

基于 MATLAB 与非球面轮廓仪的 Q-Type 非球面检测技术

贾孟, 薛常喜*, 李闯, 兰喜瑞, 王蕾, 王伦, 吴百融

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 Q-type 非球面广泛应用于光学系统设计中, 针对 Q-type 非球面超精密加工过程中的面形检测问题, 提出了一种 MATLAB 软件与 Taylor Horbison PGI-1240 非球面轮廓仪相结合的方法, 以达到对 Q-type 非球面进行高精度检测的目的。检测结果表明, 由 Nanoform 700 Ultra 单点金刚石超精密车床加工的全口径为 11.8 mm 的单晶铜 Q-type 非球面面形误差峰谷(PV)值为 $0.1963 \mu\text{m}$, 表面粗糙度方均根(RMS)值为 $0.03412 \mu\text{m}$, 满足加工第一阶段面形误差 PV 值 $< 0.2 \mu\text{m}$ 和表面粗糙度 RMS 值 $< 0.04 \mu\text{m}$ 的要求。此检测方法可以精确得到工件面形误差, 为下一阶段车削加工提供数据支持。

关键词 测量; Q-type 非球面检测; MATLAB; 非球面轮廓仪; 单点金刚石车削

中图分类号 O439; TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.151201

Q-Type Asphere Testing Technology Based on MATLAB and Aspheric Profilometer

Jia Meng, Xue Changxi*, Li Chuang, Lan Xirui, Wang Lei, Wang Lun, Wu Bairong

School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,

Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Q-type asphere has broad application prospect which has been applied in optical system design increasingly. But there is no easy or high-efficiency way to test the Q-type aspherical surface precisely until now. Aimed at the testing of Q-type asphere in the process of ultra-precision turning, a method based on MATLAB and Taylor Horbison PGI-1240 aspheric profilometer is proposed. First, we have fabricated a single crystal cupreous Q-type asphere whose aperture is 11.8 mm by Nanoform 700 single point diamond ultra turning lathe. And the testing result shows that, the PV and RMS values of Q-type asphere surface shape error are $0.1963 \mu\text{m}$ and $0.03412 \mu\text{m}$. It meets the requirement that PV value should be less than $0.2 \mu\text{m}$ as well as RMS value should be less than $0.04 \mu\text{m}$. This testing method can get precise surface shape error and provide data support for next stage of turning.

Key words measurement; Q-type asphere testing; MATLAB; aspheric profilometer; single point diamond turning

OCIS codes 120.4640; 220.4840; 220.1250; 120.4610

1 引言

近年来,非球面光学元件在现代光学系统中得到了越来越广泛的应用,但传统幂级数非球面的数学表达方式存在着固有缺陷,对于一个确定形状的曲面,当利用 10 项以上多项式进行高精度拟合时,

与之相关的 Gram 矩阵容易呈现病态,导致面形表征失败。为了解决这个问题,2007 年美国 QED 公司的 Forbes^[1]提出了一种新的非球面数学表征形式,即用一个非标准正交基底取代传统且过于简单的附加多项式,并称之为 Q-type 函数多项式^[2]。其在光学设计过程中具有明显优势,如基底在定义域

收稿日期: 2019-01-29; 修回日期: 2019-02-15; 录用日期: 2019-02-27

基金项目: 吉林省重点科技研发项目(20180201030GX)

* E-mail: xcx272479@sina.com

内正交,在曲面优化设计时各项系数之间互不影响,能够通过控制各项系数进而控制面形偏离量,设计与加工评价同时进行,以提高系统的设计效率等^[3]。目前 Q-type 非球面的研究大多为光学系统设计,主要应用在全景光学系统^[4]、内窥镜物镜光学系统^[5]、照相机光学系统^[6-7]等。

