

基于全局优装法的共轴光学系统装调研究*

刘子建[†], 易广威

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:以共轴光学系统中圆柱形零件圆环形装配平面为研究对象,研究了装调中多零件对接时基准轴的角偏误差传递与补偿原理.首先分析了共轴光学系统的实际装调方法和典型定中心基准轴传递路径.然后基于误差测量和最小二乘法,确定拟合圆环形装配平面方程.运用几何变换理论得到精确描述单个零件底面和顶面的角偏误差的变换矩阵,以及两零件装配时结合面上两坐标系间的变换矩阵,建立了多零件装配时始末法线角偏误差与相对装入角度的显式函数关系.针对不同类型的定中心基准轴传递路径,采用不同的遗传算法方案实现了对始末法线角的优化,提出了求解相对装入角度允许误差的方法.最后提出了一种基于全局优装法的共轴光学系统装调方法,并以某共轴光学系统为例,验证了本文方法的可行性与实用性.

关键词:共轴光学系统;全局优化;光学装调;定中心基准轴;遗传算法

中图分类号:TN206

文献标志码:A

Research on Alignment of Coaxial Optical System Based on Global Optimization Alignment Method

LIU Zijian[†], YI Guangwei

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Taking the ring assembly plane of cylinder part of coaxial optical system as the research object, the principle of tilt error transfer and compensation of fiducial axis in the case of multiple parts assembling was studied. Firstly, optical alignment of coaxial optical system and typical centering fiducial axis transfer paths were analyzed. And then error measurement and Least Square Method were conducted to fit the ring assembly plane of cylinder part and to get the coefficients of least-squares plane equation. By the theory of 3D geometry transformation, the transformation matrices precisely describing the tilt error of bottom face and top face in a single part, the transformation matrices of two coordinate systems of assembly joint surface in the case of two parts assembling and the function relationship between the angle between two Normal Lines of Initial Bottom Surface and End Top Surface (ANLIBSETS) and the Relative Load Angle (RLA) in the case of multiple parts assembling were established. Aiming at different types of centering fiducial axis transfer paths and applying different genetic algorithm plans, the optimization of ANLIBSETS was achieved. The method of solving the error of RLA was proposed. Finally, an optical a-

* 收稿日期:2017-03-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475152,51175161),National Natural Science Foundation of China(51475152,51175161)

作者简介:刘子建(1953-),男,湖南常德人,博士,教授,博士研究生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: zijianliu@hnu.edu.cn

alignment method of coaxial optical system based on global optimization alignment method was proposed. The feasibility and practicability of this method are verified by an example of a coaxial optical system.

Key words: coaxial optical systems; global optimization; optical alignment; centering fiducial axis; genetic algorithm

随着先进光学检测和计算机辅助装调(CAA-Computer Aided Alignment)等技术的发展,国内外学者对共轴光学系统装调技术的研究不断深入.廖志波等^[1]利用CAA技术,通过设置补偿环节对一次装调后透射式共轴光学系统的初级像差进行调整.郭夏锐等^[2-3]通过分析透射式共轴光学系统各光学元件光轴一致性误差对光学系统像差的影响,提出一种基于像差分析和仿真预估指导光轴一致性装调的方法.Rimmer M P^[4]提出一种利用阻尼最小二乘法进行测量,并比较射线跟踪波前之间的差异,通过测量系统波前均方根来确定对透镜系统定心装调的方法.栗孟娟等^[5]将光学设计和装调设计相结合,对装调公差进行再分配和补偿.

以上研究直接关注共轴光学系统的光轴一致性误差对系统像差的影响,进而求解光学系统失调量,以此指导系统的装调.通过系统像差,理论上可获得各光学元件光轴与基准轴偏角的调整量,然而,由于共轴光学系统的成像对透镜的倾斜误差极为敏感,目前的装调工艺还难以实现对各光学元件轴偏角进行精准装调,尤其对于实际应用中的多个光学元件均含有加工误差的复杂系统,难以保证通过装调可以获得性能最佳的光学系统.

鉴于任何光学系统中参与装配的零件均含有加工误差,如共轴光学系统的透镜、镜组部件、镜筒、镜框和压圈等,零件通过彼此的装配平面相互贴合形成结合面以实现装配,结合面可以传递和补偿误差^[6],因而结合面误差是决定光学系统装调精度的内在因素.本文从共轴光学系统零件的装配平面入手,提出圆环形装配平面的拟合方法;通过研究各结合面误差的传递原理,建立共轴光学系统装配误差优化补偿的目标函数;针对不同装配方法和装配条件,提出对应的遗传算法,得到符合共轴光学系统装调精度要求的误差补偿优化解,最后总结出一种精确量化的共轴光学系统全局优化装调方法.应用本文提出的精确量化装调方法,不仅可以大幅提高共轴光学系统装调的效率,理论上也可以获得最佳成像质量的共轴光学系统.

1 定中心基准轴传递

在共轴光学系统装调中,以某一基准轴为参照

进行的减小透镜光轴偏差的操作称为定中心.每一步装调都考虑基准轴误差的影响,称为定中心基准轴传递,其含义是各装调的基准轴误差在定中心操作中均处于某一规定的精度范围内,其中保证初始零件和末端零件基准轴的同轴程度尤为重要.如果定中心基准轴传递状态被破坏,将严重影响光学系统分辨力、畸变和对对比度等性能^[7].

1.1 光学系统的装调方法

光学系统的装调方法主要有如下三种:

1)随机装调法,一种完全依赖于人工经验的装调方法,效率低,难以达到高精度.

2)逐步优装法,即通过调节每个装调工序装入零件的装入角度,使得本工序结束后当前光轴角偏差误差最小或光学系统成像质量最优.

3)全局优装法,建立误差传递模型,通过优化算法确定每个工序装入零件后的合理光轴角偏误差,保证装调获得的最终光学系统成像质量总体最优(或满足要求).

随机装调法需要反复试装多次还难以获得理想成像质量.逐步优装法可使每一工序完成后获得相对最优的成像效果,而系统的最终成像质量未必是最优,装调效率也难以提高.全局优装法着眼全局,保证光学系统最终的成像质量最优.然而,如果不充分考虑结合面误差因素,将导致现有的全局优装法原理上可行,实际装调可操作性不强^[8].针对这一问题,本文提出一种考虑每个工序装入零件的结合面误差,通过建立误差补偿优化算法,直接利用零部件加工误差补偿光学系统角偏误差的光学系统全局优装方法,以期在保证总体成像质量最佳的前提下,提高光学系统装调的效率和可操作性.

1.2 共轴光学系统装调的定中心基准轴传递路径

光学系统装调过程的控制可以概括为:首先得到待控制的目标值与装调变量的关系,然后通过一定的优化方法,得到使目标值满足要求的一组变量值.在共轴光学系统装调中,此问题的变量即为系统中若干组装配对接零件间的相对装入角度,待控制的目标值即为光学系统成像质量.现有技术可通过装调使得各透镜光轴相对其定中心基准轴的角偏误差极小,据此可假设如果保证了定中心基准轴传递的准确性,则光学系统的最终成像质量将最优.

基于镜组部件结构的两种共轴光学系统典型实例^[9]如图1和图2所示. 现分析镜组部件之间的装配关系, 可以得出3种定中心基准轴传递路径.

