

# 基于机载光电成像系统光学铰链离轴的 伺服抗扰算法设计

白志刚<sup>1</sup>, 戴凌冉<sup>2</sup>, 吴 晔<sup>2</sup>, 钟 宇<sup>2</sup>, 杨光海<sup>2</sup>

(1. 空装驻成都地区第五军事代表室, 成都 610041; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

**摘要:** 在机载光电成像系统中, 小型化是其未来发展的方向之一; 为了解决系统小型化带来的尺寸受限问题, 系统采用了光学铰链与伺服框架轴非正交的离轴设计, 这给光轴指向控制及卸载飞机扰动的稳定控制带来了一定的困难; 为了解决这一问题, 系统控制回路采取半捷联设计, 通过使用经微分处理后的伺服框架角信号, 与叠加了经抗扰算法处理的飞机载体三轴角速度信号共同作为稳定回路的期望值, 再进行匹配滤波; 通过对系统进行稳定精度测试验证, 航向和俯仰稳定精度均在  $0.02^\circ$  以内, 对比采用陀螺信号反馈的直接稳定控制回路, 具有相似的稳定精度, 并且此抗扰算法设计不会对系统环境适应性带来影响。

**关键词:** 光电成像系统; 离轴设计; 半捷联设计; 抗扰算法; 匹配滤波; 稳定精度

## Servo Disturbance Rejection Algorithm Design of off-axis Optical Hinge Based on Airborne Photoelectric Imaging System

Bai Zhigang<sup>1</sup>, Dai Lingran<sup>2</sup>, Wu Ye<sup>2</sup>, Zhong Ning<sup>2</sup>, Yang Guanghai<sup>2</sup>

(1. the 5<sup>th</sup> Military Delegate Room of Air Force Equipment to Chengdu, Chengdu 610041, China;

2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In the airborne photoelectric imaging system, the miniaturization is one of the way for development. To solve the problem of the size limit, a non-orthogonal off-axis design on optical hinge and servo gimbal axis is used in this system, it also brings some difficult on optical axis pointing control and the stability control of unloading aircraft disturbance. To solve the problem, using half-strapdown design on system control loop, via servo gimbal axis signal by differential processing, and tri-axial angular speed signal on aircraft carrier overlying disturbance rejection algorithm, treated as expected value of the stable loop, then match-filtering is given. By the test of stabilization precision to the system, the result of course and pitch is below  $0.02^\circ$ , comparing with the direct stable control loop by using gyro signal feedback, provided with similar stable precision, and the disturbance rejection algorithm design will not bring any effect on environmental adaptability of the system.

**Keywords:** photoelectric imaging system; off-axis design; half-strapdown design; disturbance rejection algorithm; match-filtering; stable precision

## 0 引言

机载光电成像系统(以下简称系统)安装于飞机上,用于对地面或空中目标进行搜索、识别、跟踪和指示、侦查、评估、取证等,具有广泛的应用领域,从机载光电成像系统的使用上看,一方面要求系统具有稳定的控制,另一方面也要求具有高精度的跟踪性能。小型化是其未来发展的方向之一,本文所涉及的系统即为一款小型化系统,该系统主要包含光学系统、光电探测器、二轴伺服控制系统等。为减小系统的外形尺寸,采用了光学铰链与伺服框架轴非正交的离轴设计,部分光路既不与框架轴平行,也不与框架轴垂直,给光轴指向控制及卸载飞机扰动的稳定控制带来了一定的困难,本文着重从稳定控制的角度给出抗飞机角运动扰动的算法推导及实验室验证情况。

## 1 系统概述

### 1.1 光电成像系统分类

光电成像系统是通过相应光学器件把景物成像于光电接收器上,是一个对整个机载探测系统性能有着极其重要影响的系统。系统按照对应接收光的波长范围可以分为可见光系统、紫外光系统、红外光系统和 X 光系统;按照光学物镜系统可以分为折射式系统、反射式系统和折反式系统。本文所讨论的光电成像系统采用的是反射式光学系统。

