

doi:10.3788/gzxb20134204.0417

超光滑加工技术中光学元件表面材料的均匀去除

陈华男, 王君林, 刘健

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

摘要:超光滑加工通常是在保证光学元件面型精度不劣化前提下提升其中高频精度. 均匀去除是保证超光滑加工过程中光学元件面型精度不劣化的重要途径. 本文以四轴三联动小磨头超光滑加工机床为基础, 结合 Preston 假设, 研究了四轴三联动超光滑加工机床对光学元件的材料去除特性, 发现当机床取某些特定的参量时, 通过等值的驻留时间规划即可实现光学元件表面材料的均匀去除. 最后, 对这些特定的参量进行了对比实验. 实验结果验证了理论分析的正确性.

关键词:小磨头; 超光滑加工; 均匀去除; 等值驻留时间

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)04-0417-6

Uniform Removal of the Surface Material of the Optical Components in Ultra-smooth Technology

CHEN Hua-nan, WANG Jun-lin, LIU Jian

(The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Accuracy of the intermediate frequency and the high frequency, of the optical components, are enhanced during the ultra-smooth processing, under the premise of non-deterioration of its surface accuracy. The uniform removal is an important way to ensure of non-degradation of the surface accuracy of the optical components during the ultra-smooth processing. On the basis of the four-axis three linkage machine with small grinding heads, used for ultra-smooth processing, combined with the Preston hypothesis, the characteristics of the material removal of the optical components are studied. When the machine takes some specific parameters, uniform removal of the surface material of the optical element can be achieved with equivalent dwell time. Finally, comparison tests are done to test the specific parameters. The test results confirm the results of the theoretical analysis.

Key words: Small grinding head; Ultra-smooth processing; Uniform removal; Equivalent dwell time

0 引言

球面及非球面光学元件在国防、航天及民用光学系统中得到了广泛的应用. 由于非球面可使光学系统精度更高, 重量更轻、结构更简单, 因此近年来大口径、高精度非球面的加工技术越来越凸显重要性^[1]. 计算机控制小磨头实现光学表面超光滑是加工大口径球面以及非球面光学元件不可替代的重要技术.

超光滑加工作为提高光学元件中高频精度的有

力工具, 通常是光学元件加工过程的最后步骤^[2-5]. 因此, 超光滑加工前, 光学元件的低频精度已基本达到要求, 超光滑加工需要在低频精度不劣化的前提下实现中高频精度的改善. 超光滑加工过程中, 实现光学元件表面材料的均匀去除是保证光学元件面型精度不劣化的必要手段. 有效地实现光学元件表面材料的均匀去除是超光滑工艺研究的重点.

本文以 Preston 假设为基础, 研究了四轴三联动超光滑加工机床在超光滑加工过程中对光学元件的材料去除特性, 提出以等值驻留时间规划实现光

基金项目: 国家科技重大专项项目(No. 2009ZX02205)资助

第一作者: 陈华男(1985-), 男, 研究实习员, 硕士, 主要研究方向为光学元件的超光滑加工. Email: chennyhit@163.com

收稿日期: 2012-10-22; 录用日期: 2012-12-04

学表面材料等厚去除,从而减小过程误差、提高加工精度的方法.对等值驻留时间前提下光学元件表面材料相对累积去除深度进行了分析,力求实现相对累积去除深度等值,进而实现均匀去除.最后,本文对理论分析结果进行了实验验证,从而证实了四轴三联动超光滑加工机床实现光学元件表面材料均匀去除是有效的方法.

1 小磨头超光滑机床运动分析

由于平面、球面以及回转对称非球面的回转对称性质,故可以采用如图 1 所示的四轴三联动机床实现平面、球面以及回转对称非球面的小磨头超光滑加工.该机床有左右平移轴 X ,上下平移轴 Z ,摆轴 B 以及转轴 C ,其中转轴 C 不参与机床联动.