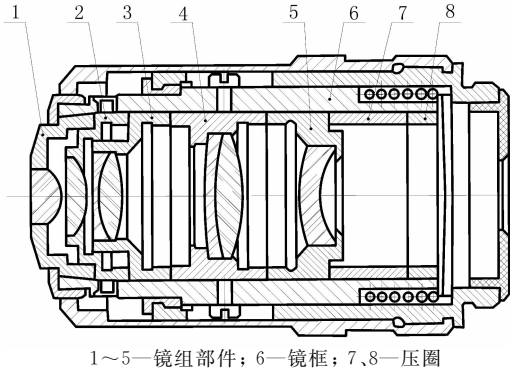


图1 某显微镜的40×无穷远平场物镜

Fig. 1 A 40×infinity flat-field objective in a microscope

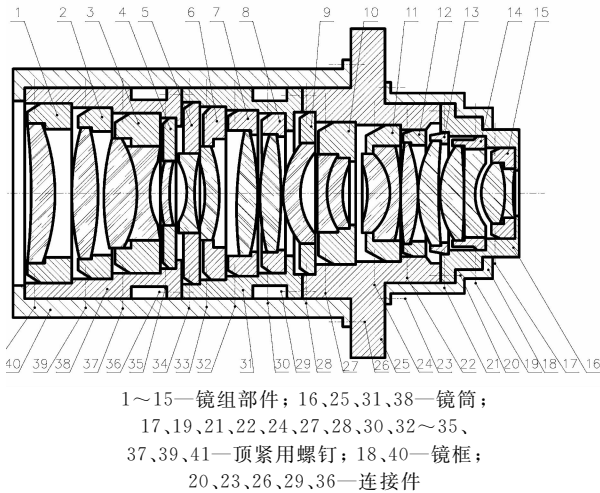


图2 某亚微米光刻物镜

Fig. 2 A submicron lithography objective

1) 第一类传递路径. 如图1所示的镜组部件1~5均为两两直接接触, 装调时两镜组部件可以绕基准轴线的任意角度(称为装入角度)装入和固定, 传递路径由初始镜组部件到末端镜组部件, 如由镜组部件1到镜组部件5.

2) 第二类传递路径. 如图2所示, 各镜组部件的端面与对应镜筒内台阶的圆环形平面结合, 镜组间互不接触. 此时, 定中心基准轴传递路径由初始镜筒传递到末端镜筒, 如由镜筒38到镜筒16. 由于两镜筒之间通常采用螺栓连接, 镜筒的装入角度可取值范围受到螺栓数量及布置方式的限制.

3) 第三类传递路径. 如图2所示, 从一个镜筒中的镜组部件传递到另一个镜筒中的镜组部件. 镜组部件可采用任意装入角度与镜筒装配, 两镜筒装配时镜筒装入角度可取值范围受连接方式限制.

以上三种传递路径的基准轴传递本质上均属于圆柱形零件的定中心对接问题. 共轴光学系统的机械误差来源主要包括零件加工误差和装配过程误差两方面^[10]. 这些误差综合表现为零件基准轴间的倾斜和平移误差^[11]. 受到径向平移误差的影响, 基准轴间的平移误差需要通过调整工装来控制. 而镜筒、镜框的加工误差和装配过程误差将直接导致基准轴间的角偏误差, 因此本文主要研究角偏误差.

对于一条确定的传递路径, 指定路径开始的第一个装配件的底面为初始零件端, 另一端为顶面, 类似地也可定义参与装配的所有零件的底面和顶面. 设镜筒38先行装配, 角偏误差示意图如图3所示, 图中以点画线注明了各镜筒基准轴, 以细实线注明了底面和顶面上的法线.

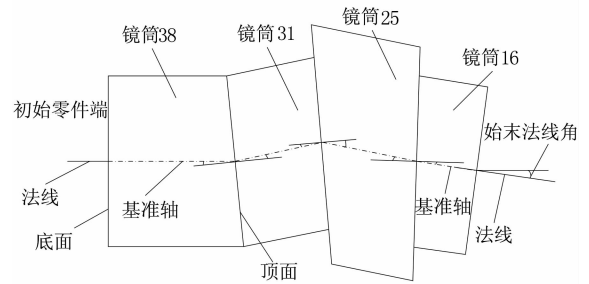


图3 传递路径角偏误差示意图

Fig. 3 Tilt error of transfer path

一般地, 各零件装配平面上的法线与基准轴具有一定角偏误差. 但在高精度共轴光学系统中, 为保证装配精度, 会对初始零件底面和末端零件顶面进行精磨修正, 使得这些面上通过轴心点的法线与零件的基准轴尽可能重合. 据此, 在本文研究中假设传递路径中初始基准轴和末端基准轴的夹角等同于初始零件底面法线与末端零件顶面法线间的夹角, 简称为始末法线角. 基于这一假设, 借助于结合面控制始末法线角偏差满足一定精度要求, 达到定中心基准轴准确传递的目的.

2 圆环形装配平面的最小二乘法模拟

镜组部件和镜筒为圆柱(筒)形零件, 研究其加工误差导致的角偏误差的传递, 重点要讨论装配平面表面误差及由其引起的法线角偏误差.

2.1 零件表面误差的描述方法

零件的真实截面轮廓形状较为复杂, 按照波距划分, 大于10 mm的为形状误差; 处于1~10 mm之间的为表面波纹度; 小于1 mm的为表面粗糙度. 如图4所示.

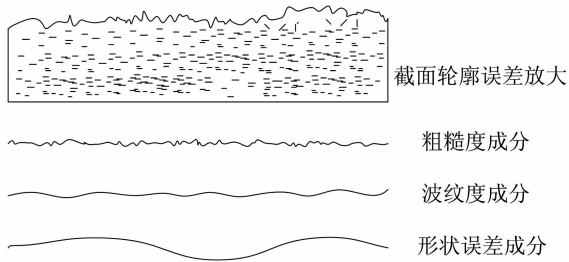


图4 零件的截面轮廓形状

Fig. 4 The cross section contour of a part

在零件表面有规律的取若干点进行拟合可得到零件表面的拟合面,由拟合面的平面方程参数可反映真实面相对理想面的位置误差,如图5所示.目前对结合面接触模型的研究均以最小二乘法作为等效接触面的基准面,如浙江大学的裘迪^[12]即利用最小二乘拟合面计算实际零件表面相对于理想表面的夹角.而真实表面的粗糙度和波纹度,以及法向载荷主要影响的是面面贴合的真实定位距离^[13].由于基于最小二乘法的平面拟合综合考虑了三种表面误差成分,故可用最小二乘拟合面替代装配平面.

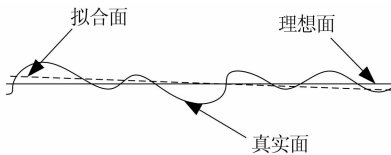


图5 零件拟合面、真实面与理想面

Fig. 5 The fitting surface, real surface and imaginary surface of a part

共轴光学系统的两个零件进行装配时,假设施加均匀的装配连接力,则两零件的拟合结合面理论上应与两零件的拟合面平行,随着装配连接力大小的变化,两零件的拟合面之间的距离误差,即装配过程误差也会发生变化.本文暂不考虑装配连接力的影响,假设装配过程误差为零,则两零件表面的拟合面在装配操作完成后重合形成结合面.

2.2 基于最小二乘法的圆环形平面拟合

鉴于镜筒和镜组部件的装配结合面均为圆环形平面,采用高精度圆柱度仪测量垂直度误差的原理,可在对零件调平调心(使零件基准轴与圆柱度仪主轴重合)后,测量圆环形平面上任意一点的坐标.根据国家标准^[14]对圆环形平面测量布点的规定,在被测面上选取半径差为 r_0 的 m 个同心圆,每个圆上选取等距离的 t 个被测点,如图6所示.

