

## 并联结构轴系回转误差建模及装配优化

董一鸣 江波 李翔宇 谢友金 吕涛 阮萍

### Rotary error modeling and assembly optimization of parallel structure shafting

DONG Yi-ming, JIANG Bo, LI Xiang-yu, XIE You-jin, LV Tao, RUAN Ping

引用本文:

董一鸣, 江波, 李翔宇, 谢友金, 吕涛, 阮萍. 并联结构轴系回转误差建模及装配优化[J]. *中国光学*, 2024, 17(3): 586–594. doi: 10.37188/CO.2023–0171

DONG Yi-ming, JIANG Bo, LI Xiang-yu, XIE You-jin, LV Tao, RUAN Ping. Rotary error modeling and assembly optimization of parallel structure shafting[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 586–594. doi: 10.37188/CO.2023–0171

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0171>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 面向硅基光电子混合集成的二维材料探测器

Two-dimensional material photodetector for hybrid silicon photonics

中国光学 (中英文). 2021, 14(5): 1039 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0003>

#### 星敏镜头参数化建模辅助设计

Parametric modeling aided design for star sensor lens

中国光学 (中英文). 2021, 14(3): 615 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0029>

#### 二维量子片及其光学研究进展

Progress on two-dimensional quantum sheets and their optics

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 1 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0176>

#### 基于多激光传感器装配的自由曲面法线找正方法研究

The normal alignment method for freeform surfaces based on multiple laser sensor assembly

中国光学 (中英文). 2021, 14(2): 344 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0205>

#### 二维Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se的制备与光学表征研究进展

Recent progress on synthesis and optical characterization of two-dimensional Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 24 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0071>

#### 二维材料异质结高灵敏度红外探测器

Highly sensitive infrared detector based on a two-dimensional heterojunction

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 87 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0139>

文章编号 2097-1842(2024)03-0586-09

## 并联结构轴系回转误差建模及装配优化

董一鸣<sup>1,2,3</sup>, 江波<sup>1,3\*</sup>, 李翔宇<sup>1,3</sup>, 谢友金<sup>1,3</sup>, 吕涛<sup>1,3</sup>, 阮萍<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院空间精密测量技术重点实验室, 陕西 西安 710119)

**摘要:**为提高光电经纬仪等二维转台的轴系运动精度, 本文基于雅可比旋量理论建立了一种可考虑零件结构误差及其耦合放大效应的数学模型。针对“一端固定、一端游动”的轴系结构, 提出了局部并联结构的分析方法。通过数值仿真分析, 获得了各零件结构误差对轴系运动精度的影响以及最优的轴系装配方案。光学口径为 650 mm 的光电经纬仪的装调结果表明: 装配优化后的轴系运动精度较优化前提高了 32.1%。所构造的轴系运动精度模型及优化方法为指导光电经纬仪等二维转台的轴系装调以及公差设计提供了一定的理论根据。

**关键词:** 光学测量; 二维转台; 轴系运动模型; 光电经纬仪; 装配优化

中图分类号: TH745 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0171

## Rotary error modeling and assembly optimization of parallel structure shafting

DONG Yi-ming<sup>1,2,3</sup>, JIANG Bo<sup>1,3\*</sup>, LI Xiang-yu<sup>1,3</sup>, XIE You-jin<sup>1,3</sup>, LV Tao<sup>1,3</sup>, RUAN Ping<sup>1,3</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Space Precision Measurement Technology,

Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

\* Corresponding author, E-mail: ilysay@opt.ac.cn

**Abstract:** In order to improve the shafting motion accuracy of two-dimensional turntables such as photoelectric theodolites, we establish a mathematical model considering both the structural error of parts and the coupling amplification effect based on Jacobian-Torsor theory. Aiming at a shafting structure with one fixed end and one swimming, an analysis method of partial parallel structure was proposed. Through numerical simulation analysis, the impact of each part's structural errors on the motion accuracy of the shafting and the optimal shafting assembly scheme were obtained. The results of assembly and adjustment of a photoelectric theodolite with an optical diameter of 650 mm show that assembly optimization improved the motion accuracy of the shaft system by 32.1%. The precision model and optimization method of shafting motion provide a theoretical basis for the shafting adjustment and tolerance design of two-dimensional turntables such as pho-

收稿日期: 2023-09-28; 修订日期: 2023-10-26

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (No. 12103081)

Supported by National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (No. 12103081)

toelectric theodolites.

