

离子束抛光去除函数的在位快速计算与抛光实验

张旭¹, 王大森¹, 夏超翔¹, 郭海林¹, 黄思玲¹, 赵仕燕¹, 聂凤明¹

(中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103)

摘要: **目的** 基于 BP 神经网络使用法拉第杯扫描离子束流实现离子束抛光去除函数的在位快速计算。**方法** 对于空间分布不同的离子束流, 通过法拉第杯扫描方法获得电流密度分布信息, 通过刻蚀实验计算去除函数分布信息, 使用 BP 神经网络对电流密度和去除函数分布之间的关系进行拟合, 建立基于 BP 神经网络计算去除函数的模型。使用该模型可以实现对去除函数的在位快速计算, 并应用于光学元件的离子束抛光实验中。**结果** 利用上述方法建立的 BP 神经网络模型计算的去除函数体积去除率和实验方法获得的去除函数体积去除率的误差为 5.09%, 使用计算的去除函数进行了离子束抛光实验, 抛光样件为直径 320 mm 的融石英, 抛光后光学元件表面 PV 值为 0.197λ (波长 $\lambda=632.8$ nm), RMS 值为 0.009λ , 收敛率达到 4.19, 实现了光学元件表面的超精密抛光。**结论** 使用建立的 BP 神经网络模型可以实现离子束抛光去除函数的在位快速计算, 该模型对融石英及其他材料的光学元件均适用, 计算的去除函数精度满足光学元件离子束超精密加工需求, 并提高了离子束抛光的效率。

关键词: 离子束抛光; 去除函数; 半高全宽; BP 神经网络; 法拉第扫描; 融石英

中图分类号: TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)20-0158-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.20.013

In-situ Fast Calculation of Removal Function for Ion Beam Polishing and Polishing Experiment

ZHANG Xu¹, WANG Dasen¹, XIA Chaoxiang¹, GUO Hailin¹,
HUANG Siling¹, ZHAO Shiyan¹, NIE Fengming¹

(Ningbo Branch of China Ordnance Academy, Zhejiang Ningbo 315103, China)

ABSTRACT: The work aims to realize the in-situ fast calculation of the removal function for ion beam polishing by Faraday cup scanning based on BP neural network. For ion beams with different spatial distributions, the information of the current density distribution was determined by Faraday cup scanning, and the information of the removal function was determined by etching experiment. A BP neural network was used to fit the relationship between current density distribution and removal function distribution. The BP neural network created was a three-layer back propagation neural network, containing one hidden layer. The input signal of the BP neural network was the full width at half height of the ion beam current density and the output signal was the full width at half height of the removal function. After 408 iterations, the mean square error of the BP neural network was 2.451×10^{-10} . Based on this, the model to calculate the distribution information of the removal function based on BP

收稿日期: 2024-01-14; 修订日期: 2024-03-01

Received: 2024-01-14; **Revised:** 2024-03-01

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY23E050006); 所列基金 (YQJJ2023-05); 宁波市自然科学基金重点项目 (2022J317)

Fund: The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY23E050006); Fund of Ningbo Branch of China Ordnance Academy (YQJJ2023-05); Ningbo Natural Science Foundation (Key Projects) (2022J317)

引文格式: 张旭, 王大森, 夏超翔, 等. 离子束抛光去除函数的在位快速计算与抛光实验[J]. 表面技术, 2024, 53(20): 158-165.

ZHANG Xu, WANG Dasen, XIA Chaoxiang, et al. In-situ Fast Calculation of Removal Function for Ion Beam Polishing and Polishing Experiment[J]. Surface Technology, 2024, 53(20): 158-165.

*通信作者 (Corresponding author)

neural network was established. With this model, the in-situ fast calculation of the removal function could be realized and used for ion beam polishing. For a set of ion source determined parameters, the peak current density obtained by Faraday cup scanning was 0.722 mA/cm^2 with a full width at half height of 13.923 mm . The removal function obtained by the groove etch experiment had a peak removal rate of 1.153 nm/s , a full width at half height of 12.899 mm , and a volumetric removal rate of $0.012 898 \text{ mm}^3/\text{s}$. According to the current density distribution, the removal function calculated by the established BP neural network model had a peak removal rate of 1.192 nm/s , with a full width at half height of 13.006 mm and a volumetric removal rate of $0.013 556 \text{ mm}^3/\text{s}$, respectively. The error between the volume removal rate of the removal function calculated by the BP neural network and the experimental method was 5.09% , which met the requirements of optical ultra-precision polishing. Ion beam polishing experiment was carried out by the calculated removal function on a 320 mm diameter fused silica element. After ion beam polishing, the PV value of the surface of the optical element decreased to 0.197λ (wavelength $\lambda=632.8 \text{ nm}$), and the RMS value decreased to 0.009λ , which realized the ultra-precision polishing of optical element surfaces. The convergence rate in the polishing process reached 4.19 . The experimental results showed that the BP neural network established could bring about the in-situ fast calculation of the removal function for ion beam polishing. The accuracy of the removal function calculated from this model met the demand for ultra-precision processing of optical components. The model is applicable to the calculation of removal functions for fused silica and other material optics. The time to determine the removal function using this model is reduced from 2 hours to 2 minutes, which improves the efficiency of ion beam polishing.

