

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G05B 19/4093 (2006.01)

C03C 23/00 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200810030957.5

[45] 授权公告日 2010年2月10日

[11] 授权公告号 CN 100589054C

[22] 申请日 2008.3.31

[21] 申请号 200810030957.5

[73] 专利权人 中国人民解放军国防科学技术大学
地址 410073 湖南省长沙市砚瓦池正街47号中国人民解放军国防科学技术大学机电工程与自动化学院机电工程系

[72] 发明人 李圣怡 戴一帆 解旭辉 周林
郑子文 王建敏 尹自强

[56] 参考文献

Stabilizing a linear system by switching control with dwell time. Hideaki Ishii. Automatic Control, IEEE Transaction on, Vol. 47 No. 2. 2002

光学镜面离子束加工的可达性. 周林. 光学精密工程, 第15卷第2期. 2007

回转对称非球面光学零件磁流变成形抛光的驻留时间算法. 彭小强. 国防科技大学学报, 第26卷第3期. 2004

计算机控制光学表面成形驻留时间算法研究. 李全胜. 光学技术. 1999

离子束加工中驻留时间的求解模型及方法. 周林. 纳米技术与精密工程, 第5卷第2期. 2007

审查员 周瞻瞻

[74] 专利代理机构 湖南兆弘专利事务所
代理人 赵洪

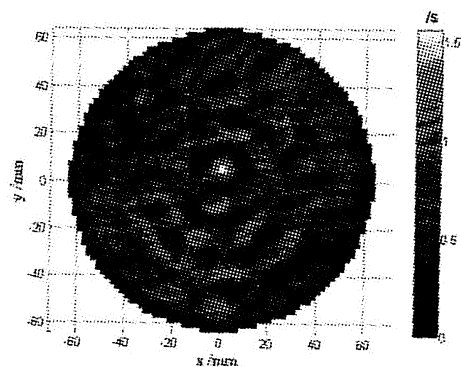
权利要求书2页 说明书6页 附图5页

[54] 发明名称

离子束抛光工艺中面形收敛精度的控制方法

[57] 摘要

本发明公开了一种离子束抛光工艺中面形收敛精度的控制方法, 该方法是通过首先获取抛光工艺的去函数 $b(x, y)$, 然后检测待加工光学镜面的面形误差分布 $z(x, y)$, 再根据 $b(x, y)$ 和 $z(x, y)$ 建立确定性抛光过程的线性模型, 根据建立的线性模型和加工精度求解驻留时间向量, 再对计算所得的驻留时间进行必要的修正后, 以该加工驻留时间进行抛光加工。通过对抛光加工过程中的驻留时间进行控制, 可以实现离子束抛光工艺中对面形收敛精度的控制, 使得在加工精度要求较低时, 能以较高的效率完成加工, 节省加工时间, 而在加工精度要求较高时, 又能满足精度要求, 提高工艺的精准性。



1、一种离子束抛光工艺中面形收敛精度的控制方法，包括以下步骤：

(1) 获取抛光工艺的去除函数：用确定性抛光工艺过程进行去除函数试验获取去除函数，经试验获取的去除函数记为 $b(x, y)$ ；

(2) 检测面形误差分布：采用面形检测装置检测待加工光学镜面的面形误差分布，将检测得到的面形误差分布记为 $z(x, y)$ ；

(3) 建立抛光工艺的加工过程模型：在所述光学镜面上选取 m 个加工量分布点，第 i 点的坐标记为 (x_i, y_i) ， $1 \leq i \leq m$ ，则第 i 点处的期望加工量为 $z_i = z(x_i, y_i)$ ，所有的 z_i 按顺序组成一个期望加工量向量 z_e ；同时，在所述光学镜面上及镜面边缘外选取 n 个驻留加工分布点，第 j 点的坐标记为 (u_j, v_j) ， $1 \leq j \leq n$ ，设第 j 点处的原始加工驻留时间为 t_j ，所有的 t_j 按顺序组成一个原始驻留时间向量 t ，则所有的驻留加工分布点对某一加工量分布点 i 点的材料去除量总和为 $r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} t_j$ ，把所有加工量分布点的材料去除量 r_i 按顺序组成一个材料去除量向量 r ，则加工过程模型表示为 $r = At$ ，其中 A 为 m 行 n 列的加工矩阵，第 i 行第 j 列的元素为 a_{ij} ， $a_{ij} = b(x_i - u_j, y_i - v_j)$ ；

