

偏轴反射镜平台视轴稳定技术及建模分析

宋江鹏^{1,2}, 孙广利², 周 荻¹, 李 丹²

- (1. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 天津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘 要: 常规反射镜平台采用方位/俯仰型两框架结构形式, 探测器视轴平行于外框架旋转轴。区别于常规反射镜平台, 偏轴反射镜平台不再遵循探测器视轴与外框架旋转轴平行的原则, 其视轴角速度具有强耦合和非线性的特点。主要研究了这类偏轴反射镜平台的运动学、动力学建模和视轴稳定机理。首先, 采用虚拟整体稳定平台技术推导平台运动学方程, 并确定了虚拟平台框架类型的选取原则。在此基础上推导了完整的视轴坐标系动力学模型。然后, 对载体运动耦合机制进行了分析并给出了控制框图。最后, 对视轴运动特性进行仿真分析。仿真结果表明, 该平台在视轴指向、力矩耦合等方面具有不同于常规反射镜平台的特性, 且由视轴运动非线性引起的视轴交叉耦合力矩大于惯量耦合力矩。

关键词: 偏轴反射镜; 虚拟整体稳定; 运动学模型; 动力学模型

中图分类号: TP275 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2484-07

Line-of-sight stabilization and modeling analysis of bias shafting mirror platform

Song Jiangpeng^{1,2}, Sun Guangli², Zhou Di¹, Li Dan²

- (1. Department Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: The conventional mirror stabilized platform consists of two-axis azimuth-elevation gimbal axes and the sensor input Line-of-sight (LOS) is always oriented parallel to the outer gimbal axis. Compared with conventional mirror platform, the bias shafting mirror gimbal axis can have an arbitrary orientation with respect to the sensor LOS, and the resulting LOS kinematics are both axis-coupled and non-linear. The primary purpose of this paper is to study LOS kinematics and dynamic modeling of this bias shafting mirror. Firstly, the artificial mass stabilization platform method was proposed to derive LOS kinematics. Meanwhile, the artificial platform gimbal type was determined to derive equations of dynamics. And a complete dynamics model was presented based on LOS coordinate system. Then, the carrier motion coupling was analyzed and system control block diagrams were developed. Lastly, simulation results show that the characteristics of LOS pointing and torque coupling is different between the bias shafting and conventional mirror platform.

Key words: bias shafting mirror; artificial mass stabilization; kinematics model; dynamics model

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-01-09

作者简介: 宋江鹏(1980-), 男, 工程师, 博士生, 主要从事光电稳定平台控制系统设计方面的研究。Email:jjh_sjp@163.com

导师简介: 周荻(1969-), 男, 博士生导师, 主要从事非线性控制理论及其在飞行器制导和控制方面的研究。Email:zhoudi@hit.edu.cn

0 引言

光电稳定平台以光电探测器为载荷,能够有效隔离载体姿态运动或其他干扰力矩所造成的光电探测器视轴在惯性空间内的抖动,有效补偿由视轴抖动引起的探测器成像模糊,在现代武器系统中得到了非常广泛的应用^[1-2]。同时,光电稳定平台是一个存在参数摄动以及非线性干扰的复杂控制系统^[3],建立完整、准确的运动学、动力学模型和进行全面的耦合特性分析设计是稳定平台控制系统设计的基础,研究这些问题对进一步提高稳定平台控制性能具有重要意义。

国内外学者在整体稳定平台建模与分析方面做了大量工作,参考文献[4]分别采用方向余弦矩阵和拉格朗日方程建立了两轴框架的刚体动力学模型,较为全面地分析了框架间耦合关系。参考文献[5]建立了包含质量不平衡力矩的动力学模型,分析了载体与外框架、外框架与内框架之间的相互耦合关系。参考文献[6]在前人研究的基础上,利用刚体绕动点转动的动量矩定理建立了具有更普遍意义的动力学模型,并针对质量不平衡力矩进行了仿真分析。参考文献[7-8]分别对极坐标稳定平台和捷联式稳定平台的动力学模型进行了推导和分析。

区别于整体稳定平台,反射镜平台将反射镜安装在光学传感器入射光路中,光轴的方向由受控反射镜的姿态变化来改变。其中,偏轴反射镜平台探测器输入视轴不再平行于反射镜外框架旋转轴,这类反射镜平台视轴运动呈现了耦合、非线性关系^[9]。目前尚未查到关于此类反射镜平台的运动学、动力学建模以及视轴稳定机理分析的文献。