KEY WORDS: ion beam polishing; removal function; full width at half height; BP neural network; Faraday scanning; fused silica

超精密光学元件在深空探测、激光系统、先进仪器等高端领域具有广阔的应用前景,随着这些领域的发展,对光学元件面形精度的要求已经达到了纳米级甚至更高^[1-5]。离子束抛光 (IBF, Ion Beam Polishing) 使用离子束流完成对光学元件的加工,避免了传统接触式抛光方法面临的亚表面损伤、抛光工具磨损和去除函数不稳定等问题,同时基于离子溅射原理去除元件材料可以使离子束抛光实现原子级别的抛光精度,因此通常被用于超精密光学元器件的最后一道加工工序^[6-10]。

去除函数的准确计算是实现离子束超精密抛光的前提,其精度直接关系到离子束抛光最终的加工质量,因此在离子束抛光之前需要进行去除函数的确定^[11-13]。目前,确定离子束抛光去除函数信息的方法多为实验方法,实验方法不仅过程繁琐、效率低,而且每次实验都需要消耗光学元件,增加了成本^[14-16]。为实现对去除函数信息的快速准确获得,孟晓辉等^[8]使用束流分布来近似表示去除函数的分布。唐瓦等^[17]研究了离子束抛光过程中离子能量和离子束流分布对去除函数的影响,并建立了对硅和融石英均适用的基于法拉第扫描的去除函数计算模型。由此可见,使用法拉第扫描得到电流密度是实现去除函数快速计算的重要途径。

本文基于离子溅射理论,研究了离子束抛光去除函数和电流密度分布模型,通过法拉第杯扫描离子束得到电流密度分布信息,使用刻蚀实验获取去除函数信息,然后使用线性拟合方法确定了离子束电流密度峰值和去除函数峰值之间的线性关系,使用 BP 神经

网络确定了离子束电流密度半高全宽和去除函数半高全宽之间的关系,从而建立了基于 BP 神经网络计算去除函数的模型,该模型对不同材料的光学元件均适用。结合抛光实验进行验证,使用建立的 BP 神经网络模型可以在较短的时间内实现去除函数信息的在位快速计算,计算的去除函数精度满足离子束超精密抛光的要求,能在降低成本的同时提高离子束抛光的效率。

1 理论分析

1.1 材料去除率

离子束抛光的物理过程如图 1 所示,离子源电离工作气体产生离子束,通过控制离子源的入射角度和距离将离子束流发射到元件表面。根据 Sigmund 溅射原理,入射离子将能量传递给光学元件表面原子,表面原子获得能量后开始运动并与其他表面原子继续碰撞,当表面原子获得一定的能量时,就会从元件表面飞离,这就是离子束抛光过程中的材料去除^[6,18-19]。

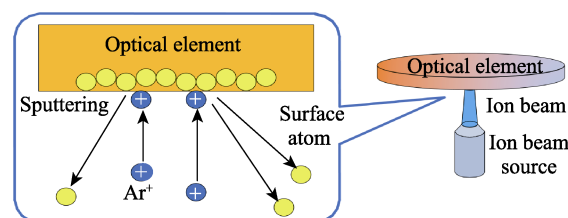


图 1 离子溅射效应
Fig.1 Ion sputtering effect

根据 Sigmund 溅射原理,当离子束入射到光学元件表面时,在离子束有效去除范围内,材料去除率 r 可以用式 (1) 表示^[17]。

$$r = EB_m A_m P(x, y) \quad (1)$$

式中: E 为入射离子的能量; B_m 为与入射角度相关的常数; A_m 为与材料相关的常数; $P(x, y)$ 为元件表面的离子束流分布。由式 (1) 可知,对于材料相同的光学元件,当离子束的能量和入射角度固定时,离子束抛光材料去除率与离子束流分布 $P(x, y)$ 正相关。

1.2 法拉第杯扫描获取离子束电流密度分布信息

法拉第杯是一种电量测量装置,其内部设有转换电路,可以将入射到杯腔的带电粒子电量转换成电信号(电流或电流密度)^[20-21],因此可以通过法拉第杯扫描离子束流获得电流密度分布,并据此确定离子束流分布信息。离子束抛光采用的工艺气体一般为氩气,电离后产生带一个单位正电荷的 Ar^+ ,使用法拉第杯测量离子束流时,离子数量和电流密度的关系为:

$$\frac{p}{t} = \frac{Js}{e} \quad (2)$$

式中: p 为离子数量; t 为测量时间; J 为测量的电流密度值; s 为法拉第杯测量孔的面积; e 为基本电荷量。

由式 (2) 可知,离子束流分布 $P(x, y)$ 与其电流密度分布 $J(x, y)$ 呈正相关,两者均服从高斯分布,则可以使用离子束电流密度分布来表示离子束流分布。通过法拉第杯扫描离子束流的方式,获得不同位置处的离子束电流密度值,从而确定离子束电流密度的分布信息,当离子束垂直入射时,可以用式 (3) 表示电流密度分布 $J(x, y)$ ^[16]。

$$J(x, y) = J_{\max} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2(H_F / 2.355)^2}\right) \quad (3)$$