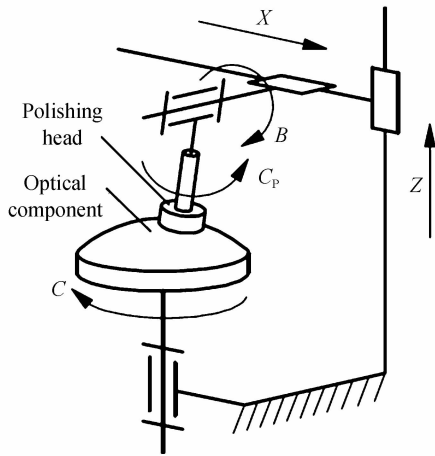


图 1 四轴三联动机床机构简图
Fig. 1 Diagram of mechanism of four-axis three linkage CNC

在图 1 中,磨头在三联动轴作用下沿着光学元件面型的母线移动,则在 C 轴的回转作用下,光学元件整个面型都能被超光滑加工覆盖到.显然,小磨头相对于光学元件走出的加工轨迹为螺旋线式或者是同心圆式.

磨头相对于光学元件的运动可以简化为如图 2 所示.光学元件半径为 r_m ,光学元件以转速 ω_1 顺时

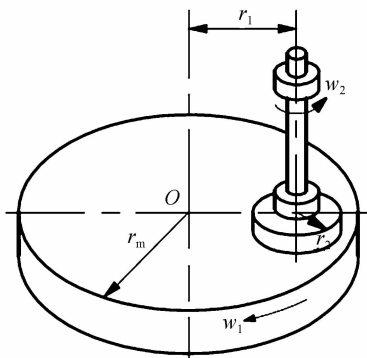


图 2 小磨头运动简图
Fig. 2 Diagram of the movement of the small grinding head

针转动;磨头半径为 r_2 ,磨头以转速 ω_2 逆时针转动,磨头轴线与光学元件表面的交点距离光学元件轴线为 r_1 .由于磨头沿着光学元件的母线运动,所以 r_1 的值是随时间变化的.

为了分析磨头与光学元件间的相对运动,将参考坐标系固定在光学元件中心,则磨头与光学元件的相对运动关系如图 3 所示,磨头以速度 ω_1 公转的同时以速度 ω_2 自转,方向均为逆时针方向.由于 r_1 是随时间变化的,故磨头与光学元件的相对运动为公转半径可变的双转子运动.

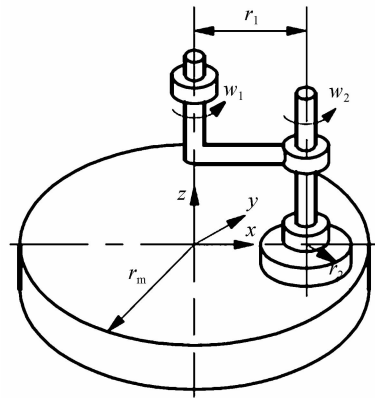


图 3 小磨头运动等效简图
Fig. 3 Equivalent diagram of the movement of the small grinding head

2 小磨头超光滑机床的加工特性

计算机控制光学表面成形技术的基础是 Preston 假设,即

$$dZ/dt = KVP \tag{1}$$

式中: Z 表示某点的材料去除量; V 表示某点某刻的抛光速度; P 表示某点某刻的抛光压力; K 为比例常量,表示除压力及速度外其它因素的综合影响.

式(1)表示抛光过程中光学元件表面单位时间的材料去除量与抛光速度及抛光压力成正比^[6-8].在时间长度为 t 的抛光过程中,某点的材料去除量为

$$Z = \int_0^t KVP dt \tag{2}$$

则整个抛光过程中小磨头的去除函数为

$$R(x, y) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} \int_0^T KV(x, y, t) P(x, y, t) dt \right] \tag{3}$$

在抛光过程中,光学元件表面材料的去除可以数学描述为

$$\Delta Z(x, y) = R(x, y) * * D(x, y) \tag{4}$$

式中: $**$ 表示二维卷积; $\Delta Z(x, y)$ 表示点 (x, y) 处的材料去除量; $R(x, y)$ 表示去除函数; $D(x, y)$ 表示驻留时间函数.

式(4)表示某点 (x, y) 处的材料去除量 ΔZ 是该点去除函数 $R(x, y)$ 与去除函数在该点的驻留时

间 $D(x, y)$ 的卷积^[9-11].

在小磨头抛光过程中,小磨头的去除函数一般都是已知的,所以如何规划驻留时间成为实现光学表面成型技术的核心.驻留时间规划越简单,则预期光学元件面型精度的可预见性及可实现性都将更好,相反,复杂的驻留时间规划将使预期光学元件面型精度受更多的因素影响,从而必然影响其最终面型精度.

