

doi: 10.7690/bgzdh.2021.08.003

## 高精度光电伺服稳定平台控制技术

杨光海<sup>1</sup>, 王宏宇<sup>1</sup>, 周 通<sup>1</sup>, 彭晓乐<sup>1</sup>, 刘培磊<sup>1</sup>, 尚建蓉<sup>2</sup>

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 2. 火箭军装备部驻成都地区第四军事代表室, 成都 610052)

**摘要:** 为提高光电稳定平台的伺服控制性能, 对高精度光电伺服稳定平台控制技术进行探讨。针对伺服稳定平台控制策略, 从 2 轴 2 框架伺服稳定平台、2 轴 4 框架伺服稳定平台、复合轴高精度伺服稳定平台 3 个方面的结构、组成、控制策略进行对比分析, 并对各种伺服稳定平台在 PID 控制策略对相同扰动条件下的隔离基座扰动能力进行仿真计算。仿真结果表明: 采用复合轴高精度伺服稳定平台可大幅提高伺服稳定平台的抗扰动能力, 为从事伺服稳定控制研究人员提供借鉴。

**关键词:** 高精度; 伺服稳定平台; 控制策略; 隔离扰动

**中图分类号:** TP275 **文献标志码:** A

## Control Technology of High-precision Photoelectric Servo Stabilization Platforms

Yang Guanghai<sup>1</sup>, Wang Hongyu<sup>1</sup>, Zhou Tong<sup>1</sup>, Peng Xiaole<sup>1</sup>, Liu Peilei<sup>1</sup>, Shang Jianrong<sup>2</sup>

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China;

2. No. 4 Military Representative Office of Rocket Force Equipment Department in Chengdu District, Chengdu 610052, China)

**Abstract:** In order to improve the servo control performance of photoelectric stabilization platform, testing the control technology of high-precision photoelectric servo stabilization platform. Aiming at the strategy of controlling the servo stabilization platform, compared and analyzed the the structure, composition and control strategy of 2-axis 2-frame servo stabilization platform, 2-axis 4-frame servo stabilization platform and composite axis high-precision servo stabilization platform. Carrying out simulation calculation of the disturbance ability of different servo stabilization platforms under the same disturbance condition with PID control strategy. The results show that the anti-disturbance capability of the servo stability platform can be greatly improved by using the composite shaft high precision servo stability platform, and this study can provide reference for researchers engaged in servo stability control.

**Keywords:** high-precision; servo stabilization platform; control strategies; isolating disturbance

### 0 引言

光电伺服稳定平台在军用、民用光电探测领域得到广泛应用, 主要用于对目标的探测、识别、捕获、跟踪或瞄准等, 而光电稳定平台的伺服控制性能决定着系统目标跟踪/瞄准精度等关键指标, 是一项核心关键技术<sup>[1]</sup>。

光电伺服稳定平台安装有光电探测设备, 一般包括红外成像探测设备、可见光成像探测设备等, 用于对目标区域进行成像, 提供给信息处理单元进行目标的探测、识别、捕获、跟踪或瞄准等图像信息处理。作为光电探测设备的支撑平台, 光电伺服稳定平台的控制性能直接关系到光电伺服稳定平台的作用效果, 特别是影响光电伺服稳定平台的稳定精度指标, 直接关系到光电系统视轴指向的准确性。

常用的伺服稳定平台结构形式有 2 轴 2 框架、2 轴 4 框架和复合轴伺服稳定平台, 笔者针对不同的

伺服稳定平台控制策略进行分析总结。

### 1 2 轴 2 框架伺服稳定平台

2 轴 2 框架伺服稳定平台在光电稳定平台中得到广泛应用, 适用于稳定精度要求不高的场合。2 轴 2 框架伺服稳定平台的机械主体结构包括方位和俯仰 2 个运动轴系, 2 轴系采用 U-O 的框架组合形式。方位、俯仰均采用直流力矩电机直接驱动<sup>[2]</sup>。其结构如图 1 所示。

