

文章编号 1004-924X(2019)10-2224-09

## 反射镜式光电系统光路内嵌复合轴稳定平台

李红光\*, 彭富伦, 姜旭, 迟圣威, 胡正良  
(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:**为满足高机动装甲车辆对光电瞄准系统视轴高稳定精度的要求,设计了光路中嵌入快速反射镜的反射镜式光电系统复合轴稳定平台。首先,利用施奈尔反射镜定律的矢量方程,构建系统视轴矢量方程,研究其运动特性、稳定补偿原理;然后,分析了控制方法、控制系统频率特性,分析结果显示,传统稳定平台控制系统的截止频率 26 Hz,而复合控制系统的截止频率为 215 Hz,控制系统带宽提升了 8 倍以上;最后,构建了复合轴稳定平台实验装置、测试装置,介绍了实验方法、稳定精度测试原理,开展了复合轴平台与传统平台的稳定精度比较实验。实验结果表明,在相同的实验条件下,复合轴平台较传统平台的稳定精度提高了 5 倍以上,反射镜式光电系统光路内嵌复合轴稳定平台能够实现光电瞄准镜的高精度稳定。

**关键词:**反射镜式光电系统;光路内嵌复合轴;快速反射镜;瞄准线稳定

**中图分类号:** V241.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192710.2224

## Stabilization platform of complex axes embedded into optical path for optics-electricity system with upside mirror

LI Hong-guang\*, PENG Fu-lun, JIANG Xu, CHI Sheng-wei, HU Zheng-liang

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

\* Corresponding author, E-mail: redlight007@163.com

**Abstract:** According to the requirements of high-stability accuracy electro-optic systems for high-mobility armored vehicles, a stabilization platform of complex axes for electro-optic systems with upside mirrors was designed, which embeds a fast steering mirror into the optical path. First, using the vector equation of Schneier's law of reflection, the vector equation of the line of sight is calculated, and the movement characteristics and compensation theory of stabilization for complex axes are studied. Second, the controlling method and frequency characteristics of the control system are analyzed. The results show that the cut-off frequency of complex axes platform control system, which is 215 Hz, is eight times that of the traditional platform control systems, which is 26 Hz. Finally, an experimental device and test equipment of the complex-axes platform are established, and the experimental method and testing principle of stability accuracy are introduced. Furthermore, the comparison experiments of stability accuracy between the complex-axes and traditional platforms are discussed. The experimental results indicate that the stability accuracy of the complex-axes platform is five times that of traditional platforms under the same experimental conditions, and a stabilization

收稿日期:2019-01-15;修订日期:2019-03-28.

基金项目:兵器集团基础性创新团队基金资助项目(No. JCCX2013A0205002)

platform of complex-axes embedded into the optical path of an electro-optic system with upside mirrors can realize high-accuracy stability of electro-optic systems.

**Key words:** optics-electricity system with upside mirror; complex axes embedded into optical path; fast steering mirror; stabilization of the LOS

## 1 引 言

随着科技不断进步,车辆武器系统的打击距离越来越远、车辆机动性能日益提高,这就要求光电系统的作用距离更远、分辨能力更高、瞄准跟踪精度更高,且隔离振动、颠簸、冲击等频谱特性复杂的强扰动的能力更强。目前,车辆光电瞄准镜稳定的典型方式主要为反射镜式稳定平台、两轴两框架式稳定平台,由于两者隔离扰动的能力有限,系统稳定精度无法达到拍摄高分辨率清晰图像的要求<sup>[1-4]</sup>,这就制约了光电系统对远距离目标识别、精确瞄准及跟踪的性能。

在光电系统领域,提高瞄准线稳定精度的方法主要有采用两轴多框架式或多轴万向架平台、减震器等两种方式,两轴多框架式或多轴万向架平台结构复杂<sup>[4-5]</sup>,车辆振动、颠簸及武器发射冲击的极易造成系统零位走动,甚至轴系结构部件损坏,不太适合高机动车辆行进间使用。减震器可以隔离高频扰动,但是无法隔离低频扰动,并且其形变影响了对目标的位置测量精度,而车辆火控系统大多为直瞄火控系统,需要高精度的目标位置数据,所以车辆装备高精度火控打击系统时,其光电瞄准镜一般不安装减震器。因此,从系统构建着手,探索新型高精度稳定平台<sup>[6-10]</sup>。

本文利用快速反射镜嵌入到反射镜式光电系统的下部平行光路中,作为稳定误差补偿的精级平台,从而构成粗细组合的复合轴稳定平台,从构建系统视轴矢量方程入手,研究其运动特性、稳定机理及稳定补偿原理,分析控制方法、控制系统频率特性。最后,搭建了实验装置、测试装置,介绍了测试原理、实验方法,开展了复合轴平台与传统平台稳定精度对比实验。

## 2 系统组成

在不改变传统反射镜式光电系统稳定平台构成的基础上,反射镜式光电系统光路内嵌复合

轴稳定平台将快速反射镜安装在反射镜稳定平台的主反射镜后方光路中,即光电系统固定部分的光路内。入射光线经过主反射镜反射后,经过望远镜光学组件后,通过快速反射镜反射进入分光镜组件,不同波段的光进入相应的传感器组件,其光路示意图如图 1 所示。反射镜式粗级稳定平台的俯仰平台由方位平台支撑,方位平台位于基座上,快速反射镜安装于与基座固连的光路中,可在俯仰、方位两个自由度内微量转动,以补偿反射镜式粗级平台稳定误差。

