

大径厚比深拱形光学元件高抛变形抑制方法*

张 昊, 沈 羿, 王 朋

(天津航技术物理研究所, 天津 300308)

[摘要] 球面光学零件高速抛光工艺具有生产效率高、面形精度稳定等优势, 已经成为光学零件规模化生产必不可少的手段, 但部分光学元件具有径厚比大、矢高深等特点, 极易发生弯曲或扭转变形, 在高转速、高压条件下进行抛光, 受到夹具作用和抛光盘运动等影响, 面形精度难以稳定控制, 严重制约了抛光效率的提升。针对上述问题, 建立大径厚比深拱形光学元件高速抛光动力学模型, 进行模态分析, 提取影响面形精度的模态特征。在此基础上, 采用拓扑优化算法, 优化夹具设计, 使得加工变形对面形精度的影响大幅度降低。

关键词: 高速抛光; 模态分析; 拓扑优化; 变形抑制; 光学加工

Deformation Suppression Method for High-Speed Polishing of Optical Dome With High Ratio of Diameter to Thickness

ZHANG Hao, SHEN Yi, WANG Peng

(Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

[ABSTRACT] The high-speed polishing has become an indispensable means of spherical optical manufacture because of its process consistency and short production time. However, it is difficult to suppress deformation for optical domes with high ratio of diameter to thickness under high-speed rotation and high pressure. This limits application of high-speed polishing technology in manufacture of optical domes. In this paper, a modal analysis of high-speed polishing process for the optical dome with high ratio of diameter to thickness is demonstrated. Furthermore, a topological optimization of structure of the receipt is proposed and a series of experiments shows that the deformation cause by polishing process can be suppressed effectively.

Keywords: High-speed polishing; Modal analysis; Topological optimization; Deformation suppression; Optical manufacture

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.23/24.087

光学表面高速抛光工艺是伴随着光学系统规模化生产需求逐渐发展起来的高效制造技术。与传统工艺不同, 高速抛光设备可以提供更大的压力和主轴转速, 加工效率大幅度提高, 抛光盘采用热稳定性较高的聚氨酯材料, 相比较沥青抛光盘, 表面形状精度更加稳定。经过几十年的发展, 高速抛光技术已经成为光学零件大规模生产必不可少的手段, 广泛应用于车载镜头、安防镜头、照相机、生物显微镜等领域, 但部分光学元件具有径厚比大、矢高深等特点, 极易发生弯曲或扭转变形, 采用高速抛光工艺, 在高速高压条件下, 面形精度难以稳定控制, 严重制约了抛光效率的提升。因此, 如何优化装夹方式, 抑制加工变形是实现该类光学元件高速抛光的关键。

通过优化装夹方式减小加工变形一直都是制造领域普遍关注的技术之一^[1-3], 特别是对于形状精度达到亚微米级的光学制造过程, 由于加工变形导致的面形误差会显著降低精度。为此, 许多学者进行了深入研究。长春光机所陈华男等^[4]采用静态有限元方法分析了真空夹具设计对光学加工变形的影响。湖南大学王晨升^[5]基于弹性变形原理对非球面加工真空夹具进行了优化设计。浙江工业大学耿健^[6]从模态分析角度利用有限元法对气压砂轮的抛光过程进行振动分析, 有效抑制加工变形问题。台湾德霖技术学院 Chiu 等^[7]对化学机械抛光(CMP)过程进行模态分析, 研究了工艺因素对微变形的影响。燕山大学赵珉乾^[8]采用动力学仿真和模态分析方法研究了高精度双面研抛机的动态特性, 在此基础上优化了工艺参数。中国工程物理研究院 Pan

* 基金项目: 天津市自然科学基金(17JCZDJC38600)。

等^[9]借助静态有限元分析,优化夹具设计,实现了大径厚比石英表面的超精密铣磨。从文献资料可以看出,通过仿真分析等手段,优化夹具设计可以显著降低磨抛变形,提高加工精度,在光学表面精密铣磨、化学机械抛光等领域得到有效应用。