图6中的任意一个被测点可用柱面坐标表示为 $P_{ij}(r_i, \theta_j, z_{i,j})$,其中 $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq t, r_i = r_1 + (i-1)r_0, \theta_j = 2\pi(j-1)/t$.将被测点的柱面坐标表示成空间直角坐标(圆柱度仪的测量坐标^[15])表

示为 $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$,则

$$\begin{cases} x_{i,j} = r_i \cos \theta_j = [r_1 + (i-1)r_0] \cos \frac{2\pi(j-1)}{t} \\ y_{i,j} = r_i \sin \theta_j = [r_1 + (i-1)r_0] \sin \frac{2\pi(j-1)}{t} \end{cases} \quad (1)$$

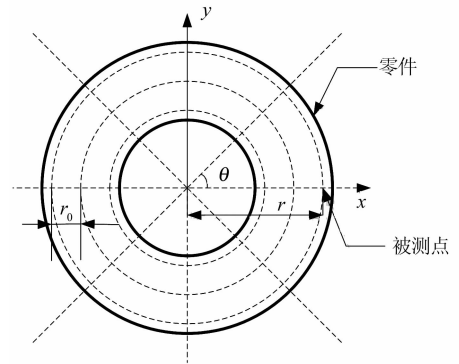


图6 圆环形平面被测点

Fig. 6 The measured points of ring plane

利用测量的数据进行最小二乘法拟合^[16],可得到零件装配平面的拟合平面方程.设平面方程为 $a_0x + b_0y + c_0z + d_0 = 0$,其法线向量为 $[a_0 \ b_0 \ c_0]$.平面方程也可写成 $z = ax + by + c$.对 $s = m \cdot t$ 个被测量点 $P_{i,j}$, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, t$,记为 $(x_g, y_g, z_g), g = 1, 2, \dots, s$,分别对应 $(x_{1,1}, y_{1,1}, z_{1,1}), (x_{1,2}, y_{1,2}, z_{1,2}), \dots, (x_{1,t}, y_{1,t}, z_{1,t}), (x_{2,1}, y_{2,1}, z_{2,1}), (x_{2,2}, y_{2,2}, z_{2,2}), \dots, (x_{2,t}, y_{2,t}, z_{2,t}), \dots, (x_{m,1}, y_{m,1}, z_{m,1}), (x_{m,2}, y_{m,2}, z_{m,2}), \dots, (x_{m,t}, y_{m,t}, z_{m,t})$.

用上述 s 组数据拟合出最小二乘平面 $z = ax + by + c$,各被测点 (x_g, y_g, z_g) 到最小二乘平面对应点 (x_g, y_g, z) 距离的平方和须最小,即最小二乘法拟合平面的目标函数是

$$J(a, b, c) = \min \sum_{g=1}^s [z_g - (ax_g + by_g + c)]^2 \quad (2)$$

此时必须满足

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial a} = -2 \sum_{g=1}^s [z_g - (ax_g + by_g + c)] \cdot x_g = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial b} = -2 \sum_{g=1}^s [z_g - (ax_g + by_g + c)] \cdot y_g = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial c} = -2 \sum_{g=1}^s [z_g - (ax_g + by_g + c)] = 0 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)展开化简可得其矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} \sum_{g=1}^s x_g^2 & \sum_{g=1}^s x_g y_g & \sum_{g=1}^s x_g \\ \sum_{g=1}^s x_g y_g & \sum_{g=1}^s y_g^2 & \sum_{g=1}^s y_g \\ \sum_{g=1}^s x_g & \sum_{g=1}^s y_g & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{g=1}^s x_g z_g \\ \sum_{g=1}^s y_g z_g \\ \sum_{g=1}^s z_g \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于所有被测点在 xOy 面上的投影关于 x 轴、 y 轴对称(此时 t 需为正偶数), $\sum_{g=1}^s x_g = 0$, $\sum_{g=1}^s y_g = 0$, $\sum_{g=1}^s x_g y_g = 0$. 式(4)变为

$$\begin{bmatrix} \sum_{g=1}^s x_g^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sum_{g=1}^s y_g^2 & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{g=1}^s x_g z_g \\ \sum_{g=1}^s y_g z_g \\ \sum_{g=1}^s z_g \end{bmatrix} \quad (5)$$

解此方程组易得平面方程的系数为

$$\begin{aligned} a &= \sum_{g=1}^s x_g z_g / \sum_{g=1}^s x_g^2, \\ b &= \sum_{g=1}^s y_g z_g / \sum_{g=1}^s y_g^2, c = \sum_{g=1}^s z_g / s. \end{aligned} \quad (6)$$

$z = ax + by + c$ 表示的是零件处于圆柱度仪测量状态中时被测装配平面的拟合方程,最小二乘面的法线向量为 $\mathbf{K} = [a \ b \ -1]$. \mathbf{K} 能表示圆柱形零件圆环装配平面形状误差导致的其相对圆柱形零件基准轴的垂直度位置误差,利用其可求得参与装配零件底面和顶面法线间的角偏误差(包括大小和方位).

3 始末法线角与相对装入角度的关系

建立装配体关于每个零件装入角度的角偏误差传递模型的主要步骤为:设参与装配的圆柱形零件共有 n 个,在第 k 个零件($k = 1, 2, \dots, n$)底面的拟合平面上建立坐标系 F_k ,顶面的拟合平面上建立坐标系 F'_k .始末法线角为考虑了每一步装配后 F_1 的 z_1 轴与 F'_n 的 z'_n 轴的夹角,于是先要求解 z'_n 轴向量在 F_1 中的表示,为此需求得从 F_1 到 F'_n 的每一步装配变换矩阵^[15],具体方法是先求任一零件 k 的 F_k 到 F'_k 的变换矩阵 \mathbf{T}'_k ,然后求零件 k 和零件 $k+1$ 装配时 F'_k 到 F_{k+1} 的变换矩阵 \mathbf{T}_k .由 \mathbf{T}'_k 和 \mathbf{T}_k 即可求得 F_1 到 F'_n 的总变换矩阵 \mathbf{T} ,利用 \mathbf{T} 可求得 z'_n 轴向量和 z_1 轴向量在 F_1 中的表示,从而建立始末法线

角 φ_n 的计算模型.

3.1 零件底面到顶面的变换矩阵计算

本文所涉及的绕坐标轴的旋转变换矩阵,其中旋转角度均为从坐标轴正方向向负方向看去,逆时针方向旋转取正号,顺时针方向取负号.空间任意点绕坐标轴的变换矩阵为^[17]:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_y &= \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_z &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

设参与装配的圆柱形零件共有 n 个,则由式(6)可得第 k 个零件($k = 1, 2, \dots, n$)底、顶面拟合平面方程的系数为 $a_k, b_k, c_k, a'_k, b'_k, c'_k$.由于本文关注零件基准轴线角偏问题,暂不考虑零件长度方向的误差,为了清晰起见,对零件 k ,将按照 2.2 节求取的底面和顶面的拟合平面分别平移,使其几何中心与圆柱度仪测量坐标系 $F(O-xyz)$ 的原点 O 重合,此时底面和顶面的拟合平面方程系数分别为 $a_k, b_k, 0$ 和 $a'_k, b'_k, 0$.基于第 1 节关于精磨修正的说明,令初始零件底面和末端零件顶面与 xOy 面重合,有 $a_1 = b_1 = c_1 = 0, a'_n = b'_n = c'_n = 0$.

平移后 F_k 和 F'_k 的原点即为坐标系 F 的原点 O , y_k 轴方向为零件 k 底面最低点指向最高点(测量零件误差后将 y_k 轴标记出来), x_k 轴为底面与 xOy 面的交线, z_k 轴由右手定则确定.同理可得 F'_k 的 z'_k, y'_k, x'_k 轴.如图 7 给出 F_k, F'_k 建立的示意图(为清楚起见,图中 F'_k 还未平移至 F 原点).