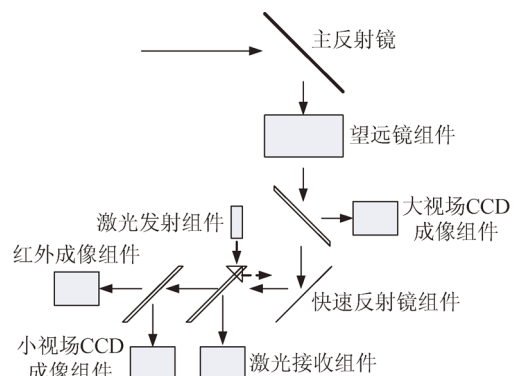


图 1 光路内嵌复合轴稳定平台光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of complex axes stabilization platform embedded into optical path

该系统的快速反射镜尺寸比较小,快速反射镜的各种性能指标易于实现,且原有的经典反射镜式稳定平台几乎不变,其反射镜平台的体积、稳定精度等性能指标变化不大。但是光路设计较复杂,结构布局相对比较难,需要对上反射镜后的光路重新设计。另外,由于快速反射镜不随粗平台转动,复合轴补偿关系随着粗平台方位角度变化而变化。

## 3 系统视轴运动特性

### 3.1 系统坐标系及其相互关系

如图 2 所示<sup>[1,4,8-9]</sup>,基座坐标系  $O_bXYZ$  以安装于基座的探测器为坐标原点, $Z$ 轴平行于反射

镜式稳定平台的方位旋转轴,  $X$  轴平行于探测器自身的视轴, 但方向相反, 探测器视轴矢量(反射前)为  $\mathbf{P}_{0B} = [-1 \ 0 \ 0]^T$ 。基座坐标系  $O_B XYZ$  绕  $Y$  轴旋转  $-45^\circ$  得到快速反射镜坐标系  $O_{ism} XYZ$ , 快速反射镜坐标系  $O_{ism} XYZ$  以快速反射镜基座为坐标原点,  $X$  轴垂直于基座安装面,  $Z$  轴平行于基座安装面。

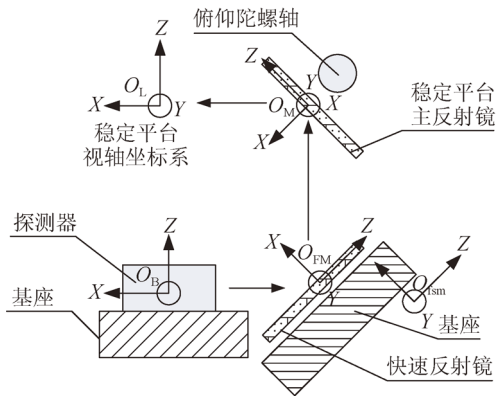


图 2 光路内嵌复合轴平台相关坐标系

Fig. 2 System coordinate of complex axes platform embedded into optical path

快速反射镜镜面坐标系  $O_{FM} XYZ$  以快速反射镜的镜面为坐标原点,  $X$  轴垂直于快速反射镜镜面,  $Z$  轴平行于镜面, 快速反射镜法线矢量为

$$\mathbf{N}_{FMism} = E(-\theta_m) E(-\varphi_m) \mathbf{N}_{FM} = \begin{bmatrix} \cos \theta_m & 0 & \sin \theta_m \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_m & 0 & \cos \theta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_m & -\sin \varphi_m & 0 \\ \sin \varphi_m & \cos \varphi_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_m \cos \varphi_m \\ \sin \varphi_m \\ -\sin \theta_m \cos \varphi_m \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中:  $\theta_m$  为快速反射镜绕  $Y$  轴旋转角度,  $\varphi_m$  为绕  $Z$  轴旋转角度, 此时快速反射镜的  $Z$  旋转轴安装在  $Y$  旋转平台上。

由施奈尔反射定律知, 反射前、反射后快速反射镜视轴矢量之间的转换矩阵  $\mathbf{T}_{FSM}^{[8-9]}$  为:

$$\mathbf{T}_{FSM} = \begin{bmatrix} 1-2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_yN_x & 1-2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_zN_x & -2N_zN_y & 1-2N_z^2 \end{bmatrix},$$

其中:  $N_x, N_y, N_z$  为快速反射镜法线矢量  $\mathbf{N}_{FMism}$  的分量,  $N_x = \cos \theta_m \cos \varphi_m$ ,  $N_y = \sin \varphi_m$ ,  $N_z = -\sin \theta_m \cos \varphi_m$ 。

则在快速反射镜坐标系下快速反射镜反射后

$\mathbf{N}_{FM} = [1 \ 0 \ 0]^T$ , 当快速反射镜偏转角度为零时, 坐标系  $O_{FM} XYZ$  与  $O_{ism} XYZ$  重合。