为解决大径厚比深矢高拱形光学元件的高速抛光变形问题,本文根据工艺参数建立有限元模型,采用模态分析算法提取了影响面形精度的模态特征,在此基础上,采用拓扑优化算法,优化夹具结构,并通过试验验证优化夹具后加工变形对面形精度的影响。

1 高抛变形产生的面形误差

拱形光学元件高速抛光运动方式如图 1 所示,抛光盘与机床主轴连接,压力通过铁笔作用在夹具上,传递到抛光表面。抛光盘在主轴电机的带动下,做主动旋转,与零件产生相对运动,使得抛光盘与抛光表面产生摩擦力,驱动零件转动。同时,抛光盘在主轴电机的带动下,绕零件球心摆动。

按照表 1 列出的 3 组工艺参数,采用韩国 Kwangjin 公司 KJSC-3.0 高速抛光机对 K9 材料、径厚比 26、球心角 123° 的深拱形光学元件(图 2)进行抛光。抛光后,

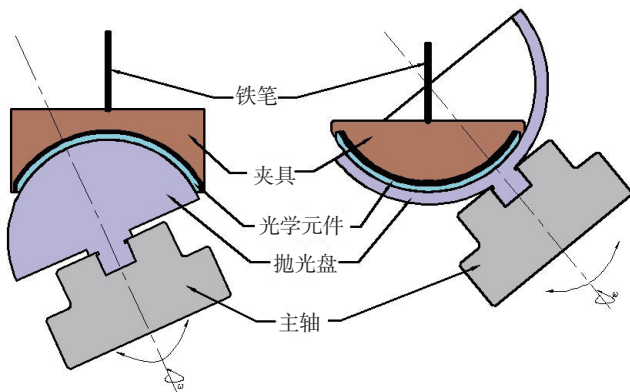


图1 拱形光学元件高速抛光
Fig.1 High-speed polishing of optical domes

采用激光干涉仪测量面形精度,结果如图 3 和图 4 所示。根据测量结果,表 2 列出了凹凸球面在 3 组不同工艺参数下的抛光变形程度。通常依据 Preston 方程和面形误差,通过调整工艺参数,改变抛光表面各点的压力和相对速度,进而调整相对去除速率,能够提高面形精度,但对于这种大径厚比深矢高光学零件,加工诱导变形对面形精度影响很大,单纯调整工艺参数很难消除变形造成的面形误差。

从形状上来看,这种深拱型零件厚度小,很容易产生变形,特别是在高速高压的情况下,受到铁笔压力、抛光盘摩擦、夹持作用、机床振动、外部激励等各种因素的影响,零件在高速抛光过程中会产生加工诱导变形,影响表面材料去除的均匀性。因此,认识高速抛光过程中的零件动态特性是提高面形精度的前提。

2 模态分析

忽略结构阻尼,对于线性定常系统自由振动,其运动微分方程可表达为

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \tag{1}$$

其中, M 、 K 分别为质量矩阵和刚度矩阵, \ddot{x} 、 x 分别为结构加速度向量和位移向量。运动微分方程的特征方程为

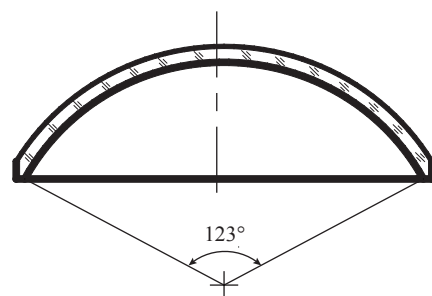


图2 拱形光学元件
Fig.2 Optical domes

表1 高抛工艺参数
Table 1 Processing parameters

形状	工艺参数	摆角 / (°)	摆频 / RPM	压力 / MPa	转速 / (r·min ⁻¹)	时间 / min	抛光液	抛光垫		
凹球面	参数 1	26 ~ -32	10	0.1	500	40	氧化铈	聚氨酯		
	参数 2		15	0.2	600					
	参数 3		20	0.3	700					
凸球面	参数 1	35 ~ -42	10	0.1	400	50			氧化铈	聚氨酯
	参数 2		10	0.3	500					
	参数 3		15	0.2	600					

$$(K - \omega^2 M)q = 0 \quad (2)$$

其中, ω 为系统固有频率; q 为对应的模态振型向量。对运动微分方程进行拉普拉斯变换后, 系统动态响应 x 可以表达为模态振型向量 q 的线性组合。每一阶模态振型都对应相应的固有频率, 模态振型与固有频率是系统的固有特征, 当外部激励频率接近某个固有频率时, 就会产生相应振型的共振。为了减小变形, 需要对系统进行优化, 提高刚度, 提高固有频率。