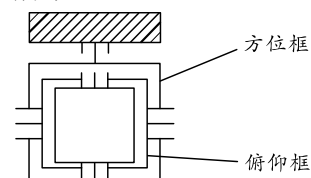


图 1 2 轴 2 框架结构

稳定伺服平台控制电路主要包括伺服控制驱动电路、功放电路、2 轴速率陀螺、测角装置和直流

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-05-20

作者简介: 杨光海(1978—), 男, 贵州人, 高级工程师, 从事伺服控制技术研究。E-mail: 172315161@qq.com。

力矩电机等。伺服控制驱动电路、功放电路、2 轴速率陀螺、直流力矩电机构成速率环回路，使方位、俯仰 2 框架轴保持惯性空间的稳定，从而使固定在 2 框架轴上的光电探测设备保持惯性空间的稳定。

方位、俯仰 2 框架的速率环回路工作状态相同，略去耦合关系和切换控制电路后其原理见图 2。

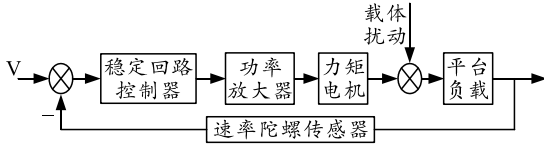


图 2 伺服稳定平台单框架稳定回路原理

方位、俯仰 2 框架的稳定控制方面，一般使用模拟式与数字式 2 种不同的控制方式。其中，数字式控制系统的结构相对简单，且能满足复杂控制的规律，以保证对被控对象进行准确地控制<sup>[3]</sup>。目前，一般用数字信号处理器 DSP 芯片作为控制电路的核心器件进行控制处理，配以高效的控制软件实现对框架速率环回路的实时控制。其工作过程为：在每个控制周期内，上位机输入的给定工作角速度  $v$  与速率陀螺传感器测定的该方向框架上的角速度作差，送给稳定回路控制器，经过控制器软件的控制算法整定，形成控制指令送给功率放大器控制力矩电机转动，从而实现平台负载的转动，进而使平台框架上光电探测设备的视轴保持惯性空间的稳定。

控制器软件的控制算法一般采用经典的 PID 控制算法。PID 控制算法原理简单直观，易于调节，控制作用明显。比例环节是提高系统的开环增益、减小系统稳态误差，从而提高系统的控制精度，但过大的比例会导致系统不稳定；积分环节是用来消除系统稳态误差，系统一旦出现误差，积分调节就起作用，直至消除误差，积分控制相当于增加一个相角滞后控制环节，可使系统稳定性下降，动态响应变慢；微分环节是根据输入信号的变化趋势，产生有效的早期修正信号，以增加系统的阻尼程度，从而改善系统的稳定性。PID 控制算法运算公式为：

$$y_n = k_p \cdot (x_n + k_i \cdot \text{sum}_n + k_d \cdot \text{dif}_n) \quad (1)$$

其中，微分项为：

$$\text{dif}_n = (x_n - x_{n-1}) / \Delta T \quad (2)$$

稳定回路的积分项表达式为：

$$\text{sum}_n = \text{sum}_{n-1} + x_n \cdot \Delta T; \left\{ \begin{array}{l} |y_{n-1}| \leq y_{\text{sat}} \\ |y_{n-1}| > y_{\text{sat}} \end{array} \right\} \quad (3)$$

式中： $x_n$  为回路当前工作周期中的控制误差，指角速度指令与陀螺角速度之差； $x_{n-1}$  为回路前一个工

作周期中的控制误差； $y_n$  为回路当前工作周期的 PID 计算结果； $y_{n-1}$  为回路前一个工作周期中的力矩输出修正结果； $y_{\text{sat}}$  为饱和控制量； $k_p$  为比例校正系数； $k_i$  为积分校正系数； $k_d$  为微分校正系数。 $y_{\text{sat}}$ 、 $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的值分别由工作参数中的方位、俯仰速率环控制量限幅、P 参数、I 参数、D 参数给定。

对 2 框架稳定回路的隔离扰动能力进行仿真分析，加入  $174.533 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ ，3 Hz 的载体扰动信号，得到方位稳定回路的陀螺信号输出和扰动信号对比见图 3 和图 4，计算得到速度隔离度为 3.9%，稳定精度为  $300 \mu\text{rad}$ 。俯仰稳定回路仿真情况和方位框近似。