主反射镜镜面坐标系  $O_M XYZ$  以主反射镜为坐标原点,  $X$  轴垂直于主反射镜镜面,  $Z$  轴平行于主反射镜镜面且向上为正, 主反射镜法线矢量为  $\mathbf{N}_M = [1 \ 0 \ 0]^T$ 。反射镜稳定平台视轴坐标系  $O_L XYZ$  以陀螺为中心,  $Z$  轴为方位陀螺敏感轴,  $Y$  轴为俯仰陀螺敏感轴。

### 3.2 系统视轴矢量方程

#### 3.2.1 快速反射镜视轴矢量

基于上节的描述, 在快速反射镜坐标系下表示的传感器视轴矢量(反射前)  $\mathbf{P}_{1ism}$  为:

$$\mathbf{P}_{1ism} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \mathbf{P}_{0B},$$

其中  $\beta$  为快速反射镜坐标系  $O_{ism} XYZ$  变换到基座坐标系  $O_B XYZ$  时绕  $Y$  轴旋转的角度,  $\beta = 45^\circ$ , 则:

$$\mathbf{P}_{1ism} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \mathbf{P}_{0B} = \begin{bmatrix} -\cos \beta \\ 0 \\ \sin \beta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$\mathbf{N}_{FMism}$  为在快速反射镜坐标系下表示的快速反射镜法线矢量, 则:

的视轴矢量:

$$\mathbf{R}_{1ism} = \mathbf{T}_{FSM} \mathbf{P}_{1ism} = \begin{bmatrix} 1-2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_yN_x & 1-2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_zN_x & -2N_zN_y & 1-2N_z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos \beta \\ 0 \\ \sin \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2\cos^2 \varphi_m \cos^2 \theta_m - 1)(\cos \beta) + \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m) \sin \beta \\ \sin(2\varphi_m) \cos \theta_m \cos \beta + \sin(2\varphi_m) \sin \theta_m \sin \beta \\ \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m)(-\cos \beta) + (1-2\sin^2 \theta_m \cos^2 \varphi_m) \sin \beta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

转换为在底座坐标系下的快速反射镜反射后的矢量  $\mathbf{R}_{1B}$  则:

$$\mathbf{R}_{1B} = E(\beta) \mathbf{R}_{1ism} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (2 \cos^2 \varphi_m \cos^2 \theta_m - 1)(\cos \beta) + \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m) \sin \beta \\ \sin(2\varphi_m) \cos \theta_m \cos \beta + \sin(2\varphi_m) \sin \theta_m \sin \beta \\ \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m)(-\cos \beta) + (1 - 2 \sin^2 \theta_m \cos^2 \varphi_m) \sin \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cos^2 \beta)(2 \cos^2 \varphi_m \cos^2 \theta_m - 1) + 2 \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m) \cos \beta \sin \beta + \sin^2 \beta(2 \cos^2 \varphi_m \sin^2 \theta_m - 1) \\ \cos \beta \sin(2\varphi_m) \cos \theta_m + \sin \beta \sin(2\varphi_m) \sin \theta_m \\ \sin \beta \cos \beta(2 \cos^2 \varphi_m \cos^2 \theta_m - 1) + \sin^2 \beta \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m) - \cos^2 \beta \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m) + \sin \beta \cos \beta(1 - 2 \sin^2 \theta_m \cos^2 \varphi_m) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

矢量  $\mathbf{R}_{1B}$ 是在底座坐标系下经快速反射镜的反射后的视轴矢量,其和在底座坐标系下表示的一级反射镜反射前的视轴矢量  $\mathbf{P}_{2B}$ 相同。

### 3.2.2 主反射镜视轴矢量

在底座坐标系下,主反射镜的法线矢量  $\mathbf{N}_{MB}$ :

$$\mathbf{N}_{MB} = E(-\varphi_0) E(-(\theta_0 + 45^\circ)) \mathbf{N}_M = \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 \cos(\theta_0 + 45^\circ) \\ \sin \varphi_0 \cos(\theta_0 + 45^\circ) \\ -\sin(\theta_0 + 45^\circ) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中  $\varphi_0$  为反射镜稳定平台的方位角度表示,用  $\theta_0$  反射镜稳定平台俯仰反射镜轴角度。

反射镜稳定平台反射前与反射后的视轴矢量之间的转换矩阵  $\mathbf{T}_M$  为:

$$\mathbf{T}_M = \begin{bmatrix} 1 - 2 \cos^2 \varphi_0 \cos^2(\theta_0 + 45^\circ) & -\sin(2\varphi_0) \cos^2(\theta_0 + 45^\circ) & \cos \varphi_0 \sin(2(\theta_0 + 45^\circ)) \\ -\sin(2\varphi_0) \cos^2(\theta_0 + 45^\circ) & 1 - 2 \sin^2 \varphi_0 \cos^2(\theta_0 + 45^\circ) & \sin \varphi_0 \sin(2(\theta_0 + 45^\circ)) \\ \cos \varphi_0 \sin(2(\theta_0 + 45^\circ)) & \sin \varphi_0 \sin(2(\theta_0 + 45^\circ)) & 1 - 2 \sin^2(\theta_0 + 45^\circ) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