式中: J_{\max} 和 H_F 分别为电流密度分布的峰值和半高全宽。

根据式 (1) ~ (3),可以先使用法拉第杯扫描离子束流获得电流密度分布 $J(x, y)$,再进一步计算得到去除函数分布信息。

2 基于 BP 神经网络计算去除函数模型

2.1 法拉第扫描和去除函数实验

离子束由离子源产生,为了研究电流密度和去除函数之间的关系,需要制备空间分布不同的离子束流,可以通过改变离子源的工作参数来实现^[14]。实验在一台五轴离子束抛光机床上进行,五轴运动系统使离子束能够保持垂直入射法拉第杯和光学元件,机床

配备的离子源为射频离子源,工作气体为氩气。射频离子源的控制参量包括 Beam 电压值、Acc 电压值、HF 功率、氩气流量以及工作距离^[22-23],设定离子束能量为 1 keV (Beam 电压值 1 kV),改变上述其他工艺参数,待离子源稳定后,先使用法拉第杯扫描确定电流密度的分布信息,再通过刻蚀实验的方法获得去除函数信息。

使用法拉第杯扫描获得电流密度分布的过程如图 2 所示,设定扫描距离后,控制离子束垂直入射法拉第杯,此时法拉第杯的输出值就是离子束流在该位置的电流密度值。为了获得完整的电流密度分布信息,采用等间距采样的方法来进行法拉第扫描,设定扫描方向为 y 方向,扫描范围为 $[-15 \text{ mm}, 15 \text{ mm}]$,取样间距为 1 mm,扫描距离为 25 mm。

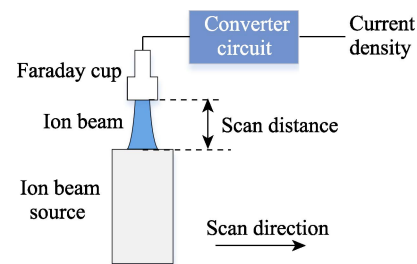


图 2 法拉第杯扫描离子束流
Fig.2 Faraday cup scanning ion beam

使用刻蚀实验获得去除函数的过程如图 3 所示,控制离子束在光学元件表面以一定时间定点进行刻蚀来实现材料去除,通过干涉仪测量实验前后元件表面面形并相减得到实验过程的材料去除量,然后除以加工时间得到去除效率分布,并据此计算去除函数信息。实验样件为直径 50 mm 的融石英,设定离子束的轰击时间为 60 s,工作距离为 25 mm。

通过上述方法,得到的 11 组实验结果如表 1 所示。

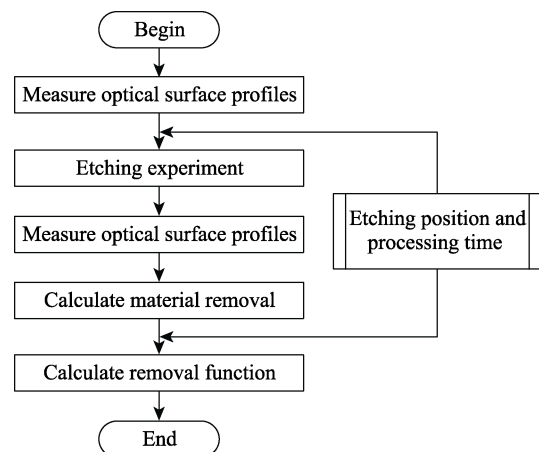


图 3 去除函数实验流程
Fig.3 Process of removal function experiments

表 1 法拉第扫描和去除函数实验结果
Tab.1 Results of Faraday scanning and removal function experiments

No.	Information of faraday scan		Information of removal function	
	$J_{\max}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	H_F/mm	$R_{\max}(\text{nm}\cdot\text{s}^{-1})$	H_R/mm
1	1.545	6.621	2.721	6.342
2	1.577	8.601	2.603	7.116
3	1.080	10.761	1.589	9.590
4	0.934	11.633	1.595	9.371
5	0.903	12.245	1.391	10.520
6	0.809	12.266	1.328	11.056
7	0.722	13.923	1.153	12.499
8	0.718	12.660	1.058	11.754
9	0.717	14.215	1.247	13.335
10	0.715	12.916	1.189	11.842
11	0.447	11.334	0.707	11.132