**Key words:** optical measurement; two-dimensional turntable; shafting motion model; photoelectric theodolite; assembly optimization

## 1 引言

光电经纬仪被广泛应用于航空、航天、激光通讯等前沿科研领域,被测目标距离可达数百公里,因此对轴系运动精度的要求非常高<sup>[1-5]</sup>。光电经纬仪为典型的二维转台结构,转台结构是承载各子系统的骨架,其在加工和装配过程中产生的结构误差,经过传递和耦合放大,会对轴系运动精度造成很大影响,是影响最终测量结果的主要因素之一。

光电经纬仪等二维转台的运动由方位轴系和俯仰轴系组成的正交轴系控制,其中俯仰轴系依托于U型架,属于开放结构,相较于方位轴系,引入的误差更大<sup>[6]</sup>。目前国内很多学者针对二维转台的结构误差进行分析,Lv等<sup>[7]</sup>针对转台系统中的寄生扰动,建立了视准轴指向与机构抖动间的评估预测模型。Wu等<sup>[8]</sup>应用几何光学方法,分析轴系误差对指向精度的影响规律。Zhang等<sup>[9-10]</sup>针对用于空间激光通讯的二维转台,通过推导误差变换矩阵,分析了几何误差对指向精度的灵敏度以及同轴度误差对指向精度的影响规律。李翔宇等<sup>[11]</sup>基于物理模型,对方位轴倾斜误差进行修正。江波等<sup>[12-13]</sup>采用坐标变换法对车载光电经纬仪因基座受载变形所引起的测量误差进行分析并补偿。姜玉鑫等<sup>[14]</sup>针对空间激光通讯转台的旋转双棱镜指向误差,采用迭代算法进行误差校正。这些研究方法和研究结果均是针对已产生误差的补偿,即事后补偿,缺少对结构误差事前消除的研究工作。因此,本文研究了各零件结构误差间的传递和耦合放大情况,通过优化装配提高二维转台轴系的运动精度,进一步提升光电经纬仪的跟踪测量能力。

雅可比旋量法(Jacobian-Torsor method)是由Lafond等<sup>[15]</sup>提出的基于零件和装配体公差的分析模型。该模型包含用于表达零件几何特征的旋量模型和用于表达零件之间几何误差传递的雅可比矩阵。该方法思路清晰,可合理表达误差的特征及误差间的传递关系,得到了广泛的关注和深

入的研究<sup>[16]</sup>。Xi等<sup>[17]</sup>针对复杂结构装配,引入雅可比旋量法对装配质量进行分析。Chen等<sup>[18]</sup>、戴宏伟等<sup>[19]</sup>应用雅可比旋量法对并联结构的装配误差进行了分析。

现有的针对二维转台结构误差及装配优化的理论研究,没有考虑到加工和装配过程中零件的结构误差耦合放大效应及相应的消除方法。针对以上问题,本文基于雅可比旋量法,建立了俯仰轴系的运动精度模型,对俯仰轴系装调过程中的关键参数——轴颈处径向跳动量进行了仿真预测,利用粒子群算法求解因误差耦合可能产生的跳动量极值,采用扩展傅立叶法分析了结构各误差对轴系运动精度影响的敏感性,基于上述理论研究工作,对某型光学口径为650 mm的光电经纬仪二维转台俯仰轴系进行了优化装配。揭示误差在结构中的传递机理,以期对光电经纬仪以及通用二维转台的轴系装配调试以及在设计时的公差分配提供一定的理论根据。

## 2 轴系运动模型

### 2.1 轴系的回转运动误差

为建立轴系的运动学模型,首先需要明确轴系回转运动误差的来源和表现形式。与机械结构相关的转台轴系运动误差的主要来源有轴系加工装配误差、结构弹性变形和轴承跳动。光电经纬仪转台轴系刚度大,针对本文所研究的光学口径650 mm的光电经纬仪,通过有限元分析,轴体最大变形量为1.97  $\mu\text{m}$ ,弹性变形对轴系晃动的影响很小;本文所研究的俯仰轴系轴承实测最大跳动量不超过5  $\mu\text{m}$ ,该型经纬仪轴系的同轴度为20  $\mu\text{m}$ 、装配间隙在10  $\mu\text{m}$ 以上,轴承的随机跳动相对于加工装配误差对轴系的运动精度影响小。因此,本文只研究轴系因加工装配在空间中表现为刚体六自由度运动的误差运动。轴系运动误差在空间中的表现形式如图1所示。具体表现为:轴系运动的平均轴线 $L_a$ 与理想轴线 $L_i$ 的偏离运动和轴系转子的运动轨迹与平均轴线 $L_a$ 的偏离

运动。轴系转子上任意一处  $O_m$  沿径向对理想回转中心  $O_i$  和平均回转中心  $O_a$  的跳动量分别为  $h_i$  和  $h_a$ 。用于测量轴系运动精度的测量仪器为千分表、光电自准直仪,其中千分表测量的几何量为轴颈上一处相对于平均回转中心  $O_a$  的跳动量  $h_a$ 。

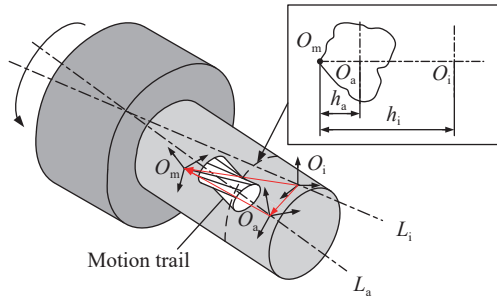


图 1 运动误差示意图

Fig. 1 Schematic diagram of motion error

### 2.2 考虑轴系运动的雅可比旋量模型

雅可比旋量模型中包含功能单元  $E$  的误差表达和功能要求  $F$  的误差累积两个部分。其中误差表达称为功能单元的特征旋量,包含 6 个方向的变动特征量: 3 个平移特征量  $\delta$  和 3 个旋转特征量  $\theta$ , 功能单元的表达式为:

$$[E] = \begin{bmatrix} \delta(x) \\ \delta(y) \\ \delta(z) \\ \theta(x) \\ \theta(y) \\ \theta(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $\delta(x)$ 、 $\delta(y)$  和  $\delta(z)$  分别是沿局部坐标系  $xyz$  三轴方向的平移特征量;  $\theta(x)$ 、 $\theta(y)$  和  $\theta(z)$  分别是绕局部坐标系  $xyz$  三轴的旋转特征量。

