

陀螺稳定平台与定向装置

前面章节中讲述了具有动量矩的一类陀螺仪有三个特性：定轴性、进动性和陀螺动力效应。定轴性是指高速旋转的转子具有力图保持其转子轴在惯性空间内的方向稳定不变的特性。进动性是指陀螺仪在外力矩作用下，高速旋转的转子力图使其转子轴沿最短的路径趋向外力矩的作用方向。陀螺动力效应是指如果施力给陀螺，使它具有进动角速度 ω ，则陀螺必给施力者一反作用力矩（陀螺力矩） M_G ，且有 $M_G = -\omega \times H = H \times \omega$ 。

当需要应用陀螺仪的定轴性时，应尽一切努力设法减少有害力矩；或者利用陀螺仪的进动性，在内、外环轴上加外力矩以约束和修正陀螺仪，使陀螺仪的转子轴稳定在惯性空间内的方向不变。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。

以陀螺仪为敏感元件，能隔离基座的角运动并能使被控对象按指令旋转的机电控制系统称为陀螺稳定平台，简称陀螺平台。机械转子式陀螺仪具有的定轴性和进动性，使其既具有相对惯性空间保持指向不变的能力，又具有按照要求的规律相对惯性空间旋转的能力，所以这类陀螺仪既能够用来模拟坐标轴的指向，也可以用来测量角速度和角度，是控制陀螺稳定平台角运动的理想元件。

陀螺稳定平台的两个基本功能是稳定和修正。稳定作用即隔离运载体的角运动，通过稳定系统产生的稳定力矩来抵消运载体运动对平台的干扰力矩，阻止平台相对惯性空间转动，如船舶上的同步卫星接收天线，在船舶受风浪作用而摇摆时，通过平台的稳定作用使天线始终能指向同步卫星；修正作用即控制平台按照所需要的角运动规律相对惯性空间运动，如检测火箭发射的地面光学跟踪系统，通过稳定平台的修正作用使光轴始终跟踪观察点与火箭的连线，尽管该连线的指向在不断变化。当陀螺稳定平台要模拟当地水平面时，平台在保持稳定的同时，还必须进行修正，以跟踪当地水平面相对惯性空间的运动。

按照稳定轴的数目，陀螺稳定平台可以分为单轴陀螺稳定平台、双轴陀螺稳定平台和三轴陀螺稳定平台等。

陀螺稳定平台应用广泛，可用来建立参考坐标系，测量运动载体姿态，并为线加速度计建立基准，是导弹、航天器、飞机和舰船等的惯性制导系统和惯性导航系统的主要装置；或用于稳定舰船、飞机、坦克和机器人等载体上的装备，如火炮、鱼雷发射器、导弹发射器、摄像机等；或用于动力装置的辅助稳定，在工程实际中有大量带陀螺稳定器的动力装置系统，如磁悬浮单轨列车、航天飞行器、多自由度动力转台、飞行模拟器、赛车等。此

类平台习惯上也称为惯性平台。

寻北技术作为导航系统的关键技术之一,不仅在卫星、导弹、火炮发射、舰船惯性导航等国防高科技领域得到广泛应用,而且在地球物理探测、煤矿开采、大地测量、矿山、地下工程钻井、隧道挖掘等方位测量,以及车载定位定向系统等民用领域,也成为必要的测量方法。

本章主要对一维稳定器、三维稳定平台和陀螺垂直仪以及寻北仪进行动力学分析和控制系统分析。

5.1 单轴陀螺稳定平台

单轴陀螺稳定平台,也称为一维的单轴稳定器,是最早投入使用的动力陀螺稳定器。其示意图如图 5-1 所示。图中,平台 P 水平。当有 x 向干扰力矩(干扰力 f)作用时,陀螺主轴以 $\dot{\beta}$ 角速度进动,产生 β 角后,稳定电机发出稳定力矩 M_m 与干扰力矩 M_f 平衡,因而平台 P 永保水平。

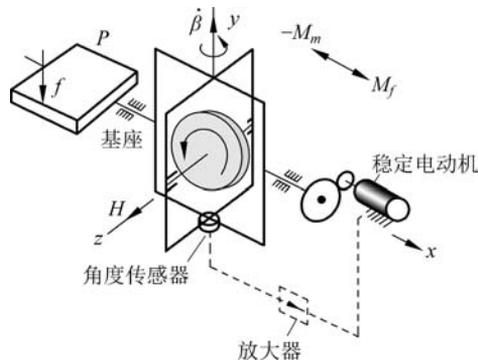


图 5-1 陀螺稳定平台示意图

5.1.1 单轴陀螺稳定平台基本原理

图 5-2 是一个用二自由度陀螺仪组成的单轴稳定器,被稳定对象为一光学装置(平台)¹⁰。陀螺外环与内环用轴承支承。取陀螺坐标系为 $Oxyz$ 和光学装置平台坐标系为 $Ox_e y_e z_e$ 。设陀螺绕 Ox 和 Oy 轴的进动角度分别为 α 和 β ,平台绕陀螺坐标系各轴相对惯性空间转动的角分别为 θ_x, θ_y 和 θ_z 。由于外环轴 Ox 始终和光学装置平台的 Ox_e 轴固连,有

$$\alpha \equiv \theta_x \quad (5-1)$$

起始时,光学装置的光轴与陀螺转子轴平行。当基座 4 绕外环 3 的 Ox 轴匀速转动时,转子轴与光轴由于陀螺的特性不随之转动,保持原有方向;当基座 4 振动、受到冲击时,转子轴与光轴作章动,仍处于原有方向附近,误差不大于章动振幅;如果在外环轴上作用一常值外干扰力矩 M_{xf} ,转子 2 与内环 6 一起绕内环轴 Oy 进动。进动的角速度大

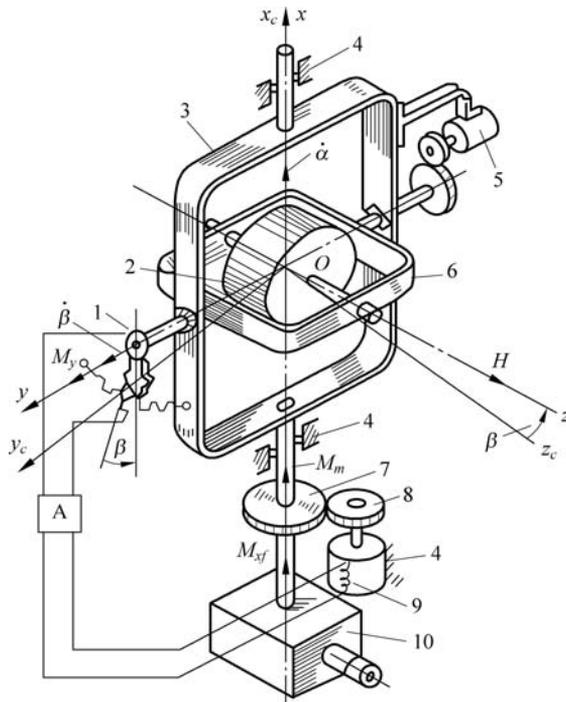


图 5-2 单轴动力陀螺稳定器结构原理图

1—电位计；2—转子；3—外环；4—基座；5—伺服电机；6—内环；
7,8—减速器齿轮；9—稳定电机；10—光学装置

小为 $\dot{\beta} = M_{x_f} / H \cos\beta$ ，这种进动是在进动角 β 不大于 90° 的范围内进行的。产生陀螺力矩 $H\dot{\beta}\cos\beta$ 也作用在外环轴上，两者大小相等、方向相反，光轴仍处于起始位置。

由于被稳定对象的质量往往较大，陀螺所产生的陀螺力矩只能在瞬时起稳定作用，事实上达不到长时间稳定的要求，因此，需要采用稳定回路。

事实上，陀螺稳定器可工作在两种状态：一是稳定；二是定位或随动（伺服状态）。对第一种状态需要稳定回路，而对第二种状态需要伺服修正回路。外环轴称为稳定轴，内环轴称为进动轴。

1. 稳定回路

在陀螺内环轴上安装信号器，用电位计 1 表示。电位计固定在外环轴上，电刷固定在内环轴上。

初始时刻两坐标系重合（陀螺坐标系和光学平台坐标系）。当在外环轴上作用外干扰力矩 M_{x_f} 时，平台产生角加速度 $\ddot{\theta}_x$ ；同时陀螺绕内环轴进动（陀螺的进动方向与施加的外力矩方向正交），电位计输出与进动角 β 成正比的电压信号 u

$$u = k_u \beta \tag{5-2}$$

电压信号 u 经过放大器 A 后得电流 I ，用来控制稳定电机 9。设 k_i 为放大器的放大

系数,则

$$I = -k_i u = -k_i k_u \beta \quad (5-3)$$

设 k_m 为电机放大系数,电机输出力矩为

$$M_{m'} = k_m I = -k_u k_i k_m \beta \quad (5-4)$$

电机力矩通过减速比为 i 的减速器(齿轮 7,8 表示)作用在外环轴上,这个力矩称为稳定力矩 M_m ,即

$$M_m = i M_{m'} = -i k_u k_i k_m \beta = -K_m \beta \quad (5-5)$$

这里, $K_m = i k_u k_i k_m$ 。

稳定力矩 M_m 将带动平台旋转(注意平台的这个运动是一般刚体的特性运动,旋转方向与电机力矩方向一致),以抵消干扰力矩造成的平台的转动。

当作用方向相反的稳定力矩 M_m 大小与干扰力矩 M_{xf} 相等时,陀螺停止绕内环轴的进动,存在一个定值的进动角 β^* ,此时稳定力矩为 M_m^* 。单轴动力陀螺稳定器(稳定回路)方框图见图 5-3。

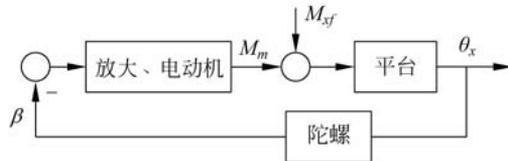


图 5-3 单轴动力陀螺稳定器(稳定回路)

稳定回路工作过程

$$M_{xf} \rightarrow \ddot{\theta}_x \uparrow, \alpha \uparrow, H\dot{\beta} \uparrow \rightarrow |M_m| = K_m \beta \uparrow \rightarrow \theta_x \downarrow,$$

$$\alpha \downarrow \rightarrow M_m(\beta^*) = M_{xf} \rightarrow \alpha = \theta_x = 0$$