2.2 基于 BP 神经网络计算去除函数模型

本研究使用的离子源为射频离子源,工作气体电离后产生等离子体,经过三级光学栅网引出后得到离子束流,在空间的分布为高斯分布^[11]。对于五轴运动系统,抛光时离子束始终垂直入射光学元件表面,因此去除函数 $R(x,y)$ 可以用式 (4) 来表示^[16]。

$$R(x,y)=R_{\max}\exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2(H_R/2.355)^2}\right]$$
 (4)

式中: R_{\max} 和 H_R 是去除函数的分布系数,分别表示去除函数的峰值去除率和半高全宽,表征了去除函数具有有效去除作用的强度和范围分布,是评价去除函数性能的重要指标,典型的去除函数形状如图 4 所示。

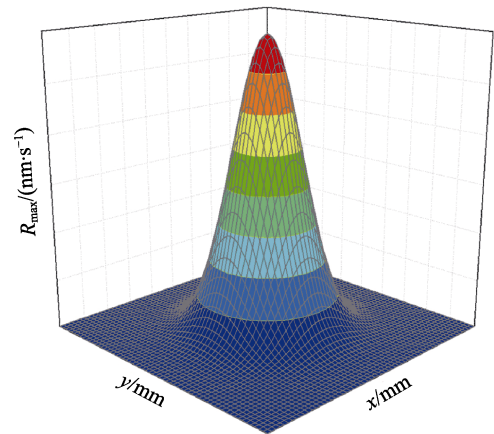


图 4 典型的离子束抛光去除函数
Fig.4 Typical removal function of ion beam polishing

由式 (1) 可知,在离子束抛光过程中,当离子束入射角度和能量一定时,对于相同材料的光学元件,材料去除率与其表面的束流分布成正比,由式 (2)

可知,离子束电流密度分布正比于离子束流分布。由此,对于同种材料的光学元件,当离子束的入射角度和能量一定时,去除函数的峰值去除率 R_{\max} 正比于离子束电离密度峰值 J_{\max} , 即:

$$R_{\max}=b\cdot J_{\max}$$
 (5)

式中: b 为 R_{\max} 与 J_{\max} 之间的系数,对于材料不同的光学元件, b 值不相同。为了确定此系数,对表 1 中通过实验得到的 R_{\max} 与 J_{\max} 数据进行了线性拟合,结果如图 5 所示。

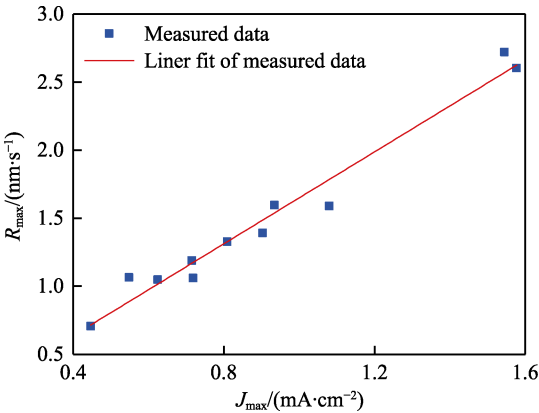


图 5 材料峰值去除率和电流密度峰值关系拟合
Fig.5 Linear fitting results of R_{\max} and J_{\max}

由图 5 中的拟合结果可知,当离子束能量固定 (1 keV) 时,离子束抛光融石英光学元件时 R_{\max} 与 J_{\max} 之间的关系为:

$$R_{\max}=1.6513\cdot J_{\max}$$
 (6)

根据式 (3) 和式 (4),电流密度和去除函数的分布参数都包括半高全宽,但是根据实验结果发现两者的关系并不是线性的,因此无法直接通过离子束电流密度的半高全宽来计算去除函数的半高全宽^[17]。BP 神经网络是一种多层前向神经网络,当神经网络的层数超过三层时,就可以拟合任何变量之间的非线性关系^[24-27],因此使用 BP 神经网络对离子束电流密度半高全宽和去除函数半高全宽之间的非线性关系进行了拟合,构建的三层神经网络如图 6 所示,选择离子束电流密度半高全宽 H_F 作为输入信号,选择去除函数半高全宽 H_R 作为输出信号,神经网络的隐含层包含 5 个节点。

对于构建的神经网络,设定 S 型正切函数为各隐

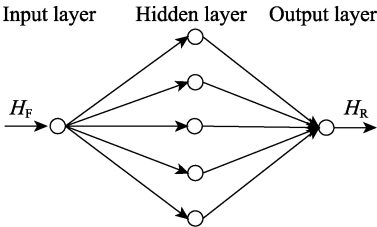


图 6 构建的神经网络模型
Fig.6 BP network model established

含层和输出层的传递函数,使用表 1 中的数据对建立的 3 层神经网络进行了训练,设定的目标误差为 1×10^{-9} ,训练时最大迭代次数为 5 000 次。训练结果如图 7 所示,经过 408 次迭代后,神经网络的均方误差为 2.451×10^{-10} 。