(4) 根据加工精度求解原始驻留时间向量：根据加工要求的精度求解线性方程组 $z_e = At$ 中的原始驻留时间向量 t ，求解公式为 $t = \sum_{i=1}^k \frac{\mu_i^T z_e}{\sigma_i} \tau_i$ ，其中 σ_i 为加工矩阵 A 的第 i 个奇异值，奇异值的顺序满足 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \dots \geq \sigma_{m \times n} \geq 0$ ， μ_i 和 τ_i 分别是奇异值 σ_i 对应的左奇异向量和右奇异向量，截断参数 k 为满足不等式 $\sum_{i=k+1}^{m \times n} (\mu_i^T z_e)^2 \leq rms^2$ 的最小值，其中 rms 为加工要求达到的精度；

(5) 数控加工中对面形收敛精度的控制：当计算所得的各驻留加工分布点的原始加工驻留时间 t_j 中未出现负值时，根据上述求解得到的原始驻留时间向量 t 中的各元素 t_j 和其坐标 (u_j, v_j) 生成数控加工代码，通过数控加工实现离子束抛光工艺中对面形收敛精度

的控制;

当计算所得的各驻留加工分布点的原始加工驻留时间 t_j 中出现负值时,利用公式 $t_a = t_j - \min(t_j)$ 对各驻留加工分布点的原始加工驻留时间进行修正,其中 t_a 为各驻留加工分布点的修正加工驻留时间, $\min(t_j)$ 为各驻留加工分布点的原始加工驻留时间中的最小值,所有的 t_a 组成修正驻留时间向量 t' ,根据修正后的驻留时间向量 t' 的元素 t_a 和其坐标 (u_j, v_j) 生成数控加工代码,再通过数控加工实现对面形收敛精度的控制。

离子束抛光工艺中面形收敛精度的控制方法

技术领域

本发明属于光学加工领域，尤其涉及一种离子束抛光工艺过程中进行精度控制的工艺方法。

背景技术

现有的离子束抛光控制工艺，对于面形收敛精度的控制是基于经验进行的，对面形收敛精度缺乏预测和控制的能力。例如，根据已知的误差面形和去除函数，现有技术只能求解出一组驻留时间，这样，在精度要求高的情况下，求解出的驻留时间往往无法满足要求，而精度要求低的情况下，求解出的驻留时间又常常偏大，加工时间偏长。

发明内容

本发明要解决的技术问题是克服现有技术的不足，提供一种操作简单、可控性强、效率较高的离子束抛光工艺中面形收敛精度的控制方法。

为解决上述技术问题，我们提供的技术方案为一种离子束抛光工艺中面形收敛精度的控制方法，该方法首先建立确定性抛光过程的线性模型，再根据求解驻留时间的截断奇异值方法中截断参数与残差的关系，计算出满足加工精度要求的驻留时间，再以该加工驻留时间进行加工，从而实现对加工精度的控制，具体包括以下步骤：

(1) 获取抛光工艺的去除函数：用确定性抛光工艺过程进行去除函数试验获取去除函数或者直接选用已经获取并保留下来的去除函数，经试验获取的或直接选用的去除函数记为 $b(x, y)$ ；

(2) 检测面形误差分布：采用面形检测装置检测待加工光学镜面的面形误差分布，将检测得到的面形误差分布记为 $z(x, y)$ ；

(3) 建立抛光工艺的加工过程模型：在所述光学镜面上适当选取 m 个加工量分布点，第 i 点 ($1 \leq i \leq m$) 的坐标记为 (x_i, y_i) ，则该第 i 点处的期望加工量为 $z_i = z(x_i, y_i)$ ，所有 z_i 按顺序组成一个期望加工量向量 \mathbf{z}_e ；同时，在所述光学镜面上及镜面边缘外适当选取 n 个加工驻留分布点，第 j 点 ($1 \leq j \leq n$) 的坐标记为 (u_j, v_j) ，设第 j 点处的原始加工驻留时间为 t_j ，所有的 t_j 按顺序组成一个原始驻留时间向量 \mathbf{t} ；当离子束在驻留加工分

布点 j 点 (u_j, v_j) 停留时间 t_j 时, 对加工量分布点 i 点 (x_i, y_i) 的材料去除量为 $r_{ij} = a_{ij}t_j$, 则所有的驻留加工点对某一加工量分布点 i 点 (x_i, y_i) 的材料去除量总和为 $r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}t_j$, 把所有加工量分布点的材料去除量 r_i 按顺序组成一个材料去除量向量 r , 则加工过程模型可表示为 $r = At$, 其中 A 为 m 行 n 列的加工矩阵, 第 i 行第 j 列的元素为 a_{ij} , $a_{ij} = b(x_i - u_j, y_i - v_j)$;

