

应力盘面形变化量与驱动器策动力间的多元统计模型

谢开贵¹, 曹侃¹, 欧阳稳³, 万勇建², 陈民铀¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术重点实验室 重庆 沙坪坝区 400030; 2. 中国科学院光电技术研究所 成都 610209;
3. 湖北省电力勘测设计院 武汉 430024)

【摘要】为了保证应力盘与非球面光学元件在不同位置上实时吻合研磨,将回归分析法应用于应力盘盘面形变化量与驱动器策动力间变化规律的分析,建立磨盘面形变化量关于驱动器策动力的多元回归分析模型。该模型将分别以面形变化、策动力为因变量和自变量建立多元回归分析模型,并根据最小二乘原理求得回归方程系数,从而对于任意的驱动器策动力可以快速求得与其对应的磨盘面形变化量。此外,还建立了驱动器策动力关于磨盘面形变化量的多元回归分析模型,对任意目标曲面可以快速求得与其对应的各驱动器策动力大小。这两个模型互逆,建模过程类似,能实时地为能动磨盘控制系统提供合理的输入。针对有效变形口径为420 mm,包含12个驱动器和60个微位移阵列传感器的能动磨盘,建立的应力盘面形变化量与驱动器策动力间的多元回归分析模型计算结果与试验值极为接近,验证了模型的精确性和可行性。

关键词 非球面; 多元统计模型; 回归分析; 应力盘

中图分类号 TG665

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.04.029

Multivariate Statistical Model Between Stressed-Lap Surface Displacements and Driving Forces

XIE Kai-gui¹, CAO Kan¹, OUYANG Wen³, WAN Yong-jian², and CHEN Min-you¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University Shapingba Chongqing 400030;
2. Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Science Chengdu 610209;
3. Hubei Electric Power Survey&design Institute Wuhan 430024)

Abstract In order to ensure the fitting of stressed-lap and optical elements with aspheric surface with different local position in real time, regression analysis is used to analyze the changing rule between stressed-lap surface displacements and driving forces. The relationship between stressed-lap surface displacements and driving forces was formulated as a multivariate regression model. The surface displacements of a stressed-lap are modeled as a function of driving forces. The regression coefficients of the model are determined by using the least-squares method. The surface displacements can therefore be calculated quickly based on arbitrary given driving forces. At the same time, the multivariate regression model between driving forces and stressed-lap surface displacements is also proposed in this paper. The solution method is similar to the former model. The driving forces are also quickly calculated based on arbitrary given surface displacements. The proposed models are used to a 420 mm diameter stressed-lap with 12 motors and 60 macro-movement sensors. The case studies show that the results are very close to testing values, and indicate that the proposed models have the accuracy and feasibility.

Key words aspheric; multivariate statistical model; regression analysis; stressed-lap

非球面光学元件的传统加工方法是先将光学元件加工为球面,然后再用小尺寸磨头进行局部修磨以产生非球面面形。这种加工方法不仅效率低而且容易形成较大的高频、中频残差,面形收敛效率相对较低^[1]。采用能动磨盘磨制非球面是天文大镜面技术中的新技术,能动磨盘在盘面周边可变应力的

作用下,盘的面形可以实时地变形成所需的面形,以适配非球面的不同位置上的吻合研磨^[2]。因此,应力盘抛光技术具有优先去除表面最高点或部位的特点,具有平滑中、高频差的趋势,可以很好地控制中、高频差的出现,有效提高加工效率^[3-7]。

应力盘系统是一个多变量控制系统,各输入变

收稿日期: 2010-09-07; 修回日期: 2011-11-09

基金项目: 重庆市自然科学基金重点项目(CSTS2008BC7031)

作者简介: 谢开贵(1972-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事电力系统规划与可靠性方面的研究。

