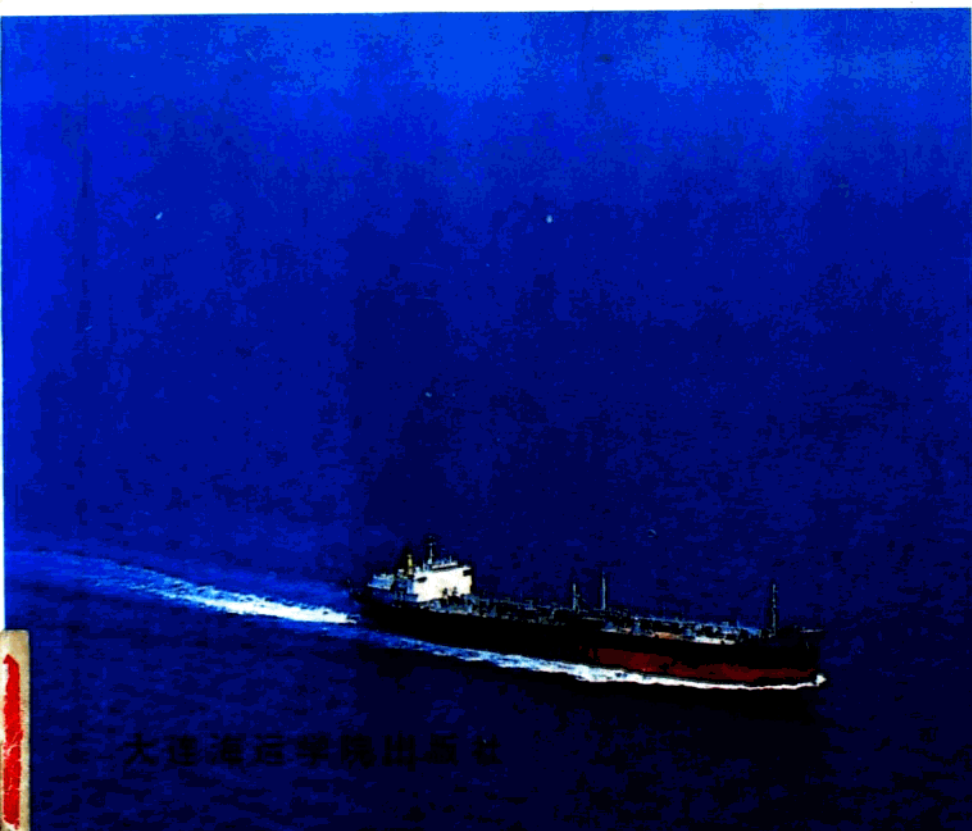


高级船员适任证书  
考试用航海培训教材



# 航海仪器

刘文勇 主编



大连海运学院出版社

高级船员适任证书考试用航海培训教材

# 航海仪器

Hanghai Yiqi

刘文勇 主编

徐德兴 主审

大连海运学院出版社

(辽)新登字 11 号

## 内 容 提 要

本书共分十七章,内容系叙述航海仪器所包括的陀螺罗经、回声测深仪、计程仪、雷达、ARPA、无线电测向仪、罗兰、台卡、奥米加、卫星导航系统和磁罗经的基本工作原理、结构原理、与使用保养有关的电路原理及使用保养等。书中对所编写的典型产品作了一定深度的论述。

本书作为海船船长、驾驶员考证培训试用教材,也可供船舶驾驶人员自学参考。

## 航 海 仪 器

刘文勇 主编

徐德兴 主审

大连海运学院出版社出版、发行

大连海运学院出版社印刷厂印刷

责任编辑:时培育 封面设计:王 艳

开本:787×1092 1/16 印张:27.5 字数:686千字

1993年7月第1版 1993年7月第1次印刷

印数:0001~6000 定价:23.00元

ISBN 7-5632-0562-4/U·110

## 编 者 的 话

《航海仪器》是叙述这门课程所包括的各种仪器的基本工作原理、结构原理、与使用保养有关的电路原理,以及它们的使用与保养等内容。本书是在交通部航海类专业有关教材的基础上,根据1988年中华人民共和国港务监督局制订的《海船船长、驾驶员考试大纲》的要求而编写的。全书共分三篇:第一篇电航仪器,包括陀螺罗经、回声测深仪和计程仪;第二篇船用雷达与ARPA;第三篇无线电航仪器与磁罗经,包括无线电测向仪、罗兰、台卡、奥米加、卫星导航系统和磁罗经。

编写本教材的目的和要求是:

