

文章编号 1004-924X(2017)11-2889-06

## 应用新轴系结构改善光电跟踪系统谐振频率特性

杨立保<sup>1,2</sup>, 李艳红<sup>1</sup>, 伞晓刚<sup>2</sup>, 王 晶<sup>2</sup>, 史国权<sup>1\*</sup>

- (1. 长春理工大学, 吉林 长春 130012;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**对典型的光电跟踪系统进行结构分析,提出了改善机械结构谐振频率的方法,以便提高光电跟踪系统的跟踪速度。研究了典型跟踪架的垂直轴系的结构,认为单向止推轴系沿轴向的窜动限制了扭转刚度。提出了以双向止推密珠轴系结合定心轴系的结构形式设计垂直轴系,从而有效地提高了系统的刚度,改善了系统的机械谐振频率。对改进后的跟踪架进行了模态仿真分析,并通过振动及扫频试验获得了光电跟踪系统谐振频率特性曲线。实验结果表明,系统谐振频率达到 114 Hz,为伺服系统实现高速跟踪时的稳定性和快速性提供了硬件基础。在舰面跟踪高速起降目标的试验中,该系统最大跟踪速度达到 150(°)/s 以上,加速度大于 240(°)/s<sup>2</sup>,显示其光电跟踪能力显著提升。

**关键词:**光电跟踪系统;跟踪速度;机械谐振频率;双向止推轴系

**中图分类号:**V556 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172511.2889

### Improvement of resonant frequency characteristics of photoelectric tracking system with new bearing structure

YANG Li-bao<sup>1,2</sup>, LI Yan-hong<sup>1</sup>, SAN Xiao-gang<sup>2</sup>, WANG Jing<sup>2</sup>, SHI Guo-quan<sup>1\*</sup>

- (1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;
  2. Changchun Institute of Optics, Fine mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
- \* Corresponding author, E-mail: sgq@cust.edu.cn

**Abstract:** The structure of a typical photoelectric tracking system was analyzed and a method to improve the resonant frequency of mechanical structure was proposed to improve the tracking speed of the photoelectric tracking system. The structure of the vertical bearing of a typical tracking frame was researched, and it pointed out that the torsional stiffness of the system was limited by the movement of a one-way thrust bearing along axial direction. Then, a structure of double thrust bearing combined with centering bearing was proposed to design of the vertical axis. By which the system stiffness was enhanced and the resonant frequency of mechanical structure was improved. A modal simulation on the improved tracking gimbal was analyzed, the resonance frequency curve of photoelectric tracking system was obtained through the experiments of vibration and sweep frequency. The results show that the resonant frequency of the system is up to 114 Hz, which provides a hardware support for the stability and higher speed of servo system. In the actual task, the maximum tracking speed and the acceleration of the system is above 150 (°)/s and greater than 240 (°)/s<sup>2</sup>, respectively, improving the tracking ability of the photoelectric tracking system significantly.

**Key words:** photoelectric tracking system; speed of tracking; mechanical resonant frequency; structure of double thrust bearing

收稿日期:2017-07-03;修订日期:2017-08-15.

基金项目:国防科技预研基金资助项目(No. 1040603)

### 1 引言

光电跟踪系统是靶场光电测量的主要设备,可用于导弹、卫星等飞行目标的测控任务。如近距离测量出膛的炮弹、近距离测量舰载机的飞行轨迹等。这些任务对光电跟踪系统的跟踪速度提出了更高的要求,因此如何提高跟踪速度一直是科研人员研究的问题。

光电跟踪系统机械结构的频率特性是伺服系统设计的基础。当需要设计响应速度快和跟踪精度高的光电跟踪系统时,必须加强机械结构刚度的设计,以期获得较高的谐振频率。如果系统产生谐振,将会引发控制系统的控制量震荡,从而降低跟踪精度甚至丢失目标。伺服系统受跟踪架结构刚度、轴系摩擦力不均、质量配平不稳、风阻以及基座运动的影响较大,只有在结构刚度好,谐振频率高的系统中,才可能实现高速稳定地跟踪目标<sup>[1-5]</sup>。