基于以上背景,文中以一类偏轴反射镜平台为研究对象。首先,采用虚拟整体稳定平台技术推导反射镜平台的运动学模型;同时,按照虚拟整体平台与反射镜平台框架惯性角速度符合线性关系的选取原则确定了虚拟平台的框架类型;然后,在反射镜平台运动学模型的基础上完成了视轴坐标系动力学建模;最后,完成了载体运动耦合机制分析并给出了控制框图。从而为偏轴反射镜平台的控制系统设计提供了理论依据。

1 坐标系定义及光学反射矢量基本理论

以一类偏轴反射镜平台为例,如图 1 所示。坐标

系定义如下。

载体坐标系 $o_Bx_By_Bz_B$:原点位于载体质心。 o_Bx_B 轴沿载体纵轴,向前为正, o_By_B 轴在载体纵对称面内向上为正, o_Bz_B 轴按右手系定义方向。

外框坐标系 $o_o x_o y_o z_o$: 原点为载体上与反射镜平台内、外框转轴交点。 $o_o y_o$ 轴为外框架方位轴,与载体 o_By_B 夹角为 45° ,向上为正,其余两轴符合右手定则。 o 系相对 m 系绕 $o_o y_o$ 轴旋转,产生方位角 α 。

内框坐标系 $o_i x_i y_i z_i$: 原点位于内、外框转轴交点。 $o_i z_i$ 轴为内框架俯仰轴,其余两轴符合右手定则。 i 系相对 o 系绕 $o_i z_i$ 轴旋转,产生俯仰角 β 。

视轴坐标系 $o_L x_L y_L z_L$: 初始位置与载体坐标系重合, $o_L x_L$ 轴与反射镜出射视轴方向一致。

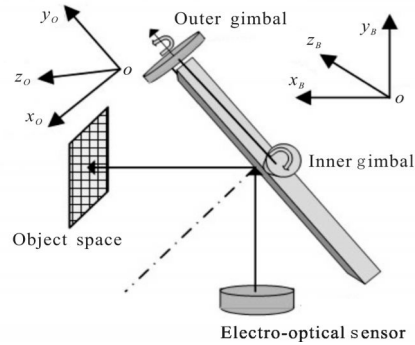


图 1 偏轴反射镜视轴运动示意图

Fig.1 Scheme diagram of bias shafting mirror LOS kinematics

同时,在反射镜视轴运动学分析中大量运用了光学反射矢量基本理论,如图 2 所示。其中, \vec{A} 代表入射矢量; \vec{N} 代表镜面法线矢量; \vec{A}' 代表出射矢量^[10]。

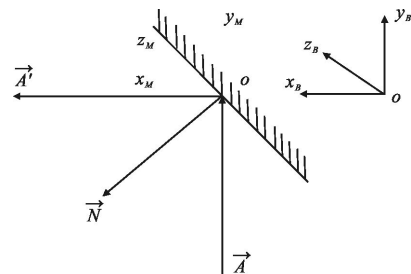


图 2 光学反射示意图

Fig.2 Scheme diagram of light reflection

基于矢量形式的斯涅尔定律,出射视轴单位矢量在选定参考坐标系中投影 \vec{A}' 可以表示为:

$$\vec{A}' = \vec{A} - 2(\vec{A} \cdot \vec{N}) \cdot \vec{N} \tag{1}$$

式中: $\vec{N}=[N_x \ N_y \ N_z]^T$, 为镜面法线单位矢量在参考坐标系内投影; $\vec{A}=[A_x \ A_y \ A_z]^T$, 为反射镜入射矢量在参考坐标系内投影; $\vec{A}'=[A_x' \ A_y' \ A_z']^T$, 为反射镜出射矢量在参考坐标系内投影。

2 偏轴反射镜平台运动学

2.1 光学反射理论分析

选定外框坐标系初始位置为光学反射矢量公式中的参考坐标系。按照光路可逆原理, 设定探测器入射视轴单位矢量 \vec{A} 逆着原来方向反射出去, 其在参考坐标系投影可以表示为:

$$\vec{A}=[-\sqrt{2}/2 \ \sqrt{2}/2 \ 0]^T \quad (2)$$

镜面法线单位矢量在参考坐标系下投影 \vec{N}_R 为:

$$\vec{N}=T_y(-\alpha) \cdot T_z(-\beta) \cdot [1 \ 0 \ 0]^T \quad (3)$$

坐标系间转换矩阵 $T_z(\cdot)$ 、 $T_y(\cdot)$ 定义如下:

$$T_z(\cdot)=\begin{bmatrix} c(\cdot) & s(\cdot) & 0 \\ -s(\cdot) & c(\cdot) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_y(\cdot)=\begin{bmatrix} c(\cdot) & 0 & -s(\cdot) \\ 0 & 1 & 0 \\ s(\cdot) & 0 & c(\cdot) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: c 表示 \cos , s 表示 \sin , 下同。