量间有强烈的耦合效应, 合理的控制方法对实现应力盘面与加工部件的吻合研磨至关重要。文献[8]将CMAC神经网络应用于应力盘的逆变形智能控制, 以应力盘面形参数和对应的驱动器电压参数作为样本训练CMAC神经网络, 将训练成功的CMAC神经网络用于控制器控制应力盘的变形。文献[9]认为应力盘表面整体变形为所有驱动器对盘面单独作用的线性组合, 从而运用有限元法计算出各驱动器的影响函数, 再根据盘面所要形成的形状对各驱动器进行组合, 计算出各驱动器上所需力的大小。文献[10]将Zernike多项式系数作为训练CMAC神经网络控制器的训练样本, 以实现对应力盘的智能控制。然而, 应用线性模型难以准确描述面形变化量与策动力间的关系; 而应用神经网络模型不能得到变量间的解析关系, 难以保证应力盘控制的实时性。

为了实现应力盘与非球面光学元件在不同位置上的实时吻合研磨, 本文应用多元回归分析法建立了应力盘盘面形与驱动器策动力间的多元统计模型, 该模型包括正、逆两部分, 既可以通过面形变化量求得与其对应的策动力, 也可通过策动力求得与其对应的面形变化量, 实现了应力盘研磨非球面元件的智能控制。

1 能动磨盘基本工作原理

能动磨盘的工作原理如图1所示^[9-13]。在图1a的工作原理图中, 被加工件与能动抛光磨盘分别以不同角速度旋转, 同时能动磨盘从被加工件中心连续地逐渐向边缘移动。多组弯矩驱动器施加不同的弯矩于磨盘上使能动控制均布在磨盘背面, 如图1b所示。磨盘受力并产生与加工件相同的表面形状, 以保证在任一瞬间、任一位置与被加工非球面吻合。能动磨盘表面受力变形的规律如图1c所示。

能动磨盘与非球面完全吻接的表面形状是一个离轴量不断变化的离轴非球面。相对于抛物面来说, 球面加工更容易。先将磨盘的表面加工为与所要求抛物面最接近的球面, 再在弯矩驱动器作用下从球面向所要求的抛物面形状逐渐逼近。此时需要能动磨盘产生的变形量为^[4]:

$$\Delta s = [p + c^2sx - (p^2 + 2c^2spx - c^2s^2y^2)^{1/2}] / cs^2 - r + [r^2 - (x^2 + y^2)]^{1/2}$$

式中, r 为与抛物面相切的最接近球面半径; (x,y) 为以磨盘旋转中心为原点的局部坐标系; $c=\cos\varphi$, $s=\sin\varphi$, φ 为磨盘偏离工件中心(离轴量为 L)时相对于工件所在平面的倾斜角。

在大尺寸接触情况下, 通常抛光磨盘尺寸越大, 覆盖加工工件区域面积越大, 则收敛效率越高, 加工中出现的中、高频残差越小, 面形的光滑连续度也得到改善。但过大的磨盘尺寸使表面结构和变形控制的复杂度大大提高。仿真计算结果表明, 合理的能动磨盘直径约为被加工工件直径的 $1/5 \sim 1/3$ ^[9]。

