

# 动基座光电平台视轴自稳定控制系统设计\*

张玉良 耿天文 刘永凯

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

**摘要:** 为了消除基座晃动对光电平台稳定跟踪目标的影响,分析了动基座扰动抑制的原理,建立了动基座光电平台视轴稳定的控制系统模型。该系统模型通过组合惯导平台测得动基座摇摆的姿态数据,利用坐标转换公式计算出修正动基座扰动所需的光电平台速度顺馈数据,再将此速度顺馈数据送到光电平台速度回路参与动基座扰动抑制运算,实现光电平台在动基座扰动下的视轴稳定跟踪。经过某型号动基座光电平台的实际验证,设计的动基座光电平台视轴稳定系统在5级海况下可以做到电视跟踪下船摇隔离度大于59 dB,单杆手动跟踪模式下船摇隔离度大于25 dB。实验结果表明:设计的动基座光电平台视轴稳定系统有效地抑制了基座扰动对光电平台稳定跟踪目标的影响,提高了光电平台在基座晃动下的跟踪精度。

**关键词:** 光电平台;视轴自稳定;控制系统;动基座

**中图分类号:** TP202 TN820 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Optical axis self-stabilization control system's design for moving base optical-electrical table

Zhang Yuliang Geng Tianwen Liu Yongkai

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to restrain the interference of moving base to the optical-electrical table stably tracking object, the paper analyzes the theory of restraining the interference of moving base, finds the control system stabilization model of optical-electrical table's axis of sight. The control system stabilization model gets the pose data by the combined inertial navigation system, gets the angular velocity of the moving base by the formula of coordinate transformation. Then we can realize the stably tracking object of the moving base optical-electrical table by the control system stabilization model. The optical axis self-stabilization control system in the paper, has been used in some kind of equipment. In the five sea state, we can realize 59 dB isolation accuracy when the control model is video tracking, realize 25 dB isolation accuracy when the control model is single bar manual tracking. The experiment proves that the control system stabilization model in this paper availably restrain the interference of moving base and the tracking precision have been greatly improved.

**Keywords:** optical-electrical table; optical axis self-stabilization; control system; moving base

### 1 引言

现阶段,大多数光电平台都是在固定基座上实现光电跟踪、测量工作,因此不存在底部基座晃动对光电平台视轴稳定跟踪目标产生扰动的问题。但随着海上测量和空中监测的发展,很多测量船、飞机和空间载体上已经配备了光电跟踪瞄准设备作为跟踪测量手段,因此基座晃动对动基座光电平台视轴稳定跟踪的影响已成为必须要解决的一个严重问题。

国外的车载光电测量平台一般都采用了动基座扰动

抑制技术,由于其光电平台的结构不同所以实现的视轴稳定精度一般也差别较大。国内远望号测量船等的光电测量平台可以做到视轴稳定隔离度40~45 dB,处于目前国内行业领先水平。

基座晃动对动基座光电平台视轴稳定跟踪的影响主要有以下3点:

1) 动基座光电平台视场比较小,一般在 $1^\circ$ 左右,而基座晃动的幅度一般都在几度,若不能很好地克服基座晃动对视轴稳定的影响,会很难成功捕获目标。特别是在手动跟踪模式下,基座晃动引起的视轴晃动会使得操作手很难

收稿日期:2015-06

\* 基金项目:中国科学院三期创新工程和长春光机所内创新工程(Y10532B110)项目

捕获和稳定的跟踪目标。

2) 由于基座晃动扰动的存在, 会给动基座光电平台跟踪目标带来扰动噪声, 从而使动基座光电平台跟踪目标的精度变低。

3) 光电跟踪平台一般具有测量的功能, 如果不能降低光电平台跟踪目标的抖动, 会使光电平台电视成像质量下降, 从而影响光电平台的测量和判读精度。

针对上述问题, 本文分析了基座晃动对动基座光电平台视轴稳定的影响, 通过微型组合惯导平台测量基座晃动的姿态数据, 并建立动基座光电平台视轴稳定模型, 提高了动基座光电平台的目标跟踪精度<sup>[1-5]</sup>。

