和船舶运动两者的牵连运动。

(3)陀螺坐标系  $OXYZ$

如前所述,陀螺坐标系是与陀螺仪内环相固连的右手直角坐标系,它代表陀螺仪,如图 1-7 所示。

研究陀螺仪的运动,就是研究陀螺仪主轴  $OX$  的运动规律。研究的方法,可以直接研究陀螺坐标系  $OXYZ$  相对于惯性坐标系  $O\xi\eta\zeta$  的绝对运动,也可以由研究  $OXYZ$  相对于地理坐标系  $ONWZ$  的相对运动,加上  $ONWZ$  相对于  $O\xi\eta\zeta$  的牵连运动之和。航海陀螺罗经通常采用后一种研究方法。

陀螺仪主轴  $OX$  相对于  $ONWZ$  的位置,可以由方位角  $\alpha$  和高度角  $\theta$  来确定,如图 1-8 所示。假定起始时刻  $OXYZ$  与  $ONWZ$  完全重合。其后陀螺仪绕  $OZ$  轴(此时  $OZ$  轴与  $OZ_0$  轴重合在一起)以  $\dot{\alpha}$  的角速度转动,在研究时刻主轴  $OX$  转至  $OX'$  与  $ON$  之间的夹角即为方位角 (azimuth angle),也就是主轴  $OX$  与子午面的水平夹角,用  $\alpha$  表示。因为采用右手坐标系,所以主轴  $OX$  偏于子午面之西时, $\alpha$  角为正;主轴偏东时, $\alpha$  角为负。与此同时,陀螺仪又绕  $OY$  轴(此时  $OY$  轴与  $OW$  轴之间的夹角亦为  $\alpha$ ) 以  $\theta$  的角速度转动,在研究时刻主轴位于  $OX$  的位置, $OX$  与  $OX'$  之间的夹角即为高度角 (tilt angle),也就是主轴  $OX$  与水平面的垂直夹角,用  $\theta$  表示。同理,主轴  $OX$  位于水平面之下时, $\theta$  角为正;主轴偏上时, $\theta$  角为负。

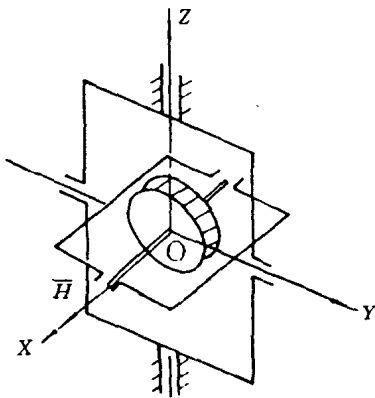


图 1-7

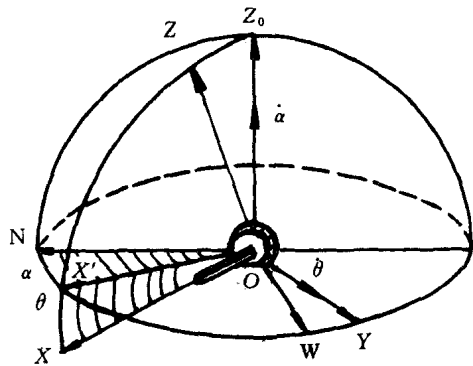


图 1-8

2. 陀螺仪的运动方程式

讨论陀螺仪的运动,实际上就是讨论陀螺仪在外力矩作用下的进动运动,这是相对惯性空间的绝对运动。假定陀螺仪的绝对运动角速度在  $OY$  轴和  $OZ$  轴上的投影分别为  $\omega_{py}$  和  $\omega_{pz}$ ,则可以从进动公式得到陀螺仪的运动方程式为:

$$\left. \begin{aligned} H\omega_{pz} &= M_y \\ -H\omega_{py} &= M_z \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中:  $\omega_{py}$  和  $\omega_{pz}$  应包含有陀螺仪相对于地理坐标系的相对运动角速度,和地理坐标系随地球自转和船舶运动的牵连运动角速度,即:

$$\begin{aligned} \omega_{py} &= \omega_{py\text{相对}} + \omega_{py\text{牵连}} \\ \omega_{pz} &= \omega_{pz\text{相对}} + \omega_{pz\text{牵连}} \end{aligned}$$

