

陀螺仪原理及应用

陆恺 罗超 吴健中 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系“陀螺导航仪器”专业教学用书。全书共八章，其内容包括陀螺仪的特性及应用简介；陀螺仪基本理论，陀螺摆及陀螺地平仪原理；陀螺方位仪的工作原理和误差分析；单转子液体连通器罗经和双转子摆式罗经的指北原理，误差分析和非周期条件；随机干扰下双转子摆式罗经和电控罗经的摇摆误差；陀螺地平罗经的工作原理和调整条件；挠性陀螺原理及挠性陀螺罗经。在陀螺稳定系统方面介绍了稳定系统的分类，单轴动力陀螺稳定系统的工作原理和系统分析，单轴积分陀螺稳定系统的工作原理和系统分析以及双轴三轴陀螺稳定系统的结构特点、工作原理和系统分析。本书可供高等院校陀螺导航仪器专业作为教学用书，也可供从事陀螺导航仪器设计制造和科学研究工作的技术人员、科研人员以及有关专业的研究生参考。

陀螺仪原理及应用

陆恺 罗超 吴健中 编著

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 22¹/₂ 525 千字

1981年7月第一版 1981年7月第一次印刷 印数：0,001—2,000册

统一书号：15034·2213 定价：2.30元

目 录

第一章 陀螺仪的特性及其应用简介	1
§ 1 陀螺仪的定义及基本特性	1
§ 2 几种二自由度及单自由度陀螺仪的原理结构	2
§ 3 地球自转及地理坐标系在惯性空间的运动	6
§ 4 陀螺地平仪工作原理简介	6
§ 5 陀螺方位仪工作原理简介	7
§ 6 陀螺罗经工作原理简介	8
§ 7 陀螺稳定系统简介	10
§ 8 平台罗经及惯性导航简介	11
第二章 陀螺仪基本理论	14
§ 1 陀螺仪的进动和陀螺力矩	14
§ 2 动量矩定理, 刚体绕定点运动的欧拉方程式	20
§ 3 无外力矩作用时刚体绕定点运动的几何描述及其绕主轴旋转的稳定性	26
§ 4 利用欧拉方程建立框架陀螺的运动方程式	31
§ 5 第二类拉格朗日方程式, 利用第二类拉氏方程建立陀螺仪的运动方程式	34
§ 6 陀螺仪的技术方程式, 利用动静法建立陀螺仪的技术方程式	40
§ 7 脉冲力矩对陀螺仪的影响, 陀螺仪的章动及其物理实质	43
§ 8 在常值力矩作用下陀螺仪的运动	48
§ 9 陀螺仪的进动方程及其建立方法	49
§ 10 二自由度框架陀螺的章动漂移	52
§ 11 几种典型干扰力矩对框架陀螺的影响	57
第三章 陀螺地平仪	65
§ 1 导航上几种常用的坐标系和坐标变换	65
§ 2 地球自转及无定位陀螺仪的视运动	70
§ 3 陀螺摆	75
§ 4 具有径向修正的陀螺地平仪	88
第四章 陀螺方位仪	101
§ 1 陀螺方位仪的工作原理	101
§ 2 陀螺方位仪的误差	104
§ 3 舰船摇摆所造成的误差及其补偿办法	110
§ 4 利用陀螺方位仪导航的特点	118
第五章 单转子液体连通器罗经	120
§ 1 使无定位陀螺成为罗经的方法	120
§ 2 液体连通器罗经的无阻尼摆动	124
§ 3 液体连通器罗经的阻尼摆动	128
§ 4 基座运动对陀螺罗经的影响	132
§ 5 陀螺罗经的第一类和第二类冲击误差	140

§ 6	陀螺罗经的一、二类冲击误差的合成	153
§ 7	罗经灵敏部分绕 OX 轴的转角对罗经的影响	161
§ 8	陀螺罗经的摇摆误差及其消减办法	166
第六章	双转子摆式罗经	176
§ 1	陀螺球在静基座上的进动方程式及无阻尼摆动	176
§ 2	陀螺球的阻尼摆动	184
§ 3	基座运动对陀螺球的影响, 陀螺球的速度偏差和冲击误差	193
§ 4	陀螺球的第二类冲击误差	205
§ 5	陀螺球的一、二两类合成冲击误差及误差积累	211
§ 6	双转子罗经的非周期条件, 陀螺地平罗经	218
§ 7	陀螺球的摇摆误差	227
第七章	电控二态罗经原理	241
§ 1	电控二态罗经简述	241
§ 2	静止基座上电控罗经的运动	242
§ 3	基座运动对电控罗经的影响	254
§ 4	挠性陀螺原理和挠性陀螺罗经简介	271
第八章	陀螺稳定系统	285
§ 1	陀螺稳定系统的分类及其基本工作原理	285
§ 2	动力陀螺稳定系统	289
§ 3	浮子式积分陀螺稳定系统	307
§ 4	二自由度陀螺稳定系统及其他新型陀螺稳定系统	327
§ 5	双轴陀螺稳定平台	330
§ 6	三轴陀螺稳定系统	345
参考文献	353

第一章 陀螺仪的特性及其应用简介

§ 1 陀螺仪的定义及基本特性

在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刚体，借助于悬挂装置，刚体的自转轴能改变其在空间所指的方向。因此，在技术上陀螺仪一词可理解为高速旋转的对称刚体及其悬挂装置的总称。所谓刚体绕自转轴高速旋转，亦即在一般情况下刚体的自转角速度应远大于刚体绕不与自转轴相平行的其他轴的旋转角速度。刚体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。

高速旋转的刚体为陀螺仪的旋转部分，亦称转子。由于它是一个对称刚体，因此相对于支架点的惯性椭球体是一个旋转椭球体，转子的自转轴即为惯性椭球体的旋转轴，它是转子的中心惯性主轴，故通常简称之为主轴，或称形体轴。过支架点与主轴相垂直的所有轴均为转子的惯性主轴，且相对于这些轴的转动惯量都相等，通常称这些轴为转子的赤道轴。赤道轴所在平面为赤道平面。在技术应用上陀螺仪的转子常常做成形似具有厚重轮缘的金属盘，因此绕主轴的转动惯量将大于绕赤道轴的转动惯量。