则在基座坐标系下主反射镜反射后的视轴矢量:

$$\mathbf{R}_{2B} = \mathbf{T}_M \mathbf{P}_{2B} = \begin{bmatrix} 1 - 2 \cos^2 \varphi_0 \cos^2(\theta_0 + 45^\circ) & -\sin(2\varphi_0) \cos^2(\theta_0 + 45^\circ) & \cos \varphi_0 \sin(2(\theta_0 + 45^\circ)) \\ -\sin(2\varphi_0) \cos^2(\theta_0 + 45^\circ) & 1 - 2 \sin^2 \varphi_0 \cos^2(\theta_0 + 45^\circ) & \sin \varphi_0 \sin(2(\theta_0 + 45^\circ)) \\ \cos \varphi_0 \sin(2(\theta_0 + 45^\circ)) & \sin \varphi_0 \sin(2(\theta_0 + 45^\circ)) & 1 - 2 \sin^2(\theta_0 + 45^\circ) \end{bmatrix} \mathbf{P}_{2B}, \quad (7)$$

其中:

$$\mathbf{P}_{2B} = \mathbf{R}_{1B} = \begin{bmatrix} (\cos^2 \beta)(2 \cos^2 \varphi_m \cos^2 \theta_m - 1) + 2 \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m) \cos \beta \sin \beta + \sin^2 \beta(2 \cos^2 \varphi_m \sin^2 \theta_m - 1) \\ \cos \beta \sin(2\varphi_m) \cos \theta_m + \sin \beta \sin(2\varphi_m) \sin \theta_m \\ \sin \beta \cos \beta(2 \cos^2 \varphi_m \cos^2 \theta_m - 1) + \sin^2 \beta \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m) - \cos^2 \beta \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m) + \sin \beta \cos \beta(1 - 2 \sin^2 \theta_m \cos^2 \varphi_m) \end{bmatrix}.$$

## 4 复合轴稳定机理及控制系统特性

### 4.1 视轴稳定补偿原理

本文中光路内嵌复合轴稳定平台的反射镜稳

定平台与传统的反射镜式光电稳定平台一致<sup>[1,4]</sup>,在此只分析光路内嵌快速反射镜实现反射镜式平台稳定误差的补偿机理。

在基座坐标系下,复合轴平台系统 LOS 矢量为:

$$\mathbf{R}_{2B} = \begin{bmatrix} R_{2Bx} \\ R_{2By} \\ R_{2Bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 2 \cos^2 \varphi_0 \cos^2(\theta_0 + 45^\circ) & -\sin(2\varphi_0) \cos^2(\theta_0 + 45^\circ) & \cos \varphi_0 \sin(2(\theta_0 + 45^\circ)) \\ -\sin(2\varphi_0) \cos^2(\theta_0 + 45^\circ) & 1 - 2 \sin^2 \varphi_0 \cos^2(\theta_0 + 45^\circ) & \sin \varphi_0 \sin(2(\theta_0 + 45^\circ)) \\ \cos \varphi_0 \sin(2(\theta_0 + 45^\circ)) & \sin \varphi_0 \sin(2(\theta_0 + 45^\circ)) & 1 - 2 \sin^2(\theta_0 + 45^\circ) \end{bmatrix} \mathbf{P}_{2B}, \quad (8)$$

其中:

$$\mathbf{P}_{2B} = \begin{bmatrix} (\cos^2 \beta)(2 \cos^2 \varphi_m \cos^2 \theta_m - 1) + 2 \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m) \cos \beta \sin \beta + \sin^2 \beta(2 \cos^2 \varphi_m \sin^2 \theta_m - 1) \\ \cos \beta \sin(2\varphi_m) \cos \theta_m + \sin \beta \sin(2\varphi_m) \sin \theta_m \\ \sin \beta \cos \beta(2 \cos^2 \varphi_m \cos^2 \theta_m - 1) + \sin^2 \beta \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m) - \cos^2 \beta \cos^2 \varphi_m \sin(2\theta_m) + \sin \beta \cos \beta(1 - 2 \sin^2 \theta_m \cos^2 \varphi_m) \end{bmatrix},$$

则在陀螺坐标系下,复合轴平台系统 LOS 矢量为:

$$\mathbf{R}_{2L} = \begin{bmatrix} R_{2Lx} \\ R_{2Ly} \\ R_{2Lz} \end{bmatrix} = E(2\theta_0)E(\varphi_0)\mathbf{R}_{2B} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_0 & 0 & -\sin 2\theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\theta_0 & 0 & \cos 2\theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 & 0 \\ -\sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R}_{2B}. \quad (9)$$