1. 掌握航海仪器所包括的各种仪器的基本工作原理、结构原理、与使用有关的电路原理、误差及其消除,并能正确使用与保养。

2. 满足船员考证的要求。

本书由大连海运学院刘文勇任主编,徐德兴任主审。

本书第一篇第一、二、三、四、五章由刘文勇编写;第一篇第六、七章由郑永敬编写;第二篇第八、九、十、十一章由杨希学编写;第三篇第十二、十三、十四、十五、十六章由洪德本、董华编写;第三篇第十七章由关正军编写。

本书初稿完成后,经讨论和修改,最后由刘文勇、徐德兴编审定稿。

本书作为海船船长、驾驶员考证培训试用教材,也可供船舶驾驶人员自学参考。

由于水平有限,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其他读者批评指正。

编 者

# 前 言

根据 1988 年中华人民共和国港务监督局《海船船长、驾驶员考试大纲》的考试科目和知识要求,大连海运学院航海分院、大连海上安全监督局、大连远洋运输公司、大连轮船公司和大连海运学院出版社等企事业单位组建了高级船员适任证书考试用航海培训教材编委会,组织了有丰富教学经验和实践经验的专家编审了这套教材。

这套培训教材在编写中注意理论联系实际,具有较强的针对性;深广度适宜,具有较好的适用性与系统性。教材既有理论阐述,又有例证与思考题,既适用于海船驾驶人员考证培训,渔船、舰艇驾驶人员考证培训,又可作为驾驶员的自学读物,也可作考试发证机关的命题参考依据。

本培训教材共分为:航海学、船舶操纵、船舶货运、航海气象、航海英语[(一)、(二)]、船员职务与海运法规(上、下)、航海仪器、船艺、船舶避碰、地文航海、天文航海。

本书在编审、出版和征订工作中得到交通部安全监督局、航运企业等单位的关心和大力支持,特致谢意。

高级船员适任证书考试用航海培训教材编委会

1992 年 7 月

## 高级船员适任证书考试用航海培训教材编委会

**主任委员** 杨守仁

**副主任委员** (以姓氏笔划为序)

马文明 王国福 张维洵 宋家慧 郭禹 倪暹

夏国忠

**委员** (以姓氏笔划为序)

王逢辰 古文贤 刘世宁 刘文勇 李新江 李锦芳

汤树佳 郑经略 赵子骥 赵兴贤 胡正良 荆吉昌

徐德兴 袁安平

# 目 录

## 第一篇 电航仪器

第一章 陀螺罗经的指北原理.....	2
第一节 概述.....	2
第二节 陀螺仪及其特性.....	2
第三节 陀螺仪的运动方程式.....	5
第四节 自由陀螺仪的视运动及其分析.....	7
第五节 变自由陀螺仪为陀螺罗经的方法.....	11
第六节 摆式罗经的等幅摆动.....	14
第七节 摆式罗经的减幅摆动.....	22
第八节 电磁控制式罗经原理.....	32
复习思考题.....	35
第二章 陀螺罗经误差及其消除.....	37
第一节 纬度误差.....	37
第二节 速度误差.....	39
第三节 冲击误差.....	49
第四节 摇摆误差.....	55
第五节 基线误差.....	56
复习思考题.....	57
第三章 安许茨(ANSCHÜTZ)4型陀螺罗经.....	59
第一节 概述.....	59
第二节 主罗经结构.....	60
第三节 附属仪器及电路系统.....	65
第四节 使用.....	73
第五节 保养.....	74
第六节 故障排除.....	81
复习思考题.....	88
第四章 斯伯利(SPERRY)37型陀螺罗经.....	89
第一节 概述.....	89
第二节 主罗经结构.....	90
第三节 电路.....	92
第四节 使用及保养.....	101
复习思考题.....	104
第五章 阿玛-勃朗(ARMA-BROWN)10型陀螺罗经.....	106
第一节 概述.....	106

第二节	主罗经结构	107
第三节	电路	110
第四节	使用	120
	复习思考题	121
第六章	回声测深仪	123
第一节	概述	123
第二节	声波在海水中的传播速度	124
第三节	声波在海水中的传播	125
第四节	回声测深原理	148
第五节	回声测深仪整机方框图及其工作过程	129
第六节	回声测深仪的最大测量深度及最小测量深度	131
第七节	回声测深仪各组成部分及其工作原理	132
第八节	回声测深仪误差	144
第九节	回声测深仪的使用	146
	复习思考题	148
第七章	计程仪	150
第一节	概述	150
第二节	水压计程仪	151
第三节	电磁计程仪	155
第四节	多普勒计程仪	160
第五节	声相关计程仪	172
	复习思考题	174

## 第二篇 船用雷达与 ARPA

第八章	船用雷达	175
第一节	引言	175
第二节	雷达的测向与测距原理	175
第三节	雷达的基本工作原理	176
第四节	电源设备	177
第五节	天线系统与收发开关	180
第六节	发射机	186
第七节	接收机	193
第八节	显示器	200
第九节	相对运动雷达的显示方式	204
第十节	雷达整机方框图	207
第十一节	雷达的主要技术性能	209
	复习思考题	214
第九章	雷达操作	217
第一节	各按钮的作用及操作方法	217