雅可比矩阵  $J$  所求解的为关于功能要求所处的全局坐标系  $\{0\}$  和各个功能单元所处的局部坐标系  $\{i\}$  的映射关系。对于最终的功能要求有:

$$[F] = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & \cdots & J_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [E_1] \\ [E_2] \\ \vdots \\ [E_n] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $J_1$  至  $J_n$  为功能单元  $E_1$  至  $E_n$  对应的  $6 \times 6$  雅可比映射矩阵,二维转台轴系的回转运动并不能在雅可比旋量模型中直接体现出来,因此需要对二维转台的运动特性,在雅可比旋量模型中引

入转动副的概念来对轴系运动进行描述。转动副本质上属于坐标系间的转换投影,因此可以使用雅可比矩阵进行描述<sup>[12]</sup>。对于绕  $x$  轴旋转的轴系,当轴系转动角度为  $\theta$  时,描述转动副的雅可比矩阵为:

$$J_{tj} = \begin{bmatrix} [R_0^i] \cdot [R_{tj}] & [W_0^i] \cdot ([R_0^i] \cdot [R_{tj}]) \\ [0]_{3 \times 3} & [R_0^i] \cdot [R_{tj}] \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:  $[R_0^i]_{3 \times 3}$  为局部坐标系  $\{i\}$  相对于全局坐标系  $\{0\}$  的转换矩阵;  $[W_0^i]_{3 \times 3}$  为坐标转换距离矩阵;  $[R_{tj}]_{3 \times 3}$  为绕  $x$  轴的旋转矩阵。

$$[R_0^i] = \begin{bmatrix} [C_{1i}]_{3 \times 1} & [C_{2i}]_{3 \times 1} & [C_{3i}]_{3 \times 1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:  $[C_{1i}]_{3 \times 1}$ 、 $[C_{2i}]_{3 \times 1}$  和  $[C_{3i}]_{3 \times 1}$  为局部坐标系  $\{i\}$  相对于全局坐标系  $\{0\}$  的三个坐标轴方向的单位向量。

$$[W_0^i] = \begin{bmatrix} 0 & dz_0^i & -dy_0^i \\ -dz_0^i & 0 & dx_0^i \\ dy_0^i & -dx_0^i & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中:  $dx_0^i = dx_i - dx_0$ ;  $dy_0^i = dy_i - dy_0$ ;  $dz_0^i = dz_i - dz_0$ 。

### 2.3 局部并联结构的分析方法

局部并联结构指机构中某一点的位置由其它两个点的位置所共同决定。二维转台俯仰轴系为一典型的局部并联结构。在俯仰轴系设计中,为避免因微小变形导致轴系卡死,通常采用组合轴承或角接触轴承作为主要支撑元件,同时设置一个深沟球轴承作为辅助支撑,采用“一端固定、一端游动”的设计方式。固定端起到约束轴系除转动方向外所有自由度的作用,而游动端只负责约束轴系的径向线自由度。图 2 所示为一局部并联结构示意图,其由功能单元  $E_a$ 、 $E_b$  和  $E_c$  组成,其中  $L$  为固定端轴承座到轴系游动端端面的距离,  $l$  为固定端轴承座和游动端轴承座之间的距离。

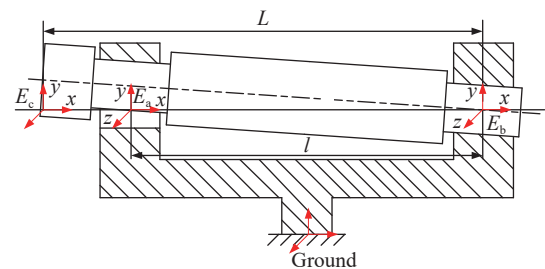


图 2 局部并联结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of local parallel structure

功能单元  $E_a$  和  $E_b$  的特征旋量分别为:

$$E_a = \begin{bmatrix} u_a & v_a & w_a & \alpha_a & \beta_a & \gamma_a \end{bmatrix}^T$$

$$E_b = \begin{bmatrix} 0 & v_b & w_b & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