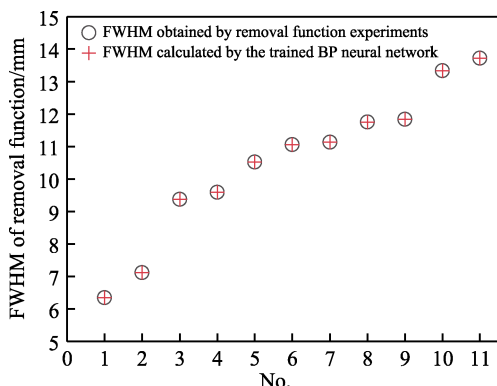


图 7 神经网络训练结果
Fig.7 Training results of BP network

基于建立的 BP 神经网络模型计算去除函数的过程如图 8 所示,对于法拉第扫描得到的电流密度峰值和半高全宽,分别使用式 (6) 和建立的 BP 神经网络计算去除函数的峰值去除率和半高全宽,将计算结果代入式 (4),得到离子束抛光去除函数。对于不同的材料的光学元件,其去除函数半高全宽和电流密度半高全宽的关系是非线性的,且没有统一适用的经验公式,本文提出的 BP 神经网络模型,可以拟合所有的非线性关系,从而适用于所有材料的光学元件去除函数的计算。

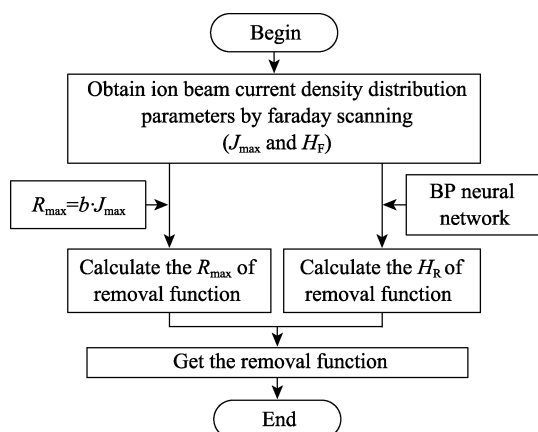


图 8 基于神经网络计算去除函数流程
Fig.8 Process to calculate the removal function based on BP neural network

3 离子束抛光实验

3.1 去除函数计算

对建立的基于 BP 神经网络计算去除函数的模型

进行了验证,并使用计算的去除函数进行了光学元件的离子束抛光实验。设定离子源的工艺参数为 Beam 电压 1 000 V, Acc 电压 200 V, HF 功率 80 W, 氩气流量 5 mL/min。首先使用法拉第杯扫描确定了离子束电流密度的分布信息,法拉第扫描结果如图 9 所示,离子束电流密度分布的峰值为 0.722 mA/cm^2 ,半高全宽为 13.923 mm。然后进行槽刻蚀实验确定去除函数,去除函数实验结果如图 10 所示,计算得到去除函数的峰值去除率为 1.153 nm/s ,半高全宽为 12.899 mm,使用槽刻蚀实验获得去除函数所用的时间约为 2 h。

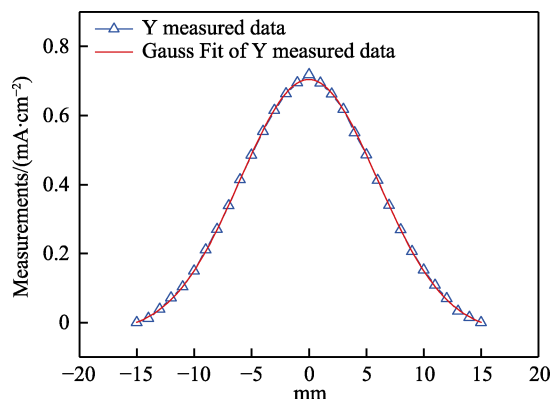


图 9 法拉第扫描结果
Fig.9 Result of Faraday scanning

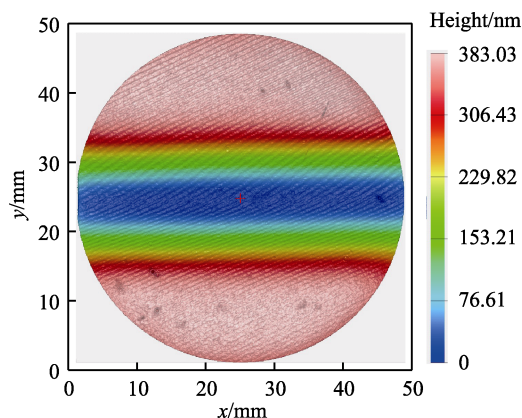


图 10 去除函数实验结果
Fig.10 Result of removal function experiment

基于建立的 BP 神经网络计算去除函数模型,根据法拉第扫描结果计算离子束抛光的去除函数。根据式 (6),去除函数峰值去除率的计算结果为 1.192 nm/s 。使用经过训练的 BP 神经网络对去除函数半高全宽进行计算,将离子束电流密度半高全宽 13.923 mm 输入 BP 神经网络中,计算结果如图 11 所示,神经网络输出的去除函数半高全宽为 13.006 mm,这一过程需要使用的时间为 2 min。