实验室内常见的陀螺仪如图 1.1-1 所示。内环外环和基座组成了转子的悬挂装置，称为卡尔登支架，或称万向支架。转子在卡尔登支架的悬挂下能绕主轴 OX 旋转，转子连同内环一起可绕内环轴 OY 旋转，转子连同内外环一起又可绕外环轴 OZ_H 旋转。由于转子能绕三轴旋转，显然它将为一绕定点运动的刚体。定点是 OX, OY, OZ_H 三轴的交点，该定点通常称之为转子的支架点，或称为陀螺仪的中心点。主轴 OX 可以指空间的任何方向，这样的陀螺仪的转子具有三个自由度，但在称呼这类陀螺仪的时候，我们只考虑自转轴所具有的转动自由度，因而称为二自由度陀螺仪。如果把内外两环中的任一环固定起来，则该陀螺仪的自转轴只具有一个转动自由度，称为单自由度陀螺仪。如将内外两环同时固定，则转子将仅仅是一个绕定轴转动的刚体，而不成为陀螺仪。重心与支架点 O 相重合的二自由度陀螺仪称之为平衡陀螺仪，或称无定位陀螺仪。不受任何外力矩作用或外力矩合成为零的二自由度陀螺仪称为自由陀螺仪。实际上理想的自由陀螺仪是不存在的，因此自由陀螺仪一词常常被理解为外干扰力矩极为微小的无定位陀螺仪。

从技术应用的角度来说，陀螺仪有三个基本特性，亦即：定轴性，进动性和陀螺力矩。

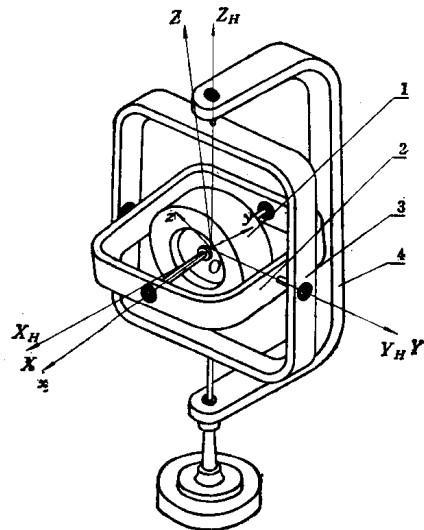


图 1.1-1 物理实验用的陀螺仪

1—高速旋转的转子；2—内环（或称内框架）；3—外环（或称外框架）；4—基座。

1109610

下面我们通过实验来观察陀螺仪的基本特性。假设我们令图 1.1-1 所示陀螺仪的转子不作高速旋转，当我们缓慢地转动基座时，由于基座（4）上的轴承中存在着摩擦，此时转子及内外环将随着基座一起转动。当我们给陀螺仪主轴 OX 以打击，则主轴将沿打击力作用方向旋转。如对该陀螺仪作用一个不与主轴相平行的常值力矩时，则主轴将沿作用方向运动。这些现象和我们日常生活中所看到的一般能绕定点运动的刚体受力后的情况完全一样。现在我们使该陀螺仪的转子绕其主轴作高速旋转，我们发现在这种情况下所得的结果和前面完全不同。当转子作高速旋转时，我们转动陀螺仪的基座，陀螺仪的主轴 OX 将保持其在空间的初始方向，不因基座转动而有显著改变。瞬时打击加在陀螺仪上时，只能引起主轴相对初始位置的微小偏离。这一特性通常称之为陀螺仪的定轴性。

现在我们对转子作高速旋转的陀螺仪沿 OY 轴作用一常值力矩，我们发现陀螺仪不绕 OY 轴转动，而是绕与 OY 轴相垂直的 OZ_H 轴旋转，旋转角速度的大小根据转子的动量矩和外加力矩的大小而定。这一特性称之为陀螺仪的进动性。我们还可以看到，陀螺仪的进动运动符合右手法则，假如伸出右手的大拇指、食指和中指，使之互成直角，以食指代表陀螺仪的动量矩矢量，中指为外力矩矢量，则大拇指方向即为陀螺仪的进动角速度矢量。

现在我们用手去推动图 1.1-1 所示陀螺仪的外环，使该陀螺仪沿 OZ_H 轴受到一个力矩。我们发现，当转子不作高速旋转时，外环就绕 OZ_H 轴转动，我们的手上没有明显受力的感觉。当转子高速旋转时，情况就完全不同，我们的手上感觉到有阻力，而且我们的手对外环施加的力越大，感觉到的阻力也越大，而外环保持其原来的位置不动。这种由感觉到的阻力形成的力矩称为陀螺力矩。它和我们的手作用在陀螺仪上的力矩大小相同，方向相反，所以又称为陀螺反力矩。根据陀螺仪进动特性，我们注意到，当用手在外环上施加一个力，使该陀螺仪沿其外环轴受到一个力矩，陀螺力矩也就是由陀螺仪进动而产生的，它作用在施力物体上。这就是陀螺仪基本特性之三。

人们利用这些基本特性设计制造了一系列的陀螺仪器仪表，供海上、水下、陆上和空中的运动物体作为方位、姿态和轨道的测量以及控制之用。

§ 2 几种二自由度及单自由度陀螺仪的原理结构

前面已经指出，二自由度陀螺仪是借助它的悬挂装置使得其自转轴具有两个转动自由度。早期的陀螺仪就是用两个框架组成的万向支架来悬挂陀螺转子的，俗称框架陀螺仪。图 1.2-1 示出了这种陀螺仪的基本组成部分。陀螺仪中两个传感器用来测量自转轴在空间转动角度，两个力矩器则是用来对陀螺转子施加修正力矩。这种陀螺仪曾成功地被应用于各种陀螺仪表中。但是由于内外框架的轴承存在着摩擦，在摩擦力矩的干扰下框架陀螺仪的精度较低。

随着实际应用对陀螺仪精度要求不断提高，人们在实践中创造了多种支承陀螺转子的方法。早期美国斯伯利公司在一种航海陀螺仪中采用了钢丝悬挂方法把陀螺转子支承起来。由于这种陀螺仪的转子和内环（有的结构中还包括外环）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，使该陀螺仪在垂直轴上的灵敏度得以提高。这种钢丝悬挂的结构在七十年代的航海陀螺仪中仍有使用。它的原理结构如图 1.2-2 所示。该陀螺仪的转子与内环一起能绕内环轴（这里是垂直轴）

转动，转子、内环和外环一起能绕外环轴（这里是水平轴）转动，所以是一个二自由度陀螺仪。该陀螺仪的转子和内环的重量由悬挂钢丝所承受，垂直轴的轴承如前所述，只起定位作用，而不承受重量，使轴承中的摩擦大大地减小，因而这类陀螺仪绕垂直轴的灵敏度较高，这对航海用的陀螺罗经来说是极其重要的。这种陀螺仪的结构还必须保证其钢丝不发生扭转，否则钢丝产生的扭矩就要降低陀螺仪的精度。为了使钢丝不发生扭转，在陀螺仪与垂直环之间装有角度传感器，只要钢丝稍有扭转，角度传感器 6 马上就有信号输出，经放大器 7 放大，使伺服马达 8 转动，随动环随即转动，一直到角度传感器没有输出为止。