## 2 系统模型建立

传统固定基座光电平台一般都采用位置回路闭环和速度回路闭环的双回路控制结构。而对于动基座光电平台, 由于其基座的晃动引入了视轴扰动, 所以为了实现其空间视轴指向的稳定, 必须消除基座晃动对视轴稳定产生的影响<sup>[6-12]</sup>。

基座晃动对光电平台视轴指向的产生的影响直接作用在视轴指向位置上, 为了消除视轴指向扰动输出, 采用扰动抑制控制模型实现视轴稳定, 其原理结构如图1所示。

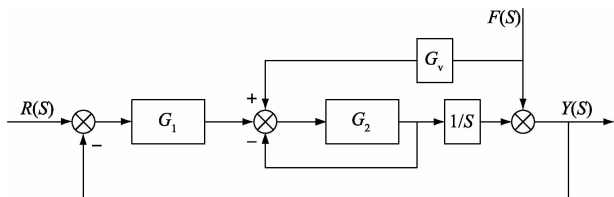


图1 视轴稳定原理

图1模型中,  $G_1$  为位置回路控制器, 可以设计为  $G_1 = \frac{1}{100} \frac{(0.45s + 1)^2}{(4.5s + 1)^2}$ ,  $G_2$  为速度回路控制器加电机负载模型, 一般设计成:  $G_2 = \frac{4}{1.5} \frac{260(0.09s + 1)(0.01s + 1)}{(0.003s + 1)}$ , 其中  $\frac{4}{1.5} \frac{260(0.09s + 1)(0.01s + 1)}{(0.003s + 1)}$  是速度回路控制器模型,  $\frac{0.266}{(0.8s + 1)(0.01s + 1)}$  是电机负载模型。

当  $R(S)$  为 0 时, 动基座扰动输入  $F(S)$  与光电平台输出  $Y(S)$  之间的关系如式(1)所示:

$$F(S) \left[ G_v \frac{G_2}{1 + G_2} \frac{1}{S} + 1 \right] = Y(S) \left[ 1 + G_1 \frac{G_2}{1 + G_2} \frac{1}{S} \right] \quad (1)$$

为了使在有动基座扰动输入  $F(S)$  情况下光电平台视轴无变化, 即  $Y(S)$  等于 0, 需要:

$$G_v \frac{G_2}{1 + G_2} \frac{1}{S} + 1 = 0 \quad (2)$$

由于光电平台速度环带宽设计的比较宽, 一般速度环带宽大于 100 rad/s, 所以  $\frac{G_2}{1 + G_2} \approx 1$ , 因此可以设计成  $G_v = -S$ 。所以只需要将基座的扰动速度取反反馈到光电平台的速度回路即可抑制基座扰动对光电平台视轴稳定跟踪的影响。

这样设计的动基座扰动控制模型在理论上可以近似完全消除基座扰动对光电平台视轴稳定的影响, 但需要对基座扰动输入  $F(S)$  进行准确测量。

## 3 光电平台动基座姿态测量模型

为了获得动基座扰动输入  $F(S)$  的准确数据, 本文采用小型组合惯导平台对基座姿态进行测量, 其对基座姿态的测量精度可以达到 30", 图2是组合惯导安装实物图。



图2 组合惯导实物

组合惯导平台对基座姿态的测量采用的是大地坐标系, 即惯导平台测得的动机座横滚、航向和俯仰姿态数据都是采用大地坐标系的。而如果光电平台安装于船的甲板上, 那么光电平台的位置测量数据是相对于船的甲板的, 即采用甲板坐标系。因此组合惯导平台测得的基座姿态数据需要进行坐标转换, 最终转换成光电平台使用的甲板坐标系数据, 这样光电平台才能用转换后的姿态数据去抑制基座扰动对光电平台视轴稳定的影响。

