

组合导航系统

孙 枫 袁赣南 张晓红 编著

哈尔滨工程大学出版社

组合导航系统

孙 枫 袁赣南 张晓红 编著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书共分九章。第一、二章介绍组合导航系统发展情况及信息源分系统。第三、四章介绍组合导航数据处理基础与组合模式。第五、六章介绍组合导航计算机及信息转换、传输、接口技术。第七章介绍智能化航迹仪。第八章介绍组合导航中的航海计算。第九章介绍电子海图系统。

本书系全国高等学校船舶类统编教材。可供船舶导航及相关专业的本科生、研究生使用。也适于有关工程技术人员自学与参考。

01250/55

组合导航系统

孙枫 袁赣南 张晓红 编著

责任编辑 张笑冰

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

新华书店经销

哈尔滨毕升电脑排版有限公司排版

东北农业大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 414 千字

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

印数:1~1000 册

ISBN 7-81007-595-0

TN·8 定价:13.60 元

出 版 说 明

根据国务院国发(1978)23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”,中国船舶工业总公司负责全国高等学校船舶类专业教材编审、出版的组织工作。

为了做好这一工作,中国船舶工业总公司相应地成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”、“水中兵器”五个教材小组,聘请了有关院校的教授、专家 60 余人参加工作。船舶类专业教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的专家组织,其任务是做好高等学校船舶类专业教材的编审工作,为提高教材质量而努力。

在总结前三轮教材编审、出版工作的基础上,根据国家教委对“八五”规划教材要“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理体制,加强组织领导”的要求,船舶总公司于 1991 年又制定了《1991~1995 年全国高等学校船舶类专业规划教材选题》。列入规划的选题共 107 种。

这批教材由各有关院校推荐,同行专家评阅,教材委员会(小组)评议,完稿后又经主审人审阅,教材委员会(小组)复审,然后分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及有关高等学校的出版社出版。

为了不断地提高教材质量,希望使用教材的单位和广大师生提出宝贵意见。

中国船舶工业总公司教材编审室

1992 年 5 月

前 言

本书系高校船舶类专业“八五”规划教材选题之一,根据“惯性导航及仪器”教材组通过的“组合导航系统”大纲编写的,供高等院校有关专业本科生、研究生及从事组合导航工作的技术人员学习时使用,讲授约需 36 - 54 学时。

现代组合导航系统是随着电子计算机技术,特别是微机技术的迅猛发展和现代控制理论的进步,在航海、航空及航天等领域发展起来的。将过去单独使用的各种导航设备通过计算机有机地组合在一起,应用卡尔曼滤波等数据处理技术,发挥各自特点,取长补短,使系统导航的精度、可靠性和自动化程度都大为提高,成为当前导航技术的发展方向之一。国内外都已先后推出了多种系列的组合导航系统,并普遍装备各种类型舰船,成为最重要最基本的导航系统。我国组合导航系统研制起步于 70 年代末,十几年来发展较快,研制出了多种适用于大、中、小型舰船的组合同航系统。为适应更新教学内容的需要,也为了适应组合导航系统科研、生产和使用的要求,我们结合十几年来的组合导航科研、生产与教学的实践,撰写了本书,以便较系统、全面地将组合导航系统的原理、分析与设计等内容介绍给读者。

本书共九章。第一、二章介绍组合导航系统发展情况及信息源分系统。第三、四章介绍组合导航数据处理基础与组合模式。第五、六章介绍组合导航计算机及信息转换、传输、接口技术。第七章介绍智能化航迹仪。第八章介绍组合导航中的航海计算。第九章介绍电子海图系统。

本书由孙枫、袁赣南、张晓红同志共同编著,孙枫同志任主编。第一、三、四、五、九章由孙枫编写,第六章由袁赣南编写,第二、七、八章由张晓红编写。海军工程学院张崇伟教授主审了全书。他对书稿提出了许多宝贵意见和建议。哈尔滨工程大学郝燕玲教授在本书编写中给予了大力支持与指导。在此,对他们表示衷心的感谢。

组合导航技术在飞跃发展,由于编著者水平所限,不足与错误之处在所难免,谨请读者批评指正。

编著者

1995 年 3 月于哈尔滨工程大学

目 录

1	绪 论	(1)
1.1	概述	(1)
1.2	国内外组合导航系统发展情况	(3)
2	组合导航系统信息源分系统介绍	(6)
2.1	陀螺罗经、平台罗经	(6)
2.2	计程仪	(12)
2.3	惯性导航系统	(17)
2.4	无线电导航系统	(22)
2.5	全球定位系统 GPS	(28)
2.6	导航雷达	(33)
2.7	气象仪	(38)
3	组合导航系统数据处理基础	(39)
3.1	状态估计问题及其分类	(39)
3.2	离散线性系统的卡尔曼滤波	(40)
3.3	离散线性系统最优滤波的几个问题	(48)
3.4	滤波的稳定性	(53)
3.5	衰减记忆滤波	(54)
3.6	常值增益次优滤波	(57)
3.7	自适应滤波	(58)
3.8	非线性系统的滤波方法	(61)
4	组合导航系统的组合模式	(66)
4.1	推算船位为基础的组合模式	(66)
4.2	基于惯导系统的组合模式	(87)
5	组合导航计算机	(105)
5.1	组合导航计算机的基本组成	(105)
5.2	组合导航计算机输入/输出可编程 接口芯片	(110)
5.3	组合导航计算机中断系统	(116)
5.4	分布式组合导航计算机	(124)
6	导航信息转换、传输及接口技术	(133)
6.1	自整角机/旋转变压器-数字转换	(133)
6.2	导航信息模-数转换	(159)
6.3	数字信息传输及接口模块	(170)