### 1.2 系统光学铰链离轴特点

在本系统中,入射的近似平行光经二维扫描反射镜(以下简称一反)反射进入固定反射镜(以下简称二反),光线经二反反射进入光学镜头及光电探测器,再通过伺服控制系统驱动一反运动。该伺服控制系统为航向、俯仰两轴正交结构,航向框架为外框架,俯仰框架为内框架。当伺服框架运动时,带动一反围绕一反镜面中心进行航向、俯仰二自由度转动,从而将外部不同空间角度上的景物经由固定反射镜(二反)反射到光电探测器<sup>[1]</sup>。本系统安装到载机后,伺服航向轴与载机航向轴平行,伺服俯仰轴平行于一反镜面且位于镜面内,伺服航向

收稿日期: 2019-11-12; 修回日期: 2020-01-03。

作者简介: 白志刚(1976-),男,四川汉源人,硕士,高级工程师,主要从事图像制导、电子控制方向的研究。

轴处于零位时伺服俯仰轴与载机俯仰轴平行。

通常基于反射式光学系统的伺服平台设计都是一反入射光与内框轴垂直, 同时一反出射光与外框轴平行。由于本系统后端长度尺寸受载机结构空间限制, 光电成像系统在结构上进行了特殊处理, 将一反中心与二反中心连线相对伺服航向轴前倾  $30^\circ$ , 在一反相对载机位置不变的情况下将光学镜头和光电探测器向前布局, 适当利用了载机前端富余空间, 减小了系统后端长度方向的尺寸, 但由此带来伺服航向轴与一反出射光不平行的问题, 即所谓的“光学铰链离轴”问题, 此时航向、俯仰框架轴的运动形成耦合, 不能形成单通道独立控制, 相应地, 在系统伺服控制上需要进行匹配设计和额外的算法处理。

系统光路及伺服框架轴的关系如图 1 所示, 结构三维模型剖视图如图 2 所示。

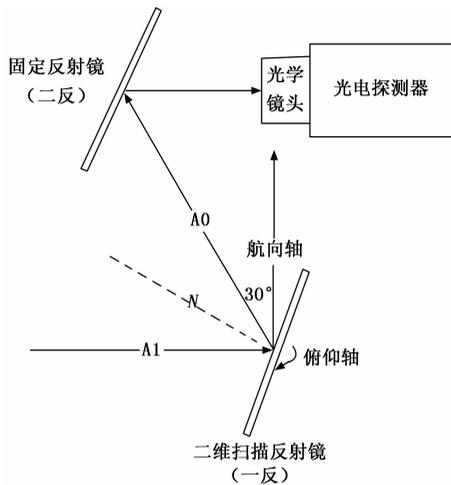


图 1 光电成像系统光路与框架轴关系示意图

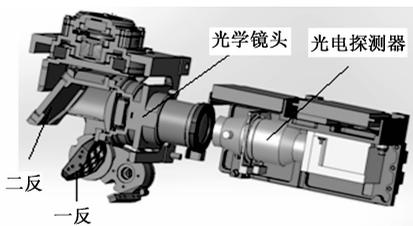


图 2 结构三维模型剖视图

### 1.3 系统控制回路特点

由于系统的外形尺寸的限制, 在光学铰链离轴的条件下, 系统控制回路只能采取半捷联设计方案<sup>[2-4]</sup>, 取消了速率陀螺元件, 通过对惯导姿态信息进行数学解算达到控制目的, 但保留了与陀螺稳定平台相同的伺服框架, 其稳定控制回路(单通道)构成如图 3 所示。与通常陀螺信号反馈的直接稳定回路相比, 该回路有两点不同, 一是反馈信号使用的是经微分处理后的伺服框架角信号, 即框架角速度; 二是指令信号中叠加了经抗扰算法处理的飞机载体三轴角速度信号。框架角速度的获取可以采用数字差分方法, 也可采用 TD 跟踪微分算法等其它方法, 但需要注意所需信号带宽的截取, 同时, 由于采用微分处理方式, 得到的框架角速度信号在某些固定频率点存在一定的放大, 需要数

字陷波器对其进行抑制; 抗扰算法处理则将当前载体三轴角速度结合伺服框架角解算出卸载载体扰动所需要的框架角速度, 并与外回路给定的惯性空间“角速度指令”叠加, 共同作为稳定回路的期望值, 为了达到良好的稳定精度, 需要对微分算法模块输出的框架角速度信号与抗扰算法输出的期望框架角速度信号进行匹配滤波, 使两者在幅频、相频特性尽可能逼近。

