

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200510016907.8

[51] Int. Cl.

G02B 27/62 (2006.01)

G01M 11/00 (2006.01)

[43] 公开日 2006 年 12 月 27 日

[11] 公开号 CN 1885097A

[22] 申请日 2005.6.22

[21] 申请号 200510016907.8

[71] 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130031 吉林省长春市东南湖大路 16 号

[72] 发明人 薛栋林 郑立功 张学军

[74] 专利代理机构 长春科宇专利代理有限责任公司
代理人 梁爱荣

权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 1 页

[54] 发明名称

利用计算机对非球面检验光学系统进行调整的方法

[57] 摘要

本发明针对利用计算机对非球面检验光学系统进行调整的方法。首先完成系统光路的粗装调，然后实时采集一幅干涉图，获得被检非球面镜的波像差，利用赛德尔像差多项式作为基底拟合获得被检非球面镜失调引入波像差，根据拟合波像差与失调引入波像差的相互对应关系得到失调量的数值，利用计算机控制调整机构实现系统精确定位。再采集一幅干涉图，当干涉条纹为“零”条纹时，则调整结束；否则，对新采集的干涉图拟合计算失调量并且重新调整，直至调整结果满足要求。本发明结合了光学系统的检验、检验结果的数据分析处理以及优化算法、实现了微小平移量和转动量的控制与精确调整，使调整过程在理论指导下可视、定量、有序地完成，提高了干涉检验的效率。

1、利用计算机对非球面检验光学系统进行调整的方法，其特征在于调整步骤如下：

(1) 首先将非球面检验光学系统中的数字波面干涉仪、光学补偿器和被检非球面镜置于气浮防震平台上，调整数字波面干涉仪、光学补偿器和被检非球面镜之间的相对位置，直至在数字波面干涉仪观察到非球面检验光学系统的出瞳波面的干涉条纹，则完成非球面检验光学系统光路的粗装调；

(2) 在步骤 1 的基础上，再利用数字波面干涉仪实时采集一幅干涉图，获得被检非球面镜的波像差为 $W(x,y)$ ，波像差 $W(x,y)$ 包含被检非球面镜的实际加工面形残留波像差为 $W_m(x,y)$ 以及光学补偿器和被检非球面镜的失调引入的波像差为 $W_a(x,y)$ ；

(3) 根据步骤 2 再利用刚体位移理论得到非球面检验系统中的光学补偿器和被检非球面镜的失调引入的波像差 $W_a(x,y)$ ；

利用赛德尔(seidel)像差多项式作为基底拟合获得被检非球面镜失调引入波像差 $W_a(x,y)$ ，然后根据拟合波像差与失调引入波像差的相互对应关系得到失调量 D_x 、 D_y 、 D_z 以及 θ_x 、 θ_y 的数值；

(4) 按照实际要求，利用第一调整机构精密调整光学补偿器的位置，利用第二调整机构精密调整被检非球面镜的位置，第一调整机构实现被检非球面镜的平动调整（即 X 、 Y 、 Z 三个方向的平动），第二调整机构实现被检非球面镜的转动调整（即俯仰和扭摆）；根据

步骤 3 所获得的失调量数据,利用计算机控制第一调整机构和第二调整机构调整光学补偿器和被检非球面镜的位置精确定位;

(5) 根据步骤 4 采集一幅干涉图,当数字波面干涉仪所获得的干涉条纹为“零”条纹时,则非球面检验光学系统中的光学补偿器和被检非球面镜调整结束;否则,返回步骤 3,直至调整光学补偿器和被检非球面镜的结果满足要求,则计算机完成对非球面检验光学系统的调整装配。