(4) 根据加工精度求解原始驻留时间向量: 加工的目的是使实际的材料去除量向量 r 等于期望加工量向量 z_e , 所以加工过程中要确定线性方程组 $z_e = At$ 的解, 但一般不存在正好相容的解 t^* , 使得 $At^* = z_e$, 这使问题的求解变得复杂, 但是我们可以根据加工要求的精度 (即残差的 rms 值) 求解出原始驻留时间向量 t , 求解公式为 $t = \sum_{i=1}^k \frac{\mu_i^T z_e}{\sigma_i} \tau_i$,

其中 σ_i 为加工矩阵 A 的第 i 个奇异值, 奇异值的顺序满足 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \dots \geq \sigma_{m \times n} \geq 0$, μ_i 和 τ_i 分别是奇异值 σ_i 对应的左奇异向量和右奇异向量, 截断参数 k 为满足不等式

$\sum_{i=k+1}^{m \times n} (\mu_i^T z_e)^2 \leq rms^2$ 的最小值, 其中 rms 为加工要求达到的精度;

(5) 数控加工中对面形收敛精度的控制: 当计算所得的各驻留加工分布点的原始加工驻留时间 t_j 中未出现负值时, 根据上述求解得到的原始驻留时间向量 t 中的各元素 t_j 和其坐标 (u_j, v_j) 生成数控加工代码, 通过数控加工实现离子束抛光工艺中对面形收敛精度的控制;

当计算所得的各驻留加工分布点的原始加工驻留时间 t_j 中出现负值时, 由于加工中的驻留时间不能为负值, 所以一般需要对求解得到的原始驻留时间向量 t 进行修正, 各点驻留时间的修正公式为 $t_a = t_j - \min(t_j)$, 其中 t_a 为各驻留加工分布点的修正加工驻留时间 ($1 \leq a \leq n$), 修正的目的是使各驻留加工分布点的原始加工驻留时间中的最小值 $\min(t_j) = 0$, 所有的 t_a 组成修正驻留时间向量 t' , 再根据 t' 的元素 t_a 和其坐标 (u_j, v_j) 生成数控加工代码, 再通过数控加工实现对面形收敛精度的控制。

与现有技术相比,本发明的优点在于:本发明的方法可以根据不同的加工精度的要求计算出不同的加工驻留时间,一般地,当加工精度要求低时,加工时间少,反之,加工精度要求高时,加工时间长。因此,通过计算上述驻留时间,并根据计算结果对抛光加工过程中的驻留时间进行控制,可以实现离子束抛光工艺中对面形收敛精度的控制,使得在加工精度要求较低时,能以较高的效率完成加工,节省加工时间,而在加工精度要求较高时,又能满足精度要求,提高工艺的精准性。

附图说明

图1为实施例1中试验获得的去除函数分布图;

图2为实施例1中测得的待抛光光学镜面的面形误差分布图;

图3为实施例1中计算所得的原始驻留时间分布图;

图4为实施例1中修正后的加工驻留时间分布图;

图5为实施例1中光学镜面真实加工后的面形残差图;

图6为实施例2中测得的待抛光光学镜面的面形误差分布图;

图7为实施例2中计算所得的原始驻留时间分布图;

图8为实施例2中修正后的加工驻留时间分布图;

图9为实施例2中光学镜面真实加工后的面形残差图;

在图2、图5、图6和图9中,PV值为表面形貌误差的最大峰谷值,RMS值为表面形貌误差的均方根值。

具体实施方式

实施例1:

$rms = 0.01\lambda$ 的离子束抛光工艺

离子束抛光工艺机床为一台普通的离子束抛光设备,基本的工艺参数为:工作气体为氩气、工作真空 $1.6 \times 10^{-2} \text{Pa}$ 、离子能量1000eV、束电流30mA,试验工件为直径100mm的普通微晶玻璃。

通过下述方法步骤对所述的普通微晶玻璃进行离子束抛光工艺:

1、获取抛光工艺的去除函数:应用上述确定性抛光工艺进行去除函数试验,将获取的去除函数记为 $b(x,y)$,结果如图1所示;

2、检测面形误差分布:采用激光干涉仪检测待加工光学镜面的面形误差分布,将检测得到的面形误差分布记为 $z(x,y)$,结果如图2所示;