第二节	雷达的一般操作步骤	223
第三节	真运动雷达的操作和正确使用	225
第四节	双雷达系统的互换装置	226
第五节	性能监视器	228
	复习思考题	231
第十章	雷达观测	232
第一节	影响雷达距离探测能力的因素	232
第二节	影响雷达方位观测的因素	237
第三节	影响雷达回波观测的因素	239
第四节	雷达定位	244
	复习思考题	251
第十一章	ARPA	254
第一节	引言	254
第二节	ARPA 的基本组成部分及其功用	254
第三节	CAS II 型 ARPA	260
第四节	可能碰撞点与预测危险区	264
第五节	ARPA 的技术性能标准	266
第六节	ARPA 的局限性	271
	复习思考题	273

### 第三篇 无线电航仪器与磁罗经

第十二章	无线电测向仪	275
第一节	无线电示标台的设置	275
第二节	无线电测向原理	275
第三节	目测式无线电测向仪	278
第四节	无线电测向	283
第五节	无线电测向仪自差的测定	286
	复习思考题	289
第十三章	罗兰	291
第一节	罗兰 A 导航系统的设置	291
第二节	罗兰 A 定位原理	294
第三节	罗兰 C 导航系统的设置	297
第四节	罗兰 C 导航系统工作原理	301
第五节	罗兰 A/C 接收机	304
第六节	自动罗兰 C 接收机	308
第七节	JNA-760 型、JNA-761 型罗兰 C 接收机	311
第八节	LR-777 型、LR-707 型、TL-838 型罗兰 C 接收机	315
第九节	罗兰 A 天地波识别与图表的用法	320
第十节	罗兰 C 天地波识别及定位精度	326

复习思考题.....	328
第十四章 台卡.....	330
第一节 台卡导航系统的设置.....	330
第二节 台卡导航系统定位原理.....	332
第三节 MK21 型台卡接收机.....	336
复习思考题.....	340
第十五章 奥米加.....	342
第一节 奥米加导航系统的设置.....	342
第二节 奥米加导航系统的工作原理.....	344
第三节 JLA-104 型奥米加接收机.....	346
第四节 手动奥米加接收机.....	350
第五节 奥米加信号传播改正.....	354
复习思考题.....	358
第十六章 卫星导航.....	359
第一节 子午仪卫导系统概述.....	359
第二节 全球定位系统(GPS)概述.....	364
第三节 MX1112 型卫星导航仪.....	366
第四节 MX5400 型 GPS 卫星导航仪.....	377
第五节 NNSS 卫星导航仪误差.....	386
第六节 GPS 卫星导航仪误差.....	387
复习思考题.....	389
第十七章 磁罗经.....	391
第一节 有关磁的基本概念.....	391
第二节 磁罗经的结构与检查.....	400
第三节 磁罗经自差.....	405
第四节 自差的校正与测定.....	418
复习思考题.....	430

# 第一篇 电 航 仪 器

本篇是叙述陀螺罗经、回声测深仪和计程仪等电航仪器的基本工作原理、结构和主要电路原理,以及有关使用与维护保养等内容。

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

## 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  $\pm 0.25\text{sec}\varphi$  以内;
4. 可重复性精度应在  $\pm 0.25\text{sec}\varphi$  以内;
5. 船舶横摇  $20^\circ$ 、纵摇  $10^\circ$ 、偏航  $5^\circ$ 引起的罗经摇摆误差应在  $\pm 1^\circ\text{sec}\varphi$  以内;
6. 在各种环境条件下(包括电源、温度、湿度、磁场与振动等),罗经的试验误差应在  $\pm 1^\circ\text{sec}\varphi$  以内;
7. 船舶迅速改变航速 20kn 引起罗经的误差应在  $\pm 2^\circ$  以内;
8. 船舶以 20kn 航速、快速改变航向  $180^\circ$ 而引起的罗经误差应在  $\pm 3^\circ$  以内;
9. 船舶以航速 20kn 作恒速恒向航行,校正了航速、航向和纬度影响后的罗经剩余误差应在  $\pm 0.25\text{sec}\varphi$  以内;
10. 主罗经与分罗经之间的最大读数误差应在  $\pm 0.5$  以内。