当外方位框架绕 o_y 旋转 α 角、内俯仰框架绕 o_z 旋转 β 角时, 根据公式(1)求得出射视轴单位矢量在参考坐标系投影 \vec{A}' , 并求解在载体坐标系中投影 \vec{A}_B' :

$$\vec{A}_B' = T_z(45^\circ) \cdot \vec{A}' = [c^2\alpha \cdot c^2\beta - s^2\beta - c\beta \cdot (c^2\alpha \cdot c\beta + 2c\alpha \cdot s\beta - c\beta) \sqrt{2} \cdot s\alpha \cdot c\beta (s\beta + c\alpha \cdot c\beta)]^T \quad (5)$$

2.2 平台运动学方程推导

该节通过虚拟整体稳定平台运动等效上节推导的反射镜平台出射视轴运动, 然后采用整体稳定平台视轴稳定技术推导视轴运动学方程。

虚拟整体平台框架类型并不唯一, 当选取两轴整体稳定平台外方位框架转动 λ_1 角、内俯仰框架转动 λ_0 角时, λ_1 、 λ_0 与 α 、 β 之间存在严重非线性, 难以通过整体稳定平台技术推导偏轴反射镜平台的视轴运动学方程。

文中选取的虚拟稳定平台为外方位框架 y 旋转 α 角、绕中俯仰框架 z 旋转 2β 角、绕内方位框 y 旋转 α 角的三框架整体稳定平台, 推导虚拟整体稳定平台视轴运动在载体坐标系内投影 \vec{A}_B'' :

$$\vec{A}_B'' = T_y(-\alpha) \cdot T_z(-2\beta) \cdot T_y(-\alpha) \cdot [1 \ 0 \ 0]^T =$$

$$[c^2\alpha \cdot c^2\beta - s^2\beta - c\beta \cdot (c^2\alpha \cdot c\beta + 2c\alpha \cdot s\beta - c\beta) \sqrt{2} \cdot s\alpha \cdot c\beta (s\beta + c\alpha \cdot c\beta)]^T \quad (6)$$

由公式(5)、(6)可知, \vec{A}_B' 与 \vec{A}_B'' 完全一致。因此, 可以将这类偏轴反射镜平台等效为虚拟三框架整体稳定平台。

下面推导反射镜平台的视轴运动学方程, 定义载体惯性角速度矢量为 $\vec{\omega}_b$ 、反射镜外框惯性角速度矢量为 $\vec{\omega}_o$ 、反射镜内框惯性角速度矢量为 $\vec{\omega}_i$, 视轴惯性角速度矢量为 $\vec{\omega}_L$ 。

(1) 根据载体和稳定平台的空间关系以及复合运动原理可知反射镜外框架惯性角速度为:

$$\vec{\omega}_o = T_y(\alpha) \cdot \vec{\omega}_b + \vec{\omega}_{bo} \quad (7)$$

式中: $\vec{\omega}_{bo}=[0 \ \dot{\alpha} \ 0]$ 为反射镜方位框架相对角速度。

(2) 反射镜内框架惯性角速度为:

$$\vec{\omega}_i = T_z(\beta) \cdot \vec{\omega}_o + \vec{\omega}_{oi} \quad (8)$$

式中: $\vec{\omega}_{oi}=[0 \ 0 \ \dot{\beta}]$, 为反射镜俯仰框架相对角速度。

(3) 按照虚拟稳定平台的视轴运动特性, 将反射镜内框架惯性空间角速度传递至视轴为:

$$\vec{\omega}_L = T_y(\alpha) \cdot (T_z(\beta) \cdot \vec{\omega}_i + \vec{\omega}_{oi}) + \vec{\omega}_{bo} \quad (9)$$

根据公式(7)~(9)推导视轴惯性角速度 ω_{Ly} 、 ω_{Lz} 与框架惯性角速度 ω_{oy} 、 ω_{oz} 的关系:

$$\begin{cases} \omega_{Ly} = -s2\beta \cdot \omega_{oy} + c2\beta \cdot \omega_{oy} + \dot{\alpha} \\ \omega_{Lz} = s\alpha \cdot (c2\beta \cdot \omega_{oz} + s2\beta \cdot \omega_{oz}) + c\alpha \cdot \omega_{oz} + c\alpha \cdot \dot{\beta} \end{cases} \quad (10)$$

综上所述, 采用虚拟整体稳定平台方法可以推导偏轴反射镜平台的视轴运动学方程。其中, 公式(10)中 ω_{Ly} 、 ω_{Lz} 为视轴在方位、俯仰方向的惯性角速度, 用于视轴稳定控制。