本文针对典型的光电跟踪系统的结构进行分析,提出改善机械结构谐振频率的方法,优化结构设计,设计双向止推密珠轴系组合定心轴系的结构形式。这种结构形式有效地提高了系统的刚度,从而提高了系统的机械谐振频率,为稳定高速跟踪目标提供了硬件基础。

### 2 伺服机械结构优化设计

#### 2.1 典型跟踪架的垂直轴系的结构

对于高速跟踪需求的光电跟踪系统而言,需要其结构具有较高的扭转谐振频率<sup>[6-9]</sup>。据此可知,为了实现高速跟踪能力,在结构设计中需要提高扭转谐振频率<sup>[10]</sup>。本文从典型垂直轴系的结构展开设计,其垂直轴系原理图如图 1 所示。

这种结构的显著特点是回转精度高且承载能力强<sup>[11-14]</sup>。对于单向止推的垂直轴系,为了保证运输时的轴系安全,需要将止推轴系的上下轴承环分离,也就是用承载圈结构托起轴承上环。因此将轴承上环设计成可以沿定心轴系的轴线向上窜动的形式,一般窜动量为 0.5 mm。但是当光电跟踪系统的搭载平台是活动状态的,比如车载或船载时,由于地面的凹凸不平或海浪的作用使得单向止推轴系的上环有向上的窜动的趋势。从而破坏轴系的扭转刚度,这对于动基座有高速跟踪需求的光电跟踪系统而言尤其重要。因此该结构形式的跟踪架扭转谐振频率不够高。

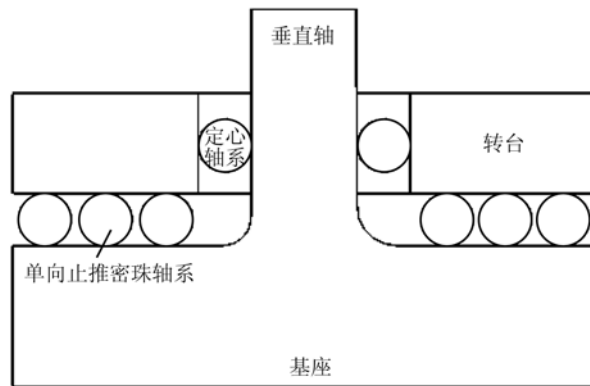


图 1 典型垂直轴系原理图

Fig. 1 Schematic diagram of typical vertical bearinging

#### 2.2 双向止推组合定心轴系结构

通过针对上述典型结构的分析,提出以双向止推密珠轴系的结构设计垂直轴系,其目的在于将转动轴承环限定在了平放的 U 形固定轴承环的滑道内,限定沿垂直轴线向上的窜动,从而提高扭转谐振频率。如图 2 所示。