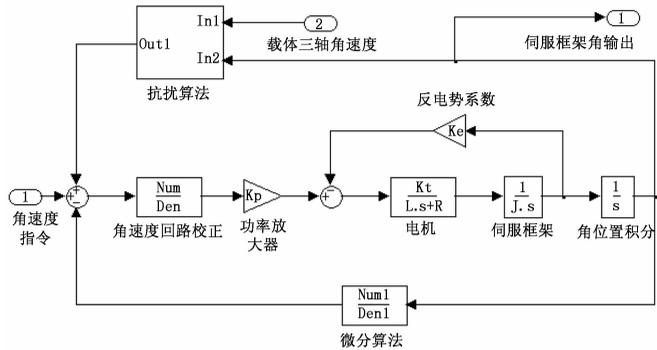


图 3 光电成像系统稳定控制回路图

本文以下介绍的重点内容为图 3 中“抗扰算法”部分。

## 2 抗扰算法设计

### 2.1 坐标系及符号定义

为方便进行运动学分析和抗扰算法推导, 对本机载光电成像系统定义如下坐标系:

载体坐标系  $o_1x_1y_1z_1$ ——与载体固联的坐标系, 原点  $o_1$  位于载体质心,  $o_1x_1$  轴与载体纵对称轴一致且指向头部,  $o_1y_1$  轴垂直于  $o_1x_1$  轴且在载体纵对称面内指向上方,  $o_1x_1y_1z_1$  构成右手正交坐标系;

一反坐标系  $o_Tx_Ty_Tz_T$ ——与一反固联的坐标系, 原点  $o_T$  为一反中心点,  $o_Tx_T$  轴与一反法线重合且垂直镜面向外,  $o_Tz_T$  轴与俯仰框架轴平行指向右方,  $o_Ty_T$  轴平行于镜面向上,  $o_Tx_Ty_Tz_T$  构成右手正交坐标系。

视线坐标系  $OX_LY_LZ_L$ ——与一反入射光固联的坐标系, 由载体坐标系  $o_1x_1y_1z_1$  依次旋转航向视线角  $\alpha_L$  和俯仰视线角  $\phi_L$  得到, 原点  $O$  为一反中心点,  $OX_L$  轴与一反入射光重合且指向外,  $OZ_L$  轴在所在平面内指向右方,  $OY_L$  轴指向上方,  $OX_LY_LZ_L$  构成右手正交坐标系。

定义如下符号及矩阵:

$\alpha_L$  为载体坐标系航向视线角;  $\phi_L$  为载体坐标系俯仰视线角;  $\alpha$  为航向框架角;  $\phi$  为俯仰框架角;  $\phi_0$  为一反二反中心连线与航向框架轴之间的夹角, 为  $30^\circ$ ;  $\vec{A}_1$  为载体坐标系下的一反入射光矢量;  $\vec{A}_0$  为载体坐标系下的一反出射光矢量;  $\vec{N}$  为载体坐标系下的一反法线矢量(垂直镜面向外);  $\omega_\alpha$  为沿航向框架轴的框架角速度;  $\omega_\phi$  为沿俯仰框架轴的框架角速度;  $\omega_{\alpha_0}$  为载体坐标系下的载体航向角速度;  $\omega_{\alpha_c}$  为载体坐标系下的载体俯仰角速度;  $\omega_{\alpha_r}$  为载体坐标系下的载体横滚角速度;  $T_\phi$  为载体坐标系到视线坐标系的俯仰旋转矩阵;

$$\mathbf{T}_\phi(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$\mathbf{T}_\alpha$  为载体坐标系到视线坐标系的方位旋转矩阵;

$$\mathbf{T}_\alpha(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

$\mathbf{T}_\phi^{-1}$  为视线坐标系到载体坐标系的俯仰旋转矩阵;

$$\mathbf{T}_\phi^{-1}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$\mathbf{T}_\alpha^{-1}$  为视线坐标系到载体坐标系的方位旋转矩阵。

$$\mathbf{T}_\alpha^{-1}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

## 2.2 算法设计原理及推导思路

1) 将光路中所有光线矢量统一到视线坐标系  $OX_L Y_L Z_L$  下, 该坐标系由载体坐标系绕  $OY_L$  轴旋转航向视视角  $\alpha_L$  后再绕  $OZ_L$  轴旋转俯仰视视角  $\phi_L$  得到, 其  $OX_L$  轴与一反入射光平行, 指向前方;