对于各功能单元之间的误差旋量, 根据几何关系可推导出  $E_c$  的平移特征量:

$$u_c = u_a$$

$$v_c = \frac{L \times (v_a - v_b)}{L - l}$$

$$w_c = \frac{L \times (w_a - w_b)}{L - l} \quad (7)$$

$E_c$  的旋转特征量:

$$\beta_c = \arctan\left(\frac{v_c - v_a}{L - l}\right) + \beta_a$$

$$\gamma_c = \arctan\left(\frac{w_c - w_a}{L - l}\right) + \gamma_a \quad (8)$$

在旋量模型中, 各量均为微小量, 有:

$$\beta_c = \frac{v_c - v_a}{L - l} + \beta_a$$

$$\gamma_c = \frac{w_c - w_a}{L - l} + \gamma_a \quad (9)$$

根据式(6)~式(9), 可得功能单元  $E_c$ 。

### 2.4 轴系结构分析

俯仰轴系的结构由左右两耳架轴套、轴承、左右横轴、载物法兰和载物框组成, 如图 3 所示。在轴系装配调试时, 工程上通常首先采用千分表测量轴颈处的径向跳动, 预估轴系的运动精度, 当跳动量满足需要时, 进一步采用光电自准直仪对轴系回转误差进行测量。为建立轴系的运动学模型, 首先建立位于测量轴系晃动的自准直仪分划板处的大地坐标系  $o_g$  和用于测量固定端径向跳动的千分表的局部坐标系  $o_d$ , 并建立用于表征各功能单元的局部坐标系, 各功能单元存在的几何误差及其编号如表 1 所示。

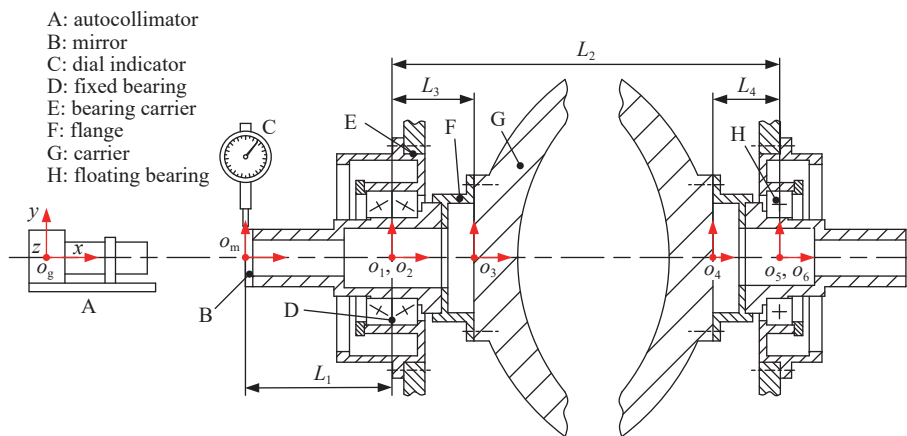


图 3 轴系结构与回转误差测量

Fig. 3 Shaft structure and rotary error measurement

表 1 俯仰轴系几何误差及编号

Tab. 1 Geometric deviation items and numbers of elevation axle

零件名	坐标系	误差项	编号
固定端轴承	$o_1$	$\delta(x), \delta(y), \delta(z), \theta(y), \theta(z)$	1, 2, 3, 4, 5
固定端轴套	$o_2$	$\delta(x), \delta(y), \delta(z), \theta(y), \theta(z)$	6, 7, 8, 9, 10
固定端法兰	$o_3$	$\delta(x), \delta(y), \delta(z), \theta(y), \theta(z)$	11, 12, 13, 14, 15
游动端法兰	$o_4$	$\delta(x), \delta(y), \delta(z), \theta(y), \theta(z)$	16, 17, 18, 19, 20
游动端轴承	$o_5$	$\delta(y), \theta(z)$	21, 22
游动端轴套	$o_6$	$\delta(x), \delta(y), \delta(z), \theta(y), \theta(z)$	23, 24, 25, 26, 27

结构误差从与大地坐标系固连的 U 型架底座出发, 分为固定端传递链和游动端传递链两路: U 型架底座 → 固定端轴承座 → 固定端轴承 → 功能要求; U 型架底座 → 游动端轴承座 → 游动端轴承 → 游动端法兰 → 固定端法兰 → 功能要求。两条传递链合并于游动端轴承处, 形成局部并联结构。功能要求是千分表测头相对于大地坐标系的位置, 通过计算可进一步获得千分表所测得的轴系轴颈处的跳动量。

### 2.5 基于雅可比旋量法的轴系运动建模

以某型光学口径为 650 mm 的光电经纬仪为例, 基于雅可比旋量法的轴系运动建模参数如

表 2 所示。

表 2 轴系运动模型参数

Tab. 2 Shafting motion model parameters

参数名	数值
$E_1$	$[\pm 0.005, \pm 0.020, \pm 0.020, 0, \pm 9.696 \times 10^{-6}, \pm 9.696 \times 10^{-6}]^T$
$E_2$	$[\pm 0.005, \pm 0.005, \pm 0.005, 0, \pm 9.696 \times 10^{-6}, \pm 9.696 \times 10^{-6}]^T$
$E_3$	$[\pm 0.005, \pm 0.005, \pm 0.005, 0, \pm 9.696 \times 10^{-6}, \pm 9.696 \times 10^{-6}]^T$
$E_4$	$[\pm 0.010, \pm 0.010, \pm 0.010, 0, \pm 8.242 \times 10^{-6}, \pm 8.242 \times 10^{-6}]^T$
$E_5$	$[0, \pm 0.010, \pm 0.010, 0, 0, 0]^T$
$E_6$	$[\pm 0.005, \pm 0.020, \pm 0.020, 0, \pm 9.696 \times 10^{-6}, \pm 9.696 \times 10^{-6}]^T$
$L_1$	250 mm
$L_2$	1100 mm
$L_3$	200 mm
$L_4$	150 mm

