

文章编号 1004-924X(2004)02-0141-05

空间相机偏流调整旋转轴系的设计与精度分析

李松,张立平

(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:为提高空间相机的摄影精度和偏流角的控制精度,应用刚度较强的外筒机座平面作为轴系止推轴承轨道平面,设计了双径向与轴向复合约束力封闭式旋转轴系结构,其结构具有质量轻、转动灵活、回转精度高特点。讨论了影响轴系旋转精度的诸多误差因素,如轴向窜动误差、角度摆动误差等,并定量分析了构成轴系零件的形位误差引起旋转轴系在回转运动中的晃动误差。通过对轴系晃动误差的检测,验证了所选用的轴系精度为3.8,满足了总体技术指标在5以内的要求。

关键词:空间相机;旋转轴系;误差分析

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A

Design and accuracy analysis for drift adjusting rotary axes of space camera

LI Song, ZHANGLi-Ping

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

Abstract: The drift adjusting rotary axes of space camera mainly provides the angular motion control of the camera in the horizontal direction, and performs the real-time control of azimuthal drift to realize the image motion compensation in the photo-taking process. The drift adjusting rotary axes determine to a large extent the photo-taking accuracy and the drift control accuracy of a camera. For the utilization of the plane of highly rigid external pedestal as the orbital plane of the thrust bearing, and the adoption of composite enclosed design in both radial and axial directions, the structure of rotary axes features light mass, free rotation and high rotational accuracy. A number of factors having effect on the accuracy of rotary axes, such as radial runout and angular swing, are discussed, and a quantitative analysis has also been made for the axial shaking error resulting from the form and position errors of the rotary axis components. The measured shaking error of the rotary axes indicated that the accuracy of the axes selected is 3.8", and satisfies the general technical specification of being within 5".

Key words: space camera; rotary axial series; error analysis

收稿日期:2003-12-12;修订日期:2004-02-24.

1 引言

随着空间科学技术的发展,空间遥感相机以其高分辨率及高可靠性等优点,在军事目标侦察,空间遥测等方面的作用日益突出。空间相机在对地面目标摄影过程中,空间飞行器相对地面目标运动和自身飞行姿态的变化会使胶片曝光时被摄目标与胶片相对运动产生像移。为了保证照相摄影时能够在地球自转及空间飞行器姿态变化,特别是有偏航存在的情况下正确地获得主向量像移补偿,消除其对成像质量下降所造成的影响,空间相机机身设计有偏流调整装置,装置中的旋转轴系是实现偏流角调整的重要部件,并由偏流角控制^[1]系统对其偏流角进行实时修正以达到像移补偿的目的。

2 轴系形式选择及结构设计

如图 1 所示,该轴系由一个内环,一个外环及防翻环组成。其轴系结构不具备独立的外筒,故独立性很差,而且轴系的端面晃动和轴向窜动大,精度也不能满足技术要求。图 2 给出了径向与轴向复合约束力封闭式方位旋转轴系,由内外筒、钢球、二对径向内外轴承环、上下止推环组成。钢球采用过盈压入内外环中组成双径向支承,其中 2 个内环各有一端面兼作轴向止推面,对于径向内外环分别采用过盈配合压入内外筒配合处。为防止下止推环与外筒过盈配合造成下止推环变形而影响钢球滚道的平面度,下止推环与外筒的配合采用间隙配合,用螺钉紧固在配合处,上下止推环以

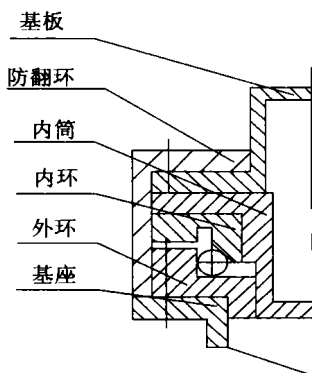


图 1 旋转轴系方案图(I)

Fig. 1 Schematic diagram of the rotary axial series (I)