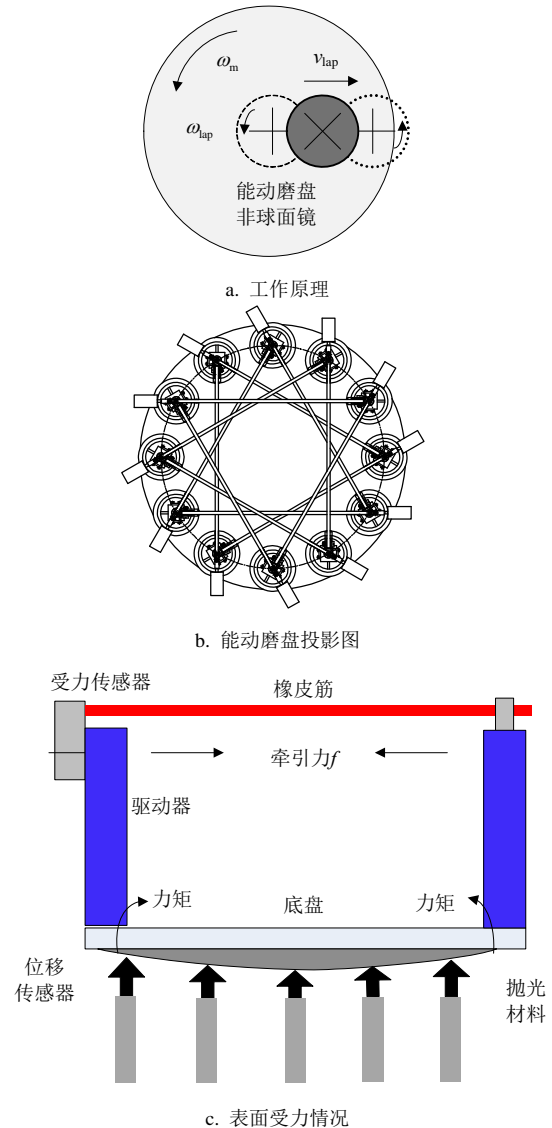


图1 能动磨盘基本工作原理和结构示意图

2 应力盘盘面形变化量与驱动器策动力间的多元统计模型

回归分析是研究变量之间关系的一种常用统计方法, 它通过分析大量试验数据, 找出蕴藏在这些数据中并反映它们之间关系的内部规律: 经验公式或近似函数^[14]。由Weierstrass第一定理知, 任何函数都可用多项式以任意精度逼近。因此, 可以用多元回归分析法描述应力盘盘面形变化量与驱动器策动力间的变化规律^[15-16]。

2.1 应力盘盘面形变化量关于驱动器策动力的回归分析模型

对于 k 次试验,记驱动器 $m(m=1,2,\dots,M)$ 策动力的向量 $F_m=(F_m^{(1)},F_m^{(2)},\dots,F_m^{(K)})$;位移观测点 $n(n=1,2,\dots,N)$ 的向量 $D_n=(D_n^{(1)},D_n^{(2)},\dots,D_n^{(K)})$ 。从而,可建立某位移传感器测量台面形变化量与驱动器脉冲数的多元统计模型。为方便分析,下面以第1个位移传感器测量台位移与驱动器策动力的关系,建立多元线性统计模型:

$$D_1 = a_0 + a_1 F_1 + a_2 F_2 + \dots + a_M F_M + \varepsilon \quad (1)$$

上述多元统计模型中,对任意 k ,有:

$$D_1^{(k)} = a_0 + a_1 F_1^{(k)} + a_2 F_2^{(k)} + \dots + a_M F_M^{(k)} + \varepsilon \quad (2)$$

记:

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{pmatrix} D_1^{(1)} \\ D_1^{(2)} \\ \vdots \\ D_1^{(K)} \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_M \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E}_1 = \begin{pmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{X}_1 = \begin{pmatrix} 1 & F_1^{(1)} & F_2^{(1)} & \dots & F_M^{(1)} \\ 1 & F_1^{(2)} & F_2^{(2)} & \dots & F_M^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & F_1^{(K)} & F_2^{(K)} & \dots & F_M^{(K)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可知,当以面形变化模型的估计值和实际值间的误差平方和最小为目标准则时,可建立如下模型:

$$\text{Min } \mathbf{E}_1^T \mathbf{E}_1 = (\mathbf{Y}_1 - \hat{\mathbf{Y}}_1)^T (\mathbf{Y}_1 - \hat{\mathbf{Y}}_1) =$$

$$(\mathbf{Y}_1 - \mathbf{X}_1 \hat{\boldsymbol{\alpha}})^T (\mathbf{Y}_1 - \mathbf{X}_1 \hat{\boldsymbol{\alpha}}) \quad (4)$$

式中, $\hat{\mathbf{Y}}_1$ 和 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$ 分别为 \mathbf{Y}_1 和 $\boldsymbol{\alpha}$ 的估计值。

上述模型中,待估计的参数为 $\boldsymbol{\alpha}$,应用最小二乘原理可以得到其估计值为:

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}} = (\mathbf{X}_1^T \mathbf{X}_1)^{-1} \mathbf{X}_1^T \mathbf{Y}_1 \quad (5)$$

从而,当给定各驱动器的策动力 $\mathbf{F}=(F_1, F_2, \dots, F_M)$ (即为已知量),即可按模型求解出相应的应力盘形变量 $D_0=(D_{10}, D_{20}, \dots, D_{N0})$ (即为待求量):

$$\begin{cases} D_{10} = \hat{a}_{10} + \hat{a}_{11} F_1 + \hat{a}_{12} F_2 + \dots + \hat{a}_{1M} F_M \\ D_{20} = \hat{a}_{20} + \hat{a}_{21} F_1 + \hat{a}_{22} F_2 + \dots + \hat{a}_{2M} F_M \\ \vdots \\ D_{N0} = \hat{a}_{N0} + \hat{a}_{N1} F_1 + \hat{a}_{N2} F_2 + \dots + \hat{a}_{NM} F_M \end{cases} \quad (6)$$

2.2 驱动器策动力关于应力盘盘面形变化量的回归分析模型

对任意 k 次,有:

$$F_1^{(k)} = b_0 + b_1 D_1^{(k)} + b_2 D_2^{(k)} + \dots + b_N D_N^{(k)} + \delta \quad (7)$$

记:

$$\mathbf{Y}_2 = \begin{pmatrix} F_1^{(1)} \\ F_1^{(2)} \\ \vdots \\ F_1^{(K)} \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_N \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E}_2 = \begin{pmatrix} \delta_0 \\ \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_N \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{X}_2 = \begin{pmatrix} 1 & D_1^{(1)} & D_2^{(1)} & \dots & D_N^{(1)} \\ 1 & D_1^{(2)} & D_2^{(2)} & \dots & D_N^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & D_1^{(K)} & D_2^{(K)} & \dots & D_N^{(K)} \end{pmatrix} \quad (8)$$

由式(7)、式(8)可知,当以驱动器策动力模型的估计值和实际值间的误差平方和最小为目标准则时,可建立如下模型:

$$\text{Min } \mathbf{E}_2^T \mathbf{E}_2 = (\mathbf{Y}_2 - \hat{\mathbf{Y}}_2)^T (\mathbf{Y}_2 - \hat{\mathbf{Y}}_2) =$$

$$(\mathbf{Y}_2 - \mathbf{X}_2 \hat{\boldsymbol{\beta}})^T (\mathbf{Y}_2 - \mathbf{X}_2 \hat{\boldsymbol{\beta}}) \quad (9)$$

式中, $\hat{\mathbf{Y}}_2$ 和 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 分别为 \mathbf{Y}_2 和 $\boldsymbol{\beta}$ 的估计值。

上述模型中,待估计的参数为 $\boldsymbol{\beta}$,应用最小二乘原理可以得到其估计值为:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}_2^T \mathbf{X}_2)^{-1} \mathbf{X}_2^T \mathbf{Y}_2 \quad (10)$$

从而,当给定需要曲面对应的观测点理想值 $D_0=(D_{10}, D_{20}, \dots, D_{N0})$ (即为已知量),则可得到需要各驱动的策动力向量 $\mathbf{F}=(F_1, F_2, \dots, F_M)$ (即为待求量):

$$\begin{cases} F_{10} = \hat{b}_{10} + \hat{b}_{11} D_1 + \hat{b}_{12} D_2 + \dots + \hat{b}_{1N} D_N \\ F_{20} = \hat{b}_{20} + \hat{b}_{21} D_1 + \hat{b}_{22} D_2 + \dots + \hat{b}_{2N} D_N \\ \vdots \\ F_{M0} = \hat{b}_{M0} + \hat{b}_{M1} D_1 + \hat{b}_{M2} D_2 + \dots + \hat{b}_{MN} D_N \end{cases} \quad (11)$$