虽然 Q-type 非球面具有优良的光学性质,但是对于 Q-type 非球面加工过程中的检测问题,还没有一个简单高效的解决方法,这也是影响非球面超精密加工的关键因素之一。对非球面的检测主要分为接触式与非接触式两种^[8]。接触式一般采用轮廓仪法,非接触式主要分为补偿法和计算全息法(CGH)^[9-10]。Q-type 非球面,由于是旋转对称的非球面,利用轮廓仪检测是一种快捷有效的方法。若使用计算全息法检测,不仅全息片计算量大,对其复位精度要求严格,而且不同参数的非球面需要对应制作不同的全息片,通用性较差^[11-12]。本文提出了一种 MATLAB 软件与非球面轮廓仪相结合的方法,通过 MATLAB 软件将 Q-type 多项式拟合为非球面轮廓仪的理论参考方程,即标准偶次非球面方程,拟合得到非球面系数后将其输入到非球面轮廓仪中得到检测数据,再对检测数据和拟合误差进行数据处理后得出检测结果。该方法可以简捷有效地解决加工过程中 Q-type 非球面的检测问题,以便后续的加工。

2 Q-type 非球面

2.1 Q-type 函数多项式的数学描述

Q-type 函数多项式包括 Q-con 和 Q-bfs 两种形式,Q-con 型函数多项式表征非球面的基本形式是在二次曲面的基础上附加新型多项式。Forbes 等^[1-2]通过选择一系列正交基底构造新型多项式,其表达式为

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + c_{\text{con}})c^2\rho^2}} + u^4 \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{\text{con}}(u^2). \quad (1)$$

Q-bfs 型函数多项式则定义了一个非球面,其特征量是从最佳拟合球面到非球面的方均根斜率偏离量,其表达式为

$$z(\rho) = \frac{c_{\text{bfs}}\rho^2}{1 + \sqrt{1 - c_{\text{bfs}}^2\rho^2}} + \frac{u^2(1 - u^2)}{\sqrt{1 - c_{\text{bfs}}^2\rho^2}} \cdot \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{\text{bfs}}(u^2), \quad (2)$$

式中: $c=1/R$, R 为顶点曲率半径, c_{con} 和 c_{bfs} 分别为所示非球面的最接近二次曲面和最佳拟合球面的曲率半径; ρ 为通光半口径, $u=\rho/\rho_{\text{max}}$, ρ_{max} 为表面最大通光半口径; a_m 为表征偏离基准曲面的系数^[13-14]; $Q_m(u^2)$ 是一组以 a_m 为系数的正交化 m 阶 Jacobi 多项式,两种 Q-type 非球面的 $Q_m(u^2)$ 表达形式不同,避免了偶次非球面表达式在进行优化计算时多项式各项之间的冗余干扰和精度丢失,使得光学系统的优化效率更高。

2.2 Q-type 非球面表面的拟合

本文中待检测的是 Q-bfs 型非球面,具体参数如下: $\rho_{\text{max}}=5.9$ mm, $c_{\text{bfs}}=0.011147$, 偏离基准曲面系数 $a_0 \sim a_5$ 依次为 1.2713×10^{-2} 、 4.772×10^{-3} 、 -3.203×10^{-3} 、 2.292×10^{-3} 、 -9.545×10^{-4} 、 2.111×10^{-4} 。其中, $Q_m^{\text{bfs}}(x)$ 的前6项基底多项式表示为

$$Q_0^{\text{bfs}}(x) = 1, \quad (3)$$

$$Q_1^{\text{bfs}}(x) = \frac{1}{\sqrt{19}}(13 - 16x), \quad (4)$$

$$Q_2^{\text{bfs}}(x) = \sqrt{\frac{2}{95}}[29 - 4x(25 - 19x)], \quad (5)$$

$$Q_3^{\text{bfs}}(x) = \sqrt{\frac{2}{2545}} \cdot \{207 - 4x[315 - x(577 - 320x)]\}, \quad (6)$$

$$Q_4^{\text{bfs}}(x) = \frac{1}{3\sqrt{131831}}\{7737 - 16x \cdot [4653 - 2x[7381 - 8x(1168 - 509x)]]\}, \quad (7)$$

$$Q_5^{\text{bfs}}(x) = \frac{1}{3\sqrt{6632213}}\{66657 - 32x\{28338 - x \cdot [135325 - 8x[35884 - x(34661 - 12432x)]]\}\}. \quad (8)$$

