

# 电航 仪器

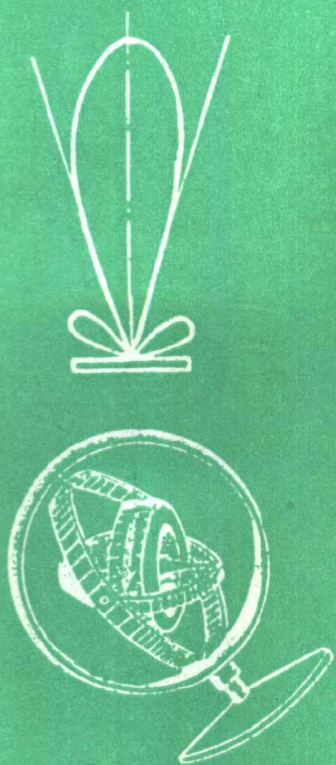
第二版

高等专业学校教材

(海船驾驶专业用)

江德藩 主编

鲍启勋 主审



人民交通出版社

高等专科学校教材

# 电 航 仪 器

Dianhang Yiqi

(海船驾驶专业用)

第 二 版

江德藩 主编  
鲍启勋 主审

人民交通出版社

(京) 登字091号

## 内 容 提 要

本书共十二章，内容系叙述航海陀螺罗经、船用回声测深仪及计程仪等仪器的基本原理、结构、电路、误差及其消除和使用保养。书中对所编写的典型产品作了较详细的论述。

本书为交通部高等航海院校的统一教材，亦可供船舶驾驶人员及电航仪器检修人员自学参考。

高等专科学校教材

电 航 仪 器

(海船驾驶专业用)

第 二 版

人民交通出版社出版

(100013北京和平里东街10号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

三河科教印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16印张:20.25 插页:2 字数:496千

1980年7月 第1版

1992年12月 第2版 第5次印刷

印数:23951—25950 定价:5.60元

ISBN7-114-00440-0

U · 00359

# 前 言

本书是在大连海运学院、上海海运学院航海仪器教研室编写的《电航仪器》试用教材（1980版）的基础上，根据1983年1月于集美航海专科学校召开的“部属海运院校航海仪器课程讨论会”精神制订的电航仪器教学大纲，并根据航海类教材编写要求而编写的。

编写本教材的要求是：

- 1.掌握航海陀螺罗经与航海水声仪器所包括的各仪器的基本原理、结构、电路、误差及其消除，并能正确使用与保养。
- 2.满足船员考证、IMO及国标提出的要求。
- 3.了解电航仪器发展动向。

本书由上海海运学院江德藩任主编，大连海运学院鲍启勋任主审。

本书第一篇第一、二、三、四章由江德藩编写；第一篇第五、六章由刘文勇编写；第一篇第七、八章由邢同琨编写；第二篇第九、十章由蔡美昂编写；第二篇第十一、十二章由杨在金编写。任茂东参加编写了第二篇第十一章第二节中斯伯利SRD331型多普勒计程仪的调整内容与TD-501型多普勒计程仪部分。

本书初稿完成后，由全体成员集体讨论和修改，最后由鲍启勋、江德藩、刘文勇三同志参加的定稿会编审定稿。

上海交通大学陆恺教授、上海船研所施超、谢伟铠研究员、集美航专吴景荣教授等对本书的编写提出了宝贵的指导意见，在此向他们表示感谢。

本书为交通部高等院校海船驾驶专业的统编教材，亦可供海船船舶驾驶人员及电航仪器检修人员参考。

本书编写时间仓促，书中难免有错误之处，恳切希望使用本书的教师与读者提出批评指正。

编 者

# 目 录

绪 言	( 1 )
-----	-------

## 第一篇 航海陀螺罗经

<b>第一章 陀螺仪实用理论</b>	( 3 )
第一节 陀螺仪及其基本特性	( 3 )
第二节 陀螺仪的运动方程	( 7 )
第三节 地球自转角速度及其分量	( 9 )
第四节 自由陀螺仪相对于子午面和水平面的视运动	( 10 )
第五节 变自由陀螺仪为陀螺罗经的方法	( 11 )
<b>第二章 机械摆式陀螺罗经原理</b>	( 17 )
第一节 机械摆式陀螺罗经简介	( 17 )
第二节 静止基座上摆式陀螺罗经的等幅摆动	( 18 )
第三节 双转子摆式罗经的减幅摆动	( 25 )
第四节 液体连通器罗经的减幅摆动	( 31 )
<b>第三章 电磁控制式陀螺罗经原理</b>	( 40 )
第一节 电磁控制式陀螺罗经简介	( 40 )
第二节 A-B 型罗经的运动方程	( 44 )
第三节 DH 型罗经的运动方程	( 51 )
第四节 电控罗经两参数方程	( 54 )
<b>第四章 陀螺罗经误差及其消除</b>	( 59 )
第一节 纬度误差	( 59 )
第二节 速度误差	( 61 )
第三节 冲击误差	( 73 )
第四节 摇摆误差	( 79 )
第五节 基线误差	( 81 )
<b>第五章 安许茨 (ANSCHÜTZ) 4型陀螺罗经</b>	( 82 )
第一节 概 述	( 82 )
第二节 主罗经结构	( 86 )
第三节 电源系统	( 94 )
第四节 随动系统及传向系统	( 97 )
第五节 温控系统及警报系统	( 105 )
第六节 电路原理图	( 107 )
第七节 使用	( 108 )
第八节 保养	( 109 )
第九节 故障排除	( 117 )

<b>第六章 斯伯利 (SPERRY) MK-37 型陀螺罗经</b> .....	(123)
第一节 概    述.....	(123)
第二节 主罗经结构.....	(126)
第三节 电    路.....	(129)
第四节 使用及保养.....	(145)
第五节 故障排除.....	(149)
<b>第七章 阿玛-勃朗 (ARMA-BROWN) 型陀螺罗经</b> .....	(158)
第一节 概    述.....	(158)
第二节 主罗经结构.....	(159)
第三节 电源系统.....	(162)
第四节 随动系统.....	(163)
第五节 传向系统.....	(171)
第六节 附属电路.....	(173)
第七节 使用与保养.....	(176)
<b>第八章 国产电控陀螺罗经</b> .....	(184)
第一节 CLP-2型陀螺罗经.....	(184)
第二节 DH-2 型陀螺罗经.....	(192)