注: $\varphi$  为罗经所在地的纬度。

## 二、回声测深仪

1. 测量范围:应能测量换能器以下 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:浅水档,误差为  $\pm 1\text{m}$ ;深水档,误差为  $\pm 5\text{m}$  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;航程显示应能显示 0.1 n mile;
2. 测量精度:显示的航速误差应不大于船舶航速的  $\pm 5\%$  或  $\pm 0.5\text{kn}$ ;
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,我国已制定了电航仪器性能标准。随着我国电航仪器现代化、系列化和标准化的工作的发展,海船上必将安装性能优良的国产电航仪器,以适应我国海运事业的长足发展之需要。

# 第一章 陀螺罗经的指北原理

## 第一节 概述

航海罗经是用来指示船舶航向和测定物标方位的重要的航海仪器。最早得到应用的航海罗经是磁罗经,因受地磁场的作用,磁针相对于磁子午面可以获得其稳定位置,并在外界干扰使它偏离稳定位置后,它仍然具有返回至应有稳定位置的性能。磁罗经结构简单,使用方便,安全可靠,是目前船舶必不可少的一种航海罗经。但因任何磁场均会对磁针产生影响,使磁罗经产生误差,故要求人们能创造一种不受磁场影响的航海罗经。

1852年,著名的法国物理学家列昂·傅科(Leon Foucault)第一个提出利用陀螺仪作为指示方向仪器的设想,其主要内容可概括为:利用三自由度陀螺仪的惯性来观测地球的自转;将二自由度陀螺仪的主轴限制在水平面内时,其稳定位置为地球子午线方向;将二自由度陀螺仪的主轴限制在子午面内时,其稳定位置与地球自转轴相平行。傅科上述三个富有创见的思想,基本上概括了陀螺仪的各种用途。把陀螺仪的特殊惯性和地球自转联系起来能够成为指示地球子午线的仪器,这就是陀螺罗经的工作依据。目前不同结构的陀螺罗经,都是以傅科这一卓越思想为基础发展起来的。

陀螺罗经是利用陀螺仪的特殊惯性所制成的一种航海罗经。它不依赖地磁场进行定向,不受磁干扰影响,故能在钢质船舶上高度精确地工作,与磁罗经相比较这是它的巨大优越之处。对航行在浩无涯际的海洋上的船舶来讲,获取精确的航向读数极为重要,因此性能良好的陀螺罗经得到了普遍使用,并被公认为重要的航海罗经。

本世纪初,以发明者命名的、可供船用的安许茨型陀螺罗经(1908年)、斯伯利型陀螺罗经(1911年)和勃朗型陀螺罗经(1916年)先后相继问世。迄今船用陀螺罗经已有80多年历史,据不完全统计,全世界现有的船用陀螺罗经型号已约达近百种。尽管陀螺罗经型号繁多,但基本上可作下列分类:按陀螺罗经其灵敏部分具有的陀螺转子个数划分,分为单转子陀螺罗经和双转子陀螺罗经两大类型;按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种系列陀螺罗经;按给陀螺施加力矩的形式划分,分为机械摆式陀螺罗经和电磁控制式陀螺罗经两大类型。

随着科学技术的长足发展,船用陀螺罗经无论在结构上还是在理论上都有很大的发展。当前船用陀螺罗经的主要发展趋向是:以保证船舶航行指向精度为前提,采用新技术,以实现其体积小、工作可靠性和使用寿命长;简化其维护保养工作和降低产品成本。

## 第二节 陀螺仪及其特性

陀螺罗经又称电罗经。它是利用陀螺仪的基本特性——定轴性和旋进性,借助于控制设备和阻尼设备,能自动找北指北并精确地跟踪地理子午面的一种指向仪器。因此,我们首先需要认识的问题是,何谓陀螺仪,陀螺仪具有怎样的特殊结构和基本特性,使它能区别于一般刚体而发展成为陀螺罗经的可能。

## 一、陀螺仪的定义

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自转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,在工程技术上对陀螺仪一词可理解为高速旋转的对称转子及其悬挂装置的总称。所谓转子绕自转轴作高速旋转,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。转子通常是一个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。为方便起见,今后将它称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制成,由陀螺马达驱动使转子绕自转轴作高速旋转。观察者从主轴的一端能看到转子作逆时针方向旋转时,则该端称为陀螺仪的极。

## 二、陀螺仪的结构

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 2、外环 3、固定环 4 和基座 5 组成了转子的悬挂装置。转子能自由地绕主轴  $ox$  作高速旋转,转子连同内环可绕水平轴  $oy$  旋转,转子连同内环及外环一起又可绕垂直轴  $oz$  旋转。由于转子能绕三轴旋转,显然它将成为一绕定点运动的刚体。定点  $o$  为三轴的交点,该点通常称为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三个自由度的陀螺仪。若把三自由度陀螺仪的内外两环中的任何一环固定,则陀螺仪将具有两个自由度。若将内外两环同时固定,则转子将为一绕定轴旋转的刚体。若不计及转子绕主轴的自转,我们可以将上述的三自由度陀螺仪和二自由度陀螺仪分别称为二自由度陀螺仪和单自由度陀螺仪。