6.4	组合导航系统数字信号传输与接口	(181)
7	智能化航迹仪	(190)
7.1	航迹仪的发展与现状	(190)
7.2	智能化航迹仪微机系统	(194)
7.3	步进电机控制	(200)
7.4	航迹仪微机操作系统	(209)
7.5	绘图软件数学模型及误差分析	(217)
8	组合导航系统中的航海计算	(220)
8.1	舰船船位推算法	(220)
8.2	地文导航算法	(224)
8.3	天文导航算法	(230)
9	电子海图系统	(239)
9.1	电子海图的特点及主要功能	(239)
9.2	电子海图显示系统的组成	(241)
9.3	电子海图数字化	(249)
9.4	电子海图的显示	(262)
	主要参考文献	(267)

1 绪 论

1.1 概 述

现代组合导航系统是本世纪 70 年代在航海、航空与航天等领域随着现代高科技的发展应运而生的。但是,组合导航的技术思想则从我国古老的航海术中已经体现出来。

北宋宣和元年(1119 年)朱彧著的“萍洲可谈”一书中记载有:“舟师试地理、夜则观星、昼则观日、阴晦观指南针”。就是说当时的航海家用地文航海术、天文航海术(白天测太阳、夜晚测星体),在阴天见不到太阳时用磁罗经进行定向导航。从有文字记载的历史中可以看出我国是最早综合应用各种航海术(天文、地文和仪表等导航)的国度之一。

本世纪初(1908 年),为了完成潜水艇北极航行计划,由于磁罗经在潜水艇内因地磁力线为潜水艇铁壳所屏蔽不能工作,德国人安休茨为此研制成功了世界上陀螺家族中的第一台精密(惯性级)陀螺仪器——航海陀螺罗经。之后,经半个世纪的发展,陀螺仪表中的最高水平代表——航海惯性导航系统在美国麻省理工学院德雷珀(Draper C. S.)实验室诞生。1958 年配备 N6A 型惯导的潜艇首次水(冰)下航行通过北极。无线电导航在本世纪 30 年代第二次世界大战期间开始问世。最早的无线电导航设备是技术上最简单的无线电测向仪。雷达也是第二次世界大战中为军事用途由英国发明的。半个多世纪以来无线电导航技术有着惊人的发展。低频中远程脉冲相位双曲线系统劳兰 C、甚低频超远程双曲线导航系统奥米加相继研制成功。卫星导航的第一代产品是 1965 年的子午仪,它使导航系统进入了宇宙空间。全球全天候自动精确三维定位导航的全球定位导航系统(GPS)的研制成功是导航技术上的一次革命。大到舰船、飞机,小到汽车甚至单兵作战也用了全球定位系统。百年来不仅陀螺导航技术、无线电导航技术呈现出百花争奇斗艳的局面,其他水声导航、气象导航等也涌出许多设备。它们为组合导航提供了众多讯息源的基础。

随着电子计算机技术特别是微机技术的迅猛发展和现代控制系统理论的进步,从 70 年代开始组合导航技术开始迅猛发展起来。过去单独使用的各种导航设备,通过微型电子计算机有机地组合到一起,发挥各自特点、扬长避短,加之使用卡尔曼滤波技术等数据处理方法,使系统导航能力、精度、可靠性和自动化程度大为提高,成为目前导航技术发展的方向之一。我国是从 70 年代末 80 年代初开始研究组合导航技术的。目前已有成熟的技术可应用于各种类型的军用与民用的舰船上。

总之,组合导航系统是组合不同特点的导航设备与导航方法,应用计算机技术对多种导航信息进行综合处理,以提高系统性能的导航系统。它是一种综合工程技术,涉及到各导航讯息源的许多设备的有关技术,计算机技术、显示技术以及控制系统、数据处理等理论。将这些内容有机地组织起来作为一门学科来加以研究与介绍是本书的目的。