## 第二篇 航海水声仪器

<b>第九章 水声学基础</b> .....	(203)
第一节 概    述.....	(203)
第二节 声波在海水中的传播速度.....	(205)
第三节 水中声的传播.....	(207)
第四节 海洋中的混响和噪声.....	(211)
<b>第十章 船用回声测深仪的基本原理</b> .....	(214)
第一节 回声测深原理.....	(214)
第二节 发射系统.....	(218)
第三节 换能器.....	(221)
第四节 接收系统.....	(229)
第五节 显示系统.....	(231)
第六节 扬子江型回声测深仪.....	(238)
第七节 SKIPPER ED162 型回声测深仪.....	(252)
<b>第十一章 水声计程仪</b> .....	(258)
第一节 概    述.....	(258)
第二节 多普勒计程仪.....	(260)
第三节 声相关计程仪原理.....	(295)
<b>第十二章 电磁计程仪</b> .....	(298)
第一节 概    述.....	(298)
第二节 CDJ-5 型电磁计程仪.....	(298)

# 绪 言

为了确保海洋船舶的航行安全与运输任务的完成，在现代船舶上都装置了电航仪器；它由陀螺罗经和航海水声仪器（包括回声测深仪和计程仪）等部分组成。

《电航仪器》课程是叙述这门课程所包括的各种仪器的基本理论基础、结构和电路原理以及它们的使用与维修保养要求等。它是一门重要的海洋船舶驾驶专业课程。本书是根据1983年交通部高等航海院校航海仪器课程协作组会议制订新的《电航仪器》大纲，并在1985年部教材编审会议后修订的教材编写提纲的基础上对电航仪器的基本理论基础、结构和电路原理以及它们的使用与维修保养要求作了一定深度的介绍。

陀螺罗经又称电罗经。它是一种提供方向基准的电航仪器，在海洋运输船舶上应用最广。因此，本书对陀螺罗经作了相当篇幅的叙述。陀螺罗经是利用绕定点高速旋转对称刚体的特殊惯性所制成的。由于它不依赖地磁场进行定向，因而不受磁干扰的影响，能在钢质船舶上高度精确地工作。与磁罗经相比较这是其明显优点。对航行在浩瀚无际的海洋上的船舶来讲，指示精确的航向更具有重要的意义。

自从法国学者福科（Leon Foucault）于1852年提出利用陀螺仪作为指向仪器的设想之后，本世纪初可供船用的安许茨型单转子陀螺罗经（1908）、斯伯利型单转子陀螺罗经（1911）和勃朗型单转子陀螺罗经（1916）相继问世。迄今船用陀螺罗经已有80年的历史了，全世界陀螺罗经的型号约达80种以上。80年代，我国民用船舶上装置的国产和外产的陀螺罗经，约有20多种型号。

按陀螺罗经灵敏部分具有转子的个数划分，分为单转子类型和双转子类型两大类；按其结构特征和工作原理划分，分为安许茨系列、斯伯利系列和勃朗系列三大系列；按给陀螺施加力矩的方式划分，分为机械摆式和电磁控制式两大类。

船用陀螺罗经随着科学技术的进步，无论在结构上还是在理论上都有很大的发展。当前主要发展趋向：在保证航行精度的条件下，采用新技术，实现小型化，提高可靠性和使用寿命，简化维修保养工作和降低产品成本。

磁罗经也为一种船舶必备的指向仪器，结构简单，使用可靠。船舶驾驶人员务必克服忽视发挥磁罗经作用的片面倾向，应使两者各尽所长，共同为船舶安全航行服务。

回声测深仪是应用超声波在海水中传播的特性来测量船所在地的水深，发现水中障碍物，以保证船舶安全航行的最常用最重要的电航仪器。对于船舶在浅水道和狭水道航行以及船舶进出港湾尤为重要。

回声测深仪具有测量速度快、深度显示准确且可连续测深的特点；其深度显示方式有闪光式、记录式、数字直读式和数字打印式等并具有深度报警装置。回声测深仪种类与型号繁多；本书着重介绍声波在水中传播的基本特性、测深基本原理及组成测深仪各系统的主要要求；在此基础上阐述具有典型的国内外常见的产品，使海洋船舶驾驶专业学生与船舶驾驶员能对仪器的总体知识与使用维护保养有一定的基本概念和技术能力，以求达到触类旁通。

计程仪是测量船舶速度并利用积分装置累计船舶航程的一种电航仪器。有了准确的航向

和航程，就可以利用推算法求取船舶的地理位置。

计程仪从拖曳式、转轮式、水压式、电磁式等相对计程仪发展到多普勒式、声相关式等绝对计程仪，已经有 100 多年的历史了；它们的基本工作原理都不相同，彼此继承性甚少。所以，本书除对目前船舶上普遍装置的电磁计程仪作比较详细的介绍外；又着重编入多普勒计程仪与声相关计程仪的内容。由于型号繁多，在编写上同样着重于基本原理和总体概念，以及典型产品的电路原理与使用维修保养，以适应仪器更新的发展要求。

根据国际海事组织（IMO）规定，航行在国际海域的船舶，都必须装备满足仪器性能要求的电航仪器，推荐的性能指标：

### 一、陀螺罗经

1. 罗经稳定时间不大于 6h；
2. 稳定点误差应在  $\pm 0.75\text{sec}\varphi$  以内；
3. 航向偏差的均方根值应在  $0.25\text{sec}\varphi$  以内；
4. 可重复性精度应在  $0.25\text{sec}\varphi$  以内；
5. 横摇  $20^\circ$ ，纵摇  $10^\circ$ ，偏航  $5^\circ$  引起的摇摆差应在  $\pm 1^\circ\text{sec}\varphi$  以内；
6. 各种环境条件下（包括电源、温度、湿度、磁场与振动等）试验误差应在  $\pm 1^\circ\text{sec}\varphi$  以内；
7. 迅速改变航速 20kn 引起的误差应在  $\pm 2^\circ$  以内；
8. 20kn 航速，快速改变航向  $180^\circ$  引起的误差应在  $\pm 3^\circ$  以内；
9. 航速 20kn，校正航速、航向、纬度影响后的剩余误差应在  $\pm 0.25\text{sec}\varphi$  以内；
10. 主、分罗经之间的最大读数误差应在  $\pm 0.5$  以内。其中  $\varphi$  为罗经所在地的纬度。