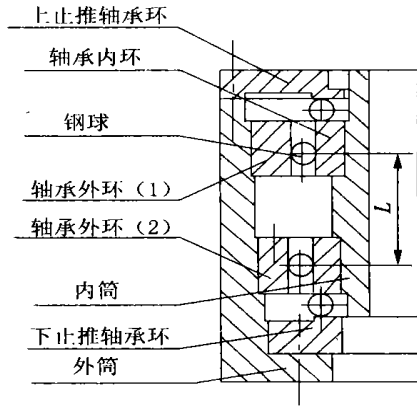


图 2 旋转轴系方案图(II)

Fig. 2 Schematic diagram of the rotary axial series (II)

螺钉紧固在外筒的后端面处,上下止推支承装配时,同样给予 0.001 ~ 0.002 mm 过盈量。两止推轴承环和径向内外环的滚道面采取了组合配研达到设计精度要求,从而使旋转轴系的径向间隙和轴向窜动得到控制。

3 影响旋转轴系精度的因素

精密机械中的轴系在旋转过程中要求有较高的回转精度^[2,4,8,9],其精度一般用轴系的轴线位置变动量来表征,而旋转轴实际回转轴线的变动可分为轴向窜动 s , 径向移动 c , 轴线角度摆动。

3.1 旋转轴系的轴向窜动误差 s

轴向窜动误差 s 是旋转轴回转误差的轴向分量,它沿主轴轴线方向度量,其量反映了轴系轴向回转精度。旋转轴轴向窜动误差越小,表明该轴系的轴向回转精度越高。

3.2 旋转轴系的置中误差 c

旋转轴旋转在任一轴向位置时,旋转轴实际回转轴线的单一径向偏移与旋转轴轴线角度摆动所引起轴心径向偏移之和为

$$c = c_0 + l_n \cdot \theta \quad [3]$$

式中 c_0 为旋转轴旋转在任一轴向位置时,实际回转轴线的径向偏移; l_n 为轴线摆动角 θ 顶点至旋转轴端面之距离; c 表征旋转轴线对理论轴线的径向偏移程度。

3.3 旋转轴的晃动误差

旋转轴实际回转轴线对转轴理论轴线的纯角度摆动量 称为晃动误差,即为定向误差,表征实际回转轴线对给定方向的偏移量。

4 空间相机偏流角调整旋转轴系的精度分析

空间相机偏流角调整旋转轴系主要用于控制摄影机在水平方向上的角运动,完成方位偏流角的实时控制调整,以实现摄影过程中的像移补偿。由图 2 可知,在偏流角旋转轴系的机构设计中,应用刚度较强的外筒基座平面作为轴系止推轨道平面基准设计思想,采用双径向与轴向支承复合合力封闭滚动摩擦形式的轴系结构,其结构具有质量轻,转动灵活,回转精度高的特点。

4.1 旋转轴系的静态误差分析

旋转轴系的静态误差主要包含以下几种:

(1) 旋转轴的不垂直度误差:该项误差是由下止推轴承的平面轨道面对两径向轴承轨道面的不垂直度所造成的,它将影响轴系的角晃动,如图 3 所示:

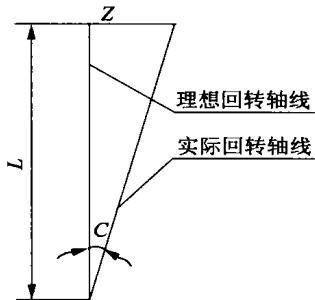


图 3 垂直度误差引起的角晃动值

Fig. 3 Angular shaking value due to the perpendicularity error

设其误差为 α_z 则

$$\alpha_1 = (\alpha_z / L) \cdot 10^5, \quad (1)$$

式中: α_z 为垂直度误差; α_1 为轴系不垂直度误差

所引起的角晃动量; L 为轴系两径向支承的跨距; 为弧度化为弧秒因子。

设计时 $\alpha_z = 0.0015, L = 112$, 其 α_1 最大值可由公式(1)近似计算

$$\alpha_{1max} = (0.0015 / 112) \times 206265 = 2.76 \text{ } ^{[5]}$$

(2) 旋转轴的轴向窜动误差:因轴系在结构设计时采取上下止推轴承过盈装配,在此该项误差可忽略不计;