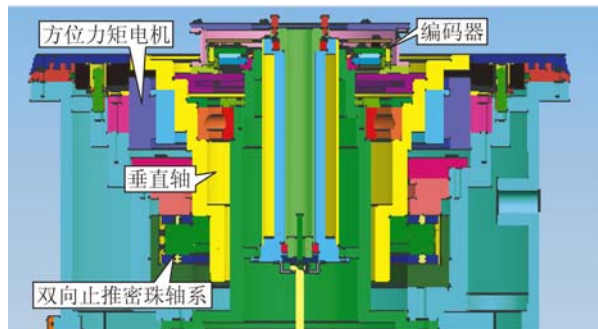


图 2 垂直轴系剖视图

Fig. 2 Section view of vertical bearinging

双向止推密珠轴系部分原理如图 3 所示。

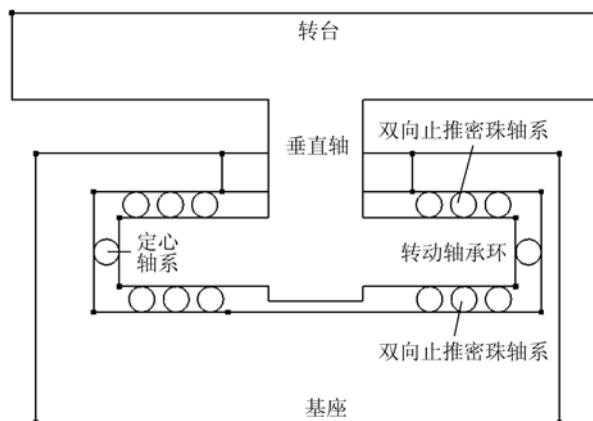


图 3 双向止推密珠轴系结构

Fig. 3 Bi-directional thrust bearing structure

垂直轴下部连接转动轴承环,上部连接转台。双轴向止推密珠轴系结合定心轴系的结构原理即是:力矩电机带动转动轴承环在双向止推密珠轴系的 U 形封闭滑道内转动。该封闭滑道在轴向和径向两个方向均限制了位移,即限定转动部分相对滑道的轴向窜动也限制了径向的平动,提高了刚度和谐振频率。

### 3 模态仿真分析

根据上述结构设计,优化了跟踪架的结构,对其进行模态仿真分析。

有限元模型如图 4 所示:网格划分,单元数为 291 336,节点数为 505 518,四面体二次元。跟踪架的材料性能如表 1 所示:

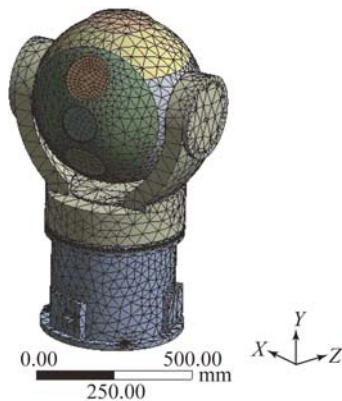


图 4 有限元网络模型  
Fig. 4 Finite element model

表 1 跟踪架的材料

Tab. 1 Material of improved tracking gimbal

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 $\mu$	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
铝 2A12 Aluminum_2014	73.11	0.330	2 994
铸铝 ZL24(S) Aluminum_6061	68.980	0.33	2 711
钢 40Cr 45 steel	206.94	0.288	7 829
轴承钢 steel-Rolled	206.00	0.300	7 850

仿真结果如表 2 所示:

表 2 仿真结果  
Tab. 2 Simulation results

模态阶次	振型图	谐振频率	振型
1		98.472	X 方向晃动
2		116.80	Z 方向晃动
3		319.82	Y 轴扭转
4		398.63	Y 方向晃动
5		463.74	X 轴扭转
6		492.28	Z 轴扭转

### 4 振动及伺服扫频试验

进行振动试验,试验现场如图 4 所示;如图所示,将光电跟踪系统安装在 V964 振动台上进行振动试验。



图 4 光电跟踪系统振动试验

Fig. 4 Vibration test of photoelectric tracking system

采用伺服扫频试验模拟真实情况下的跟踪架运转,得到的基频是工作时的基频,对其试验数据更有意义。输入的激励信号为如图 5 所示的正弦波;

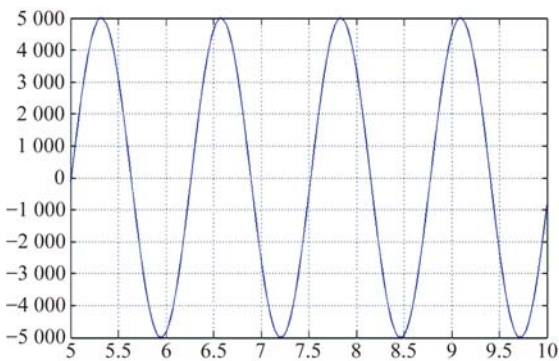


图 5 输入的正弦波信号

Fig. 5 Input sine wave signal

采用频率特性法来观察跟踪架是否存在谐振点,通过向垂直轴力矩电机输入一个频率逐渐变大的正弦激励,记录编码器响应,即编码器代表当前位置的码值。经数据处理,得出频率和幅值的关系曲线如图 6 所示。关于谐振点的判断标准,