3、建立抛光工艺的加工过程模型：按照 2mm 的间距在整个光学镜面上选取加工量分布点，总共取 1869 个点，第 i 点 ($1 \leq i \leq 1869$) 的坐标为 (x_i, y_i) ，并将在这些点处的期望加工量 z_i ($z_i = z(x_i, y_i)$) 按顺序组成一个期望加工量向量 z_e ；同时，在光学镜面平面内半径为 65mm 的圆内也按 2mm 的间距选取驻留加工分布点，总共取 3281 个驻留加工分布点，第 j 点 ($1 \leq j \leq 3281$) 的坐标为 (u_j, v_j) ，设第 j 点处的原始加工驻留时间为 t_j ，所有的 t_j 按顺序组成一个原始驻留时间向量 t ；设加工时离子束在驻留加工分布点 (u_j, v_j) 停留时间 t_j ，则所有的驻留加工分布点对某一加工量分布点 i 点 (x_i, y_i) 的材料去除量总和为 $r_i = \sum_{j=1}^{3281} a_{ij} t_j$ ，把所有加工量分布点的材料去除量 r_i 按顺序组成一个材料去除量向量 r ，则加工过程模型可以表示为 $r = At$ ，其中 A 为 1869 行 3281 列的加工矩阵，第 i 行第 j 列的元素为 a_{ij} ， $a_{ij} = b(x_i - u_j, y_i - v_j)$ ；

4、根据加工精度求解原始驻留时间向量：加工的目的是使实际的材料去除量向量 r 等于期望加工量向量 z_e ，所以加工过程中要确定线性方程组 $z_e = At$ 的解，我们可以根据加工要求的精度（即残差的 rms 值）求解出原始驻留时间向量 t ，求解公式为 $t = \sum_{i=1}^k \frac{\mu_i^T z_e}{\sigma_i} \tau_i$ ，其中 σ_i 为加工矩阵 A 的第 i 个奇异值，奇异值的顺序满足 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \dots \geq \sigma_{1869 \times 3281} \geq 0$ ， μ_i 和 τ_i 分别是奇异值 σ_i 对应的左奇异向量和右奇异向量，其中的截断参数 k 为满足不等式 $\sum_{i=k+1}^{1869 \times 3281} (\mu_i^T z_e)^2 \leq rms^2$ 的最小值，在本实施例中要求的 $rms = 0.01\lambda$ ，其中 λ 为激光干涉仪的激光波长， $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ，计算出截断参数 $k = 138$ ，而得到的原始驻留时间向量 t 在二维平面上的分布如图 3 所示；

5、修正驻留时间：由于本实施例中计算所得的各点原始加工驻留时间 t_j 中出现负值，因此需要对原始驻留时间向量 t 进行修正，各点原始加工驻留时间的修正公式为 $t'_a = t_j - \min(t_j)$ ($1 \leq a \leq 3281$)，上述步骤 4 计算得到的原始驻留时间向量 t 经修正之后，得到的修正驻留时间向量 t' 如图 4 所示，总驻留时间（加工时间）为 34.14min；

6、根据修正驻留时间向量生成数控加工代码进行加工：本实施例的加工精度要求是

0.01 λ ，总加工时间为 34.14min，根据最后的修正驻留时间向量 t' 的元素 t'_q 和其坐标 (u_j, v_j) ，采用现有技术生成数控加工代码，再通过数控加工实现对面形收敛精度的控制。

离子束加工完成后，采用激光干涉仪检测了加工后的光学镜面的面形误差分布，检测结果如图 5 所示，实际加工的精度是 0.012 λ ，与计算精度 0.01 λ 基本吻合。

实施例 2:

$rms = 0.03\lambda$ 的离子束抛光工艺

离子束抛光工艺机床为一台离子束抛光设备，基本的工艺参数为：工作气体为氩气、工作真空 1.6×10^{-2} Pa、离子能量 1000eV、束电流 30mA，试验工件为直径 100mm 的普通微晶玻璃。