2.1 模型建立与边界条件

在结构优化前, 采用 ANSYS 有限元软件对光学元

件、夹具和弹性橡胶垫组成的系统进行模态分析, 各部分材料属性如表 3 所示, 有限元模型采用 20 节点 3 自由度 SOLID95 单元。

在高速抛光过程中, 光学元件、夹具组成的系统受到铁笔压力、抛光盘支持力的作用, 同时随抛光盘转动。因此, 在模态分析时需要将铁笔压力和系统绕铁笔的刚体转动作为预应力, 边界条件与有限元模型如图 5 所示。

2.2 分析结果与讨论

模态振型的幅值是各节点位移的相对值, 表示各节点在某一阶固有频率上振动量的相对比值。本文采用

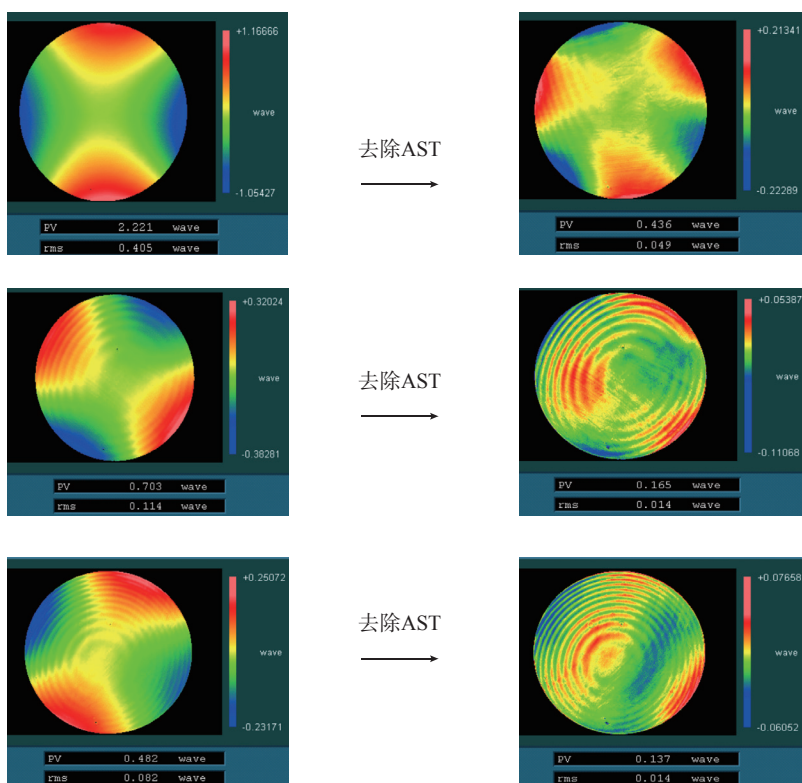


图3 凹面抛光变形

Fig.3 Deformation of concave surface

表2 抛光变形程度

Table 2 Deformation of polishing process

形状	工艺参数	面形误差 RMS_0 / wave	去除 AST 后面形误差 RMS_A / wave	变形程度 $\frac{RMS_0 - RMS_A}{RMS_0} / \%$
凹球面	参数 1	0.07	0.016	77.1
	参数 2	0.114	0.014	87.7
	参数 3	0.082	0.014	82.9
凸球面	参数 1	0.282	0.03	89.4
	参数 2	0.178	0.046	74.2
	参数 3	0.405	0.049	87.9