根据式(1)~式(9), 最终功能要求的计算方法如下:

(1) 分别在  $o_1$  和  $o_6$  局部坐标系下计算固定端轴承的功能要求  $F_1$  和游动端轴承的功能要求  $F_2$ :

$$\begin{aligned} [F_1] &= \begin{bmatrix} J_1^1 & J_2^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [E_1] \\ [E_2] \end{bmatrix} \\ [F_2] &= \begin{bmatrix} J_6^6 & J_5^6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [E_6] \\ [E_5] \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_5$  和  $E_6$  分别为固定端轴承座、固定端轴承和游动端轴承、游动端轴承座的特征旋量;  $J_1^1$  至  $J_6^6$  分别为  $o_1$  和  $o_6$  局部坐标系下特征旋量对应的雅可比矩阵。

(2) 在大地坐标系下由局部并联结构分析法求取最终功能要求  $F$  的误差累积:

$$[F] = \begin{bmatrix} J_{Pa} \\ J_3^1 \\ J_4^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Pa([F_1], [F_2]) \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中:  $Pa$  为局部并联结构的计算方法;  $E_3$  和  $E_4$  分别为游动端法兰和固定端法兰的特征旋量;  $J_3^1$  和  $J_4^1$  为特征旋量对应的雅可比矩阵。

(3) 根据求得的功能要求计算轴颈处的径向跳动  $h_r=v$ 。

### 3 关键误差识别

#### 3.1 基于粒子群算法的误差耦合放大效应分析

轴系中的结构误差在三维空间中是既有大小又有方向的矢量, 在加工装调过程中即使局部精度达到了设计要求, 若不考虑零件间结构误差的耦合放大, 随着装配体零件数目的增多, 累积的误差因耦合放大效应会导致最终的轴系运动精度难以控制。这就需要在装调过程中不断迭代, 以达到最优值。本文通过粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 寻找在装调过程中轴系轴颈处跳动量可能出现的极值。假设轴系零件的加工偏差处于最大极限偏差, 以轴系回转体零件绕转轴不同的安装角度作为粒子在空间中的位置组合, 通过不断迭代组合粒子的空间位置, 利用 PSO 算法搜索轴颈处跳动量可能出现的极值。

图 4 为 PSO 算法的收敛曲线。

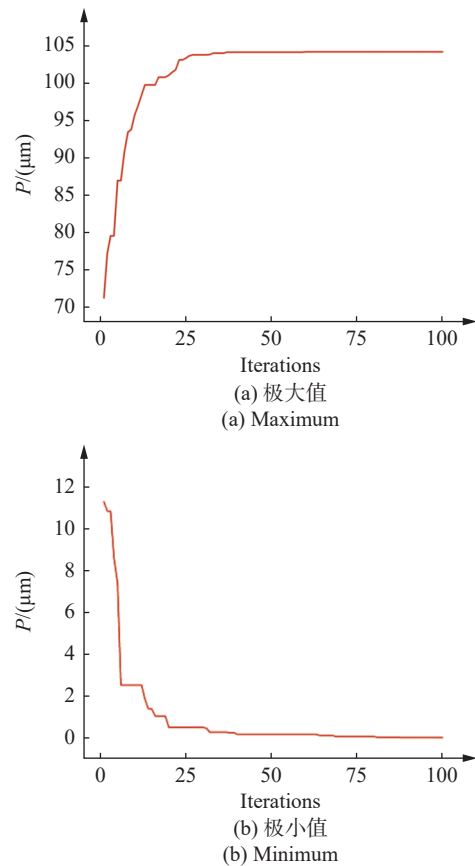


图 4 PSO 收敛曲线

Fig. 4 PSO convergence curve

若没有对光电经纬仪装调过程中的误差耦合放大效应加以控制, 轴系轴颈处产生的最大跳动

接近  $105\ \mu\text{m}$ , 此时的轴系运动精度远不能满足设计要求, 但当考虑到零件偏差的耦合放大效应, 并对此加以优化装调, 理论最优时轴系轴颈处的跳动可以接近于  $0\ \mu\text{m}$ 。

### 3.2 基于敏感性分析的误差定位

轴系结构中不同类型和位置的误差对轴系运动精度的影响不同, 为了在加工装调过程中, 更快地对误差进行识别定位, 本文采用扩展傅立叶敏感性检验 (Extended Fourier Amplitude Sensitive Test, EFAST) 对轴系的几何误差进行辨识, 分析零件结构误差对运动精度的敏感性。根据敏感性分析结果, 在装配过程中对指向精度影响更大的零件装配加以关注, 以提升装配效果。

