

文章编号 1004-924X(2009)10-2499-07

应用改进模拟退火算法实现关节 臂式坐标测量机的参数辨识

高贯斌, 王 文, 林 铿, 陈子辰

(浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 结构参数误差是影响关节臂式坐标测量机精度的主要因素之一, 精确辨识其结构参数可以有效地提高测量机的精度。本文基于 Denavit-Hartenberg 模型建立了六自由度关节臂式坐标测量机坐标变换方程, 分析了基于锥孔的参数辨识原理, 提出了一种改进的模拟退火算法用于测量机的结构参数辨识。该算法在接近最优解时将减小搜索范围以提高搜索效率和求解精度, 并保留中间过程的最优解。以单点重复精度为目标函数, 利用改进的模拟退火算法对研制的六自由度关节臂式坐标测量机的结构参数进行辨识。实验结果表明, 经过参数辨识后, 测量机的单点重复精度提高了 7.87 倍, 长度测量精度提高了 5.59 倍。

关键词: 关节臂式坐标测量机; 结构参数辨识; 标定; 模拟退火算法

中图分类号: TH721 **文献标识码:** A

Parameter identification based on modified annealing algorithm for articulated arm CMMs

GAO Guan-bin, WANG Wen, LIN Keng, CHEN Zi-chen

(*Institute of Advanced Manufacture Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: Errors of structural parameters are one of the main factors causing uncertainty of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines (AACMM), however, the accuracy of AACMMs can be improved efficiently by identifying structural parameters accurately. In this paper, the homogeneous transformation equations of 6-DOF AACMMs were established based on Denavit-Hartenberg model and a method to identify structural parameters with a cone-shape hole was analyzed. Then, a Modified Simulated Annealing Algorithm (MSAA) was presented to identify the structural parameters of the AACMMs. The MSAA can keep the best solution during search and can reduce the search range when the solution approaches to the global minimum, which improves the search efficiency and accuracy. The definition of single-point repeatability was deduced, and the structural parameters of AACMMs were identified by using single-point repeatability as the objective function based on the MSAA. A 6-DOF AACMM was used to carry out experimental tests to evaluate the efficiency of the presented method, the single-point results show that after identification, the repeatability and length measure-

收稿日期: 2008-11-20; **修订日期:** 2008-12-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50875241); 浙江省科技计划重大专项基金资助项目 (No. 2006C11256); 杭州市科技攻关基金资助项目 (No. 20062422B18)

ment accuracy of the AACMM are improved by 7.87 and 5.59 times respectively.

Key words: Articulated Arm Coordinate Measuring Machine (AACMM); structural parameter identification; calibration; Simulated Annealing Algorithm (SAA)

1 引言

三坐标测量机是一种高效率、高集成度的精密测量仪器,被广泛应用于机械制造、电子、汽车和航空航天等领域。但在产品快速反求设计、产品加工质量在线检测、大中型零件精度检验等场合,常规的三坐标测量机则难以适应,近年来出现了关节臂式坐标测量机可以成功地解决上述问题。

与传统的三坐标测量机相比,关节臂式坐标测量机具有体积小、质量轻、便于携带、测量灵活、测量空间大、环境适应性强、成本低等优点。但由于其结构环节较多、结构误差累积放大等因素,其测量精度较难保证^[1],通常其长度测量示值误差为 0.01~0.5 mm,并与测量范围密切相关,因此,该类测量机的应用受到较大限制,目前主要用于对精度要求较低的产品反求设计领域。如果能够提高其测量精度,关节臂式坐标测量机将具有广泛的应用前景。

关节机器人的连杆参数误差是影响其绝对定位精度的最主要因素^[2],而结构形式源自于关节机器人的关节臂式坐标测量机,其结构参数的精度也是影响其测量精度及重复精度的主要因素之一,因此对结构参数进行精确估计或参数辨识是提高其精度的主要措施之一,也是关节臂式坐标测量机标定的一个主要内容。