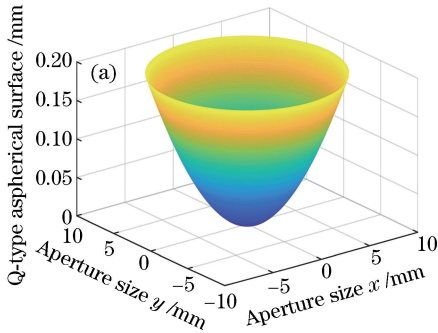
非球面轮廓仪的理论参考方程为标准偶次非球面方程^[15],表示为

$$z = \frac{x^2}{R + \sqrt{R^2 - (1+k)x^2}} + A_2x^2 + A_4x^4 + A_6x^6 + \dots, \quad (9)$$

式中: k 为圆锥系数; A_m 为非球面系数。由于理论参考方程不同于 Q-type 多项式的数学描述方式,二者存在较大差别,故轮廓仪无法直接检测 Q-type 非球面。为此,需要通过 MATLAB 软件根据 Q-type 多项式求取非球面表面各点的坐标值,再按照标准偶次非球面方程拟合出检测所需的各项非球面系数。令各奇次方项系数为0,再输入 R 、 k 以及系数 $A_2 \sim A_{12}$,并对拟合误差以及轮廓仪检测数据进行数据处理后

才能够得出较准确的检测结果。

在 MATLAB 软件中使用非线性最小二乘法进行数据拟合^[16-17],拟合误差在 ± 50 nm 以内,检测完成后的数据处理阶段会将拟合误差加入其中,因此拟合误差不会对检测结果产生影响。拟合后的标准偶次非球面顶点曲率半径 $R = 89.71$,圆锥系数 $k = -1.08$,高次项系数 $A_2 \sim A_{12}$ 依次为 4.8940×10^{-4} 、 -1.9620×10^{-6} 、 -1.8220×10^{-6} 、 1.1112×10^{-7} 、



-2.9011×10^{-9} 和 2.7616×10^{-11} 。

如图 1(a)所示,由 MATLAB 软件得到的 Q-type 非球面表面,并可知各点坐标矢高理论值,中心处矢高为 0,而边缘 5.9 mm 处矢高为 0.195084 mm;如图 1(b)所示,对 Q-type 多项式按照标准偶次非球面方程拟合后得到的标准偶次非球面表面,其中心处矢高为 0,而边缘处矢高为 0.195061 mm,边缘处误差为 2.3×10^{-5} mm。

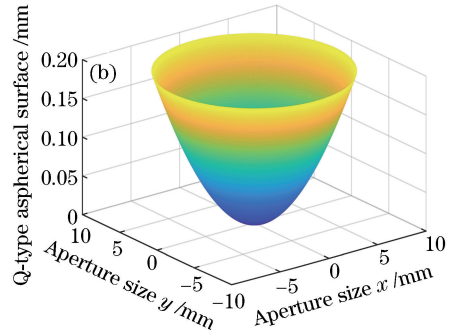


图 1 非球面理论面形。(a) Q-type 非球面;(b)拟合标准偶次非球面

Fig. 1 Theoretical aspherical surface. (a) Q-type asphere; (b) fitting standard even asphere

图 2 为表面的拟合误差曲线,总体拟合误差在 $-20 \sim 50$ nm,拟合残差平方和(各点拟合值与理论值之差的平方和)为 4.031×10^{-5} 。