EFAST 分析结果如图 5 所示, 可见, 俯仰轴固定端处零件的同轴度误差对轴系运动精度的影响最大, 其次是轴系与载物架连接的法兰的平面度误差和游动端零件的同轴度误差。灵敏度分析结果与工程实际基本吻合, 验证了所构造模型的准确性。在光电经纬仪俯仰轴系实际安装过程中, 应重点对以上对运动误差敏感度高的零件装配加以调整。

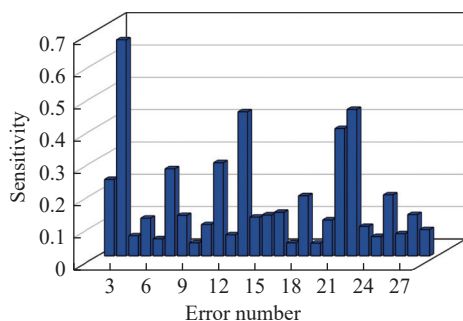


图 5 敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis

## 4 误差识别结果验证

### 4.1 误差定位

以某型光学口径为  $650\ \text{mm}$  的光电经纬仪为例, 装调时千分表的测量结果表明: 跳动以 1 次为主, 跳动量在  $30\ \mu\text{m}$  附近, 光电自准直仪测得此时轴系的最大晃动误差为  $5.76''$  (PV)。依据同型号光电经纬仪轴系的装调经验, 轴系的轴颈处的径向跳动量在  $15\ \mu\text{m}$  以下时, 轴系的运动精度方可满足要求。为追溯轴系晃动误差的来源, 首先使用坐标镗床对尺寸大且较难加工的载物框的螺栓

连接面的平面度和 U 型架左右轴孔的同轴度进行测量, 如图 6 所示, 其次采用三坐标测量仪对左右轴、法兰盘以及轴承的加工尺寸进行测量。测量结果表明各零件的加工偏差均符合设计要求, 但最终轴系运动精度无法达到设计需要, 因此需要对轴系运动误差来源进行进一步定位。

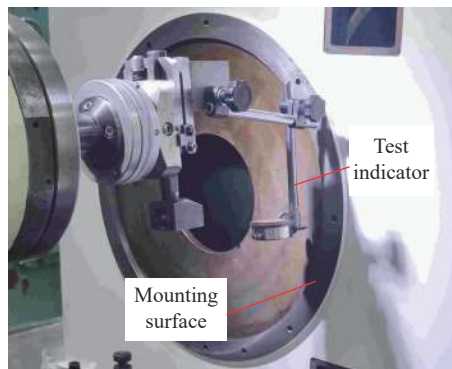


图 6 几何量测量

Fig. 6 Geometric measurement

为进一步定位误差来源, 将测量数据应用于上文所述的轴系运动模型, 并基于 PSO 算法在所有装配组合中搜索是否存在与千分表测得的轴系跳动相吻合的结果。图 7 所示为轴系固定端轴颈处的径向跳动量, 千分表测得的跳动量为转子绕平均轴线的跳动量  $h_a$ , 与模型预测跳动量  $h_i$  之差等于理想轴线与平均轴线的偏心距。因此需要做归一化处理, 将模型预测跳动量  $h_i$  减去偏心距, 处理后的实测值和 PSO 算法搜索到的装配组合的模型预测值基本吻合, 两者间误差的产生原因是没有分离表面加工痕迹所造成的跳动以及轴系的弹性形变, 从而验证了所建立模型的可靠性。综合结构几何量的实际测量结果和模型仿真分析结果知: 各零件的加工偏差均在公差允许范围内; 在 PSO 搜索到的所有装配组合中, 当前的装配组合远没有达到 3.1 节中的理论最优。因此, 轴系运动误差的主要来源是装配过程中各零件的结构误差耦合放大效应。

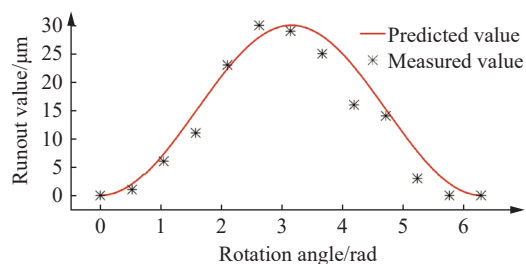


图 7 轴颈跳动

Fig. 7 Journal runout

## 4.2 轴系优化装配

为在装配过程中提高光电经纬仪俯仰轴系的运动精度,验证本文所提方法的有效性,根据测得的轴系零件加工尺寸数据构建各零件的特征旋量。基于 PSO 算法搜索轴颈径向跳动量最小的安装角度组合,搜索到的最优组合的跳动量为  $5\ \mu\text{m}$ ,与 3.1 节理论最优结果存在差异的原因无法对 U 型架和载物框的安装角度进行调整,参与误差耦合相消的零件无法将误差完全消解。