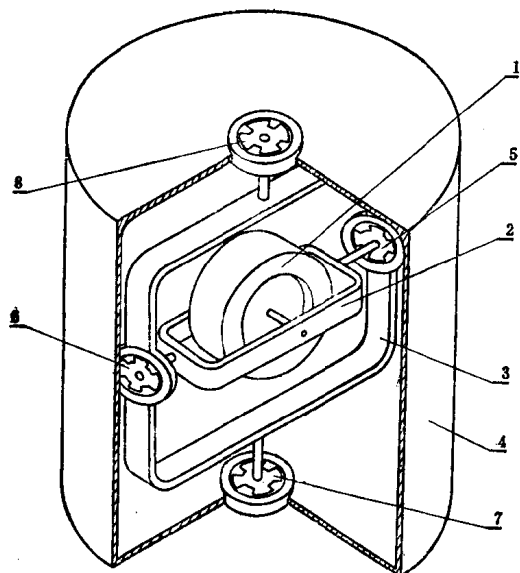


图1.2-1 二自由度陀螺仪的原理结构图

1—陀螺转子，包括其驱动机构；2—内环；3—外环；4—壳体；5—内环传感器；6—内环力矩器；7—外环传感器；8—外环力矩器。

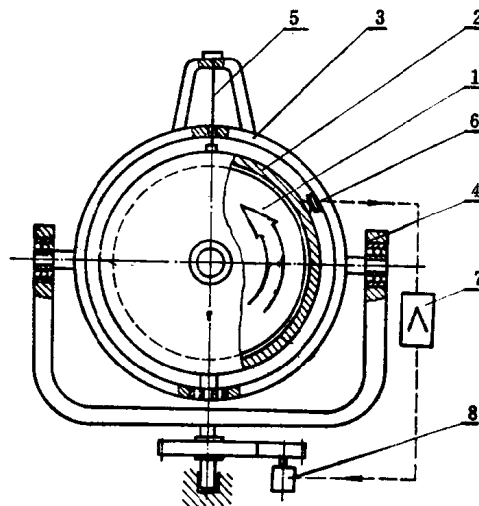


图1.2-2 用钢丝悬挂的陀螺仪的原理结构图

1—转子；2—内环（陀螺房）；3—外环；4—随动环；5—悬挂钢丝；6—角度传感器；7—放大器；8—伺服马达。

另一种典型的航海用的二自由度陀螺仪采用了液浮的结构。德国安修茨公司早在本世纪三十年代就研制成了这种陀螺仪，一直到现在这一结构仍被采用在陀螺罗经和陀螺平台罗经等仪器中。这种陀螺仪是把两个单自由度陀螺仪装在一个圆球内，俗称陀螺球，整个球放在具有液体的贮液缸内，球的重量基本上由液体来支承，此外再采用电磁力或其他方式加以定位。图 1.2-3 所示就是这种陀螺仪的原理结构。整个球被悬浮在液体内，因而它具有三个自由度。陀螺球的 OX 轴相当于陀螺仪的主轴，这一主轴可以绕 OY 和 OZ 轴转动，所以陀螺球相当于一个二自由度陀螺仪。由于陀螺球不用内外两个框架来支承，避免了机械摩擦，因而陀螺仪的精度得到了提高。关于陀螺球的工作原理将在第六章中详细介绍。

还有一种典型的二自由度陀螺仪采用了液浮支承和扭丝定位的结构，扭丝同时还具有施矩的作用。英国勃朗公司的阿玛勃朗陀螺仪就是这种结构，其原理结构见图 1.2-4。这种结构的陀螺仪也避免了框架轴承的摩擦，因而精度得到了提高。此外由于结构比较紧凑，所以用这种陀螺仪组成的陀螺罗经，目前在同类型的罗经中其体积是最小的。

随着实际应用对陀螺仪精度的要求不断提高，出现了一种超高精度的陀螺仪，叫做静

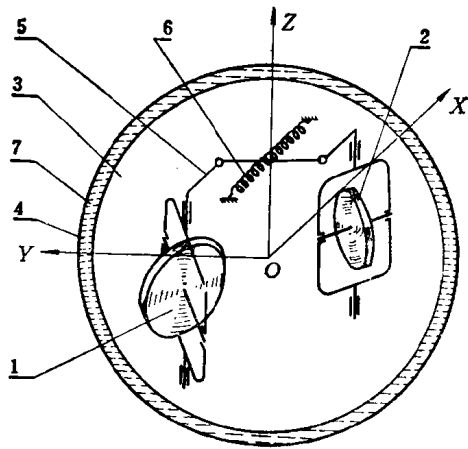


图1.2-3 双转子陀螺球的原理结构图
1、2—两个单自由度陀螺仪； 3—陀螺球的球壳； 4—贮液缸； 5—连杆； 6—弹簧； 7—液体。

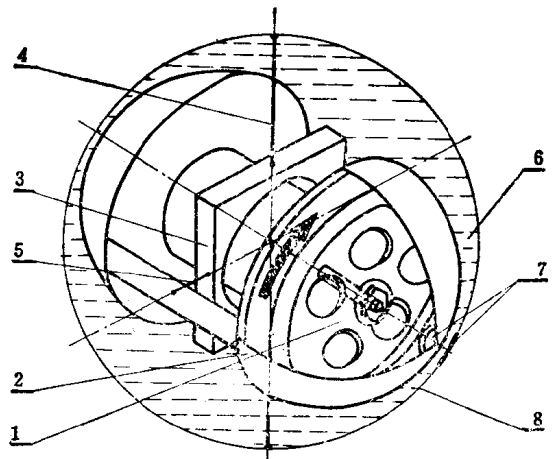


图1.2-4 阿玛勃朗陀螺仪的原理结构图
1—转子； 2—内环； 3—外环； 4—垂直扭丝，上下各一根； 5—水平扭丝，两边各一根； 6—支承液体； 7—角度传感器； 8—贮液缸。

电陀螺仪。图 1.2-5 所示是静电陀螺仪的原理结构。静电陀螺仪有多种结构，图示的那种结构的转子是一个薄壁空心圆球，由于静电吸力较弱，所以该空心圆球用铍制成，使圆球的重量很轻。在该球形转子的上下、左右、前后三个相互垂直的方向上有三对电极，借助在静电场中电极与转子间的吸力，来支承和控制转子的位置。为了使支承系统具有足够的刚度，就希望尽可能增大静电吸力，这就要求在电极与转子间的静电场具有尽可能高的电场强度，因此在电极与转子间必须抽成真空，其真空度要达到 10^{-7} 毫米汞柱以上。我们知道，静电力是一种吸力，当转子因某种原因偏离中心位置时，与某一电极的距离减小，而与相对的另一个电极的距离增大。距离减小，吸力增大，距离增大，吸力却减小，这样的支承系统是一种不稳定的系统。为此，我们可以在支承系统内采用反馈的办法，使之满足稳定条件。另外我们也可以采用图示的电感电容串联谐振的办法。当陀螺转子在中心位置时，支承系统的共振频率略低于电源频率。这样，当转子偏离某一电极时，该电极的电压增高，吸力增大，使陀螺转子拉向原来的位置，使之满足稳定条件。这种球形转子支承在空间，没有机械的接触，不需要一般框架陀螺的三套轴承，也称为自由转子陀螺仪。