由底面拟合平面方程 $a_k x + b_k y - z = 0$ 可得 z_k 轴向量为 $\mathbf{K}_k = [-a_k \ -b_k \ 1]$,因为 x_k 轴在 xOy 面上且与 z_k 轴垂直,则可求得 x_k 轴向量为 $\mathbf{I}_k = [b_k \ -a_k \ 0]$,由 \mathbf{I}_k 和 \mathbf{K}_k 可得 y_k 轴向量 $\mathbf{J}_k = [a_k \ b_k \ a_k^2 + b_k^2]$.同理可求得 F'_k 过原点的三个坐标轴向量.

F_k 和 F'_k 的坐标轴向量在 F 中的表示可分别以矩阵形式记为

$$\begin{aligned} [\mathbf{I}_k \ \mathbf{J}_k \ \mathbf{K}_k]^T &= \begin{bmatrix} b_k & -a_k & 0 \\ a_k & b_k & a_k^2 + b_k^2 \\ -a_k & -b_k & 1 \end{bmatrix} \\ [\mathbf{i}'_k \ \mathbf{j}'_k \ \mathbf{k}'_k] &= \begin{bmatrix} b'_k & -a'_k & 0 \\ a'_k & b'_k & a_k'^2 + b_k'^2 \\ -a'_k & -b'_k & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

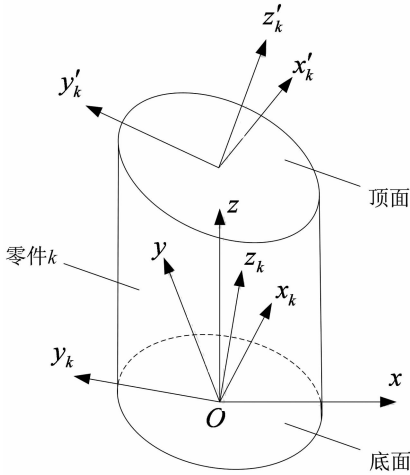


图 7 单个零件误差
Fig. 7 Error in a single part

间的关系,成立条件是 a_k, b_k 不同时为 0 或 a'_k, b'_k 不同时为 0. 由此可直接计算出底面法线与顶面法线之间夹角的大小,但不能得出偏角的方位. 鉴于 F_k 和 F'_k 相对 F 的位置是不确定的,求解 T'_k 时采用了对 F_k 和 F'_k 进行几何变换的方法. 令 F_k 绕 F 坐标系的 z 轴和 x 轴先后旋转 γ_k 角和 α_k 角,使 F_k 与 F 重合(即两坐标系原点重合,坐标轴方向分别相同),由式(7)和式(8)可得

$$\begin{aligned} \sin\gamma_k &= \frac{a_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}}, & \cos\gamma_k &= \frac{b_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}}, \\ \sin\alpha_k &= \frac{-\sqrt{a_k^2 + b_k^2}}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2 + 1}}, & \cos\alpha_k &= \frac{1}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2 + 1}}. \end{aligned} \quad (9)$$

同一零件的顶面坐标系随底面坐标系进行相同变换,由式(7)~(9),此时顶面坐标系 F'_k 的三个坐标轴向量在坐标系 F 中可表示为

式(8)是以拟合平面方程系数表示的坐标轴之

$$\begin{aligned} & [\mathbf{I}'_{k1} \ \mathbf{J}'_{k1} \ \mathbf{K}'_{k1}]^T = \\ & \begin{bmatrix} (a_k a'_k + b_k b'_k) \sqrt{a_k^2 + b_k^2 + 1} & a_k b'_k - a'_k b_k & -(a_k b'_k - a'_k b_k) \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ (a'_k b_k - a_k b'_k) \sqrt{a_k^2 + b_k^2 + 1} & a_k a'_k + b_k b'_k + (a_k^2 + b_k^2)(a_k'^2 + b_k'^2) & (a_k'^2 + b_k'^2 - a_k a'_k - b_k b'_k) \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ (a_k b'_k - a'_k b_k) \sqrt{a_k^2 + b_k^2 + 1} & a_k^2 + b_k^2 - a_k a'_k - b_k b'_k & (a_k a'_k + b_k b'_k + 1) \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

将 $[\mathbf{I}'_{k1} \ \mathbf{J}'_{k1} \ \mathbf{K}'_{k1}]^T$ 内的三个坐标轴向量单位化,得到 $[\mathbf{I}'_{k2} \ \mathbf{J}'_{k2} \ \mathbf{K}'_{k2}]^T$, 即

$$[\mathbf{I}'_{k2} \ \mathbf{J}'_{k2} \ \mathbf{K}'_{k2}]^T = \left[\frac{\mathbf{I}'_{k1}}{\|\mathbf{I}'_{k1}\|} \ \frac{\mathbf{J}'_{k1}}{\|\mathbf{J}'_{k1}\|} \ \frac{\mathbf{K}'_{k1}}{\|\mathbf{K}'_{k1}\|} \right]^T \quad (11)$$

变换后的 F'_k 也可由 F_k 相对于 F_k 绕 x_k 轴旋转

α'_k 角后,再绕未旋转 α'_k 角前的 y_k 轴旋转 β'_k 角,再绕未旋转 α'_k 和 β'_k 角前的 z_k 轴旋转 γ'_k 角后得到. 鉴于此时 F_k 与 F 处于重合位置,故对 F_k 坐标轴单位向量进行变换的结果与式(11)结果相等,由式(7)可将此过程表示为

$$\begin{aligned} [\mathbf{I}'_{k2} \ \mathbf{J}'_{k2} \ \mathbf{K}'_{k2}]^T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha'_k & \sin\alpha'_k \\ 0 & -\sin\alpha'_k & \cos\alpha'_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta'_k & 0 & -\sin\beta'_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta'_k & 0 & \cos\beta'_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma'_k & \sin\gamma'_k & 0 \\ -\sin\gamma'_k & \cos\gamma'_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} \cos\beta'_k \cos\gamma'_k & \cos\beta'_k \sin\gamma'_k & -\sin\beta'_k \\ \cos\gamma'_k \sin\alpha'_k \sin\beta'_k - \cos\alpha'_k \sin\gamma'_k & \cos\alpha'_k \cos\gamma'_k + \sin\alpha'_k \sin\beta'_k \sin\gamma'_k & \cos\beta'_k \sin\alpha'_k \\ \sin\alpha'_k \sin\gamma'_k + \cos\alpha'_k \cos\gamma'_k \sin\beta'_k & \cos\alpha'_k \sin\beta'_k \sin\gamma'_k - \cos\gamma'_k \sin\alpha'_k & \cos\alpha'_k \cos\beta'_k \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

也就是说,此时如果设 $P(x', y', z')$ 为 F'_k 中的任意点,该点在 F 中的表示为

$$[x \ y \ z] = [x' \ y' \ z'] [\mathbf{I}'_{k2} \ \mathbf{J}'_{k2} \ \mathbf{K}'_{k2}]^T \quad (13)$$

则 F'_k 变换至 F_k 的变换矩阵为

$$T'_k = \begin{cases} \left[\frac{\mathbf{I}'_1}{\|\mathbf{I}'_1\|} \ \frac{\mathbf{J}'_1}{\|\mathbf{J}'_1\|} \ \frac{\mathbf{K}'_1}{\|\mathbf{K}'_1\|} \right]^T, & k = 1; \\ [\mathbf{I}'_{k2} \ \mathbf{J}'_{k2} \ \mathbf{K}'_{k2}]^T, & k = 2, 3, \dots, n-1; \\ \left[\left[\frac{\mathbf{I}'_n}{\|\mathbf{I}'_n\|} \ \frac{\mathbf{J}'_n}{\|\mathbf{J}'_n\|} \ \frac{\mathbf{K}'_n}{\|\mathbf{K}'_n\|} \right]^T \right]^{-1}, & k = n. \end{cases} \quad (14)$$

式中,当 $k=1$ 或 $k=n$ 时,由于设置 $a_1=b_1=0$, $a'_n=b'_n=0$, \mathbf{T}'_k 表达式是特殊的. 由式(8), (12), (13)和(14)可知 \mathbf{T}'_k 中各元素是由 a_k , b_k , a'_k 和 b'_k 表示的,即 \mathbf{T}'_k 只与零件装配平面的加工误差有关,在光学系统的装调中每一个零件的 \mathbf{T}'_k 是确定的.