为了避免产生大的测量误差,超过 3 dB 就可以判断产生了谐振。由图中曲线和数据可知跟踪架在 720 rad/s(约 114 Hz)附近存在谐振点。认为扫频试验的谐振点与模态分析的一阶谐振 98.472 Hz 对应,两者之间的偏差跟据分析判断来自于头部负载的变化引起转动惯量变化产生的。这个量级的差异在工程实践中被认为是可以接受的。

从试验结果看,新轴系结构的跟踪架谐振频率点很高,说明跟踪刚度很好。

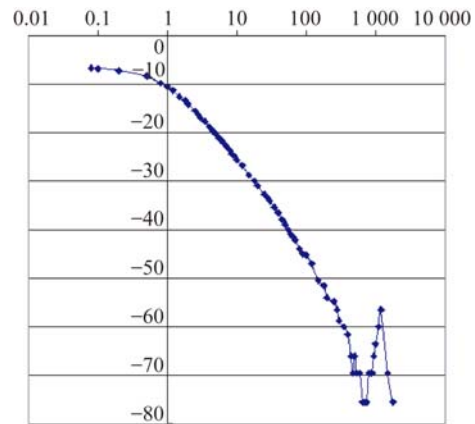


图 6 垂直轴系的谐振频率特性曲线

Fig. 6 Frequency characteristic of orientation

以上数据为扫频实验获得的机械谐振频率,该系统通过在舰面跟踪高速起降目标的试验,证明其结构刚度满足高速跟踪能力的需要,数据如图 7 所示;纵坐标分别是角度(°)、速度(°/s)、加速度(°/s<sup>2</sup>),横坐标为时间单位是 0.01 s。

由图 7 可知,其跟踪速度达到 150(°)/s 以上,加速度大于 240(°)/s<sup>2</sup>。

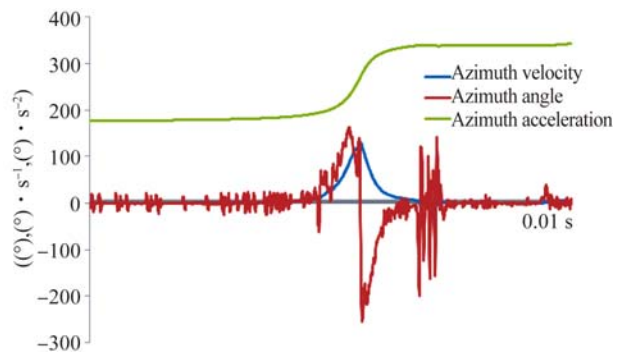


图 7 跟踪能力的数据

Fig. 7 Tracking data

## 5 结 论

通过仿真分析和试验获得了提高光电跟踪系统机械谐振频率的方法。对结构进行了优化设计,提出了双向止推密珠轴系结合定心轴系的结

构形式,有效地提高了系统的刚度,从而提高了系统的机械谐振频率。经过扫频测试,其谐振频率达到 114 Hz。为伺服系统实现高速跟踪时的稳定性和快速性提供了硬件基础。使光电跟踪系统的跟踪速度达到跟踪速度  $150 (^{\circ})/s$  以上,加速度大于  $240 (^{\circ})/s^2$ ,显著提高了跟踪能力。