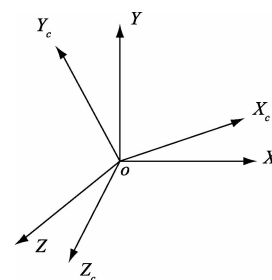


图3 大地坐标系与甲板坐标系

图3中,  $(X, Y, Z)$  是大地坐标系直角坐标,  $(X_c, Y_c, Z_c)$  是甲板坐标系直角坐标。大地坐标系中直角坐标  $(X, Y, Z)$  到甲板坐标系直角坐标  $(X_c, Y_c, Z_c)$  的坐标转换公式

如公式(3)所示:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & \sin R \\ 0 & -\sin R & \cos R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P & \sin P & 0 \\ -\sin P & \cos P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos H & 0 & \sin H \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin H & 0 & \cos H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $R$ 、 $P$ 、 $H$  分别为组合惯导测得的船摇横滚角、纵摇角、航向角。将甲板坐标系直角坐标( $X_c$ ,  $Y_c$ ,  $Z_c$ ) 转换为

甲板极坐标系,可以计算出大地坐标系下船摇扰动转换到甲板坐标系下的光电平台视轴扰动角度:

$$\begin{cases} A_c = \tan^{-1}\{[\cos E[\cos R \sin(A-H) + \sin R \sin P \cos(A-H)] - \sin E \sin R \cos P] / [\cos E \cos P \cos(A-H) + \sin E \sin P]\} \\ E_c = \sin^{-1}\{\cos E[\sin R \sin(A-H) - \cos R \sin P \cos(A-H)] + \sin E \cos R \cos P\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $A_c$  是甲板坐标系下方位船摇扰动角度; $E_c$  是甲板坐标系下俯仰船摇扰动角度; $A$  为光电平台方位编码器的角位置实测值; $E$  为光电平台俯仰编码器的角位置

实测值。

惯性极坐标系下船摇扰动速度到甲板极坐标系下船摇扰动速度的转换公式:

$$\begin{cases} E_{cv} = -(\omega_P \cos R + \omega_H \cos P \sin R) \cos A_c + (\omega_R - \omega_H \sin P) \sin A_c \\ A_{cv} = \omega_P \sin R - \omega_H \cos P \cos R - \tan E_c [(\omega_R - \omega_H \sin P) \cos A_c + (\omega_P \cos R + \omega_H \cos P \sin R) \sin A_c] \end{cases} \quad (5)$$