从产生进动角 β 到稳定力矩平衡外干扰力矩,即 $M_m = -M_{xf}$ 的过程中,总存在一个过渡过程。陀螺在这里起两个作用:一是作为外干扰力矩传感器;二是当有外干扰力矩作用在稳定轴时,瞬时地产生陀螺力矩 $H\dot{\beta} \cos\beta$ 。就像这个系统有两种动力,用于平衡外干扰力矩,使被稳定对象处于稳定状态,所以称这种系统为动力陀螺稳定器。

动力陀螺稳定器的定义为,在外干扰力矩作用初始瞬间,以陀螺力矩抗干扰,随后在外力干扰继续作用下,利用稳定电机产生的力矩平衡外干扰力矩的一种陀螺稳定装置。

由于陀螺的两种作用,在陀螺本身和稳定回路的技术要求适当降低的情况下,动力陀螺稳定器仍具有良好的性能。陀螺的动量矩 H 可以小一些,系统的过渡过程可以长一点,进动角 β 一般在几十角分到几度范围内。

在有些结构中,特别是在一些小型稳定器中,不采用电机,而用力矩器。在坦克火炮稳定器等大型装置中采用的是液压传动装置。在这种情况下自然也就不需要减速器了,或者说减速比 $i=1$ 。为了简明起见,图 5-2 中还是用带减速器的电机来表示。

2. 伺服(修正)回路

伺服状态,要求被稳定对象随外框架一起,绕稳定轴 O_x 旋转一角度 α ,或以角速度 $\dot{\alpha}$ 转动时,控制安装在伺服轴(内框轴) O_y 上的伺服电机 5,通过减速器将力矩 M_y 传递到 O_y 上,使被稳定对象与外框一起绕 O_x 进动,进动的角速度为 $\dot{\alpha}$,按陀螺仪的技术方程,有

$$\dot{\alpha} = -M_y / H \quad (5-6)$$

但在稳定器中,陀螺的进动有别于自由陀螺,陀螺绕外框架轴 O_x 直接进动是不可能的。因为被稳定对象安装在外框上,稳定轴上的有害力矩太多,例如轴承中摩擦力矩很大。在图 5-2 的结构中还采用了减速器,减速器反向转动很困难。因此,仅在伺服力矩 M_y 作用下,陀螺绕 O_x 轴直接进动是不可能的,需要稳定回路协同工作。稳定回路的作用是产生一与摩擦力矩大小相等、方向相反的稳定力矩作用在 O_x 上,陀螺才能有与伺服力矩 M_y 对应的绕轴 O_x 的进动。

作用在内环轴 O_y 上的有害力矩也将引起被稳定对象绕 O_x 偏离起始位置,造成误差,但可以通过伺服电机 5 产生的力矩进行修正和控制。而所形成的回路称伺服回路、修正回路或控制回路。

上述动力陀螺稳定器只能绕外框轴 O_x 实现稳定,因此为单轴的。如再增加一个陀螺、一套稳定回路和一套控制回路就成为双轴动力陀螺稳定平台。如再增加,就变成三轴动力陀螺稳定平台或空间稳定平台。

5.1.2 单轴陀螺稳定器的理论分析

从基本理论看,重点应是学习单轴稳定器。在不考虑平台所产生的阻尼力矩 $C_x \theta_x$ 、 $C_y \theta_y$ 的情况下,只工作在稳定状态时,图 5-2 所示的单轴动力陀螺稳定器的技术方程为

$$\begin{cases} J_x \ddot{\alpha} + C_\alpha \dot{\alpha} + H \dot{\beta} = M_m + M_{xf} \\ J_y \ddot{\beta} + C_\beta \dot{\beta} - H \dot{\alpha} = 0 \end{cases} \quad (5-7)$$

将式(5-5) $M_m = -K_m \beta$ 代入式(5-7)得

$$\begin{cases} J_x \ddot{\alpha} + C_\alpha \dot{\alpha} + H \dot{\beta} = -K_m \beta + M_{xf} \\ J_y \ddot{\beta} + C_\beta \dot{\beta} - H \dot{\alpha} = 0 \end{cases} \quad (5-8)$$

式中, J_x 为绕稳定轴 O_x 的转动惯量; J_y 为绕修正轴 O_y 的转动惯量; C_α, C_β 分别为稳定轴与进动轴上阻尼器的阻尼系数; K_m 为稳定回路执行机构放大系数, $K_m = ik_u k_i k_m$; H 为陀螺动量矩; M_{xf} 为作用在 O_x 轴的干扰力矩; $\ddot{\alpha}, \dot{\alpha}$ 分别为绕 O_x 轴转动的角加速度、角速度; $\ddot{\beta}, \dot{\beta}, \beta$ 分别为绕 O_y 轴转动的角加速度、角速度和角度。

单轴动力陀螺稳定器在稳定工作状态时的各项力矩如图 5-4 所示,方框图如图 5-5 所示,其中 O_y 轴上的修正力矩 $M_y = 0$ 。

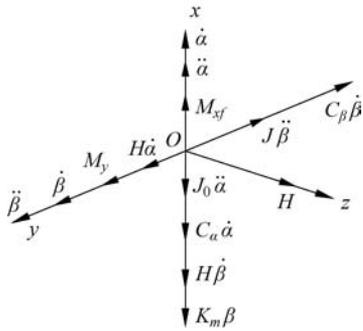


图 5-4 作用在陀螺稳定器上的力矩

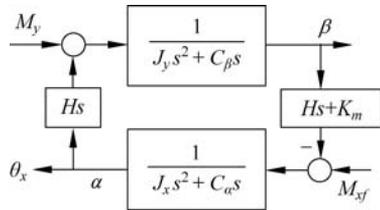


图 5-5 方框图

下面讨论陀螺稳定器的过渡过程、陀螺章动和稳定精度对稳定器的影响。

1. 动力陀螺稳定器的过渡过程

在讨论稳定回路的工作时,要求被稳定对象保持给定的起始位置,即要求 $\dot{\alpha} = 0, \ddot{\alpha} = 0$ 。此时,式(5-8)简化为

$$H\dot{\beta} + K_m \beta = M_{xf} \quad (5-9)$$

假设动量矩 H 、外干扰力矩 M_{xf} 为常值,则方程的解(图 5-6)为

$$\beta = M_{xf} (1 - e^{-\epsilon t}) / H\epsilon \quad (5-10)$$

式中, $\epsilon = K_m / H$ 。

陀螺转子轴最终停止在偏离起始位置 Oz_0 的 Oz 处,稳态角为

$$\beta^* = M_{xf} / K_m \quad (5-11)$$

由于外干扰力矩 M_{xf} 为稳定力矩 $K_m \beta^*$ 所平衡,此时绕稳定轴的稳态转角 $\alpha^* = 0$,即外干扰力矩对稳定轴无影响,这是动力陀螺稳定器的特点。

根据控制理论,非周期性过渡过程到达稳态值的 90%~97%,即认为过渡过程结束,允许存在一个误差角 $\delta = \beta^* - \beta$,相对误差角为

$$\eta = \frac{\delta}{\beta^*} = \frac{\beta^* - \beta}{\beta^*} = 1 - \frac{M_{xf} (1 - e^{-\epsilon t}) / H\epsilon}{M_{xf} / H\epsilon} = e^{-\epsilon t} \quad (5-12)$$

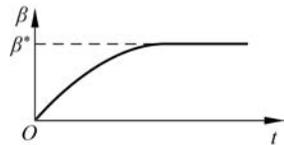
因 $e^{-\epsilon t} \approx 0.043$,按参数 β 的变化,当 $\eta = 4.3\%$ 时,认为过渡过程结束。过渡过程时间

$$t^* = \pi / \epsilon = \pi H / K_m \quad (5-13)$$

过渡过程时间 t^* 取决于动量矩 H 与稳定回路执行机构的放大系数 K_m 。如有一动力陀螺稳定器, $H = 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}, K = 0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$, 则 $t^* \approx 0.31 \text{ s}$ 。

2. 陀螺仪的章动问题

图 5-5 中,只求解陀螺仪的章动成分时,可设稳定电机不工作,即 $K_m = 0$,这时求出

图 5-6 进动角 β 变化曲线

外干扰力矩 M_{xf} 与平台偏移 θ_x 之间的传递函数为

$$\frac{\theta_x(s)}{M_{xf}(s)} = \frac{J_y s + C_\beta}{J_x J_y s \left[s^2 + \frac{J_x C_\beta + J_y C_\alpha}{J_x J_y} s + \frac{C_\alpha C_\beta + H^2}{J_x J_y} \right]} \quad (5-14)$$

其特征方程式为

$$s^2 + \frac{J_x C_\beta + J_y C_\alpha}{J_x J_y} s + \frac{C_\alpha C_\beta + H^2}{J_x J_y} = 0 \quad (5-15)$$

其振荡频率为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C_\alpha C_\beta + H^2}{J_x J_y}} \quad (5-16)$$

这个振荡频率即为二自由度陀螺章动频率,代表了陀螺的高频衰减振荡。

对于一般应用的二自由度陀螺仪,陀螺的质量大部分集中在陀螺转子及内环上,为了估算无阻尼自振荡频率 ω_0 ,可认为 $J_x \approx J_y \approx 1.5J$, $C_\alpha \approx C_\beta \approx 0$,代入式(5-16)得

$$\omega_0 = \frac{\Omega}{1.5} = 0.66\Omega \quad (5-17)$$

比如,当自转角速度 Ω 取为 24000r/min 时, $f_0 = 267\text{Hz}$ 。

实际应用的陀螺稳定器,通频带的宽度一般不超过十几赫兹。显然满足 $\omega \gg \omega_0$ 的条件,即平台不反映陀螺仪的章动。因此,在研究稳定器系统的运动时,不必考虑陀螺仪章动的影响。

3. 动力陀螺稳定器的稳定性和精度问题

按自动控制原理,增大通道的 K_m 可提高 α 的稳态精度。但从图 5-5 动力陀螺稳定器的方框图来看系统特征方程。将式(5-8)变为

$$\begin{cases} J_x \ddot{\alpha} + C_\alpha \dot{\alpha} + H \dot{\beta} + K_m \beta = 0 \\ J_y \ddot{\beta} + C_\beta \dot{\beta} - H \dot{\alpha} = 0 \end{cases} \quad (5-18)$$