(3) 旋转轴晃动误差:由于平面轴系是以钢球和上下止推轴承环的滚道平面支撑和定位的,故旋转轴的晃动取决于钢球不圆度误差及上下止推轴承环的滚道不平度误差。由于上下止推轴承采用了数量较多钢球的组合使用,所以钢球本身不圆度误差难以反映,可忽略不计。这样旋转轴的晃动误差只取决于上下止推环滚道平面的不平度误差,其最大值可按式近似计算

$$\alpha_{2max} = K \frac{\alpha_y}{D} \text{ } ^{[5]}, \quad (2)$$

式中: α_y 为止推轴承环平面滚道不平度(设计时取 $\alpha_y = 0.002$); D 为止推轴承环平面滚道中径(设计时取 $D = 510$); K 为负载变形系数,一般取 $K = 0.4 \sim 0.96$, 计算求得

$$\alpha_{2max} = 0.32 \sim 0.77$$

该项误差服从均匀分布,故

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_{2max}}{\sqrt{3}} = 0.18 \sim 0.45 ;$$

(4) 旋转轴的随机晃动误差:该晃动误差 α_3 是由平面止推轴承环工作表面不平度和外筒安装基面刚度变化所引起止推轴承环工作面变形所决定的,该项误差按照反余弦分布,则有:

$$\alpha_3 = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{D} \times \alpha_1\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{D} \times \alpha_2\right)^2} \text{ } ^{[6]}, \quad (3)$$

式中: α_1 为下平面止推环工作表面不平度; α_2 为外筒安装基面变形引起止推轴承环工作面变形量; D 为下平面止推环中径。

设计取 $\alpha_1 = 0.002, \alpha_2 = 0.002, D = 510$,

$$\alpha_3 = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{0.002}{510} \times 206265\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{0.002}{510} \times 206265\right)^2} = \pm 0.8$$

由公式(3)可知,若止推环装配后由于变形使

$\alpha_2 = 0.004$ 时,则 $\alpha_3 = 1.28$

由此可见,外筒安装基面下止推环安装基面发生变化对轴系晃动影响很大,所以在结构设计时除保证外筒有足够的刚度,在加工允许的条件下还应尽量提高下止推环安装基础面的精度,以减小对下止推环工作表面精度的影响。下止推环与外筒配合采用间隙配合,以螺钉紧固,保持原有加工精度。

综合结果其偏流旋转轴系的机械误差为

$$i = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} \text{ 得 } i = 2.88 \sim 2.9$$

4.2 安装基面误差对轴系晃动的影响

安装基面误差主要指外筒配合基面平面度误差和表面粗糙度对精度的影响。由于加工后的零件表面都存在宏观几何形状误差和微观粗糙度,当平面止推轴承环与外筒安装基面相连时,两个零件的实际接触面积只为名义接触面积的一部分,即为表面粗糙的高峰点互相接触,如图 4 所示。在自重和负载作用下,接触表面将引起接触变形,可用下列公式表示:

$$\delta = Cq^m [7]$$

式中: δ 为表面接触变形; C 为系数; q 为压强; m 为系数。

当负载一定时, C 值是主要因素,它由连接平面的波峰值所决定。当表面不平度较小时,接触表面的粗糙度高,则 C 值小,所以提高装配基准面的表面粗糙度会减小表面接触变形,从而可减小对轴系晃动的影响。

参考文献:

- [1] 李友一. 空间相机的偏流角控制[J]. 光学 精密工程, 2002, 4(10): 402-406.
LI Y Y. Study of the drift angle control in a space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 4(10): 402-406. (in Chinese)
- [2] 杜俊峰, 李正周. GD-220 光电经纬仪轴系的精度分析[J]. 光学 精密工程, 2002, 4(10): 416-419.
DU J F, LI ZH ZH. Analysis of the axial accuracy of the GD-220 photoelectric theodolite[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 4(10): 416-419. (in Chinese)
- [3] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
MAO Y T. *The theory of error and analysis of accuracy* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982.
- [4] 郑文学, 王全波. 仪器精度设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
ZHENG W X, WANG Q B. *Design of instrumental accuracy* [M]. Beijing: Military Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [5] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
FEI Y T. *The theory of error and data processing* [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. (in Chinese)
- [6] 王之江. 光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
WANG ZH J. *Handbook of optics technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 1994. (in Chinese)
- [7] 姜文汉, 凌宁. 平面止推轴系的精度问题[J]. 光学机械, 1980, 1: 9-17.