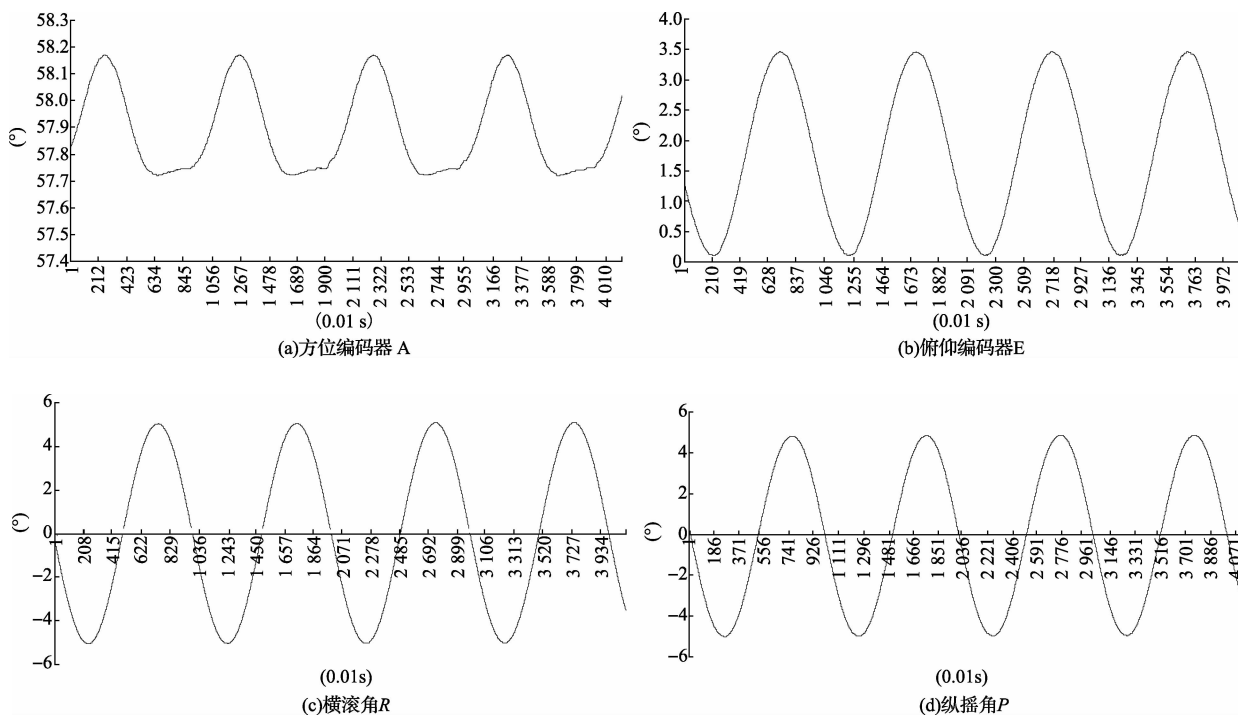
式中: $A_{cv}$  是甲板坐标系下方位船摇扰动角速度; $E_{cv}$  是甲板坐标系下俯仰船摇扰动角速度; $\omega_R$  为微型组合惯导平台测得的大地坐标系下船摇横滚角速度值; $\omega_P$  为微型组合惯导平台测得的大地坐标系下船摇纵摇角速度值。

这样通过式(5) 计算出船摇对光电平台产生的甲板极坐标系下的扰动速度,并将其取反回馈到光电平台的速度回路,就可以实现舰载光电平台下的视轴稳定跟踪。此原理同样使用机载、星载和球载等动基座光电平台的视轴稳定跟踪。

#### 4 姿态测量数据和视轴稳定精度

本文设计的动基座光电平台控制系统在某型号舰载动基座光电设备得到了充分验证,将光电平台放在两轴摇摆台上,将方位轴和俯仰轴摇摆信号均设定为  $\theta(t) = 5^\circ \sin(0.6t)$  来等效模拟 5 级海况下的基座晃动信号。