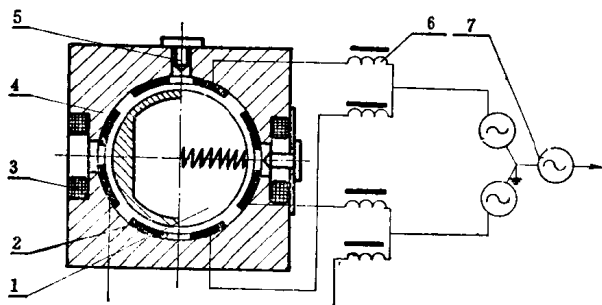


图1.2-5 一种静电陀螺仪的原理结构图
1—陀螺转子； 2—支承电极； 3—驱动线圈； 4—壳体； 5—光电检测装置； 6—电感； 7—支承电源。

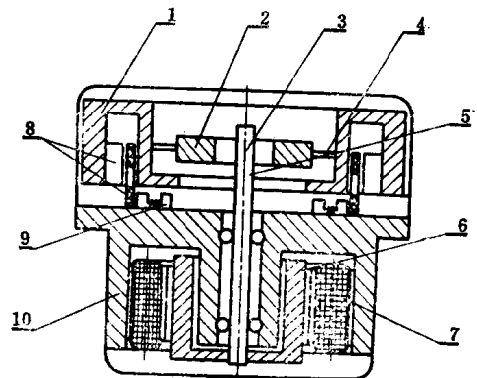


图 1.2-6
1—转子； 2—平衡环； 3—内扭杆； 4—外扭杆； 5—驱动轴； 6—驱动电机转子； 7—驱动电机定子； 8—力矩器； 9—传感器； 10—壳体。

近十年来，一种新型结构的二自由度陀螺仪获得了很快的发展，这种陀螺仪叫做挠性陀螺仪。这种陀螺仪的主要特点是：结构简单，尺寸小，成本低，因而获得了广泛的应用。这里介绍一种叫做动力调谐挠性陀螺仪的原理结构，见图 1.2-6 所示。该陀螺仪的驱动和支承的原理结构专门在图 1.2-7 上表示出来。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，而不是在框架之内。转子 1 的支承是由一个平衡环 2，两对扭杆 3、4 和驱动轴 5 所组成。驱动轴由驱动电机 6 带动，驱动轴通过内扭杆带动平衡环，平衡环通过外扭杆带动转子，转子就以驱动电机的转速旋转。两对扭杆的特点是，在带动平衡环和转子转动时，扭杆像刚体一样，但是转子可以绕外扭杆转动，转子和平衡环一起可以绕内扭杆转动。这样该陀螺仪的自转轴就具有两个进动自由度，所以是二自由度陀螺仪。如果驱动轴和转子轴之间出现了偏转角，此时平衡环就会产生一种扭摆运动，它所产生的动力效应作用于转子，从而补偿了扭杆的弹性反力矩，使转子的自转轴仍稳定在惯性空间。

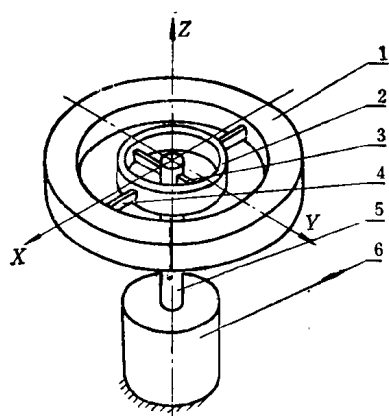


图 1.2-7

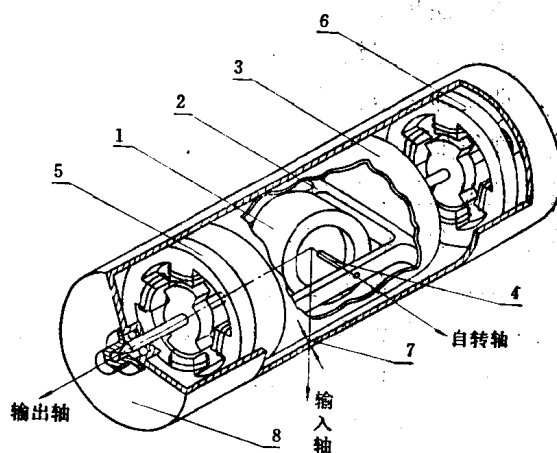


图 1.2-8 单自由度液浮陀螺仪的原理结构图

1—陀螺转子；2—框架；3—浮筒；4—自转轴；5—信号传感器；6—力矩器；7—阻尼间隙；8—壳体。

单自由度陀螺仪的转子支承在一个框架内，没有第二个框架，因而转子的自转轴只有一个进动自由度，所以被称为单自由度陀螺仪。这里介绍一种用液体支承的单自由度液浮陀螺仪的原理结构。图 1.2-8 即为该陀螺仪的原理结构图。该陀螺仪的转子除了绕自转轴作高速旋转外，它能同框架和浮筒一起绕输出轴转动。在浮筒与壳体间充满液体，整个转子、框架和浮筒等重量由液体支承，壳体两端的轴承仅作定位之用。该陀螺仪所需的阻尼器就由浮筒和壳体之间的空隙来实现。

单自由度液浮陀螺仪有积分陀螺仪和微分陀螺仪两类。积分陀螺仪是指其输出轴的角度输出正比于其输入轴角速度对时间的积分。其主要约束力矩是阻尼反作用力矩，在液浮积分陀螺仪中就利用浮筒和壳体之间的间隙来实现其阻尼作用的，不同的液体粘度就获得大小不同的阻尼力矩。积分陀螺仪不能单独工作，必须有一套随动系统相配合，以使陀螺仪的自转轴对壳体的偏角为零。微分陀螺仪是指其输出轴的角度输出正比于其输入轴角速度。大家知道，角速度即为角度的微分，故得此名。微分陀螺需要弹性反作用力矩作为约束力矩，在液浮微分陀螺仪中将信号传感器和力矩器联成一回路，形成一个电气机械“弹

簧”，以产生弹簧反作用力矩。

§3 地球自转及地理坐标系在惯性空间的运动

我们在分析某一物体相对于另一物体的运动时，首先要有参考系才能表示出物体间的相对运动。在第三章中将要介绍几种导航上常用的坐标系。这里为了介绍陀螺仪的一般应用，先了解一下地理坐标系及其在惯性空间的运动。