当快速反射镜处于零位位置时:

$$\mathbf{P}_{2B} = \begin{bmatrix} \cos 2\beta \\ 0 \\ \sin 2\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_{2B}^0 = \begin{bmatrix} 1-2\cos^2\varphi_0\cos^2(\theta_0+45^\circ) & -\sin(2\varphi_0)\cos^2(\theta_0+45^\circ) & \cos\varphi_0\sin(2(\theta_0+45^\circ)) \\ -\sin(2\varphi_0)\cos^2(\theta_0+45^\circ) & 1-2\sin^2\varphi_0\cos^2(\theta_0+45^\circ) & \sin\varphi_0\sin(2(\theta_0+45^\circ)) \\ \cos\varphi_0\sin(2(\theta_0+45^\circ)) & \sin\varphi_0\sin(2(\theta_0+45^\circ)) & 1-2\sin^2(\theta_0+45^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_0\sin(2(\theta_0+45^\circ)) \\ \sin\varphi_0\sin(2(\theta_0+45^\circ)) \\ 1-2\sin^2(\theta_0+45^\circ) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),推导计算得出复合轴平台系统 LOS 矢量为:

$$\mathbf{R}_{2L}^0 = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_0 & 0 & -\sin 2\theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\theta_0 & 0 & \cos 2\theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos j_0 & \sin j_0 & 0 \\ -\sin j_0 & \cos j_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos j_0 \sin(2(\theta_0+45^\circ)) \\ \sin j_0 \sin(2(\theta_0+45^\circ)) \\ 1-2\sin^2(\theta_0+45^\circ) \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ 0]^T.$$

当快速反射镜的旋转角度不为零时,使得系统视轴矢量的变化角度为其偏离矢量  $\mathbf{R}_{2L}^0$  的角度。因此,快速反射镜转动带来的系统视轴角度变化如下。

方位偏离角度为:

$$\varphi_{Lm} = \arctg \frac{R_{2Ly}}{R_{2Lx}}. \quad (11)$$

俯仰偏离角度为:

$$\theta_{Lm} = \arctg \frac{R_{2Lz}}{R_{2Lx}}. \quad (12)$$

由于陀螺输出是反射镜式稳定平台的残余速度误差,分别为  $\omega_{kx}, \omega_{ky}, \omega_{kz}$ ,当快速反射镜的角度不为零时,系统视轴偏离了陀螺敏感轴,可根据此时视轴的偏移角度进行坐标转换,解算出视轴的稳定角速度误差  $\omega_{Lx}, \omega_{Ly}, \omega_{Lz}$ 。因此当  $\varphi_{Lm} - \varphi_{Lm}^0 = -\int \omega_{Lx}, \theta_{Lm} - \theta_{Lm}^0 = -\int \omega_{Ly}$  时,反射镜式稳定平台稳定误差被快速反射镜运动带来的视轴偏移而消除,其中  $\varphi_{Lm}^0, \theta_{Lm}^0$  为当前快速反射镜的方位及俯仰的角度。在实际控制系统中,  $\omega_{kx}, \omega_{ky}, \omega_{kz}, \varphi_0, \theta_0, \beta$  均已知,则当  $\varphi_{Lm} - \varphi_{Lm}^0 = -\int \omega_{Lx}, \theta_{Lm} - \theta_{Lm}^0 = -\int \omega_{Ly}$  时,可以求解出  $\theta_m, \varphi_m$  的值,从而实现快速反射镜的位置控制。

### 4.2 稳定补偿控制系统及频率特性

由于反射镜式稳定平台是两轴平台,其光路内部嵌入快速反射镜后,光学、机械转动、陀螺敏感轴之间严重耦合。为实现对稳定平台视轴方位、俯仰的高精度控制,可依据上节得到的方位、俯仰陀螺信号与快速反射镜方位、俯仰角度之间的关系,实现解耦运算。以方位控制为例,解耦处理后光路内嵌复合轴稳定系统的框图<sup>[10-12]</sup>如图 3 所示。

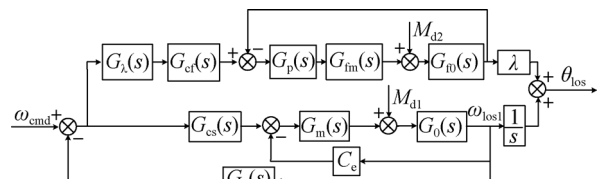


图 3 光路内嵌复合轴稳定控制框图

Fig. 3 Controlling diagram of complex axes stabilization platform embedded into optical path

为了比较反射镜式稳定平台与光路内嵌复合轴稳定平台间的频率特性,在复合控制仿真回路的输出增加了微分环节将角位置数据转换为速率数据,研究复合控制系统频率特性。图 4 为系统闭环特性曲线,图中曲线 Mode(1)为复合控制系统频率特性曲线,曲线 Mode(0)为传统反射镜式

稳定平台频率特性曲线。两者比较后可以看出,传统稳定平台控制系统的截止频率 26 Hz,而复合轴控制系统的截止频率为 215 Hz,且与快速反射镜将近。图 5 为系统隔离度,图中曲线 Mode(0)为传统稳定平台控制系统隔离度曲线,曲线 Mode(1)为复合轴控制系统隔离度曲线,其在低频段明显优于传统稳定平台隔离度,且频率范围更宽。