小磨头对光学元件上某点的去除函数是该点速度与压力的卷积^[12-13].不考虑边缘效应,同时假设小磨头抛光面与光学元件表面等距贴合,则磨头与光学元件间的压力 P 可以认为是恒定不变的,所以小磨头对光学元件的抛光效果是磨头公转运动与自转运动合作用的结果.双转子抛光的运动简图如图 4 所示.距离公转中心 r 处点 P 在磨头上的对应的半径为 ρ .半径为 r 的圆与磨头重合部分的圆心角的一半为 θ_0 ,点 P 与 O 点连线与 x 轴夹角为 θ , P 点速度为 V .

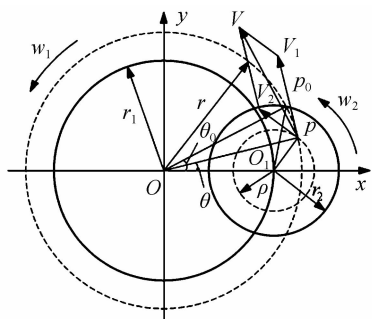


图 4 双转子抛光运动分析

Fig. 4 Kinematic analysis of dual-rotor polishing

根据文献[1]可以得到点 P 的速度为

$$V(\theta, r) = [(\omega_1^2 + \omega_2^2)r^2 + r_1^2\omega_2^2 + 2r^2\omega_1\omega_2 - 2rr_1(\omega_2^2 + \omega_1\omega_2)\cos\theta]^{1/2} \quad (5)$$

所以由式(3)可以得到双转子运动的去除函数

为

$$R(x, y) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{KP}{T} \int_0^T V(x, y, t) dt \right] \quad (6)$$

$$R(r) = \frac{KP}{2\pi\omega_1} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} V(\theta, r) d\theta \quad (7)$$

式中, $\theta_0 = \arccos\left(\frac{r^2 + r_1^2 - r_2^2}{2rr_1}\right)$

在图 3 中,随机取一些机床参量:取光学元件半径 r_m 为 50 mm,磨头半径 r_2 为 10 mm,光学元件转速 ω_1 为 10 r/min,方向为顺时针方向,磨头转速 ω_2 为 200 r/min,方向为逆时针.则磨头从光学元件中心处运动至光学元件边缘位置处的过程中,其去除函数如图 5 所示.

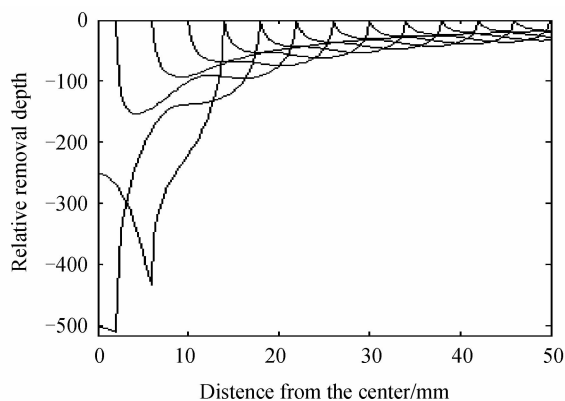


图 5 光学元件上各处去除函数

Fig. 5 Removal function range on the optical component

图 5 中,在光学元件中心附近,去除函数非常陡峭,远离光学元件中心处去除函数的变化趋于平缓.在距离光学元件中心较远处,由于去除函数相差不大,所以更容易实现均匀去除,而在光学元件中心附近则容易形成凹坑.在整个光学元件范围内,光学元件中心附近与光学元件边缘附近的去除函数相差很大,为了实现磨头对光学元件的均匀去除,需要合理规划并精确控制磨头在光学元件各个半径处的驻留时间.因为驻留时间的复杂控制难以精确实现,故在整个面型上实现均匀去除是比较困难的.

当光学元件中心附近与光学元件边缘附近的去除函数几乎相同时,驻留时间的规划与控制最简单,选用各处驻留时间等值即可实现光学元件表面的均匀去除.

3 光学元件表面材料均匀去除的实现

如果对图 5 所示的去除函数进行各处驻留时间等值规划,则当磨头从光学元件中心运动到光学元件周边时,光学元件上各处的总材料去除量即相对累积去除深度如图 6 所示.