3 偏轴反射镜平台动力学

3.1 平台框架动力学方程推导

文中采用第二类拉格朗日方程, 在考虑质量不平衡力矩和轴承摩擦力矩条件下推导完整的平台框架动力学模型^[4]。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_k} = Q_k \quad (11)$$

式中: T 为系统动能; D 为系统瑞利耗散函数; q_k 为系统广义坐标; k 为系统独立的自由度个数; Q_k 为系统的广义力。

刚体旋转运动的动能计算公式为 $\vec{\omega} \cdot \vec{H}/2$ ^[4], 刚体平移运动的动能计算公式为 $m \cdot v^2/2$ 。

根据动能的计算公式和公式(7)、(8), 可得平台两个框架的总动能 T 为:

$$T = \frac{1}{2} \vec{\omega}_o \cdot \vec{H}_o + \frac{1}{2} \vec{\omega}_i \cdot \vec{H}_i + \frac{1}{2} m_o \cdot (\vec{v}_o)^T \cdot \vec{v}_o + \frac{1}{2} m_i \cdot (\vec{v}_i)^T \cdot \vec{v}_i \quad (12)$$

式中: $\vec{\omega}_o$ 为外框架旋转角速度矢量; $\vec{\omega}_i$ 为内框架旋转角速度矢量; \vec{H}_o 、 \vec{H}_i 分别为外、内框架动量矩, 且

$$\vec{H} = \vec{J} \cdot \vec{\omega} = \begin{bmatrix} J_x & J_{xy} & J_{xz} \\ J_{xy} & J_y & J_{yz} \\ J_{xz} & J_{yz} & J_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

m_o 、 m_i 分别为外、内框架质量; \vec{v}_o 为外框架平移速度矢量, 且

$$\vec{v}_o = [\dot{\rho}_{ox} \quad \dot{\rho}_{oy} \quad \dot{\rho}_{oz}] \quad (14)$$

\vec{v}_i 为内框架平移速度矢量, 且

$$\vec{v}_i = [\dot{\rho}_{ix} \quad \dot{\rho}_{iy} \quad \dot{\rho}_{iz}] \quad (15)$$

同时, 系统的能量耗散主要来源于框架轴上的摩擦^[1]。文中选择库仑+粘滞摩擦模型, 则系统的能量耗散函数为:

$$D = T_{oc} \cdot |\dot{\alpha}| + \frac{1}{2} K_{ov} \cdot (\dot{\alpha})^2 + T_{ic} \cdot |\dot{\lambda}| + \frac{1}{2} K_{iv} \cdot (\dot{\lambda})^2 \quad (16)$$

式中: T_{oc} 、 T_{ic} 为外框、内框库仑摩擦力矩; K_{ov} 、 K_{iv} 为外框、内框粘滞摩擦系数。

由公式(16)可得两框架摩擦力矩为:

$$M_{fc} = \frac{\partial D}{\partial \lambda_c} = T_{ic} \cdot \text{sgn}(\dot{\beta}) + K_{iv} \cdot \dot{\beta} \quad (17)$$

$$M_{fv} = \frac{\partial D}{\partial \lambda_v} = T_{oc} \cdot \text{sgn}(\dot{\alpha}) + K_{ov} \cdot \dot{\alpha} \quad (18)$$

同时, 两框架平移加速度 a_o 和 a_i 受到载体运动和重力加速度影响。借鉴参考文献[6]的分析方法, 根据刚体动点加速度合成原理以及导弹和位标器的空间关系, 推导了外框架原点 O 的平移加速度:

$$\vec{a}_{Bo} = \frac{d\vec{v}_B}{dt} + \frac{d\vec{\omega}_B}{dt} \times \vec{\rho} + \vec{\omega}_B \times (\vec{\omega}_B \times \vec{\rho}) \Rightarrow \vec{a}_{Bo} = \begin{bmatrix} a_{Bx} \\ a_{By} \\ a_{Bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_{By}^2 \cdot \rho - \omega_{Bz}^2 \cdot \rho + a_{Bx} \\ \dot{\omega}_{Bz} \cdot \rho + \omega_{Bx} \cdot \omega_{By} \cdot \rho + a_{By} + g \\ -\omega_{By} \cdot \rho + \omega_{Bx} \cdot \omega_{Bz} \cdot \rho + a_{Bz} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: $[a_{Bx} \ a_{By} \ a_{Bz}]$ 为载体平移加速度矢量; $[\omega_{Bx} \ \omega_{By} \ \omega_{Bz}]$