表 1-1 常用导航设备性能对照表

名称	频段	覆盖范围	定位时间	输出数据	精度	优缺点
惯性导航		全球		经纬度,航向,航速,纵摇,横摇	定位精度为 0.4~0.7n mile(10h)航向误差 1'以内,水平误差 5"~8"	自主式,有航向、航速、位置姿态输出,能长期水下潜航;有积累误差,造价高
卫星导航	150MHz 400MHz	全球	定位时间 8~15min, 定位间隔平均 1.5~2h	经纬度	50m 圆概率(双频),128m(单频)	精度高,使用范围广,全球,全天候;不能连续定位,需要推算法支持,不能入水,造价中等
天文导航		全球	40s	经纬度,航向修正量	1n mile	精度有限,受气候限制
奥米加导航仪	10.2MHz 11.3MHz 13.6MHz	全球	搜索约 3min 连续跟踪	经纬度	1~2n mile	全球全天候,水下接收,水下深度可达 12~15m,造价低;精度有限,有多值性
劳兰 C 导航仪	100kHz	1200n mile 覆盖北半球海域的 2/3	搜索约 3min 连续跟踪	经纬度	0.25~1.2n mile	精度高,无多值性,使用范围广;造价中等,覆盖区不够大,入水较浅
全球定位系统 (导航星)	1227MHz 1575MHz	全球	连续定位	绝对三维位置,速度,时间	P 码: 水平方向 7m,垂直方向 9m,速度 0.1m/s, 时间 15m μ s; C/A 码: 水平方向 25m,垂直方向 35m,速度 0.1m/s,时间 10m μ s	精度高,连续定位,多用性好,陆海空军军民共用;造价中至高等

我们列表(见表 1-1)给出几种常用导航设备的性能并指出它们的优缺点。由表可知:惯性导航具有优良的工作特性,能连续提供定位和姿态等多种导航信息,但是误差随时间积累增加,不能单独长期工作,必须不断加以校准;且系统造价高昂,限制了它的应用范围。卫星导航提供的船位信息精度高,且在全球范围内都可以得到;但是卫星定位信息存在几何精度系数好坏影响精度及受制于人的问题。无线电定位信息连续,长期稳定,剪度高;但是受区域、时间和气候影响较大;其庞大的岸台也易被干扰和摧毁。因此,任何一种导航设备的性能和应用范围都有一定的局限性,不可能完全满足现代各种舰船的导航要求。为了实现高精度,高可靠性,全球、全天候和水上水下连续定位的导航,途径之一是把些单一的导航设备组合起来,构成一个有机的整体,形成组合导航系统。组合导航系

统的应用已成为近代自动化舰船的重要特征。

1.2 国内外组合导航系统发展情况

组合导航技术始于宇航,70年代开始在航海事业中得到发展。随着舰船现代化程度不断提高,不仅要求提供准确的船位讯息,而且要求导航系统和武器装备、测量系统相结合,提供武器发射的精确位置和落点测量等各种数据;并且舰船在航行、操纵、定位、避碰等方面所遇到的自动化和系统化的新课题,也只有依靠组合导航技术才能完成。计算机技术的飞速发展和卡尔曼滤波技术的应用,为舰船组合导航系统的实现提供了现实基础。

组合导航系统的发展也是一个从比较简单到复杂、从用处较少到多用途、从灵活性较少到较多的过程。

初期组合导航系统的组合模式如图 1-1 所示。

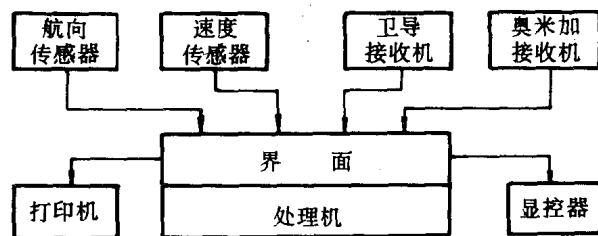


图 1-1 初期组合导航模式图

这类系统通常由陀螺罗经或平台罗经测得航向,由电磁计程仪或多普勒声纳测定航速进行推算舰位,并用卫导(子午仪)、劳兰 C 或奥米加等对推算舰位进行校准,这样就构成了组合导航系统。这类系统一般都采用简单的滤波技术和加权平滑处理等。它通常用于先进的水面战斗舰艇、远洋运输船、近海作业船等。它的典型系统如美国美乐华公司生产的 MX1105 卫导/奥米加组合导航仪。

随着各类舰船应用范围不同,实现全船自动化的自动航行系统与高精度组合导航系统相继研制投产。

自动航行系统的组合模式如图 1-2 所示。它通常由陀螺罗经、计程仪构成推算船位系统,并由卫导、劳兰 C 和奥米加接收无线电定位讯息对其进行校准。为了安全,引入雷达讯息构成的避碰子系统,为了减轻船员体力负担与航行经济性设有自动操舵与数据航行子系统。这是一种大型的组合导航系统。通常由数据定位、数据航行、数据操舵、数据分配装载以及导航控制台等各子系统组成,因此通常又称数据桥(Data Bridge)。它除执行导航功能外,还可控制船舶的避碰信息、天文数据、海图绘制及燃料消耗。这类系统主要用于巨型油轮、集装箱船等大型远洋货轮船。它的典型系统如日本的 IHI 数据桥组合导航系统。

高精度组合导航系统的组合模式如图 1-3 所示。它是以惯导为中心,以 GPS、无线电导航、多卜勒声纳等多种手段组合而成。组合处理技术采用卡尔曼滤波器。它代表着目前最先进的舰船组合导航系统的水平。目前在世界上有 100 多个这类系统在导弹核潜艇、各