舰载光电平台由于船摇晃动引起的基座扰动姿态测量数据和光电平台编码器数据如图 4 所示。



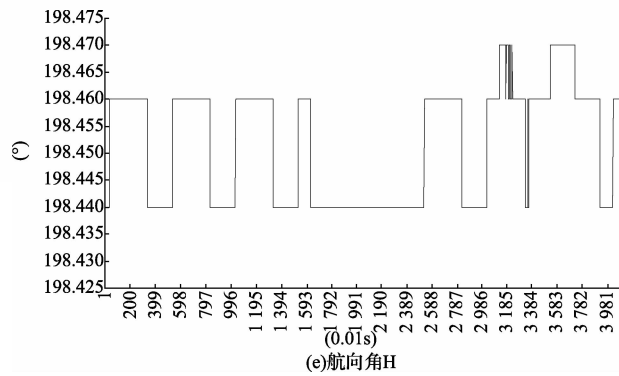


图4 基座扰动姿态测量数据和光电平台编码器数据曲线

经过坐标转换后得到的光电平台扰动抑制位置和扰动速度反馈数据如图5所示。

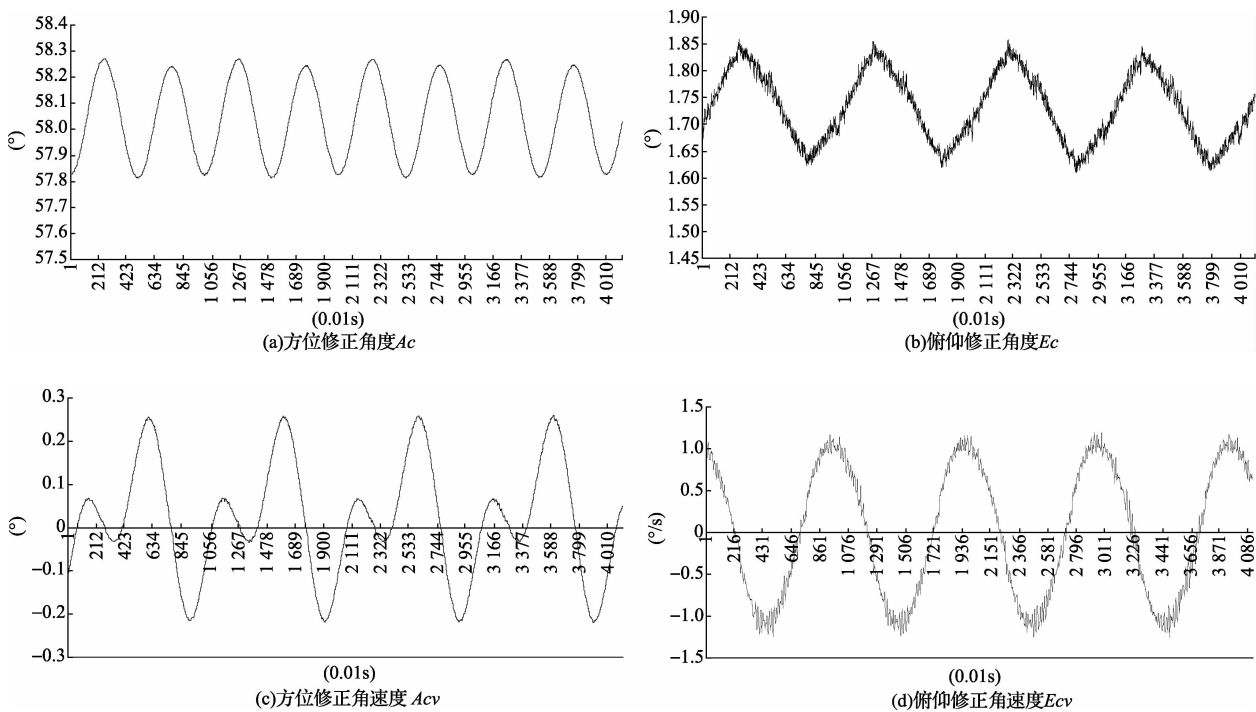


图5 系统软件流程

按照本文设计的系统控制模型将扰动速度数据反馈到系统速度回路,通过电视位置跟踪误差检测相机测得系

统的跟踪精度数据如图6所示。从图中可以看出,方位轴跟踪精度优于 $10''$ ,俯仰轴跟踪精度优于 $20''$ 。

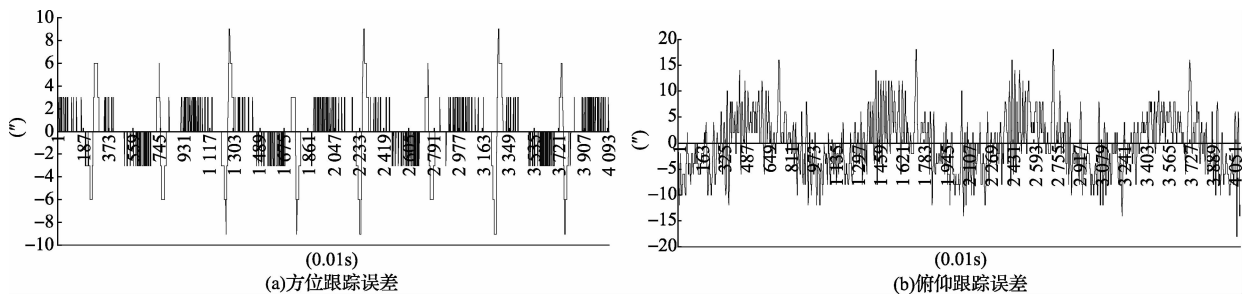


图6 动基座视轴稳定跟踪精度数据曲线

通过隔离度计算公式:  $d = 20\log \frac{in}{error}$  可以计算出动基座光电平台视轴稳定控制系统的方位轴隔离度  $20\log \frac{5 \times 3\ 600}{10} = 65$  dB, 俯仰轴隔离度  $20\log \frac{5 \times 3\ 600}{20} = 59$  dB。

通过实验数据可以看出,设计的动基座光电平台视轴自稳定控制系统,在基座扰动隔离能力上取得了优异的效果,相对远望号测量船上的一些动基座测量光电平台,设计的动基座光电平台视轴自稳定控制系统在扰动抑制能力上更强,扰动抑制隔离度提高了 20 dB 左右。

## 5 结 论

设计了基于扰动抑制原理的动基座光电平台视轴自稳定系统,该系统采用组合惯导平台进行动基座姿态测量,建立了视轴自稳定控制模型,给出了坐标转换计算公式。设计的这种动基座光电平台视轴自稳定控制系统在多个设备上得到了应用和验证,结果表明系统设计良好,改善了光电平台的目标跟踪精度。

### 参 考 文 献

- [1] LI Q G, HAN Q SH, PENG B Y, et al. The re-search of contour error compensation control for X-C non-circular grinding in polar coordinates[J]. Instrumentation, 2014, 1(1): 29-37.
- [2] 杨黎都, 肖本龙, 张程, 等. 三轴仿真转台动态性能对仿真实验影响分析[J]. 电子测量技术, 2013, 34(12): 28-31.