通过上述正逆两个模型可以分析计算能动磨盘面形与驱动器策动力之间的相互变化规律,为实现能动磨盘盘面与工件表面实时匹配提供保证。

2.3 模型的进一步讨论

本文采用多元线性统计模型描述位移传感器测量台位移与驱动器策动力的关系。若对误差精度的要求很高时,可提高多项式模型的阶数,即将式(2)和式(7)的多元线性模型改为多元非线性模型,用非线性参数估计方法即可实现参数估计^[17]。

在求解式(4)和式(9)时,采用的目标准则为估计值和实际值间的误差平方和最小,也可选择其他准则进行建模。如面形变化模型的估计值和实际值间的误差绝对值之和最小,即为最小一乘模型,可选择最小一乘参数估计法进行求解^[18-19];面形变化模型的估计值和实际值间的最大绝对误差最小,可选择遗传算法等随机优化方法进行求解。

3 实例分析

以有效变形口径为420 mm, 包含12个驱动器和60个微位移阵列传感器的能动磨盘为实验对象。实验装置的结构如图2所示, 能动磨盘采用1/3工件口径尺寸的刚性铝合金材料作为基盘, 依靠安装在应力盘边缘上的驱动电机和连杆装置, 在12个变力矩的作用下, 使基本形状为球面的磨盘能够产生需要的低阶变形。能动磨盘上的驱动器及微位移阵列传感器的分布如图3所示, 通过微位移传感器测得各驱动器施加不同策动力时能动磨盘的面形变化量。应用本文建立的驱动器策动力和测量点面形变化量的多元回归模型, 求得各观测点面形变化量关于驱动器策动力的回归系数如表1所示。驱动器策动力关于各观测点面形变化量的回归系数如表2和图4所示。

最大绝对误差、误差平方和及平均百分误差的定义如下: 设实际值向量为 $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_n]$, 估计值向量为 $\hat{\mathbf{X}}=[\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n]$, 则最大绝对误差为

$$\text{Max } |x_i - \hat{x}_i|_{i=1:n}, \text{ 误差平方和为 } \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i|^2, \text{ 平均百分误差为 } \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right|。$$

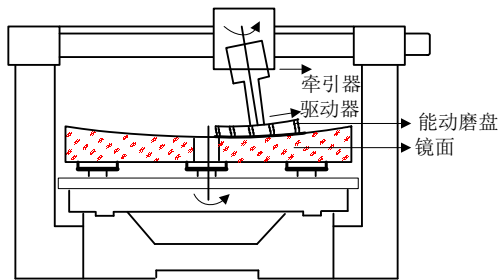


图2 实验装置结构示意图

运用表1所示的回归系数, 求出当策动力为(1,0,0,⋯,0)时能动磨盘的面形变化量, 并将其与实际试验测量数据比较, 可得模型计算结果与试验测量值间的最大绝对误差为 5.4179×10^{-14} , 误差平方和为 2.5487×10^{-26} , 平均百分误差为 3.0466×10^{-15} 。

将策动力为(1,0,0,⋯,0)时能动磨盘的面形变化量的实际测量值代入2.2节模型, 并结合表2的回归系数, 计算出各驱动器驱动力如表3所示。与实际驱动力(1,0,0,⋯,0)相比, 最大绝对误差仅为0.006 4, 误差平方和为 1.6674×10^{-4} , 平均百分误差为0.002 9。

去掉15个测量数据, 模型计算结果与试验测得的面形变化量间的最大绝对误差为 9.5382×10^{-14} , 误差平方和为 8.6556×10^{-26} , 平均百分误差为 5.1952×10^{-15} 。