利用计算机对非球面检验光学系统进行调整的方法

技术领域：本发明属于非球面检验技术领域，特别涉及利用计算机对非球面检验光学系统进行调整的方法。

背景技术：光学系统的计算机辅助装调技术是通过计算机对实时检测结果和理论结果进行对比分析，经过必要的优化处理，给出光学系统中各零件失调的方位和量值。在装调过程中，可以有目的地使各零件达到最佳的位置状态，提高装调的效率。从八十年代开始，国内外光学工作者（美国 Santa Barbara 研究中心、美国 Arizona 大学光学中心、美国 Ball Aerospace 技术公司、日本 Nikon 公司、中国科学院长春光机所、哈尔滨工业大学）就已经开始研究计算机辅助装调技术，但它主要是针对加工完成后的近衍射极限的成像光学系统进行装调。在非球面干涉检验过程中，由于传统的手工调整，实现光路的准确定位非常困难，因此如何高效、准确地实现非球面检验光学系统精确定位，提高干涉检验的效率，则是现有技术中有待解决的问题。

发明内容：为了解决上述背景技术非球面干涉检验过程中，采用传统的手工调整周期长、实现光路的准确定位非常困难，本发明的目的是从实时采集的干涉图中分离出非球面检验光学系统失调引入波像差，计算出调整机构的调整量数值，采用计算机控制调整调整机构实现非球面检验光学系统的精确定位。为此本发明将提供一种利用计算机对非球面检验光学系统进行调整的方法，提高干涉检验的效率，为加工出合格的非球面面形提供保障。

本发明的技术方案：

1.首先将非球面检验光学系统中的数字波面干涉仪、光学补偿器和被检非球面镜置于气浮防震平台上，调整数字波面干涉仪、光学补偿器和被检非球面镜之间的相对位置，直至在数字波面干涉仪观察到非球面检验光学系统出瞳波面的干涉条纹，则完成非球面检验光学系统光路的粗装调；

2.在步骤 1 的基础上，再利用数字波面干涉仪实时采集一幅干涉图，获得被检非球面镜的波像差为 $W(x,y)$ ，波像差 $W(x,y)$ 包含被检非球面镜的实际加工面形残留波像差为 $W_m(x,y)$ 以及光学补偿器和被检非球面镜的失调引入的波像差为 $W_a(x,y)$ ；

3.根据步骤 2 再利用刚体位移理论得到非球面检验系统中的光学补偿器和被检非球面镜失调引入的波像差 $W_a(x,y)$ ；

利用赛德尔(seidel)像差多项式作为基底拟合获得被检非球面镜失调引入波像差 $W_a(x,y)$ ，然后根据拟合波像差与失调引入波像差的相互对应关系得到失调量 D_x 、 D_y 、 D_z 以及 θ_x 、 θ_y 的数值；

4.按照实际要求，利用第一调整机构精密调整光学补偿器的位置，利用第二调整机构精密调整被检非球面镜的位置，第一调整机构实现被检非球面镜的平动调整（即 X 、 Y 、 Z 三个方向的平动），第二调整机构实现被检非球面镜的转动调整（即俯仰和扭摆）；根据步骤 3 所获得的失调量数据，利用计算机控制第一调整机构和第二调整机构调整光学补偿器和被检非球面镜位置的精确定位；

5.根据步骤 4 采集一幅干涉图，当数字波面干涉仪所获得的干

涉条纹为“零”条纹时，则非球面检验光学系统中的光学补偿器和被检非球面镜调整结束；否则，返回步骤3，直至调整光学补偿器和被检非球面镜的结果满足要求，则计算机完成对非球面检验光学系统的调整装配。

优点：由于本发明在非球面检验光学系统调整过程中，从实时采集的干涉图中，分离了系统失调引入波像差，结合了光学系统的检验、检验结果的数据分析处理以及优化算法、实现了微小平移量和转动量的控制与精确调整。从干涉图中分离非球面检验光学系统失调引入波像差，给出了同轴非球面分离失调引入波像差的数学模型，对于离轴非球面则将其看作同轴母镜的一部分，获取各采样点在同轴母镜下的坐标值，在同轴条件下对离轴非球面检验光学系统进行拟合计算，获得失调量的数值结果，采用计算机辅助调整技术，使整个非球面检验光学系统的调整过程在理论指导下可视、定量、有序地完成，从而提高干涉检验的效率。实践证明，该方案具有很高的调整精度，收敛速度很快，实验表明：经过四次调整后，系统像差的均方根值（RMS 值）为 0.028λ ($\lambda = 632.8\text{nm}$)，缩短了干涉检验周期。