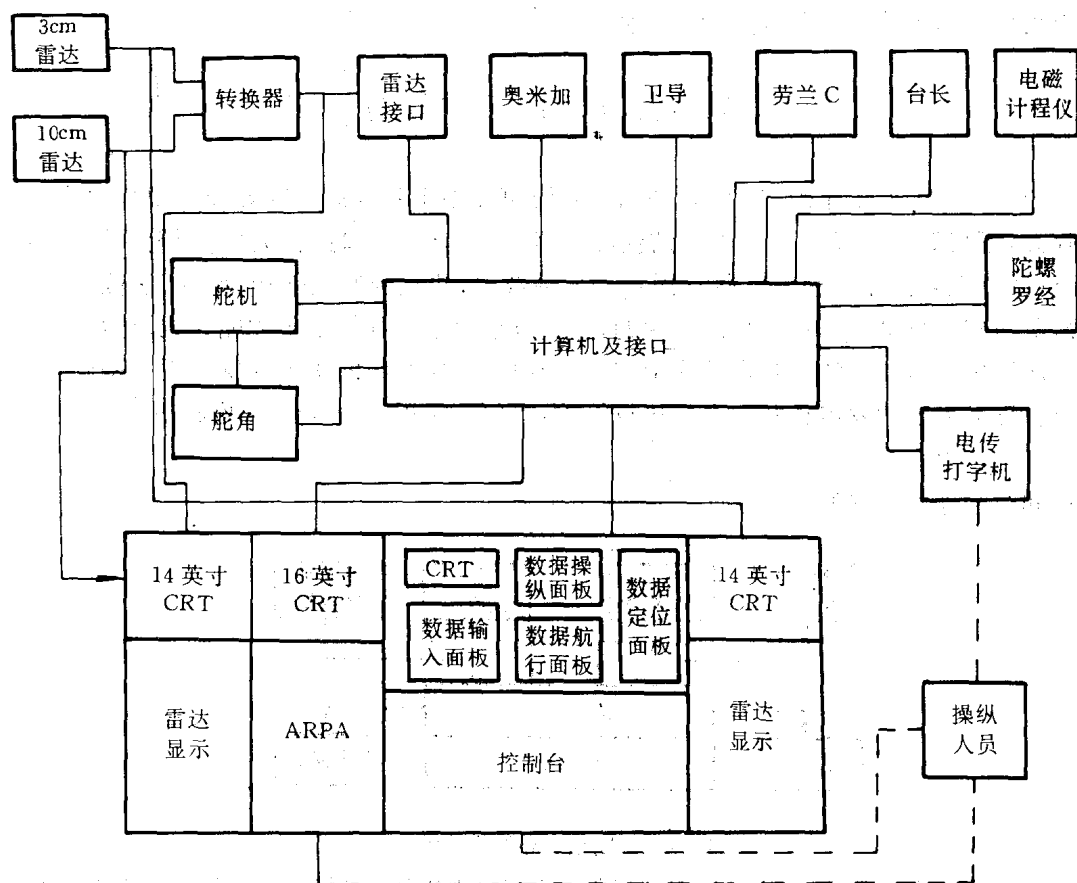


图 1-2 自动航行系统模式图

种测量船与石油勘探船等要求定位精度高的舰船上应用。它的典型系统是美国利顿公司的 WINS 组合导航系统。

我国舰船组合导航系统的研究起步于 70 年代末,经十多年的努力,现在发展很快,已广泛用于舰艇、测量船及其它船舶。与之有关的科研工作还在深入进行,并正在赶超世界先进水平。

组合导航发展趋势是日益小型化、数字化、全自动化及多功能化。它能实现自动检测、自动转换、自动报警、自动纪录以及自动标绘与打印等。系统采用多功能、多模式的体制,即将多种传感器、多模式工作方式及模式自动转换、滤波和逻辑职能计算技术、自动控制系统理论应用结合为一个整体,形成集成化组合导航系统。全舰讯息系统、操纵指挥系统整体自动化是舰船的发展趋势。它就是将组合导航系统与其他系统如自动航行系统、避碰系统、舰船控制系统及通讯监视、作战指挥系统等组合到一起,以完成导航以外的更广泛的功能。此外,美国第二代卫星导航的导航星全球定位系统 GPS 已于 1994 年布满了 18 颗星并正式投入使用。由于它能连续三维定位,精度高,全球全天候使用,又具有提供速度、时间信息等独特优点,因而以惯性导航和 GPS 为核心的组合导航,将使组合导航技术跨入一个新的时代。