2) 分别考虑一反法线绕航向框架轴转动微量角度  $\Delta\alpha$  和绕俯仰框架轴转动微量角度  $\Delta\phi$ , 将方位、俯仰框架轴的 2 次转动进行合成 (由于是微量转动, 所以不考虑转序的影响, 进而直接将 2 次转动进行线性叠加), 合成的结果除以  $\Delta t$  并取极限, 得到光轴角度变化速度<sup>[5]</sup>;

3) 伺服系统控制光轴稳定的目标是将视线坐标系  $OX_L Y_L Z_L$  下的载体角速度  $OY_L$  轴分量和  $OZ_L$  轴分量分别与一反出射光角速度沿  $OY_L$  轴和  $OZ_L$  轴的分量大小相等, 方向相反, 即令两者矢量和为零, 因此, 在构成控制回路时, 以前者为期望值, 以后者为反馈值, 形成负反馈控制回路, 回路采用合适的校正环节将两者之间的误差控制到最小;

4) 所有矢量按照单位矢量考虑, 且因为矢量是有方向性的, 所以, 后续推导得到的光轴角度变化速度必须用初始矢量叉乘才是最终的光轴转动角速度。

5) 推导过程中应用的主要公式为矢量绕轴微量转动公式和反射定律矢量表达式:

矢量绕轴微量转动公式如下:

$$\vec{N}_1 = \vec{N} - \Delta\theta(\vec{N} \times \vec{A}_{axis}) \quad (5)$$

其中:  $\vec{N}$  为微量转动后的矢量;  $\vec{N}$  为微量转动前的矢量;  $\Delta\theta$  为微量转动的角;  $\vec{A}_{axis}$  为微量转动所围绕的转轴矢量。

反射定律矢量表达式如下:

$$\vec{A}_{out} = \vec{A}_{in} - 2(\vec{A}_{in} \cdot \vec{N})\vec{N} \text{ 或 } \vec{A}_{in} = \vec{A}_{out} - 2(\vec{A}_{out} \cdot \vec{N})\vec{N} \quad (6)$$

其中:  $\vec{A}_{out}$  为反射光矢量;  $\vec{A}_{in}$  为入射光矢量;  $\vec{N}$  为反射面的法线矢量。

## 2.3 抗扰算法推导

### 2.3.1 将矢量统一到视线坐标系下

1) 视线坐标系  $OX_L Y_L Z_L$  下的载体角速度  $\vec{\omega}_d$ :

$$\vec{\omega}_d = T_\phi(\phi_L) T_\alpha(\alpha_L) \begin{pmatrix} \omega_{dx} \\ \omega_{dy} \\ \omega_{dz} \end{pmatrix} \stackrel{\text{define}}{=} \begin{pmatrix} \omega_{dxl} \\ \omega_{dyl} \\ \omega_{dzl} \end{pmatrix} \quad (7)$$

2) 视线坐标系  $OX_L Y_L Z_L$  下的一反出射光矢量  $\vec{N}_1$ :

$$\vec{A}_1 = T_\phi(\phi_L) T_\alpha(\alpha_L) T_\phi(\phi_0) \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

3) 视线坐标系  $OX_L Y_L Z_L$  下的反射镜法线矢量  $\vec{N}$ :

$$\vec{N} = T_\phi(\phi_L) T_\alpha(\alpha_L) T_\alpha^{-1}(\alpha) T_\phi^{-1}(\frac{\phi}{2} + \phi_0) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

4) 视线坐标系  $OX_L Y_L Z_L$  下的俯仰框架轴矢量  $\vec{A}_\phi$ :

$$\vec{A}_\phi = T_\phi(\phi_L) T_\alpha(\alpha_L) T_\alpha^{-1}(\alpha) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

5) 视线坐标系  $OX_L Y_L Z_L$  下的航向框架轴矢量  $\vec{N}_\alpha$ :

$$\vec{N}_\alpha = T_\phi(\phi_L) T_\alpha(\alpha_L) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