体积去除率表示单位时间内离子束在有效作用范围内去除的材料体积,是评价离子束去除能力的重要指标^[17],体积去除率的计算方法如式 (7) 所示。

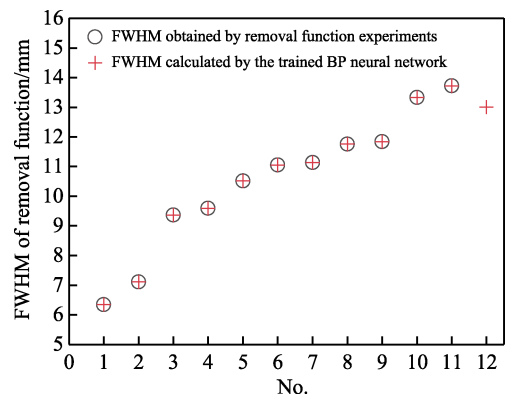


图 11 神经网络计算结果
Fig.11 Calculation results of BP neural network

$$V = \iint_S R(x,y)dx dy \quad S: \sqrt{x^2 + y^2} \leq d \quad (7)$$

式中： V 为离子束抛光的体积去除率； $R(x,y)$ 为去除函数； d 为去除函数的作用范围，一般取 $d=3(H_R/2.355)$ 。

分别计算了实验方法和 BP 神经网络模型得到的去除函数对应的体积去除率，如表 2 所示，使用神经网络计算的去除函数体积去除率与刻蚀实验得到的体积去除率结果误差为 5.09%，使用神经网络计算的去除函数能够用于光学元件的离子束抛光。使用建立的 BP 神经网络模型可以准确计算去除函数，且去除函数的计算时间从 2 h 缩短到 2 min，可以极大地缩短去除函数的计算时间，从而提高离子束抛光的效率。

表 2 实验方法与 BP 神经网络模型计算去除函数结果
Tab.2 Removal function results of experiments and BP neural network

Removal function	$R_{\max}/$ ($\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$)	$H_R/$ mm	$V/$ ($\text{mm}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	Volume error/%
From experiments	1.153	12.899	0.012 898	5.09
Based on BP neural network	1.192	13.006	0.013 556	

3.2 离子束抛光实验

使用基于 BP 神经网络模型计算的去除函数进行了光学元件的离子束抛光实验。离子束抛光过程中的材料去除原理如式（8）所示^[11]。

$$E(x,y) = R(x,y) \otimes D(x,y) \quad (8)$$

式中： $E(x,y)$ 为期望的材料去除量； $R(x,y)$ 为去除函数； $D(x,y)$ 为驻留时间分布。一般取元件初始面形作为期望材料去除量，将计算得到的去除函数代入式（7），通过解卷积得到驻留时间函数，然后根据驻留时间函数分布计算离子束的运动轨迹和速度，从而完成光学元件的离子束抛光。

抛光样件的直径为 320 mm，材料为融石英，使用干涉仪测量得到元件表面面形。图 12 为抛光前元件表面面形，元件表面 PV 值为 0.827λ（波长 λ=632.8 nm），RMS 值为 0.204λ。图 13 为完成离子束抛光后元件表面面形，元件表面 PV 值下降到 0.197λ，RMS 值下降到 0.009λ，加工收敛率达到 4.19，加工后元件表面精度满足光学超精密加工的要求。

