

稳定平台轴系精度对视轴指向误差的影响分析

王 涛^{1,2}, 朱明超¹, 阎胜利¹, 贾宏光¹, 孙 高^{1,2}

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033 ;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 为提高双框架稳定跟踪平台的控制精度, 需要对机械误差造成的视线角误差进行严格的控制, 要求设计轴系在现有加工水平和轴承精度水平的基础上保证高的回转精度。轴承孔的同轴度、轴承跳动、结构挠度等是影响轴系回转精度的主要因素, 文中对这些因素造成的轴系回转误差进行了分析与综合, 并针对某样机进行定量的分析, 得到了轴系的运动误差, 计算了由此造成的视轴指向误差。通过分析计算, 轴系误差造成的视轴指向误差满足设计指标的要求, 从而验证了结构设计的可行性和合理性。

关键词: 稳定跟踪平台; 轴系误差; 视轴指向误差

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2011)11-2265-05

Analysis of LOS pointing error derived from precision of shafting in stabilization mechanism

Wang Tao^{1,2}, Zhu Mingchao¹, Yin Shengli¹, Jia Hongguang¹, Sun Gao^{1,2}

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve the control accuracy of double framework stabilization tracking platform, the view angle error of this device caused by mechanical error should be strictly controlled, high rotation accuracy of shafting should be guaranteed on the basis of the current level of processing accuracy and shaft bearing accuracy. The coaxial tolerance of bearing bore, run-out of assembled bearing, and structure deflection are the main effect factors of shaft rotation accuracy. In this paper, shaft rotary errors caused by these factors were analyzed and synthesized. The motion errors of shafting were gained through quantitative calculation of a prototype, and the pointing errors caused by errors of shafting were calculated. Through the calculation of pointing errors of sight, the errors caused by shafting errors could satisfy the requirements of design index, and the feasibility and rationality of structure design were verified.

Key words: stabilization tracking platform; errors of shafting; pointing errors of sight

收稿日期: 2011-03-22; 修订日期: 2011-04-19

基金项目: 中国科学院“三期创新”平台资助项目

作者简介: 王涛(1986-), 男, 硕士生, 主要从事导引头结构设计及半实物仿真方面的研究。Email: wang_tao08@hotmail.com

导师简介: 贾宏光(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事精确制导控制技术、微机电一体化技术方面的研究工作。

Email: jiahg@ciomp.ac.cn

0 引言

稳定跟踪平台是精密机械技术、控制技术、光学技术及图像处理技术的综合系统,随着科学技术的发展,稳定平台在各方面的应用越来越广泛。特别在军事领域,广泛的用于机载稳定瞄准平台、导引头等领域。稳定平台是在移动载体条件下,通过多轴运动补偿载体运动所造成的光轴扰动,从而保持其指向惯性稳定的装置,并在光轴稳定指向的基础上实现跟踪目标等其他功能。由于环境干扰,稳定平台的跟踪精度、稳像精度要求较高,所以平台的稳定性和跟踪控制方法的优劣直接决定平台的性能^[1]。光轴的准确指向受到各轴以及轴间几何误差的影响。几何误差主要包括由于机构加工、装配的不准确导致的安装误差以及由轴承跳动等原因造成的运动误差等^[2]。

在稳定跟踪平台的整个控制回路中,脱靶量是最主要的反馈信号,其精度影响整个控制系统的稳定水平。视轴指向误差是影响脱靶量精度的最主要因素,为了保证系统的整体性能,需要从根本上分析系统结构设计参数对视轴指向误差的影响。近些年,稳定平台的轴系精度得到了很大的关注。金毅民等^[3]等运用 PIOGRAM 图的方法进行了四轴指向机构的轴系运动误差分析;金光、王家琪等^[4]用四元数法通过坐标变化推导了三轴系统的轴系误差;Alasty 等^[5]通过 D2H 变换法,Kifidena^[6]和曲智勇^[7]等运用多体系统误差建模方法也建立了三轴机构的指向误差模型;李岩等^[2]建立了基于几何误差的指向误差模型并进行了误差敏感度分析等。然而针对光电稳定机构从结构设计参数到参数对最终指向误差的影响计算很少涉及。文中根据光电稳定机构的工作原理,以某导引头样机中两轴稳定机构为例分析了轴系设计参数以及轴承参数对轴系精度的影响,通过误差合成而得到了样机由于设计因素造成的视轴指向误差。