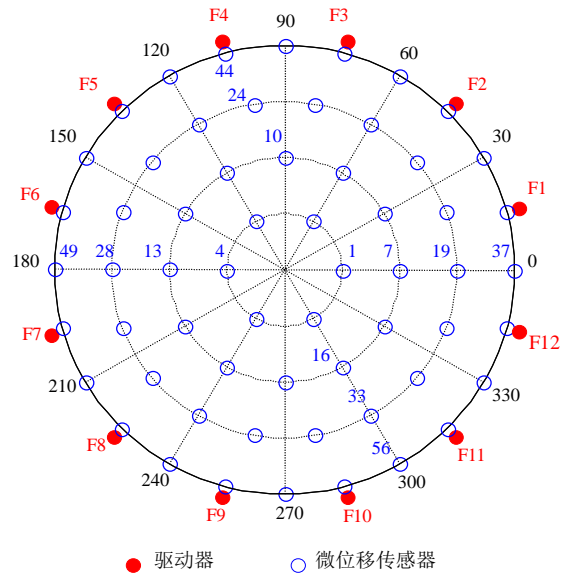


图3 驱动器及微位移传感器分布图

表1 各观测点面形变化量关于驱动力的回归系数

系数	观测点1	观测点2	⋯	观测点60
a_0	-6.107 6	-5.303	⋯	-4.200 0
a_1	10.774 0	12.870	⋯	-36.567 0
a_2	13.508 0	21.286	⋯	-33.050 0
a_3	26.258 0	36.303	⋯	6.766 7
a_4	27.624 0	28.586	⋯	43.067 0
a_5	22.858 0	17.770	⋯	37.817 0
a_6	26.524 0	19.170	⋯	19.700 0
a_7	18.924 0	17.303	⋯	-22.967 0
a_8	11.058 0	15.703	⋯	-59.950 0
a_9	14.658 0	17.520	⋯	-1.366 7
a_{10}	33.241 0	31.186	⋯	52.600 0
a_{11}	46.124 0	37.436	⋯	69.883 0
a_{12}	28.874 0	21.403	⋯	1.216 7

增加15个伪数据, 模型计算结果与试验测得的面形变化量间的最大绝对误差为 8.3466×10^{-13} , 误差平方和为 6.4234×10^{-25} , 平均百分误差为 7.3365×10^{-14} 。

由以上分析知, 减少测量数据会导致模型计算结果误差增大, 为提高模型精度应尽量多地获取试验数据。同时, 增加伪数据也会导致模型计算结果误差增大。因此, 在将试验数据代入模型进行计算之前, 应对试验数据进行预处理, 剔除异常数据, 以提高模型的精确度。

表2 各驱动力关于观测点面形变化量的回归系数

驱动器	b_0	b_1	...	b_{60}
1	-0.037 87	-0.035 16	...	-0.007 50
2	-0.033 62	0.014 18	...	0.005 82
3	0.074 50	-0.010 14	...	-0.002 75
4	-0.021 43	0.003 48	...	-0.001 74
5	0.007 02	-0.031 32	...	-0.000 90
6	0.027 15	0.024 26	...	0.002 57
7	0.083 57	-0.023 66	...	-0.001 57
8	0.002 08	0.024 66	...	0.001 83
9	0.023 04	-0.039 47	...	0.000 27
10	0.040 97	0.056 88	...	0.001 56
11	0.028 65	-0.036 01	...	-0.002 35
12	0.016 26	0.043 64	...	0.005 11

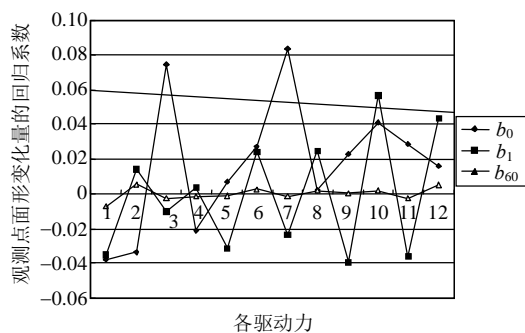


图4 各驱动力关于观测点面形变化量的回归系数

表3 各驱动器驱动力理论计算值

驱动器	驱动力	驱动器	驱动力
1	1.001 5	7	-0.003 8
2	-0.001 1	8	0.006 2
3	-0.000 2	9	-0.000 4
4	-0.006 4	10	0.000 4
5	0.006 2	11	0.003 8
6	0.001 8	12	-0.003 6