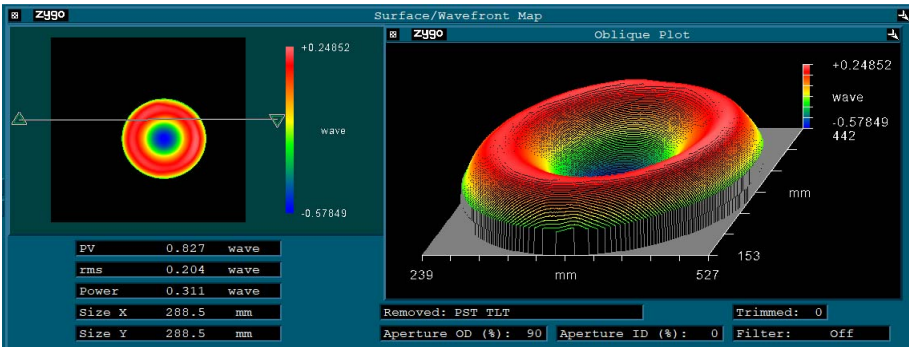


图 12 抛光前面形
Fig.12 Initial surface figure before polishing

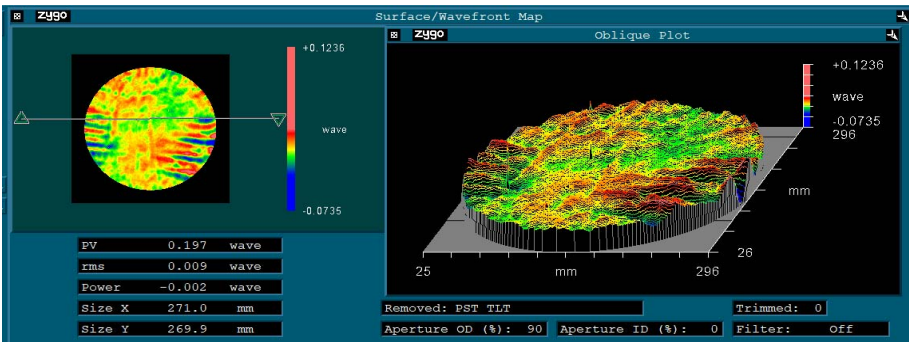


图 13 抛光后面形
Fig.13 Surface figure error after polishing

4 结论

1) 使用 BP 神经网络对离子束电离密度分布和去除函数半高全宽之间的关系进行了拟合, 建立了基于 BP 神经网络计算去除函数分布信息的模型, 该模型不受元件材料的限制, 对融石英材料以外的光学元件的去除函数计算同样适用。

2) 使用建立的 BP 神经网络模型计算的去除函数体积去除率和实验方法获得的去除函数体积去除率的误差为 5.09%, 实验结果表明, 建立的 BP 神经网络模型可以实现去除函数的在位快速计算, 且计算精度满足要求。

3) 使用计算的去除函数对融石英光学元件进行离子束抛光, 抛光后元件表面面形 PV 值下降到 0.197 λ , RMS 值下降到 0.009 λ , 满足光学超精密加工的要求。

参考文献:

- [1] 郭隐彪, 彭云峰, 王振忠, 等. 大口径光学元件的精密磨抛与检测装备开发及应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(6): 26-35.
GUO Y B, PENG Y F, WANG Z Z, et al. Development and Application of Precision Grinding/Polishing and Measurement Equipment for Large-Size Optical Components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(6): 26-35.
- [2] 蒋小为, 龙兴武, 谭中奇. 光学玻璃超精密抛光加工中材料去除机理研究综述[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 236-253.
JIANG X W, LONG X W, TAN Z Q. A Review of Material Removal Mechanism in Ultra-Precision Polishing of Optical Glass[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 236-253.
- [3] LIAO W L. Corrective Capability Analysis and Machining Error Control in Ion Beam Figuring of High-Precision Optical Mirrors[J]. Optical Engineering, 2012, 51(3): 033402.
- [4] 朱德清, 李扬, 房建国, 等. 离轴抛物面镜复合抛光技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2023, 59(2): 9-12.
ZHU D Q, LI Y, FANG J G, et al. Research on Composite Polishing Technology of Off-Axis Parabolic Mirror[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2023, 59(2): 9-12.
- [5] 叶卉, 李晓峰, 崔壮壮, 等. 熔石英玻璃高效低缺陷磁辅助抛光[J]. 光学精密工程, 2022, 30(15): 1857-1867.
YE H, LI X F, CUI Z Z, et al. Magnetic-Assisted Polishing of Fused Silica Optics with High Efficiency and Low Defects[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(15): 1857-1867.
- [6] 李晓静, 王大森, 张旭, 等. 融石英光学材料离子束抛光去除特性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(6): 9-12.
LI X J, WANG D S, ZHANG X, et al. Study on Removal Characteristics of Fused Quartz Optical Materials by Ion Beam Figuring[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(6): 9-12.
- [7] 孙国斌, 蒋世磊, 张余豪, 等. 离轴抛物面镜离子束抛光工艺研究[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 241-249.
SUN G B, JIANG S L, ZHANG Y H, et al. Ion Beam Polishing Process of Off-Axis Parabolic Mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 241-249.
- [8] 孟晓辉, 王永刚, 李文卿. 航天相机非球面光学元件的离子束抛光工艺研究[J]. 航天制造技术, 2016(6): 27-31.
MENG X H, WANG Y G, LI W Q. Application of Ion Beam Figuring Technology on Aerospace Camera Aspheric[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016(6): 27-31.
- [9] 李晓静, 王大森, 王刚, 等. 光学元件表面离子束抛光过程边缘效应抑制[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 349-355.
LI X J, WANG D S, WANG G, et al. Edge Effect Suppression of Ion Beam Figuring Process on Optical Component Surface[J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 349-355.
- [10] 刘锋伟, 吴永前, 陈强, 等. 大口径光学非球面镜先进制造技术概述[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 65-87.
LIU F W, WU Y Q, CHEN Q, et al. Overview of Advanced Manufacturing Technology of Large-Aperture Aspheric Mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(10): 65-87.
- [11] 张旭. 中大口径光学元件离子束抛光控制技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
ZHANG X. Study on Control Technology of Ion Beam Figuring for Medium and Large Aperture Optical Components[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [12] 李云, 邢廷文, 许嘉俊, 等. 三轴离子束抛光系统驻留时间算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1300-1305.
LI Y, XING T W, XU J J, et al. Dwell Time Algorithm for the 3-Axis Ion Beam Figuring System[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1300-1305.
- [13] 马占龙, 谷勇强, 彭利荣, 等. 应用五轴离子束修正超高陡度镜面[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 241-248.
MA Z L, GU Y Q, PENG L R, et al. Ultra-Gradient Mirror Figuring by 5-Axis Ion Beam[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 241-248.
- [14] 湛贵阳, 解旭辉, 周林, 等. 光学加工射频离子源的去除函数与稳定性研究[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(5): 19-22.
CHEN G Y, XIE X H, ZHOU L, et al. Removal Function and Stability Study of RF Ion Source for Optics Figuring[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2016, 52(5): 19-22.
- [15] 王永刚, 肖正航, 王鹏. 光学元件离子束抛光去除特性