从式(5-18)第二式得出 $\dot{\alpha}$ 和 $\ddot{\alpha}$ 的表达式,代入第一式中,经整理得

$$J_y J_x \ddot{\beta} + (J_y C_\alpha + J_x C_\beta) \dot{\beta} + (H^2 + C_\alpha C_\beta) \dot{\beta} + H K_m \beta = 0 \quad (5-19)$$

上式的特征方程为

$$J_y J_x \lambda^3 + (J_y C_\alpha + J_x C_\beta) \lambda^2 + (H^2 + C_\alpha C_\beta) \lambda + H K_m = 0 \quad (5-20)$$

根据劳斯稳定性判据,应有

$$\begin{cases} J_y J_x > 0 \\ J_y C_\alpha + J_x C_\beta > 0 \\ H^2 + C_\alpha C_\beta > 0 \\ H K_m > 0 \end{cases} \quad (5-21)$$

同时

$$(J_y C_\alpha + J_x C_\beta)(H^2 + C_\alpha C_\beta) > J_y J_x H K_m \quad (5-22)$$

在动力陀螺稳定器中,稳定轴上的阻尼系数 C_α 和进动轴上的阻尼系数都比较小,特别是在进动轴上往往不设阻尼器, $C_\beta \approx 0$, 这样得到

$$C_\alpha H/J_x + C_\beta H/J_y > K_m > 0 \quad (5-23)$$

由此可以看出,增大放大系数 K_m , 受到一定的限制。虽然增大 K_m 对提高精度和减小过渡过程时间都有益,但超过了界限,系统就不稳定了。

所以,要提高陀螺稳定器的精度,可在回路中加校正装置(也就是设计控制系统的控制器)。在各种稳定系统中,稳定回路的设计历来是重要的,往往也是复杂的。

此外,还要考虑陀螺的漂移。动力陀螺稳定器进动轴上的干扰力矩,特别是采用滚珠轴承来支承时,不可避免存在干摩擦力矩 M_{yf} , 将引起被稳定对象与外框一起绕稳定轴以角速率 $\dot{\alpha}_f$ 漂移偏离给定的 $\theta_x=0$ 的位置。根据进动方程 $\dot{\alpha}_f = -M_{yf}/H$, 增大 H 可减小漂移,但不可避免地增大了整个装置的尺寸、重量。减小进动轴上的干扰力矩 M_{yf} 是个好措施。因此,现多采用小型单自由度液浮积分陀螺、微分陀螺和挠性陀螺构成稳定器。这些陀螺的动量矩很小,所产生的陀螺力矩对稳定回路来说几乎没有影响,因此这种稳定器也不是“动力陀螺”的了。陀螺在这里只起传感器的作用。

5.1.3 二自由度液浮陀螺稳定器

如果用小型二自由度液浮陀螺仪来实现单轴陀螺稳定器,其安装方式和图 5-2 的二自由度动力陀螺的安装方式相同。但陀螺的动量矩很小。而且由于二自由度液浮陀螺仪的阻尼系数很小,由此引起的阻尼力矩也不必考虑,陀螺在这里只起传感器的作用。因此,二自由度陀螺仪的 x 轴和 y 轴之间相互解耦,可将其作为两个独立的角度传感器通道来考虑,即 $\beta = K_x \theta_x, \alpha = K_y \theta_y$ 。

这时,对应图 5-3 所示的稳定回路,有

$$\begin{cases} J_x \ddot{\theta}_x = M \\ -K_m \beta = M_m \\ \beta = K_x \theta_x \\ M = M_m + M_{xf} \end{cases} \quad (5-24)$$

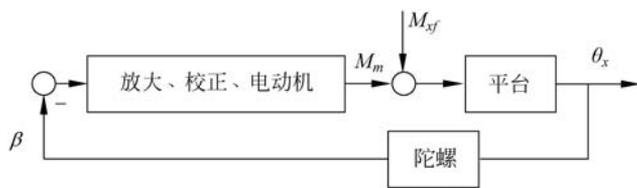
此时单轴陀螺稳定器的开环传递函数为

$$\left. \frac{\theta_x(s)}{M_{xf}(s)} \right|_k = \frac{K_m K_x}{J_x s^2} \quad (5-25)$$

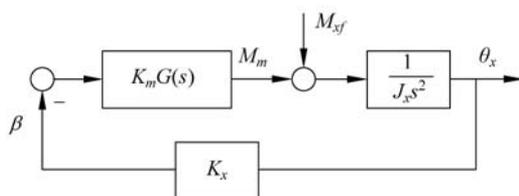
为了使系统稳定和减少稳态误差以及改善这类系统的动特性,往往加入 RC 有源或无源校正装置(图 5-7),这类无源校正网络电路图及传递函数为

$$G(s) = \frac{K_G (1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \quad (5-26)$$

图 5-8 给出了对应的对数幅频特性图。低频时,校正网络相当于一个积分环节消除静态误差,在较高频率时,相当于一个微分环节增强信号使系统得到稳定。加校正环节后在截止频率附近,是 -20dB , 而不是 -40dB , 使系统具有较高的稳定储备,其值一般可大于 45° 。

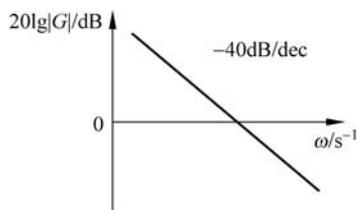


(a) 结构示意图

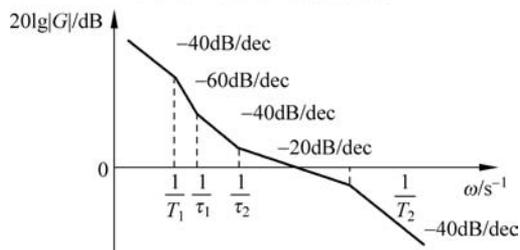


(b) 方框图

图 5-7 加入校正装置 $G(s)$



(a) 系统原开环对数幅频特性



(b) 加校正环节后系统开环对数幅频特性

图 5-8 系统开环对数幅频特性

5.1.4 单自由度液浮陀螺稳定器

1. 单自由度液浮积分陀螺组成的稳定器

单自由度液浮积分陀螺组成的稳定器结构示意图如图 5-9 所示。用单自由度液浮陀螺组成的单轴稳定器与二自由度陀螺组成的单轴稳定器一样，初始调整时，必须保证平台的稳定轴 O_x 和陀螺的进动轴 O_y 、转子轴 O_z 相互垂直。

对于工作范围较宽的稳定器，陀螺的转角 β 已不是小量角，作用在进动轴 O_y 上的阻

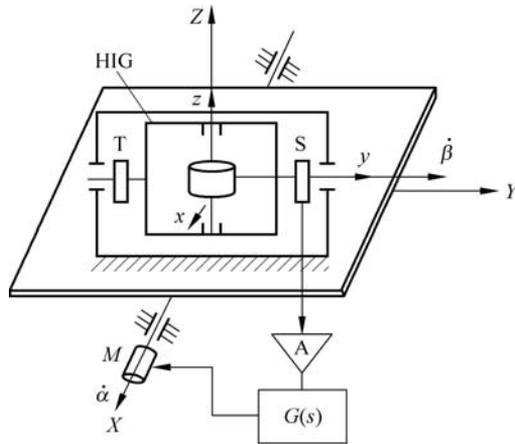


图 5-9 单自由度液浮积分陀螺组成的稳定器结构示意图

HIG—浮子积分陀螺；S—陀螺信号传感器；T—陀螺力矩传感器；A—放大器；M—力矩电机

尼力矩 $C\dot{\beta}$ 影响很大,作用在 Ox 轴上的陀螺力矩 $H\dot{\beta}\cos\beta$ 也不能忽略不计。

整个稳定器的角运动可以看成是一个大陀螺。稳定器平台坐标系为 $OXYZ$,陀螺坐标系为 $Oxyz$ 。如果平台绕 OX 轴的转动角速度 $\omega_x=0$,则系统的运动方程为

$$\begin{cases} J_0\ddot{\alpha} + H\dot{\beta}\cos\beta = M_X \\ J\ddot{\beta} + C\dot{\beta} + K\beta - H\dot{\alpha}\cos\beta = M_Y \end{cases} \quad (5-27)$$

式中, J_0 为平台绕 Ox 轴的转动惯量; J 为浮子的转动惯量; C 为阻尼系数; K 为弹簧刚度; M_X, M_Y 分别为作用在 OX, OY 轴的外力矩。

假设,作用在陀螺进动轴 Oy 上的所有外力矩为 0,作用在平台对称轴 OX 上的外力矩为常值 M 。当初始条件为 $\alpha(0)=\beta(0)=0, \dot{\alpha}(0)=\dot{\beta}(0)=0$ 时,有

$$\begin{cases} J_0\ddot{\alpha} + H\dot{\beta}\cos\beta = M \\ J\ddot{\beta} - H\dot{\alpha}\cos\beta = 0 \end{cases} \quad (5-28)$$

方程组的解为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{JM}{H^2 \cos^2 \beta} (1 - \cos nt) \\ \beta = \frac{M}{H \cos \beta} t - \frac{JM}{H^2 \cos^2 \beta} \sqrt{\frac{J_0}{J}} \sin nt \end{cases} \quad (5-29)$$

其中, $n = \frac{H \cos \beta}{\sqrt{JJ_0}}$ 。

相点在相平面上的运动轨迹示于图 5-10。在图上

$$\Delta\alpha = \frac{JM}{H^2 \cos^2 \beta} = \frac{M}{H^2 \cos^2 \beta / J} = \frac{M}{S} \quad (5-30)$$

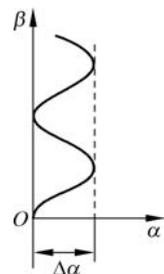


图 5-10 相平面上的运动轨迹

$$S = H^2 \cos^2 \beta / J \quad (5-31)$$

S 为陀螺的准弹簧刚度, 在外力矩 $M_X = M$ 的作用下, 陀螺做强迫运动, 频率为

$$n = \sqrt{S/J_0} = \frac{H \cos \beta}{\sqrt{JJ_0}} \quad (5-32)$$

在外力矩 M_X 的作用下, 陀螺沿 β 轴方向以角速度 $M_X / (H \cos \beta)$ 发散。陀螺转子轴在外力矩 M_X 的作用方向转过 $\Delta\alpha$ 角, 好像是转子与位于惯性空间的基座之间存在一个弹簧。