### 二、回声测深仪

1. 测量范围——应能测换能器以下 2~400m 之间的任意深度；
2. 显示方式——主要为图表显示即记录式或数字打印式；
3. 测量精度——浅水挡，误差  $\pm 1\text{m}$ ；深水挡，误差  $\pm 5\text{m}$  或  $\pm 5\%$ ；
4. 在船舶横摇  $10^\circ$ ，纵摇  $5^\circ$  的情况下，仪器应能正常工作。

### 三、计程仪

1. 显示——数字显示式应能显示 0.1kn；模拟显示式应能显示 0.5kn；距离显示应能显示 0.1n mile。
2. 测量精度——指示的速度误差应不大于航速的 5% 或 0.5kn；
3. 在船舶横摇  $10^\circ$ ，纵摇  $5^\circ$  的情况下，仪器应能正常工作。

根据 IMO 推荐的性能指标，我国电航仪器性能标准已经制定，随着我国电航仪器现代化、系列化、标准化等工作的发展，海船上必将装备性能优良的国产电航仪器，以适应我国海运事业的不断发展。



# 第一篇 航海陀螺罗经

## 第一章 陀螺仪实用理论

### 第一节 陀螺仪及其基本特性

在工程技术上获得广泛应用的机械陀螺仪是一个被悬挂着的绕其对称轴作高速旋转的对称转子，借助于悬挂装置，转子的自转轴能改变其在空间所指的方向。因此，在工程技术上陀螺仪一词又可理解为高速旋转的对称转子及其悬挂装置的总称。所谓转子绕自转轴高速旋转，亦即在一般情况下转子的自转角速度应远大于转子绕不与自转轴相平行的其他轴的旋转角速度。转子的自转轴能改变其在空间所指的方向，它的自由度应不少于二。转子通常做成形似具有厚重轮缘的金属盘，因此转子的旋转轴为通过金属盘的对称中心并与盘面相垂直的中心主惯量轴。今后将称它为陀螺仪的主轴或极轴。与主轴相垂直并在转子平面内的主惯量轴称为赤道轴。转子平面称为赤道平面。转子一般采用高比重金属材料造成，由陀螺电动机驱动使转子绕自转轴高速旋转。

实验室内常见的陀螺仪如图 1-1 所示。1 为高速旋转的转子，即对称转子。内环、外环、固定环与基座组成了转子的悬挂装置，或称万向支架。转子在悬挂下能绕主轴  $ox$  作高速旋转，转子连同内环可绕水平轴  $oy$  旋转，转子连同内外环一起又可绕垂直轴  $oz$  旋转。由于转子能绕三轴旋转，显然它将为绕定点运动的刚体。定点  $o$  为三轴的交点，该点称转子的支架点或陀螺仪的中心点。显然主轴  $ox$  可以指空间的任何方向，这样的陀螺仪称为具有 3 个自由度的陀螺仪。若把 3 自由度陀螺仪的内外两环中的任何一环固定，则陀螺仪将具有 2 个自由度。如将内外两环同时固定，则转子将为一绕定轴旋转的刚体。但在称呼这类陀螺仪时，不计及转子绕主轴的自转，只考虑自转轴所具有的转动自由度，可将上述的 3 自由度陀螺仪和 2 自由度陀螺仪分别称为两自由度陀螺仪和单自由度陀螺仪。

若 3 自由度陀螺仪的重心与其支架点相重合时，则这种陀螺仪称为平衡陀螺仪。不受任何外力矩作用的 3 自由度平衡陀螺仪称为自由陀螺仪。

近代船用陀螺罗经中有以下几种悬挂装置形式。

1. 液体支承形式，如图 1-2 与 1-3 所示。这种陀螺仪是把两个 2 自由度陀螺仪装在一个圆球内，通称陀螺球；整个陀螺球被浸没在导电的支承液体中，球的重量基本上由液体支承，再用电磁力聚中（图 1-2）或中心定位针定中（图 1-3）。这种支承形式广泛应用于安许茨系

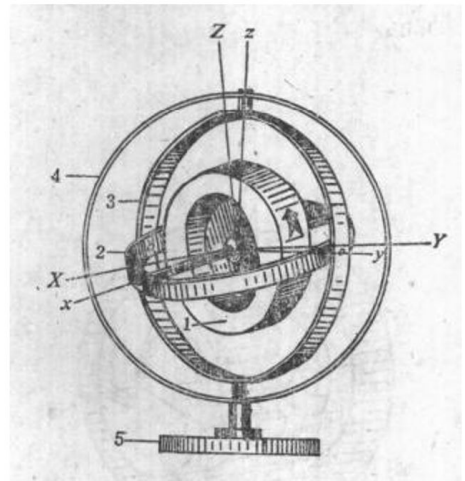


图 1-1  
1-转子；2-内环；3-外环；4-固定环；5-基座

列罗经中。因为不用内外框架悬挂装置，避免了机械摩擦，故提高了罗经的工作精度。

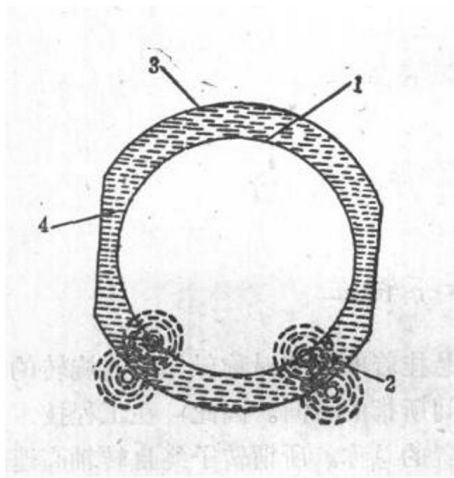


图 1-2

1-陀螺球；2-电磁上托线圈；3-随动球；4-支承液体

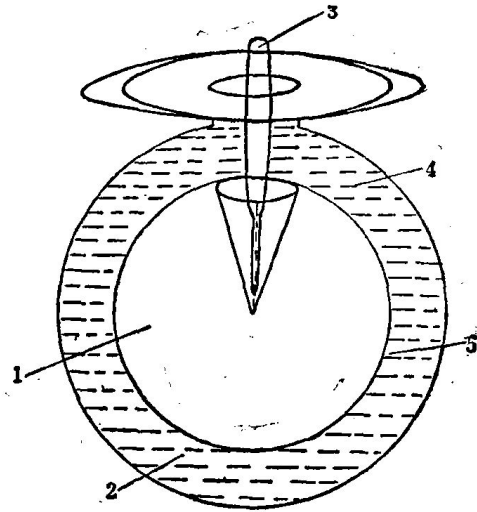


图 1-3

1-陀螺球；2-水银垫；3-中心定位针；4-支承液体；5-随动球

阿玛勃朗型陀螺罗经的陀螺仪的支承形式系采用液体支承和扭丝定位的结构，如图 1-4 所示。这种陀螺仪不但避免了框架轴承的摩擦，而且结构紧凑，从而使体积小化，精度也得到提高。