为进一步消解轴系中存在的误差,采用以下装配优化措施:选取易于添加铜箔垫片且对运动误差敏感度高的固定端载物法兰,基于实测数据建立雅可比旋量运动模型,以  $E_3$  单元的  $\beta_3$  和  $\gamma_3$  为自变量,以轴系旋转一周轴颈处的最大径向跳动  $h_{\max}$  为因变量,求解该方程在自变量允许范围内的极小值,求解的三维曲面如图 8 所示。根据所求解的最优装配方案,在固定法兰的螺栓连接处通过加减厚度为  $0.01\ \text{mm}$  的铜箔垫片来调整  $\beta_3$  和  $\gamma_3$ ,以优化装配,如图 9 所示。

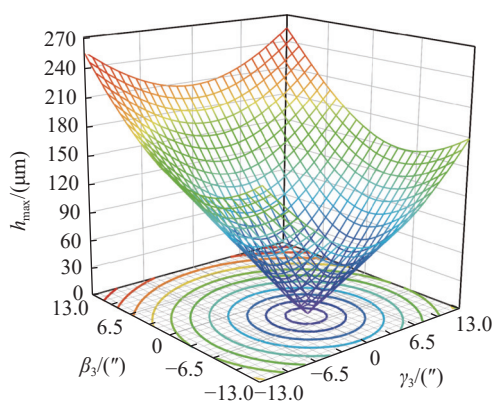


图 8 优化三维曲面图

Fig. 8 Optimized 3D surface

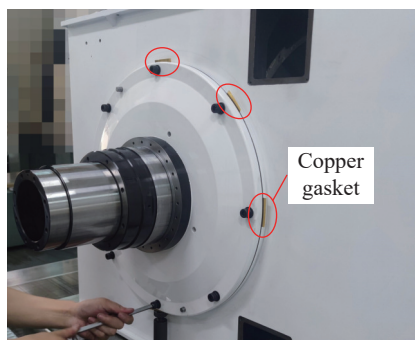


图 9 装配误差补偿

Fig. 9 Assembly error compensation

轴系轴颈处跳动量为  $10\ \mu\text{m}$  左右。利用光电自准直仪对优化装配后的俯仰轴系晃动进行测量,转台俯仰轴系的最大晃动为  $3.91''$  (PV),满足设计指标。经过装配优化后的俯仰轴系晃动相较于优化前的  $5.76''$  (PV)降低了 32.1%。优化装配结果和理论模型计算数据存在差异的原因是在模型中没有考虑到轴系的弹性变形和轴承在运动过程中产生的跳动,结合多台同型号转台的装调经验,优化装配后的轴系运动精度已经达到最优,验证了本文所述优化方法的有效性。

表 3 测量结果

Tab. 3 Measurement results

转角 /rad	跳动量 / $\mu\text{m}$	顺时针			逆时针		
		X/'	Y/'	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X/'	Y/'	$\sqrt{X^2+Y^2}$
0	0	0	0	0	0.5	0.2	0.54
0.52	4	1.7	1.5	2.27	1.9	0.8	2.06
1.05	3	2.2	1.7	2.78	3	1.5	3.35
1.57	5	2.8	1.6	3.22	3.3	1.2	3.51
2.09	2	2.3	0.3	2.32	2.6	-0.1	2.60
2.62	3	1.6	0.2	1.61	1.5	0.5	1.58
3.14	5	0.6	1.9	1.99	0.7	2.1	2.21
3.67	10	1.3	3.3	3.55	1	3.1	3.26
4.19	9	2.1	3.3	<b>3.91</b>	1.9	3	3.55
4.71	7	2.3	2	3.05	2.5	1.7	3.02
5.24	4	1.1	1	1.49	1	0.3	1.04
5.76	1	-0.1	-0.3	0.32	0.1	-0.1	0.14
6.28	1	0.4	-0.1	0.41	0.4	-0.1	0.42

## 5 结论

本文基于雅可比旋量理论,引入了转动副的概念用以描述光电经纬仪等二维转台轴系的实际运动。提出了针对“一端固定、一端游动”轴系的局部并联结构分析方法。基于工程实际需求,建立了用以描述俯仰轴系轴颈处跳动的轴系运动精度模型。以某型  $650\ \text{mm}$  口径光电经纬仪为例,采用扩展傅立叶敏感性检验方法对零件的结构误差对轴系运动精度影响的灵敏度进行分析,并对俯仰轴系进行优化装配。装配结果表明,优化后的俯仰轴系回转精度提高了 32.1%。结合理论分

表 3 为最终优化装配后的测量结果。可见,



析与工程实际,验证了所构造模型的准确性。本模型能够应用于光电经纬仪的俯仰轴系的装配调试,并可推广至二轴或三轴的测量转台,为转台轴系的装配调试和公差设计提供一定的理论根据。