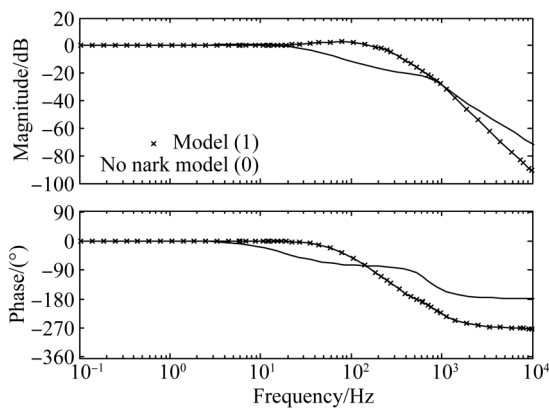


图 4 系统闭环频率特性

Fig. 4 Frequency characteristics of system close loop

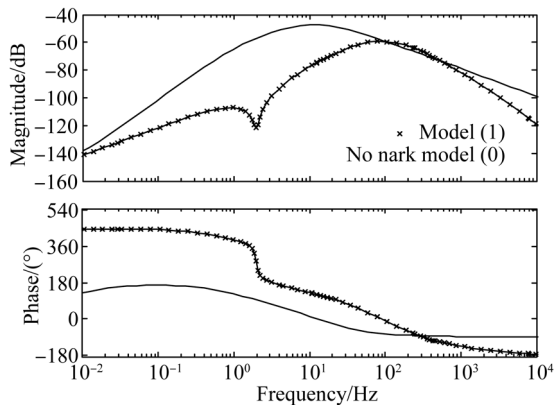


图 5 系统隔离度

Fig. 5 Isolation of system

### 5 复合轴稳定性能实验

#### 5.1 稳定精度测试方法

光路内嵌复合轴平台稳定精度测试光学系统<sup>[13-14]</sup>示意图如图 6 所示,自准直仪由自准直仪主机、光源、信号处理软件平台构成,光源发出特定波段的光,由自准直仪主机内部的光学系统转换为平行光,由主反射镜、快速反射镜两次反射后,反射镜最终回到自准直仪光学系统,然后经过

自准直仪内部的分光处理在其后部的探测器靶面上成像,读取成像点的位置信息,依据光学系统焦距等参数转换为光反射光的偏转角度,从而测试系统稳定精度。

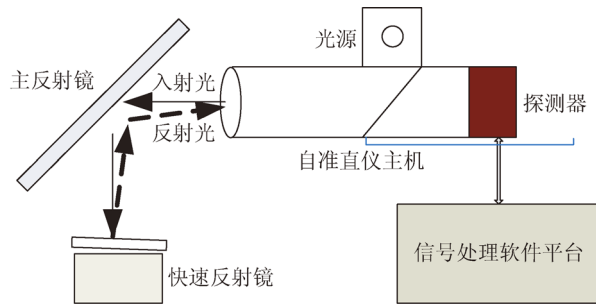


图 6 稳定精度测试光学示意图

Fig. 6 Sketch map of optical system for stability accuracy test

#### 5.2 实验系统及测试方法

实验系统包括实验装置和测试装置两部分,如图 7 所示,测试装置有摇摆台、自准直仪构成,实验中由摇摆台简单模拟车辆行驶中的颠簸、摇摆,自准直仪用来测试系统的稳定精度。

实验装置是采用已有上部反射镜式瞄准镜和快速反射镜构建的光路内嵌复合轴稳定平台,上部反射镜式瞄准镜的两轴转台构成粗级平台,通过固定板将快速反射镜固定在粗级平台的基座上,代替原有的光学组件,如图 7 所示。该两轴转台由方位、俯仰两个轴系,俯仰平台安装在方位平台上,且采用二比一机构带动反射镜转动,而陀螺安装在俯仰的电机轴上,陀螺测量数据为反射镜转动速度的二倍。快速反射镜采用了压电陶瓷驱动的两轴快速反射镜,该快速反射镜的角度范围为 $\pm 1.5$  mrad,反射镜直径为 $\varphi 40$  mm。

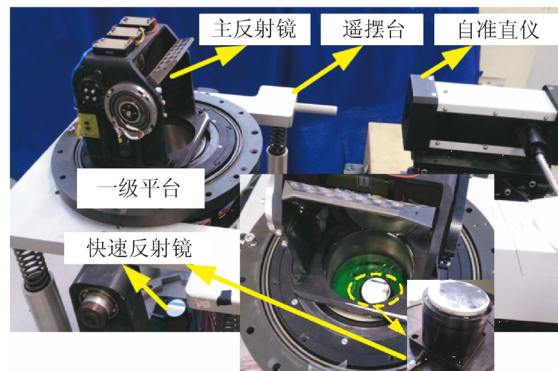


图 7 实验系统

Fig. 7 System of experiment

由于实验条件的限制,实验时粗级平台反射镜与快速反射镜之间没有嵌入光学望远镜,所以光学放大倍率为 1。为了便于测试,实验中快速反射镜没有倾斜 45°角放置,而是按照 5.1 节介绍的方法,将快速反射镜安装基面与粗级平台方位旋转轴垂直,此时快速反射镜方位角度、俯仰角度与其反射光线之间都存在 2 倍的关系。由于光线经过粗级平台的主反射镜反射两次,在系统稳定精度测试实验中,快速反射镜补偿的误差是粗级平台稳定误差的两倍。系统工作时,伺服稳定控制计算机将粗级平台方位、俯仰陀螺数据经过滤波、积分、控制器等处理后,由串口送入快速反射镜控制电路,实现粗级平台的稳定残差补偿。