为载体角速度矢量; \vec{v}_B 为载体平移速度矢量; ρ 为载体质心 o_m 到框架质心 o 的矢径。

然后, 加速度 \vec{a}_{Bo} 在外框坐标系投影为:

$$\vec{a}_o = T_b^o \cdot \vec{a}_{Bo} \quad (20)$$

外框架加速度 \vec{a}_o 在内框架坐标系的投影为:

$$\vec{a}_i = T_o^i \cdot \vec{a}_o \quad (21)$$

得到由载体平移运动引起的两框架质量不平衡力矩:

$$M_{ic} = \rho_{ix} \cdot F_{iy} - \rho_{iy} \cdot F_{ix} = m \cdot (\rho_{ix} \cdot a_{iy} - \rho_{iy} \cdot a_{ix}) \quad (22)$$

$$M_{iv} = \rho_{oz} \cdot F_{ox} - \rho_{ox} \cdot F_{oz} = m \cdot (\rho_{oz} \cdot a_{ox} - \rho_{ox} \cdot a_{oz}) \quad (23)$$

选取两框架相对角度 λ_y 、 λ_z 以及两框架质心位置 ρ_{ox} 、 ρ_{oz} 和 ρ_{ix} 、 ρ_{iy} 为广义坐标, 则由公式(11)~(23)可得到平台的动力学方程。

方位轴动力学方程可以表示为:

$$J_s \dot{\omega}_{oy} = M_{my} - M_{fy} - M_{iy} - M_{cry} - M_{y_cross} \quad (24)$$

其中, J_s 为外框架等效转动惯量, 且

$$J_s = J_{oy} + J_{ix} \sin^2 \lambda_z + J_{iy} \cos^2 \lambda_z + J_{ixy} \sin(2\lambda_z) \quad (25)$$

式中: M_{my} 为外框电机驱动力矩; M_{fy} 为外框架摩擦产生的力矩, 可由公式(18)求得; M_{iy} 为外框架质量不平衡产生的力矩, 可由公式(23)求得; M_{cry} 为外框架线缆产生的柔性干扰力矩, 导线干扰力矩很难量化, 设计时留出一定的余量即可; M_{y_cross} 为外框架惯量耦合力矩, 由于外框受到了内框对外框的反作用力矩的影响, 耦合力矩表达式复杂, 这里不再详细列出。

同时, 俯仰轴动力学方程表示为:

$$J_{iz} \dot{\omega}_{iz} = M_{mz} - M_{fc} - M_{ic} - M_{cz} - M_{z_cross} \quad (26)$$

式中: M_{mz} 为内框电机驱动力矩; M_{fc} 为内框架摩擦产生的力矩, 可由公式(17)求得; M_{ic} 为内框架质量不平衡力矩, 可由公式(22)求得; M_{cz} 为内框架线缆产生的柔性干扰力矩, 导线干扰力矩很难量化, 设计时留出一定的余量即可。

M_{z_cross} 为内框架惯量耦合力矩, 且

$$M_{z_cross} = (J_{ix} - J_{iy}) \omega_{ix} \omega_{iy} - J_{ixy} (\omega_{ix}^2 - \omega_{iy}^2) + J_{izc} (\omega_{iz} \omega_{iy} - \dot{\omega}_{ix}) - J_{izc} (\omega_{ix} \omega_{iz} + \dot{\omega}_{iy}) \quad (27)$$

3.2 平台视轴动力学方程推导

上节推导了反射镜平台框架坐标系的动力学方程。由于稳定平台主要完成视轴指向和稳定功能, 有必要将平台视轴运动学模型和框架动力学模型相结

合,建立偏轴反射镜平台的视轴动力学方程。

将公式(10)代入公式(24)和(26),得到关于视轴坐标系的动力学微分方程:

$$\begin{cases} J_s \dot{\omega}_{Ly} = c2\beta \cdot (M_{my} - M_{ly} - M_{fy} - M_{cry} - M_{y_cross}) + M_{Ly_couple} \\ J_{iz} \dot{\omega}_{Lz} = c\alpha \cdot (M_{mz} - M_{lz} - M_{fz} - M_{cz} - M_{z_cross}) + M_{Lz_couple} \end{cases} \quad (28)$$