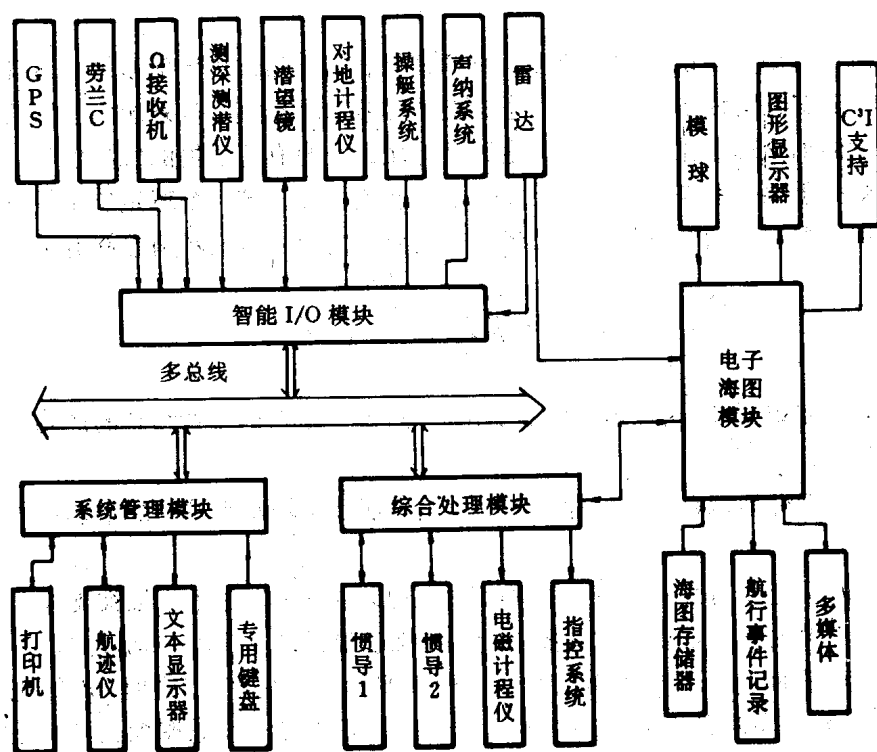


图 1-3 高精度组合导航系统模式图

2 组合导航系统信息源分系统介绍

组合导航信息源分系统的种类繁多，有精密仪表类，如惯性导航系统、陀螺罗经和计程仪等；有无线电仪表类，如劳兰 C、全球定位系统和雷达等。从系统大小繁简来看差别也很大，大的如全球定位系统上至太空下至地面；小的有可手提的气象仪表。所以我们介绍的原则是重要分系统着重介绍，如与陀螺有关的分系统，全球定位系统等。介绍中以基本原理为重点，细节省略，令读者知其概貌。需深入研究者请参阅有关专著。

2.1 陀螺罗经、平台罗经

我们先介绍陀螺罗经，陀螺垂直仪的工作原理，再介绍它们二者结合的产物——平台罗经的工作原理。

陀螺罗经原理分地球自转对陀螺的影响及具有摆性主轴水平陀螺的指北过程二步说明。

设陀螺仪的位置如图 2-1 所示。陀螺壳体（内装转子）通过水平轴被支撑于内框架上，而内框架又被支撑于垂直轴上。图中所示陀螺已经是绕垂直轴转动过的。因此，包含自转轴的垂直平面顺时针方向偏离南北（子午）平面一个角度 γ 。同时，陀螺也已经绕水平轴转动，自转轴靠北的一端向上跷起一个 α 角。设框架轴承没有摩擦且陀螺是完全平

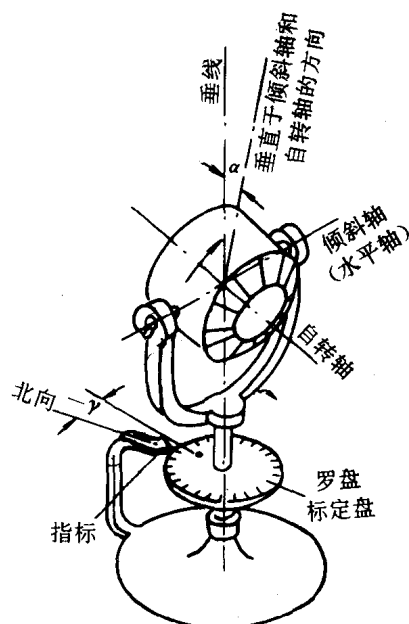


图 2-1 陀螺在地理坐标系上示意图

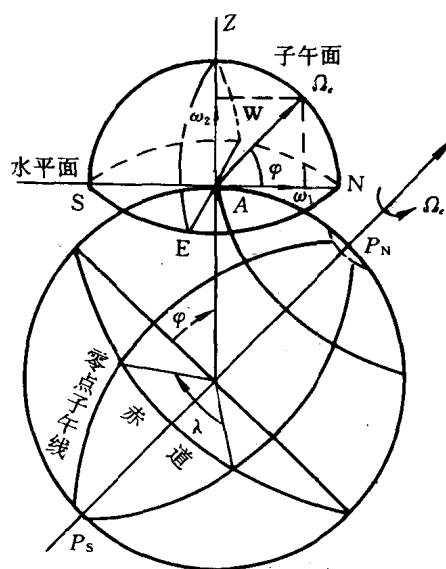


图 2-2 地球自转角速度的分解图

衡的，那么自转轴在惯性空间将保持某一指向不变。但是地球自转将引起陀螺与地球之间产生相对运动。随着地球一起运动的人们并不感到地球在自转，只看见陀螺在运动，这就是我们所说的视运动。我们可以确定地球自转角速度并分解它至陀螺自转轴、水平内框轴与垂直外框轴上。

