

基于半捷联方式的反射镜视轴稳定技术

王 琦, 孙广利, 黎纯宁, 宋江鹏

(天津航技术物理研究所, 天津 300192)

摘 要: 针对反射镜视轴稳定平台特点, 从基本的反射镜视轴运动学关系出发, 采用基于虚拟整体稳定平台的视轴重建方法对反射镜稳定平台视轴惯性角速度进行数学重建, 同时分析了反射镜转角和视场范围的关系。为克服反射镜固有的 2:1 特性, 对比了传统的机械稳定控制方法, 和重建光轴的半捷联稳定方法。仿真结果表明: 两种方法都可以稳定视轴, 但重建视轴的半捷联控制方法符合稳定平台小型化的发展趋势。

关键词: 反射镜; 间接稳定; 虚拟光轴; 半捷联稳定; 半角机构

中图分类号: TN202 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-3070-06

Inertial line-of-sight stabilization technique of semi-strapdown control using mirrors

Wang Qi, Sun Guangli, Li Chunling, Song Jiangpeng

(Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China)

Abstract: According to the characteristics of the line-of-sight kinematics in mirror stabilization platform, a general method based on the artificial mass stabilization platform was used to reconstruct LOS angle rate by utilizing the basic mirror kinematics equations. Then the relation between mirror rotation and the field-of-view was figured out. Due to the law of reflection, an auxiliary shaft must be made for mechanical mass stabilization or semi-strapdown stabilization. Analyzing this two methods deeply show that the methods are both feasible for mirror LOS stabilization control, but semi-strapdown stabilization would accord with the future needs.

Key words: mirror; indirect control; fabricate auxiliary shaft; semi-strapdown stabilization; half angle mechanism

收稿日期: 2015-02-05; 修订日期: 2015-03-15

作者简介: 王琦(1990-), 女, 硕士生, 主要研究方向为稳定平台控制。Email: helionswq@163.com

导师简介: 孙广利(1962-), 男, 研究员, 主要研究方向为红外成像制导总体技术研究。

0 引言

光电稳定平台是导引头的核心技术之一,能够有效隔离载体姿态运动或其他干扰所造成的光电探测器光轴在惯性空间内的抖动,实现对目标的自主搜索、自动识别、快速捕获和精确跟踪^[1],广泛应用于现代武器系统中。

1 反射镜视轴稳定技术的控制方式

目前,光电稳定平台主要有整体稳定(见图 1(a))和反射镜间接稳定(图 1(b))两种方式^[2]。前者是将光学探测器和惯性器件直接安装在稳定平台上,通过驱动电机补偿平台对载体的角扰动,保持光轴的惯性稳定。但是其平台体积、结构和转动惯量较大,不利于实现稳定平台的小型化和快速响应能力。后者是通过控制光路中的反射镜来稳定视轴^[3],使其输入光束与像面光束保持相对稳定,较好地克服了直接稳定在空间和惯量方面的限制。

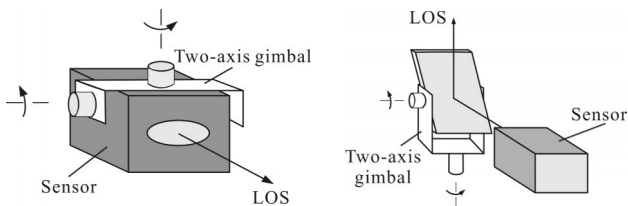


图 1 光电稳定平台控制方式
Fig.1 Configuration of LOS stabilized platforms

由于反射镜的光学固有特性,反射镜间接稳像系统的主流方案是通过一个半角机构克服反射镜运动和光轴运动存在的 1:2 的传动关系,如图 2 所示。但是,半角机构存在的弹性变形、传动间隙和机械谐振,会影响传动精度,进而影响稳定精度,且半角机

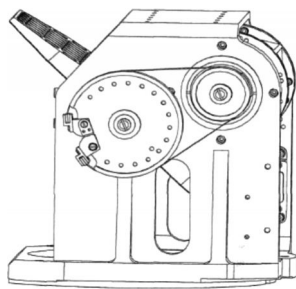


图 2 含半角机构的反射镜稳定系统结构图
Fig.2 Structure of mirror stabilization system with half angle mechanism