### 2.3.2 推导过程

现已知视线坐标系  $OX_L Y_L Z_L$  下的一反出射光矢量  $\vec{A}_1$ , 根据反射定律矢量表达式, 当前一反入射光矢量为:

$$\vec{A}_0 = \vec{A}_1 - 2(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})\vec{N} \quad (12)$$

应用矢量绕轴微量转动公式, 分别求一反法线矢量  $\vec{N}$  绕俯仰框架轴  $\vec{A}_\phi$  旋转微量角度  $\Delta\phi$  和绕航向框架  $A_\alpha$  轴旋转微量角度  $\Delta\alpha$  后, 新生成的法线矢量  $\vec{N}_\phi$  和  $\vec{N}_\alpha$ 。

$$\vec{N}_\phi = \vec{N} - \Delta\phi(\vec{N} \times \vec{A}_\phi) \quad (13)$$

$$\vec{N}_\alpha = \vec{N} - \Delta\alpha(\vec{N} \times \vec{A}_\alpha) \quad (14)$$

再次应用反射定律矢量表达式, 求得一反法线经微量转动后形成的一反入射光新的矢量分别为:

$$\vec{A}_\omega = \vec{A}_1 - 2(\vec{A}_1 \cdot \vec{N}_\alpha)\vec{N}_\alpha \quad (15)$$

$$\vec{A}_\phi = \vec{A}_1 - 2(\vec{A}_1 \cdot \vec{N}_\phi)\vec{N}_\phi \quad (16)$$

一反法线绕  $A_\phi$  轴旋转  $\Delta\phi$  角形成的新一反入射光矢量相对初始的一反入射光矢量的变化量  $\vec{A}_0$  为:

$$\begin{aligned} \vec{A}_\phi - \vec{A}_0 &= [\vec{A}_1 - 2(\vec{A}_1 \cdot \vec{N}_\phi)\vec{N}_\phi] - [\vec{A}_1 - 2(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})\vec{N}] = \\ &= -2(\vec{A}_1 \cdot \vec{N}_\phi)\vec{N}_\phi + 2(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})\vec{N} = \\ &= -2\{\vec{A}_1 \cdot [\vec{N} - \Delta\phi(\vec{N} \times \vec{A}_\phi)]\} [\vec{N} - \Delta\phi(\vec{N} \times \vec{A}_\phi)] + \\ &= 2(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})\vec{N} = 2\Delta\phi(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})(\vec{N} \times \vec{A}_\phi) + \\ &= 2\Delta\phi\vec{A}_1 \cdot (\vec{N} \times \vec{A}_\phi) [\vec{N} - \Delta\phi(\vec{N} \times \vec{A}_\phi)] \end{aligned} \quad (17)$$

略去二阶小量, 得到:

$$\begin{aligned} \vec{A}_\phi - \vec{A}_0 &= 2\Delta\phi(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})(\vec{N} \times \vec{A}_\phi) + \\ &= 2\Delta\phi\vec{A}_1 \cdot (\vec{N} \times \vec{A}_\phi)\vec{N} \end{aligned} \quad (18)$$

同理可得, 一反法线绕轴旋转角形成的新一反出射光矢量相对于初始矢量变化为:

$$\begin{aligned} \vec{A}_\omega - \vec{A}_0 &= 2\Delta\alpha(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})(\vec{N} \times \vec{A}_\alpha) + \\ &= 2\Delta\alpha\vec{A}_1 \cdot (\vec{N} \times \vec{A}_\alpha)\vec{N} \end{aligned} \quad (19)$$

两次转动 (微量转动可忽略转序) 形成的矢量增量为:

$$\begin{aligned} \Delta\vec{V} &= (\vec{A}_\phi - \vec{A}_0) + (\vec{A}_\omega - \vec{A}_0) = \\ &= [2\Delta\phi(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})(\vec{N} \times \vec{A}_\phi) + 2\Delta\phi\vec{A}_1 \cdot (\vec{N} \times \vec{A}_\phi)\vec{N}] + \end{aligned}$$

$$[2\Delta\alpha(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})(\vec{N} \times \vec{A}_\alpha) + 2\Delta\alpha\vec{A}_1 \cdot (\vec{N} \times \vec{A}_\alpha)\vec{N}] \quad (20)$$

已知条件中均为单位矢量, 则可以用如下叉乘运算来求取入射光角速度矢量:

$$\vec{\omega} = \vec{A}_0 \times \lim_{\Delta t} \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} \quad (21)$$