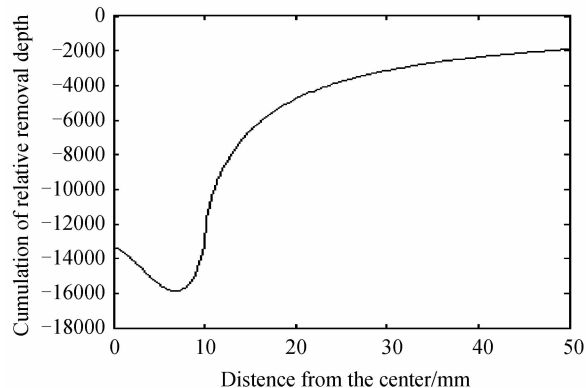


图 6 光学元件上各处总材料去除量

Fig. 6 Total material removal on the optical component

从图6可以看出,光学元件中心附近去除量远

大于距离光学元件中心较远处. 距离光学元件中心较远处的累积去除深度函数变化较平缓, 而中心附近则变化陡峭. 由于均匀去除时, 光学元件上各处的相对累积去除深度是等值的, 所以从图 6 可以看出, 采用等值驻留时间规划时, 前文所述超光滑机床参量的理论相对累积去除效果距离均匀去除差异很大, 为了实现均匀去除效果需要进行复杂的驻留时间规划.

为了研究小磨头超光滑机床参量对光学元件全面型各处相对累积去除量的影响, 令

$$\eta = \omega_1 / \omega_2 \quad (8)$$

取光学元件半径 r_m 为 50 mm, 小磨头半径 r_2 为 10 mm, 小磨头转速 ω_2 为 200 r/min, 本文研究了 η 取不同值时, 光学元件表面材料的理论相对累积去除量, 如图 7 所示.

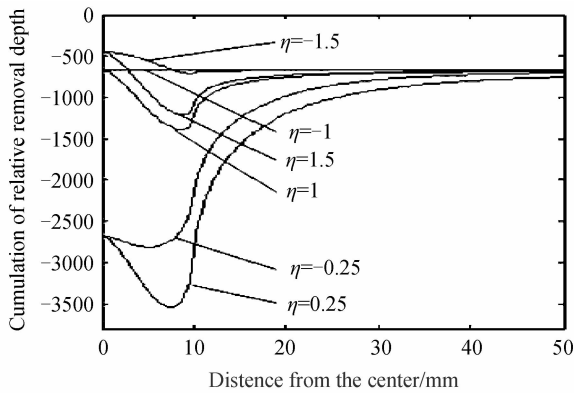


图 7 不同 η 时光学元件上的总材料去除量

Fig. 7 Total material removal on the optical component when η is different

从图 7 可以看出, 当 η 的绝对值越接近 0, 则相对累积去除深度曲线越陡峭, 即距离均匀去除的效果越远; 当 η 的值越接近 -1, 则相对累积去除深度曲线越平缓, 即距离均匀去除的效果越近, 当 η 的值为 -1 时, 可以看出, 光学元件各处的相对累积去除深度基本是等值的, 即理论上实现了均匀去除.

在图 3 中, 令 ω_1 与 ω_2 反向, 也即

$$\omega_1 = -\omega_2 = \omega \quad (9)$$

则可以化简式(5)为

$$V(\theta, r) = \omega r_1 \quad (10)$$

所以, 由式(7)可以得到公转与自转等值反向的双转子抛光运动的去除函数理论方程为

$$R(r) = \frac{KP}{\pi\omega} \int_0^{\theta_0} \omega r_1 d\theta = \frac{KP}{\pi} r_1 \theta_0 \quad (11)$$

$$R(r) = \frac{KP}{\pi} r_1 \arccos \frac{r_1^2 + r^2 - r_2^2}{2rr_1} \quad (12)$$

由式(12)可知, 公转与自转等值反向的双转子运动的去除函数仅与公转半径以及磨头半径相关, 与转速无关.

取光学元件半径 r_m 为 50 mm, 小磨头半径 r_2 为 10 mm, 磨头从光学元件中心运动到光学元件周边过程中, 其去除函数如图 8 所示.