4 结 论

本文运用回归分析法建立了能动磨盘面形变化量与驱动器策动力之间的多元回归模型。该模型包括正、逆两部分，既可以通过面形变化量求得与其对应的策动力，也可通过策动力求得与其对应的面形变化量。非球面光学元件的实时吻合研磨不仅需

要根据盘面所要形成的形状计算出各驱动器上所需力的大小，还需要实时得到盘面面形变化，再根据盘面面形变化实时调整驱动力。能动磨盘面形变化量与驱动器策动力之间的正、逆模型可保证应力盘与非球面光学元件在不同位置上实时吻合研磨，该模型方法成熟易懂、拓广性强。

为提高模型精度，可将线性模型拓广为非线性模型，用非线性参数估计方法求解模型。当决策者决策目标函数发生变化时，还可将最小二乘模型拓广为最小一乘等模型，用最小一乘参数估计法、遗传算法等求解模型。

通过对有效变形口径为420 mm，包含12个驱动器和60个微位移阵列传感器的能动磨盘进行分析，计算结果表明模型是精确有效的，可为能动磨盘控制系统提供精确的输入。

参 考 文 献

- [1] JONES R A. Computer controlled polisher demonstration[J]. Applied Optics, 1980, 19(12): 2072-2076.
- [2] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004. YANG Li. The advanced optical manufacturing technology[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [3] CUI Xing-qun, GAO Bi-lie, WANG Da-xing, et al. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(3): 402-407.
- [4] 胡自强, 凌宁, 潘君骅, 等. 非球面变形抛光盘变形能力分析[J]. 压电与声光, 2010, 32(4): 582-584. HU Zi-qiang, LING Ning, PAN Jun-hua, et al. Deformation capability analysis of deformable aspheric polishing lap[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(4): 582-584.
- [5] 曾志革, 邓建明, 李晓今, 等. 能动抛光磨盘的变形试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 555-559. ZENG Zhi-ge, DENG Jian-ming, LI Xiao-jin, et al. Investigation of deformation experiment for active polishing lap[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004, 16(5): 555-559.
- [6] 胡自强, 凌宁, 潘君骅, 等. 基于PZT的非球面能动抛光盘定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1577-1581. HU Zi-qiang, LING Ning, PAN Jun-hua, et al. Location error analysis of deformable aspheric polishing lap based on PZT actuator[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1577-1581.
- [7] 孙天祥, 杨力, 吴永前, 等. 应力抛光技术加工抛物面的实验研究[J]. 光电工程, 2009, 36(12): 123-126. SUN Tian-xiang, YANG Li, WU Yong-qian, et al. Experimental Investigation of Stressed Mirror Polishing on Paraboloid[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(12): 123-126.

(下转第636页)

- Sensitivity analysis method for thermal-stress coupling structure[J]. *Journal of Mechanics*, 2001, 33(5): 685-691.
- [3] 王小兵, 陈建军, 梁震涛, 等. 随机温度场Monte-Carlo法的一类近似处理[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(10): 2156-2164.
- WANG Xiao-bing, CHEN Jian-jun, LIANG Zhen-tao, et al. A kind of approximate treatment with Monte-Carlo method of random temperature field[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(10): 2156-2164.
- [4] 陈建军, 王灵刚, 李金平. 随机参数杆结构在稳态随机温度场下的热分析[J]. *工程力学*, 2009, 26(6): 12-15.
- CHEN Jian-jun, WANG Ling-gang, LI Jin-ping. Thermal response analysis of stochastic pole structures under steady random temperature field[J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(6): 12-15.
- [5] 吴永礼. 计算固体力学方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 50-102.
- WU Yong-li. Calculation of solid mechanics method[M]. Beijing: Science Press, 2005: 50-102.
- [6] YANG Jian-xu, LI Juan-xing. Analysis of heating steady temperature field in a ceramic/metal composite FGM plate by FEM[J]. *Computer Modeling and Simulation*, 2010, 2: 103-106.
- [7] 李金平, 陈建军, 刘国梁, 等. 具有区间参数的瞬态温度场数值分析[J]. *电子科技大学学报*, 2009, 38(3): 463-466.
- LI Jin-ping, CHEN Jian-jun, LIU Guo-liang, et al. Numerical analysis of transient temperature field with interval parameters[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(3): 463-466.
- [8] RYOICHI C. Stochastic heat conduction analysis of a functionally graded annular disc with spatially random heat transfer coefficients[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, 33: 507-523.
- [9] XIU Dong-bin, KARNIADAKIS G E. A new stochastic approach to transient heat conduction modeling with uncertainty[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(24): 4681-4693.
- [10] GAO Wei, CHEN Jian-jun. Dynamic response analysis of closed loop control system for random intelligent truss structure under random forces[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2004, 18(4): 947-957.