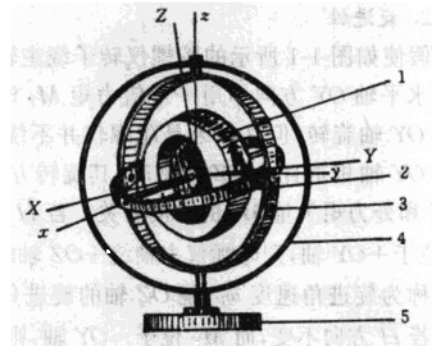


图 1-1

1-转子;2-内环;3-外环;4-固定环;5-基座

若三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三自由度陀螺仪称为自由陀螺仪。

## 三、陀螺仪的基本特性

在叙述陀螺仪的基本特性之前,我们先介绍用以描述陀螺仪转子绕其主轴作高速旋转运动的物理量——动量矩。它是一个矢量,通常用符号  $\vec{H}$  表示。陀螺仪转子动量矩  $\vec{H}$  等于转子绕主轴的转动惯量  $J_z$  和转子自转角速度  $\vec{\Omega}$  之乘积,即

$$\vec{H} = J_z \times \vec{\Omega} \quad (1-1)$$

$\vec{H}$  的方向沿主轴并与转子自转角速度的矢量方向一致,其单位是  $g \cdot cm \cdot s$ 。若转动惯量的单位为  $g \cdot cm^2$ ,则动量矩的单位为  $g \cdot cm^2 \cdot s^{-1}$ 。转子动量矩越大,自转轴在空间的方向越不容易改变,陀螺仪特性表现越明显。

由于陀螺仪具有特殊结构,转子以角速度  $\vec{\Omega}$  作高速旋转时使主轴的动量矩  $\vec{H} = \vec{J}\vec{\Omega}$  远大于其他轴,以及具有三个自由度,因此陀螺仪在运动形式上与一般刚体相比较有其特异之处。下面我们将简述陀螺仪的两个基本特性。

### 1. 定轴性

假使如图 1-1 所示的陀螺仪转子绕主轴不作高速旋转,当我们缓慢地转动其基座时,由于固定环的轴承中存在着摩擦,转子及其内外环将随着基座一起转动。若给陀螺仪主轴以打击或施加一个不与主轴相平行的常值力矩作用在上述装置上,则主轴  $ox$  将沿打击力或外力矩作用方向旋转。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,并无任何特异之处。但当陀螺仪的转子绕其主轴作高速旋转时,所得到的结果则全然不同,当我们转动其基座时,则可发现陀螺仪主轴  $ox$  将保持其在空间的初始方向不变;在瞬时打击力作用下,陀螺仪主轴实际上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。上述现象称为陀螺仪的定轴性,如图 1-2 所示。应该说明的是,陀螺仪的定轴性是在没有外力矩作用条件下所表现出来的一种陀螺现象。因此,我们可以将陀螺仪的定轴性叙述为:在不受外力矩作用时,自由陀螺仪的主轴  $ox$  将保持它在空间的初始方向不变。

### 2. 旋进性

假使如图 1-1 所示的陀螺仪转子绕主轴作高速旋转,若沿水平轴  $OY$  方向作用一常值力矩  $M_y$  时,意在使陀螺仪绕  $OY$  轴旋转,但其结果是陀螺仪并不绕  $OY$  轴旋转而绕与  $OY$  轴相垂直的  $OZ$  轴旋转,其旋转方向与动量矩矢量  $\vec{H}$  和外力矩矢量  $\vec{M}_y$  的方向有关。若  $\vec{H}$  位于  $+OX$  轴,  $\vec{M}_y$  位于  $+OY$  轴,则陀螺仪主轴绕  $+OZ$  轴转动,其转动角速度称为旋进角速度  $\bar{\omega}_p$ ,绕  $OZ$  轴的旋进角速度用  $\bar{\omega}_{pz}$  表示。若  $\vec{H}$  方向不变,而  $\vec{M}_y$  位于  $-OY$  轴,则陀螺仪主轴绕  $-OZ$  轴转动。上述现象称为陀螺仪的旋进性,如图 1-3 所示。同样,陀螺仪的旋进性是在外力矩作用条件下所表现出来的另一种陀螺现象。因此,我们可以将陀螺仪的旋进性叙述为:在外力矩作用下,陀螺仪主轴的动量矩  $\vec{H}$  矢端以捷径趋向外力矩  $\vec{M}$  矢端作旋进。可记为  $\vec{H} \rightarrow \vec{M}$ 。