注: AST 表示象散 (astigmatism) 变形量; $\text{wave} = 632.8 \text{nm}$ 。

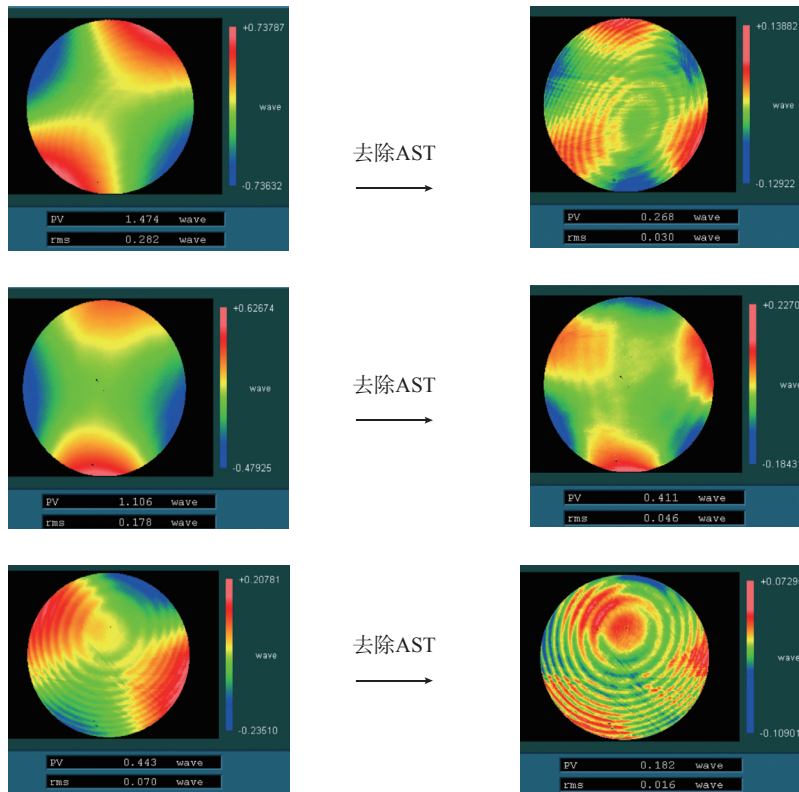


图4 凸面抛光变形

Fig.4 Deformation of convex surface

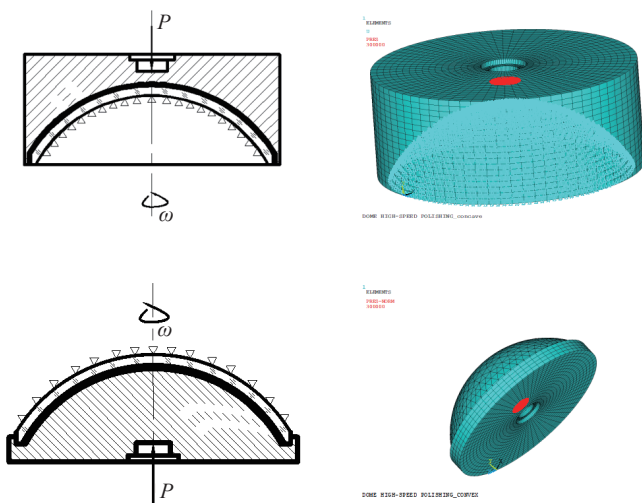


图5 模态分析有限元模型

Fig.5 Finite element model of modal analysis

Block Lanczos 算法提取除刚体模态以外的前 6 阶模态，计算结果如图 6 所示。

从分析结果可以看出，凹面抛光在 1 阶模态和 2 阶模态、4 阶模态和 5 阶模态出现重频，相应的振型表现为马鞍形，与抛光后面形误差的形状相似(图 6 (a))。同样，凸面抛光在 1 阶模态和 2 阶模态、5 阶模态和 6 阶模态也存在相同的现象(图 6 (b))。由模态分析理论可知，系统在重频或密频处易发生共振现象，产生相应形变。因此，优化夹具结构的关键是提高固有频率的基础上，尽量避免出现重频。