附图说明：

图 1 为本发明的流程图。

具体实施方式：

本发明的技术方案的流程图如图 1 所示。

非球面检验光学系统由 Zygo 干涉仪、光学补偿器和被检非球面镜三部分组成。由零位补偿检验原理可知，在零位补偿检验结果中，

既包含有被检非球面的实际加工残留的波像差,也包含光路调整过程中失调量引入的波像差。因此,要获得被检非球面镜镜面的实际加工残留的波像差数据,必须从干涉检验结果中分离系统失调引入的波像差,对非球面检验光学系统进行精确调整。

本发明可以直接用于同轴非球面检验光学系统,也可以用于离轴非球面检验光学系统。

当用于离轴非球面检验光学系统时,将被检非球面镜看作是同轴母镜的一部分,根据被检离轴非球面镜设计要求,获得离轴非球面和其同轴母镜之间的关系,将被检离轴非球面镜上各点的坐标转换到同轴母镜坐标系中,得到被检离轴非球面镜上各采样点在同轴母镜下的坐标,使用上述同轴非球面的拟合条件对离轴非球面的失调量进行拟合;

失调量的确定过程是数据处理过程也是优化过程。算法上即是建立失调量和失调量引入的波像差之间的关系。波像差 $W(x, y)$ 包括被检非球面镜镜面的实际加工残留误差为 $W_n(x, y)$ 和由第一调整机构和第二调整机构的失调引入的误差为 $W_a(x, y)$ (其中 (x, y) 代表镜面上某一点的位置)。因此干涉图波像差 $W(x, y)$ 可用下式表示:

$$W(x, y) = W_n(x, y) + W_a(x, y) \quad (1)$$

所以要获得合格的非球面面形,必须从测量结果中去除失调引入波像差 $W_a(x, y)$ 。将被检非球面镜看作是一个六自由度的刚体。分别为沿 xyz 轴的平动 D_x, D_y, D_z 和绕 x, y, z 轴的转动 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$, 其中由于 z 为光轴,所以绕 z 轴的旋转 θ_z 因其具有回转对称性可以忽

略。根据刚体位移理论我们可以获得被检非球面镜引入波像差：

$$W_a(x, y) = -2D_z + 2x(cD_x + \theta_y) + 2y(cD_y - \theta_x) + p^2 c^2 D_z + xp^2 c^3 k D_x + yp^2 c^3 k D_y + p^4 c^4 \frac{4k+1}{8} D_z \quad (2)$$

在上述式(2)中： $p^2 = x^2 + y^2$ (x, y 为镜面坐标)， $c=1/r$ ， r 为被检非球面镜的曲率半径， k 为被检非球面镜的二次曲面常数；

$$\begin{aligned} -2D_z &: \text{ 平移;} & 2x(cD_x + \theta_y) &: \text{ X-倾斜;} \\ 2y(cD_y - \theta_x) &: \text{ Y-倾斜;} & p^2 c^2 D_z &: \text{ 离焦;} \\ xp^2 c^3 k D_x &: \text{ X-彗差;} & yp^2 c^3 k D_y &: \text{ Y-彗差;} \\ p^4 c^4 \frac{4k+1}{8} D_z &: \text{ 球差} \end{aligned}$$

考虑到离轴非球面可以看作同轴母镜的一部分，因此(2)式也适用于对离轴非球面的调整量误差拟合，在获得采样点在同轴母镜下的坐标后，可以使用同轴非球面的拟合条件对离轴非球面的失调量误差进行拟合。

采用赛德尔(seidel)像差多项式作为基底拟合获得被检非球面镜失调引入波像差 $W_a(x, y)$ ，设：

$$W_a(x, y) = c_0 + c_1 x + c_2 y + c_3(x^2 + y^2) + c_4 x(x^2 + y^2) + c_5 y(x^2 + y^2) + c_6(x^4 + y^4) \quad (3)$$