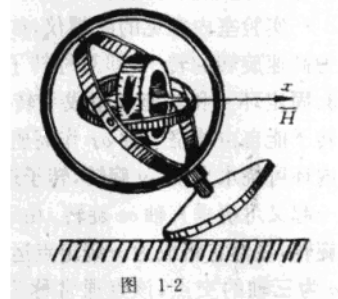


图 1-2

由上述陀螺仪的两个基本特性可以看出,它们是共存于陀螺仪之中互相矛盾的陀螺现象,正由于陀螺仪的内部存在着这种矛盾性,才促进了使其发展成为不同用途的陀螺仪表。陀螺仪的定轴性和旋进性又是可以互相转化的,其转化条件就看有外力矩的作用。无外力矩作用时,陀螺仪主轴

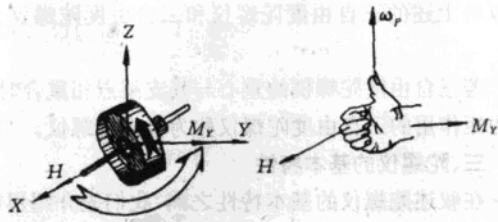


图 1-3

则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作旋进运动。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。为此,我们需要找出陀螺仪的旋进公式,用以阐明动量矩  $\vec{H}$ 、外力矩  $\vec{M}$  与进动角速度  $\bar{\omega}_p$  三者之间的关系。

### 四、旋进公式

在动力学定理中,动量矩定理对陀螺仪应用理论言之具有特别重要的意义。我们可以借助于动量矩定理将陀螺仪动量矩  $\vec{H}$  和外力矩  $\vec{M}$  联系起来。根据动量矩定理,质点系相对于某一点的动量矩矢量对时间的导数,等于作用于该质点系上各外力相对于同一点的总力矩。简言

之,动量矩矢量对时间的导数等于外力矩。亦即

$$\frac{d\bar{H}}{dt} = \bar{M} \quad (1-2)$$

公式(1-2)告诉我们,若无外力矩作用于陀螺仪时,则上式中 $\bar{M}=0$ ,显然动量矩 $\bar{H}$ 应是一个常值矢量,其大小以及在宇宙空间的指向皆应不变,从而证明了自由陀螺仪主轴的定轴性。

赖柴尔定理告诉我们:质点系相对于某一点的动量矩 $\bar{H}$ 其矢端的线速度 $\bar{u}$ 在几何上等于作用于该质点系上各外力相对于同一点的总力矩 $\bar{M}$ ,亦即动量矩矢端的线速度矢量与外力矩矢量大小相等方向相同,即

$$\bar{u} = \bar{M} \quad (1-3)$$

我们知道矢量对时间的导数也就是该矢量末端的线速度。若以 $\bar{u}$ 表示 $\frac{d\bar{H}}{dt}$ ,则(1-2)式可以写为

$$\frac{d\bar{H}}{dt} = \bar{u} = \bar{M} \quad (1-4)$$

$\bar{u}$ 的方向即陀螺仪主轴运动的线速度方向,换言之陀螺仪主轴动量矩矢端向外力矩矢端旋进。陀螺仪主轴旋进角速度 $\bar{\omega}_p$ 与线速度 $\bar{u}$ 的关系,可用下列矢量积表示,即

$$\bar{u} = \bar{\omega}_p \times \bar{H} \times \sin(\bar{\omega}_p \cdot \bar{H}) \quad (1-5)$$

当 $\bar{u}$ 、 $\bar{\omega}_p$ 和 $\bar{H}$ 这三个矢量的交角皆为直角时,并将 $\bar{u}=\bar{M}$ 代入,上式(1-5)可写成

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

(1-6)式称为陀螺仪的旋进公式,表明旋进角速度 $\omega_p$ 与外力矩 $M$ 的大小成正比,而与动量矩 $H$ 的大小成反比。当外力矩停止作用时,陀螺仪主轴的旋进即随之消失。旋进的方向可以用右手法则予以确定:我们伸出右手,使四指并拢并与大拇指成直角,四指沿着陀螺仪动量矩矢量的方向,以捷径转向外力矩矢量方向,则大拇指所指的方向便是陀螺仪旋进角速度矢量的方向(图1-3)。