陀螺仪是一种以惯性空间为基准的仪表，有必要按恒星速率计算，即地球每年转 366 周。地球恒星速率 Ω 等于 $15.0411^\circ/\text{h}$ 或 $7.29211 \times 10^{-6} \text{rad/s}$ 。在任何纬度处，地球自转角速度可以分解成垂直分量和水平分量（见图 2-2）。在任何一个纬度 φ 处，其垂直分量 ω_2 和水平分量 ω_1 是：

$$\omega_2 = \Omega \sin \varphi \quad (2-1)$$

$$\omega_1 = \Omega \cos \varphi \quad (2-2)$$

由图 2-2 可以看出，地球自转角速度的垂直分量 ω_2 ，将令子午面 (NZS) 绕垂直轴 AZ 转动，子午面的北半平面上的北端 N 点不断地向西 (W) 点转动。地球自转角速度的水平分量 ω_1 将令水平面 ENWS 绕 SN 转动，其东半平面不断地向下倾斜，而西半平面不断地向上升起，即产生“东降西升”现象。

我们将地球自转角速度分解至陀螺的自转轴、内框轴与外框轴上，如图 2-3 所示。地球自转水平分量 $\Omega \cos \varphi$ 分解为两个互相垂直的分量： $-\Omega \cos \varphi \sin \gamma$ 沿着内框轴； $\Omega \cos \varphi \cos \gamma$ 沿着自转轴在水平面上的投影方向上。再将 $\Omega \cos \varphi \cos \gamma$ 分解至自转轴上，分量为 $\Omega \cos \varphi \cos \gamma \cos \alpha$ ；分解至垂直于自转轴与内框轴的轴上，分量为 $\Omega \cos \varphi \cos \gamma \sin \alpha$ ，其方向朝下。地球自转垂直分量 $\Omega \sin \varphi$ 分解至自转轴上的分量为 $\Omega \sin \varphi \sin \alpha$ ；分解至垂直于自转轴与内框轴的轴上，分量为 $\Omega \sin \varphi \cos \alpha$ ，其方向朝上，它与水平分量所引起的分量 $\Omega \cos \varphi \cos \gamma \sin \alpha$ 方向相反。

由上分析可总结地球自转角速度沿三根轴上的分量分别为：

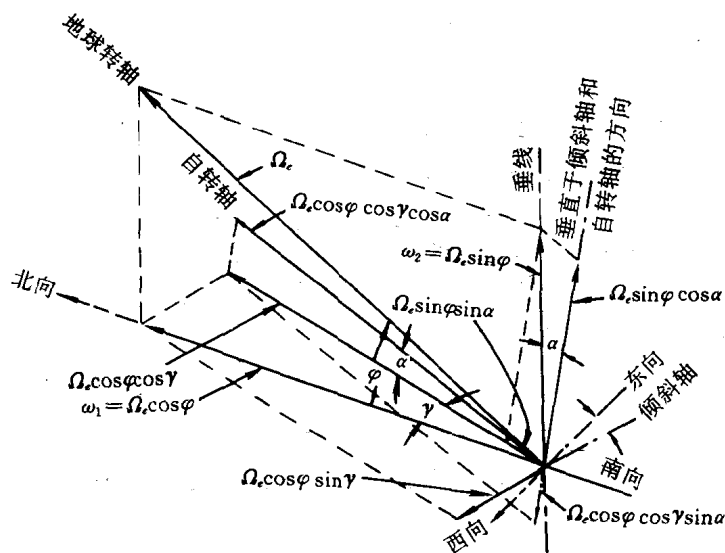


图 2-3 地球自转角速度分解在陀螺三轴上示意图

$$\text{自转轴: } \Omega \cos \varphi \cos \gamma \cos \alpha + \Omega \sin \varphi \sin \alpha \quad (2-3)$$

$$\text{内框轴: } -\Omega \cos \varphi \sin \gamma \quad (2-4)$$

垂直于自转轴与内框轴的轴:

$$\Omega \sin \varphi \cos \alpha - \Omega \cos \varphi \cos \gamma \sin \alpha \quad (2-5)$$

地球自转角速度沿自转轴分量与陀螺自转角速度相比是完全可以忽略的, 因为陀螺自转角速度一般为10000r/min左右, 而地球自转角速度即使陀螺自转轴与它平行时一天也才只有一转。

陀螺罗经工作过程中角 α 通常都是很小的, 所以式(2-5)的第二项也是可以忽略的, 它的第一项中的 $\cos \alpha$, 这时可等于1。因此, 式(2-5)所表示的轴就近似于垂直轴(外框轴)了。

角 γ 表示陀螺罗经的方位误差角, 它一般也不太大, 它是我们研究的主要对象, 故 $\sin \gamma = \gamma$, $\cos \gamma = 1$ 。

这样, 简化后的分量为:

$$\text{内框轴: } \gamma \Omega \cos \varphi \quad (2-6)$$

$$\text{垂直轴: } \Omega \sin \varphi \quad (2-7)$$

当然在 α 、 γ 不是小角的情况下, 还是要应用式(2-4)与式(2-5), 并且即使在小角度情况下, 如果要求精度高时, 例如工作在方位仪工作状态, 陀螺主轴不完全水平时, 也要考虑式(2-5)的第二项。当角 γ 不是小角时, $\sin \gamma$ 不能以 γ 代替。这时陀螺罗经方程则变为非线性的了, 只能以椭圆积分求解。其结果是振荡周期比线性情况的长了。