通过下述方法步骤对所述的普通微晶玻璃进行离子束抛光工艺：

1、获取抛光工艺的去除函数：由于抛光工艺条件与实施例 1 完全相同，所以无需重新做去除函数试验，直接采用实施例 1 获得的去除函数，如图 1 所示；

2、检测面形误差分布：采用激光干涉仪检测待加工光学镜面的面形误差分布，将检测得到的面形误差分布记为 $z(x, y)$ ，结果如图 6 所示；

3、建立抛光工艺的加工过程模型：按照 2mm 的间距在整个光学镜面上选取加工量分布点，总共取 1829 个点，第 i 点 ($1 \leq i \leq 1829$) 的坐标记为 (x_i, y_i) ，并将在这些点处的期望加工量 z_i ($z_i = z(x_i, y_i)$) 按顺序组成一个期望加工量向量 z_e ；同时，在光学镜面平面内半径为 65mm 的圆内也按 2mm 的间距选取驻留加工分布点，总共取 3281 个驻留加工分布点，第 j 点 ($1 \leq j \leq 3281$) 的坐标记为 (u_j, v_j) ，设第 j 点处的原始加工驻留时间为 t_j ，所有的 t_j 按顺序组成一个原始驻留时间向量 t ；设加工时离子束在驻留加工分布点 (u_j, v_j) 停留时间 t_j ，则所有的驻留加工分布点对某一加工量分布点 i 点 (x_i, y_i) 的材料去除量总和为 $r_i = \sum_{j=1}^{3281} a_{ij} t_j$ ，把所有加工量分布点的材料去除量 r_i 按顺序组成一个材料去除量向量 r ，则加工过程模型可以表示为 $r = At$ ，其中 A 为 1829 行 3281 列的加工矩阵，第 i 行第 j 列的元素为 a_{ij} ， $a_{ij} = b(x_i - u_j, y_i - v_j)$ ；

4、根据加工精度求解原始驻留时间向量：根据与实施例 1 相同的计算方法求解截断

参数 k 的值,但由于本实施例中要求的 $rms = 0.03\lambda$,所以计算出的截断参数 $k = 47$,得到的原始驻留时间向量 t 在二维平面上的分布如图 7 所示;

5、修正驻留时间:由于本实施例中计算所得的各点原始加工驻留时间 t_j 中出现负值,因此可根据与实施例 1 相同的方法对原始驻留时间向量 t 进行修正,上述步骤 4 中计算得到的原始驻留时间向量 t 经修正之后,得到的修正驻留时间向量 t' 如图 8 所示,总驻留时间(加工时间)为 25.08min;

6、根据修正驻留时间向量生成数控加工代码进行加工:本实施例的加工精度要求是 0.03λ ,总加工时间为 25.08min,根据最后的修正驻留时间向量 t' 的元素 t_a 和其坐标 (u_j, v_j) ,采用现有技术生成数控加工代码,再通过数控加工实现对面形收敛精度的控制。

离子束加工完成后,采用激光干涉仪检测了加工后的光学镜面的面形误差分布,检测结果如图 9 所示,实际加工的精度是 0.032λ ,与计算精度 0.03λ 基本吻合。

由实施例 1 和实施例 2 比较可以看出,虽然实施例 2 中镜面的初始面形 (0.144λ rms) 比实施例 1 中的镜面初始面形差,但是由于实施例 2 中要求的面形精度 (0.03λ rms) 低于实施例 1 中要求的面形精度 (0.01λ rms),采用本发明所提出的面形收敛控制方法计算所得的实施例 2 的加工时间 (25.08min) 比实施例 1 的加工时间 (34.14min) 短。