### 第三节 陀螺仪的运动方程式

#### 一、常用的参考坐标系

我们讨论陀螺仪的运动,就是要确定陀螺仪主轴的运动状态以及它在空间的位置。为此,必须建立一些参考坐标系。以陀螺仪支架点 $O$ 为公共中心作三个右手直角坐标系:其一是与地球相固连的地理坐标系 $ONWZ_0$ , $ON$ 和 $OW$ 两根坐标轴位于水平面内, $ON$ 轴与地球的子午线在 $O$ 点的切线相重合并指向地球的北极; $OW$ 轴与纬线在 $O$ 点的切线相重合并指向西方; $OZ_0$ 轴与地垂线相重合,也与陀螺仪的外环轴相重合指向天顶。该坐标系实际上代表了地球的自转运动。其二是与内环相固连的陀螺坐标系 $OXYZ$ , $OX$ 轴与陀螺仪主轴相重合, $OY$ 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 $OY$ 、 $OZ$ 均在转子赤道平面内,但不参与转子绕其主轴 $OX$ 的旋转。该坐标系是用以研究陀螺仪的运动的。其三是与陀螺仪转子相固连并随同转子一起绕其主轴 $ox$ 轴旋转的动坐标系 $oxyz$ 。

陀螺仪转子为一绕定点转动的刚体。欲确定其在空间的位置必须要有三个独立的广义坐标。根据陀螺仪的结构,转子能绕 $OZ_0$ 、 $OY$ 、 $Ox$ 三轴旋转。假设在起始时刻, $Ox$ 、 $OX$ 、 $ON$ 三轴重合, $Oy$ 、 $OY$ 、 $OW$ 三轴重合, $Oz$ 、 $OZ$ 、 $OZ_0$ 三轴重合。其后转子连同内环和外环以角速度 $\dot{\alpha}$ 绕

$OZ_0$  轴转过  $\alpha$  角, 转子连同内环绕  $OY$  轴以角速度  $\theta$  绕  $OY$  轴转过  $\theta$  角, 转子以角速度  $\phi$  绕其主轴  $ox$  轴转过  $\phi$  角, 如图 1-4 所示。显然, 若  $\alpha, \theta, \phi$  为已知时, 动坐标系  $oxyz$  相对于地理坐标系  $ONWZ_0$  的位置便可确定。因此,  $\alpha, \theta$  和  $\phi$  为确定陀螺仪转子相对于地理坐标系  $ONWZ_0$  位置的三个广义坐标。 $\alpha$  角是陀螺仪主轴  $ox$  与  $ON$  轴之间的水平夹角, 表示陀螺仪主轴偏在子午面之西或之东的角度, 称  $\alpha$  角为陀螺仪主轴的方位角。 $\theta$  角是陀螺仪主轴  $ox$  与水平面  $NOW$  之间的垂直夹角, 表示陀螺仪主轴偏在水平面之下或之上的角。称  $\theta$  角为陀螺仪主轴的高度角。 $\phi$  角是  $Oy$  轴与  $OY$  轴之间的夹角, 表示陀螺仪转子绕其主轴  $ox$  所转过的角度, 称  $\phi$  角为陀螺仪转子的自转角。 $\alpha, \theta, \phi$  的符号规定为: 当观察者从  $OZ_0, OY, Ox$  的正端看到  $Ox$  及  $Oy$  轴以逆时针方向离开  $ON$  轴、 $OK$  节线及  $OY$  轴时, 这些角将为正, 反之将为负。根据此规定, 图 1-4 中的  $\alpha, \theta, \phi$  角皆为正, 亦即陀螺仪主轴指北端偏在子午面之西时  $\alpha$  为正, 偏在水平面之下时  $\theta$  为正。需说明的是, 选择  $\alpha, \theta, \phi$  三个角为广义坐标不是唯一的, 但对陀螺罗经言之, 这样的选择是最为适宜的。在陀螺仪应用理论上, 称  $\alpha, \theta, \phi$  三个角为赖柴尔角。

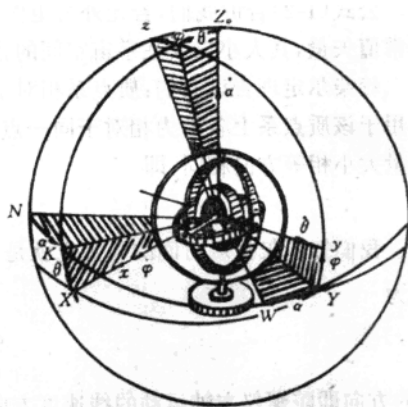


图 1-4

因陀螺罗经是用来指示地球子午线方向的一种指向仪器, 故在研究陀螺仪运动时感兴趣的仅是其主轴指北端相对于地理坐标系的方位角  $\alpha$  和高度  $\theta$ , 而对陀螺仪转子相对于地理坐标系的自转角  $\phi$  则不感兴趣。基于此想法, 在研究陀螺仪运动时, 只需采用地理坐标系  $ONWZ_0$  和陀螺坐标系  $OXYZ$ 。