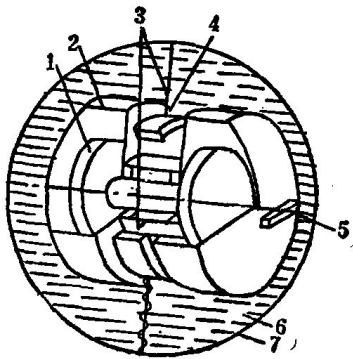


图 1-4

1-转子；2-陀螺球；3-扭丝；4-浮动环；5-角度传感器；6-支承液体；7-贮液缸

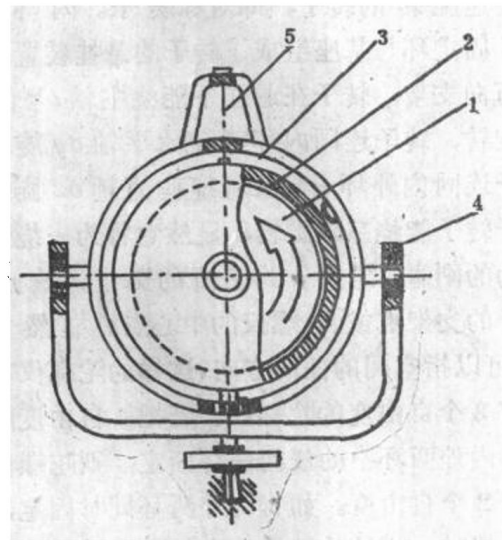


图 1-5

1-转子；2-内环（陀螺房）；3-外环；4-随动环；5-悬挂钢丝

2. 钢丝悬挂支承形式，如图 1-5 所示。这种陀螺转子支承形式以斯伯利系列船用陀螺罗经为多。由于这种陀螺仪的转子和内环即陀螺房早期的结构还包括外环的全部重量都由钢丝承受，陀螺仪垂直轴的轴承只起定位作用，不承受重量；因而轴承中的摩擦大大地减小，使该陀螺仪的灵敏度提高。

3. 挠性支承形式，如图 1-6 所示。这种陀螺仪转子借助挠性接头与驱动轴相连。挠性接

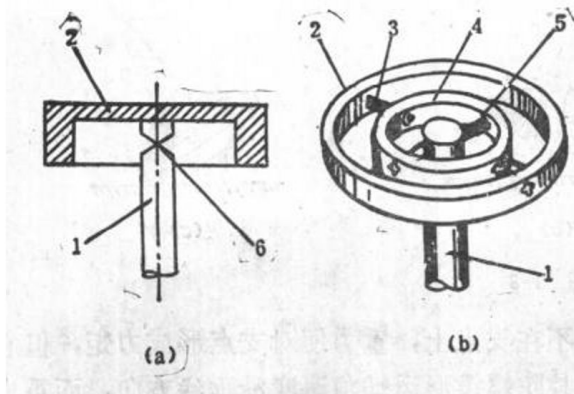


图 1-6  
1-驱动轴，2-转子，3-外扭杆，4-平衡环，5-内扭杆，6-挠性接头

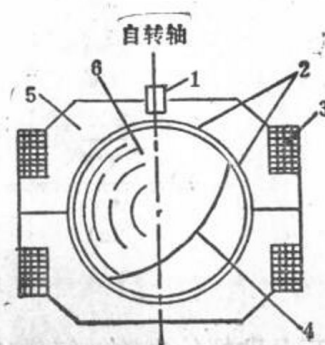


图 1-7  
1-光电传感器，2-支承电极，3-驱动线圈，4-读取刻线，5-陶瓷壳体，6-球形转子

头是一种无摩擦的弹性支承，有细颈轴和动力调谐式两种。如图1-6的(b)所示，这种陀螺仪仍有框架或称平衡环，但没有轴承。陀螺转子在框架之外，其支承由平衡环、内外扭杆及驱动轴组成。驱动轴由电动机带动，通过内扭杆带动平衡环，再通过外扭杆带动转子，转子就以电动机的转速绕自转轴高速旋转；另一方面，又允许转子绕垂直于自转轴的两个正交轴方向转动很“柔软”，因此自转轴具有两个转动自由度。SKR型陀螺罗经就是应用这种挠性陀螺仪。

4. 静电支承形式，如图1-7所示。这种陀螺仪转子由铝或铍做成空心或实心的圆球，放置在超高真空的陶瓷球腔内。球腔壁上一般有3对电极，其位置是在该球形转子的上下、左右、前后3个相互垂直的方向上。转子与电极的间隙仅 $10\mu\text{m}$ 。借助在静电场中电极与转子间的吸力来支承并控制转子的位置。静电支承的转子除了可绕自转轴高速旋转外，还可绕垂直于自转轴的两个正交轴方向转动。它是一种超高精度的3自由度陀螺仪，主要用于惯导系统中。

在叙述自由陀螺仪基本特性之前，我们介绍陀螺仪转子动量矩，它是陀螺仪一个重要的特性参数。转子动量矩大，自转轴的空间方向愈不容易改变，陀螺仪特性表现愈明显。

转子绕自转轴作高速自转运动，同时又绕框架轴转动。严格言，转子动量矩应包括自转运动和框架轴转动这两部分运动所产生的动量矩。由于在陀螺仪的结构中，框架轴转动的转动惯量与转动角速度远比转子对自转轴的转动惯量与自转角速度为小，因此转子动量矩的量值非常接近于自转轴动量矩的量值，而方向也非常接近于自转轴动量矩的方向；因此可以略去框架轴转动动量矩的影响，而认为转子动量矩的大小和方向都与自转轴动量矩相同，写成

$$H = J_x \Omega \quad (1-1)$$

其方向沿自转轴并与转子自转角速度的方向一致。 $J_x$ 为转子对自转轴的转动惯量。通常作为陀螺仪特性参数的陀螺仪动量矩，指的就是转子的自转轴动量矩，其单位是 $\text{g}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}$ 。若转动惯量的单位采用 $\text{g}\cdot\text{cm}^2$ ，则动量矩单位是 $\text{g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$ 。