车载光电系统的结构强度一般较好,稳定平台转动惯量较大,在车辆高速行驶时,高频扰动幅

值较小,经过稳定平台机构衰减后,对车载光电系统的稳定精度影响很小。因此,由于摩擦力矩带来的低频扰动是制约光电系统稳定精度的主要因素。实验中,将实验装置固定于于摇摆台上,摇摆台进行低频摇摆运动<sup>[15]</sup>,复合轴控制数据刷新时间周期为 1 ms。经实验测试,方位稳定控制误差数据如图 8 所示,俯仰稳定控制误差数据如图 9 所示。在图 8 中第一幅曲线图的左半侧为没有复合补偿控制时方位稳定误差,而右半侧为开启复合补偿控制后方位稳定误差,第二幅曲线图为复合补偿控制后稳定误差曲线的放大图。在图 9 中第一幅曲线图的左半侧为没有复合补偿控制时俯仰稳定误差,而右半侧为开启复合补偿控制后俯仰稳定误差,第二幅曲线图为复合补偿控制后稳定误差曲线的放大图。

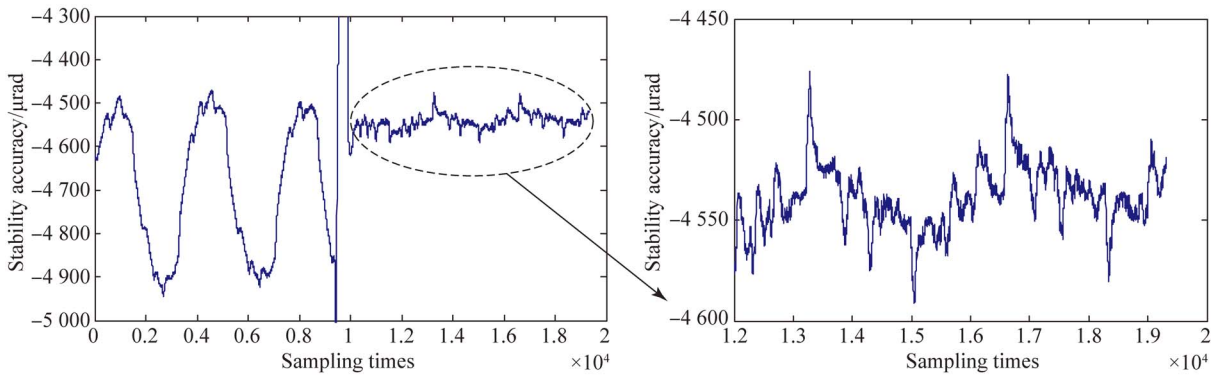


图 8 方位稳定误差

Fig. 8 Stability error of azimuth

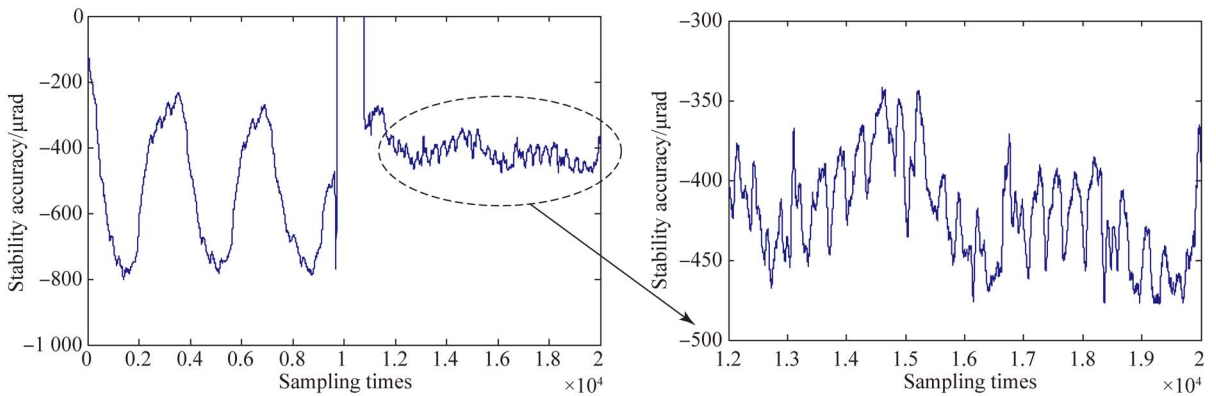


图 9 俯仰稳定误差

Fig. 9 Stability error of pitch

综上所述,从复合轴稳定控制方位、俯仰稳定误差曲线得知,在相同的扰动、实验条件下,传统

平台的稳定误差峰峰值约为 0.6 mrad,而复合轴稳定平台稳定误差峰峰值约为 0.1 mrad。无论

方位还是俯仰,复合轴稳定精度较传统的稳定平台的稳定精度大幅度提高,提高了 5 倍以上。由于误差分布更加集中,瞬间差毛刺对稳定精度影响较小,通过计算稳定误差的  $1\sigma$  值可知,复合轴稳定精度( $1\sigma$  值)提高 8 倍以上。

## 6 结 论

本文针对反射镜式光电系统视轴高精度稳定的需要,设计了光路内嵌快速反射镜的反射镜式

光电系统复合轴稳定平台,介绍了系统视轴矢量方程、复合轴稳定补偿机原理,提出了补偿控制方法及控制回路的频率特性,最后介绍了复合轴稳定平台实验装置及实验测试方法。实验结果表明,在相同的扰动、实验条件下,复合轴稳定平台控制误差峰峰值约为 0.1 mrad,较传统平台稳定精度提高了 5 倍以上。