编辑 黄 莘

(上接第630页)

- [8] 范斌, 杨力, 袁家虎, 等. 应力盘盘面变形智能控制研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(S0): 155-157.
- FAN Bin, YANG Li, YUAN Jia-hu. Research of stressed-lap surface deformation intelligent control[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(S0): 155-157.
- [9] 曾志革, 邓建明, 姜文汉. 能动抛光磨盘的有限元分析[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(1): 29-34.
- ZENG Zhi-ge, DENG Jian-ming, JIANG Wen-han. Finite element analysis for active polishing lap[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2002, 14(1): 29-34.
- [10] 范斌, 杨力, 曾志革, 等. 应力盘智能控制盘面面形的表征方法及检测技术的研究[J]. *光学技术*, 2005, 31(5): 751-753.
- FAN Bin, YANG Li, ZENG Zhi-ge. Method for representing the surface and testing technology of stressed-lap in CMAC controller[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(5): 751-753.
- [11] 范斌, 万勇建, 陈伟, 等. 能动磨盘加工与数控加工特性分析[J]. *中国激光*, 2006, 33(1): 128-132.
- FAN Bin, WAN Yong-jian, CHEN Wei, et al. Manufacturing features comparing between computer control active-lap and computer control optical surface for large aspheric optics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(1): 128-132.
- [12] 王栋, 杨洪波, 陈长征. 光学表面面形的计算机仿真[J]. *计算机仿真*, 2007, 24(2): 289-301.
- WANG Dong, YANG Hong-bo, CHEN Chang-zheng. Computer simulation of the optical surface[J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(2): 289-301.
- [13] 万勇建, 袁家虎, 范斌, 等. 光学加工中边缘问题的数控处理方法[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 92-96.
- WAN Yong-jian, YUAN Jia-hu, FAN Bin, et al. Methods of edge figuring in digital controlled fabrication of optical surface[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 92-96.
- [14] 张铁茂, 丁建国. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990.
- ZHANG Tie-mao, DING Jian-guo. Experimental design and data processing[M]. Beijing: Arms Industry Press, 1990.
- [15] MARTIN H M, ANDERSON D S, ANGEL J R P, et al. Progress in the stressed-lap polishing of a 1.8 mf/1.0 mirror[J]. *Advanced Technology Optical Telescopes*, 1990, 1236: 682-690.
- [16] WEST S C, MARTIN H M, NAGEL R H, et al. Practical design and performance of the stressed-lap polishing tool[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(34): 8084-8099.
- [17] 韦博成. 非线性回归分析及应用[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997.
- WEI Bo-cheng. Nonlinear regression analysis and application[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 1997.
- [18] 谢开贵, 宋乾坤, 周家启. 最小一乘线性回归模型研究[J]. *系统仿真学报*, 2002, 14(2): 189-192.
- XIE Kai-gui, SONG Qian-kun, ZHOU Jia-qi. A linear regress model based on least-absolute criteria[J]. *Journal of System Simulation*, 2002, 14(2): 189-192.
- [19] 吕书龙, 刘文丽. 最小一乘估计快速算法[J]. *应用概率统计*, 2008, 24(6): 321-630.
- LÜ Shu-long, LIU Wen-li. Quick Algorithm for least absolute deviation estimator[J]. *Chinese Journal of Applied Probability And Statistics*, 2008, 24(6): 321-630.

编辑 漆 蓉