2. 单自由度液浮速率积分陀螺组成的稳定器

如果采用的陀螺为液浮速率积分陀螺, 则在方程组(5-27)中, $C \neq 0, K = 0$, 其他条件不变, 即

$$\begin{cases} J_0 \ddot{\alpha} + H \dot{\beta} \cos \beta = M_X \\ J \ddot{\beta} + C \dot{\beta} - H \dot{\alpha} \cos \beta = 0 \end{cases} \quad (5-33)$$

此时方程的近似解为

$$\begin{cases} \alpha \approx \frac{M_X J}{H^2 \cos^2 \beta} \left(1 - e^{-\frac{c}{2J}t} \cos n_1 t \right) + \frac{M_X}{H i_g \cos \beta} t \\ \beta \approx \frac{M_X}{H \cos \beta} t - \frac{M_X J}{H^2 \cos^2 \beta} \sqrt{\frac{J_0}{J}} e^{-\frac{c}{2J}t} \sin n_1 t - \frac{M_X J}{H^2 \cos^2 \beta i_g} \left(1 - e^{-\frac{c}{2J}t} \cos n_1 t \right) \end{cases} \quad (5-34)$$

其中

$$\begin{aligned} i_g &= H \cos \beta / C \\ n_1 &= \sqrt{H^2 \cos^2 \beta / (JJ_0) - [C / (2J)]^2} \end{aligned}$$

陀螺的运动衰减到非周期极限状态的条件为

$$H^2 \cos^2 \beta / (JJ_0) = [C / 2J]^2 = [H \cos \beta / (2J i_g)]^2 \quad (5-35)$$

陀螺相点在相平面上的运动轨迹如图 5-11 所示, 由图可得

$$\begin{cases} \Delta\alpha = JM_X / (H^2 \cos^2 \beta) \\ \Delta\beta = JM_X / (H^2 \cos \beta i_g) \end{cases} \quad (5-36)$$

陀螺相点在相平面上的运动轨迹最终收敛到一条极限直线。

作用在平台对称轴 OX 上的空气阻力矩是很小的。从图 5-11 中可以看出, 由于采用了液浮速率陀螺, 作用在进动轴 Oy 上的阻尼力矩 $C\dot{\beta}$ 对平台运动的影响显著。

3. 单自由度液浮速率陀螺组成的稳定器

在此种情况下, 液浮陀螺的弹性元件和阻尼器都工作正常, 即在方程组(5-27)中, $C \neq 0, K \neq 0$ 。系统的运动方程为

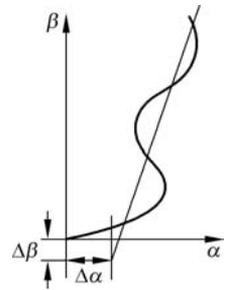


图 5-11 相点在相平面上的运动轨迹

$$\begin{cases} J_0 \ddot{\alpha} + H \dot{\beta} \cos \beta = M_X \\ J \ddot{\beta} + C \dot{\beta} + K \beta - H \dot{\alpha} \cos \beta = 0 \end{cases} \quad (5-37)$$

在假定 β 是小量角的情况下, 消去参数 β 得

$$\ddot{\alpha} + \frac{C}{J} \dot{\alpha} + \left(\frac{H^2}{JJ_0} + \frac{K}{J} \right) \alpha = \frac{K}{JJ_0} M_X \quad (5-38)$$

可以看出, 章动频率为

$$n_H = \sqrt{\frac{H^2}{JJ_0} + \frac{K}{J}} \quad (5-39)$$

由于弹性约束的存在(弹性元件的刚度为 K), 系统章动频率增大了。

平台的稳态误差为

$$\Delta \ddot{\alpha} = M_X / (J_0 + H^2/K) = M_X / J'_0 \quad (5-40)$$

采用速率陀螺组成的稳定器好像是一个非陀螺体, 在外力矩 M_X 的作用下, 平台将以角加速度 $\Delta \ddot{\alpha}$ 加速转动, 所不同的是由于速率陀螺的存在, 使平台绕对称轴的转动惯量由 J_0 变成了 J'_0 。则

$$J'_0 = J_0 + H^2/K \quad (5-41)$$

从而使转动的角加速度 $\Delta \ddot{\alpha}$ 减小。如果外力矩 M_X 为常值, 作用的时间为 t , 则误差角 $\Delta \alpha$ 为

$$\Delta \alpha = M_X t^2 / 2(J_0 + H^2/K) \quad (5-42)$$

可以看出, 由速率陀螺组成的稳定器, 其稳定误差与外力矩成正比, 与外力矩作用时间的平方成正比。所以, 这种稳定器过去多在舰船上采用, 因为在海面上浪涌形成的振荡近似于周期性, 可使误差不发散。

而由速率积分陀螺组成的稳定器的稳态误差:

$$\alpha \approx \frac{M_X}{H i_g \cos \beta} t \quad (5-43)$$

与外力矩及作用时间成正比, 因此精度高一些。

例如, 现有卫星稳定器, 其参数为: $M_X = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$, $J = 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $t = 100 \text{ s}$, $J_0 = 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $H = 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$, $i_g = H \cos \beta / C \approx 1.6 \times 10^2$ 。

采用液浮积分陀螺时的稳态误差为

$$\Delta \alpha = M_X t / (H i_g) \approx 6'$$

采用液浮速率陀螺时, 弹性元件的刚度为 $K = 10^2 \text{ N} \cdot \text{m}$, 其稳定误差为

$$\Delta \alpha = M_X t^2 / 2(J_0 + H^2/K) \approx 1.5^\circ$$

可以看出, 简单的液浮陀螺稳定器的精度还是较低的, 且不宜长期工作在空间飞行器中被稳定体上。现在应用较多的是工作于双闭环(位置环和速度环)的稳定器, 增设测速发电机, 产生速率反馈信号, 输入到放大器, 从而提高系统的品质。

5.2 三维陀螺稳定平台

5.2.1 三轴稳定平台

1. 三轴稳定平台的基本结构

三轴稳定平台按其模拟坐标系的不同,可以分为空间稳定平台和跟踪平台。空间稳定平台模拟惯性坐标系,不受载体运动和干扰力矩的影响;跟踪平台模拟任一需要的导航坐标系,多数是模拟地理坐标系,跟踪平台必须在陀螺仪的力矩器中施加修正电流,使平台坐标系跟踪当地地理坐标系。

三轴稳定平台中使用的陀螺仪可以是单自由度的,也可以是二自由度的。一个空间的三轴稳定平台需要三个单自由度陀螺仪,而使用二自由度陀螺仪时,只需要两个陀螺仪就可以了。图 5-12 是用两个二自由度陀螺仪构成的三轴稳定平台,每一个陀螺仪可以敏感平台绕两个坐标轴方向的转角,两个陀螺仪的转子轴方向要互相垂直设置。互相垂直的三个敏感轴各敏感平台上一个坐标轴向的干扰力矩,通过稳定电机产生相应力矩抵消干扰力矩。多余的一个敏感轴,可考虑用于修正或监控用。

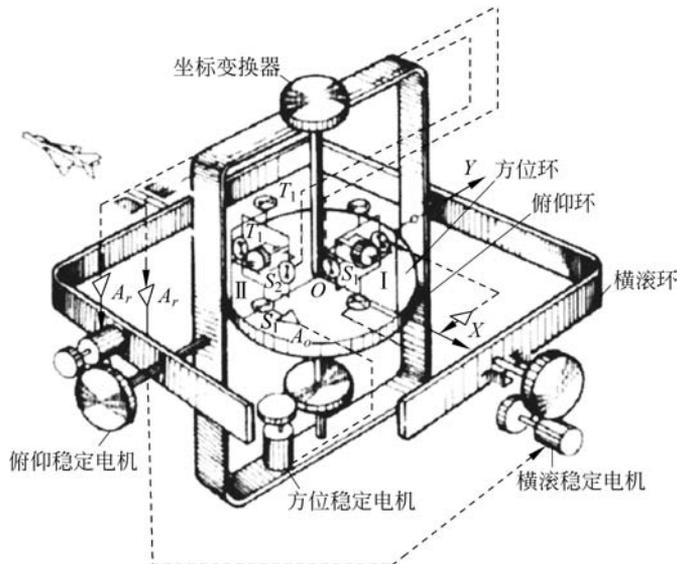


图 5-12 三轴稳定平台

传统的机电陀螺仪离不开高速转动的转子,主要存在问题是高速转子容易产生质量不平衡问题并受加速度影响;还需要一定的时间才能达到转速平衡,使用不便,所以现代平台的设计中,只把陀螺仪作为干扰力矩的敏感元件,而不再把它直接作为干扰力矩的补偿器,即不再使用动量矩大、体积大的框架式陀螺仪。陀螺平台质量由几十千克发展到仅 0.8kg,外廓尺寸由 0.5m 以上发展到仅为 0.08m 的小型陀螺平台。目前,稳定平台向高精度、高可靠性、低成本、小型化,并对平台误差进行补偿的方向发展。

由陀螺仪稳定的平台是相对惯性空间稳定的,保持了一个惯性坐标系。由于惯性导航系统的精度要求,在载体机动或振动的环境条件下,稳定回路应具有很好的静态和动态特性,以后将对其动态特性予以分析。

三轴稳定平台是惯性导航系统中的核心部件。影响惯性导航系统位置误差、速度误差、方位误差的主要因素是平台的漂移角速度。产生平台漂移的原因除了漂移角速度外,陀螺在台体上的安装误差也是重要原因。所以,对惯性元件在平台上的安装也必须提出一定的要求。对于中等精度的导航系统来说,陀螺仪和加速度计敏感轴的安装误差不能超过几角分。此外,计算机与平台的衔接也应特别注意,由于平台跟踪地理系是施加控制电流于陀螺而产生的,如果计算机输出陀螺力矩器的数字电流不准确,或者力矩器线性度不好,都将导致产生等效的陀螺漂移,即产生平台漂移。在这方面对控制陀螺的数字电流以及力矩器的线性度一般都应有 0.01% 的精度要求。