目前,国内外对关节臂式坐标测量机的研究主要集中在参数的估计或标定上。I. Kovac 等设计了一种专用量具并结合商业化软件对关节臂式坐标测量机进行标定^[3-4];R. Furutani 等利用装有多个标准球的金属板对关节臂式坐标测量机进行标定^[5];J. Santolaria 等使用带有 14 个球的球形量规,建立了基于傅里叶多项式的误差模型并对关节臂式坐标测量机的参数误差进行了估计^[1];汪平等根据高精度正交三坐标测量机提供的标准,运用最小二乘参数辨识法对关节臂式坐标测量机进行标定^[6];王学影等提出了多重逆向标定方法,借助正交三坐标测量机对关节臂式

坐标测量机的各参数误差进行分离^[7];另外叶东^[8]、王从军^[9]、刘万里^[10]等也对关节臂式坐标测量机的标定进行了研究。

以上这些方法标定流程通常都比较复杂、周期较长,一般需要借助于精密三坐标测量机或复杂的非标准量具等设备进行标定,且标定精度很大程度上依赖于设备精度。

本文提出一种操作简单、易于在工业现场应用的数据采集和参数辨识方法,利用研制出的六自由度关节臂式坐标测量机进行了参数辨识实验。

2 坐标变换模型

研制的关节臂式坐标测量机结构如图 1 所示,主要由基座、两个测量臂、六个关节和测头系统构成,具有六个自由度。

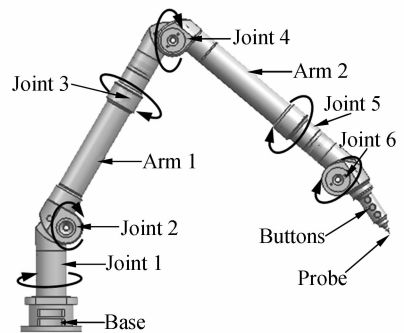


图 1 关节臂式坐标测量机结构图

Fig. 1 Mechanical structure of AACMM

测量机的各关节转角和测头坐标之间的关系可表示为:

$$y = f(\theta, p). \quad (1)$$

式中 y 为测头坐标, θ 为关节转角, p 为结构参数。结构参数 p 确定之后,根据关节转角 θ 和 f 定义的方程,即可利用式(1)计算出测头的坐标 y 。本文采用 Denavit-Hartenberg 方法(简称 D-H 方法)建立测量机的坐标变换模型,D-H 方法使用 4 组参数(杆长 d_i , 关节长度 a_i , 关节扭转角 α_i , 关节转角 θ_i)建立相邻坐标系的坐标变换矩

阵,坐标系 i 与 $i-1$ 之间的齐次变换矩阵由这 4 组参数决定。基于 D-H 方法建立起来的测量机坐标系统如图 2 所示。

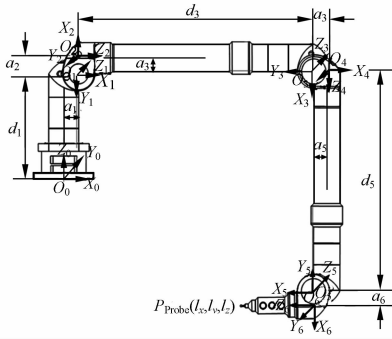


图 2 关节臂式坐标测量机坐标系
Fig.2 Reference frames of AACMM

根据 D-H 方法可知相邻坐标系 $\{x_i, y_i, z_i\}$ 与坐标系 $\{x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}\}$ 之间的齐次变换矩阵为^[11]:

$$T_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过依次前乘与前一坐标系的变换矩阵最终可以得到全局变换矩阵,即测头所在坐标系 $\{x_6, y_6, z_6\}$ 与基座所在坐标系 $\{x_0, y_0, z_0\}$ 的变换矩阵:

$$T_{0,6} = T_{0,1} \times T_{1,2} \times T_{2,3} \times T_{3,4} \times T_{4,5} \times T_{5,6} \quad (3)$$

