

基于轮廓仪测量数据的非球面方程反演技术

耿安兵 王彬

(华中光电技术研究所武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430073)

摘要 求取未知参数或有面形误差的实际非球面光学零件面型方程,在非球面加工精度分析、光学系统成像质量分析、拆解分析光学镜头等方面都有实际需求。分析了 Taylor Hobson 轮廓仪测量数据格式,采用遗传算法,根据测量数据反演非球面的方程,对反演过程中采取的关键技术进行了分析。编制软件实现了非球面方程的反演,验证了所提方法的可行性。

关键词 测量;轮廓仪;非球面;光学系统

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.042204

Inversion Method for Aspheric Surface Equation Derivation Based on Data Measured from Talysurf

Geng Anbing Wang Bin

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong Institute of Electro-Optics
Wuhan, Hubei 430073, China)

Abstract Derivation of unknown parameters or deviation of practical aspheric optic surface equation with surface error are in practical demand for aspheric machining accuracy analysis, optical system imaging quality analysis, and decomposition analysis of optical lenses. Beginning with an analysis of the data format obtained from Taylor Hobson Talysurf, the key technique used for inversion method to derive aspheric equation based on genetic algorithm and measured data is analyzed. Programmable inversion of aspheric equation is given. It is shown that the method proposed is practical.

Key words measurement; contourgraph; aspheric surface; optical system

OCIS codes 220.0220; 120.6650; 120.4820

1 引言

现代光学设计中经常用到非球面,因为在光学系统中使用非球面能减少透镜片数、减轻重量、有效提高像质^[1]。现代的非球面加工往往采用计算机数控加工技术^[2],由于加工必然存在误差^[3,4],了解非球面的加工精度,或者得到实际加工的非球面的方程,对于光学设计是非常必要的。它有利于设计者根据实际加工情况评价可能的成像质量,或对其它光学零件进行调整,从而得到最优的光学系统成像质量。此外,对于未知面型的表面,如果通过测量分析得到非球面方程,对拆解分析已有光学系统也具有十分重要的意义。测量非球面的方法有许多种^[5~7],但对于金刚石车削等方法加工的旋转对称非球面来说,采用轮廓仪测量是非常快捷、经济的方法。有人针对非球面的加工精度和轮廓仪测量误差分析进行了一些研究工作,得出了一些有益的经验及理论^[8~10],但对于基于 Talysurf 轮廓仪的测量结果进行非球面方程的反演技术或实践则进行得较少,本文对此进行了详细的研究与分析。

2 轮廓仪测量数据

英国 Taylor Hobson 公司的轮廓仪采用接触法测量非球面面形,能够得到非球面相对于理论非球面的

收稿日期: 2010-08-23; **收到修改稿日期**: 2010-11-16

基金项目: 武汉光电国家实验室基金项目(P080013)资助课题。

作者简介: 耿安兵(1970—),男,高级工程师,主要从事光电系统及光学设计等方面的研究。

E-mail: genganbing@163.net

偏差,进而为通过误差补偿的方式修正非球面面形提供数据。它是事实上的一种工业标准,世界上主流光学数控加工设备均支持 Taylor Hobson 公司轮廓仪的测量结果。但是,利用轮廓仪测量非球面面形误差,必须首先知道非球面的理论方程才能开始分析,因此它不具备对未知非球面进行分析的能力。本文利用轮廓仪的初始测量数据,反演出非球面方程,为轮廓仪下一步分析或为光学设计者评价光学系统提供依据。

Taylor Hobson 公司的轮廓仪的初始测量数据文件名为“*.PRF”,实际上是一种文本格式文件。对其数据格式进行分析,剔除无关大局的信息,可以得到以下有用的信息。

第 3 行是 X 坐标的参数,该行的第 3 列是 X 方向上取点的个数,第 5 列是 X 向每两点之间的比例因子;第 4 行是 Z 坐标的参数,该行的第 3 列是 Z 方向上取点的个数,第 5 列是 Z 向每两点之间的比例因子;第 7 行第 3 列是 X 向每两点之间的归化间隔。

从第 11 行开始,就是表征与 X 取点一一对应的 Z 的有关参数。该值乘上 Z 向比例因子,就得到 Z 向的测量坐标值。

例如,某测量数据文件前几行的数据为:

```
1 2
703-00 0.000000e+000 PRF
CX M 7.617100e+004 MM 1.000000e+000 D
CZ M 7.617100e+004 MM 3.223250e-005 L
EOR
STYLUS_RADIUS 0.000000e+000 MM
SPACING CX 1.000000e-003
MAP 1.000000e+000 CZ CZ 1.000000e+000 1.000000e+000
MAP 2.000000e+000 CZ CX 1.000000e+000 0.000000e+000
EOR
27132
27130
```