- [3] 杜璧秀, 米阳, 张淑梅. 变结构控制在转台高精度系统中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9): 68-71.
- [4] 王卓, 陈红丽, 王芳, 等. 基于模型预测的动力定位控制系统体系结构及仿真[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1279-1284.
- [5] 盖竹秋, 戴明, 程志峰, 等. 经纬仪角度测量系统的实时侦测[J]. 仪器仪表学报, 2013, 27(12): 1200-1205.
- [6] 陈建, 凌振宝, 陈鹏飞, 等. 近红外光谱仪数据采集系统的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(1): 72-77.
- [7] 葛兵, 高慧斌, 余毅. 光电着舰引导系统的视轴稳定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1577-1583.
- [8] 谢婷婷, 杨忠, 郑志忠. 基于加速度滞后补偿的转台控制系统应用[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2): 81-86.
- [9] 王平, 刘家燕, 李永刚, 等. 机载光电平台外框架结构优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 84-91.
- [10] 张大为, 刘铁, 毕涛, 等. 一种基于转台电机的伺服控制系统的设计与仿真[J]. 自动化与仪器仪表, 2014, 175(5): 150-151.
- [11] 张涛, 王印松, 田靖雨. 基于 MATLAB/GUI 的控制系统性能评价研究[J]. 仪器仪表用户, 2015, 22(1): 16-17.
- [12] 任春华, 李兵, 赵幸子, 等. 全姿态光纤陀螺井眼轨迹连续测量仪研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2703-2708.

### 作 者 简 介

张玉良, 硕士研究生, 助理研究员, 2007 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 主要研究方向为电测控设备伺服控制系统设计。

E-mail: zyl2154667@163.com