设测头球心在坐标系 $\{x_6, y_6, z_6\}$ 中的坐标为 (l_x, l_y, l_z) , 则其在基座坐标系 $\{x_0, y_0, z_0\}$ 中的坐标可通过式(4)求得。

$$P_{Probe} = T_{0,6} \times [l_x \quad l_y \quad l_z \quad 1]^T \quad (4)$$

由于装配误差的影响,编码器物理零位与关节零位往往不重合,因此,关节转角 θ_i 是由编码器角度读数 θ_{iEnc} 和关节零位偏差 θ_{0i} 组成的,如式(5)所示。 θ_{0i} 表示编码器物理零位与关节零位之间的偏差,需要对 θ_{0i} 进行辨识,才能确保 θ_i 的正确性。

$$\theta_i = \theta_{iEnc} - \theta_{0i} \quad (5)$$

这样六自由度关节臂式坐标测量机的结构参数为 27 项,研制的测量机各参数的设计值如表 1 所示。

表 1 关节臂式坐标测量机结构参数

Tab.1 Nominal structural parameters of AACMM

关节	d_i/mm	a_i/mm	$\alpha_i/(\text{^\circ})$	$\theta_{0i}/(\text{^\circ})$
1	401	42	-90	0
2	0	42	-90	0
3	326	37	-90	0
4	0	37	-90	0
5	326	37	-90	0
6	0	37	-90	0
测头	$l_x=0 \text{ mm}$	$l_y=0 \text{ mm}$	$l_z=213 \text{ mm}$	

3 辨识原理及目标函数

3.1 辨识原理

对于六自由度关节臂式坐标测量机,其测量空间内部的每个点理论上都可以从无数个不同方向进行探测,而且无论从哪个方向探测,测得该点的坐标值都应该是相同的,但由于测量机实际结构参数与坐标变换模型中所用的理论参数之间存在偏差,因此,每次测得的同一点的坐标值并不完全相同,所测得的坐标值之间的差异大小是测量机重复精度的体现,理论参数和实际参数偏差越大,测量机的重复精度就越差。

基于关节臂式坐标测量机的这一特点,本文设计了一种数据采集方法。利用固定的锥孔使测头中心点的位置保持不变,通过不断改变各关节的转角,获得一系列关节转角数据,采集现场照片如图 3 所示。每组转角数据通过测量机坐标变换模型均可计算出一组测头的坐标值,通过测头的各组坐标值可得到测量机的单点重复精度。本文以单点重复精度为目标函数,提出一种改进的模拟退火算法对测量机各结构参数进行辨识。



图 3 利用锥孔进行数据采集

Fig.3 Data acquisition with cone shaped hole

3.2 目标函数定义

按照上述方法,改变测量机的位姿,获得一组位姿 $S = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]$, 其中 N 为姿态数量, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$ 为测量机的一个姿态, 对于每一个位姿 θ_i 都可以通过测量机的坐标变换模型计算出相应的测头坐标值 (x_i, y_i, z_i) 。

为了描述单点重复精度, 首先定义以下几个参数。

坐标平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad (6)$$

坐标误差值:

$$E_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2} \quad (7)$$

坐标误差平均值:

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (8)$$

坐标误差标准差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2} \quad (9)$$

\bar{E} 代表一组数据的平均误差大小, 而 σ 代表误差的波动范围, 这两项都是测量机精度的重要组成部分, 因此以 \bar{E} 和 σ 的组合来定义测量机的单点重复精度为:

$$RP = \bar{E} + 3\sigma \quad (10)$$

4 改进的模拟退火算法

4.1 算法原理

模拟退火算法是求解组合优化问题的一种有效方法, 它源于对固体退火过程的模拟, 采用 Metropolis 接受准则, 使算法能够逃离局部最优“陷阱”; 模拟退火算法用一组称为冷却进度表的参数来控制算法进程, 最终得到一个近似全局最优解。

模拟退火算法在局部极小解处有机会跳出并最终趋于全局最优解的根本原因是算法通过概率判断来接受新状态^[12], 但由于全局收敛条件难以实现, 且“概率接受”使得当前状态可能比搜索过程中某些中间状态要差, 从而实际算法往往最终只得到近似最优解, 甚至可能比中间经历的最优解还差; 由于在整个搜索过程中, 搜索范围大小不变, 导致搜索效率较差和最终解质量不高。

为了不遗失中间最优的状态, 提高搜索效率

和最终解质量, 本文提出一种改进的模拟退火算法: 在算法搜索过程中保留中间最优解, 并及时更新; 算法在接近最优解时减小搜索范围, 这样可以提高搜索效率和最终解的精度。判断当前状态接近最优解需要满足以下两个条件:

- (1) 当前的重复精度 $RP(p)$ 小于设定值 ϵ ;
- (2) 在前面计算的 m 个 Markov 链中重复精度 RP 未得到明显改善, 即 δRP_m 小于设定值 ζ 。