玩具陀螺表现出的运动现象是大家所熟悉的。当玩具陀螺快速旋转时，它能直立在地面上。即使给予冲击，也只是产生晃动而不易冲倒。玩具陀螺的自转轴方向能够在空间保持稳定，这是陀螺稳定现象的表现，如图1-8(a)所示。

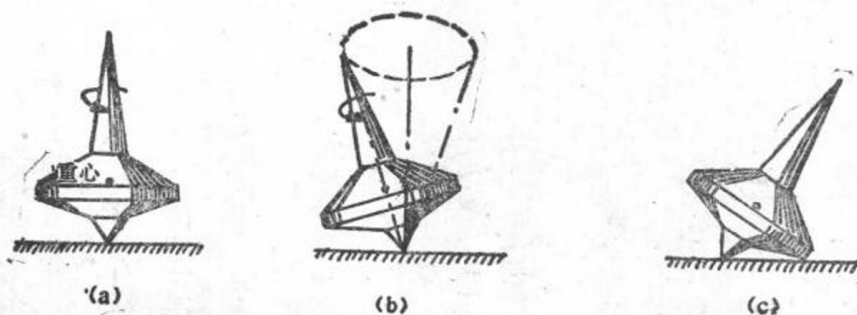


图 1-8

当玩具陀螺的自转轴倾斜时，因其重心不在支点上，重力便对支点形成力矩，但它并不会倒下，而是自转轴在空间作圆锥运动。玩具陀螺锥形运动角速度沿垂线方向，而重力矩沿水平方向，两者正好是相互垂直的，这是陀螺进动现象的表现，如图1-8(b)所示。

如果玩具陀螺不转时，它就直立不稳而倒下，如图1-8(c)所示。如果其旋转变慢，也表现出不稳而易倒。

可见，玩具陀螺只有在快速旋转的情况下，才会表现出陀螺的特殊运动现象。

现在介绍 3 自由度陀螺仪的两个基本特性。

1. 定轴性。假使如图 1-1 所示陀螺仪转子绕主轴不作高速旋转，当我们缓慢转动其基座时，由于框架轴承存在着摩擦，转子及其内外环将随着基座一起转动。若给陀螺仪主轴  $ox$  以打击或施加一个不与主轴相平行的常值力矩在上述装置上，则主轴  $ox$  将沿打击力或外力作用方向旋转。这些现象和我们日常生活中所看到的能绕定点运动的刚体受力后的运动情况完全一样。当转子绕主轴作高速旋转，我们转动其基座，陀螺仪主轴  $ox$  将保持其在空间的初始方向不变。在瞬时打击力作用下，陀螺仪主轴实际也不改变其初始指向；只能引起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，该摆动肉眼观察不到。所以 3 自由度陀螺仪，当其转子绕主轴高速旋转时，力图保持其自转轴  $ox$  在空间的初始方向不变的特性称之为陀螺仪的定轴性（或稳定性），如图1-9所示。

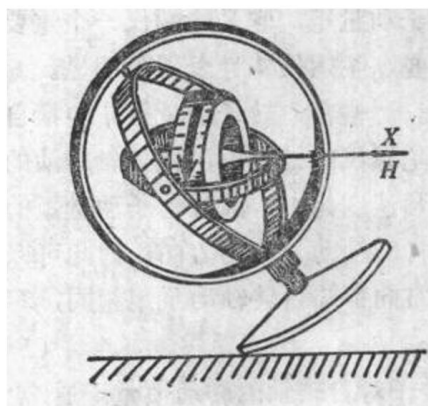


图 1-9

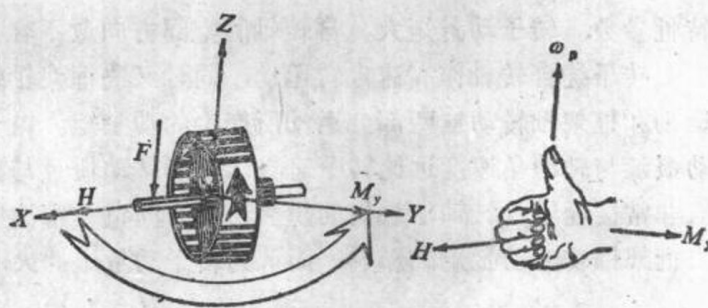


图 1-10

2. 进动性。假使如图 1-1 所示陀螺仪转子绕主轴作高速旋转，若受外力矩作用时，假定外力矩绕内环轴作用，则陀螺仪绕外环轴转动；假定外力矩绕外环轴作用，则陀螺仪绕内环轴转动。陀螺仪的转动方向与外力矩的作用方向不一致，而是与后者相垂直，该特性称之为

陀螺仪的进动性。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。转动角速度称进动角速度，通常以  $\omega_p$  表示。陀螺仪进动所绕的轴称进动轴。

陀螺仪进动角速度的方向，取决于动量矩的方向和外力矩方向。其规律如图1-10所示。

从图1-10知，我们可将陀螺仪的进动性叙述为：在外力矩作用下，陀螺仪的动量矩  $H$  矢端沿捷径握向外力矩  $M$  矢端作进动，记  $H \rightarrow M$ 。

陀螺仪进动角速度的大小，取决于动量矩的大小和外力矩的大小。其计算式如下：

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

将表达式(1-1)代入上式，则上式写成

$$\omega_p = \frac{M}{J_x \Omega} \quad (1-3)$$

式(1-2)或式(1-3)表明：当动量矩为一定值时，进动角速度的大小是与外力矩的大小成正比的；当外力矩为一定值时，进动角速度的大小是与动量矩的大小成反比的。若动量矩和外力矩均为一定值时，进动角速度也保持为一定值。

在陀螺罗经中，会遇到将外力矩  $M$  表达为沿水平轴  $oy$  和沿垂直轴  $oz$  的分量形式，这时陀螺仪进动角速度的大小，其计算式写为下列一组公式