## 二、陀螺仪的运动方程式

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之和。假设陀螺仪的绝对运动角速在  $OY$  轴上的投影为  $\omega_{py}$ , 在  $OZ$  轴(因  $OZ_0$  与  $OZ$  二轴间的夹角  $\theta$  很小, 故可近似地认为  $OZ_0$  与  $OZ$  两轴重合)上的投影为  $\omega_{pz}$ (图 1-5)。为了讨论在外力矩  $M$  作用下陀螺仪的运动规律, 可将外力矩  $M$  分解到  $OX, OY$  及  $OZ$  三根轴上来分别考虑, 其中  $M_x$  不会引起陀螺仪主轴的旋进, 故可以不予考虑。因  $M_y$  的作用, 使陀螺仪主轴动量矩矢端产生绕  $OZ$  轴正向的旋进, 其旋进角度  $\omega_{pz}$  的表达式为

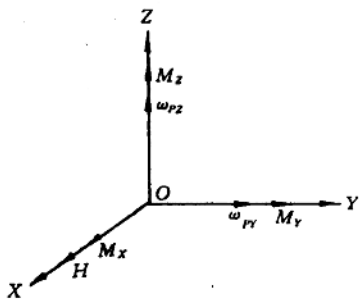


图 1-5



$$\omega_{pz} = \frac{M_y}{H} \quad (1-7)$$

因  $M_z$  的作用,使陀螺仪主轴动量矩矢端产生绕  $OY$  轴负向的旋进,其旋进角速度  $\omega_{py}$  的表达式为

$$-\omega_{py} = \frac{M_z}{H} \quad (1-8)$$

将(1-7)与(1-8)两式联立便得到陀螺仪相对于宇宙空间的实用运动方程式为

$$\left. \begin{aligned} H\omega_{pz} &= M_y \\ -H\omega_{py} &= M_z \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

(1-9)式中的  $\omega_{py}$  和  $\omega_{pz}$  是陀螺仪相对于宇宙空间的绝对运动角速度在  $OY$  和  $OZ$  轴上的分量,它应包括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。这一点是极其重要的,切不可疏忽。

#### 第四节 自由陀螺仪的视运动及其分析

在第二节中我们讨论陀螺仪的定轴性时指出,在不受外力矩作用时,自由陀螺仪的主轴将保持它在空间的初始方向不变。当我们了解了陀螺仪的定轴性后可能会提出这样的问题:既然如此,我们将陀螺仪放置在地球上。只要将主轴对准地球的真北,其后使转子作高速旋转,主轴不就保持其方向不变而一直指向地球的真北成为用于航海的陀螺罗经了吗?对此问题暂且不作回答,首先让我们观察日常生活中众所周知的现象。生活在地球上的人们,每天都能看到太阳从东方升起西方落下,其实太阳是颗恒星,并不动,而是地球绕地轴自西向东一昼夜自转一周所致。然而生活在地球上的人们,并不感到地球在自转,反而却看到太阳相对于地球在不停地运动。太阳这种早晨从东方升起傍晚自西方落下的运动,是生活在地球上的人们所看到的运动,称为太阳的周日视运动。

将自由陀螺仪放置在地球上,因受地球自转的影响,陀螺仪主轴也会作类似上述的视运动。欲使陀螺仪主轴在地球上稳定指向,则必须了解和掌握陀螺仪主轴的视运动规律。下面我们将对位于地球上的自由陀螺仪的视运动进行讨论。

##### 一、位于地球上自由陀螺仪主轴的视运动现象

###### 1. 自由陀螺仪在赤道上的视运动

将自由陀螺仪放置在赤道上,如图 1-6 所示。在起始时刻位于  $A$  点,陀螺仪主轴呈水平并自西指东,指东的主轴一端用  $a$  标记。因陀螺仪所在地的水平面随同地球一起转动,故水平面将不断地改变其在空间的位置,从而也不断地改变其相对于陀螺仪的位置。因陀螺仪具有定轴性,故随同地球自转的观察者将看到陀螺仪主轴正端  $a$  开始逐渐离开水平面而上升。经过 6h,陀螺仪位于  $C$  点,主轴正端  $a$  将与所在地的铅垂线相重合并指向天顶。其后,主轴正端  $a$  开始下降负端开始上升。经过 12h,陀螺仪位于  $E$  点,主轴呈水平,其正端  $a$  指西。其后,主轴正端  $a$  继续下降负端继续上升。经过 18h,陀螺仪位于  $G$  点,主轴正端  $a$  又将与所在地的铅垂线相重合并指向天底。其后,主轴正端  $a$  又开始逐渐上升负端开始逐渐下降。经过 24h 陀螺仪又回至起始位置  $A$  点,其时主轴又呈水平,主轴正端  $a$  又指东。不难看出,地球自转一周,置于赤道主轴呈水平自西指东的陀螺仪主轴正端  $a$  将绕与子午线平行的轴旋转一周,唯其旋转角速度的方向与地球自转角速度相反;主轴正端  $a$  的高度角改变了  $360^\circ$ 。