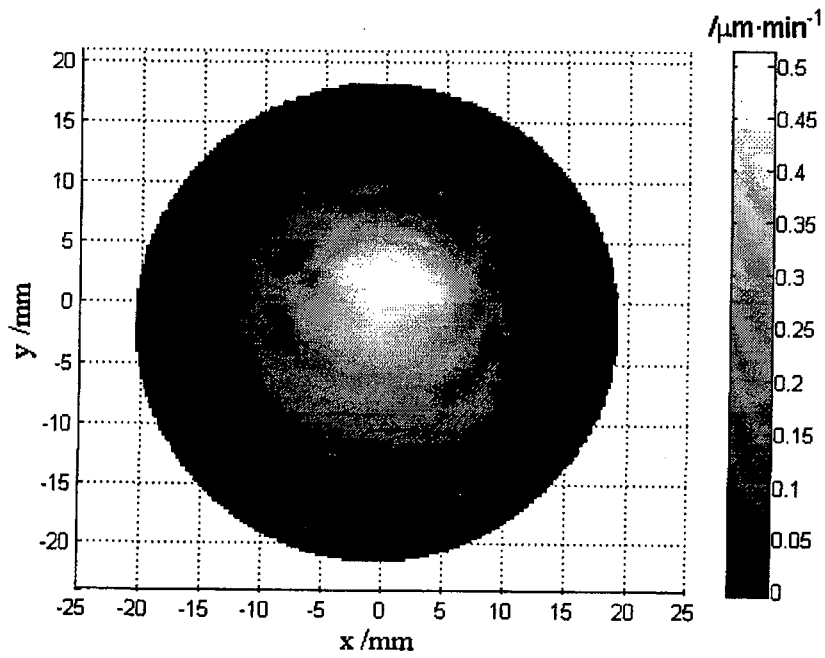


图 1

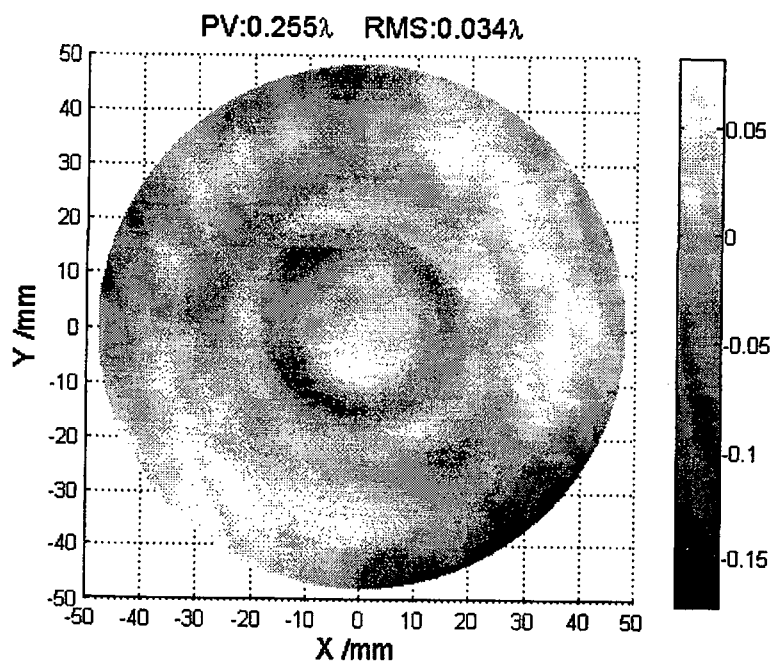


图 2

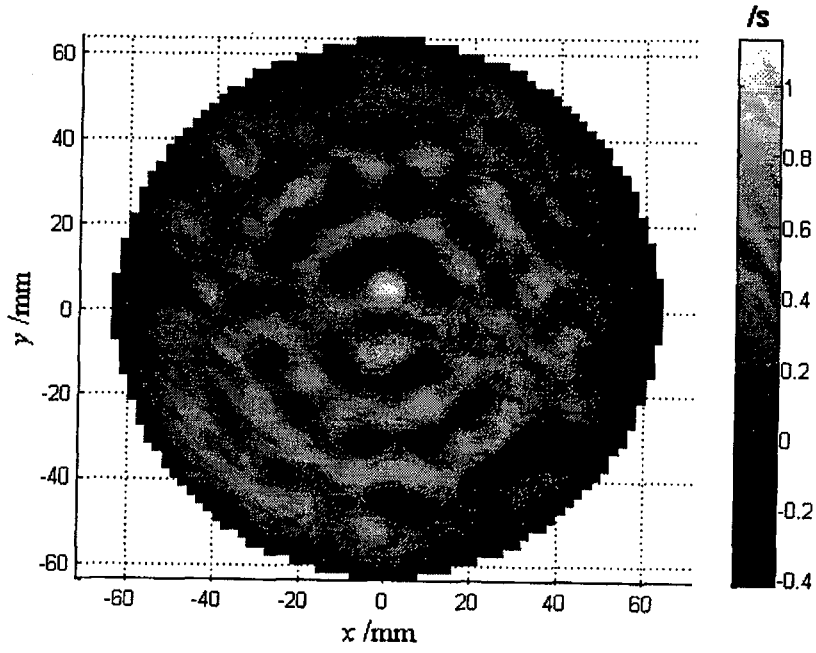


图 3