采用最小二乘法，即 $F(x, y) = [w(x, y) - w_a(x, y)]^2 = \min$ ，求解系数 $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ 的最小二乘解。

令：

$$a_{0i} = 1; a_{1i} = x_i; a_{2i} = y_i; a_{3i} = x_i^2 + y_i^2; a_{4i} = x_i(x_i^2 + y_i^2); a_{5i} = y_i(x_i^2 + y_i^2); a_{6i} = x_i^4 + y_i^4$$

由于 $F(x, y) = \min$ 的充要条件为：

$$\frac{\partial F}{\partial c_0} = 0, \frac{\partial F}{\partial c_1} = 0, \frac{\partial F}{\partial c_2} = 0, \frac{\partial F}{\partial c_3} = 0, \frac{\partial F}{\partial c_4} = 0, \frac{\partial F}{\partial c_5} = 0, \frac{\partial F}{\partial c_6} = 0 \quad (4)$$

由(4)式,可以获得一个包含7个未知量的线性方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_0 \sum a_{0i} a_{0i} + c_1 \sum a_{0i} a_{1i} + c_2 \sum a_{0i} a_{2i} + c_3 \sum a_{0i} a_{3i} + c_4 \sum a_{0i} a_{4i} + c_5 \sum a_{0i} a_{5i} + c_6 \sum a_{0i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{0i} \\ c_0 \sum a_{1i} a_{0i} + c_1 \sum a_{1i} a_{1i} + c_2 \sum a_{1i} a_{2i} + c_3 \sum a_{1i} a_{3i} + c_4 \sum a_{1i} a_{4i} + c_5 \sum a_{1i} a_{5i} + c_6 \sum a_{1i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{1i} \\ c_0 \sum a_{2i} a_{0i} + c_1 \sum a_{2i} a_{1i} + c_2 \sum a_{2i} a_{2i} + c_3 \sum a_{2i} a_{3i} + c_4 \sum a_{2i} a_{4i} + c_5 \sum a_{2i} a_{5i} + c_6 \sum a_{2i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{2i} \\ c_0 \sum a_{3i} a_{0i} + c_1 \sum a_{3i} a_{1i} + c_2 \sum a_{3i} a_{2i} + c_3 \sum a_{3i} a_{3i} + c_4 \sum a_{3i} a_{4i} + c_5 \sum a_{3i} a_{5i} + c_6 \sum a_{3i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{3i} \\ c_0 \sum a_{4i} a_{0i} + c_1 \sum a_{4i} a_{1i} + c_2 \sum a_{4i} a_{2i} + c_3 \sum a_{4i} a_{3i} + c_4 \sum a_{4i} a_{4i} + c_5 \sum a_{4i} a_{5i} + c_6 \sum a_{4i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{4i} \\ c_0 \sum a_{5i} a_{0i} + c_1 \sum a_{5i} a_{1i} + c_2 \sum a_{5i} a_{2i} + c_3 \sum a_{5i} a_{3i} + c_4 \sum a_{5i} a_{4i} + c_5 \sum a_{5i} a_{5i} + c_6 \sum a_{5i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{5i} \\ c_0 \sum a_{6i} a_{0i} + c_1 \sum a_{6i} a_{1i} + c_2 \sum a_{6i} a_{2i} + c_3 \sum a_{6i} a_{3i} + c_4 \sum a_{6i} a_{4i} + c_5 \sum a_{6i} a_{5i} + c_6 \sum a_{6i} a_{6i} = \sum \sigma_i a_{6i} \end{array} \right. \quad (5)$$

设:

$$A = \begin{pmatrix} \sum a_{0i} a_{0i} & \sum a_{0i} a_{1i} & \dots & \sum a_{0i} a_{6i} \\ \sum a_{1i} a_{0i} & \sum a_{1i} a_{1i} & \dots & \sum a_{1i} a_{6i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum a_{6i} a_{0i} & \sum a_{6i} a_{1i} & \dots & \sum a_{6i} a_{6i} \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \dots \\ c_6 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} \sum \sigma_i a_{0i} \\ \sum \sigma_i a_{1i} \\ \dots \\ \sum \sigma_i a_{6i} \end{pmatrix}$$