构占用了部分体积和空间,不利于实现导引头的小型化^[4]。

为克服机械结构限制,进一步实现导引头小型化,文中采用半捷联方式搭建数学平台代替半角机构实现视轴稳定。文中首先从基本的反射镜光轴运动学关系出发,采用了虚拟整体稳定平台方法重建反射镜视轴在惯性空间角速度,该方法将反射镜视轴运动等效为整体稳定平台视轴运动,推导过程清晰、便于应用,从而可以采用整体稳定平台光轴稳定技术对反射镜间接稳定平台进行分析和设计。同时,文中分析了反射镜转角和视场范围的关系,并对控制策略进行了分析和比较,为反射镜间接稳定平台的设计提供了参考和理论基础。最后给出了在转台上的实际稳定结果。

2 光学成像及虚拟平台的建立

图 3 为反射镜稳定平台示意图。其中,外框架为俯仰框架,内框架为航向框架,成像器视轴平行于外框架。外俯仰框架绕 OZ 旋转 α 角,内航向框架绕 OY 旋转 β 角。反射镜 M_1 、 M_2 固定, M_3 在两轴双框架的稳像平台内,可绕内航向轴、外俯仰轴转动。稳像平台通过控制 M_3 ,实现光轴稳定。

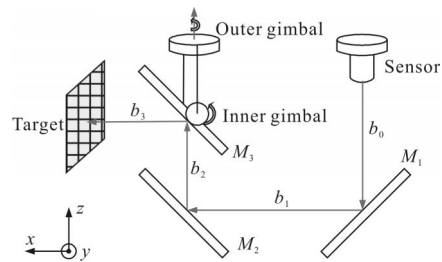


图 3 反射镜稳定平台的结构
Fig.3 Configuration of LOS stabilization platform using mirrors

下面推导视轴转角和框架角之间的关系。由图 1 可知,摆镜 M_1 、 M_2 、 M_3 的零位法线分别为: n_1 、 n_2 、 n_3 。

光学成像器固联在弹体上。若成像器有一出射矢量 $b_0=(x \ y \ z)^T$,则光轴 b_0 经各摆镜反射后,目标指向为 $b_3=(-z \ y \ -x)^T$ 。

当稳像平台控制摆镜进行光轴稳定时,根据转动矢量公式,在成像坐标系中,摆镜 M_3 的法线 n_3 和外框架角 α 、内框架角 β 之间的关系为:

$$n_3' = S_{z,\alpha} \cdot S_{y,\beta} \cdot n_3 =$$

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

根据坐标系定义,若取 $b_0=(0 \ 0 \ -1)^T$,根据反射镜矢量公式,摆镜 M_3 转动后视轴为:

$$b_3' = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cdot \cos 2\beta \\ \sin \alpha \cdot \cos 2\beta \\ -\sin 2\beta \end{pmatrix} \quad (2)$$

当反射镜框架依次转动 α 、 β 角时,光轴在参考坐标系下的投影分量可等效于虚拟两轴整体稳定平台外俯仰框架转动 λ_1 角、内航向框架转动 λ_0 角引起的视轴投影分量。设定虚拟稳定平台转动轴与反射镜稳定平台转动轴相对应,外框架绕 Z 旋转,内框架绕 Y 旋转,如图 4 所示。

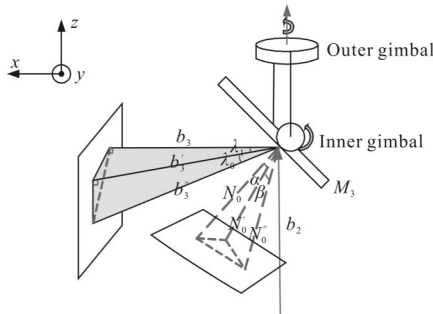


图 4 视轴运动示意图

Fig.4 Configuration of LOS rotation

由图 4 推导 λ_0 、 λ_1 和 α 、 β 角的关系:

$$\cos \lambda_1 = \frac{b_{3x}''}{\sqrt{(b_{3x}'')^2 + (b_{3y}'')^2}} = \cos \alpha \quad (3)$$

$$\sin \lambda_1 = \frac{b_{3y}''}{\sqrt{(b_{3x}'')^2 + (b_{3y}'')^2}} = \sin \alpha$$

$$\cos \lambda_0 = \frac{-b_{3z}''}{\sqrt{(b_{3x}'')^2 + (b_{3y}'')^2 + (b_{3z}'')^2}} = \cos 2\beta \quad (4)$$

$$\sin \lambda_0 = \frac{\sqrt{(b_{3x}'')^2 + (b_{3y}'')^2}}{\sqrt{(b_{3x}'')^2 + (b_{3y}'')^2 + (b_{3z}'')^2}} = \sin 2\beta$$