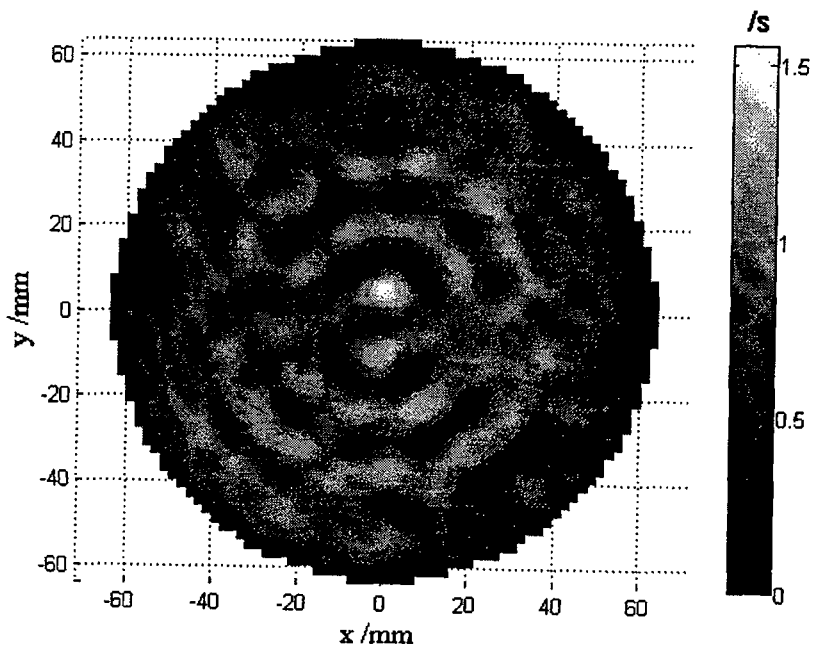


图 4

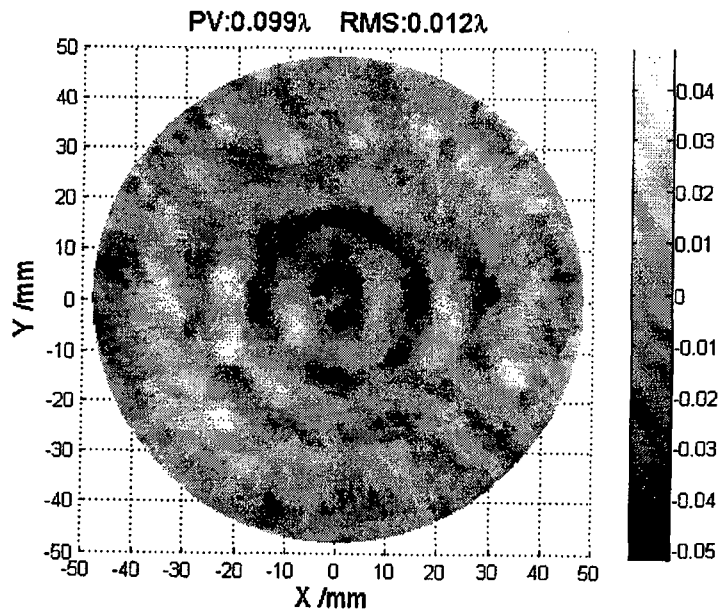


图 5

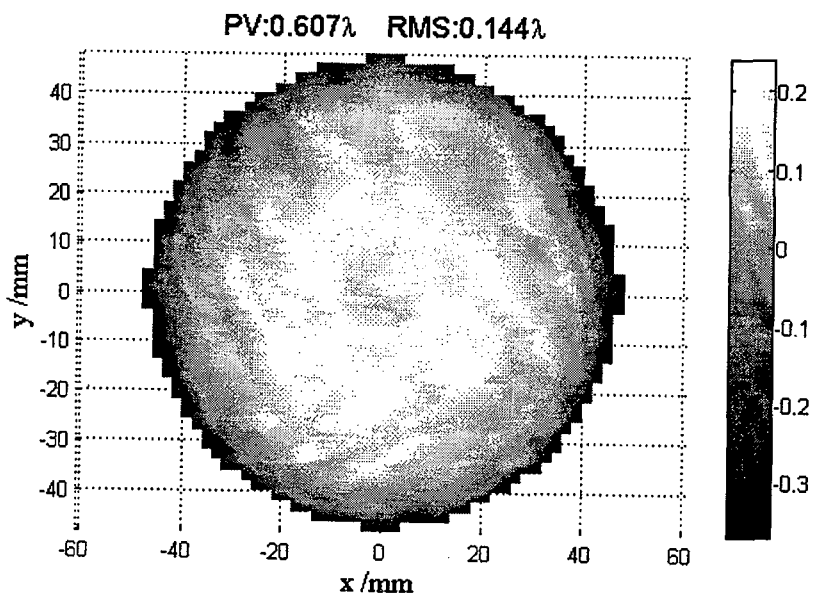


图 6

