

【武器装备】

静电陀螺仪四环空间稳定平台的运动学分析*

唐洪亮, 赵毅, 刘锡敬

(海军潜艇学院, 山东 青岛 266071)

摘要:通过分析静电陀螺仪四环空间稳定平台各轴坐标系的运动关系, 利用 Euler 动力学方程、载体和坐标系的运动关联, 从理论上分析平台的稳定性. 结果表明, 四环空间稳定平台受外框轴电动机力矩的限制, 工作纬度不应超过 70°.

关键词:静电陀螺仪; 四环稳定平台; 坐标变换

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2010)01-0030-02

在静电陀螺惯性导航系统中, 静电陀螺仪的自由转子没有精密的力矩器, 当组成惯性导航系统时, 通常通过四环空间稳定平台产生惯性参考坐标系. 平台上正交安装 3 只加速度计测量载体运动加速度, 经过积分等运算, 获得载体速度、位置及姿态信息. 四环空间稳定平台各轴在载体上的布置方式为: 台体轴平行地轴, 内框轴与赤道平面平行并落在子午面内, 中框轴水平向东, 外框轴为载体方位轴. 四环空间稳定平台里的 3 根轴由台体上的 2 只自由转子陀螺仪稳定, 并通过外框轴的随动来控制保持正交. 其中: 台体轴由赤道陀螺的 1 根测量轴输出信号控制; 内框轴和中框轴分别由极轴陀螺的 2 根测量轴输出信号控制; 外框 8 轴由内框轴上的角度传感器信号经过计算机解算后控制, 以保持内框轴传感器始终处于零位. 这样布置的平台仅在地球南北两极附近失去稳定性.

四环空间稳定平台通过 4 个框架对载体的运动干扰进行隔离, 摩擦力矩、静不平衡力矩及惯性干扰力矩均需通过伺服电动机提供的控制力矩来补偿. 在系统运动学及动力学方程的基础上完成平台框架轴角运动曲线的绘制, 是认清平台系统的工作机理、建立平台系统控制模型、实现平台稳定控制的基础.

坐标系之间的几何关系如图 1 所示, 图中外框相对载体的转角为 s , 中框相对外环的夹角为 r (等于 $\Delta r + \lambda_0$, 其中 Δr 为系统运行之后中框相对外框的转角, λ_0 为载体初始时刻所在位置的纬度角), 内框相对中框的转角为 q , 台体相对内框的转角为 p . 初始时刻, 载体位于赤道且纵轴指北, 载体坐标轴 x_b 对应载体的纵轴, y_b 轴沿载体横轴并指向右侧, z_b 轴垂直向下, 如图 1 所示. 这样, 载体运动角速度 $\omega_b = [\omega_{bx} \ \omega_{by} \ \omega_{bz}]$, 各分量分别对应载体的纵摇、横摇和方位角速度.

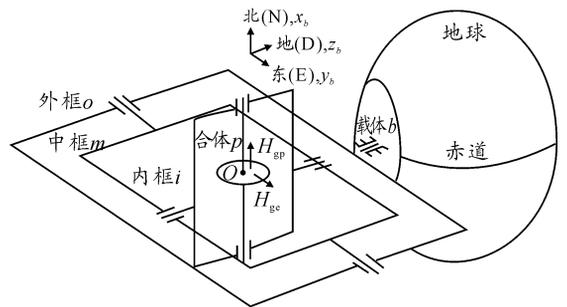


图 1 坐标系示意图

各坐标系的运动角速度存在如下关系:

$$\begin{cases} [\omega_{ox} \ \omega_{oy} \ \omega_{oz}]^T = [0 \ 0 \ s]^T + C_b^o [\omega_{bx} \ \omega_{by} \ \omega_{bz}]^T \\ [\omega_{mx} \ \omega_{my} \ \omega_{mz}]^T = [0 \ r \ 0]^T + C_o^m [\omega_{ox} \ \omega_{oy} \ \omega_{oz}]^T \\ [\omega_{ix} \ \omega_{iy} \ \omega_{iz}]^T = [0 \ 0 \ q]^T + C_m^i [\omega_{mx} \ \omega_{my} \ \omega_{mz}]^T \\ [\omega_{px} \ \omega_{py} \ \omega_{pz}]^T = [p \ 0 \ 0]^T + C_i^p [\omega_{ix} \ \omega_{iy} \ \omega_{iz}]^T \end{cases}$$

由上述坐标关系得台体角速度、载体角速度和框架相对角速度之间的一般关系式(运动学方程)为

1 坐标系定义及运动学关系

为建立四环空间稳定平台的运动学模型, 需分别引入与各部件相固连的坐标系. 各坐标系分别定义为: $OX_b Y_b Z_b$ (载体坐标系), $OX_o Y_o Z_o$ (外框坐标系), $OX_m Y_m Z_m$ (中框坐标系), $OX_i Y_i Z_i$ (内框坐标系), $OX_t Y_t Z_t$ (台体坐标系). 各

* 收稿日期: 2009-11-19

作者简介: 唐洪亮(1984—), 男, 山东无棣人, 硕士, 主要从事静电陀螺惯性导航系统方面的研究.

$$\begin{bmatrix} \omega_{px} & \omega_{py} & \omega_{pz} \end{bmatrix}^T = C[\dot{p} \quad \dot{q} \quad \dot{r} \quad \dot{s}]^T + C_b^p [\omega_{bx} \quad \omega_{by} \quad \omega_{bz}]^T$$