3 拓扑优化与试验验证

3.1 拓扑优化

从工程应用角度，结构优化设计方法主要分为尺寸

表3 模态分析中的材料特性

Table 3 Material properties of modal analysis

材料	弹性模量 /Pa	泊松比	密度 /($\times 10^3 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
光学玻璃	7.13×10^{10}	0.17	3
尼龙夹具	1.07×10^9	0.4	1.05
弹性橡胶垫	7.84×10^6	0.47	0.4

优化、形状优化和拓扑优化 3 种类型,尺寸优化和形状优化具有算法简单、计算效率高等优点,但受到零件尺寸、机床结构等因素的制约,夹具直径、高度等尺寸要素不能作为设计变量,限制了可行域的范围。考虑到拱形光学元件夹具结构中存在大量可去除的非支撑材料,本文采用拓扑优化方法,改善系统的动态特性。

拓扑优化是指在给定的设计域、载荷和约束条件下,优化材料分布、结构内空洞的数量和位置等拓扑形式的一种优化方法^[10]。在基于有限元模型的拓扑优化中,拓扑优化变量 t_i 表示第 i 个单元的有无。以固有频率为目标函数的拓扑优化模型为

$$\begin{aligned} & \text{var } t=(t_1, t_2, \dots, t_n) \\ & \max \omega \\ & \text{s.t. } 0 \leq t_i \leq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

本文以高速抛光运动系统的 1 阶固有频率为优化

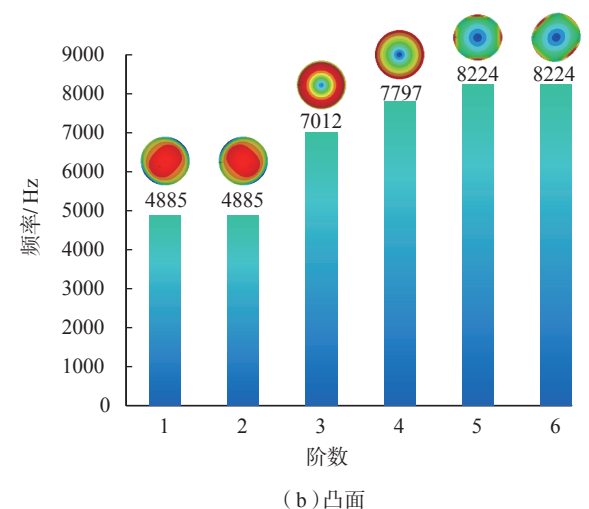
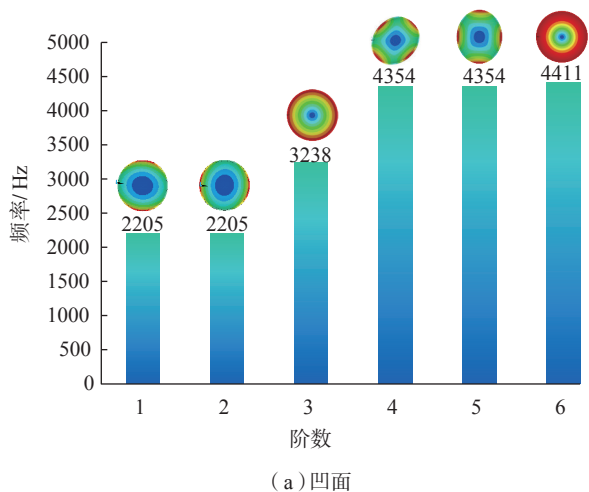