于是运动方程式可以改写为

$$\begin{aligned} H(\omega_{pz\text{相对}} + \omega_{pz\text{牵连}}) &= M_y \\ -H(\omega_{py\text{相对}} + \omega_{py\text{牵连}}) &= M_z \end{aligned} \quad (1-5)$$

由图 1-8 可知:

$$\begin{aligned} \omega_{py\text{相对}} &= \dot{\theta} \\ \omega_{pz\text{相对}} &= \dot{\alpha} \cos\theta \end{aligned}$$

若  $\alpha$  和  $\theta$  均为小角时,可认为  $\cos\theta = 1$ ,那么运动方程式又可以改写为:

$$\begin{aligned} H(\dot{\alpha} + \omega_{pz\text{牵连}}) &= M_y \\ -H(\dot{\theta} + \omega_{py\text{牵连}}) &= M_z \end{aligned} \quad (1-6)$$

式(1-6)即为陀螺仪运动方程式的普遍式。

若  $\omega_{py\text{牵连}}$ 、 $\omega_{pz\text{牵连}}$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  均为已知值,代入上式后并对上式求解,即可得出方位角  $\alpha$  和高度角  $\theta$  的变化规律,也就是陀螺仪在外力矩的作用下主轴相对于地理坐标系的运动规律。对于指示地理真北的航海陀螺罗经来说,必须研究这个运动规律。

### 第三节 位于地球上的自由陀螺仪的视运动及其分析

#### 一、问题的提出

自由陀螺仪主轴的定轴性,是对惯性空间而言的。在地球上观察自由陀螺仪的主轴,它并不能指地球上某一固定方向不变,而是在不断改变其方向。这与在地球上看到天空中的恒星和太阳在运动一样,都是因为地球自身在空间转动的结果。实际上,恒星、太阳和自由陀螺仪的主轴在空间的方向是不变的,而在地球上所看到的它们的运动,叫做视运动。只有了解和掌握自由陀螺仪的视运动规律,才能设法使陀螺仪主轴相对地球真北指示稳定。为此,有必要对位于地球上的自由陀螺仪的视运动进行讨论和分析。

#### 二、地球的转动规律

众所周知,地球是太阳的行星,它围绕太阳作公转和自转。

##### 1. 公转

地球是在椭圆轨道上绕太阳公转的,地心轨迹确定的平面称黄道平面。公转时,地球的赤道平面与黄道平面的夹角保持  $23^\circ 27'$  不变,即地轴  $P_N P_S$  不改变它的空间方向,如图 1-9 所示。

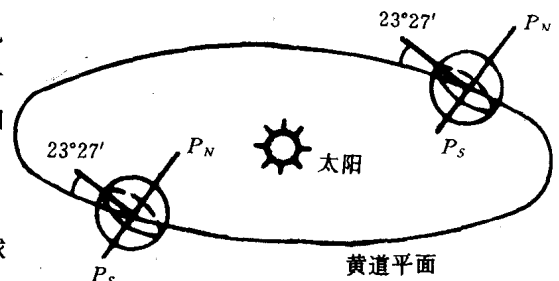


图 1-9

##### 2. 自转

地球自西向东不断地作自转运动,作为地球上的两个参考平面——水平面和子午面是如何在空间运动的呢?