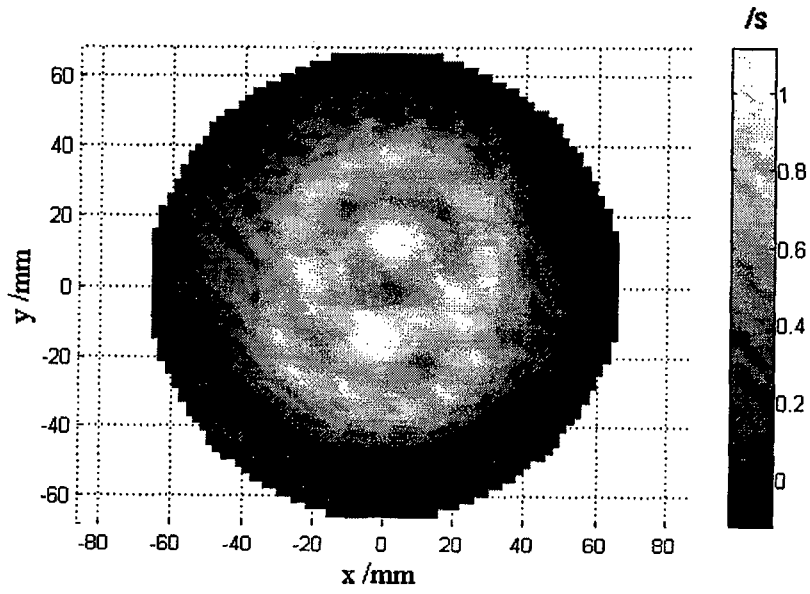


图 7

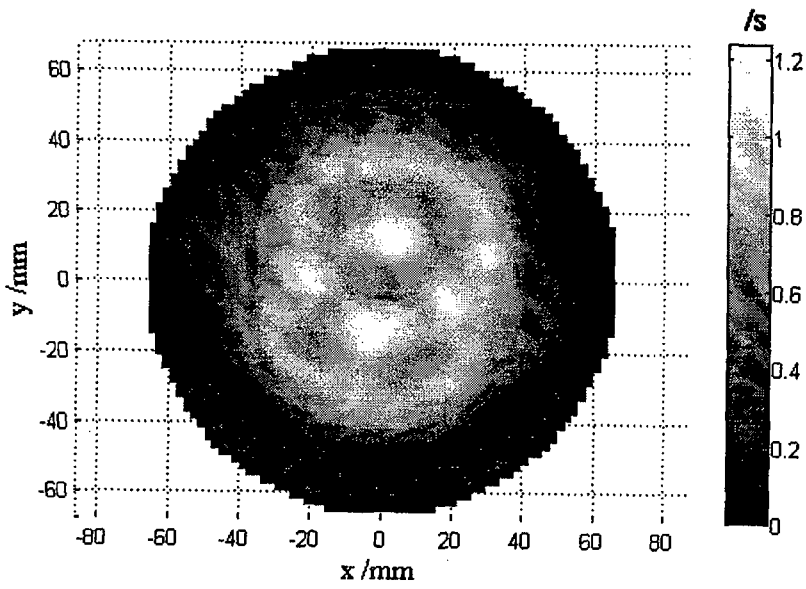


图 8

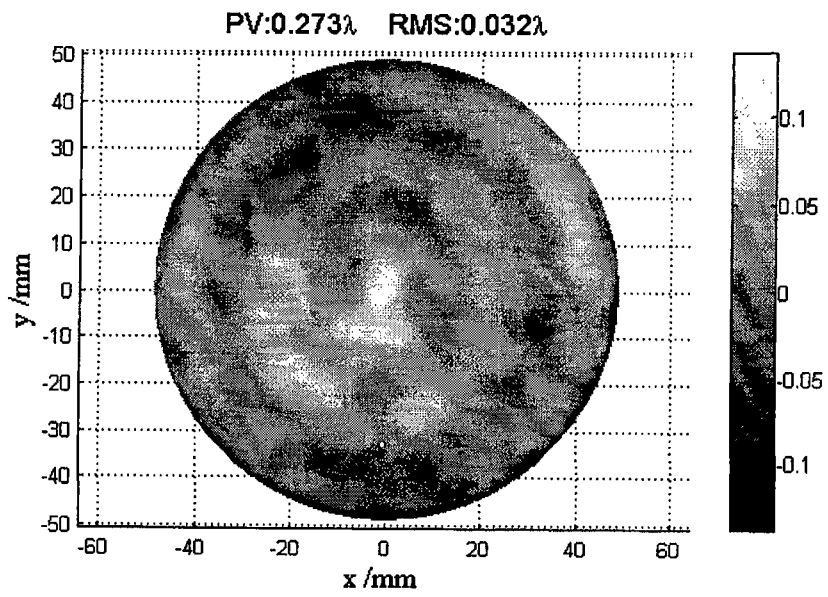


图 9