图 6 抛光动力系统模态
Fig.6 Modal analysis of polishing process

目标,优化迭代过程如图 7 所示,随着系统刚度增加,质量减小,凹面抛光系统 1 阶频率提高了近 20%,凸面抛光系统 1 阶频率提高了近 5%。

对优化后夹具(图 8)的抛光过程进行模态分析。如图 9 所示,优化后拱形光学元件抛光的各阶频率均有提升,而且密频、重频问题得到改善。

3.2 试验验证

按照表 1 的工艺参数,采用优化后的夹具进行抛光,结果如图 10 所示。比较表 2 和表 4 可以看出,由于

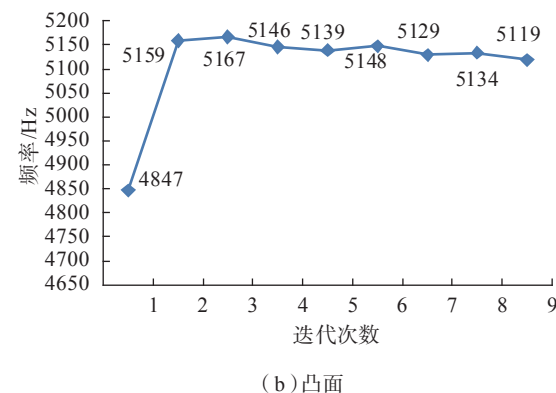
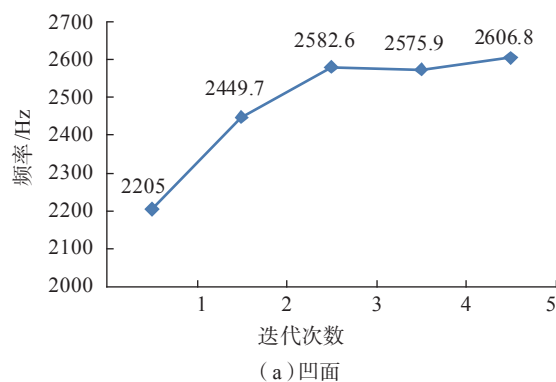