3.2 始末法线角的计算模型

零件 k 和零件 $k+1$ 装配时,零件 k 顶面坐标系 F'_k 和零件 $k+1$ 底面坐标系 F_{k+1} , 原点重合, z'_k 轴和 z_{k+1} 轴重合, $x'_k O_k y'_k$ 面与 $x_{k+1} O_{k+1} y_{k+1}$ 面共面,组成结合面. 但 x'_k 轴与 x_{k+1} 轴, y'_k 轴与 y_{k+1} 轴不一定重合,设 y'_k 轴与 y_{k+1} 轴间的夹角为 θ_k , 它也是零件相对装入角度,如图 8 所示(为清楚起见,图中各坐标系还未平移至 F 原点).

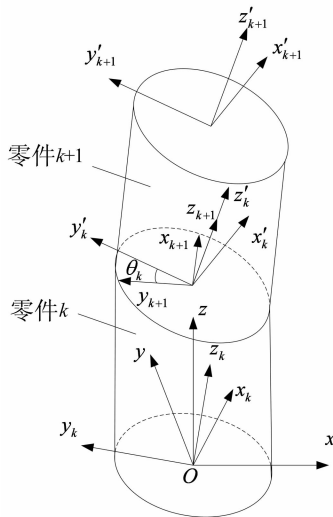


图 8 两零件相对装入角度示意

Fig. 8 Relative load angle between two parts

显然 F_{k+1} 可由 F'_k 的位置相对于 F'_k 绕 z'_k 轴旋转 θ_k 得到,由式(7)可知, F_{k+1} 到 F'_k 的变换矩阵为

$$\mathbf{T}_k = \begin{bmatrix} \cos \theta_k & \sin \theta_k & 0 \\ -\sin \theta_k & \cos \theta_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad k=1, 2, \dots, n-1 \quad (15)$$

由式(15)可知, F'_k 到 F_{k+1} 的变换矩阵 \mathbf{T}_k 只与 θ_k 有关. θ_k 是可以根据装调需要改变的,而且改变 θ_k 即可调整零件 k 和零件 $k+1$ 基准轴间的角偏差,从而利用包含有圆环形装配平面加工误差的拟合平面实现相邻零件的角偏差误差补偿, θ_k 角即为控制装调的角度.

n 个零件装配时,设第 n 个零件顶面法线向量在第 n 个零件顶面坐标系 F'_n 中的表示为 $\mathbf{K}^n_n = [0 \ 0 \ 1]$ (\mathbf{K}^n_n 下标指在 F'_n 中表示,上标指第 n 个零

件顶面法线向量),由式(14)可得其在第 n 个零件底面坐标系 F_n 中的表示为 $\mathbf{K}^n_n = \mathbf{K}^n_n \mathbf{T}'_n$,再由式(15)可得其在第 $n-1$ 个零件顶面坐标系 F'_{n-1} 中的表示为 $\mathbf{K}^n_{(n-1)'} = \mathbf{K}^n_n \mathbf{T}'_{n-1} = \mathbf{K}^n_n \mathbf{T}'_n \mathbf{T}'_{n-1}$. 以此类推, F_1 到 F'_n 的总变换矩阵为

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}'_n \mathbf{T}'_{n-1} \mathbf{T}'_{n-2} \cdots \mathbf{T}'_2 \mathbf{T}'_1 \mathbf{T}'_1 \quad (16)$$

由式(14)~(16)可知, \mathbf{T} 可由 \mathbf{T}'_k ($k=1, 2, \dots, n$) 和 \mathbf{T}_k ($k=1, 2, \dots, n-1$) 求得,而 \mathbf{T}'_k 是各元素为常数的矩阵, \mathbf{T}_k 只与 θ_k 有关,所以 \mathbf{T} 也只与 θ_k 有关.

第 n 个零件顶面法线向量在第 1 个零件底面坐标系 F_1 中的表示 \mathbf{K}^n_1 为

$$\mathbf{K}^n_1 = \mathbf{K}^n_n \mathbf{T} = [n_1 \quad n_2 \quad n_3] \quad (17)$$

显然, \mathbf{K}^n_1 仍为单位向量,则 n_1 、 n_2 和 n_3 为第 n 个零件顶面法线相对于坐标系 F_1 的方向余弦. 又因为 z_1 轴向量在 F_1 中的表示为 $\mathbf{K}^1_1 = [0 \ 0 \ 1]$, 则 n 个零件装配的始末法线角的余弦值为

$$\cos \langle \mathbf{K}^1_1, \mathbf{K}^n_1 \rangle = \frac{|\mathbf{K}^1_1 \cdot \mathbf{K}^n_1|}{|\mathbf{K}^1_1| |\mathbf{K}^n_1|} = n_3 \quad (18)$$

式中, \mathbf{K}^1_1 指初始零件底面法线在坐标系 F_1 中的表示. 因为始末法线角十分小,可以认为其值等于其正弦值,由此, n 个零件装配的始末法线角 φ_n 的计算模型为

$$\varphi_n = \sin \langle \mathbf{K}^1_1, \mathbf{K}^n_1 \rangle = \sqrt{1 - n_3^2} \quad (19)$$

特别的,利用上述思路,设想一个装配体只包含零件 k 和零件 $k+1$,令零件 k 底面和零件 $k+1$ 顶面的拟合平面系数均为 0,求得此装配体始末法线角为 $\varphi_{k, (k+1)}$,即为零件 k 和零件 $k+1$ 的基准轴夹角,利用 $\varphi_{k, (k+1)}$ 可对相邻零件的基准轴夹角进行控制.

显然始末法线角的计算模型 φ_n 是只与 θ_k 有关的函数,利用 φ_n 不仅可以通过优化 θ_k 角的组合对始末基准轴线间的角偏误差进行补偿,而且可以为实际装调操作提供具体指导.

4 始末法线角优化方法

经过上一节的分析可知, n 个零件装配的始末法线角的余弦值是关于 $\cos \theta_k$ 和 $\sin \theta_k$ ($k=1, 2, \dots, n-1$) 的含交叉项的 $n-1$ 次多项式,则本文研究的始末法线角误差优化问题即为一个非线性多变量最优化问题(极小化问题). 其目标函数较为复杂,无法直接求得其解析值,需借助一种兼顾稳定性和效率性的优化方法.

遗传算法是一种基于自然选择原理、自然遗传

机制和自适应搜索方法(寻优)的算法,在机械优化设计中广为应用,适用于上述问题的求解^[18].