我们这样来选定地理坐标系，首先近似地认为地球是一个圆球。然后取地球表面任一点作为原点 O ，在 O 点作 OZ_0 轴，该轴与当地地垂线重合，指向天顶。再作轴 ON ，该轴在当地水平面内，并指向北方。取轴 OW 在当地水平面内，并指向西方。由此组成右手直角坐标系 $ONWZ_0$ ，这就是选定的地理坐标系。 O 点的位置可用经度 λ 和纬度 φ 来表示。当 O 点在地球表面运动时，地理坐标系亦随之运动。但其三根轴的方位始终代表当地的地垂线、水平北和水平西。我们也可以选取东北天顶右手直角坐标系 $OENZ_0$ 作为地理坐标系，可根据使用方便而定。

大家知道地球绕自转轴在不断地转动，其自转角速度近似地认为每二十四小时转一圈。因而，即使地理坐标系原点 O 在地球表面不作运动，这个坐标系在惯性空间还是运动着。运动的规律如图 1.3-1 所示。地球自转角速度 $\bar{\omega}_e$ 的矢量指向北极，因而 O 点上的 $\bar{\omega}_e$ 可分解成沿地理坐标系的 ON 轴和 OZ_0 轴上的两个分量。在 ON 轴上的分量 ω_1 称为水平分量，在 OZ_0 轴上的分量 ω_2 称为垂直分量。设当地纬度 φ ，则水平分量 $\omega_1 = \omega_e \cos \varphi$ ；垂直分量 $\omega_2 = \omega_e \sin \varphi$ 。由此我们可知：地球表面任一点的水平面，除了在两极以外，绕该点子午圈的切线以角速度 ω_1 在空间转动，在赤道上角速度最大（ $\omega_1 = \omega_e$ ）。地球表面任一点子午面，除了赤道以外，绕该点地垂线以角速度 ω_2 在惯性空间转动，在两极处角速度最大（ $\omega_2 = \omega_e$ ）。

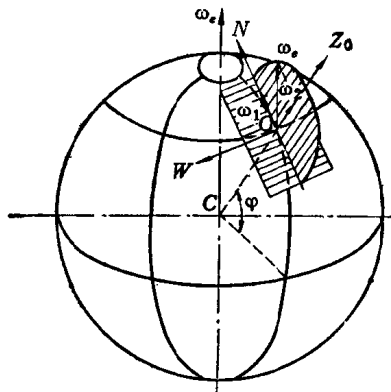


图1.3-1 地理坐标系

§4 陀螺地平仪工作原理简介

我们知道，在驾驶飞机时需要知道飞机的姿态，而驾驶员在飞机作加速飞行时，无法凭其自身的感觉来判断飞机的姿态，为此在飞机上需有一个人工指示地平线的仪表。人们就应用陀螺仪的基本特性研制成了人工指示地平线的仪表，这种仪表叫做陀螺地平仪。它的原理结构如图 1.4-1 所示。

由图可知，陀螺地平仪是由一个二自由度陀螺仪、摆式器件、产生修正力矩的力矩器以及指示地平线的部件所组成。二自由度陀螺仪的自转轴垂直安放，由于二自由度陀螺仪是相对惯性空间具有定轴性，因而如不加修正装置仍不能稳定在地垂线方向。摆式器件是用来敏感地垂线方向，如自转轴偏离地垂线，则摆式器件输出信号，根据陀螺仪的进动特性，将信号送至相应轴上的力矩器，以产生修正力矩使自转轴回向地垂线。陀螺地平仪的

输出就是人工地平线指示杆和与仪表壳体固定的小飞机之间的角度。仪表壳体是与飞机机体固定，所以这些角度就表示飞机的俯仰角和横滚角。

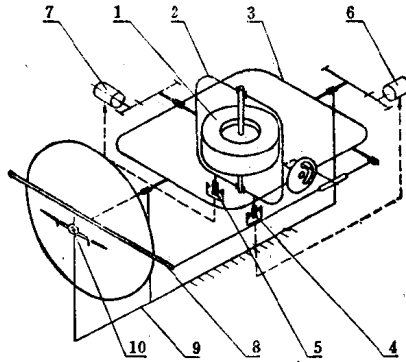


图1.4-1 陀螺地平仪原理结构图

1—陀螺转子；2—内环；3—外环；4、5—摆式器件；6、7—力矩器；
8—人工地平线指示杆；9—壳体；10—固定于壳体上的小飞机。

§ 5 陀螺方位仪工作原理简介

我们需要知道的运动体的姿态中，除了俯仰和横滚外，还有一个方位的问题。人们应用二自由度陀螺仪的基本特性研制成指示运动体方位的仪表，就叫做陀螺方位仪。如果在起始时刻，我们把陀螺方位仪的自转轴稳定指北，那么方位仪上就可读出航向。陀螺方位仪的原理结构如图1.5-1所示。

陀螺方位仪是由一个二自由度陀螺仪所组成，但与地平仪不同，其自转轴是水平放置的。同样，二自由度陀螺仪的自转轴相对惯性空间具有定轴性，因而要使方位仪指示相对地理坐标系的方位，必须修正掉地球自转水平分量 ω_1 和垂直分量 ω_2 的影响。这里，如因 ω_1 而自转轴绕内环轴偏离水平位置，此时摆式器件6发出信号，送入力矩器7，产生沿外环轴方向的力矩，使自转轴回向水平面，一直到摆式器件没有信号输出为止，从而保证自转轴在水平面内。重物5产生沿内环方向的力矩，它是用来修正 ω_2 的影响。陀螺方位仪的输出可从刻度盘上读出。当船的航向不变时，外环与随动环之间没有角度偏离，传感器8没有信号输出，随动系统不工作。当舰船的航向发生变化时，随动环随船体一起转动，外环与随动环之间出现角度偏离，传感器8输出信号，伺服马达9驱动随动环，使随动环回向与外环相协调的位置，直到传感器8没有输出。随动环转动时带动刻度盘，并指示出方位的读数。

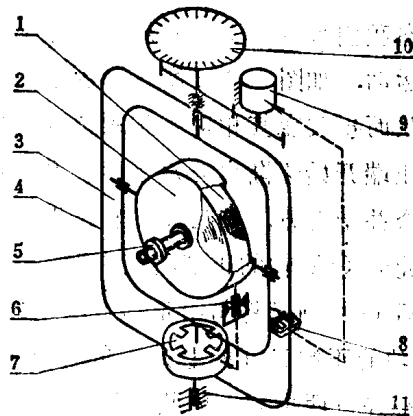


图1.5-1 陀螺方位仪原理结构图

1—陀螺转子；2—内环；3—外环；4—随动环；5—重物；6—摆式器件；7—力矩器；8—传感器；9—伺服马达；10—刻度盘；11—壳体。

§ 6 陀螺罗经工作原理简介

陀螺罗经是一种指示航向的导航仪器，它的特点是能精确地自动寻找真北方向。它的主要组成部分如图 1.6-1 所示。

我们在这章第三节中已指出，由于地球绕其转轴转动，因此在地球表面上任意一点 O 的地理坐标系 $ONWZ_0$ 将随同地球转动。我们又知道，二自由度陀螺仪的主轴在惯性空间具有定轴性，亦即主轴的位置在惯性空间是保持不变的。这样对惯性空间而言，随同地球自转的地理坐标系 $ONWZ_0$ 将相对于陀螺仪的主轴不断改变其相对位置。但是，由于观察者随着地球一起运动，因此他只能观察到陀螺仪相对于地理坐标系 $ONWZ_0$ 的运动。这一运动我们称之为陀螺仪的视运动。