则: $C = A^{-1}B$

在求得 C 的最小二乘解以后,然后根据拟合波像差与失调引入波像差的相互对应关系得到失调量 Dx、Dy、Dz 以及 θ_x 、 θ_y 的数值。在实践中应根据获得的近似解重新调整光路,然后再求解、再调整,直到光学调整达到满意的精度为止。在光学调整精确的情况下,测得的结果必然是一个不包含失调量误差的面形误差分布,使用这种方法可以较为精确地实现失调量误差与加工误差的分离。

按照实际要求,设计两套调整机构:将光学补偿器与第一调整机构固定连接,用于精密调整光学补偿器的位置;将被检非球面镜第二调整机构固定连接,用于精密调整被检非球面镜的位置,并且确保调整机构具有合适的行程范围。第一调整机构主要实现被检非球面镜

的平动调整（即 X、Y、Z 三个方向的平动），第二调整机构主要实现被检非球面镜的转动调整（即俯仰和扭摆）；将所获得的失调量数据存储于计算机的存储器中，利用计算机控制第一调整机构和第二调整机构调整光学补偿器和被检非球面镜的精确位置；

第一调整机构和第二调整机构的控制系统由计算机、运动控制卡、驱动器及步进电机构成，利用步进电机对调整机构进行控制。

根据计算获得的失调量数据，采用计算机控制调整机构，精确控制与调整光学补偿器和被检非球面镜的微小平移量和转动量，实现非球面检验光学系统精确定位。

我们结合实际加工任务，利用计算机对一离轴非球面检验光学系统进行光路调整，检验系统粗装调后，利用 Zygo 数字波面干涉仪实时采集一幅干涉图，波像差为 1.070λ (PV值)、 0.164λ (RMS值) ($\lambda = 632.8\text{nm}$)，经过四次调整后系统像差的 RMS 值为 0.028λ 。据此看出，该方法收敛速度很快，具有很高的精度，缩短了系统检验周期。

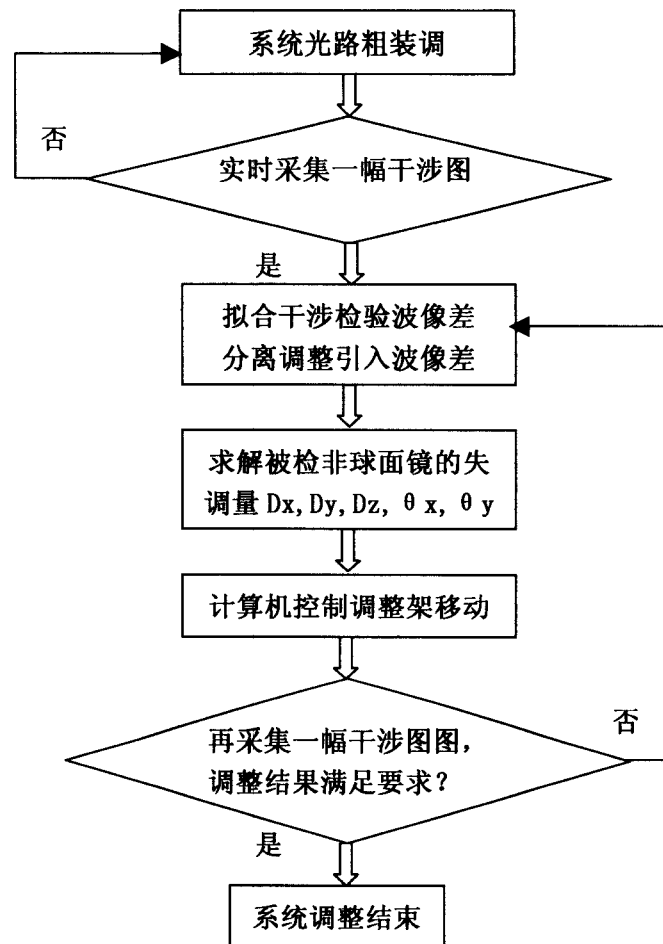


图 1