4.1 遗传算法参数设置和优化流程

由式(14)~(19)可将共轴光学系统始末法线角误差优化模型记为

$$\min \varphi_n = f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}) \quad (20)$$

第一类传递路径中各变量(相对装入角度)的取值是连续的,其取值范围是 $0 \sim 2\pi$. 此优化问题可采用二进制编码的遗传算法. 变量的二进制位数由其精度决定,二进制编码的编码精度如下式

$$\delta = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^l - 1} \quad (21)$$

式中, U_{\max} 为变量的最大值, U_{\min} 为变量的最小值, l 为变量的二进制位数. 假设零件相对装入角度能精确到 $1'$, $1'$ 用弧度制表示约为 2.9×10^{-4} , 若取二进制位数为 15, 此时 $\delta = \frac{2\pi - 0}{2^{15} - 1} \approx 1.9 \times 10^{-4} < 2.9 \times 10^{-4}$, 即可取变量二进制位数为 15.

第二类传递路径中各变量的取值是离散的,其取值的个数等于螺栓孔个数 q . 对于 p 个零件的装配,若两相邻零件间的螺栓个数均为 q ,则总的装配位姿组数为 q^{p-1} ,随零件个数的增加呈指数函数增长,显然利用遗传算法相对穷举法能大大提高运算效率. 各变量取值取决于单位螺栓角度间距,以及螺栓孔相对装配平面上坐标轴的角度. 单位螺栓角度间距由螺栓个数决定,对于 q 个螺栓,其单位螺栓角度间距为 $360^\circ/q$.

零件 k 和零件 $k+1$ 装配时,如对零件 k ,由 z'_k 轴正方向向负方向看去,将 y'_k 轴正方向顺时针方向的第一个螺栓孔编号为 $k.2.1$,此编号由三个数组成,第一个数表示零件编号,第二个数表示顶面,第三个数表示螺栓孔的序号,然后依次对所有螺栓孔进行编号 $k.2.1, k.2.2, \dots, k.2.n$. 同理,对零件 $k+1$ 的螺栓孔编号为 $(k+1).1.1, (k+1).1.2, \dots, (k+1).1.n$.

零件装配表面误差的测量在螺栓孔加工完成后进行,按照图 7 中坐标系的确定方法确定装配平面上的坐标系后,测得螺栓孔 $k.2.1$ 中心点 A_k 在此坐标系下的坐标为 $(x_{ok}, y_{ok}, 0)$, 计算可得 $A_k'O$ 和 y'_k 的角度间距为

$$\Delta_k' = \arccos \langle A_k'O, y'_k \rangle \quad (22)$$

同理, $A_{k+1}O$ 和 y'_k 的角度间距为 Δ_{k+1} , 如图 9.

此时,若令 $k.2.1$ 与 $(k+1).1.1$ 对齐装配, $\theta_k = \Delta_{k+1} - \Delta_k' + 0 \times 360^\circ/n$, 对零件 k 和零件 $k+1$ 装配的其他 $n-1$ 种装配位姿, θ_k 还可取 $\Delta_{k+1} - \Delta_k' + 1 \times 360^\circ/n, \Delta_{k+1} - \Delta_k' + 2 \times 360^\circ/n, \dots, \Delta_{k+1} - \Delta_k'$

$+ (n-1) \times 360^\circ/n$.

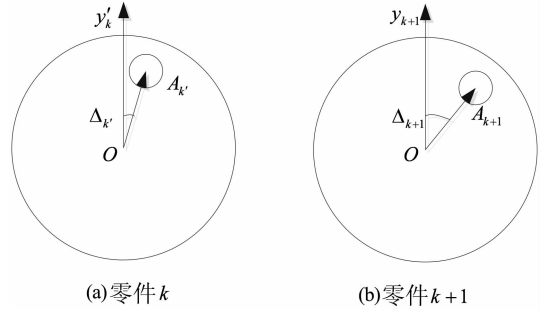


图 9 两零件螺栓相对位置示意

Fig. 9 The relative positions of bolts between two parts

此时变量的可取值个数是一个有限大整数. 采用二进制编码只适用于连续变量和变量维数为 2^l 的离散变量(用 l 位二进制表示)的情况,对任意变量维数的离散变量的二进制编码,易出现编码冗余和产生较多不可行解^[19]. 必须采用整数编码取代二进制编码,才能对螺栓个数为任意值的情况进行优化.

对第三类传递路径,因其包含第二类传递路径,假设先对若干个镜筒进行装配,对其中镜筒零件组成的第二类传递路径进行优化后,求解得到镜筒与镜筒之间的相对装入角度. 然后将所有镜筒视为一个部件,将此部件与始末两个镜组部件进行装配,此时可根据对第一类传递路径的优化方法求得镜组部件与镜筒的相对装入角度.

以第二类传递路径的始末法线角优化为例,其遗传算法流程如图 10 所示.

4.2 零件相对装入角度误差范围求解

通过遗传算法求得一组合适的零件相对装入角度后,在实际装配时,操作人员对零件相对装入角度的控制是有限的. 需确定一个合适的相对装入角度误差范围,操作人员在装入零件时,控制相对装入角度在该误差范围内,能保证始末法线角满足精度要求. 该误差范围太大则会增加装配成本,太小则无法保证始末法线角的精度.

不妨假设相对装入角度误差范围为 $\pm \Delta\theta$, 可令 $\Delta\theta = 10', 30'$, 甚至 1° , 若误差范围可取 $\pm 1^\circ$, 则无需将该误差范围再扩大,因为现有装配技术控制 θ_k 在 $\pm 1^\circ$ 范围内已较为容易. 对一组理想相对装入角度 $\theta = [\theta_1 \theta_2 \dots \theta_{n-1}]$, 令实际装配中,实际相对装入角度 θ'_k 可从 $\theta_k - \Delta\theta, \theta_k + \Delta\theta$ 和 θ_k 中取值,则可得到新的 $3^{n-1} - 1$ 组变量值. 求得相对装入角度误差范围的流程如图 11 所示.

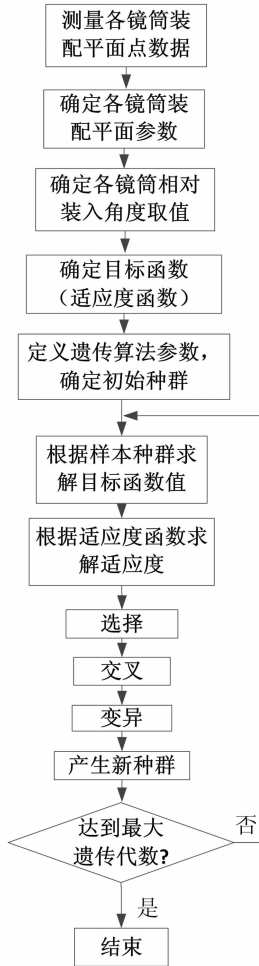


图 10 遗传算法优化流程

Fig. 10 Optimization process based on genetic algorithm

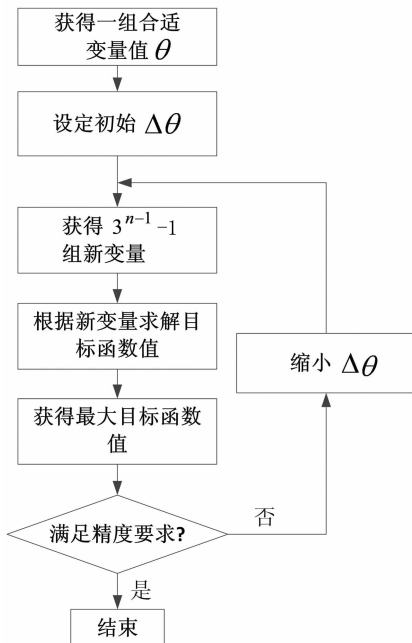


图 11 相对装入角度误差范围求解流程
Fig. 11 Solution process of the error range of relative load angle

4.3 共轴光学系统装调方法

基于全局优化法的共轴光学系统装调方法主要步骤如下:

1) 根据第 2 节和第 4 节所述方法,测得各镜组部件、各镜筒装配平面点数据;根据第 1 节所述的实例确定传递路径类型.