4.2 算法流程

改进的模拟退火算法由 Metropolis 采样算法(M 算法)和退火过程(Annealing Procedure, AP)组成, 算法步骤如下。

4.2.1 AP 算法

Step1: 设定初始温度 T_0 , 初始结构参数 $p(0) = p_0$, 终止检验精度 e , 终止温度 T_{\min} , 接近阈值 m, ϵ 和 ζ , 令初始最优解 $p^* = p_0$, 迭代次数 $i = 0$, 搜索范围 $\text{delta} = \text{delta}_L$ 。

Step2: 令 $T = T_i$, 以 T, p^* 和 $p(i)$ 为参数调用 M 算法, 以 M 算法返回状态 p 为当前状态即 $p(i) = p$, 更新 p^* 。

Step3: 降温 $T = T_{i+1} = \alpha T_i, i = i + 1$ 。

Step4: if ($RP < e$ or $T < T_{\min}$), then 转 Step6。

Step5: if ($RP < \epsilon$ and $\delta RP_m < \zeta$), then 令 $\text{delta} = \text{delta}_S$, 转 Step2。

Step6: 最优解 p^* 作为最终解输出, 中止算法。

4.2.2 M 算法

Step1: 令 $k = 0$ 时的初始结构参数 $p'(0) = p(i)$, 初始最优解 $p^{*'} = p^*$ 。

Step2: 由新解产生器 $p' = p(k) + \text{rand} * \text{delta}$ 产生新解, 并计算 $\delta RP = RP(p') - RP[p(k)]$, 其中 rand 为 $[-1, 1]$ 区间的随机数, 符合 Cauchy 分布。

Step3: if ($\delta RP < 0$), then $p(k+1) = p', p^* = p'$ 。

if ($\delta RP \geq 0$), 计算接受概率 $r = \exp[-RP(p')/T]$, if ($r > pp$), then $p(k+1) = p',$ else $p(k+1) = p(k)$, pp 为 $[0, 1]$ 区间上的随机数。

Step4: $k = k + 1$; if $k > L_k$, then 转 Step5, else 转 Step2。

Step5: 将当前最优解 p^* 和当前状态 $p(k+1)$ 返回 AP 算法。

5 实验验证

5.1 参数辨识实验

根据改进的模拟退火算法,编制了关节臂式坐标测量机参数辨识软件,图 4 为软件运行界面。

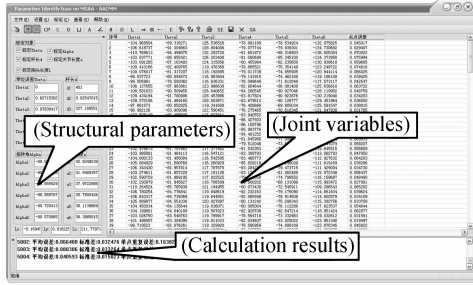


图 4 参数辨识软件运行界面

Fig. 4 Function interface of parameter identification software

参数辨识时,主要参数设定如下。

将测量机的参数设计值作为 p_0 ,如表 1 所示;对于采样数据集 S ,根据式 (7) 计算出坐标误差值的方差作为 $T_0; e=0.01; T_{min}=10^{-4}; m=5, \epsilon=0.1$, 和 $\zeta=10^{-3}$; δ_{L} 中长度的步长为 1, 角度步长为 2° ; δ_{S} 中长度的步长为 0.05, 角度步长为 $0.1^\circ; \alpha=0.9; L_k=10$ 。

按照前面提到的方法,用测量机采集 100 组关节转角数据,辨识软件将这些数据读入之后,对结构参数进行辨识,辨识结果如表 2 所示。

表 2 关节臂式坐标测量机结构参数辨识结果

Tab.2 Identified structural parameters of AACMM

关节	d_i (mm)	a_i (mm)	α_i ($^\circ$)	θ_{0i} ($^\circ$)
1	401	43.009 96	-89.505 66	0
2	0.023 13	41.984 57	-90.889 44	0.627 15
3	327.192 84	37.972 62	-89.855 53	0.078 38
4	1.045 93	35.690 36	-90.859 71	-1.035 45
5	326.299 19	38.118 38	-90.721 79	1.305 07
6	0.192 48	36.398 80	-90.570 96	0.042 23
测头	$l_x=-0.169 45 \text{ mm}$ $l_y=0.013 59 \text{ mm}$ $l_z=211.783 \text{ mm}$			