1 双框架光学稳定平台的结构设计

由于受体积和重量要求的限制,导引头稳定平台采用典型的双框架结构。其结构可以看作是由偏

航框和俯仰框组成的运动学链,结构简图如图 1 所示,由外壳(基座)、方位框、俯仰框、光学系统组成。方位框通过轴承与导引头外壳相联结,俯仰框通过轴承与偏航框相联结,光学系统固联于俯仰框上。俯仰轴系和方位轴系采用力矩电机直接驱动的结构方式,具有传动结构简单、精度高的特点。轴系精度主要靠加工和装配保证,尺寸误差与形位位置误差都控制在 0.004 mm(公差等级 3 级)之内;轴承采用日本 EZO 轴承,精度为 4 级,在俯仰和方位轴系上采用两端支撑的轴承组合方式,有利于减小轴系晃动,增加轴系刚度和耐振动冲击能力。由于受安装空间和器件选型的限制,结构设计的方位角范围为 $-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$,俯仰角范围为 $-30^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$ 。

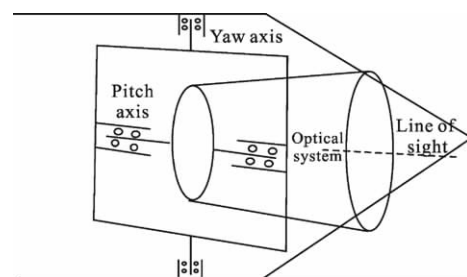


图 1 导引头稳定平台结构示意图

Fig.1 Structural diagram of stabilization mechanism of seeker

2 双轴稳定平台的轴系误差分析

稳定跟踪平台要求有较高的稳定精度和跟踪精度,这就要求其具有较高的运动精度和指向精度。但在实际的加工、装配及使用过程中不可避免地产生一些误差,如加工误差、装配间隙、轴承跳动,摩擦和温度等。双轴稳定平台的轴系误差包括机械轴的回转误差和光学系统的视轴误差。

2.1 机械轴系误差分析

轴系的设计中,轴系回转精度是首要考虑的目标。轴系在运动过程中不可能始终保持在空间的某个固定的位置,其位置的变动就是其回转精度的表征。轴系相对于理想回转轴线的偏差越小,则轴系回转精度越高,系统的性能就可能越高。轴系的误差主要可以分为 3 类:轴向窜动量 Δa 、径向移动量 Δb 和角度摆动 $\Delta \theta$ 。在此稳定平台中,轴承及安装的结构尺寸如表 1 所示。

表 1 轴承及安装结构参数

Tab.1 Parameters of bearing and installation

Parameter	Yaw axis	Pitch axis
Coaxial of bearing holes/mm	0.004	0.004
Distance between bearings/mm	82	56
Diameter error of bearing raceway/mm	0.000 4	0.000 4

2.1.1 偏航框架轴系误差分析

(1) 偏航框架轴系的垂直度误差 框架垂直轴系和底座的垂直度精度由机械加工决定, 其误差为:

$$\sigma_{11}=(\Delta_{11}/L_1) \cdot T'' \quad (1)$$

式中: Δ_{11} 为垂直度; L_1 为轴承跨距; T'' 为弧秒转化因子, 其值为 206 265。设计垂直度为 $\Delta_1=0.004$ mm, 轴承跨距为 $L_1=82$ mm, 则由垂直度误差引起的轴系角晃动量为:

$$\sigma_{11}=(0.004/82) \times 206\ 265=10.06''$$

(2) 偏航框架轴系的轴向窜动误差 轴向窜动分量比较小, 而且对视线指向的影响不大, 在此可以忽略不计。

(3) 偏航框架轴系的晃动误差 偏航框架采用两端支撑的方式, 有利于轴系晃动的控制。垂直轴系的晃动误差主要取决于轴承参数和轴承孔的不圆度误差, 主要影响因素有: 滚动轴承的滚道表面, 滚动轴承端面跳动, 滚动轴承存在间隙, 安装面的不圆度误差。

1) 滚动轴承的滚道表面确定主轴的几何轴心位置, 当轴承内圈滚道和内孔偏心时, 轴的几何轴线将产生径向跳动, 跳动最大值为 $\Delta_{12}=0.002\ 5$ mm。