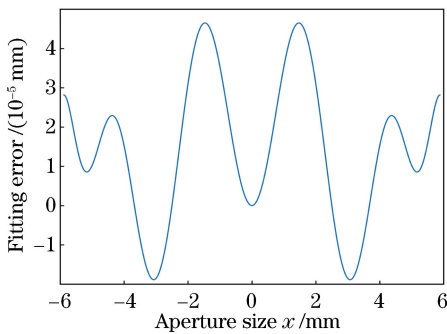


图 2 拟合误差曲线

Fig. 2 Fitting error curve

3 Q-type 非球面的检测

在检测之前需完成 Q-type 非球面和拟合标准偶次非球面的加工。本次加工使用型号为 Nanoform 700 Ultra 的单点金刚石超精密车床,选取两把刀尖半径为 1 mm、前角为 0° 的金刚石刀具,分别用作粗加工、半精加工与精加工,最终达到面形误差峰谷(PV)值 $< 0.1 \mu\text{m}$,表面粗糙度方均根(RMS)值 $< 0.02 \mu\text{m}$ 的超精密加工要求。在加工过程中,将各非球面面形参数输入到加工软件 Diffsys 中,得到两个非球面的最佳拟合球面半径,即用来进行粗加工的球面半径。由 MATLAB 软件可计算得

到非球面偏离最佳拟合球面的面形偏离量,即精加工需去除量。如图 3 所示,可以看出,二者加工去除量较为接近,最大加工去除量 $< 5 \mu\text{m}$,并且两个非球面的最佳拟合球面半径相同,面形偏离量差值与拟合误差分布完全一致。

编写好加工程序后,采用多轴联动的加工方式,对两个非球面设置相同的加工参数。各个阶段的主要加工参数^[18],即主轴转速、进给率、切削深度见表 1。

待精加工完成后将工件从车床取下,如图 4 所示(左侧为标准偶次非球面,右侧为 Q-type 非球面),并对两个工件表面进行面形检测,以便后续加工。

本次检测使用的非球面轮廓仪型号为 Taylor-Hobson PGI-1240,选择的钻石探针针尖半径为 0.02 mm, x 坐标取值范围在 ± 5.9 mm 之间,每两个取样点 x 间距为 1.25×10^{-4} mm,取点总数为 94400,每个 x 坐标对应一个 z 坐标矢高数据,生成 94400 个 (x, z) 坐标点。在检测过程中不可避免地受到环境振动的影响,出现一些数值波动较大的异常数据。将这些数据取均值进行平滑处理,尽量减小检测误差,以降低对检测结果的影响。处理后的面形误差数据如图 5、6 所示。

图 5 为拟合标准偶次非球面检测结果,从误差数据曲线可以看出,加工误差整体呈边缘大于 0、中心小于 0 的趋势,面形误差 PV 值为 $0.1607 \mu\text{m}$,表

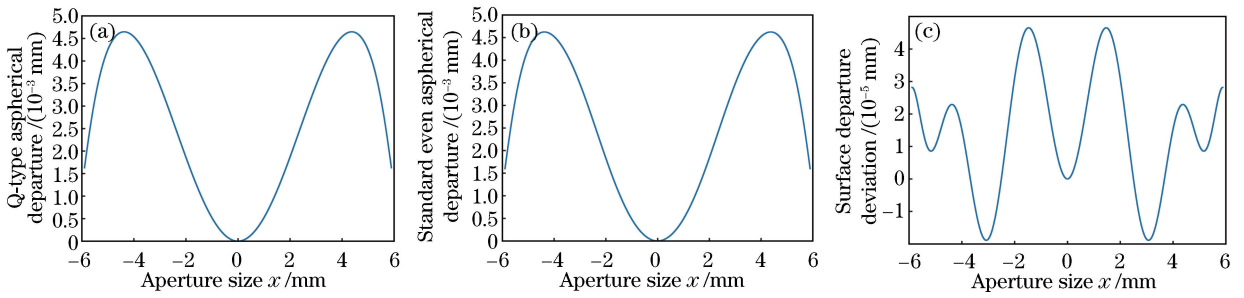


图3 面形偏离量曲线。(a) Q-type非球面;(b)拟合标准偶次非球面;(c)两非球面偏离量差值
Fig. 3 Surface departure curves. (a) Q-type asphere; (b) fitting standard even asphere; (c) difference of deviation between two aspheric surfaces