### 参考文献:

- [1] 彭树萍, 李博, 姜润强, 等. 光电跟踪系统的双模控制[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2):335-342.  
PENG SH P, L B, JIANG R Q, *et al.*. Dual mode control for electro-optical tracking systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 335-342. (in Chinese)
- [2] 廖洪波, 范世琦, 黑墨, 等. 光电稳定平台伺服系统动力学建模与参数辨识[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2):477-484.  
LIAO H B, FAN SH X, HEI M, *et al.*. Modeling and parameter identification for electro-optical stabilized platform servo systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2):477-484. (in Chinese)
- [3] 高云国, 王超, 江展洪, 等. 光电跟踪设备载车平台的重复定位精度[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5):1322-1330.  
GAO Y G, WANG CH, JIANG ZH H, *et al.*. Re-orientation accuracy of vehicle-born photoelectric tracking equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1322-1330. (in Chinese)
- [4] 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.  
GE B, GAO H B, YU Y. LOS stabilization of optic-electro landing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1577-1583. (in Chinese)
- [5] 王建立, 陈涛, 陈娟, 等. 提高光电经纬仪跟踪快速运动目标能力的一种方法[J]. 光电工程, 2002, 29(1):34-37.  
WANG J L, CHEN T, CHEN J, *et al.*. A method for improving the tracking ability of a photoelectric-theodolite against the fast moving targets [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(1): 34-37. (in Chinese)
- [6] 吴晗平, 易新建, 杨坤涛. 机械结构因素对光电跟踪伺服系统性能的影响[J]. 应用光学, 2004, 25(3):11-14.  
WU H P, YI X J, YANG K T. Mechanism structure factors on performance of opto-electronic tracker servo systems [J]. *Journal of Applied Optics*, 2004, 25(3):11-14. (in Chinese)
- [7] 孔德杰, 戴明, 程志峰, 等. 动基座光电稳定平台伺服系统中加速度反馈的实现[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8):1782-1788.  
KONG D J, DAI M, CHENG ZH F, *et al.*. Realization of acceleration feedback for servo system of moving base optoelectronic platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8):1782-1788. (in Chinese)
- [8] 陶波. 雷达伺服系统结构谐振频率的测量[J]. 现代雷达, 2011, 33(1):63-66.  
TAO B. Measure for structural resonance frequency of radar servo system [J]. *Modern Radar*, 2011, 33(1):63-66. (in Chinese)
- [9] 李焱, 曹立华, 王弟男. 惯导平台下舰载光电搜索跟踪系统的控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5):1126-1133.  
LI Y, CAO L H, WANG D N. Controlling of shipborne optoelectronic searching and tracking system based on inertial navigation platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5):1126-1133. (in Chinese)
- [10] 王智, 郭万存. 空间臂式补偿机构轴承预紧力与系统刚度关系分析[J]. 中国光学, 2014, 7(6):989-995.  
WANG ZH, GUO W C. Analysis on the relationship between bearing preload of spatial arm compensation mechanism and system stiffness [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2014, 7(6):989-995. (in Chinese)
- [11] 杨立保, 王晶, 史国权. 米级口径跟踪架的设计与模态分析[J]. 光电工程, 2015, 42(6):45-49.  
YANG L B, WANG J, SHI G Q. Design and model analysis on tracking frame of meter class aperture [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(1):45-49. (in Chinese)
- [12] 王晶. 中型光电经纬仪垂直轴系的可靠性设计[J]. 光学精密工程, 1997, 5(4):64-69.  
WANG J. Reliability design for vertical shafting of

- medium-sized opto-electronic theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(4):64-69. (in Chinese)
- [13] 苏芬平, 李东杰, 修宏明, 等. 高准确度稳定平台的分析与设计[J]. *宇航计测技术*, 2012, 32(4):33-37.
- SU F P, LI D J, XIU H M, *et al.*. The analysis and design of high-accuracy stable platform [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2012, 32(4):33-37. (in Chinese)
- [14] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. *中国光学*, 2012, 5(4):327-336.
- ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4):327-336. (in Chinese)

**作者简介:**

杨立保(1972—),男,河北唐山人,副研究员,硕士生导师,2005年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光学仪器总体设计方面的研究以及空间光学载荷在轨维护技术研究。E-mail: yanglibao228@163.com

**导师简介:**

史国权(1965—),男,吉林舒兰人,博士,教授,博士生导师,1996年于吉林大学获得博士学位,主要从事精密、超精密加工技术及装备。E-mail: sgq@cust.edu.cn