展开如下:

$$\vec{\omega} = 2\vec{A}_0 \times \left\{ \lim_{\Delta t} \frac{\Delta \phi}{\Delta t} [(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})(\vec{N} \times \vec{A}_\phi) + \vec{A}_1(\vec{N} \times \vec{A}_\phi)\vec{N}] + \lim_{\Delta t} \frac{\Delta \alpha}{\Delta t} [(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})(\vec{N} \times \vec{A}_\alpha) + \vec{A}_1(\vec{N} \times \vec{A}_\alpha)\vec{N}] \right\} \quad (22)$$

$\lim_{\Delta t} \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$  即为俯仰框架角速度  $\omega_\phi$ ,  $\lim_{\Delta t} \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}$  即为航向框架

角速度  $\omega_\alpha$ , 于是有:

$$\vec{\omega} = 2\vec{A}_0 \times \left\{ \omega_\phi [(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})(\vec{N} \times \vec{A}_\phi) + \vec{A}_1(\vec{N} \times \vec{A}_\phi)\vec{N}] + \omega_\alpha [(\vec{A}_1 \cdot \vec{N})(\vec{N} \times \vec{A}_\alpha) + \vec{A}_1(\vec{N} \times \vec{A}_\alpha)\vec{N}] \right\} \quad (23)$$

定义如下变量, 以简化角速度表达式:

$$\alpha \stackrel{\text{define}}{=} \vec{A}_1 \cdot \vec{N} \quad (24)$$

$$\vec{V}_\phi \stackrel{\text{define}}{=} \vec{N} \times \vec{A}_\phi \quad (25)$$

$$\vec{V}_\alpha \stackrel{\text{define}}{=} \vec{N} \times \vec{A}_\alpha \quad (26)$$

$$b_\phi = \vec{A}_1 \cdot (\vec{N} \times \vec{A}_\phi) = \vec{A}_1 \cdot \vec{V}_\phi \quad (27)$$

$$b_\alpha = \vec{A}_1 \cdot (\vec{N} \times \vec{A}_\alpha) = \vec{A}_1 \cdot \vec{V}_\alpha \quad (28)$$

简化角速度表达式如下:

$$\vec{\omega} = 2\omega_\phi \vec{A}_0 \times (\alpha \vec{V}_\phi + b_\phi \vec{N}) + 2\omega_\alpha \vec{A}_0 \times (\alpha \vec{V}_\alpha + b_\alpha \vec{N}) \quad (29)$$

进一步定义变量:

$$\vec{V}_\phi = 2\vec{A}_0 \times (\alpha \vec{V}_\phi + b_\phi \vec{N}) \quad (30)$$

$$\vec{V}_\alpha = 2\vec{A}_0 \times (\alpha \vec{V}_\alpha + b_\alpha \vec{N}) \quad (31)$$

角速度表达式进一步简化为:

$$\vec{\omega} = \omega_\phi \vec{V}_\phi + \omega_\alpha \vec{V}_\alpha \quad (32)$$

令  $\vec{\omega}$  在视线坐标  $Ox_L y_L z_L$  系下沿  $Oy_L$  轴和  $Oz_L$  轴的分量分别  $\omega_{dyL}$  与沿  $Oy_L$  轴和  $Oz_L$  轴的分量大小相等, 符号相反, 可以解出  $\omega_\alpha$  和  $\omega_\phi$ , 即令:

$$\begin{cases} -\omega_{dyL} = \omega_\phi V_{\phi y} + \omega_\alpha V_{\alpha y} \\ -\omega_{dzL} = \omega_\phi V_{\phi z} + \omega_\alpha V_{\alpha z} \end{cases} \quad (33)$$

从而, 解得:

$$\begin{cases} \omega_\phi = \frac{\omega_{dzL} V_{\alpha y} - \omega_{dyL} V_{\alpha z}}{V_{\phi y} V_{\alpha z} - V_{\phi z} V_{\alpha y}} \\ \omega_\alpha = \frac{\omega_{dyL} V_{\phi z} - \omega_{dzL} V_{\phi y}}{V_{\alpha y} V_{\phi z} - V_{\alpha z} V_{\phi y}} \end{cases} \quad (34)$$