因此,反射镜式光电系统复合轴稳定平台可以大幅提升系统视轴稳定精度,能够满足高速行进间车辆武器系统瞄准、激光指示以及打击目标的需求。

### 参考文献:

- [1] 李红光,纪明,等.上反射镜式光电系统复合轴稳定机理[J].红外与激光工程,2016,45(7):0731001.  
LI H G, JI M, *et al.*. Stabilization theory of complex axes for optics-electricity system with upside mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016,45(7):0731001. (in Chinese)
- [2] 纪明.反射镜稳定系统的仿真与误差分析[J].应用光学,2000,21(5):19-22.  
JI M. Simulation and error analysis of mirror stabilized system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2000,21(5):19-22. (in Chinese)
- [3] 何海燕,张凤,林喆.无人机光轴稳定平台复合稳定控制方法研究[J].战术导弹技术,2018(3):78-83.  
HE H Y, ZHANG F, LIN Z. A hybrid stability control method for the optical axis stabilization platform of an unmanned aerial vehicle [J]. *Tactical Missile Technology*. 2018(3):78-83. (in Chinese)
- [4] 范大鹏,张智永,范世琦,等.光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究[J].光学精密工程,2006,14(4):673-679.  
FAN D P, ZHANG ZH Y, FAN SH X, *et al.*. Research of basic principles of E-O stabilization and tracking devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):673-679. (in Chinese)
- [5] 王国富,余法山,汪旭东,等.机载光电转台的谐振分析及自适应滤波器设计[J].光学精密工程,2007,15(11):1802-1807.  
WANG G F, YU F SH, WANG X D, *et al.*. Analysis on resonance of air-borne opto-electronic tracking turntable and design of adaptive filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1802-1806. (in Chinese)
- [6] 胥青青,刘伟,纪明,等.远程红外探测系统瞄准线高精度稳定技术[J].红外与激光工程,2014,43(11):3646-3650.  
XU Q Q, LIU W, JI M, *et al.*. Line-of-sight high-precision stabilization technology of remote infrared detection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014,43(11): 3646-3650. (in Chinese)
- [7] MASTEN M. Inertially stabilized platforms for imaging optical system [J]. *IEEE CSM*, 2008, 28: 47-64.
- [8] HILKERT J M. Line-of-sight kinematics and corrections for fast-steering mirrors used in precision pointing and tracking systems [J]. *SPIE Vol. 9076, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications XI*, 2014: 90760F1-90760F12.
- [9] SATYAM Satyarathi. Optical Line-of-Sight steering using gimbaled mirrors. *Proceedings of SPIE Vol. 9076, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications XI*, 2014: 90760E1-90760E8.
- [10] 徐飞飞,纪明,谢静,等.FSM在高精度瞄准线稳定系统中的应用研究[J].应用光学,2012,33(1):9-13.  
XU F F, LI M, XIE J, *et al.*. Application of FSM in high accuracy line-of-sight stabilization system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012,33(1):9-13. (in Chinese)
- [11] 李贤涛,张晓沛,毛大鹏,等.高精度音圈快速反射镜的自适应鲁棒控制[J].光学精密工程,2017,25(9):2429-2436.  
LI X T, ZHANG X P, MAO D P, *et al.*. Adaptive robust control over high-performance VCM-FSM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,25(9): 429-2436. (in Chinese)
- [12] 扈宏杰,王元哲.机载光电平台的复合补偿控制方法[J].光学精密工程,2012,20(6):1272-1281.

- HU H J, WANG Y ZH. Composite compensation control scheme for airborne opto-electrol platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (6): 1272-1281. (in Chinese)
- [13] 孙辉,郎小龙,李志强,等. 动载体光电平台视轴稳定精度的检测 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2131-2137.
- SUN H, LANG X L, LI ZH Q, *et al.*. Measurement for LOS stabilization accuracy of electro-optical imaging system on moving carrier [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2131-2137. (in Chinese)
- [14] 李国宁,刘妍妍,金龙旭. 用于动态目标跟踪的面阵 CCD 成像系统 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3): 558-564.
- LI G N, LIU Y Y, JIN L X. Area CCD imaging system used in moving target tracking [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 558-564. (in Chinese)
- [15] 方宇超,李梦雪,车英,等. 车载光电侦察平台视轴稳定技术研究 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 410-417.
- FANG Y CH, LI M X, CHE Y, *et al.*. Study on boresight stabilized technology of vehicle photoelectric reconnaissance platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(2): 410-417. (in Chinese)

#### 作者简介:



**李红光**(1983—),男,山东巨野人,博士,研究员,2004年于长春理工大学获得学士学位,2007年、2016年于西安应用光学研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光电侦察系统及稳定跟踪技术研究。E-mail:redlight007@163.com



**彭富伦**(1980—),男,四川乐山人,博士,研究员,2001年于南京理工大学获得学士学位,2004年、2014年于西安应用光学研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光电系统及软件技术研究。E-mail:pxoolfy@163.com