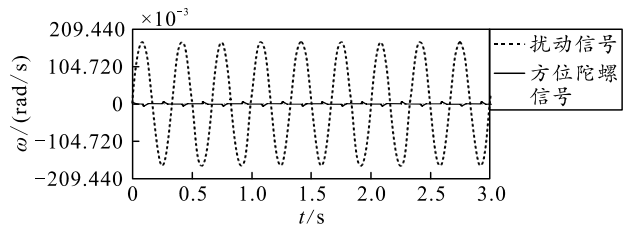


图 3 方位稳定回路陀螺输出信号和扰动信号对比

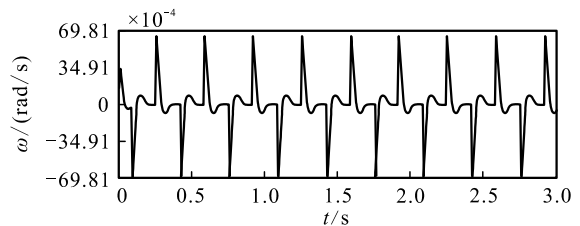


图 4 方位稳定回路陀螺输出信号

## 2 2 轴 4 框架伺服稳定平台

作为无人侦察机的“眼睛”，机载高精度光电稳定平台在无人机系统中是最重要的设备，其挂载在无人机下方的吊舱之中，平台一般都具有球形或半球形构造，具有多轴多框架的结构，其中搭载了可见光、红外、激光等光电精密载荷，并直接将它们与外界环境相阻隔，保障其正常工作<sup>[4]</sup>。

2 轴 4 框架伺服稳定平台由平台内、外框架、导电环、编码器、陀螺仪、力矩电机等组成，能很好地弥补 2 轴 2 框架伺服稳定平台自身的局限性<sup>[4]</sup>。

2 轴 4 框架伺服稳定平台的机械主体结构包括方位和俯仰 2 个运动轴系，2 轴系采用 U-O 的框架组合形式，其结构示意图如图 5 所示。

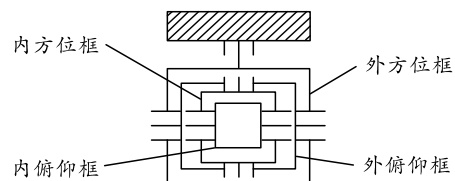


图 5 2 轴 4 框架结构

2 轴 4 框架伺服稳定平台与 2 轴 2 框架伺服稳定平台的速率环控制回路工作状态相同，其工作原理框图均与图 2 相同。外方位框、外俯仰框作为粗稳定回路控制通道进行控制，内方位框、内俯仰框作为精稳定回路控制通道进行控制。外方位框、外俯仰框构成对光电载荷的第 1 级扰动隔离机构，内方位框、内俯仰框构成对光电载荷的第 2 级扰动隔离机构，经过第 1 级扰动隔离机构隔离后，内方位框、内俯仰框所承受的扰动大大降低，进而使内框架上的光电探测设备的视轴稳定性得到提高。

2 轴 4 框架伺服稳定平台的各框架速率环可以进行独立控制，其控制算法可以采用 PID 控制算法，各框架的 PID 控制参数值各不相同，需根据平台具体情况进行控制参数整定，也可以根据产品具体情况采用其他控制算法进行控制。

对 2 轴 4 框架稳定回路的隔离扰动能力进行仿真分析，加入  $174.533 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ ，3 Hz 的载体扰动信号，得到方位稳定回路内框架的陀螺信号输出和外框架惯性空间转动角速度对比见图 6 和图 7，计算得到外框架速度隔离度为 15%，内框架速度隔离度为 0.5%，稳定回路隔离度为 0.5%，稳定精度  $45 \mu\text{rad}$ 。俯仰稳定回路仿真情况和方位框近似。