5.2 参数辨识实验

为了验证辨识结果的有效性,分别对测量机的重复精度和长度测量精度进行了检验。

5.2.1 重复精度检验

用一锥孔进行单点重复精度测试,采集 100 种不同空间姿态下的各关节转角数据,分别采用参数辨识前后的结构参数计算出每组关节转角对应的坐标值,并用式 (10) 分别计算出两种结构参数下的重复误差,计算结果如图 5 所示。计算结果表明,辨识前测量机的平均误差为 0.721 mm, 其标准差为 0.329 mm, 单点重复误差为 1.708 mm; 辨识后测量机的平均误差为 0.094 mm, 标准差为 0.041 mm, 单点重复误差为 0.217 mm, 可见经过参数辨识之后测量机单点重复精度提高了 7.87 倍。

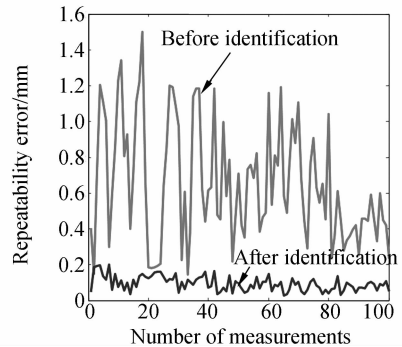


图 5 参数辨识前后的重复误差

Fig. 5 Repeatable errors measured with different parameters

5.2.2 长度测量精度检验

由于参数辨识的目标函数为单点重复精度, 但单点重复精度的提高, 并不能说明测量机精度得到了提高, 还需要对其它的精度指标进行检验, 下面对测量机的长度测量精度进行检验。

实验中使用长度为 50 mm、误差为 $\pm 1 \mu\text{m}$

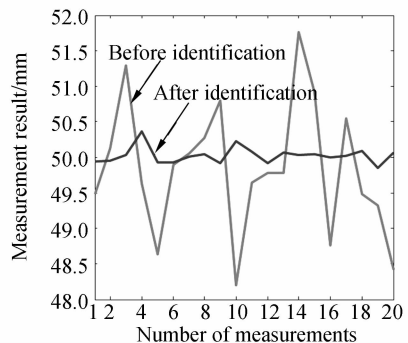


图 6 参数辨识前后的长度测量数据

Fig. 6 Length results measured with different parameters

(20~24 °C下)的量规,分别采用辨识前后的结构参数对量规的长度进行 20 次测量,测量结果如图 6 所示。测量结果表明,辨识前测量机的平均误差为 0.73 mm,最大误差为 1.79 mm;辨识后平均误差为 0.11 mm,最大误差为 0.32 mm,若以最大测量误差作为衡量标准,则经过参数辨识之后测量机的精度提高了 5.59 倍。

6 结 论

建立了六自由度关节臂式坐标测量机的坐标变换模型,以平均误差及其标准差的线性组合

定义了测量机的单点重复精度,以单点重复精度为目标函数,利用改进的模拟退火算法对六自由度关节臂式坐标测量机的结构参数进行了辨识。实验结果表明,经过辨识之后,测量机的单点重复精度提高了 7.87 倍,长度测量精度提高了 5.59 倍。

本文所述的参数辨识方法,只需要借助一固定的锥孔就可实现,便于在工业现场推广应用。实验中所用的六自由度关节臂式坐标测量机结构和坐标变换模型具有通用性,因此本文提出的方法也适用于其它类似结构的六自由度关节臂式坐标测量机或机器人的参数辨识。

参考文献:

- [1] SANTOLARIA J, ANGUILAR J J, YAGUE J A, *et al.*. Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines [J]. *Precision Engineering*, 2008, 32(4): 251-268.
- [2] 叶声华, 王一, 任永杰, 等. 基于激光跟踪仪的机器人运动学参数标定方法 [J]. *天津大学学报*, 2007, 40(2): 202-205.
YE SH H, WANG Y, REN Y J, *et al.*. Calibration of robot kinematic parameters based on laser tracker [J]. *Journal of Tianjin University*, 2007, 40(2): 202-205. (in Chinese)
- [3] KOVAC I, FRANK A. Testing and calibration of coordinate measuring arms [J]. *Precision Engineering*, 2001, 25(2): 90-99.
- [4] KOVAC I, KLEIN A. Apparatus and a procedure to calibrate coordinate measuring arms [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 48(1): 17-32.
- [5] FURUTANI R, SHIMOJIMA K, TAKAMASU K. Parameter calibration for non-cartesian CMM [J]. *VDI Berichte*, 2004, 1860: 317-326.
- [6] 汪平平, 费业泰, 林慎旺. 柔性三坐标测量臂的标定技术研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(3): 284-288.
WANG P P, FEI Y T, LIN SH W. Calibration technology of a flexible coordinate measuring arm [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(3): 284-288. (in Chinese)
- [7] WANG X Y, LIU SH G, ZHANG G X, *et al.*. Calibration technology of the articulated arm flexible CMM [J]. *Journal of Harbin Institute of*

Technology, 2008, 40(9): 1439-1442.

- [8] 叶东, 黄庆成, 车仁生. 多关节坐标测量机的误差模型 [J]. *光学 精密工程*, 1999, 7(2): 91-96.
YE D, HUANG Q CH, CHE R SH. An error model for multi-joint coordinate measuring machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(2): 91-96. (in Chinese)
- [9] 王从军, 魏霖, 李中伟. 仿人关节式坐标测量机的数学建模及标定方法 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(11): 1-4.
WANG C J, WEI L, LI Z W. Mathematical model and parametric calibration of apery multi-joint articulated coordinate measuring machine [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2007, 35(11): 1-4. (in Chinese)
- [10] 刘万里, 曲兴华, 闫勇刚. 便携式三坐标测量臂校准和误差补偿 [J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(4): 81-84.
LIU W L, QU X H, YAN Y G. Calibration and error compensation of portable coordinate measuring arm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(4): 81-84. (in Chinese)
- [11] DENAVIT J, HARTENBERG R. A kinematic notation for lower pair mechanism based on matrices [J]. *ASME Journal of Applied Mechnics*, 1955, 22(6): 215-221.
- [12] BUREERAT S, LIMTRAGOOOL J. Structural topology optimisation using simulated annealing with multiresolution design variables [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2008, 44(12-13): 738-747.

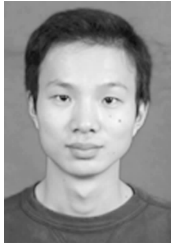
作者简介:



高贯斌(1979—),男,山东成武人,博士研究生,主要从事精密测量系统方面的研究。E-mail:gbgao@163.com



王 文(1968—),男,湖北大冶人,博士,副教授,主要从事精密测量与数字控制等方面的研究。E-mail:wangwn@zju.edu.cn



林 铿(1985—),男,福建罗源人,硕士研究生,主要从事精密测量系统方面的研究。E-mail:loganlinkeng@163.com



陈子辰(1950—),男,福建福州人,博士,教授,博士生导师,主要从事精密机械、精密测量和 MEMS 等方面的研究。E-mail:chenzc@zju.edu.cn

● 下期预告

光学加工中高频误差对环围能量比的影响

吴冬良,戴一帆,王贵林

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

以大型光学系统主镜为研究对象,基于经典标量衍射理论分析中高频误差对环围能量比的影响。根据光学镜面面形误差近似为高斯平稳随机过程特征以及全频段面形误差对光强分布和环围能量比(FEE)的影响,建立了光学镜面中高频误差梯度均方根(GRMS)与 FEE 之间的数学关系模型,进行了仿真分析并利用实际面形误差数据进行了验证。研究表明,环围能量比 FEE 随着中高频误差 GRMS 的增加近似呈指数规律衰减,同时各频段误差将无误差时对应的光强分布边缘部分能量转移到光强分布的中心以及更宽范围,并且随着中高频误差的增大,能量转移曲线出现反复振荡。在特定光学口径下,中高频误差 GRMS 值分别小于 12 nm/mm 以及 30 nm/mm 时,可使得中高频误差对 FEE 的影响均 $<5\%$,能够用于控制中高频误差对 FEE 的影响,为中高频误差的进一步修形提供理论支持。