2) 滚动轴承端面跳动会造成主轴端面跳动 $\Delta_{13}=0.002$ mm。

3) 由于滚动轴承滚道中心交替出现滚动体及处在两滚动体之间, 且滚动轴承存在间隙, 造成轴心变动, 不但使主轴在外力作用下发生一个静位移, 而且使主轴回转轴线作复杂周期运动, 由此造成的轴心变动 $\Delta_{14}=0.003$ mm。

4) 安装面的不圆度误差 由于加工误差的存在, 不圆度误差不可避免, 不圆度误差设计值为 0.000 5 mm, 由此带来的轴心跳动 $\Delta_{15}=0.000\ 5$ mm。在此假设各个误差互相独立, 进行误差合成后总的轴心跳动量为: $\Delta_{16}=\sqrt{\Delta_{12}^2+\Delta_{13}^2+\Delta_{14}^2+\Delta_{15}^2}=0.004\ 4$ 。其最大晃动

误差可由下式近似计算:

$$\sigma_{12_{\max}}=k' \cdot \Delta_{16}/L_1 \quad (2)$$

式中: Δ_{16} 为引起轴承晃动的轴心变化量; k' 为负载变形系数, 一般取 $k'=0.4\sim 0.96$; L_1 为两径向轴承间的跨距, 设计时 $L_1=82$ mm。该误差服从正态分布^[8], 故:

$$\sigma_{12}=\sigma_{12_{\max}}/\sqrt{3}=2.56''\sim 6.13''$$

(4) 偏航框架轴系的随机晃动误差 该随机晃动误差是由轴承钢球不圆度误差和安装基面刚度变化所引起轴承环工作面变形所决定的, 该项误差按照反余弦分布, 有:

$$\sigma_{13}=\sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{\Delta k_1}{L_1} \times T''\right)^2+\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{\Delta k_2}{L_1} \times T''\right)^2} \quad (3)$$

式中: Δk_1 为轴承钢球不圆度; Δk_2 为安装基面变形引起轴承环工作面变形量; L_1 为轴承间距。根据设计及选用的轴承及结构, 取 $\Delta k_1=0.000\ 4$ mm, $\Delta k_2=0.000\ 4$ mm, $L_1=82$ mm, 求得 $\sigma_{13}=1''$ 。

综合上述计算得偏航框架轴系的机械总误差为: $\delta_1=\sqrt{\sigma_{11}^2+\sigma_{12}^2+\sigma_{13}^2}=10.43''\sim 11.82''$ 。

2.1.2 俯仰框架轴系误差分析

俯仰框架的支撑结构及轴承选型与偏航框架相同, 所以误差的计算方法也一致, 也分为垂直度误差、晃动误差和随即晃动误差计算。

(1) 俯仰框架轴系的垂直度误差为:

$$\sigma_{21}=(\Delta_{21}/L_2) \cdot T'' \quad (4)$$

式中: Δ_{21} 为垂直度; L_2 为轴承跨距; T'' 为弧秒转化因子, 其值为 206 265。设计垂直度为 $\Delta_{21}=0.004$ mm, 轴承跨距为 $L_2=56$ mm, 则由垂直度误差引起的轴系角晃动量为: $\sigma_{21}=(0.004/56) \times 206\ 265=18.41''$ 。

(2) 俯仰框架轴系的晃动误差, 其最大晃动误差可由下式近似计算:

$$\sigma_{22_{\max}}=k' \cdot \Delta_{26}/L_2 \quad (5)$$

式中: Δ_{26} 为引起轴承晃动的轴心变化量; k' 为负载变形系数, 一般取 $k'=0.4\sim 0.96$; L_2 为两径向轴承间的跨距, 设计时 $L_2=56$ mm。该误差服从正态分布^[7], 故为: $\sigma_{22}=\sigma_{22_{\max}}/\sqrt{3}=3.74''\sim 8.98''$ 。

(3) 俯仰框架轴系的随机晃动误差为:

$$\sigma_{23}=\sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{\Delta k_1}{L_2} \times T''\right)^2+\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{\Delta k_2}{L_2} \times T''\right)^2} \quad (6)$$