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

式(1-4)称之为陀螺仪的进动公式。式中  $H$  为位于  $ox$  轴的正向。在某些罗经中， $H$  是位于  $ox$  轴的负向，则在应用公式(1-4)时应在  $H$  前加一负号。 $M_y$ 、 $M_z$  也是位于  $oy$  轴和  $oz$  轴的正向，在后面讨论中只要将  $M_y$  和  $M_z$  的实际表达式代入即可。参阅图 1-10 所示，不难判断出：公式(1-4)的第一式说明，外力矩绕内环轴的正向作用，陀螺仪是绕外环轴的正向进动；公式(1-4)的第二式说明，外力矩绕外环轴的正向作用，陀螺仪是绕内环轴的负向进动。

## 第二节 陀螺仪的运动方程

为了研究陀螺仪的运动，必须建立一些参考坐标系。为此，我们以陀螺仪支架点  $O$  为公共原点作 3 个右手直角坐标系：一个是与地球相固连的地理坐标系  $ONWZ_0$ ， $ON$ 、 $OW$  两轴在水平面内， $ON$  轴与地球的子午线相重合指北方， $OW$  轴与  $ON$  轴相垂直指西方， $OZ_0$  轴则垂直于  $ON$ 、 $OW$  两轴亦即与外环的垂直轴相重合指天顶，如图1-11所示。假定地球无自转和公转运动以及坐标系原点  $O$  相对地球无运动时，那么轴系  $ONWZ_0$  在宇宙空间为固定不动的。再一个是与陀螺仪内环相连的坐标系  $OXYZ$ ， $OX$  轴与转子主轴相重合， $OY$  轴与内环上的水平轴相重合， $OZ$  轴垂直于  $OX$ 、 $OY$  两轴指向上方。坐标轴  $OX$ 、 $OZ$  均在转子赤道平面内；但不参与转子绕其主轴  $OX$  的旋转，所以称  $OXYZ$  坐标系为陀螺仪的中间轴系。当  $OX$  轴水平，外环平面与子午线面相垂直时， $OX$ 、 $OY$  和  $OZ$  轴则分别与  $ON$ 、 $OW$  和  $OZ_0$  轴相重合。第三个坐标系是选取与陀螺仪转子相固连并随同转子一起绕其主轴  $ox$  旋转的坐标系  $oxyz$ 。

陀螺仪转子为一绕定点转动的刚体。欲确定其空间的位置必须要用3个赖柴耳角  $\alpha$ ,  $\theta$  和  $\varphi_p$ 。这3个角的确定是这样的: 如图1-11所示, 陀螺仪转子能绕  $OZ_0$ 、 $OY$  和  $OX$  3个轴旋转。假定某一时刻,  $ox$ 、 $OX$ ,  $ON$  重合,  $OY$ ,  $oy$ ,  $OW$  重合,  $OZ$ 、 $oz$ 、 $OZ_0$  重合; 其后转子连同内外环以角速度  $\dot{\alpha}$  绕  $OZ_0$  轴转过一个角度  $\alpha$ , 转子连同内环以角速度  $\dot{\theta}$  绕  $OY$  轴转过一个角度  $\theta$ , 转子以角速度  $\dot{\varphi}_p$  绕自转轴  $ox$  轴转过一个角度  $\varphi_p$ 。显然, 若  $\alpha$ 、 $\theta$ 、 $\varphi_p$  为已知时, 与转子固连的坐标系  $oxyz$  相对地理坐标系  $ONWZ_0$  的位置便可确定。角  $\alpha$ 、 $\theta$ 、 $\varphi_p$  的正方向是这样确定: 当观察者从  $Z_0$ 、 $Y$ 、 $x$  轴的正端望去, 如果它们以反时针方向离开  $ON$ 、 $OK$  与  $OY$  轴时为正, 反之为负。根据此假定, 主轴北端偏在子午面之西时  $\alpha$  为正, 偏在水平面之下时  $\theta$  为正。图中  $OK$  为节线。在陀螺罗经实用理论中, 通常称角  $\alpha$  为方位角即陀螺仪主轴与子午线之间的水平夹角; 称角  $\theta$  为高度角即陀螺仪主轴与水平面之间的垂直夹角; 称角  $\varphi_p$  为自转角即  $oy$  轴与  $OY$  轴之间的夹角。

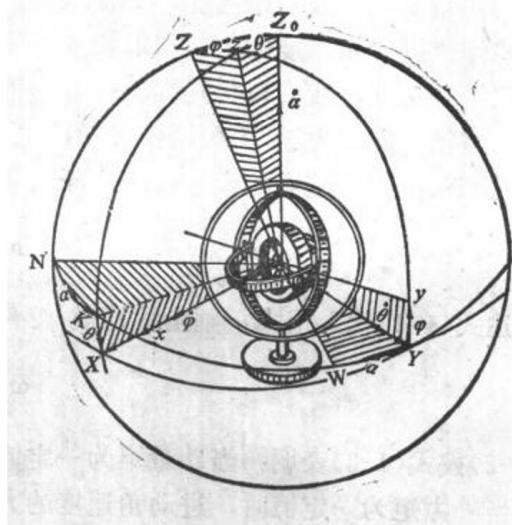


图 1-11

实用上只确定陀螺仪转子主轴在空间的某一位置, 那么用两个赖柴耳角  $\alpha$  与  $\theta$  就够了; 这是因为中间轴系不参与转子绕自转轴的转动。因此陀螺仪转子绕瞬时轴转动的瞬时角速度应为

$$\omega_p = \dot{\alpha} + \dot{\theta}$$

将其在轴系  $OXYZ$  的各轴上投影为

$$\left. \begin{aligned} \omega_p X &= -\dot{\alpha} \cos \theta \\ \omega_p Y &= \dot{\theta} \\ \omega_p Z &= \dot{\alpha} \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

我们讨论陀螺仪的运动是相对于宇宙空间的运动, 即由陀螺仪相对于地理坐标系的相对运动和随同地理坐标系一起运动的牵连运动所组成的复合运动。因此, 陀螺仪相对于宇宙空间的运动称为绝对运动。显然, 陀螺仪主轴相对于宇宙空间的绝对运动角速度应为相对于地理坐标系的相对运动角速度以及随同地理坐标系一起运动的牵连运动角速度的矢量和。假定陀螺仪的瞬时绝对运动角速度在  $OY$  轴的投影为  $\omega_p Y$ , 在  $OZ$  轴 (因为  $OZ_0$  与  $OZ$  之间的夹角  $\theta$  很小, 可以认为  $OZ_0$  与  $OZ$  两轴重合) 上的投影为  $\omega_p Z$ ; 那么, 为了讨论陀螺仪在外力矩作用下的运动规律, 我们应用进动公式 (1-4) 得到陀螺仪相对宇宙空间的实用运动方程式为

$$\left. \begin{aligned} H \omega_p Z &= MY \\ -H \omega_p Y &= MZ \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