设定稳定平台基座惯性空间扰动角速度在参考坐标系投影 $\omega_b=(\omega_{bx}, \omega_{by}, \omega_{bz})^T$,按照整体稳定平台视

轴惯性空间角速度解算方法^[5-7],由整体惯性空间角速度、虚拟框架相对转角、虚拟框架相对旋转角速度可以解算出视轴运动角速度:

$$\begin{pmatrix} \omega_{gx} \\ \omega_{gy} \\ \omega_{gz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \lambda_0 & 0 & -\sin \lambda_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \lambda_0 & 0 & \cos \lambda_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \lambda_1 & \sin \lambda_1 & 0 \\ -\sin \lambda_1 & \cos \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{bx} \\ \omega_{by} \\ \omega_{bz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \lambda_0 & 0 & -\sin \lambda_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \lambda_0 & 0 & \cos \lambda_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \lambda_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2\beta \end{pmatrix} \quad (5)$$

从而得到反射镜稳定平台视轴运动角速度:

$$\begin{pmatrix} \omega_{gx} \\ \omega_{gy} \\ \omega_{gz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 2\beta & 0 & -\sin 2\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\beta & 0 & \cos 2\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{bx} \\ \omega_{by} \\ \omega_{bz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos 2\beta & 0 & -\sin 2\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\beta & 0 & \cos 2\beta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2\beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中, ω_{gx} 引起图像的旋转,在视轴稳定控制设计中不予考虑,将在软件上进行补偿, ω_{gy} 、 ω_{gz} 是视轴在航向、俯仰方向的惯性角速度,用于视轴稳定控制。

综上,通过构建虚拟的整体稳定平台可以等效反射镜稳定平台的视轴运动,把反射镜的运动等效为一个两框两自由度的框架平台。当反射镜依次转动 α 角、 β 角时,视轴在成像坐标系下的投影分量可等效为虚拟两轴整体稳定平台外俯仰框架转动 α 角、内航向框架转动 2β 角引起的视轴投影分量。

3 反射镜转动和视场的关系

通过研究光轴单位矢量 b_0 的像矢量 b_3 在平行于 YOZ 平面内的运动轨迹,来计算反射镜旋转角度 α 、 β 和视场范围的关系,如图 5 所示。

由图 5 可知:

$$x = \tan a = \frac{b_{3y}'}{b_{3x}'} \frac{\sin \alpha \cos 2\beta}{\cos \alpha \cos 2\beta} = \tan \alpha$$

$$y = \tan b = \frac{b_{3z}'}{b_{3x}'} \frac{-\sin 2\beta}{\cos \alpha \cos 2\beta} = -\frac{\tan 2\beta}{\cos \alpha} \quad (7)$$

视轴在距摆镜单位距离的扫描轨迹可表示为:

$$\frac{y^2}{\tan^2 2\beta} - x^2 = 1 \quad (8)$$

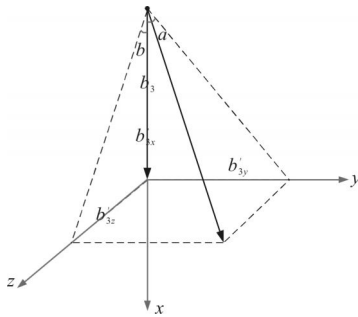


图 5 反射镜视场示意图

Fig.5 Field-of-view via mirror rotation

从上式所描述的扫描轨迹曲线方程可以看出,扫描轨迹是一条双曲线,离心率为:

$$e=c/a=1/\sin 2\beta \tag{9}$$

随着航向 β 角的增大,离心率越来越小,双曲线开口越小,也越弯曲。若反射镜的转动范围为 y 轴 $\pm 20^\circ$ (传动关系为 1:2),外框绕 z 轴 $\pm 30^\circ$,则视场扫描范围如图 6 所示。图中,每个 x 号间隔表示反射镜旋转了 1° ,垂直方向为航向摆动角,水平方向为俯仰摆动角。可以看出,航向角 β 越大,扫描曲线越弯曲。