根据以上分析,可以得到:该非球面测量数据有 $N=76171$ 个点,每两个点间 X 间距是 0.001 mm ,Z 向的比例因子是 $3.223250e-005$,则 X,Z 值依次为

$$X_{mi} = 0, 0.001, \dots, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$Z_{mi} = 0.874532, 0.874468, \dots, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

3 遗传算法

遗传算法是 1975 年由美国 J. Holland^[11]提出的一种人工智能方法,是在计算机上按生物进化过程进行模拟的一种搜索寻优算法。遗传算法相对于传统优化算法的主要特点在于:它是多点寻优而不是单点寻优,是一种隐性并行算法,能够找到全局最优解^[12,13]。同时,遗传算法直接利用从目标函数转化成的适应函数,而不采用导数等信息,能够大大简化算法本身。它不是直接处理决策变量本身的实际值,而是对它进行编码运算,此编码处理方式,使优化计算过程可以借鉴生物学中染色体和基因等概念,通过模拟自然界中生物的遗传和进化等机理,可以方便地应用遗传操作算子,使得遗传算法具有广泛的应用领域。遗传算法的运算基本流程如图 1 所示。

根据轮廓仪初始测量数据反演非球面方程,比较困

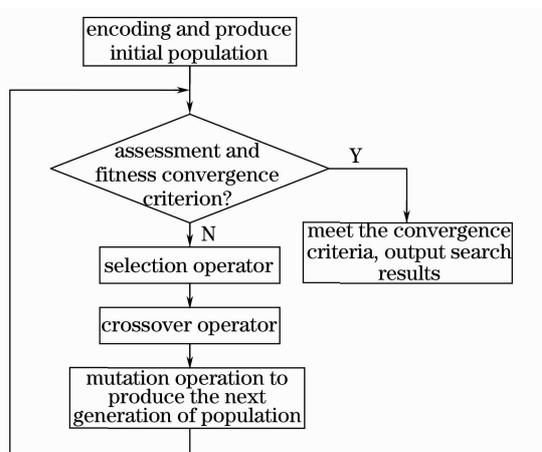


图 1 遗传算法的运算基本流程

Fig. 1 Basic process of genetic algorithm operators

难的一点就是并不知道大致的非球面方程,即没有常规优化中的初始值,因此,采用遗传算法是一种比较合适的方法。

4 反演分析中的关键技术

非球面的方程通常表示为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2r^2}} + A_4r^4 + A_6r^6 + A_8r^8 + \dots, \quad (1)$$

式中 Z 是不同口径处非球面的矢高; c 是顶点曲率半径的倒数; r 是孔径, $r^2 = x^2 + y^2$,对于旋转对称面, $r = X$; K 是二次曲面系数; A_4, A_6 等是高次非球面系数,其对应的曲线图如图 2 所示。

对照轮廓仪测量数据与非球面方程及曲线,要实现反演,首先要解决以下几个技术问题。

1) 寻找非球面的对称点,并对数据进行转化处理

轮廓仪测量非球面时,不一定是完全对称进行测量的。而且测量数据文件中给出的数据在 X 方向上一律以 0 开始,也与方程不符合。处理方法是:首先取所有数据点个数的中间 1/4 部分,一般情况下该段曲线覆盖了非球面的对称点。对这段数据进行滤波平滑处理,然后采用最小二乘法进行多项式拟合^[4],即得到方程

$$Z = a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 + \dots, \quad (2)$$

对(2)式求导,并令 $\frac{\partial Z}{\partial X} = 0$,可以求出对称点 $P(X_0, Z_0)$,令 $X_i = X_{mi} - X_0$,其中 X_{mi} 是测量值, $i = 1, 2, \dots, N$,则数据转化为与(1)式对应的数据。

2) 对 Z 值进行中心点 0 值化处理

轮廓仪测量数据中中心点 X_0 处对应的 Z 值不一定是 0,而非球面方程对应的该 Z 值必须为 0,因此必须进行处理,方法是: $Z_i = Z_{mi} - Z_0$,其中 Z_{mi} 是测量值, $i = 1, 2, \dots, N$,则数据转化为与(1)式对应的数据。这样就将原始测量数据转化成为可以进行拟合分析的数据。