2) 由式(6)求得传递路径中各零件底面拟合平面系数 a_k, b_k , 顶面拟合平面方程的系数 a'_k, b'_k ; 标记 y_k 轴和 y'_k 轴. 根据传递路径类型确定可能的相对装入角度, 利用式(19)建立始末法线角与相对装入角度的显式函数关系.

3) 根据传递路径的类型, 确定遗传算法参数, 包括种群规模 M 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 和最大遗传代数 G 等, 代入本文编写的遗传算法 MATLAB 优化程序.

4) 运行遗传算法优化程序, 得到一组合适的相对装入角度变量值 θ , 根据图 11 调用本文编写的 MATLAB 程序求得相对装入角度误差范围 $\pm \Delta\theta$.

5) 根据所标记的 y_k 轴和 y'_k 轴, 按照 θ 并考虑 $\pm \Delta\theta$ 依次装入镜组部件和镜筒.

在极高精度共轴光学系统中, 考虑像差影响因素, 可将上述方法与 CAA 技术相结合, 一方面验证本文方法的准确性, 另一方面根据像差结果进行微量调整, 获得更佳的成像质量.

5 实例分析

针对某共轴光学系统, 零件个数 $n = 8$ 的情况, 假定各装配平面的公差要求均一致, 位置公差 $T_p = 0.04$, 形状公差, $T_s = 0.02$; 零件直径 $d = 100$; 认定目标函数值小于 10^{-5} 即满足精度要求. 作为仿真实例, 可根据理想平面 SDT (Small displacement torsor) 分量的变动范围不等式^[6]对装配平面的点进行模拟. 运行本文编写的 MATLAB 程序可模拟得到一个零件的底面和顶面点坐标并计算得到拟合平面系数. 表 1 为求出的一组数据(令初始零件底面和末端零件顶面拟合平面系数均为 0).

表 1 某光学系统各零件装配平面方程系数
Tab. 1 Parameters of plane equations for assembly of parts in an optical system

	a_k	a'_k	b_k	b'_k
零件 1	0	-0.000 248 628	0	-0.000 014 720
零件 2	-0.000 161 183	0.000 058 117	-0.000 069 116	0.000 100 777
零件 3	-0.000 002 446	-0.000 219 243	0.000 044 938	-0.000 212 366
零件 4	-0.000 194 884	-0.000 231 928	0.000 010 063	-0.000 050 459
零件 5	0.000 102 050	0.000 007 993	0.000 082 607	-0.000 127 059
零件 6	0.000 086 172	-0.000 094 848	0.000 053 616	-0.000 038 258
零件 7	0.000 000 116	0.000 041 149	0.000 089 789	0.000 064 868
零件 8	-0.000 007 084	0	-0.000 013 194	0

5.1 第一类传递路径的始末法线角优化

对于第一类传递路径,根据类似图 10 的遗传算法优化流程,采用 MATLAB 软件编写程序. 设定种群规模 $M = 20$ 、交叉概率 $P_c = 0.7$ 、变异概率 $P_m = 0.05$ 和最大遗传代数 $G = 50$. 若在一个与图 1 所示类型的光学系统中,包含 8 个镜组部件,两相邻镜组部件通过端面接触定位,需确定由第 1 个镜组部件到第 8 个镜组部件的始末法线角. 现给出 5 组运行结果的最优目标函数值和变量解,优化结果(保留四位小数)如表 2 所示,其中第 4 组运行结果的目标函数值随遗传代数的变化如图 12 所示.

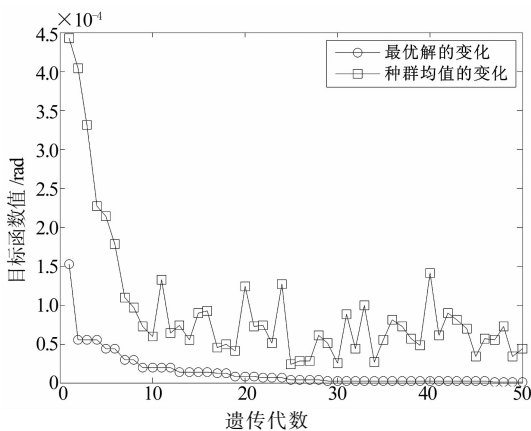


图 12 第一类传递路径的优化结果

Fig. 12 Optimization results in transfer path 1

表 2 第一类传递路径的 5 组运行结果

Tab. 2 5 groups of run results in transfer path 1

序号	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组
φ_n / rad	2.107 3 $\times 10^{-8}$	3.674 3 $\times 10^{-7}$	6.080 3 $\times 10^{-7}$	1.800 5 $\times 10^{-7}$	6.495 3 $\times 10^{-8}$
θ_1 / rad	0.332 3	0.300 1	4.706 4	5.654 2	0.647 7
θ_2 / rad	1.882 0	3.479 8	5.548 1	1.594 2	1.334 8
θ_3 / rad	3.451 2	1.033 5	2.569 5	1.238 9	2.500 5
θ_4 / rad	0.952 9	4.553 8	0.530 5	4.187 5	2.082 8
θ_5 / rad	5.524 3	3.560 8	0.027 9	3.485 5	0.602 1
θ_6 / rad	5.950 9	4.194 8	5.342 3	0.479 5	5.386 2
θ_7 / rad	1.833 0	1.740 5	1.615 4	3.729 0	1.905 6

经过多次运算,发现其均易收敛, φ_n 最小可达到 2.1073×10^{-8} , 远小于 $1''$ ($1''$ 用弧度制表示约为 4.8×10^{-6}), 趋近于 0.

每次遗传算法程序的运行在使得最终始末法线角接近于 0 的情况下,得到的相对装入角度变量数据各不相同,各对应变量间相差较大,这说明在共轴光学系统中,以各零件相对装入角度为变量、以始末法线角为目标值的目标函数是多元多峰函数.

在此求取 5 组运行结果对应的各组相邻零件基

准轴夹角的均方根进行比较,可在控制始末法线角的基础上保证两零件间的基准轴夹角不至过大. 此均方根值计算公式如下

$$\varphi_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n-1} (\varphi_{k, (k+1)})^2}{n-1}} \quad (23)$$

式中, $\varphi_{k, (k+1)}$ 为两相邻零件基准轴夹角,根据第 3 节末的分析可求得.

以上 5 组运行结果,第 5 组的 φ_{rms} 最小,取第 5 组运行结果对应的变量解作为指导光学系统装调的依据. 根据 4.2 节中相对装入角度误差范围求解流程编写 MATLAB 程序,运行结果显示,在本例中,各相对装入角度变量在 $\pm 1^\circ$ 范围内变动,目标函数值仍满足精度要求.

5.2 第二类传递路径的始末法线角优化

设 8 个镜筒装配,相邻两镜筒间通过 6 个螺栓连接,仍以表 2 中零件误差数据为例,假设 Δ_{k+1}, Δ_k' 均为 0. 种群规模 $M = 200$ 、交叉概率 $P_c = 0.7$ 、变异概率 $P_m = 0.05$ 和计算代数 $G = 200$. 多次运行根据图 10 的遗传算法优化流程编写的 MATLAB 程序,取其五组优化结果如表 3.