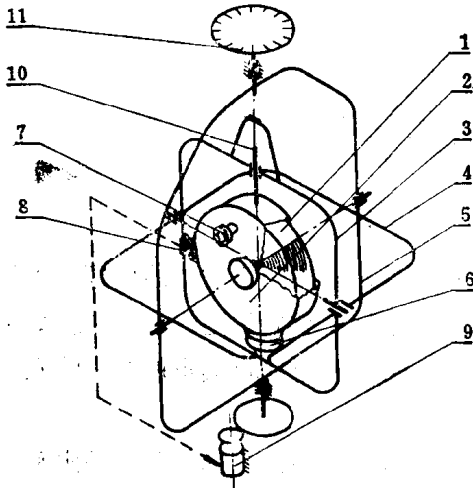


图 1.6-1 陀螺罗经原理结构图

1—陀螺转子；2—内环；3—外环；4—水平环；5—随动环；
6—摆性重物；7—阻尼重物；8—传感器；9—力矩器；10—悬挂扭丝；11—刻度盘。

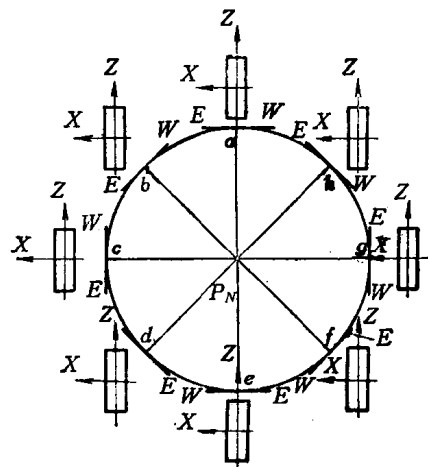


图 1.6-2

现在我们来分析一下，安放在赤道上并在起始时刻主轴保持水平自西指东情况下的陀螺仪的视运动，如图 1.6-2 所示。由于水平面与地球一起转动，因此不断地改变其在空间的位置，从而也改变其相对于陀螺仪的位置。因此参与地球自转的观察者将看到陀螺仪主轴 OX 的正端开始逐渐离开水平面上升。经过六小时后，陀螺仪主轴 OX 将与给定地点的垂直线相重合并指上方，其后 OX 轴正端开始下降，负端开始上升，又经六小时后回复到水平位置，此时 OX 轴的正端将指向西方。此后 OX 轴的正端继续下降，负端继续上升，再经六小时后 OX 轴又将与给定地点的垂线相重合，但此时 OX 轴的正端在下而负端在上。此后 OX 轴的正端又开始上升，负端开始下降，再经六小时后回到起始位置 a ，此时 OX 轴又呈水平并自西指东。因此，经过 24 小时，地球绕自转轴旋转一周，在地球赤道上某点的观察者可以看到，放置在该点的主轴呈水平自西指东的陀螺仪将绕与子午线平行的轴旋转一周，但其旋转角速度的方向与地球自转角速度相反。上面所述系陀螺仪安放在赤道上，在起始时刻主轴呈水平并在地球赤道平面内。若陀螺仪仍安放在赤道上，但其主轴在起始时刻呈水平并在子午面内，如图 1.6-3 所示，则主轴 OX 将与地球自转轴相平行，因此视

运动角速度将沿着陀螺仪的主轴,因而将不改变陀螺仪主轴相对于水平面和子午面的位置。由此可见,陀螺仪的视运动不仅与所在地的纬度有关,而且和它的主轴与子午面以及与水平面之间的夹角有关,因为陀螺仪主轴相对于子午面及水平面的位置变化将由 $\bar{\omega}_e$ 在 OY 、 OZ 轴上的投影来确定。前面已经指出,地球自转角速度在地理坐标系 ON 轴上的分量为 $\omega_1 = \omega_e \cos \varphi$,在 OZ_0 轴上的分量为 $\omega_2 = \omega_e \sin \varphi$ 。如二自由度框架陀螺仪的外框架轴 OZ_B

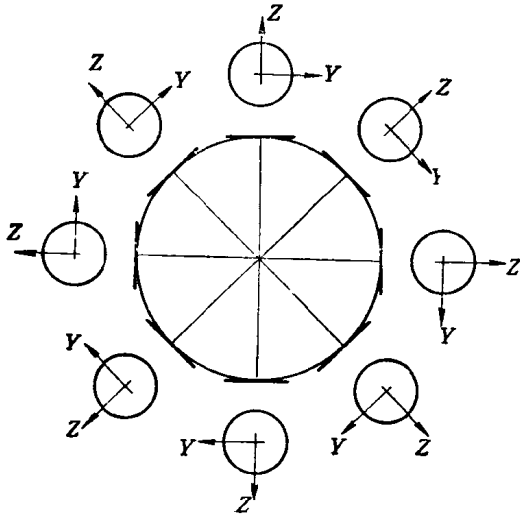


图 1.6-3

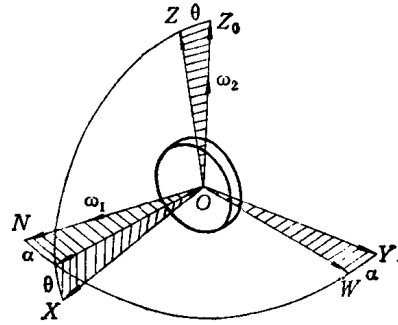


图1.6-4 绕内外框架轴有转角时陀螺仪相对地理坐标系的位置

沿垂线放置,当陀螺仪绕外框架轴转过 α 角,绕内框架轴转过 θ 角,则与内框架固连的坐标系 $OXYZ$ 相对于地理坐标系的位置如图1.6-4所示,那么地球自转角速度在 OY 和 OZ 轴上的投影将分别为

$$\omega_y = -\omega_1 \sin \alpha = -\omega_e \cos \varphi \sin \alpha$$

$$\omega_z = \omega_1 \cos \alpha \sin \theta + \omega_2 \cos \theta = \omega_e \cos \varphi \cos \alpha \sin \theta + \omega_e \sin \varphi \cos \theta$$

上式表示地理坐标系相对陀螺仪的运动角速度。由于观察者跟着地理坐标系一起运动,所以看到的是陀螺仪相对地理坐标系的运动,即所谓视运动,所以陀螺仪的视运动角速度在 OY 和 OZ 轴上的分量应该在上式的等号右边加一负号,如以 ω'_y , ω'_z 表示视运动角速度,则得

$$\omega'_y = \omega_e \cos \varphi \sin \alpha$$

$$\omega'_z = -\omega_e \cos \varphi \cos \alpha \sin \theta - \omega_e \sin \varphi \cos \theta$$