图 7 拓扑优化迭代过程
Fig.7 Iteration of topological optimization

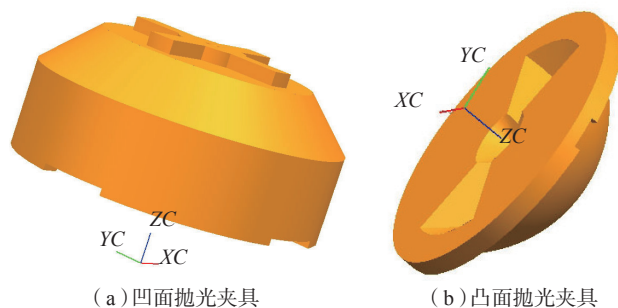


图 8 拓扑优化后的夹具
Fig.8 Optimal receipts

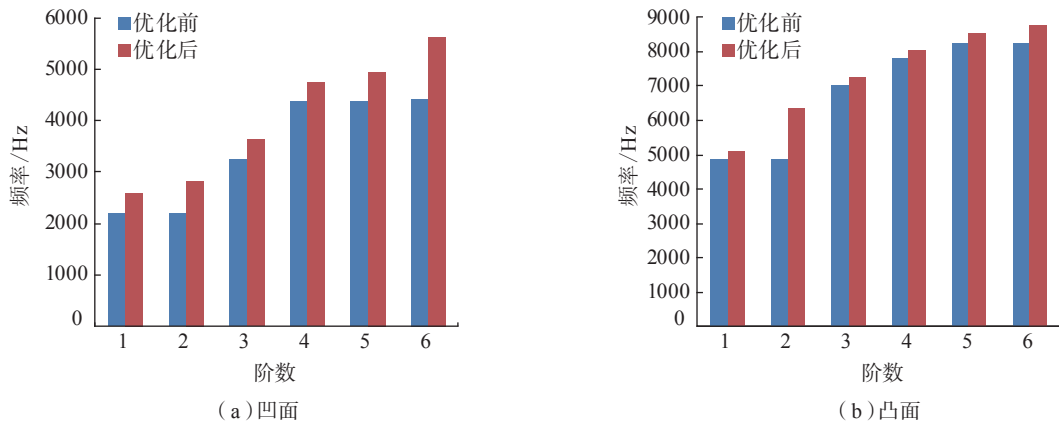


图9 优化后频率分布

Fig.9 Distribution of frequents after optimization

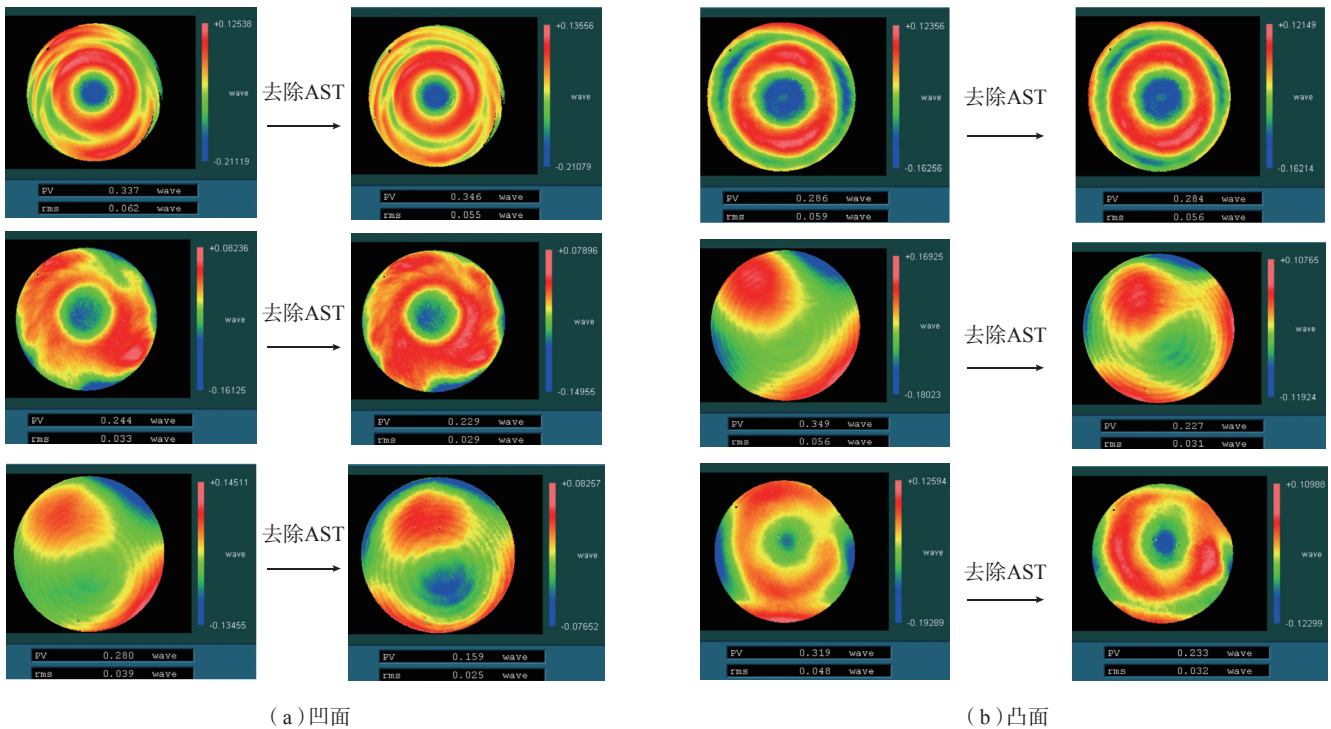


图 10 夹具优化后抛光试验结果

Fig.10 Experimental results after optimization

表 4 优化后抛光变形程度

Table 4 Deformation of polishing process after optimization

形状	工艺参数	面形误差 RMS_O / wave	去除 AST 后面形误差 RMS_A / wave	变形程度 $\frac{RMS_O - RMS_A}{RMS_O} / \%$
凹球面	参数 1	0.062	0.055	11.3
	参数 2	0.033	0.029	12.1
	参数 3	0.039	0.025	35.9
凸球面	参数 1	0.059	0.056	5.1
	参数 2	0.056	0.031	44.6
	参数 3	0.048	0.032	33.3

注: AST 表示象散(astigmatism)变形量; wave=632.8nm。

抛光变形造成的面形误差大幅下降,通过调整工艺参数可以有效改变面形精度。该试验说明拓扑优化后的夹具能够有效改善系统动态特性,大幅度降低了抛光变形对面形精度的影响。

4 结论

(1) 模态分析结果表明,在高速抛光过程中,由夹具、光学元件、机床运动机构组成的动力学系统的动态特性会直接影响大径厚比深矢高光学元件的面形精度,而且面形误差特征与动力学系统低阶频率和重频(密频)的振型特征相似。