2 动力学方程

为进行电动机力矩的计算,以下推导以台体绝对角加速度 $\dot{\omega}_p = \dot{\omega}_{px}i + \dot{\omega}_{py}j + \dot{\omega}_{pz}k$ 及内环相对中环的角加速度 \dot{q} 为变量的平台系统动力学方程。因为参考坐标轴分别沿着台体、内框、中框及外框的对称轴(惯性主轴),框架运动为围绕坐标原点 O 的定点旋转运动,所以,可利用 Euler 动力学方程建立框架的动态模型。

在动坐标系 $oxyz$ 中,Euler 动力学方程为

$$\begin{cases} \frac{dH_x}{dt} + \omega_y H_x - \omega_z H_y = T_x \\ \frac{dH_y}{dt} + \omega_z H_x - \omega_x H_z = T_y \\ \frac{dH_z}{dt} + \omega_x H_y - \omega_y H_x = T_z \end{cases}$$

其中: H 为旋转刚体的动量矩向量在动坐标系中的 3 个投影分量,即 $H = H_x i + H_y j + H_z k$; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 为动坐标系的牵连角速度 ω 在动坐标系中的 3 个投影分量,即 $\omega = \omega_x i + \omega_y j + \omega_z k$; T_x, T_y, T_z 为作用于刚体的外力对于 O 点的力矩 T 在动坐标系中的 3 个投影分量。

建立动力学模型时,需分别对台体、台体-内框、台体-内框-中框、台体-内框-中框-外框 4 个组合件列写 Euler 动力学方程。在伺服状态下,台体跟随陀螺运动,忽略陀螺仪的漂移速率,则

$$\omega_p = [\omega_{px} \quad \omega_{py} \quad \omega_{pz}]^T = 0$$

由此推出动力学方程。

3 载体和北东地坐标系的运动联系

载体相对地球的运动一般以横摇、纵摇及航向运动的形式给出,要得到载体的绝对运动,需研究载体坐标系与本地水平导航坐标系之间的联系。载体坐标系 x_b, y_b, z_b (b 坐标系)与本地水平导航坐标系 (n 坐标系,北东地坐标系)的几何关系如图 2 所示。

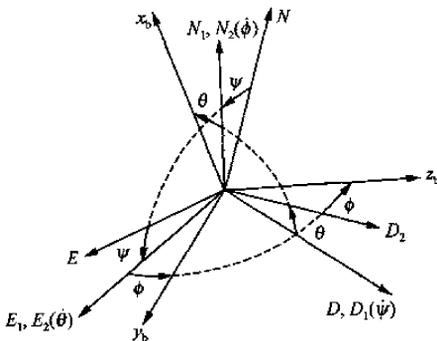


图 2 载体坐标系与本地水平导航坐标系的关系

两坐标系之间的转换矩阵为

$$C_n^b = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}$$

$$a = \cos\theta\cos\varphi$$

$$b = \cos\theta\sin\varphi$$

$$c = -\sin\theta$$

$$d = \cos\varphi\sin\theta\cos\varphi - \cos\varphi\cos\varphi$$

$$e = \sin\varphi\sin\theta\sin\varphi + \cos\varphi\cos\varphi$$

$$f = \sin\varphi\cos\theta$$

$$g = \cos\varphi\sin\theta\cos\varphi + \sin\varphi\cos\varphi$$

$$h = \cos\varphi\sin\theta\sin\varphi - \sin\varphi\cos\varphi$$

$$i = \cos\varphi\cos\theta$$

式中: φ 为航向角,即载体纵轴与北向轴之间的夹角; θ 为纵摇角,即载体纵轴与水平面之间的夹角; φ 为横摇角,即载体横轴与水平面之间的夹角。 n 坐标系相对惯性坐标系的转动角速度在 n 坐标系中表示为 $\omega_n = [\omega_N \quad \omega_E \quad \omega_D]^T$, b 坐标系相对惯性坐标系的转动角速度 ω_b 在 b 坐标系中表示为

$$\begin{bmatrix} \omega_{bx} \\ \omega_{by} \\ \omega_{bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ \sin\varphi\sin\theta & \cos\varphi & \sin\varphi\cos\theta \\ \cos\varphi\sin\theta & -\sin\varphi & \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + C_n^b \begin{bmatrix} \omega_N \\ \omega_E \\ \omega_D \end{bmatrix}$$

4 平台稳定性分析

平台通过框架的角运动隔离载体运动,实现台体稳定。利用运动学方程计算平台框架轴角运动,有助于认识系统的运动传递规律及工作机理。通过四环空间稳定平台建立惯性参考坐标系,需要 4 个伺服控制回路使台体运动准确跟踪自由转子陀螺仪的表观运动。设计伺服系统时,首先认为各电动机所能提供的力矩不受限制,此时可保证足够高的控制精度,平台具有良好的稳定性,根据分析可得到如下结论:

1) 在静基座上,台体相对内框的角速度 p 与地球自转角速度大小相同、方向相反,平台其他框架的相对角速度及绝对角速度为零。外框轴电动机主要用来克服摩擦力矩及不平衡力矩的影响。

2) 在动基座上,各框架相对角速度的频率由纵、横摇运动频率的和 $(f_e + f_r)/2$ 、差 $(f_r - f_e)/2$ 组成,幅值被航向运动角频率必调制。其中 f_e, f_r 分别为横、纵摇运动的频率。纵、横摇运动角度对外框轴电动机力矩的影响与 $\sec r$ 函数呈近似正比变化, r 趋于 90° ,所需电动机力矩趋于无穷大。在高纬度区域,受电动机力矩容量的限制,(下转第 53 页)