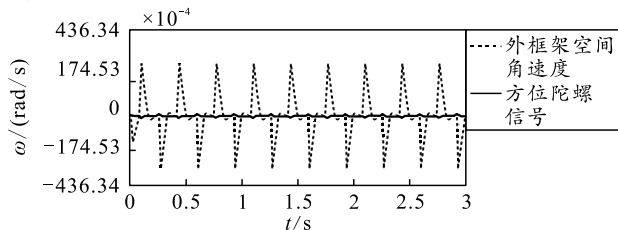


图 6 内框架的陀螺信号输出与外框架惯性空间角速度对比

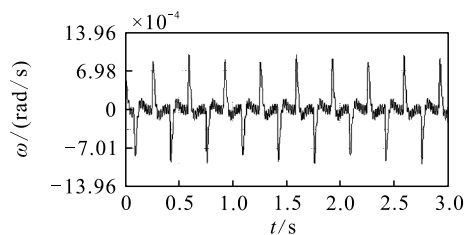


图 7 方位稳定回路内框架的陀螺输出信号

### 3 复合轴高精度伺服稳定平台

在 2 轴 4 框架伺服稳定平台的基础上形成的主动陀螺 4 框架稳定加 2 轴快速反射镜稳定的多轴稳定平台，可以很好地弥补框架机械伺服稳定平台自身的局限性<sup>[4]</sup>。传统的机械稳定称之为 1 级稳定，快速反射镜稳定技术称之为 2 级稳定。不同于传统的机械稳定结构，快速反射镜稳定技术是将快速反

射镜置于成像光路之中，将陀螺机械稳定的残差通过光路进行调整和补偿，由于快速反射镜具有极高的位置精度和带宽，从而能够实现很高的视轴稳定精度<sup>[5]</sup>。

快速反射镜是近几年发展起来的一种用于精密稳定跟踪的技术手段，是一种采用压电陶瓷等驱动元件驱动反射镜面在光源和接收器之间精确控制光束方向的装置。因其谐振频率高、转动惯量小、响应速度快、动态滞后误差小等优点，可达到很高的定位和跟踪精度<sup>[6]</sup>。

2 轴 4 框架伺服稳定平台的机械主体结构包括方位和俯仰 2 个运动轴系，两轴系采用 U-O 的框架组合形式，在其内框架上安装 2 快速反射镜稳定机构。系统结构如图 8 所示。

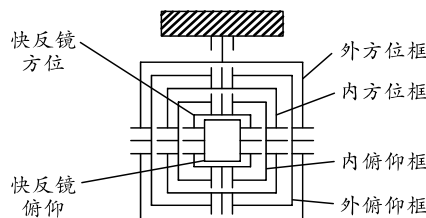


图 8 复合轴高精度伺服稳定平台框架结构

对复合轴稳定回路的隔离扰动能力进行仿真分析，加入  $174.533 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ ，3 Hz 的载体扰动信号，得到方位稳定回路内框架的陀螺信号输出和快反镜方位惯性空间视线角速度对比见图 9 和图 10，计算得到内框速度隔离度为 1%，快反镜速度隔离度为 0.1%，稳定回路隔离度为 0.1%，稳定精度  $3 \mu\text{rad}$ 。俯仰稳定回路仿真情况和方位框近似。

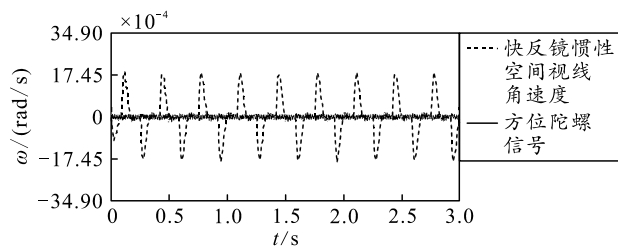


图 9 内框架的陀螺信号与快反镜惯性空间视线角速度对比

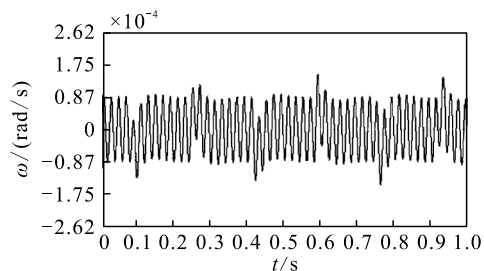


图 10 扰动条件下快反镜惯性空间视线角速度输出信号