现在我们可以看一下,陀螺罗经为什么能够自动找北呢。在开始介绍陀螺罗经的原理时,我们看到,陀螺罗经是一个下重式的二自由度陀螺仪,在主轴呈水平时,重力通过框架点不产生力矩,但是只要主轴离开水平面重力就产生力矩。在这种摆性力矩作用下,当主轴端点在水平面以上时,它就使主轴向西进动,当主轴端点在水平面以下时,它就使主轴向东进动。因而主轴顶点就绕着真北方向画出一个椭圆图形而作等幅振荡。这个振荡可用加入阻尼力矩来阻尼掉。阻尼力矩的产生方法有很多种,例如摆性重物与陀螺房偏心联接、加上阻尼重物以及液体阻尼器等等。在摆性力矩和阻尼力矩的组合下,使得主轴沿收敛螺旋线逐步趋向子午线。当主轴稳定后,其端点的平衡位置根据不同阻尼方法而异。有

的是主轴稳定在子午面内，但其端点稍微向上偏离水平面。也有的除了稍微向上偏离以外，还偏东一个小角不进入子午面，图 1.6-5 所示的偏心联接的下重式陀螺罗经就是如此。

这里还有一个很重要的概念，陀螺罗经所以自动找北，是因为陀螺仪的摆性和地球自转相结合而实现的。因为主轴呈水平时不产生摆性力矩，而在地球自转角速度在陀螺仪 OY 轴（即水平轴）上的分量 $\omega_y = -\omega_e \cos \varphi \sin \alpha$ 作用下，陀螺仪主轴以 $\omega'_y = \omega_e \cos \varphi \sin \alpha$ 的视运动角速度绕其水平轴转动。这样，主轴偏离水平面而产生了摆性力矩。只要把这个摆性力矩和地球自转角速度正确配合，就能使陀螺仪主轴自动找北。

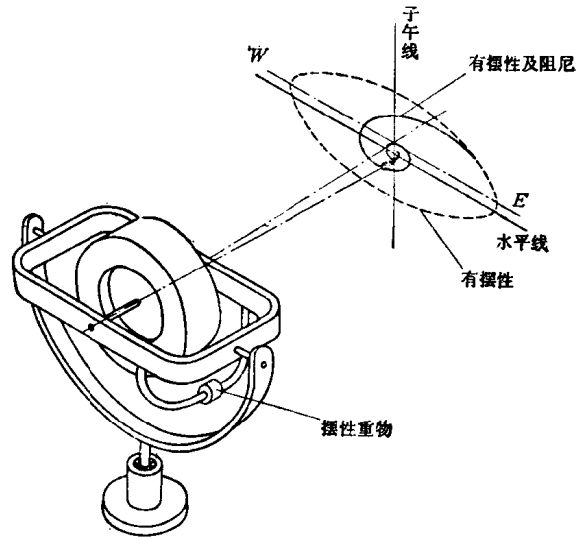


图 1.6-5 陀螺罗经的主轴端点运动轨迹

§ 7 陀螺稳定系统简介

在一个运动物体上为了实现较高精度的导航和武备控制，就需要具有一个相对于惯性空间或者地理坐标系稳定的人工坐标系。例如在一个剧烈摇摆的舰艇上，火炮的瞄准与发射就有很大的困难，如果有一个不受舰艇摇摆的影响，并能始终跟随地平面的水平基准，就可以克服火炮瞄准和发射的困难。利用陀螺仪的特性加上相应的随动系统就可以实现上述的人工坐标系。这种陀螺仪器称为陀螺稳定系统，也叫做陀螺稳定平台。根据使用的需要，这些陀螺稳定系统可以是单轴的、双轴的以及三轴的。它可以用单自由度陀螺仪组成，也可以用二自由度陀螺仪组成。早期直接利用陀螺力矩来抵抗干扰力矩，然后再以陀螺仪所输出的信号经放大后输入力矩器，产生力矩以补偿外干扰力矩，这种稳定系统称为动力陀螺稳定系统。随着科学技术的发展，对陀螺稳定系统的要求越来越高，直接式陀螺稳定系统无论在稳定的精度上和承受的负载上都不能满足要求，于是出现了把陀螺仪作为敏感元件的间接式陀螺稳定系统。这里我们介绍一种双轴陀螺稳定系统。

图 1.7-1 所示为一双轴陀螺稳定平台的原理结构。该平台用两个单自由度陀螺仪和两个摆组成，陀螺仪 I 的 Z_1 轴和平台 Y 轴平行，陀螺仪 II 的 Z_2 轴和平台 X 轴平行，两者的主轴 X_1 、 X_2 均和台体垂直，摆 I 敏感绕 Y 轴的偏角，摆 II 敏感绕 X 轴的偏角，该四个元件均固定在平台台体上。台体支承在框架上，可绕平台 Y 轴转动。台体连同框架支承在基座上，可绕 X 轴转动。该平台的工作原理如下。先看它如何抵抗干扰而保持稳定的，假定该平台

装在一舰上，其 Y 轴沿该舰的艏艉线，当该舰发生横摆时，平台基座和框架随舰摇摆，此时台体与框架间的轴承处因有摩擦而产生干扰力矩，陀螺仪 I 的主轴立即绕 Y_1 轴进动，其传感器 10 就输出信号给稳定电机 7，稳定电机 7 产生力矩，经过减速装置平衡了平台 Y 轴上所受到的干扰力矩。因为干扰力矩由稳定电机产生的力矩所平衡了，所以平台台体保持稳定。同样，在平台 X 轴上产生了干扰力矩，则由陀螺仪 II 发出信号，而由稳定电机 8 来承受该干扰力矩。这样，平台在 X 和 Y 两根轴上均可得到稳定，所以叫做双轴陀螺稳定平台。