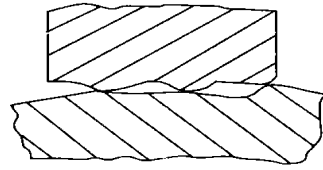


图 4 表面的实际接触情况

Fig. 4 Actual surface contact

5 结 论

由于轴系中轴承环的形状误差 0.001 , 而轴承的配合过盈量通过工艺上采用组合加工控制, 因此旋转轴系总的端面晃动量 ± 5 是可以达到的。通过多次实测其旋转轴系端面极限晃动值, i 算术平均值为 3.8 , 见表 1, 其精度充分

表 1 轴系端面极限晃动值检测结果

Tab. 1 Measured results of the limit shaking value of the axial series end plane

	1	2	3	4	5	6
i	3.8	3.9	4.0	3.7	3.6	3.8

满足总的技术指标要求。虽然实测结果大于理论分析值, 但这是由于理论分析模型简化和实际测量误差等综合因素造成的, 因此从总体上看, 对旋转轴系误差的理论分析反映了轴系结构设计的合理性和可行性。

- JIANG W H, LING N. The problem of the precision of plane thrust bearing[J]. *Optics Mechanics*, 1980, 1:9-17. (in Chinese)
- [8] 张景和. 用反相法测轴系回转误差[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(2):155-159.
ZHANG J H. Testing rotating errors of axis with reversal method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(2):155-159. (in Chinese)
- [9] 李志杰, 蔡鹤皋. 主轴回转运动精度的评定误差[J]. *计量学报*, 1993, 10(4):298-301.
LI ZH J, CAI H G. Evaluation error of main shaft rotary precision[J]. *Journal of Measurement*, 1993, 10(4):298-301. (in Chinese)

作者简介:李松(1974-),男,吉林长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生,主要研究方向为空间遥感仪器的设计。E-mail:kynfen@sina.com

欢迎订阅《光机电信息》(月刊)

《光机电信息》是一份为工程师、研究者、科学家和技术专家提供国内外有关光学、光电子学和精密机械综合消息的月刊。它从技术和商业两方面报道和分析上述领域的最新研究进展和发展趋势,其特点是信息量大且传播速度快。

完整的报道范围

《光机电信息》以全方位的视角瞄准国际前沿,紧盯国内外光机电领域发展的热点和焦点,每期以专题形式发布。主要报道光学、光电子学、光电工程、精密机械、激光、光通信、光学仪器、发光学、显示技术、医用光学、光学材料、微纳技术、微机械系统(MEMS)、先进加工制造技术等诸多读者感兴趣的领域。

有效的报道内容

《光机电信息》是国内致力于光电子领域的工程师、管理人员、科学家、研究者和技术专家的必读之物。《光机电信息》每月都会向其服务的产业提供以下栏目:各种专题报道、市场纵横、科技简讯、产品放送、设计与应用和专题信息长廊等。

广告投资的最好选择

《光机电信息》是一份每月发行量达5 000余份的资深杂志,这意味着每年有数10万人次的顶级工程师和研究人员阅读《光机电信息》。您的广告会被所有《光机电信息》的读者看到。请抓住机遇,扩大贵公司在中国市场的知名度。

欲投放广告于《光机电信息》请按下列地址联系

联系人:高晓萍

传真:(0431)5682346

电话:(0431)6176853

地址:长春市东南湖大路16号

邮编:130033

E-mail:xxfw@ciomp.ac.cn