三轴稳定平台还应尽量采取措施避免以下干扰:电磁干扰、振动干扰、温度变化干扰等。在惯性导航系统的工程实现上,电磁兼容、减振基座、平台的热平衡设计和调节都是重要的课题。高精度的三轴稳定平台要采用两级到三级温控以减小温度变化的影响。

除坐标变换器外,单轴稳定平台的工作原理、系统组成、传递函数和系统性能指标等内容都适用于三轴稳定平台。因此,下面以方位坐标变换器为例,介绍坐标变换器的作用和基本原理。

2. 方位坐标变换器

由于转台是可以转动的,安装在平台上的陀螺 I 与 II 相对外环轴与内环轴的相对位置是变化的,这与单轴稳定平台是不同的。陀螺 I 的测量轴(敏感轴)为俯仰轴与方位轴,陀螺 II 的测量轴(敏感轴)为方位轴与横滚轴。由于方位轴与俯仰轴相对平台的外环轴与内环轴的角位置是变化的,所以外环稳定回路与内环稳定回路中陀螺、控制信号的来源也应是变化的。此任务常常采用正弦-余弦旋转变压器来解决(见图 5-13),这种变压器称为方位坐标变换器。

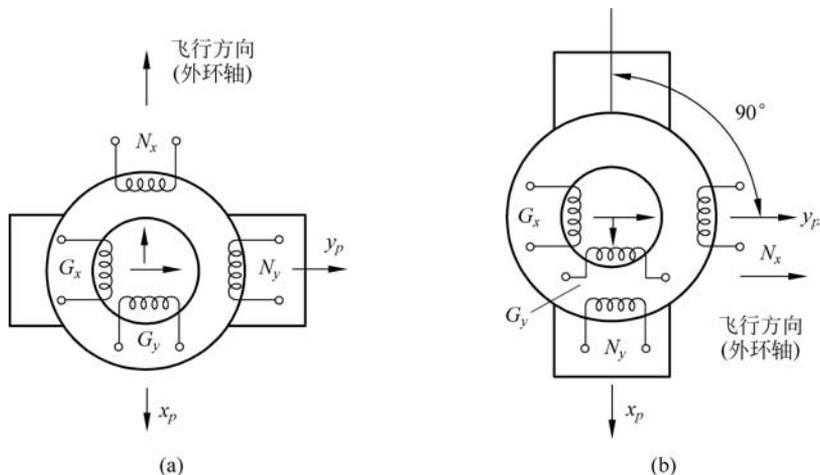


图 5-13 方位坐标变换器

旋转变压器的转子安装在平台的方位轴上,转子上有两个励磁绕组,用 G_x 与 G_y 表示。变压器的定子上也有两个绕组用 N_x 与 N_y 表示。

在起始时,相当于图 5-13(a)的位置,在外环轴上,即沿飞行方向,作用一干扰力矩于平台上,此时陀螺 I 的动量矩方向 H 与外环轴平行,故对此干扰力矩不敏感;而陀螺 II 的动量矩与其垂直,故输出与干扰力矩成正比的信号,输给绕组 G_y 后,经变压器传递给绕组 N_x ,经放大后,传递给外环轴的力矩器(稳定电机) M_x 的控制绕组,产生与干扰力矩大小相等、方向相反的稳定力矩,从而实现了稳定回路的工作过程。

如果飞行方向改变,航向角改变了 90° (相当于图 5-13(b)的位置),变压器定子上的两个绕组随内环、外环一起转动了 90° 。此时,仍然是在外环轴上作用一干扰力矩,因陀螺 II 的动量矩与外环轴平行,而 I 的动量矩与其垂直,因此上述稳定过程只有陀螺 I 参与完成了。

当航向角为上述 $0^\circ\sim 90^\circ$ 时,如果在外环轴上同样作用一干扰力矩时,陀螺 I、II 都能敏感到,分别输出信号,经放大后,经过变压器耦合,作为力矩器(稳定电机)的控制信号。

5.2.2 四平衡环系统

在一般的惯性导航系统中,在载体不做大角度机动飞行的情况下,三环式平台就可以满足导航的需要。所谓三环,即由平台台体、内环和外环三者组成。由于平衡环系统(即稳定系统)的作用在于稳定平台以隔离载体运动对平台的影响,因此,三环系统在载体上的安装方式不同,它允许载体的最大旋转角度是不同的,否则,它就不能起到隔离载体运动的目的,而是载体将带着平台一起转动,平台就失去了相对惯性空间的稳定性。图 5-14(a)给出一个三环式系统在导弹上安装的情况,其外环轴安装于导弹的俯仰轴方向。这样安装的平台,允许载体在方位轴和俯仰轴方向做 $\pm 360^\circ$ 的转动,而在滚动轴方向只允许做小于 $\pm 90^\circ$ 的转动。当滚动角为 90° 时,如图 5-14(b)所示,弹体将带动外环转动 90° ,使外环和中环在一个平面上,这时的惯性导航平台只有两个自由度,平衡环系统就不能隔离和平衡环面垂直的载体的转动,平衡环的这种现象称做平衡环的闭锁现象。

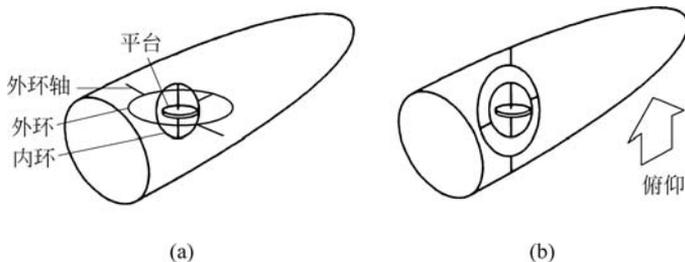


图 5-14 平衡环的闭锁现象

对上述三环式平台,当外环轴位于导弹的滚动轴时,只要当弹体俯仰角达到 90° 时就会出现闭锁现象。因此,必须根据载体的运动规律来选择三环式平台的安装方式,无论如何选择安装方式,三环式平台在原理上总是存在一个旋转轴方向有闭锁现象的可能。为了避免这一点,则必须选用四平衡环式系统。通常,在上述安装方式下,当载体有绕滚

动轴的转动时,就必须采用四平衡环式系统。

四平衡环式系统的机械编排如图 5-15 所示。第三平衡环相对第二平衡环垂直并限定转动在范围之内,在第二个平衡环和第三个平衡环之间装有角度传感器,给出两环间的正交性。角度传感器和第四平衡环的力矩电机构成随动系统,通过第四平衡环的转动带动第三个平衡环的转动,第四平衡环功用是任何时候都要保证第三平衡环和第二平衡环垂直,使平台在任何的工作条件下均能保持相对惯性空间有三个自由度,也称为全姿态稳定平台。

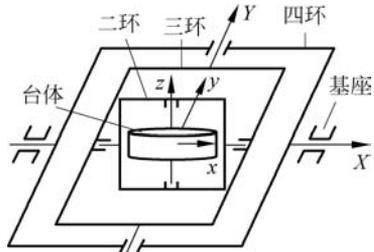


图 5-15 全姿态稳定平台

用图 5-16 对四平衡环系统的工作原理做进一步说明。图 5-16(a)表示直线水平飞行情况,第二环和第三环垂直,第四环和第三环在一个平面上。这时,平台允许载体绕三个轴任意旋转,不会发生闭锁现象。

图 5-16(b)表示载体绕滚动轴滚动情况下,当有一个滚动角出现时,第四环将带动第三环随载体一起转动一个角度,在陀螺稳定回路的作用下,驱使第二平衡环运动保持平台水平,第二平衡环仍保持初始垂直方向。因此,第二环和第三环之间就不处于垂直状态,此时,其间的角度传感器将有信号输出。

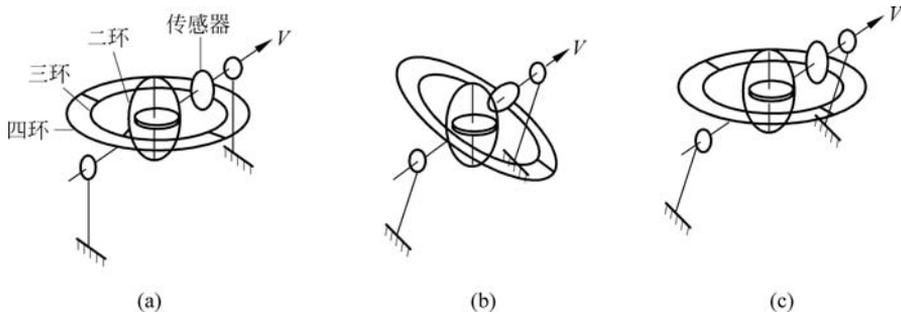


图 5-16 四平衡环系统的工作原理

图 5-16(c)表示第四平衡环上的力矩电机在角度传感器信号的作用下,带动第四平衡环和第三平衡环转动,使第三平衡环和第二平衡环处于垂直状态,使角度传感器输出为零。如果载体继续滚动,上述功能继续完成,始终保持第二环和第三环的垂直,从而达到避免平衡环闭锁现象。

图 5-17 给出一个应用第四平衡环系统的例子。

图 5-17(b)为水平飞行状态,由于四平衡环结构,保证了平台不存在闭锁现象。

图 5-17(c)为导弹发射状态,即垂直发射。这时,如第二环和第三环之间的角度传感器给出一个不垂直信号时,第四环的任何转动都不能消除以上的不垂直状态,因第四环的转轴和第三环的转轴垂直,第四环将带动第三环和第二环相对平台一起转动,使平衡环系统失去稳定。为避免上述现象发生,对垂直发射的弹体,规定发射时第四环锁定,断开随动系统,成为三环式系统。当发射后俯仰角开始小于 90° 时,第四平衡环才接入。