其中

$$\begin{aligned} M_{Ly_couple} &= J_s \cdot (-s2\beta \cdot \dot{\omega}_{\alpha} - c2\beta \cdot \dot{\beta} \cdot \omega_{\alpha}) + \\ & J_s \cdot (-s2\beta \cdot \dot{\beta} \cdot \omega_{\alpha} + \ddot{\alpha}) \\ M_{Lz_couple} &= J_{iz} \cdot (s\alpha \cdot c2\beta \cdot \dot{\omega}_{\alpha} + s\alpha \cdot s2\beta \cdot \dot{\omega}_{\alpha}) + \\ & J_{iz} \cdot (c\alpha \cdot c2\beta \cdot \dot{\alpha} - s\alpha \cdot s2\beta \cdot \dot{\beta}) \cdot \omega_{\alpha} + \\ & J_{iz} \cdot (c\alpha \cdot c2\beta \cdot \dot{\alpha} + s\alpha \cdot c2\beta \cdot \dot{\beta}) \cdot \omega_{\alpha} + \\ & J_{iz} \cdot (-s\alpha \cdot \dot{\omega}_{iz} + c\alpha \cdot \dot{\beta} - s\alpha \cdot \dot{\beta}) \end{aligned} \quad (29)$$

从公式(28)~(29)可以看出,视轴方位方向受到内框架角 β 的影响,当 $2\beta > 70^\circ$ 时,稳定平台存在“盲锥区”。同时,视轴俯仰方向也受到外框架角 α 的影响,当 $\alpha > 70^\circ$ 时,也存在“盲锥区”问题。

4 载体运动耦合机制及控制框图

4.1 载体运动耦合机制分析

载体运动主要通过几何约束和摩擦约束向各框架传递,最终影响视轴运动。由于偏轴反射镜平台视轴运动与内框架俯仰运动不再相同,需要根据公式(7)~(9),从载体运动角速度沿反射镜各框架的传递关系入手,分析载体扰动角速度的耦合途径。

$$\vec{\omega}_l = \begin{bmatrix} (\omega_{Bx} \cdot c\alpha - \omega_{Bz} \cdot s\alpha) \cdot c2\beta \\ -(\omega_{Bx} \cdot c\alpha - \omega_{Bz} \cdot s\alpha) \cdot s2\beta \\ (\omega_{Bx} \cdot c\alpha - \omega_{Bz} \cdot s\alpha) \cdot s\alpha \cdot c2\beta + \omega_{Bz} \cdot s\alpha \cdot s2\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{By} \cdot c\alpha \cdot s2\beta - (\omega_{Bx} s\alpha + \omega_{Bz} c\alpha) \cdot s\alpha \\ \omega_{By} \cdot c2\beta \\ (\omega_{Bx} s\alpha + \omega_{Bz} c\alpha) \cdot c\alpha \end{bmatrix} \quad (30)$$

几何约束耦合

摩擦力短耦合

由公式(30)可知,载体扰动角速度以摩擦力矩约束和几何约束两种方式同时影响视轴运动,增加了系统对载体扰动的敏感度^[12]。

4.2 控制框图

系统设计时一般将俯仰和方位通道独立控制,通道间的耦合视为干扰^[13]。通过稳定平台的运动学和动力学模型,建立控制框图如图 3、4 所示。

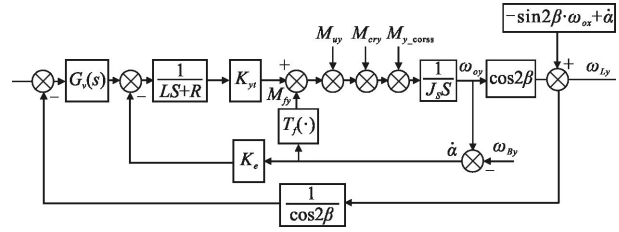


图 3 方位回路控制框图

Fig.3 Block diagram of azimuth loop

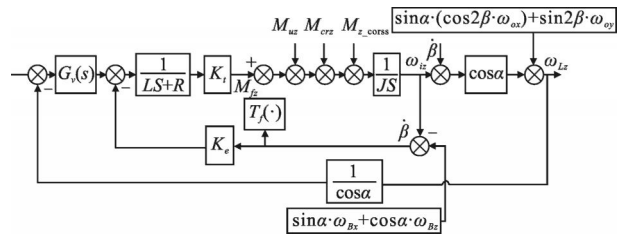


图 4 俯仰回路控制框图

Fig.4 Block diagram of elevation loop

图中, $G_r(s)$ 为稳定回路控制器, L 为电机电感, R 为电机内阻, K_t 为力矩系数, K_e 为反电势系数, K_f 为陀螺增益, J_s 为方位框架等效转动惯量, J 为俯仰框架总转动惯量, T_f 为摩擦非线性环节。

5 仿真与分析

针对上述偏轴反射镜平台运动学和动力学建模结果,重点在视轴指向非线性、摩擦干扰力矩对视轴角速度影响、不同类型耦合干扰力矩对比分析等方面进行数值仿真。仿真中平台机械参数见表 1。