进一步简化, 令:

$$C = V_{\phi y} V_{\alpha z} - V_{\phi z} V_{\alpha y} \quad (35)$$

得到伺服抗载体角运动扰动的框架角速度期望值:

$$\begin{cases} \omega_\phi = (\omega_{dzL} V_{\alpha y} - \omega_{dyL} V_{\alpha z}) / C \\ \omega_\alpha = (\omega_{dyL} V_{\phi z} - \omega_{dzL} V_{\phi y}) / C \end{cases} \quad (36)$$

### 2.3.3 推导结果小节

经过以上推导, 给出了实现本系统半捷联稳定所需要的角速度 ( $\omega_\phi$ 、 $\omega_\alpha$ ) 与载体角速度 ( $\omega_{dx}$ 、 $\omega_{dy}$ 、 $\omega_{dz}$ )、伺服框架角 ( $\alpha$ 、 $\phi$ ) 和框架角速度 ( $\omega_\alpha$ 、 $\omega_\phi$ ) 的关系式 (36), 在略去了高阶分量后, 表达式形式上为一线性表达式, 式中各项系数均可以通过简单的乘加运算得出, 所需步骤也

不多, 移植到 DSP 上进行处理后运行速度和效率均较高, 能够满足工程应用。

### 3 验证与评估

将上述算法实现到实际的机载光电成像系统样机上后, 将系统装夹到五轴转台进行稳定精度测试, 系统工作于半捷联稳定回路闭环状态, 令转台航向、俯仰轴同时施加  $1^\circ$ 、2 Hz 正弦复合扰动, 系统航向、俯仰通道输出的空间角误差如图 4~图 5 所示, 光电成像系统航向、俯仰两通道的稳定精度均在  $0.02^\circ$  以内, 对比相似结构采用陀螺信号反馈的直接稳定控制回路方案, 具有相当的精度。

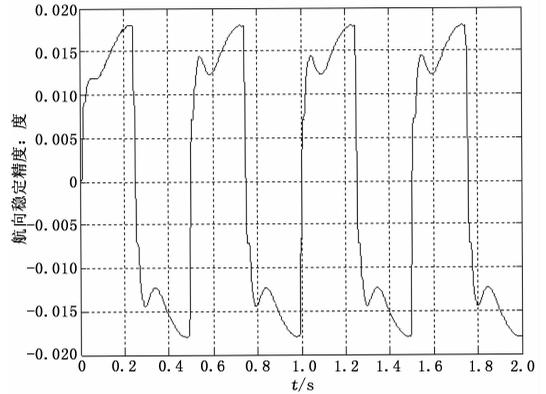


图 4 光电成像系统航向稳定精度测试曲线

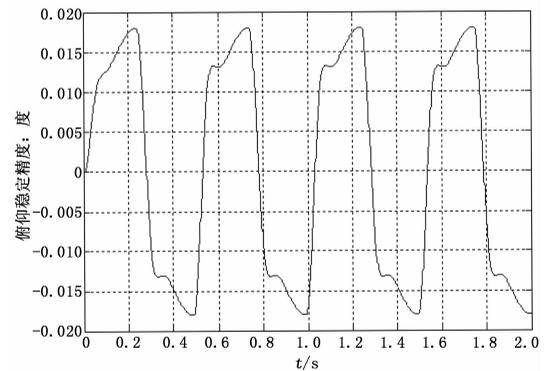


图 5 光电成像系统俯仰稳定精度测试曲线

该测试结果表明, 系统稳定控制回路设计、抗扰算法设计和实现正确, 系统达到了良好的稳定精度。

将系统装夹到振动台进行振动环境适应性测试, 施加图 6 所示随机振动谱, 系统通电工作正常。进一步提高振动量级, 系统出现功耗增大现象, 大小与振动量级呈正相关。经分析, 由于系统与振动台之间通过减振器非刚性连接, 振动台的线运动受系统质心偏离支点影响对系统产生附加的高频、微量角扰动, 被载体三轴陀螺所敏感, 并通过抗扰算法转换为稳定回路的期望角速度, 稳定回路以其为指令控制伺服框架抑制振动台施加的附加角扰动, 但由于光学铰链离轴设计, 控制过程中光轴旋转的角度与伺服框架旋转的角度不等, 在振动过程中电机必须输出力矩以维

(下转第 228 页)