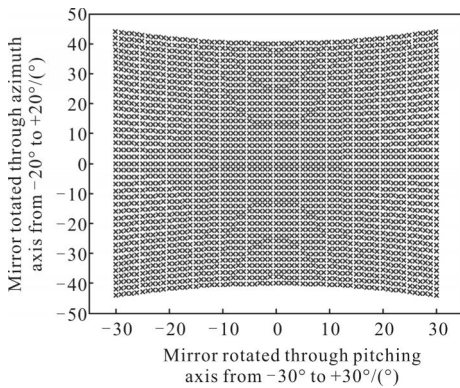


图 6 反射镜旋转得到的视场范围

Fig.6 Field-of-view for special mirror rotation confines

反射镜转角和视场的关系为:

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctan x \\ \beta &= -\frac{1}{2} \arctan(y \cdot \cos \alpha) \end{aligned} \tag{10}$$

图 7 是为实现航向 $\pm 40^\circ$ 、俯仰 $\pm 30^\circ$ 的视场范围,摆镜需要转动的角度。

经过精确计算,为实现视轴指向范围俯仰方向 $\pm 30^\circ$ 的要求,反射镜需绕俯仰 z 轴从 -30° 运动到 $+30^\circ$;为实现视轴范围航向 $\pm 40^\circ$ 的要求,反射镜需绕航向 y

轴从 $+18^\circ$ 运动到 -18° 。从上两节的分析可以看出反射镜绕垂直于光轴的转轴旋转会引入二倍效应,且反射镜转角和视场存在非线性。

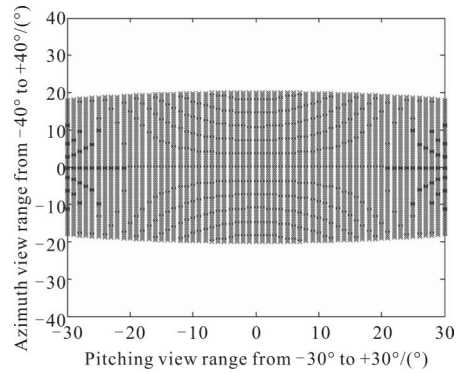


图 7 为实现视场反射镜所需的转角

Fig.7 Mirror rotates angles for special field-of-view

4 反射镜稳像平台的控制

为克服反射镜二倍效应,传统的机械式反射镜稳定通过半角机构搭建辅助轴,平行于反射镜的 2 倍回转轴,建立辅助轴与反射镜二倍回转轴之间的 2:1 关系,如图 8 所示。

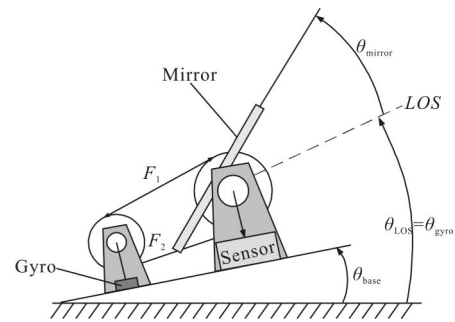


图 8 基于半角机构的反射镜视轴稳定技术

Fig.8 LOS stabilization under half angle mechanism

考虑到导引头小型化、轻型化的发展需求,通过半角机构搭建辅助轴的反射镜稳像方式往往受到导引头空间和其他条件的限制。为缓解空间制约,利用伺服机构搭建虚拟光轴的半捷联控制方法可以取代半角机构,补偿反射镜的二倍效应。由于惯性元件无法直接测量虚拟光轴在惯性空间的角速度,需要通过软件平台进行光轴解算,并引入测角元件测量摆镜的转角,驱动虚拟光轴反向旋转二倍来进行补偿。

对于两轴两框架的单摆镜间接稳像平台,基于半角机构的机械式稳像方法可利用两个单轴陀螺直

接测量光轴在惯性空间的角速度 ω_{gy} 、 ω_{gz} 进行反馈控制;但是,对于搭建虚拟光轴的半捷联控制方法,必须利用三轴陀螺和测角元件,其安装位置可选择放在反射镜背后或外框架上。若选取两轴陀螺测量光轴在惯性空间的角速度,在初始零位,两种放置方法的惯性敏感轴分别与光轴 y 、 z 平行。但是,当摆镜旋转时,光轴也随之旋转。由图 9 可以看出,反射镜旋转后,惯性元件的敏感轴与光轴 z 并不平行,陀螺的测量量 $\omega_{gyro,z} \neq \omega_{gz}$,需要引入陀螺第三轴 $\omega_{gyro,x}$ 和测角元件测量反射镜转角 θ ,共同解算出光轴 z 方向上的角速度 ω_{gz} 。