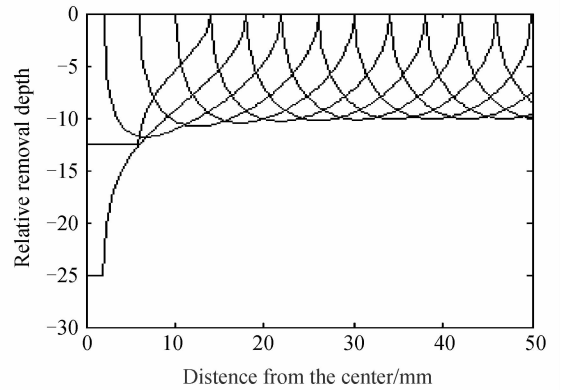


图 8 η 为 -1 时光学元件上各处去除函数

Fig. 8 Removal function range on the optical component when η is -1

从图 8 可以看出, 除去光学元件中心附近外, 其它地方的去除函数相差不多. 此种情况非常有可能简单地实现均匀去除. 设定光学元件表面各处驻留时间相同, 计算其各处相对累积去除深度, 结果如图 9 所示.

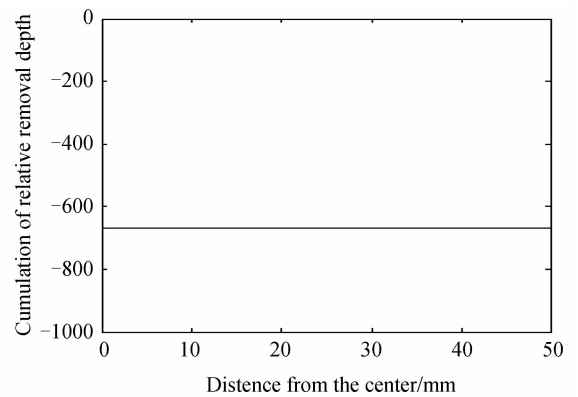


图 9 η 为 -1 时光学元件上的总材料去除量

Fig. 9 Total material removal on the optical component when η is -1

从图 9 中可以看出, 公转与自转等值反向的双转子运动, 当取光学元件上各处驻留时间等值加工时, 光学元件上各处相对累积去除深度等值, 即通过等值驻留时间规划实现了光学元件表面材料的均匀去除.

4 实验验证

为了验证前文的理论分析结果, 使用长春光机所自主研发的四轴三联超光滑加工机床进行光学元件表面材料均匀去除实验.

光学元件口径 $\Phi 100$ mm, 材质为熔石英; 小磨头直径 $\Phi 20$ mm; 机床 C 轴带动光学元件以转速 10 r/min 顺时针方向转动; 机床主轴带动小磨头以

转速 200 r/min 逆时针方向转动;小磨头等速缓慢从光学元件中心运动到光学元件边缘. 实验使用纳米金刚石抛光液.

加工前光学元件面型如图 10(a)所示,加工前光学元件的粗糙度如图 10(c)所示,经过 2 个小时的实验,光学元件的面型如图 10(b)所示,粗糙度如图 10(d)所示.

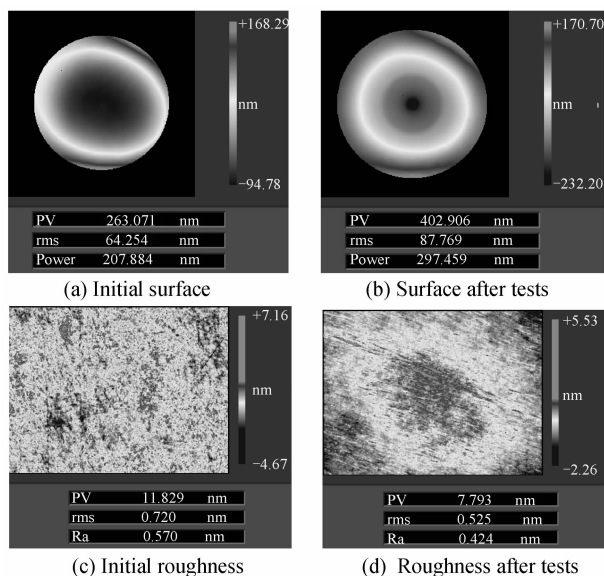


图 10 第一次实验结果对比

Fig. 10 Results contrast after the first test

对比图 10(a)与图 10(b)可以发现,加工后光学元件面型的 PV 值比加工前大 53%,RMS 值比加工前大 36.6%. 加工后光学元件面型的 PV 值和 RMS 值都比加工前要差,同时,加工后光学元件中心附近凹陷很明显,这证明了此次加工造成光学元件中心附近材料去除量大于光学元件周边附近,从而证明了此次加工在光学元件整个面上的材料去除是非均匀的. 这与图 6 的理论分析结果一致. 对比图 10(c)与图 10(d)可以发现,加工后光学元件粗糙度 RMS 值比加工前小 27%,达到 0.525 nm,超光滑加工使光学元件的粗糙度得到明显改善.