表 1 模型参数

Tab.1 Model parameter

Parameter	Value	Unit
$J_{\alpha x}, J_{\alpha y}, J_{\alpha z}$	0.004 5, 0.005, 0.004	kg · m ²
$J_{\alpha y}, J_{\alpha z}, J_{\alpha z}$	0	kg · m ²
$J_{\beta x}, J_{\beta y}, J_{\beta z}$	0.001, 0.001 5, 0.002	kg · m ²
$J_{\beta y}, J_{\beta z}, J_{\beta z}$	0	kg · m ²
L	0.008	H
R	6.2	Ω
K_t	0.2	N · m/A
K_e	0.2	V/rad

(1) 分析视轴指向角的非线性特性。

设定反射镜外框架角 α 旋转 $\pm 20^\circ$ 、内框架角 β 旋转 $\pm 10^\circ$ 。根据公式(5)推导反射镜旋转角 α 、 β 与光轴指向角 a 、 b 之间的关系:

$$\tan(a) = \frac{A_{Bz}'}{A_{Bx}'} \quad \tan(b) = \frac{A_{Bz}'}{A_{Bx}'}$$

图 5 为视轴指向与反射镜框架旋转角度间的关系示意图。图中相邻两点间隔代表反射镜框架在方位、俯仰方向旋转 1° 。如图 5 所示,在相同框架旋转角度的条件下,偏轴反射镜平台比常规反射镜平台的视轴指向角度范围更大,有利于实现较小的反射镜尺寸和摆角范围,但非线性更严重。

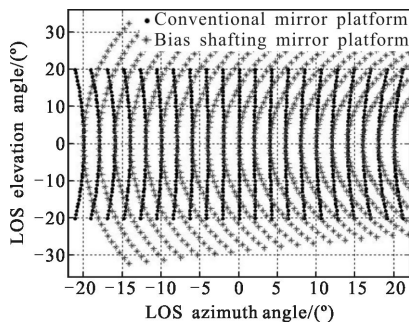


图 5 视轴指向与反射镜框架角度示意图

Fig.5 Relationship between LOS pointing and mirror gimbal angle

因此,反射镜平台绕不同轴系旋转各有其优缺点,可根据不同轴系的视轴运动学、动力学特性以及控制系统实现的难易程度进行综合考量^[9]。

(2) 在载体扰动条件下,分析框架摩擦力矩对视轴角速度影响。

载体扰动引起的摩擦力矩是影响稳定平台视轴精度的最重要耦合途径。采用线性分析方法建立载体扰动角速度 ω_{dis} 通过摩擦力矩到视轴俯仰角速度 ω_{Lz} 的传递函数:

$$G_f(s) = \frac{\omega_{Lz}}{\omega_{dis}} = \frac{\left(\frac{k_f k_e}{Js(Ls+R)} + \frac{T_f(\cdot)}{Js} \right) \cos \alpha}{1 + \frac{k_f k_e G_v(s)}{Js(Ls+R)} + \frac{k_f k_e}{Js(Ls+R)} + \frac{T_f(\cdot)}{Js}} \quad (31)$$

由公式(31)可知,载体扰动角速度在方位框架角余弦函数的作用下,以摩擦力矩约束耦合的方式影响视轴俯仰方向角速度。

图 6 为载体扰动通过框架摩擦力矩影响视轴俯仰角速度的仿真结果。仿真结果表明:摩擦力矩对视轴俯仰角速度的影响随着方位框架角度的增加而逐

渐减小。而常规反射镜平台不受方位框架角度的影响。图 6 的仿真结果验证了公式(31)。

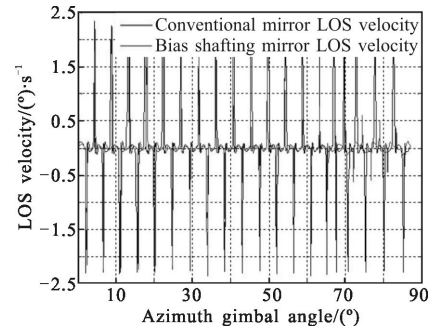
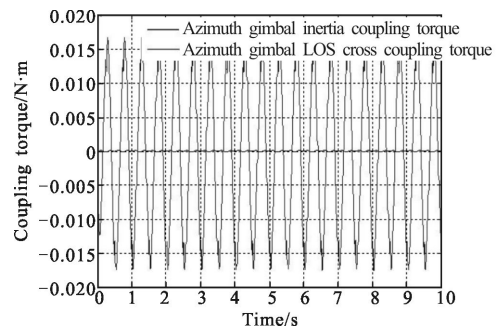


图 6 不同方位框架角下摩擦力矩引起的俯仰视轴输出角速度
Fig.6 LOS elevation angle velocity caused by friction torque under azimuth gimbal angle increases