公式 (1-6) 用来讨论当陀螺仪转子作高速旋转后, 在外力矩作用下陀螺仪的运动。式中的  $\omega_p Y$  和  $\omega_p Z$  包含陀螺仪与地球之间的相对运动以及地球自转、船舶运动在内的牵连运动。若认为地球不动即地理坐标系  $ONWZ_0$  在宇宙空间是固定不动的, 则式 (1-6) 改写为

$$\left. \begin{aligned} H\dot{\alpha} &= M_Y \\ -H\dot{\theta} &= M_Z \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

方程组(1-7)的解具有下面形式

$$\alpha = \frac{M_Y}{H}t + C_1;$$

$$\theta = -\frac{M_Z}{H}t + C_2。$$

其中  $C_1$ 、 $C_2$  为任意积分常数，它可由初始条件确定。若令初始时刻有  $\alpha_{t=0} = \alpha_0$ ， $\theta_{t=0} = \theta_0$ ，上式最后形式为

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 + \frac{M_Y}{H}t \\ \theta &= \theta_0 - \frac{M_Z}{H}t \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

所以表达式(1-8)乃为表达式(1-7)的解。可见，对式(1-7)求解即可得到陀螺仪转子主轴在外力矩  $M_Y$ 、 $M_Z$  的作用下绕进动轴的运动规律。

### 第三节 地球自转角速度及其分量

前面我们提过 3 个直角坐标系；即参与转子的自转并与转子相固连的  $oxyz$  坐标系，这个坐标系在研究陀螺仪实用理论时常不用它；中间坐标系  $OXYZ$ ，它是不参与转子自转的动轴系，这个坐标系在研究陀螺仪实用理论时极为重要；最后选取与地球相固连的地理坐标系  $ONWZ_0$ ，那时认为地球不动，而把它看作为一宇宙空间的惯性轴系。我们在分析自由陀螺仪主轴定轴性时，陀螺仪主轴的位置常常是对与地球固连的坐标系  $ONWZ_0$  的。因此， $ONWZ_0$  轴系不动，主轴指向空间的方向不变；主轴相对于坐标系  $ONWZ_0$  的运动即为陀螺仪的绝对运动。但在事实上地球是不停地绕地轴作自西向东的自转转动，故其坐标系  $ONWZ_0$  亦将绕着与地轴相平行的轴转动。所以陀螺仪主轴的绝对运动角速度应为相对于坐标系  $ONWZ_0$  的相对运动角速度及随同坐标系  $ONWZ_0$  的牵连运动角速度的矢量和。由于牵连运动的存在，自由陀螺仪主轴将产生相对于地理坐标系  $ONWZ_0$  的相对运动，这个运动称之为自由陀螺仪主轴的视运动。正如生活在地球上的人们所看到的太阳每天早晨从东方升起傍晚自西方落下的运动称之为太阳的周日视运动一样。

由于地球的自转影响，地理坐标系的子午面与水平面相对于宇宙空间的固定坐标系是不断地改变它们的位置的，为此，略去地球公转的影响，我们来研究地球自转角速度及其分量。

如图1-12所示，地球绕地轴  $P_N P_S$  以角速度  $\omega_e$  旋转，一昼夜自转一周的时间为 23h 56min 4.1s (近似24h)。所以， $\omega_e \cong 7.29 \cdot 10^{-5} \text{rad/s}$ 。

设地球表面一固定点  $A$  为地理坐标系的原点，该点位置由地理纬度  $\varphi$  和地理经度  $\lambda$  确定。由于地球上各处的自转角速度均相同，因此在  $\varphi$ 、 $\lambda$  处某固定点  $A$  上也有相同的自转角速度  $\omega_e$ 。显然当地球自转时， $A$  点的子午面和水平面均随地球自转而相对于宇宙空间转动，该点的子午面和垂直面（铅垂面）相应地不断发生变化。为了便于观察  $A$  点的地理坐标系

相对宇宙空间的运动状态，我们把沿地轴的地球自转角速度矢量  $\omega_0$  的始点  $o$  移到  $A$  点位置，然后再将  $\omega_0$  沿  $oN$  与  $oZ_0$  轴上投影，我们得到两个分量为

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= \omega_0 \cos \varphi \\ \omega_2 &= \omega_0 \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

从图1-12中看出， $\omega_1$ 在水平面NESW内，方向沿水平面的南北轴线而指北，通常称此分量为地球自转角速度的水平分量； $\omega_2$ 在子午面  $NZ_0S$  内，方向沿  $A$  点的垂直线  $AZ_0$  而指天顶，通常称此分量为地球自转角速度的垂直分量。 $\omega_1$ 将使水平面绕  $SN$  轴转动，其东半平面将相对宇宙空间不断地下倾，而西半平面则相对宇宙空间不断地上升； $\omega_2$ 将使子午面绕  $AZ_0$  轴转动，其子午面的北半平面的北端  $N$  不断地向西转动，而南半平面的南端  $S$  则不断地向东转动。它们的转动速度均决定于当地纬度  $\varphi$ 。

根据上述可得如下结论：

- 一、子午面在静止的宇宙空间中绕垂直轴转动。在北纬，子午线北端  $N$  从东向西转动；在南纬，从西向东转动。转动角速度在赤道上等于零，而在某特定纬度上系一常量。
- 二、水平面在静止的宇宙空间中绕南北轴转动。无论南北纬，水平面的东面均向下倾斜；水平面的西面均向上倾斜。转动角速度在极地等于零。