表 3 第二类传递路径的 5 组运行结果

Tab. 3 5 groups of run results in transfer path 2

序号	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组
φ_n / rad	2.673 5 $\times 10^{-6}$	5.580 6 $\times 10^{-6}$	2.673 5 $\times 10^{-6}$	6.704 8 $\times 10^{-6}$	2.895 0 $\times 10^{-6}$
θ_1 / rad	300	0	300	60	60
θ_2 / rad	300	240	300	60	120
θ_3 / rad	180	180	180	240	180
θ_4 / rad	240	60	240	300	180
θ_5 / rad	300	300	300	300	0
θ_6 / rad	180	180	180	0	0
θ_7 / rad	120	0	120	180	120

虽然各变量取值个数和 θ 的数目有限,但多次运行优化程序,仍出现多组收敛的可行解. 其中一组出现的概率较大,如表 3 中的第 1 组和第 3 组运行结果, $\varphi_n = 2.6735 \times 10^{-6}$, 在各组运行结果中最小,且由式(23)求得其对应 φ_{rms} 最小,可认为其即为最优解. 此解对应的 φ_n 已小于 $1''$, 趋近于 0 的程度亦较高,但相对第一类传递路径的优化结果相差两个数量级,这说明对相对装入角度的取值进行限制之后,会影响目标值的可优化程度. 根据 4.2 节中相对装入角度误差范围求解流程编写 MATLAB 程序,运行结果显示,在本例中,各相对装入角度变量在 $\pm 30'$ 的范围内变动,目标函数值仍满足精度要求.

另外,对两种类型的传递路径进行多次试验,初始个体目标函数均值均在 5×10^{-4} 左右,证明基于

随机装配法装配,出现始末法线角误差超差的概率较大。基于全局优装法的装调思路,两种传递路径经过优化后,始末法线角误差比基于随机装配法的始末法线角误差小2~4个数量级。

本文的实例分析证明了利用零件加工误差的全局优化方法对定中心基准轴传递的准确性具有很好的补偿能力,理论上可以通过补偿使基准轴偏角接近于零。

6 结 论

本文采用最小二乘法拟合共轴光学系统中圆柱形零件装配平面,分析了零件实际装配时的装配状态。在共轴光学系统中,针对给定圆柱形零件研究了单个圆柱形零件底面和顶面间的变换关系,建立了多个零件对接时,始末法线角误差与相对装入角度的显式函数关系,提出了基于遗传算法的始末法线角的优化方法,针对不同的传递路径,编写了MATLAB程序,总结了一种共轴光学系统全局优装法装调方法。最后,论文通过一个模拟实例,验证了本文研究方法的可行性与实用性。

参 考 文 献

- [1] 廖志波,王春雨,栗孟娟,等.透射式光学系统计算机辅助装校技术初步研究[J].红外与激光工程,2013,42(9):2453-2456.
LIAO Z B, WANG C Y, LI M J, *et al.* Research on computer-aided alignment based on refract optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(9):2453-2456. (In Chinese)
- [2] 郭夏锐,廖志波,王春雨,等.光轴一致性误差对空间透射式系统像差和质量的影响[J].红外与激光工程,2012,41(2):436-441.
GUO X R, LIAO Z B, WANG C Y, *et al.* Aberration and alignment quality investigation of space transmission optical system with centering error of optical axes[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2):436-441. (In Chinese)
- [3] 郭夏锐,王春雨,廖志波,等.高精度透射式空间光学系统装调误差分析与动态控制[J].红外与激光工程,2012,41(4):947-951.
GUO X R, WANG C Y, LIAO Z B, *et al.* Misalignment and assemblage stress analysis in space transmission optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4):947-951. (In Chinese)
- [4] RIMMER M P. Computer-aided optical alignment method[J]. Adaptive Optics and Optical Structures, 1990, 1271:363-368.
- [5] 栗孟娟,廖志波,王春雨.小口径高精度折射式光学系统装调公差的分析与控制[J].应用光学,2015,36(2):277-281.
LI M J, LIAO Z B, WANG C Y. Analysis and control on assemblage tolerance in small-aperture high-precision refractive optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(2):277-281. (In Chinese)
- [6] 吕程,刘子建,艾彦迪,等.多公差耦合装配结合面误差建模与公差优化设计[J].机械工程学报,2015,51(18):108-118.
LV C, LIU Z J, AI Y D, *et al.* Assembly joint surface error modeling and tolerance optimization in the case of coupled tolerance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(18):108-111. (In Chinese)
- [7] 魏全忠.高性能光学系统定中心研究[D].成都:电子科技大学,2003:11-17.
- [8] 杨国锋.光学系统中心偏误差分析方法研究[D].西安:西安工业大学,2015:24-30.
YANG G F. Research on the method of error analysis in the optical system decentration[D]. Xian: Xian Technological University, 2015: 24-30. (In Chinese)
- [9] 涂德华.共轴光学系统镜框结构设计[J].光学仪器,2007,29(1):52-56.
TU D H. Structure design for lens frame of coaxial optical system[J]. Optical Instruments 2007,29(1):52-56. (In Chinese)
- [10] 李安虎,左其友,卞永明,等.亚微弧度级激光跟踪转镜装配误差分析[J].机械工程学报,2016,52(10):9-16.
LI A H, ZUO Q Y, BIAN Y M, *et al.* Assembly error analysis of laser tracking steering prisms with sub-microradian order accuracy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(10):9-16. (In Chinese)
- [11] YANG Z, POPOV A A, McWILLIAM S. Variation propagation control in mechanical assembly of cylindrical components[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2012, 31(2):162-176.
- [12] 裘迪.零件表面混合维建模理论、方法及其在产品装配质量预测中的应用[D].杭州:浙江大学机械工程学系,2012:83-85.
QIU C. Theory and method of hybrid dimensional part surface modeling and its application in prediction of product assembly quality[D]. Hangzhou: Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, 2012:83-85. (In Chinese)
- [13] 王雯,吴洁蓓,傅卫平,等.机械结合面法向动态接触刚度理论模型与试验研究[J].机械工程学报,2016,52(13):123-130.
WANG W, WU J B, FU W P, *et al.* Theoretical and experimental research on normal dynamic contact stiffness of machined joint surfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13):123-130. (In Chinese)
- [14] GB/T 1958-2004 产品几何量技术规范(GPS)形状和位置公差检测规定[S].北京:中国标准出版社,2004:1-3.
GB/T 1958-2004 Geometrical product Specification (GPS)- Geometrical tolerance-Verification prescription[S]. Beijing: China Standards Press, 2004:1-3. (In Chinese)
- [15] 刘江南,洪义海.三轴数控平面磨床几何精度分析与稳健设计[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(4):1-8.
LIU J N, HONG Y H. Analysis and robust design of geometric accuracy of a three-axis CNC surface grinding machine[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(4):1-8. (In Chinese)
- [16] 邹春龙.基于二维精密工作台的平面度测量仪设计[D].武汉:武汉科技大学,2014:48-53.
ZOU C L. A Design of flatness measurement instrument based on 2D displacement worktable[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014:48-53. (In Chinese)
- [17] 刘子建,叶南海.现代CAD基础与应用技术[M].长沙:湖南大学出版社,2004:48-50.
LIU Z J, YE N H. Basic of modern CAD and application technology [M]. Changsha: Hunan University Press, 2004:48-50. (In Chinese)
- [18] 任毅如,张田田,曾令斌.基于遗传算法的潮流能水轮机翼型优化设计[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(10):59-64.
REN Y R, ZHANG T T, ZENG L B. Tidal turbine hydrofoil design method based on genetic algorithm[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015,42(10):59-64. (In Chinese)
- [19] NASRI I, PETIN J F, SIMON F B. An integer coded genetic algorithm based on a replacement procedure for designing operational control architectures of critical systems[C]// Emerging Technologies & Factory Automation. IEEE, 2015:1-6.