一般情况, 我们考虑式(2-6)与式(2-7)就足够了。它说明主轴接近水平的平衡陀螺相对于子午面与水平面的视运动。归结如下:

① 陀螺主轴相对于子午面的视运动。地球自转垂直分量沿垂直轴(外框轴)的分量 $\Omega \sin \varphi$ 使子午面NZS绕垂直轴AZ转动, 其结果使得随同地球自转的观察者却看到位于北纬 φ 处的陀螺仪主轴北端以相同角速度不断地向东偏离子午面而改变其方位角 γ 。因此, 陀螺仪主轴相对于子午面的视运动角速度为 $-\omega_z = -\Omega \sin \varphi$ 。在南纬度区的情况反之。我们也可从公式中体会出来, 因在南纬度区的 φ 应为负, 故 $-\omega_z = -\Omega \sin(-\varphi) = \Omega \sin \varphi$ 。

对于知道舰船经纬度的情况下, 该分量是容易补偿的。即沿内框轴加一力矩 M_H , 令

$$M_H = -H \Omega \sin \varphi \quad (2-8)$$

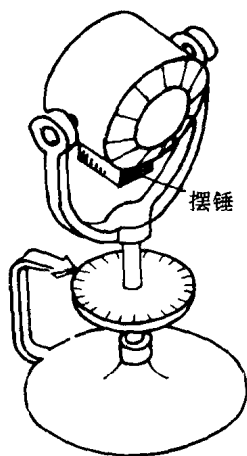
在北纬, 该水平补偿力矩令陀螺主轴逆时针进动, 而在南纬则反之。在方位仪与陀螺罗经中都应当加这种补偿, 即所谓纬度修正。工程实现可采用沿自转轴方向加配重或在电控陀螺罗经中由计算机计算出修正力矩值来加以补偿。

② 陀螺主轴相对于水平面的视运动。地球自转水平分量沿内框轴分量 $r \Omega \cos \varphi$ 是令陀螺主轴高度角 α 发生变化的角速度。若陀螺主轴偏在子午面之东时, 主轴以 $r \Omega \cos \varphi$ 角速度上升; 主轴偏在子午面之西时, 则下降。即东升西降。这个地球自转角速度沿内框轴分量 $-r \Omega \cos \varphi$ 就是使自由陀螺变成会指北的陀螺罗经的决定原因。

最后, 我们给出式(2-6)与式(2-7)的一个计算数字, 使读者有一个定量的概念。如陀螺在纬度 40° 处且偏离子午面 1° , 则陀螺绕内框轴的俯仰角速度, 即东升角速度为 $0.01745 \times 15.04 \times 0.766$ 等于 $0.201^\circ/\text{h}$ 。方位变化角速度为 15.04×0.643 等于 $9.67^\circ/\text{h}$ 。

2.1.1 罗经指北原理

我们先介绍古典的机械摆式陀螺的指北原理，再介绍现代的电控罗经如何等效于古典的罗经。



主轴水平的陀螺，如在其陀螺房下，以机械固连一重物——摆，如图 2-4 所示，则将使自由陀螺变成能找北的陀螺罗经。我们首先看这时的摆性所起的作用。假定陀螺北端在子午面东边如图 2-1 那样，则地球自转产生的 $-r\Omega\cos\varphi$ 将引起它东升，产生了角度 α 。这时所形成的绕内框轴的摆性力矩 M_H 为：

$$M_H = -M_p \sin\alpha$$

式中 α 是主轴俯仰角； M_p 是陀螺最大摆力矩 ($M_p = mgl$)； m 为陀螺房的质量； g 为重力加速度； l 为陀螺房重心 G 到内外框架支撑中心的距离。当 α 为小角时，有：

$$M_H = -M_p \alpha \quad (2-9)$$

陀螺自转方向如图 2-1 所示，式 (2-9) 等号右边负号表示当主轴在子午面东边，因东升使其摆力矩 M_H 沿内框轴指西，则陀螺向子午面进动；反之，如起始时主轴在西边，则因西降而摆力矩沿内框轴指东，故也使陀螺向子午面方向进动。

上述陀螺与摆的关系是摆在陀螺之下，故称为下摆式罗经。可以想象，如果摆在陀螺之上的上摆式结构，只要陀螺改变一下自转方向，结果也就与下摆式一样。它也使陀螺引向子午面，应用水银连通器为摆的斯伯利罗经即是典型的上摆式罗经。

下面介绍现代电控罗经的原理。自动控制技术的发展和自动元器件质量的提高，使人们将上述摆与陀螺的机械连接改变为电的连接，如图 2-5 所示。由地球自转轴引起陀螺主轴倾斜时，陀螺壳体上的摆元件输出信号至放大器，经放大后加到内框轴上的力矩电机。它产生力矩使陀螺向子午面进动。这效果与机械连接的一样。其过程就不赘述了。现代高精度的陀螺罗经都是这种电控罗经。