表1 主要加工工艺参数
Table 1 Main processing parameters

Parameter	Spindle speed / ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	Feed rate / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	Cutting depth $d / \mu\text{m}^{-1}$
Rough turning	2000	6	3
Half finished turning	2000	4	1
Finishing turning	2000	2	0.5



图4 实际加工的非球面工件
Fig. 4 Actual processing aspherical work piece

面粗糙度 RMS 值为 $0.02813 \mu\text{m}$, 在 x 坐标为 -5.691 mm 处的最大误差为 $0.0871 \mu\text{m}$ 。

图6为Q-type非球面的检测结果。图6(a)表示在数据处理前,当以标准偶次非球面方程为理论

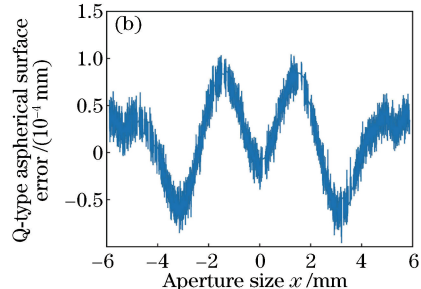
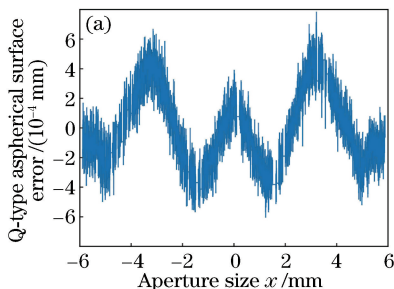


图6 Q-type非球面检测结果。(a)数据处理前;(b)数据处理后

Fig. 6 Detection results of Q-type asphere. (a) Before data processing; (b) after data processing

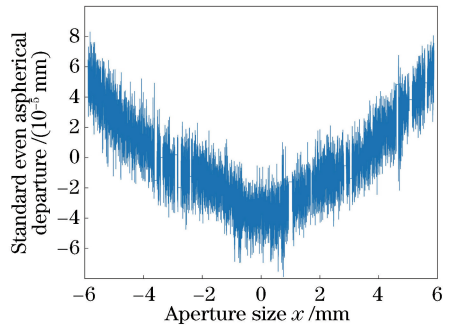


图5 拟合标准偶次非球面的检测结果

Fig. 5 Detection result of fitting standard even asphere

参考值时,面形误差 PV 值为 $0.1396 \mu\text{m}$,表面粗糙度 RMS 值为 $0.025 \mu\text{m}$,在 x 坐标为 3.216 mm 处有最大面形误差为 $0.0783 \mu\text{m}$;图6(b)表示在加入拟合误差处理数据后,Q-type非球面实际加工面形与理论面形的差值,其 PV 值为 $0.1963 \mu\text{m}$,表面粗糙度 RMS 值为 $0.03412 \mu\text{m}$,在 x 坐标为 1.239 mm 处的最大误差为 $0.105 \mu\text{m}$,已经达到此阶段加工面形误差 PV 值 $< 0.2 \mu\text{m}$ 和表面粗糙度 RMS 值 $< 0.04 \mu\text{m}$ 的要求。