式中: Δk_1 为轴承钢球不圆度; Δk_2 为安装基面变形引起轴承环工作面变形量; L_2 为轴承间距。根据设计及选用的轴承及结构, 取 $\Delta k_1=0.0004\text{ mm}$, $\Delta k_2=0.0004\text{ mm}$, $L_2=56\text{ mm}$, 求得 $\sigma_{23}=1.47''$ 。

综合上述计算得俯仰框架轴系的机械总误差为 $\delta_2 = \sqrt{\sigma_{21}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{23}^2} = 18.84'' \sim 20.54''$ 。

由上述计算可知, 在其他设计参数相同的情况下, 轴承支撑距离的长短严重影响轴系的运动精度, 因此, 当轴的支撑距离差别较大时应分开考虑。

2.2 视轴误差分析

视轴是可见光电视测量分系统光学系统主点与 CCD 靶面十字丝中心的连线, 即为电视测量分系统的轴线。视轴误差是实际视轴与理想视轴不相重合而产生的误差, 即为由于加工及装配误差, 实际光学系统的主光轴与 CCD 靶面中心并不在一条直线上, 而存在一个共线偏差。其产生的原因主要包含以下几点。

- (1) 机械零部件加工和装配的不完善, 如透镜的位置有上下位移、CCD 靶面的上下位移等引起视轴变化;
- (2) CCD 靶面本身的误差;
- (3) 热变形误差;
- (4) 镜头变形误差^[9]。

机械零部件加工及装配误差设计时要求造成的视轴误差控制在 0.004 mm , 由于镜头的直径尺寸较小, 温度变化范围不大, 由热变形和镜头变形造成的误差可以忽略不计。视轴误差服从等概率分布^[9], 可由下式计算:

$$\delta_3 = (\Delta_3 / L_3 \cdot T'') / \sqrt{3} \quad (7)$$

式中: Δ_3 为视轴误差, 取 $\Delta_3=0.004\text{ mm}$; L_3 为光学系统镜筒长度, $L_3=90\text{ mm}$; T'' 为弧秒转化因子。计算求得: $\delta_3=5.29''$ 。

3 轴系误差对视线角影响分析

在视线角误差的分析中, 将 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别看做是偏航轴相对于底座的垂直度、俯仰轴相对于偏航轴的垂直度、光轴相对于俯仰轴的垂直度。由参考文献[4]可知, 这三项误差对视线偏航角的影响分别为:

$$\Delta\alpha_1 = \delta_1 \cdot \tan\beta \cdot \sin\alpha$$

$$\Delta\alpha_2 = \delta_2 \cdot \tan\beta$$

$$\Delta\alpha_3 = \delta_3 / \cos\beta$$

则由 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 造成的偏航角误差为:

$$\Delta\alpha = \sqrt{\Delta\alpha_1^2 + \Delta\alpha_2^2 + \Delta\alpha_3^2}$$

对视线俯仰角的影响分别为:

$$\Delta\beta_1 = \delta_1 \cdot \cos\alpha$$

$$\Delta\beta_2 = 0$$

$$\Delta\beta_3 = 0$$

则由 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 造成的俯仰角误差为:

$$\Delta\beta = \sqrt{\Delta\beta_1^2 + \Delta\beta_2^2 + \Delta\beta_3^2};$$

轴系误差造成的视线角的总误差为:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \beta^2} \cdot \Delta\alpha^2 + \frac{\beta^2}{\alpha^2 + \beta^2} \cdot \Delta\beta^2} \quad (8)$$

可见各轴系垂直度对视线角的影响大小是随着偏航角度和俯仰角度的大小变化而变化的, 此双框架的设计转角范围均为 30° , 用 Matlab 仿真计算后可以得到 Δ 随着偏航角和俯仰角的变化而变化的曲线图, 图 2 和图 3 分别表示 δ_1 、 δ_2 取最小值和最大值时的总误差和偏航俯仰角的关系曲面图。

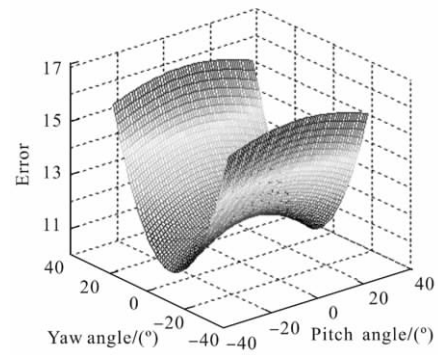


图 2 合成的指向误差(最小)