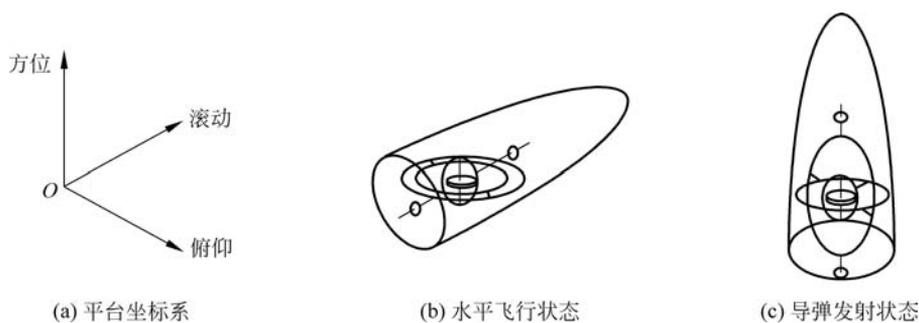


图 5-17 四平衡环系统

5.3 惯性定向装置

5.3.1 陀螺地平仪

主轴永沿地垂线的陀螺仪称为陀螺地平仪,又称陀螺垂直仪。陀螺地平仪是利用陀螺仪特性测量载体俯仰和倾侧姿态角的仪表。例如,为了在飞行器上测量飞行姿态,必须在飞行器上建立一个地垂线或地平面基准。利用陀螺仪的定轴性,使转子轴稳定在地垂线上就可以得到这一基准。但是陀螺仪不能自动找到地垂线使转子轴稳定在地垂线上,而且由于内、外环轴上的摩擦力矩使陀螺仪转子轴产生漂移。因此必须解决陀螺仪转子轴自动找到地垂线而且始终稳定在地垂线上的方法。

摆具有敏感地垂线的特性,但受到加速度干扰时会产生很大的误差。如将陀螺仪与摆式敏感元件结合在一起,就可以解决上面的问题。陀螺地平仪就是陀螺仪与摆结合在一起的仪表。它以陀螺仪为基础,用摆式敏感元件和力矩器组成的修正装置对陀螺仪进行修正,使陀螺仪的转子轴精确而稳定地重现地垂线。

图 5-18 是陀螺地平仪的结构原理图。它由双自由度陀螺仪、摆式敏感元件、力矩器和指针刻度盘等组成。陀螺外环轴平行于飞机纵轴安装。飞机俯仰或倾侧时,仪表壳体随之转动,而陀螺自转轴仍然重现地垂线,通过指示机构中飞机标志相对地平线的位置,直观而形象地显示出飞机的姿态。

装在陀螺仪内环轴上的液体开关是一种摆式敏感元件,是具有摆的特性和电路开关特性的气泡水准仪。液体开关感受陀螺仪转子轴相对地垂线的偏差,并将它变成电信号,经放大器放大后分别送给装在内、外环轴上的力矩器(力矩马达),产生修正力矩,使陀螺仪转子轴始终沿地垂线方向。修正系统,采用交叉修正方式:主轴相对地垂线绕内环轴有偏角时,在外环轴施加修正力矩;反之亦然。

修正速度一般为几度每分钟,修正缓慢,当运动加速度干扰引起液体开关的液面倾斜时,在短时间内错误修正仅引起自转轴偏离地垂线一个很小的角度。而且,当飞机线加速度或盘旋角速度超过一定值时,会自动切断相应的修正电路,以消除错误修正,提高抗干扰能力。仪表起动前陀螺自转轴处于随意位置,为使自转轴快速重现地垂线,起动

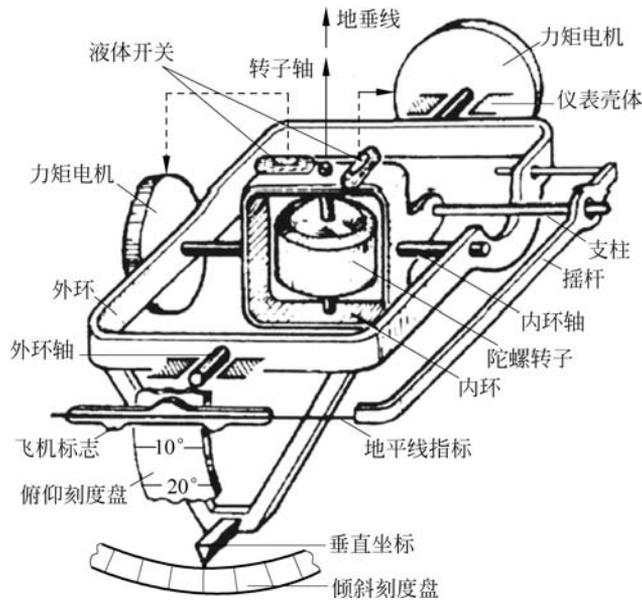


图 5-18 陀螺地平仪的结构原理图

时可加大修正力矩或靠锁定装置把自转轴锁在地垂线方向上。

为了防止俯仰角为 90° 时外环轴与自转轴重合而使陀螺仪表失去正常工作条件,地平仪中增设了随动环,将陀螺转子和内外环都安装在随动环上,随动环轴平行于飞机的纵轴安装。载体做任何姿态的机动飞行,随动环都能保证自转轴、内环轴和外环轴三者正交,从而使俯仰角和倾侧角的显示范围均可达到 360° 。

陀螺地平仪分为直读式与远读式两种。直读式直接通过表的指示机构表示飞机姿态。远读式通过装在陀螺仪上的传感元件输出飞机姿态信号,由远距传输系统送到地平指示器进行显示。这种带有信号传感元件的陀螺仪称为垂直陀螺,它作为姿态传感器可向各机载系统提供飞机俯仰和倾侧角信号。歼击机用直读式地平仪,在飞机爬升时,飞机标志移到地平线下方,俯冲时则相反,不符合直观感觉。远读式地平仪则能克服这一缺点。

5.3.2 陀螺寻北仪

主轴水平并指向某确定方位(如北向)的陀螺仪称为陀螺方位仪。

自由陀螺可短时作为方位仪使用,也可以加方位修正系统,其敏感元件是磁针,因而构成陀螺磁罗盘(图 5-19)。由于磁针指北性能易受干扰,陀螺磁罗盘主要用于方位精度要求不高的场合。

陀螺寻北仪也称为陀螺罗经(Gyro-Compass),是能自动指北的陀螺仪器。

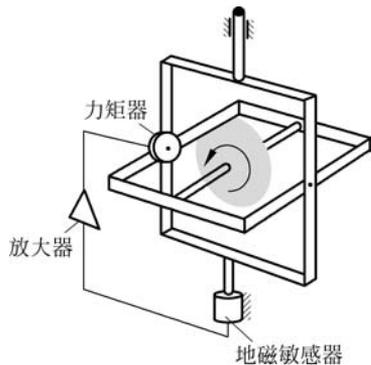


图 5-19 陀螺磁罗盘示意图

经典陀螺寻北仪的原理是：由于地球自转，地球上(北半球)的北向不断西偏。如果赋予陀螺下摆性，并将主轴抬高一小角 β^* （一般几角分），则在重力作用下，主轴向西进动，并将追上北向而永远指北(图 5-20)。抬高角的最佳值 β^* 是依靠地平面的“西升东落”效应而自动达到的。

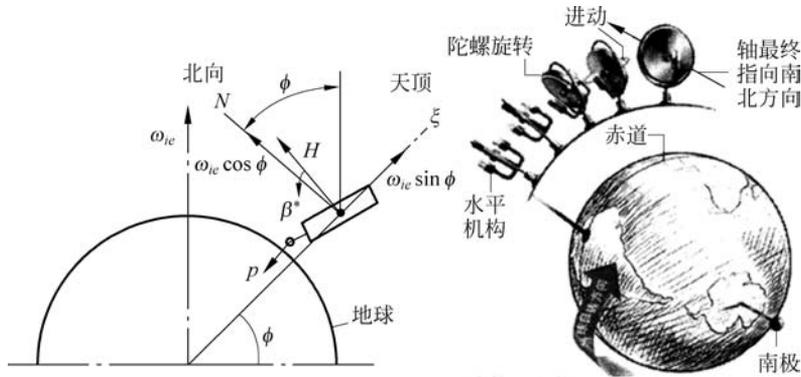


图 5-20 经典陀螺寻北仪寻北示意图

1. 陀螺寻北技术的发展与分类

寻北技术分为陀螺寻北和加速度计寻北两类。陀螺寻北技术根据采用的陀螺种类不同，可分为陀螺摆式寻北仪、单轴速率陀螺寻北仪、捷联式陀螺寻北仪。按采样方式和解算方式的不同，可以分为连续转动方案、多位置方案、四位置方案和二位置方案等。按采用寻北方法的不同，分为物理寻北和解析法寻北。

陀螺寻北技术的第一阶段：20 世纪 50 年代在船舶陀螺罗经的基础上，德国克罗斯塔尔矿业学院于 1949 年研制出液浮式单转子陀螺球，重量 640kg。寻北时间约 4h，一次观测误差 $\pm 60''$ 。

第二阶段：从 20 世纪 60 年代开始，出现了摆式陀螺罗盘和上架式陀螺经纬仪，1970 年中国产品的一次观测误差为 $\pm 10''$ （角秒），定向时间 40min，重量 60kg。

第三阶段：20 世纪七八十年代以来，随着电子技术、自动控制技术、光学传动器技术迅猛发展，为进一步提高陀螺罗盘精度和可靠性、减轻观测者劳动强度提供了技术基础，陀螺罗盘操作过程向自动化方面发展。联邦德国于 1978 年研制出数字显示方位角的自动测量陀螺仪，该仪器只需观测 7min，就可获得 $5''$ 的定向精度。

此外，美国、苏联、匈牙利、瑞士、联邦德国均研制出一批精度较高的同类产品，用于矿山挖掘、油井钻探或战略导弹的瞄准。目前精度较高的如乌克兰中央设计局研制的 GT3 陀螺指北仪，采用磁悬浮陀螺摆式结构，精度达到 $3''$ ，反应时间为 7min。

工程上对精度寻北的指标要求为优于 $15''$ ，甚至优于 $1''$ 。中低精度寻北指标一般是 $1'$ 。

经过长达一个世纪的研究，陀螺罗盘式寻北仪测量精度从 $\pm 60''$ 提高到 $\pm 0.5''$ ，定向时间从 4h 缩短到几分钟，从手工操作进入自动化测试。进入 21 世纪，陀螺罗盘式寻北仪还会进一步提高。随着光学陀螺等固体陀螺的问世和技术上日益完善，捷联式寻北仪