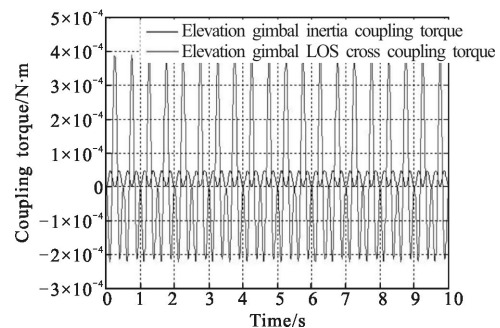
(3) 在偏轴反射镜平台的视轴动力学模型中,由于视轴运动的非线性而引入了新的视轴交叉耦合力矩项 M_{Ly_couple} 、 M_{Lz_couple} ,与惯量耦合力矩 M_{y_cross} 、 M_{z_cross} 进行对比分析。

图 7 所示为惯量耦合干扰力矩和视轴交叉耦合



(a) 方位框架耦合干扰力矩

(a) Azimuth gimbal coupling disturbance torque



(b) 俯仰框架耦合干扰力矩

(b) Elevation gimbal coupling disturbance torque

图 7 耦合干扰力矩对比分析

Fig.7 Coupling disturbance torque comparative analysis

扰力矩的仿真结果。仿真结果表明:新引入的视轴交叉耦合干扰力矩大于原有的框架惯量耦合力矩。因此,在控制系统设计中需要考虑该耦合力矩。

6 结 论

文中结合光学反射矢量理论和虚拟整体稳定平台技术,建立了偏轴反射镜平台的运动学模型和动力学模型。同时,对载体运动耦合机制进行了分析并给出了视轴稳定的控制框图。最后,依据建立的运动学模型和动力学模型,对偏轴反射镜平台的视轴运动特性进行仿真分析。可得到以下结论:

(1) 偏轴反射镜平台可以在较小的反射镜尺寸和摆角范围条件下实现较大的视轴指向范围,为稳定平台的小型化、轻量化需求提供了新的解决途径。

(2) 偏轴反射镜平台的视轴指向控制存在较严重的非线性和强耦合,需要采用查表法或局部线性算法逆解视轴指向方程^[9]。

(3) 偏轴反射镜平台的视轴交叉耦合干扰力矩大于框架惯量耦合力矩,需要考虑该耦合力矩的影响。

(4) 载体扰动角速度以摩擦力矩干扰和几何约束干扰两种形式同时影响视轴运动,需要在稳定控制系统设计时重点考虑。

在文中研究的基础上,后续将进一步建立同时包含方位、俯仰通道的状态空间模型,研究以两个通道为对象的多变量非线性控制方法以实现高精度视轴稳定控制。

参考文献:

[1] Hilker J. Inertially stabilized platform technology [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, 28(1): 26–46.

[2] Michael K M. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, 28(1): 47–64.

[3] Zhu Huazheng. Research on several essential problems of

imaging seeker servo mechanism [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)

[4] Ekstrand B. Equations of motion for a two-axes gimbal system [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(3): 1084–1091.

[5] Mckerley C W. A model for a two degree of freedom coupled seeker with mass imbalance [J]. *IEEE Proceedings on Control Systems Technology*, 1996, 9(1): 84–87.

[6] Zhu Huazheng, Fan Dapeng, Zhang Wenbo, et al. Influence analysis of the mass imbalance torque on the performance of seeker servo mechanism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 767–772. (in Chinese)

[7] Dong Xiaomeng, Zhang Ping, Fu Kuisheng. Electromechanical modeling and simulation for strapdown polar coordinate visual guidance platform [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(1): 262–265. (in Chinese)

[8] Zhou Ruiqing, Lu Shanwei, Liu Xinhua. Dynamics modeling and simulation analyzing for strapdown antenna stable platform [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(9): 953–957. (in Chinese)

[9] Hilker J M, Cohen S. Development of mirror stabilization line-of-sight rate equations for an un-conventional sensor-to-gimbal orientation[C]//SPIE, 2009, 7338: 10.1117/12.818805.

[10] Hui Bin, Li Jingzhen, Huang Hongbin, et al. Optical analysis of space two-axis scanning mirror [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(9): 508–511. (in Chinese)

[11] Nie Xutao. Study on strength and dynamics of seeker servo mechanism [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)

[12] Wu Changming, Liu Zhong. Analysis of antiinterference performance of four-gimbal two-axis gyro-stabilized platform [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, 5(3): 76–78. (in Chinese)

[13] Bao Wenliang, Huang Xianlin, Lu Hongqian. Dynamic modeling and coupling analysis of a multi-gimbal electro-optical platform [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009, 30(8): 893–897. (in Chinese)