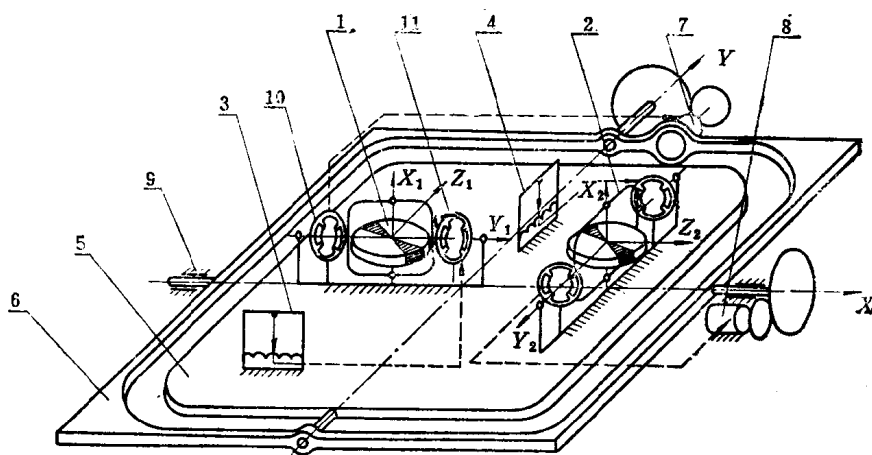


图 1.7-1 双轴陀螺稳定平台

1—陀螺仪 I；2—陀螺仪 II；3—摆 I；4—摆 II；5—平台台体；6—平台框架；
7、8—稳定电机；9—平台基座；10—传感器；11—力矩器。

由于地球自转以及舰船相对地球的运动，当地的水平面在惯性空间是在不断地运动着，所以我们还必须使平台的台体跟踪水平面，才能使台体始终稳定在水平面内。跟踪水平面的过程是这样的：假如台体绕 Y 轴偏离水平面，则摆 I 就输出一个信号，该信号送至陀螺仪 I 的力矩器 11，产生沿 Y_1 轴的修正力矩，由于是单自由度陀螺仪，沿 Y_1 方向的修正力矩无法使主轴进动而迫使主轴绕 Y_1 轴沿修正力矩的方向转动，此时陀螺仪 I 的传感器输出信号给稳定电机，该电机通过减速器使平台台体回向水平面，直到摆 I 输出为零。这时，台体回到水平面内。如果台体绕 X 轴偏离水平面，则由摆 II、陀螺仪 II 以及稳定电机 8 等组成的修正回路来使台体回到水平面。由此可知，这里介绍的一种间接式双轴陀螺稳定系统的 X 、 Y 轴，就能模拟一个当地水平面。

§ 8 平台罗经及惯性导航简介

人们在发展陀螺罗经和陀螺稳定平台的过程中，研制成功了一种既能指示航向，又能提供水平面信号的陀螺仪器，这种仪器就叫做平台罗经。这种仪器可以理解为，把一台电磁控制陀螺罗经和一台陀螺稳定平台结合在一起，相当于把一台电磁控制罗经放在一台陀螺稳定平台上。由于罗经放在稳定平台上，不受舰船摇摆的影响，因而提高了罗经的指北精度。

图 1.8-1 所示的是美国斯伯利公司的一种陀螺平台罗经。它具有两个二自由度陀螺仪，陀螺仪 1 放在台体 8 的上面，称为主陀螺仪，陀螺仪 2 放在台体 8 的下面，称为副陀螺仪。

主陀螺仪有水准器 3、水平力矩器 4、方位传感器 5、方位力矩器 6，并和方位电机 7 等

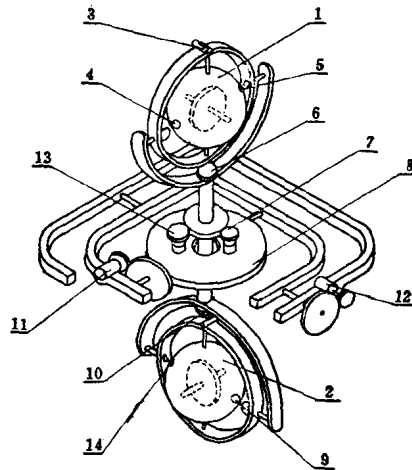


图1.8-1 平台罗经示意图

组成了一个电控罗经。主陀螺仪主轴呈水平并指北。副陀螺仪由水准器和水平力矩器 9 组成的回路，使其主轴呈水平，同时通过方位传感器 14、方位力矩器 10 所组成的回路，使副陀螺仪的主轴与主陀螺仪的主轴在水平面内始终保持垂直。这是稳定平台的基准。再通过纵摇和横摇传感器（图上未画出），信号分配器 13 以及稳定电机 11、12 组成了平台的两条稳定回路，使台体 8 始终稳定在水平面内。

大家都知道，导航就是确定运动着的运载体位置和航向的过程。要确定舰船的位置，一般可用陀螺罗经指示的航向和计程仪测得的航速计算而得，也可用无线电导航、天文导航的方法获得舰船位置，还可用卫星导航的方法来确定位置。但是所有上述方法都存在着缺点。例如无线电导航，易受干扰，隐蔽性差，独立性差。天文导航虽没有上述缺点，但受气象条件的限制。用陀螺罗经和计程仪的方法，则精度较差。平台罗经给出的航向虽然有较高的精度，但不能给出位置参数。特别出现了核潜艇，对导航系统提出了很高的要求，长期隐蔽在水下航行，无法采用无线电导航、天文导航和卫星导航。随着导弹武器的发展，更需要提供一系列精确的数据，如航向、航速、所在地的地理位置、航艇的姿态角等等。为此，人们研制出一种新的导航系统，叫做惯性导航。惯性导航是利用测出运载体本身的加速度，并对加速度进行二次积分而给出运载体位置的导航方法。由于它不需依赖外界信息，是完全自主式的导航，因而隐蔽性极佳，而且可以达到很高的精度。它已成为极重要而非常有发展前途的导航方法。

惯性导航需用加速度计来测量运载体的加速度，而加速度计需要放置在一个惯性平台或者模拟地理坐标系的稳定平台上，加速度计的输出还需要经计算机的计算，所以惯性导航是由陀螺仪、加速度计、计算机和必要的辅助设备所组成的一个系统。

惯性导航系统定位的工作原理如图 1.8-2 所示。 A_N 和 A_E 为测量南北向和东西向加速度的加速度计，放置在一导航平台上，该平台台体除始终保持水平外，不管舰船如何改变航向，其平台台体始终指北。图中台体上陀螺仪并未画出。加速度计测得的 a_N 、 a_E 经两次积分，并将其换算成球面坐标而得舰船所在地的经纬度。这些计算可通过计算机来实现。

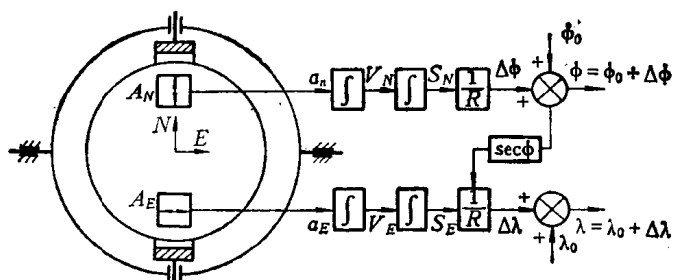


图1.8-2 惯性导航示意图

纬度 φ 和经度 λ 可由下式计算:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{1}{R_e} \iint a_N dt^2$$

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{1}{R_e} \iint a_E \sec \varphi dt^2$$

惯导系统的输出除了舰船的地理位置(经纬度)外,还同时给出航向、航速、舰船摇摆角等数据。