陀螺加摆性，形成了有指北的能力。但它形成绕子午面无阻尼自由振荡的过程时，需要加阻尼使它逐渐稳定在子午线上。阻尼方法有垂直阻尼与水平

阻尼，这里我们只介绍垂直阻尼方法。陀螺罗经无阻尼振荡的轴端轨迹如图 2-6 所示。该椭圆轨迹的长短轴之比为常数，它只与其结构参数有关。我们只要绕长轴或短轴之一设法产生一附加阻尼力矩，即可使轨迹沿水平方向或垂直方向压缩，达到阻尼的目的。阻尼力矩作用于水平轴或垂直轴，我们称之为水平阻尼法或垂直阻尼法。

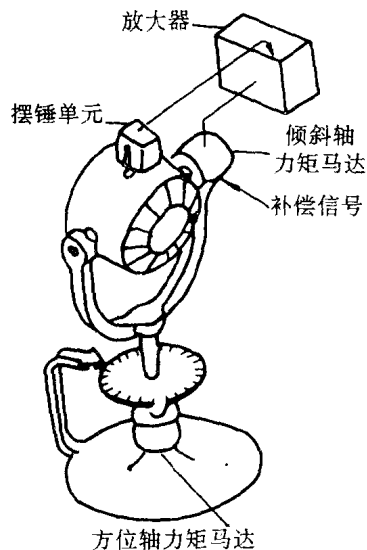


图 2-5 摆与陀螺的电连接图

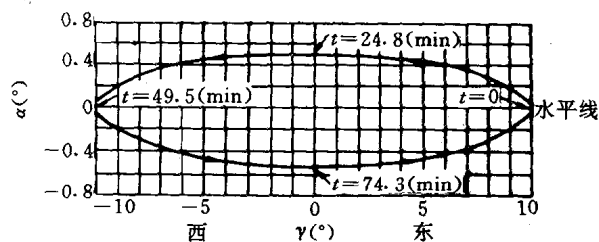


图 2-6 陀螺罗经无阻尼轨迹曲线图

垂直阻尼的电控罗经结构如图 2-7 所示。它是在图 2-5 的基础上增加一垂直阻尼回路而形成的。在陀螺壳体上的摆元件输出一比例于陀螺俯仰角的电信号。经放大后分别加于内框轴与垂直轴的两个力矩电机上。前者使其成为无阻尼振荡状态，后者则成为垂直阻尼力矩。它经过一适当的电位器来选取适当比例的阻尼力矩（约为 M_p 的 $1/20 \sim 1/30$ ）。其阻尼轨迹见图 2-7。

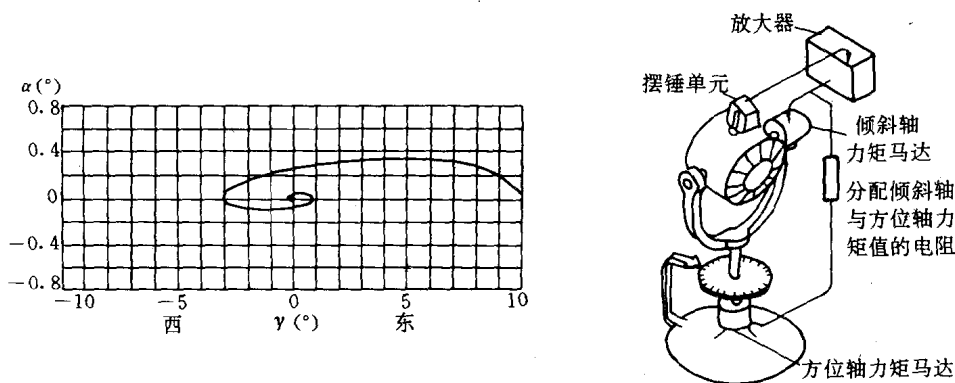


图 2-7 垂直阻尼陀螺罗经及轨迹图

以电连接代替机械连接的现代罗经有以下优点：首先是电连接容易切断电控回路，使舰船加速时摆元件产生的误差讯号不作用于陀螺上，这样陀螺就会产生进动引起误差。其次是可用电控回路改变其电阻值进而改变阻尼的大小，这样可以调节稳定到子午线的快慢。电控罗经是平台罗经的基础。

2.1.2 陀螺垂直仪指示垂线的原理

在静止的航行器上，用摆锤就可以指示铅垂线，在航行器作加速度运动或摇摆时，摆锤会产生振动，不能准确地指示出铅垂线。在不考虑哥氏和离心加速度时，上述振动的长期平均位置是真垂线，所以摆锤具有指示垂线的能力。由于陀螺具有角动量惯性大的特点，故有较强的抗干扰能力。当然，它只是对惯性空间保持定向，没有指示当地垂线的能力。将这二者结合起来即可得出既指示垂线又不受航行器作加速或摇摆影响的陀螺垂直仪。常见的陀螺垂直仪，如图 2-8 所示。它的转子轴指向垂线方向，内外环保证了陀螺转子自转轴指向不受舰船纵横摇的影响。

作为摆元件可以有许多方案，如电磁摆，导电液水准仪式摆，水银连通管液体摆等。平台罗经上目前所用的是高精度的加速度计。在修正原理上，它们是相同的。我们以图