3) 进行初步反演分析

根据 1), 2) 中得到的 X_i, Z_i 值,采用遗传算法进行非球面方程的反演。对于非球面方程中的变量,必须给出取值范围。取值范围的给定原则是:在该范围内,遗传算法能够较高效率地找到最优值,因此为了提高遗传算法的效率,仍然有一些技巧可以应用。

a) 非球面顶点曲率半径及 K 值的取值范围

可以先假定非球面为某二次曲面,中心点曲率半径为 R_0 ,二次曲面系数为 k_0 ,取边缘的 $P_1(X_1, Z_1)$ 和中间的 $P_2(X_2, Z_2)$ 值,联立解以下方程

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{cX_1^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2X_1^2}} \\ Z_2 = \frac{cX_2^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2X_2^2}} \end{cases}, \quad (3)$$

则可以得到 $R_0 = 1/c$ 及 K_0 值,然后取 $R \in (0.8R_0, 1.2R_0), K \in (0.8K_0, 1.2K_0)$ 。以上是 R_0 及 K_0 是正值的情况,负值取值范围类似,这里不再赘述。

b) 高次非球面系数取值范围的确定

高次非球面系数根据 X 值的多少次方进行确定,参考了光学优化设计程序的一些取值经验,例如可取为

$$A_i \in (-10^{-(i+2)}, 10^{-(i+2)}), i = 4, 6, 8, \dots$$

c) 反演处理

在测量数据中大致均匀地取 M 个点, M 以 50 ~ 100 个为宜,每一个点的 Z 值为 Z_{mi} 。将 M 个 X 值代入遗

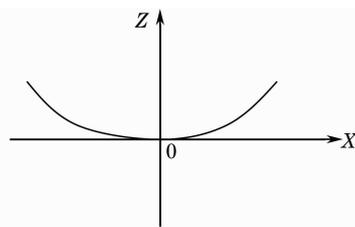


图 2 非球面方程曲线示意图

Fig. 2 Aspheric equation curve schematic diagram

传算法产生的一个个体对应的方程计算,得到 Z 值为 Z_{gi} , 则遗传算法的适应度可取为

$$F = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M (Z_{gi} - Z_{mi})^2}}{M}. \quad (4)$$

4) 校正测量数据的倾斜

轮廓仪测量的数据有可能是零件在没有完全调平的情况下测得的,经过以上几种处理后,有可能得到的数据是有一定倾斜的数据,应该予以校正。具体校正方法是:初步反演出非球面方程后,利用计算机画出该方程相对于测量数据的误差曲线,目视观察数据是否倾斜,如果倾斜,则利用鼠标取得大致对称两点的坐标,并自动计算倾斜斜率,再将初始测量数据乘上该斜率,然后重新进行其它上述处理,即可校正数据倾斜。

5 编程及示例

根据以上理论技术分析,编制了相应的反演分析软件。软件的主界面如图 3 所示。在子窗口中,左端是根据读取的轮廓仪测量数据所画曲线,以及反演后面形误差曲线,右边是反演分析选项及参数设置。

对一个数据进行了反演分析,令非球面方程的 c, K, A_4, A_6 为变量,采用实数编码,取交叉概率为 0.95,变异概率为 0.1,种群规模为 100,保留每代的最优值,经过 100 代的优化后,得到了非球面方程,其与测量值相比较的误差如图 4 所示,图 4 中纵坐标单位为 μm 。从图中可以看出,反演得到了很好的结果,误差在 $0.01 \mu\text{m}$ 以内,主要是由非球面加工自身的局部误差引起的,说明了本算法的有效性。

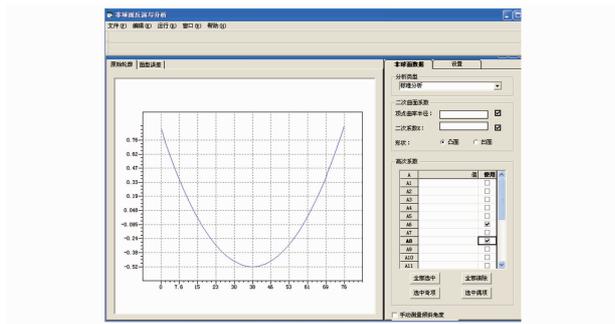


图 3 非球面反演软件界面

Fig. 3 Aspheric inversion software interface

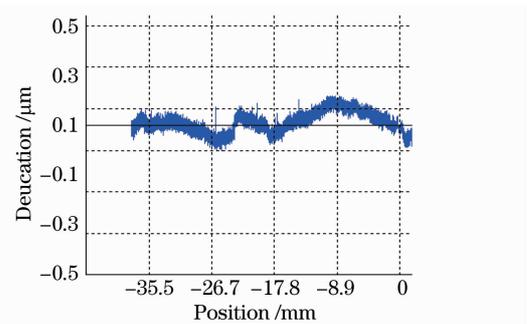


图 4 反演方程与测量值之间的偏差曲线图

Fig. 4 Deviation between the inversion equation and measured value curve

6 结 论

根据本文的分析及编程实验结果可以得到以下结论:

- 1) 将遗传算法用于非球面方程的反演是可行的,不需要输入方程的初始参数,且效率比较高;
- 2) 利用轮廓仪测量的初始表面轮廓数据进行非球面反演,必须进行有效的处理,包括中心数据点的求取、倾斜的校正等;
- 3) 由于遗传算法每一代种群中的个体是随机产生的,因此每次反演得到的非球面方程参数可能不完全一样,但基本上都能够表征非球面面型,使得误差很小;
- 4) 非球面形式多种多样,决定了采用遗传算法反演方程不是万能的,特别是选取合适的参数取值范围非常重要,它往往决定了反演是否能够成功。

参 考 文 献

- 1 Zhang Kunling, Lin Bin, Wang Xiaofeng. The status and developing tendency of optic part machine[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2007, (05): 1~5
- 张坤领,林 彬,王晓峰. 非球面加工现状[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2007, (05): 1~5
- 2 Xue Donglin, Zhang Zhongyu, Zhang Xuejun. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens

- [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, **13**(2): 198~204
- 薛栋林,张忠玉,张学军. 一种小口径非球面元件数控抛光技术[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(2): 198~204
- 3 Jia Lide, Wang Jiawu, Zheng Ziwen *et al.*. Optimization algorithm for the measurement of vertex radius of aspherics with a swing-arm profilometer[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2009, **30**(9): 1996~1999,1794
- 贾立德,王家伍,郑子文等. 光学非球面形摆臂式轮廓法测量顶点曲率半径优化算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(9): 1996~1999,1794
- 4 Qiu Gufeng, Guo Peiji, Xie Bin. Mathematical model of contacting aspheric surface contour measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, **15**(4): 493~498
- 仇谷峰,郭培基,懈滨等. 接触式非球面轮廓测量的数据处理模型[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(4): 493~498
- 5 Wu Gaofeng, Chen Qiang, Hou Xi *et al.*. Interferometric testing the vertex radius and conic constant of a conic surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2804~2807
- 吴高峰,陈强,侯溪等. 干涉法测量非球面顶点半径和二次常数[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2804~2807
- 6 Zhu Yongjian, Pan Weiqing. Measurement of aspheric surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 11202-1
- 朱勇建,潘卫清. 非球面面形测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(10): 11202-1
- 7 Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao *et al.*. Analysis and correction of retrace error for nonnull aspheric testing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 688~696
- 刘东,杨甬英,田超等. 非球面非零位检测中的回程误差分析与校正[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 688~696
- 8 Arai Yoshikazu, Gao Wei, Shimizu Hiroki Su. On-Machine measurement of aspherical surface profile[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, **2**(3): 210~211
- 9 Huang Hao, Guo Yinbiao, Wang Zhenzhong *et al.*. Error separation and compensation technology of axisymmetric aspheric machining[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2005, **41**(12): 177~181
- 黄浩,郭隐彪,王振忠等. 轴对称非球面加工误差分离及补偿技术[J]. *机械工程学报*, 2005, **41**(12): 177~181
- 10 A. J. Keane. Genetic algorithm optimization of multi-peak problems; studies in convergence and robustness[J]. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1995, (02): 75~83
- 11 J. H. Holland. *Adaptation in Natural Artificial Systems*[M]. Cambridge: the Mit Press, 1975
- 12 Yan Xinchu, Hua Yuan. Establishment of genetic algorithm fitness function in reliability-based structural optimization[J]. *Chinese J. Computational Mechanics*, 2009, **26**(1): 120~123
- 严心池,华渊. 可靠性优化问题中遗传算法适应值函数的建立[J]. *计算力学学报*, 2009, **26**(1): 120~123
- 13 Chen Lunjun, Luo Yanke, Chen Haihong *et al.*. *Genetic Algorithm in Mechanical Design*[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2005. 3
- 陈伦军,罗延科,陈海红等. *机械优化设计遗传算法*[M]. 机械工业出版社, 2005. 3.