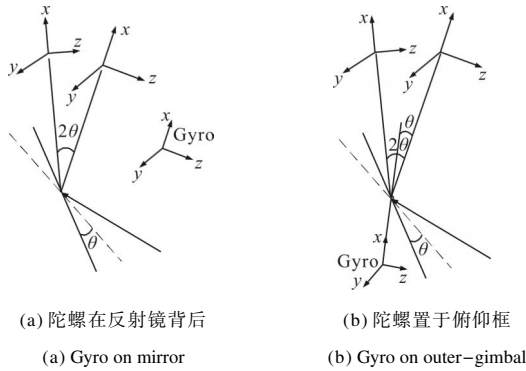


图 9 反射镜旋转对光轴的影响
Fig.9 LOS changes when mirror rotates

与半角机构的机械稳定方式相比,通过搭建虚拟光轴的半捷联稳定方式省略了半角机构,减小了导引头的空间和重量,减轻了力矩电机的负载。而且,半角机构常用的钢带传动或连杆传动方式,引入了传动摩擦阻力,其间隙和刚度将影响系统的稳态精度;半角传输比率难以校准,装配难度较大。但是,搭建虚拟光轴的半捷联单摆镜稳像方式,无法直接测量光轴角速度,需要利用三轴陀螺和测角元件进行光轴解算,在解算中容易引入测量误差。因此,在工程应用中,应综合考虑空间、成本、精度等因素,选择更为合适的稳像方案。

5 实验仿真

由于反射镜二倍效应的旋转轴为航向轴,下面选取陀螺置于俯仰框的虚拟光轴半捷联控制,并和半角机构的机械控制在航向 y 方向进行 Simulink 仿真对比。

对于半捷联控制方法,由第一节的光轴解算可知:

$$\omega_{gy} = \omega_{oy} + 2\lambda_y \tag{11}$$

式中: ω_{oy} 为外框架 y 方向在惯性空间的角速度; ω_{gy} 为陀螺的测量量; λ_y 为反射镜和外框架相对运动的角速度,是旋转变压器的测量量。仿真框图如图 10 所示。

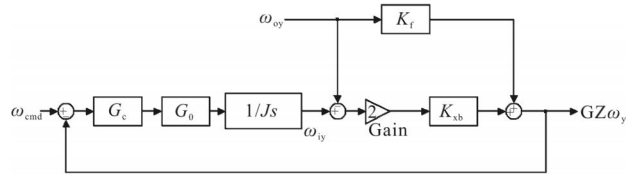


图 10 陀螺置于俯仰框的半捷联稳像方式控制框图
Fig.10 Block diagram of strap-down stabilization when gyro on outer-gimbal

其中 K_f 是陀螺的测量传函, K_{xb} 是旋变的测量传函。由此得到光轴 y 方向在惯性空间的角速度为:

$$\omega_{gy} = \frac{G_c G_0 K_{xb}}{\frac{1}{2} J s + G_c G_0 K_{xb}} \omega_{cmd} + \frac{\frac{1}{2} J s (K_f - 2K_{xb})}{\frac{1}{2} J s + G_c G_0 K_{xb}} \omega_{oy} \tag{12}$$

式中: $G_0 = \frac{K_t}{Ls + R}$ 为电机参数。

仿真时所设的参数如表 1 所示。

表 1 Simulink 仿真参数

Tab.1 Data of system for Simulink

Parameter	Parameter values	Unit
J	0.002 9	kg · m ²
G_c	20	kg · m ²
G_0	$\frac{K_t}{Ls + R} = \frac{0.044}{0.008s + 5.33}$	kg · m ²
K_f	$\frac{1}{0.000 8s + 1}$	kg · m ²
K_{xb}	$\frac{1}{0.001 59s + 1}$	kg · m ²

当基座和外框架无相对运动,即 $\lambda_z = 0$ 时,有 $\omega_{gy} = \omega_{oy}$ 。此时,基座 y 方向的扰动对光轴 y 方向角速度的影响如图 11 所示。在基座 y 方向存在 $4^\circ/1 \text{ Hz}$ 扰动时,半捷联稳像方式对干扰的隔离度约为 4.2%,而半角机构约为 7%。通过提高增益还可以进一步提高系统的隔离度。