- 研究[J]. 航天制造技术, 2013(3): 8-11.
- WANG Y G, XIAO Z H, WANG P. The Removal Characteristics of Ion Beam Polishing Optical Elements[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(3): 8-11.
- [16] 吴鹏飞, 王春阳, 李晓静, 等. 熔石英表面离子束抛光去除函数稳定性研究[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 284-291.
- WU P F, WANG C Y, LI X J, et al. Stability of Ion Beam Polishing Removal Function on Fused Silica Surface[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 284-291.
- [17] 唐瓦, 邓伟杰, 郑立功, 等. 离子束抛光去除函数计算与抛光实验[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 31-39.
- TANG W, DENG W J, ZHENG L G, et al. Calculation of Removal Function of Ion Beam Figuring and Polishing Experiment[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 31-39.
- [18] 尹小林. 空间复杂光学曲面离子束修形设备与工艺研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- YIN X L. Research on Ion Beam Shaping Equipment and Technology for Complex Optical Curved Surface in Space[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [19] 戴一帆, 周林, 解旭辉, 等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1131-1135.
- DAI Y F, ZHOU L, XIE X H, et al. Deterministic Figuring in Optical Machining by Ion Beam[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1131-1135.
- [20] ROY P K, TALLER S, TOADER O, et al. A Multi-Pinhole Faraday Cup Device for Measurement of Discrete Charge Distribution of Heavy and Light Ions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(2): 854-860.
- [21] SALEHI M, ZAVARIAN A A, ARMAN A, et al. Characterization of the Ion Beam Current Density of the RF Ion Source with Flat and Convex Extraction Systems[J]. Silicon, 2018, 10(6): 2743-2749.
- [22] 段金鑫, 解旭辉, 周林. 光学镜面离子束抛光中的离子源稳定性研究[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(5): 10-13.
- DUAN J X, XIE X H, ZHOU L. Study of Stabilization of the Ion Source in Ion Beam Figuring Progress for Optics Mirrors[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(5): 10-13.
- [23] 陈俞钱, 谢亚红, 胡纯栋, 等. 大面积 NBI 射频离子源电气参数设计分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2016, 36(3): 243-246.
- CHEN Y Q, XIE Y H, HU C D, et al. Design and Analysis of Electrical Parameters of Large Area NBI RF Ion Source[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2016, 36(3): 243-246.
- [24] 周梦, 吕志刚, 邸若海, 等. 基于小样本数据的 BP 神经网络建模[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2754-2760.
- ZHOU M, LYU Z G, DI R H, et al. BP Neural Network Modeling Based on Small Sample Data[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2754-2760.
- [25] 林宇锋, 邓洪敏, 史兴宇. 基于新的改进粒子群算法的 BP 神经网络在拟合非线性函数中的应用[J]. 计算机科学, 2017, 44(S2): 51-54.
- LIN Y F, DENG H M, SHI X Y. Application of BP Neural Network Based on New Improved Particle Swarm Optimization in Fitting Nonlinear Function[J]. Computer Science, 2017, 44(S2): 51-54.
- [26] 周欣, 王宜怀, 姚望舒, 等. 基于 GA-BP 神经网络的非线性模拟量回归[J]. 仪表技术与传感器, 2021(1): 84-88.
- ZHOU X, WANG Y H, YAO W S, et al. Nonlinear Analog Regression Based on GA-BP Neural Network[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(1): 84-88.
- [27] 廖芳芳, 肖建. 基于 BP 神经网络 PID 参数自整定的研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1711-1713.
- LIAO F F, XIAO J. Research on Self-Tuning of PID Parameters Based on BP Neural Networks[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2005, 17(7): 1711-1713.