与 GPS 相结合会得到进一步的发展。

为了减少陀螺漂移对寻北精度带来的不利影响,多年来,人们采用了诸多实用化方案和关键技术,其中主要有以下几种。

(1) 多位置静态寻北方案。它是通过采集一个周期内,寻北仪在几个不同的测量点上的输出,解算出敏感轴与地理北向的初始夹角,从而实现寻北定向。具体方案是通过转台转过很多位置,测量地球自转角速度的北向分量在陀螺输入轴上的输出,解算出实时零漂和解算载体轴向与真北方向的初始夹角或直接由其相位信息找到真北方向。根据一个周期内测量点位置的多少和解算方式的不同,分为二位置寻北法、四位置寻北法和多位置寻北法。该方案能在很大程度上克服静态寻北精度受陀螺常值漂移影响较大的缺点,是目前应用最为广泛,技术相对成熟的一种实用化关键技术。

(2) 动态寻北技术。它是一个有潜在前途的寻北解算方式,一般用于单轴速率陀螺寻北系统。具体方案是使转台以恒定角速率连续旋转,同时由陀螺测量地球速率的水平分量,最终解算载体轴向与真北方向的初始夹角,实现自主定向。采用激光陀螺或光纤陀螺构成动态寻北系统,在很大程度上缩短了寻北时间,提高其解算精度。

(3) 解析调平技术。它是提高寻北系统精度和快速性的一项重要技术。具体方案是使用加速度计实时测量转台的倾斜角,并通过解析算法对陀螺仪的信息进行校正补偿,以消除由于转台倾斜时地球自转角速度垂直分量的影响。它克服了人工调平方法操作不便、耗时长等缺点,实现快速寻北的目的。

2. 单轴速率陀螺寻北仪基本原理

下面以单轴速率陀螺寻北仪为例讲述寻北仪的工作原理。由于寻北方案和解算方式的不同,根据陀螺仪的基准面是否水平,介绍理想情况下的二位置寻北方案、四位置寻北方案,连续转动寻北方案,以及非理想情况下(即基准面倾斜)寻北方案。

实际工程应用中,虽然陀螺寻北解算的方式各有不同,但其基本原理都是一样的。假定陀螺的敏感轴在水平面内,且与载体纵轴方向一致。它通过敏感地球自转角速率在地理坐标系中的水平分量,便可以解算出载体纵轴向与真北的夹角或直接确定北向所在的方位。取陀螺坐标系为 $Oxyz$,取当地地理坐标系 $OEN\xi$ 为参考坐标系, xOy 与 EON 平面重合(采用水平调节方法实现), Oy 与 ON (Ox 与 OE) 之间错开了 ψ 角, ψ 称为偏北角,即陀螺敏感轴正向与真北方向的夹角。

在地球上任一纬度 ϕ ,如图 5-21 所示,陀螺相对惯性空间的输出表达式为

$$\boldsymbol{\omega}(t) = \boldsymbol{\omega}_{ie1} \cos\psi + \boldsymbol{\varepsilon}(t) = (\boldsymbol{\omega}_{ie} \cos\phi) \cos\psi + \boldsymbol{\varepsilon}(t) \quad (5-44)$$

式中, $\boldsymbol{\omega}_{ie}$ 是地球相对惯性空间的自转角速度矢量,平行地轴,北向为正; $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ 是陀螺的漂移,包含陀螺常值漂移、周期噪声和随机干扰信号等。

从式(5-44)可见,已知 ϕ ,补偿 $\boldsymbol{\varepsilon}$,就可从陀螺相对惯性空间的输出中求出 ψ ,即算出载体纵轴与真北方向的夹角或直接通过仪表确定北向所在方位。

1) 理想情况下二位置、四位置寻北法

如图 5-22 所示,将陀螺固定在可转动台面(如转台)上,理想情况下,转台台面平行于水平面(可通过转台再平衡控制回路实现),且隔离环境的振动(通过实验室地基实现)。

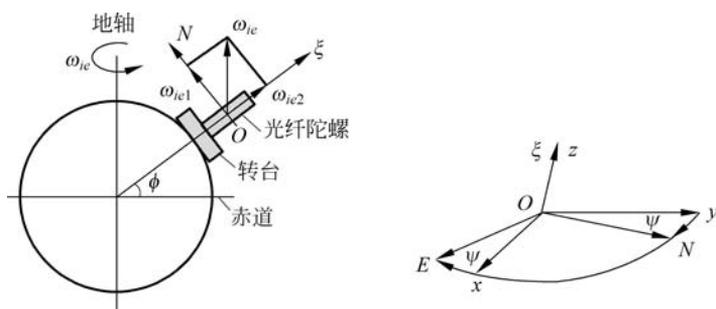


图 5-21 光纤陀螺寻北仪的原理图

陀螺输入轴 Oy 与转台台面平行,即输入轴平行于水平面。调平机构采用可以调节平台升降的三个脚螺旋机构进行粗调平及锁定。

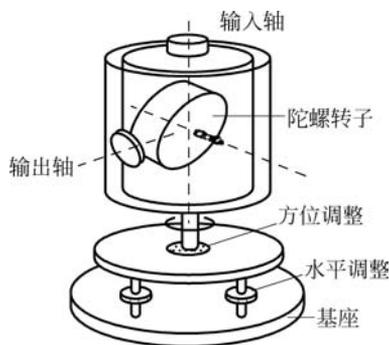


图 5-22 理想情况寻北实验系统

在实验室条件下或者一些对寻北精度要求不高的工程应用中,为了减少寻北解算的计算量,保证寻北解算的实时性,通常采用两位置寻北法。

令陀螺仪从位置 1 精确地旋转 180° ,达到位置 2,这时地球分量的输入就改变了正、负号,而陀螺仪的常值项漂移在短时间内的变化忽略不计,把位置 1、位置 2 的值相减,就得到地速的输入,从而求出陀螺敏感轴与北向的夹角,就是两位置寻北的基本原理。具体描述如下。

当在位置 1 时,有

$$\omega_1 = (\omega_{ie} \cos\phi) \cos\psi + \varepsilon_1(t) \tag{5-45}$$

当在位置 2 时,有

$$\omega_2 = -(\omega_{ie} \cos\phi) \cos\psi + \varepsilon_2(t) \tag{5-46}$$

采用低通滤波,把陀螺输出信号中的高频噪声滤掉,短时间内,有 $\varepsilon_1(t) \approx \varepsilon_2(t) = \varepsilon_d$, ε_d 为陀螺的零偏。则

$$\omega_1 - \omega_2 = (\omega_{ie} \cos\phi) \cos\psi + (\omega_{ie} \cos\phi) \cos\psi \tag{5-47}$$

由上式解算出陀螺敏感轴与真北方向的夹角

$$\psi = \arccos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2\omega_{ie} \cos\phi}\right) \tag{5-48}$$

在上面的处理中消除了陀螺常值漂移,极大地降低了对陀螺精度的要求。同时可用反馈环旋转陀螺使信号差为零,此时陀螺转过的角度就是敏感轴的初始方向与真北方向的夹角。

四位置寻北方案是将转台精确转动到四个特定位置: ψ 、 $\psi+90^\circ$ 、 $\psi+180^\circ$ 、 $\psi+270^\circ$, 得出两个表达式:

$$\psi_1 = \arccos\left(\frac{\omega_1 - \omega_3 + \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2\omega_{ie} \cos\phi}\right) \quad (5-49)$$

$$\psi_2 = \arccos\left(\frac{\omega_2 - \omega_4 + \varepsilon_2 - \varepsilon_4}{2\omega_{ie} \cos\phi}\right) \quad (5-50)$$

由于各种误差源的作用,陀螺测量误差在圆周内引起的寻北误差并不相同,即在圆周上的不同点寻北精度不同,因而采用取加权平均值的方法得出较精确的偏北角 ψ

$$\psi = \psi_1 \sin^2 \psi_1 + \psi_2 \cos^2 \psi_2 \quad (5-51)$$

2) 理想情况下(即基准面水平情况)的连续转动寻北法

连续转动寻北法将静态测量问题转化为动态测量问题。对于光纤速率陀螺,通过人为引入的连续转动对陀螺信号进行周期调制,减小光纤陀螺低频随机漂移误差的影响。通过对旋转转台各位置进行采样,对数据进行最小二乘处理,即可找到编码器零位(初始方位)与地理北向的夹角,即真北方向,达到寻北目的。

具体实现方法是,将光纤陀螺垂直安装在转台上,使其敏感轴与转台台面平行。控制转台绕 O_z 恒稳旋转,转速为 Ω 。对光纤陀螺及编码器各位置信号同步采样,这样光纤陀螺输入轴能在各个方向测量地球角速率的水平分量 ω_{ie1} 。测量结果为正弦信号,其中零值对应于东向和西向,峰值对应于南向和北向。单片机对采集的数据进行滤波处理,通过解算得出真北向方位。

光纤陀螺的实际输出为

$$\omega(t) = (\omega_{ie} \cos\phi) \cos(\psi + \Omega t) + \varepsilon(t) \quad (5-52)$$

在同一周期中取 n 个位置,光纤陀螺输出的数学模型为

$$\begin{aligned} \omega(i) &= (\omega_{ie} \cos\phi) \cos(\psi + \alpha_i) + \varepsilon(t) \\ &= A \cos\alpha_i - B \sin\alpha_i + \varepsilon(t), \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5-53)$$

式中 $\alpha_i = \Omega t_i$, $A = (\omega_{ie} \cos\phi) \cos\psi$, $B = (\omega_{ie} \cos\phi) \sin\psi$ 。

进行最小二乘参数估计,则可求出 A 和 B 的估计值为

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \sum_{i=1}^n \omega_i \cos \alpha_i - \sum_{i=1}^n \sin \omega_i \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i - \left(\sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i\right)^2} \quad (5-54)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \sum_{i=1}^n \omega_i \sin \alpha_i - \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i - \left(\sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i\right)^2} \quad (5-55)$$