超光滑加工后,光学元件的面型遭到了破坏,无论中高频达到了怎样的指标,此次的超光滑加工是失败的.

选用机床 C 轴带动光学元件以转速 150 r/min 逆时针方向转动,机床主轴带动小磨头同样以转速 150 r/min 逆时针方向转动,其它参量与上次实验完全相同,进行第二次实验. 加工前光学元件面型如图 11(a)所示,经过 2 个小时的实验,光学元件面型如图 11(b)所示.

对比图 11(b)与图 11(a)发现,加工后光学元件面型的 PV 值和 RMS 值都与加工前持平,并且干涉图的形状极大相似,这证明了此次超光滑加工基本

上实现了光学元件表面材料的均匀去除. 这与图 9 的分析结果是一致的. 对比图 11(c)与图 11(d)可以发现,加工后光学元件粗糙度 RMS 值比加工前小 20.2%,达到 0.501 nm,超光滑加工使光学元件的粗糙度得到明显改善. 所以此次加工是在面型精度不劣化的前提下实现了光学元件中高频精度的提升.

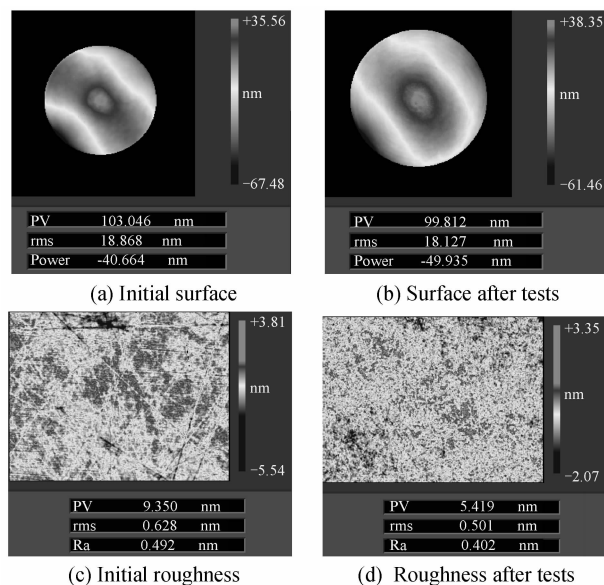


图 11 第二次实验结果对比

Fig. 11 Results contrast after the second test

为了进一步验证均匀去除的理论,对图 11 所示的光学元件采用完全相同的工艺参量再经过 3 个小时的实验,得到光学元件面型如图 12 所示.

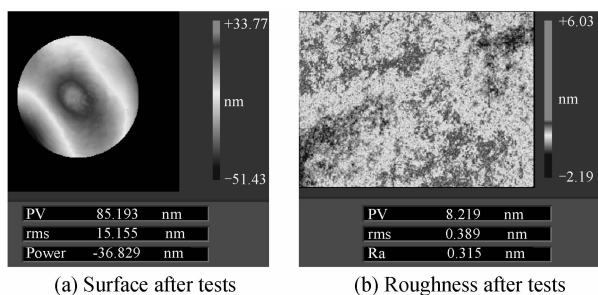


图 12 第三次实验结果

Fig. 12 Results after the third test

对比图 12(a)与图 11(b)可以发现,同一个光学元件,第二次加工后光学元件面型的 PV 值比第一次加工后小 14.6%,RMS 值比第一次加工后小 16.4%,第二次超光滑加工后,光学元件的面型精度有小幅提升,没有劣化. 对比图 12 和图 11 所示干涉图,可以认为第二次超光滑加工仍然基本实现了光学元件表面材料的均匀去除. 对比图 12(b)与图 11(d)可以发现,第二次超光滑加工后光学元件粗糙度 RMS 值比加工前小 22.3%,达到 0.389 nm,超光滑加工使光学元件的粗糙度得到明显改善.