##### (1) 水平面

由图 1-10 可以清楚地看出,由于地球的自转,地理水平面不断地改变其空间方向,即出现东端下降西端抬高的运动。不管是在赤道上或者在北纬某处及南纬某处,运动方向都是一样的,而运动速度随纬度的变化而变化。



## (2)子午面

为研究方便,取子午线的切线 NS 代表子午面。

在赤道上,NS 线与地轴  $P_N P_S$  平行,所以地球绕  $P_N P_S$  为轴自转时,NS 线的空间方向不发生变化,如图 1-11 所示。

在北纬某处,NS 线不与  $P_N P_S$  平行,而是存在某个夹角,该夹角随纬度的变化而变化。显然,地球绕  $P_N P_S$  为轴自转时,NS 线在空间将画出一个圆锥,作为母线的 NS 线将随时改变其空间方向,即北端由东向西偏转,参见图 1-11。

在南纬,情况与北纬相反,NS 线的北端将由西向东偏转,参见图 1-11。

## 三、自由陀螺仪主轴视运动现象

### 1. 置于赤道上

将陀螺仪置于赤道上,起始时刻位于 A 点,主轴动量矩  $H$  水平指正东,如图 1-12 所示。过一段时间后,地球自转将陀螺仪带至 B 点上。与 A 点比较,B 点上的水平面东端下降,西端抬高,而陀螺仪由 A 点移至 B 点其动量矩仍不改变空间方向,位于地球上的观察者看不到水平面东降西升的空间方向变化,却看到陀螺仪主轴相对于东端水平面抬高了一个角度  $\theta$ 。经过 6h,地球自转将陀螺仪带至 C 点,此时陀螺仪主轴已垂直于水平面并指天顶。经过 12h,陀螺仪位于 E 点上,主轴水平指正西。经过 18h,陀螺仪到达 G 点,主轴垂直指地心。经过 24h,陀螺仪又回到 A 点上,主轴也恢复水平指正东。

### 2. 置于北极上

将陀螺仪置于北极上,起始时刻主轴水平指某一方向,如图 1-13 所示。地球自转带动观察者一起转动,而陀螺仪主轴始终保持其空间指向不变,于是观察者看到陀螺仪主轴绕其垂直轴向与地球自转相反的方向转动,24h 转动  $360^\circ$ 。

### 3. 置于北纬某处

将陀螺仪置于北纬某处,起始时刻位于位置 1,主轴水平指北,如图 1-14 所示。

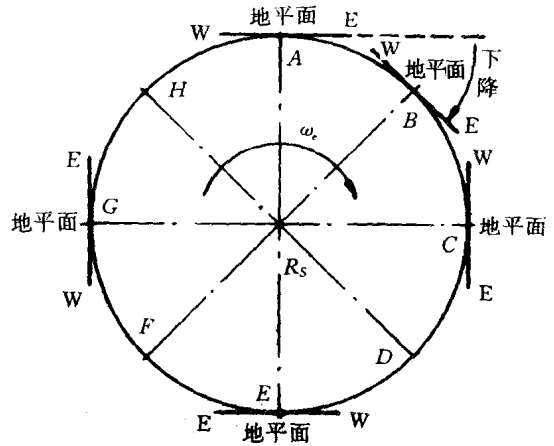


图 1-10

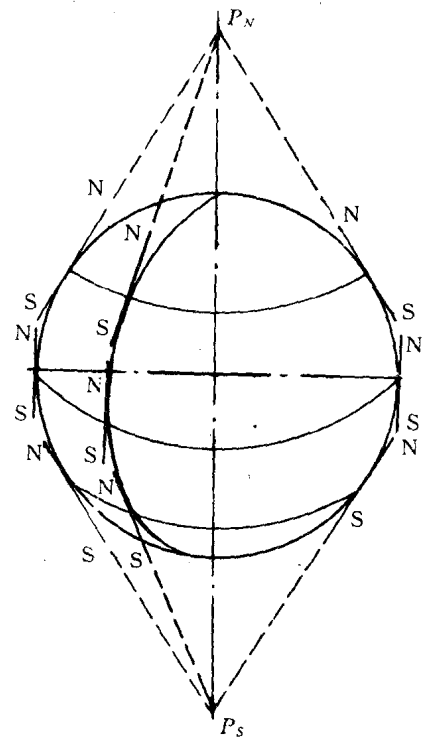


图 1-11