Fig.2 Pointing errors of synthesis (min)

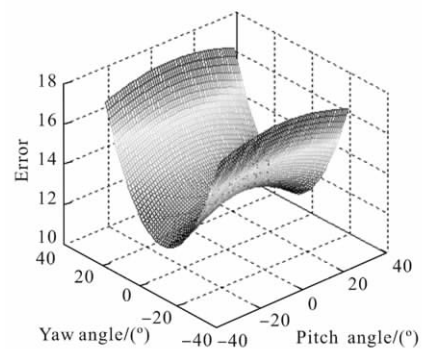


图 3 合成的指向误差(最大)

Fig.3 Pointing errors of synthesis (max)

由计算结果得此样机视线角误差的范围为 $10.47''\sim 17.82''$, 通过计算可得成像的误差为 $0.56\sim 0.95$ 个像元。对于成像稳定平台来说, 误差指标为不超过 1 个像元, 因此, 可以通过以上的分析得到此稳定平台的设计符合设计要求。

4 结 论

通过对双框架样机轴系的分析, 得到了轴系精度并对其造成的视线角误差进行了定量分析, 所得结果满足指标为一个像元的要求, 精度分析的结果反映了轴系设计的合理性和可行性, 也为此类设计提供了参考依据。通过计算发现, 轴系垂直度对视线角误差的影响特别明显, 在进行误差分配时应在现有的加工装配条件下尽量提高轴系垂直度精度, 才能确保视线指向有较高的精度。目前此平台已顺利通过各项试验, 并装于转台上和舵机、自驾仪进行了联合半实物仿真实验, 实验结果符合预期, 说明了结构设计的合理性, 同时也体现了所提指标的合理性。

参考文献:

- [1] Xu Zhaodong, Chen Songcan, Li Xin. Analysis and improvement of dynamic accuracy in stabilizing platform system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35: 454-458. (in Chinese)
许照东, 陈松灿, 李辛. 稳定平台动态精度分析及改进 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35: 454-458.
- [2] Li Yan, Fan Dapeng. Development of pointing error and sensitivity analysis of opto-electrical stabilization mechanism [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(1): 104-109. (in Chinese)
李岩, 范大鹏. 光电稳定机构指向误差建模与敏感度分析 [J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(1): 104-109.
- [3] Jin Yimin, Tao Zhong, Sun Zhijia. Mathematical simulation and shafting errors of shafting movement [J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, 24(S): 37-46. (in Chinese)
金毅民, 陶忠, 孙治家. 轴系运动的数学仿真与轴系误差 [J]. 应用光学, 2003, 24(S): 37-49.
- [4] Jin Guang, Wang Jiaqi. Deduction of errors of three axis of theodolites using coordinate transformation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(5): 89-94. (in Chinese)
金光, 王家琪. 利用坐标变化推导经纬仪三轴误差 [J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 89-94.
- [5] Alasty A, Abedi H. Kinematic and dynamic sensitivity analysis of a three2axis rotary table [C]//Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 2003: 1147-1152.
- [6] Kifidena V S B, Ferreira P M. Kinematic modeling of quasistatic errors of three-axis machining centers [J]. *Int J Machine Tools & Manufacturing*, 1994, 34(1): 85-100.
- [7] Qu Zhiyong, Yao Yu. Error analysis and error modeling of simulation turntable [J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(3): 301-304. (in Chinese)
曲智勇, 姚郁. 仿真转台误差分析及误差建模 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(3): 301-304.
- [8] Du Junfeng, Li Zhengzhou. Analysis of the axial accuracy of the GD-220 photoelectric theodolite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(4): 416-419. (in Chinese)
杜俊峰, 李正周. GD2220 光电经纬仪轴系的精度分析 [J]. 光学精密工程, 2002, 10(4): 416-419.
- [9] Liu Manlin, Hao Bin, Xiong Rensheng, et al. Visible light measurement television system design and sight line axial precision analysis [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2008, 23(6): 49-52. (in Chinese)
刘满林, 郝斌, 熊仁生, 等. 可见光测量电视系统设计及视轴精度分析 [J]. 光电技术应用, 2008, 23(6): 49-52.