5 结论

保证光学元件面型不劣化是对光学元件进行超光滑加工的前提。而光学元件表面材料的均匀去除是保证加工后光学元件面型不劣化的重要途径。针对去除函数已知的小磨头超光滑加工,等值驻留时间规划是实现光学元件表面材料均匀去除有效的方法。本文使用四轴三联动超光滑加工机床,实现了等值驻留时间规划下的光学元件表面材料的均匀去除,在光学元件面型精度不劣化的基础上粗糙度RMS值达到了0.389 nm,为高精度球面以及非球面光学元件的超光滑加工找到了有效的工艺参量。

参考文献

- [1] SHANG Wen-jin. Model building and simulation of computer control deterministic grinding and polishing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
尚文锦. 计算机控制确定性研抛的建模与仿真[D]. 长沙:国防科技大学,2005.
- [2] LI Bao-gui, XIONG You-chang, LI Cheng-gui, *et al.* Machining technology of super smooth surface[J]. *Technology and Test*, 2006, **32**(6): 60-63.
李宝贵,熊昌友,李成贵,等. 超光滑表面加工方法[J]. 工艺与检测,2006, **32**(6): 60-63.
- [3] ANDO M, NEGISHI M, TAKIMOTO M, *et al.* Super-smooth surface polishing on aspherical optics [C]. *SPIE*, 1992, **1720**: 22-33.
- [4] NEGISHI M, ANDO M, DEGUCHI A, *et al.* An on-machine coordinate measuring system for the canon super-smooth polisher [C]. SICE' 94, 33rd Annual Conference, Tokyo, 1994, **94**: 941-946.
- [5] GAO Hong-gang, CHEN Bin, CAO Jian-lin. Fabricating technology for supersmooth surfaces[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, **3**(4): 7-10.
高宏刚,陈斌,曹健林. 超光滑光学表面加工技术[J]. 光学精密工程, 1995, **3**(4): 7-10.
- [6] DAI Yi-fan, SHANG Wen-jin, ZHOU Xu-sheng. Effecton of the material of a small tool to the removal function in computer control optical polishing[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, **28**(2): 97-101.
戴一帆,尚文锦,周旭升. 计算机控制小工具抛光技术中磨盘材料对去除函数的影响[J]. 国防科技大学学报, 2006, **28**(2): 97-101.
- [7] WANG Quan-dou, LIU Min-cai, ZHANG Hong-xia. Removing function of polishing pad in computer controlled optical polishing[J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(1): 32-34.
王权陡,刘民才,张红霞. 数控抛光技术中抛光盘的去除函数[J]. 光学技术, 2000, **26**(1): 32-34.
- [8] WANG Gui-lin, DAI Yi-fan, LI Sheng-yi. Research on the determination for the abrasive disk's dimension in aspheric optics machining [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, **40**(1): 147-150.
王贵林,戴一帆,李圣怡. 光学非球面加工中研抛盘尺寸合理选择的研究[J]. 机械工程学报, 2004, **40**(1): 147-150.
- [9] WANG Quan-dou, YU Jing-chi, ZHANG Feng, *et al.* Polishing performance comparison of small polishing pad worked in different motion model in computer controlled optical polishing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(5): 73-78.
王权陡,余景池,张峰,等. 数控抛光中不同运动方式下小抛光盘抛光特性之比较[J]. 光学精密工程, 1999, **7**(5): 73-78.
- [10] WALKER D D, BROOKS D, KING A R, *et al.* The 'precession' tooling for polishing an figuring flat, spherical and aspheric surfaces[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(8): 958-964.
- [11] LI Ai-min, DAI Yi-fan, ZHENG Zi-wen, *et al.* Study on removing function of the polishing pad of dual-rotator mechanism[J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2004, **15**(23): 2077-2080.
李爱民,戴一帆,郑子文,等. 双转子抛光模去除函数研究[J]. 中国机械工程, 2004, **15**(23): 2077-2080.
- [12] KAN Yin-zhong. The optimal design and technics study on the removing function of polishing of a small tool in computer control[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008.
阎银中. 计算机控制小工具抛光去除函数的优化设计及工艺研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [13] LI Ai-min. Study on removing characteristics and technics of polishing of a small tool in computer control[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
李爱民. 计算机控制小工具研抛的去除特性及工艺研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2003.