#### 第四节 自由陀螺仪相对于子午面和水平面的视运动

我们现在来研究安放在北纬  $\varphi$  处的地球表面上自由陀螺仪主轴相对于地理坐标系的视运动。

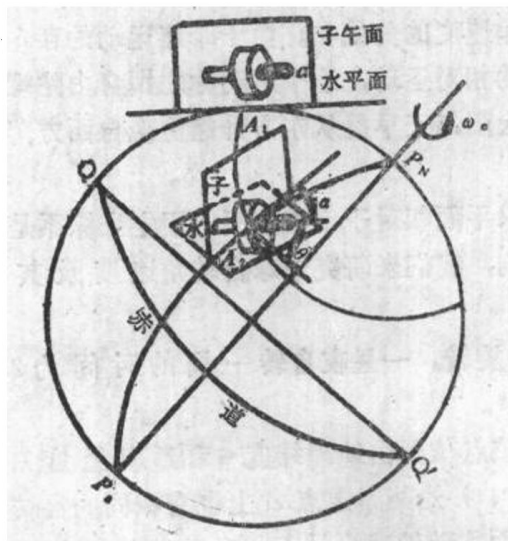


图 1-13

假定在起始时刻，陀螺仪位于  $A_1$  上，其主轴呈水平自南指北，主轴指北端用  $a$  标记，如图1-13所示。地球绕地轴  $P_N P_S$  自西向东自转，经过某一段时间陀螺仪位于  $A_2$  上。由于自由陀螺仪的主轴在空间的位置指向不变，因此在位置  $A_2$  时主轴将与位置  $A_1$  保持平行，随同地球自转的观察者将看到陀螺仪主轴与地球之间的关系发生了变化。从图1-13中看出，在位置  $A_2$  陀螺仪主轴已不是水平指北；相对于子午面其指北端  $a$  向东偏过了某一方位角  $\alpha$ ，相对于水平面其指北端  $a$  从水平面升高了某一高度角  $\theta$ 。若继续观察下去，在地球自转一昼夜时间内，上述自由陀螺仪主轴相对于子午面



和水平面的位置是不停地变化着，亦即陀螺仪主轴的方位角  $\alpha$  和高度角  $\theta$  不停地发生变化。这样，自由陀螺仪主轴的视运动将产生绕地轴  $OP_N$  描绘出圆锥体。

为了确定自由陀螺仪主轴相对于子午面和水平面视运动的规律，我们通过陀螺仪支架点  $o$  作两个坐标系： $ONWZ_0$  与  $OXYZ$ ，如图1-14所示。

将地球自转角速度矢量  $\omega_e$  在中间坐标系  $OXYZ$  的各轴上投影，得到

$$\left. \begin{aligned} \omega_x &= \omega_{1x} = \omega_1 \cos \alpha = \omega_e \cos \varphi \cos \alpha \\ \omega_y &= \omega_{1y} = \omega_1 \sin \alpha = \omega_e \cos \varphi \sin \alpha \\ \omega_z &= \omega_2 = \omega_e \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

角速度分量  $\omega_x = \omega_{1x}$  沿陀螺仪主轴，它仅确定水平面绕转子主轴的转动，故不引起主轴相对于子午面和水平面有方位角和高度角的视运动，而只改变转子自转角速度大小的微小变化，因而实际上无意义。

角速度  $\omega_y = \omega_{1y} = \omega_1 \sin \alpha$ ，当  $\alpha$  为小角度时， $\omega_y \cong \omega_1 \alpha$ ；表示水平面  $ENWS$  绕  $Y$  轴的转动角速度，亦即使陀螺仪主轴相对于水平面的高度角  $\theta$  发生变化的角速度，称为地球自转角速度的有益分量。其大小不仅与陀螺仪所在地的纬度  $\varphi$  有关，而且还与陀螺仪主轴偏离子午面的方位角大小有关。这个角速度随角  $\alpha$  的增大而增大，减小而减小。 $\alpha$  为零时最小，不

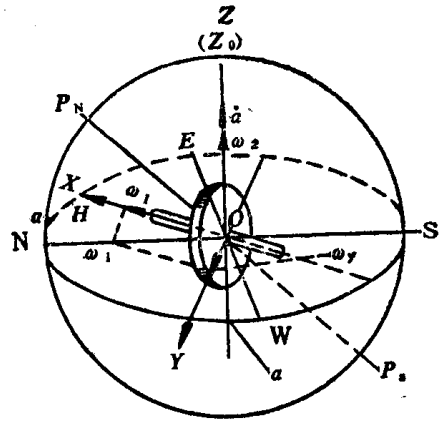


图 1-14

引起主轴高度角的变化； $\alpha$  为  $90^\circ$  时最大，引起主轴高度角的变化最快。显然，当主轴偏在子午面之东时作上升视运动；当主轴偏在子午面之西时作下降视运动。所以  $\omega_y = \omega_1 \alpha$  角速度分量有使主轴“东升西降”的视运动现象。我们若用  $V_1 = H \omega_1 \alpha$  表示陀螺仪主轴指北端自水平面上升或下降的线速度；则因  $\omega_1 \alpha$  的影响，陀螺仪主轴指北端将以  $V_1$  线速度作东升西降视运动。其中  $H$  为陀螺仪动量矩。

角速度  $\omega_z = \omega_2 = \omega_e \sin \varphi$  沿垂直轴，它表明陀螺仪主轴相对于子午面的偏离角速度。在赤道处该速度为零；在极地处该速度为最大。显然，当陀螺仪安放在北纬某  $\varphi$  处，则主轴指北端将向东作视运动；在南纬，主轴指北端将向西作视运动。在特定纬度上，主轴指北端从子午面偏东或偏西的角速度系一常量。我们若用  $V_2 = H \omega_2$  表示陀螺仪主轴指北端自子午面偏离的线速度；则因  $\omega_2$  的影响，陀螺仪主轴指北端在北纬以  $V_2$  从子午面东偏，在南纬以  $V_2$  从子午面西偏作视运动；即因  $\omega_2$  的影响，陀螺仪主轴指北端有北纬东偏、南纬西偏视运动。

从对位于地球上自由陀螺仪主轴相对于子午面和水平面的视运动的讨论可看出，在不为  $0^\circ$  或  $90^\circ$  的任意纬度上，由于地球自转的影响，随同地球自转的观察者将会看到陀螺仪主轴在方位和高度上都在不停地发生变化，所以在地球上是不能把自由陀螺仪直接作为指示方向的陀螺罗经来使用。

## 第五节 变自由陀螺仪为陀螺罗经的方法

现在我们假定自由陀螺仪安放在北纬某纬度  $\varphi$  处并与地球无相对运动的静止基座上。