将半捷联反射镜稳定机构置于转台上进行隔离度测试,测试结果如图 12 所示。当转台航向方向存在 $4^\circ/1 \text{ Hz}$ 扰动时,系统隔离度约为 4.7%。

由实际测量结果可知,采用半捷联方式的反射

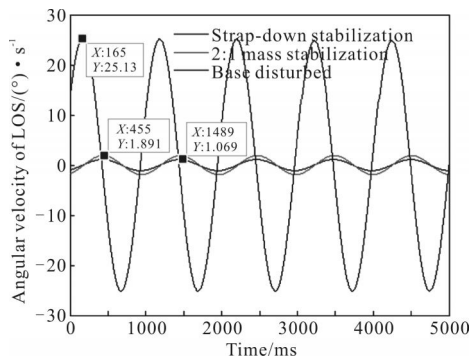


图 11 基座运动时两种稳像方式对比

Fig.11 Comparison of two methods when base disturbs

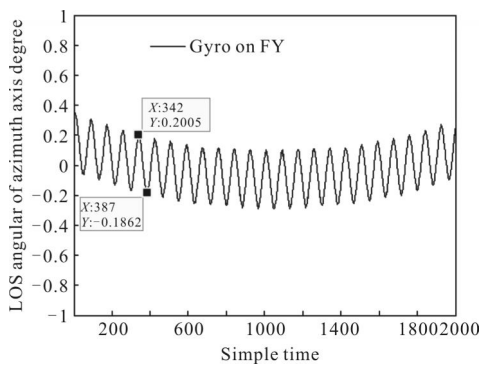


图 12 航向方向隔离度测试

Fig.12 Disturbance rejection angular of azimuth axis

镜间接稳定系统能够进行视轴稳定,并满足系统隔离度小于 5% 的指标要求。

6 结 论

反射镜稳定平台充分利用了光学设计,可将光学成像器后置,减轻了整体稳定平台框架的负载;并可利用多个反射镜改变光路方向,将成像器置于适当位置,使系统结构空间布置得更加灵活。文中通过推导反射镜视轴运动学关系,建立了基于虚拟整体稳定平台的反射镜视轴惯性空间角速度重建方法,分析了反射镜转角和视场的关系,并对控制策略进行了分析,得到以下结论:

(1) 典型单反射镜稳定平台因反射镜固有的 2:1 特性,无法采用直接稳定控制方式,常采用机械传动

机构或重建视轴惯性空间角速度的方法以实现视轴稳定控制。随着微处理器技术、传感器技术的发展以及反射镜稳定平台轻量化、高精度的需求,利用伺服机构重建虚拟视轴的半捷联稳定控制技术已成为反射镜视轴稳定控制的主要发展方向。

(2) 典型的 2:1 传动机构虽然能够克服光学 2:1 特性,但与半捷联稳定方式相比,其质量、体积较大,且难以保证机械、装配精度。但是,半捷联稳定方式需要利用测角元件和三轴陀螺测速,可能会在一定程度上增加系统的成本。因此,在实际工程中,应综合考虑空间、成本、精度等因素,选择合适的稳像方案。

参考文献:

- [1] Fan Dapeng, Zhang Zhiyong, Fan Shixun, et al. Research of basic principles of E-O stabilization and tracking devices [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14 (4):674-683. (in Chinese)
- [2] Hilkert J M. Inertially stabilized platform technology [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, 28(1): 26-46.
- [3] Shen Honghai, Liu Jinghong, Jia Ping, et al. Overview of imaging stabilization [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(2): 115-120. (in Chinese)
- [4] Hong Huajie, Wang Xuewu, Wang Ganfei. Mirror stabilization in electro-optical reconnaissance system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 591-598. (in Chinese)
- [5] Zhang Zhiyong, Zhou Xiaoyao, Fan Dapeng, et al. Design and analysis of control system for seeker servo mechanism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 1494-1499. (in Chinese)
- [6] Zhu Huazhen, Fan Dapeng. Influence analysis of the mass imbalance torque on the performance of seeker servo mechanism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38 (5): 768-778. (in Chinese)
- [7] Sun Hui. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 912-918. (in Chinese)