因此,北向方位角的估计值为

$$\psi = \arctan\left(\frac{B}{A}\right) \quad (5-56)$$

连续转动寻北法和多位置寻北法当转台水平时不需要纬度信息。连续转动寻北法和多位置寻北法的优点是:通过多个位置上的静止采样可以准确估计出陀螺的实时零偏;陀螺引入的测量误差将只有寻北过程短时间(小于等于 5min)内的随机漂移,而且还可以通过对各阶漂移系数的估计进一步减小其测量误差。因此多位置寻北法的精度一般高于其他寻北方法,在实际工程中得到了广泛的应用。其缺点是:在寻北过程中要进行多位置转动,因此需要添加转动机构。由于采用光电测量装置会增加机构复杂程度和增大控制难度,因此一般采用电机粗略控制转动角度,组合自身完成姿态测量的工作,因此各位置间的相对角度测量是否准确也会直接引入误差。

3) 非理想情况下的连续转动寻北法

非理想情况(即基准面倾斜情况),单轴光纤陀螺寻北系统基本结构如图 5-23 所示,由一个单轴陀螺和一个加速度计及支承环组成测量组合体。为简述方便,图 5-23 中由转台实现支承环。加速度计用于对台面的倾斜进行补偿解算。

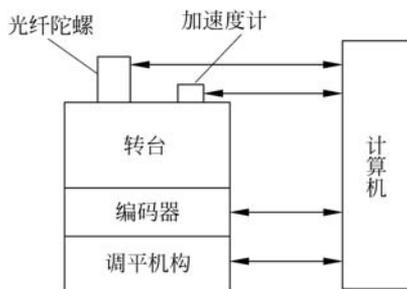


图 5-23 非理想情况单轴光纤陀螺寻北的实验系统

当陀螺的安装平面 $Oxyz$ 不在水平面内,陀螺坐标系 $Oxyz$ 与地理坐标系 $OEN\xi$ 各自三个轴都不重合。解析寻北测量就需要进行多次投影计算,还要考虑消除地球自转角速度的垂直分量。

由载体坐标系和地理坐标系之间的角度关系及变换矩阵,将载体坐标系 $Ox_b y_b z_b$ 视为陀螺坐标系 $Oxyz$,将它们重画为图 5-24,列写为

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_g^b &= \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sin\psi \sin\theta \sin\gamma + \cos\psi \cos\gamma & \cos\psi \sin\theta \sin\gamma - \sin\psi \cos\gamma & -\cos\theta \sin\gamma \\ \sin\psi \cos\theta & \cos\psi \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\psi \sin\theta \cos\gamma + \cos\psi \sin\gamma & -\cos\psi \sin\theta \cos\gamma - \sin\psi \sin\gamma & \cos\theta \cos\gamma \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5-57)$$

地球自转角速度在地理坐标系 $OEN\xi$ 中各轴上的分量可表示为

$$\boldsymbol{\omega}_{ie}^g = \begin{bmatrix} \omega_{ieE} \\ \omega_{ieN} \\ \omega_{ie\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ie} \cos\phi \\ \omega_{ie} \sin\phi \end{bmatrix} \quad (5-58)$$

输入轴为 Oy 的单轴光纤陀螺仪对于其正交轴上的运动不敏感,在 $Oxyz$ 系 Oy 轴所感受到的地球自转角速度为

$$\omega(t) = \mathbf{C}_g^b \boldsymbol{\omega}_{ie}^g \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \omega_{ie} \cos\phi \cos\psi \cos\theta - \omega_{ie} \sin\phi \sin\theta + \varepsilon(t) \quad (5-59)$$

对 $\varepsilon(t)$ 的补偿可按前述二位置测量法和连续旋转法等。但角 θ 还必须进行补偿,才能从 $\omega(t)$ 中解出 ψ 。

实际上 θ 是安装平面 xOy 相对当地水平面绕东西轴向的倾斜角,即台面俯仰(纵摇)角(参见图 5-23、图 5-24),可以通过加速度计的测量值计算出来。重力加速度矢量在地理坐标系中的分量可表示为

$$\mathbf{A}^g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (5-60)$$

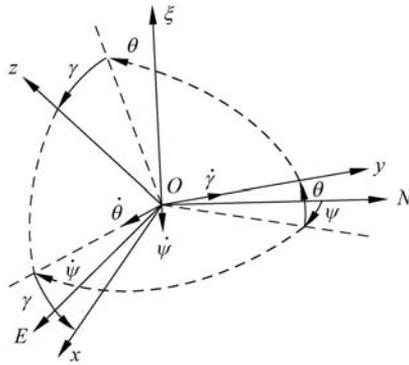


图 5-24 陀螺坐标系和地理坐标系之间的角度关系

重力加速度矢量在陀螺坐标系中的分量为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \mathbf{C}_g^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \cos\theta \sin\gamma \\ -g \sin\theta \\ -g \cos\theta \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (5-61)$$

测出在陀螺安装平面上沿 y 轴的重力加速度分量 A_y 后可求出:

$$\theta = \arcsin \frac{A_y}{g} \quad (5-62)$$

通过加速度计的输出生补偿倾斜角 θ ,即加速度计在系统中的作用就是一个测量台面俯仰(纵摇)角 θ 的摆。

在加速度计的输出生信号中,除重力加速度分量外,同样包含加速度计零位误差、周期

噪声和随机干扰信号等,也通过二位置测量法和连续旋转法等消除加速度计零偏的影响,得到重力加速度分量的估计值。

单轴光纤陀螺作为一种角速率传感器,对于其正交轴上的运动不敏感,因此非常适用于寻北。

当然,按上述原理用双轴陀螺仪组成的寻北仪,融合双轴向的地球自转角速度分量的信息,可更精确地估计出偏北角。

3. 捷联式陀螺寻北仪基本原理

上述单轴陀螺寻北仪需要一个可转动并调水平(理想寻北需要精确调平,非理想寻北也需要调平)的基准台面,属于平台式寻北仪。

如图 5-25 所示,捷联式寻北仪一般由 2~3 只捷联单轴陀螺(或 1~2 只双轴陀螺)和 2 只单轴加速度计组成。例如,用两个摆式加速度计和一个动力调谐陀螺仪组成。整个装置或装置中所有元件直接“捆绑”在载体上。可长期工作于复杂的动态环境之下,可靠性高,结构紧凑,重量轻,功耗低,无须维护。

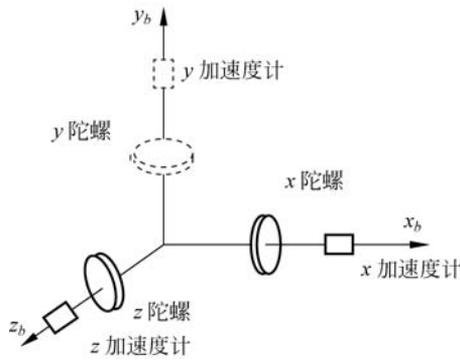


图 5-25 捷联式寻北仪

下面介绍由一个双轴速率陀螺仪和两个加速度计组成的捷联式寻北仪工作原理。

取参考系为“东北天”地理坐标系 $OEN\xi$ 。两个加速度计的输入轴与陀螺的两根输入轴平行,并分别平行于载体坐标系 Ox_b 和 Oy_b 轴。数据采集系统采集陀螺仪和加速度计的信号送入计算机进行寻北解算,输出航向角 ψ ,俯仰角 θ 和横滚角 γ 。地球自转角速度在载体坐标系各坐标轴上的投影为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_{ie}^b &= \begin{bmatrix} \omega_{ie,x} \\ \omega_{ie,y} \\ \omega_{ie,z} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_g^b \boldsymbol{\omega}_{ie}^g \\ &= \begin{bmatrix} \sin\psi\sin\theta\sin\gamma + \cos\psi\cos\gamma & \cos\psi\sin\theta\sin\gamma - \sin\psi\cos\gamma & -\cos\theta\sin\gamma \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\psi\sin\theta\cos\gamma + \cos\psi\sin\gamma & -\cos\psi\sin\theta\cos\gamma - \sin\psi\sin\gamma & \cos\theta\cos\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ie} \cos\phi \\ \omega_{ie} \sin\phi \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} (\cos\psi \sin\theta \sin\gamma - \sin\psi \cos\gamma) \cos\phi - \cos\theta \sin\gamma \sin\phi \\ \cos\psi \cos\theta \cos\phi + \sin\theta \sin\phi \\ -(\cos\psi \sin\theta \cos\gamma - \sin\psi \sin\gamma) \cos\phi + \cos\theta \cos\gamma \sin\phi \end{bmatrix} \omega_{ie} \quad (5-63)$$

重力加速度矢量在载体坐标系中的分量为

$$\mathbf{A}^b = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \mathbf{C}_g^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \cos\theta \sin\gamma \\ -g \sin\theta \\ -g \cos\theta \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (5-64)$$

由式(5-63)和式(5-64)可求出:

$$\theta = \arcsin \frac{A_y}{g} \quad (5-65a)$$

$$\gamma = -\arcsin \frac{A_x}{g \cos\theta} \quad (5-65b)$$

$$\psi = -\arctan \left(\frac{\omega_{ie x} \cos\theta - \omega_{ie y} \sin\gamma \sin\theta + \omega_{ie} \sin\gamma}{(\omega_{ie y} - \omega_{ie} \sin\theta) \cos\gamma} \right) \quad (5-65c)$$

如图 5-26 所示,式(5-65)中 $\omega_{ie x}$ 和 $\omega_{ie y}$ 为陀螺在载体系的输出, A_x 和 A_y 为加速度计在载体系的输出。通过双位置法测量可以消除陀螺常值漂移以及加速度计零偏的影响。为进一步提高寻北精度,则必须采用滤波或系统辨识的方法消除周期噪声和由外部基扰动等引起的随机干扰信号。

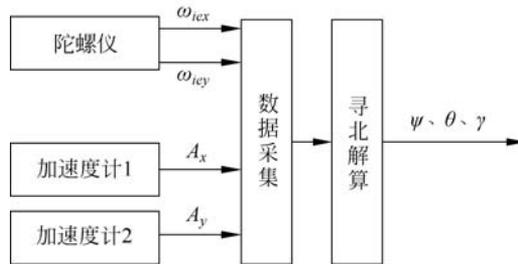


图 5-26 捷联式寻北解算

捷联式寻北仪不仅能提供载体的偏北角 ψ , 而且能提供其俯仰角 θ 和横滚角 γ , 以及加速度信号。捷联式寻北仪在某些应用场合也被称为 IMU (Inertial Measuring Unit), 惯性测量单元、惯性组合或惯性测量组合。