### 参考文献:

- [1] 胡一博,孟立新,白杨杨,等.空间激光通信粗跟踪等效复合控制技术[J].激光与光电子学进展,2023,60(9):0906004.  
HU Y B, MENG L X, BAI Y Y, *et al.*. Coarse tracking equivalent compound control technology for space laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(9): 0906004. (in Chinese).
- [2] 赵怀学,刘波,谢梅林,等.基于多视场拼接光电经纬仪的成像系统指向校正方法[J].光学学报,2022,42(6):0612002.  
ZHAO H X, LIU B, XIE M L, *et al.*. Pointing calibration method for imaging systems of photoelectric theodolites with multi-field of view stitching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0612002. (in Chinese).
- [3] 朱翠汝,孙凤莹,徐文清,等.研制二维直驱跟星转台测量夜晚整层大气透过率[J].光学学报,2021,41(16):1601002.  
ZHU C R, SUN F Y, XU W Q, *et al.*. Developed two-dimensional direct-drive star-following turntable to measure whole-layer atmospheric transmittance at night[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1601002. (in Chinese).
- [4] FU Q, ZHAO F, ZHU R, *et al.*. Research on the intersection angle measurement and positioning accuracy of a photoelectric theodolite[J]. *Frontiers in Physics*, 2023, 10: 1121050.
- [5] PAAR R, ROIĆ M, MARENDIĆ A, *et al.*. Technological development and application of photo and video theodolites[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(9): 3893.
- [6] 于夫男,徐抒岩.应用于 $\Phi 300$  mm平面反射镜的精密二维转台轴系设计[J].光学精密工程,2020,28(5):1075-1082.  
YU F N, XU SH Y. Shafting design for precise two-dimensional turntable applied to  $\Phi 300$  mm plane mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5): 1075-1082. (in Chinese).
- [7] LV T, RUAN P, JIANG K, *et al.*. Modeling and analysis of fast steering mirror disturbance effects on the line of sight jitter for precision pointing and tracking system[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 188: 110002.
- [8] WU SH CH, TAN L Y, YU S Y, *et al.*. Analysis and correction of axis error in periscope-type optical communication terminals[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 46: 127-133.
- [9] ZHANG F R, RUAN P, HAN J F, *et al.*. Analysis and correction of geometrical error-induced pointing errors of a space laser communication APT system[J]. *International Journal of Optomechatronics*, 2021, 15(1): 19-31.
- [10] ZHANG F R, RUAN P, HAN J F. Optical path pointing error and coaxiality analysis of APT system of space laser communication terminal[J]. *Optica Applicata*, 2021, 51(2): 203-222.
- [11] 李翔宇,彭勃,江波,等.基于角接触球轴承的小型经纬仪方位轴倾斜误差修正[J].红外与激光工程,2021,50(12):20210172.  
LI X Y, PENG B, JIANG B, *et al.*. Tilt error correction of minitype theodolite's vertical shaft based on angular contact ball bearings[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 20210172. (in Chinese).
- [12] 江波,周泗忠,姜凯,等.车载经纬仪的垂轴误差分析[J].红外与激光工程,2015,44(5):1623-1627.  
JIANG B, ZHOU S ZH, JIANG K, *et al.*. Analysis of vertical axis error of vehicular theodolite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1623-1627. (in Chinese).
- [13] 江波,梅超,梁元庆,等.基于平面方程旋转变化的车载经纬仪测角误差修正[J].光学学报,2015,35(S1):s112002.  
JIANG B, MEI CH, LIANG Y Q, *et al.*. Angle measurement error correction of vehicle-borne theodolite based on the rotation of plane equation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(S1): s112002. (in Chinese).
- [14] 姜玉鑫,孙建锋,侯培培,等.基于Levenberg-Marquardt算法的旋转双棱镜指向偏差修正[J].中国激光,2023,50(6):0605001.  
JIANG Y X, SUN J F, HOU P P, *et al.*. Correction of pointing deviation of Risley prisms based on Levenberg-Marquardt algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(6): 0605001. (in Chinese).
- [15] LAFOND P, LAPERRIERE L. Jacobian-based modeling of dispersions affecting pre-defined functional requirements of

- mechanical assemblies[C]. *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, IEEE, 1999: 20-25.
- [16] 杨朝晖, 高天石, 李崇赫, 等. 基于新一代几何技术规范的装配误差建模[J/OL]. *计算机集成制造系统*, 2022: 1-14. (2023-04-17) <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20221209.1431.001.html>.  
YANG ZH H, GAO T SH, LI CH H, *et al.*. Assembly error modeling based on geometrical product specifications (GPS)[J/OL]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022: 1-14. (2023-04-17) <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20221209.1431.001.html>. (in Chinese).
- [17] XI Y, GAO ZH Y, CHEN K, *et al.*. Error propagation model using Jacobian-Torsor model weighting for assembly quality analysis on complex product[J]. *Mathematics*, 2022, 10(19): 3534.
- [18] CHEN H, JIN S, LI ZH M, *et al.*. A solution of partial parallel connections for the unified Jacobian-Torsor model[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 91: 39-49.
- [19] 戴宏伟, 陈琨, 于慧, 等. 雅可比旋量的装配体并联结构公差分析方法研究[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(5): 156-165,222.  
DAI H W, CHEN K, YU H, *et al.*. Tolerance analysis of partial parallel assemblies based on Jacobian-Torsor model[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(5): 156-165,222. (in Chinese).

#### 作者简介:



江 波(1981—),男,湖北武汉人,博士,正高级工程师,2015年于中国科学院大学获得工学博士学位,主要从事光电测控技术、微小位移及角度驱动技术、同步辐射技术等方面的研究。E-mail: [ilysay@opt.ac.cn](mailto:ilysay@opt.ac.cn)