4 结 论

利用 Nanoform 700 Ultra 单点金刚石超精密车床加工了材料为单晶铜,全口径为 11.8 mm 的 Q-

type 非球面和标准偶次非球面,并在首次加工完成后使用非球面轮廓仪检测 Q-type 非球面,以确定是否满足第一阶段加工精度要求。对待测 Q-type 非球面多项式进行最小二乘拟合,将其拟合为非球面轮廓仪的理论参考方程,并得到拟合误差曲线。检测过程中利用非球面轮廓仪采集大量坐标点得出工件表面相对于理论参考值的面形误差。将拟合误差加入到面形误差值中得到的即为最终加工面形误差。检测结果表明,Q-type 非球面的面形误差 PV 值为 $0.1963\ \mu\text{m}$,表面粗糙度 RMS 值为 $0.03412\ \mu\text{m}$,满足第一阶段加工精度要求,可开始下一阶段加工。

参 考 文 献

- [1] Forbes G W. Shape specification for axially symmetric optical surfaces [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5218-5226.
- [2] Forbes G W, Brophy C P. Asphere, O asphere, how shall we describe thee? [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7100: 710002.
- [3] Youngworth R N. Tolerancing Forbes aspheres: advantages of an orthogonal basis[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7433: 74330H.
- [4] Zhou X D, Bai J. Small distortion panoramic annular lens design with Q-type aspheres [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0722003.
周向东, 白剑. Q-type 非球面小畸变全景环带光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0722003.
- [5] Li C, Xue C X, Yang H F, *et al.* Optical system design of electronic endoscope objective with Q-type aspheres [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0622001.
李闯, 薛常喜, 杨红芳, 等. 基于 Q-type 非球面的电子内窥镜物镜光学系统设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0622001.
- [6] Ma B, Sharma K, Thompson K P, *et al.* Mobile device camera design with Q-type polynomials to achieve higher production yield[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17454-17463.
- [7] Ma B, Li L, Thompson K P, *et al.* Applying slope constrained Q-type aspheres to develop higher performance lenses [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21174-21179.
- [8] Shi T, Yang Y Y, Zhang L, *et al.* Surface testing methods of aspheric optical elements [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 26-46.
师途, 杨雨英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. *中国光学*, 2014, 7(1): 26-46.
- [9] Xi J P, Li B, Ren D X, *et al.* Research progress of measurement technology for large-diameter aspheric elements on grinding stage [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030008.
席建普, 李彬, 任东旭, 等. 大口径非球面元件磨削轮廓测量技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030008.
- [10] He L, Wu Z H, Kang Y, *et al.* High order aspheric testing with large asphericity, fast focal ratio and large diameter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 122201.
何丽, 武中华, 康燕, 等. 大非球面度快焦比中大口径高次非球面检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 122201.
- [11] Gao S T, Sui Y X, Yang H J. High precise testing of asphere with computer-generated hologram and error evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0612003.
高松涛, 隋永新, 杨怀江. 用计算全息图对非球面的高精度检测与误差评估[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0612003.
- [12] Shao S C, Tao X P, Wang X K. On-machine surface shape measurement of reflective mirrors by ultra-precision turning based on fringe reflection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 071203.
邵山川, 陶小平, 王孝坤. 基于条纹反射的超精密车削反射镜的在位面形检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 071203.
- [13] Forbes G W. Robust and fast computation for the polynomials of optics [J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13851-13862.
- [14] Forbes G W. Robust, efficient computational methods for axially symmetric optical aspheres [J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19700-19712.
- [15] Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 62-68.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 62-68.
- [16] You Y, Wang Q F, Zi Z H. A test technique of surface shape aspheric optics parameters based on Matlab [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(4): 331-335.
尤越, 王乔方, 字正华. 一种基于 Matlab 的非球面光学元件面形参数测试技术[J]. *红外技术*, 2014, 36(4): 331-335.
- [17] Solaguren-Beascoa Fernández M. MATLAB

implementation for evaluation of measurements by the generalized method of least squares [J]. Measurement, 2018, 114: 218-225.

[18] Zhang Y J, Dong G J, Zhou M. The study of the

influence of tool wear on cutting temperature in diamond ultra-precision cutting of aluminum alloy mirror[J]. Key Engineering Materials, 2016, 693: 982-989.