(2) 通过对夹具结果进行拓扑优化,能够有效改善系统动态特性,提高固有频率,特别是避免低阶重频(密频)现象,降低加工变形对面形精度的影响。

参考文献

- [1] 陈冰, 杨宝通, 牛智扬, 等. 面向航空发动机薄壁零件加工的自适应夹具设计现状与进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(7): 14-24.
- CHEN Bing, YANG Baotong, NIU Zhiyang, et al. Adaptive fixture designing of thin-walled aero-engine workpiece: a survey of the state of art[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(7): 14-24.
- [2] 于金, 高彦梁. 薄壁件多点柔性加工变形的分析和控制研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(14): 52-55.
- YU Jin, GAO Yanliang. Research on analysis and improvement of thin-walled components multi-point flexible machining distortion[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(14): 52-55.
- [3] 王家颖. 大型薄壁零件防变形加工工艺[J]. 航空制造技术, 2011, 54(23): 79-82.
- WANG Jiaying. Anti-deformation process of machining large-size thin walled parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(23): 79-82.
- [4] 陈华男, 李显凌, 孙振. 光学加工中真空夹具设计及分析[J]. 真空, 2013, 50(4): 78-82.
- CHEN Huanan, LI Xianling, SUN Zhen. Design and analysis of vacuum fixture in optical processing[J]. Vacuum, 2013, 50(4): 78-82.
- [5] 王晨升. 基于弹性变形原理的非球面工件加工真空吸附夹具研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- WANG Chensheng. Study on vac-sorb jig for aspheric workpiece machining based on the elastic deformation principle[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [6] 耿健. 气压砂轮抛光工具的有限元建模及动力学分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- GENG Jian. The finite element modeling and dynamics anlysis of penumatic wheel finishing tools[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [7] CHIU J T, LIN Y Y. Modal analysis of multi-layer structure for chemical mechanical polishing process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(1-2): 83-91.
- [8] 赵珉乾. 高精度双面研抛机动态特性研究及工艺参数优化[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- ZHAO Minqian. Research of dynamic characteristics and technologic parameters optimization of high precision double-sided polishing machine[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [9] ZHOU L, WEI Q C, LI J, et al. Research on precision grinding technology of large scale and ultra thin optics[C]//Young Scientists Forum 2017. Shanghai, 2017.
- [10] 王凤. 拓扑优化方法在航空用钣金零件设计中的应用[J]. 航空制造技术, 2017, 60(1): 87-89, 93.
- WANG Feng. Application of topology optimization technique to the design of aviation sheet metal parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(1): 87-89, 93.
- 通讯作者: 张昊, 高级工程师, 博士研究生, 研究方向为光学制造技术, E-mail: zhanghao_opti@qq.com.
- (责编 古京)
-
- (上接第86页)
- 95(5-8): 3045-3055.
- [18] POLYWORKS I M. Inspect comparison and verification software, reference guide version 8.0 for windows[M]. Quebec: InnovMetric Software Inc, 2003.
- [19] 戴静兰, 陈志杨, 叶修梓. ICP算法在点云配准中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2007(3): 517-521.
- DAI Jinglan, CHEN Zhiyang, YE Xiuzi. The application of ICP algorithm in point cloud alignment[J]. Journal of Image and Graphics, 2007(3): 517-521.
- [20] 李欢, 陈志同, 屈新河. 毛坯海量点集与CAD数模的自适应快速精确配准方法研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(4): 101-105.
- LI Huan, CHEN Zhitong, QU Xinhe. Research on the fast and high accuracy adaptive method to register blank points and CAD model[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4): 101-105.
- [21] 陈志同. 一种具有局部增强结构的复杂母线抛光轮及其制作方法: 201610168879.X[P]. 2016-01-16.
- CHEN Zhitong. A complex bus polishing wheel with local reinforcing structure and manufacturing method: 201610168879 X[P]. 2016-01-16.
- 通讯作者: 陈志同, 教授, 博士, 主要研究方向为先进数控加工技术与装备, E-mail: ztchen@buaa.edu.cn.
- (责编 古京)