DOI: 10.3901/JME.2013.14.016

光学式轴孔内径在线测量方法研究与误差分析*

陈浩 郝继贵 谢洪波 王仲

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

摘要: 轴孔内径尺寸测量是发动机箱体检测中的一项关键技术,是提升发动机性能和质量的必要手段。为提高轴孔内径在线测量水平,同时克服现有方法的局限性,提出一种新型光学式多方向轴孔内径测量方法。该方法借鉴气动量仪的布局,均匀分布激光位移传感器于测棒截面,并根据发动机箱体轴孔的结构特点,匹配测棒长度和测量截面层数。为评价装配误差和测量随机误差对测量精度的影响,利用遗传算法分析内径测量数学模型,寻找影响最终测量误差的关键因素,并以此作为指导测量的依据。结合校准过程,通过比较轴孔内径的测量值和已知检定值,证明该方法内径测量误差优于 $5\ \mu\text{m}$ 。试验结果表明该方法可以用于轴孔内径的高精度自动化在线测量。

关键词: 内径在线测量 光学式多方向 遗传算法 校准

中图分类号: TH74

Analysis on Optical Shaft Hole Diameter Online Measurement Method and Error Analysis

CHEN Hao ZHU Jigui XIE Hongbo WANG Zhong

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: The measurement of shaft hole diameter is a key technology in the engine box tests, and it is also a necessary mean to enhance the quality of engine production. In order to improve the shaft hole diameter online measurement level, while overcoming the limitations of existing methods, it propose a new type of optical multi-directional shaft hole diameter measurement method. Drawing on the layout of the pneumatic measuring instrument, the method uniformly distributes the laser displacement sensors in the probe cross-section, and in accordance with the structural characteristics of the engine box, matches the probe length and measuring cross-section layers. To evaluate the influence of assembly error and random errors to the measurement accuracy, genetic algorithms is used to analysis of the internal diameter measurement mathematical model to find the key factors affecting the final measurement error which is a basis for guiding measurement. It is compared that the measurement values and test values of the shaft hole diameters at different positions in the hole by combining with the calibration process, and it is proved that the measurement error of this method is better than $5\ \mu\text{m}$. The result verifies that this method can be used to achieve precision automated online measurement of the shaft hole diameter.

Key words: Online inner diameter measurement Optical multi-direction Genetic algorithms Calibration

0 前言

随着汽车工业的迅速发展,发动机动力性能的不断f提升不仅要求发动机增多气缸数目同时也需要降低箱体高度,从而造成箱体上轴孔呈现层数多、孔径小且深等特点。发动机箱体上曲轴孔与传动曲轴之间的配合精度是决定发动机动力性能的重要因素,因而高精度轴孔内径自动化检测技术对提升发

动机性能起着至关重要的作用。

传统轴孔内径测量主要是基于坐标和基于专用量仪^[1-2]两种方式。基于坐标方式的典型内径测量仪器为三坐标测量机,测量时利用探针获取被测形貌在其测量坐标系下的坐标值^[3],此种方式具有较强的通用性;但三坐标测量机的接触式测量方式易造成被测表面划损,同时探针移动测量过程耗时长、效率低,只适用于离线或形状复杂工件的测量。目前,基于专用量仪的测量方式被普遍采用,其中气动量仪应用最为广泛,通过将被测表面位移量转化为气压变化量实现内径测量。气动量仪的非接触测量方式可避免划伤工件表面,同时多喷嘴结构设计

* 国家科技重大专项资助项目(2009ZX04014-092)。20121115 收到初稿,20130420 收到修改稿

可提高测量效率,降低动态误差^[4];然而气动量仪受自身气压源的稳定性影响大,工作距离很小(几十微米以内),难以实现在线自动化测量。

因此,在较大间隙下完成轴孔内径非接触式测量的方法是实现轴孔高精度在线测量的前提。本文提出一种新型光学式轴孔内径测量方法,首先借鉴气动量仪的布局在测棒各测量截面上分布多个激光位移传感器^[5]并且根据发动机轴孔特点匹配测棒长度,其次在分析测量原理并建立数学模型基础上利用遗传算法找出此布局的关键误差影响因素,最后通过试验验证此方法的测量精度。

1 结构设计调整

光学式轴孔内径测量方法属于比较测量法,以已知内径值的标准件作为测量基准,通过测棒获取被测件相对于标准件的尺寸偏差得出被测件的内径值,而在测棒每次深入被测物进行测量时测棒与轴孔内表面的测量间隙是能否轴孔内径在线测量的关键。传统的内径专用气动量仪多方向的测量方式虽能明显提升测量效率,但其测量间隙过小的问题是其无法实现在线测量的根本原因。本文提出的轴孔内径测量方法借鉴气动量仪多方向测量的布局,引入光电检测技术,将基于激光三角法的位移传感器(即测头)分布于测棒各个测量方向,从而解决专用量仪因测量间隙小而无法实现在线测量的难题。

作为发动机轴孔专用量仪还需解决测量深度问题。发动机箱体上轴孔呈现层数多、纵向深等特点,如采用丝杠带动量仪逐层测量的方式,丝杠的径向跳动将会引起较大的测量随机误差。因而,本文提出在测棒主体上设置多个测量截面,并依据被测发动机轴孔的层数、间距等特征匹配相应的测棒长度。在此布局下测棒单次测量即可完成所有被测轴孔内径测量,避免旋转机构引入径向跳动误差。

根据试验所用发动机的轴孔布局,在测棒上相应的设置五层测量截面,同时受限制于测头外形尺寸与轴孔测量空间等因素,测棒各截面以 90° 角度间隔均匀分布 4 个测头,如图 1 所示。测量时测棒由导轨带动自动深入至轴孔内部进行测量,但是测量之初首先应完成测棒运动方向与轴孔测量截面的垂直度校准。此过程的目的在于调整测棒中心线与轴孔中心线平行,使得测头的测量方向与轴孔中心线垂直。即使测量方向与理想测量截面较小存在异面夹角,理想测量截面上投影结果与实际测量结果偏差在可忽略的亚微米级一下水平,在随后的数学模型计算,无须考虑测头测量方向相异面的影响。

图 1 测量截面示意图

同一测量截面上测头按照测量方向垂直摆放的初始目的是直接获取两条轴孔的直径值,所以需要专用机构进行各截面测头测量方向的调整,如图 2 所示。调整机构首先将测棒嵌入在轴套内,测棒与轴套采用基轴制的间隙配合 $\phi 92H7/h6$,在加工过程将孔轴配合的极限偏差降至最低,使得测棒中心与轴套中心的距离偏差产生的直径测量误差远小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 即可忽略。调整结构首先用超高精度的分度盘在远离轴套中心的 4 个挡块的内表面刻画与回转轴线 oo' 平行的刻线且需要相对两条刻线与 oo' 共面,即 oo' 与刻线 aa' 、 cc' 平行且共面,在垂直方向上采用相同刻线方法。依据上述刻线,调整各个测头的测量方向与轴线 oo' 垂直相交,以保证各测头测量方向在轴心处相交。理想中截面 4 个测头的测量方向全部垂直的状态难以实现,而调整机构还可进行直径方向上两测量方向角度偏差的标定。

图 2 调整结构示意图

基于测量空间平均分配的原则,将 4 个测头在测量截面的径向方向上的等角度间隔分布,即选择测量相互垂直方向的两条直径。理想状况下相对两测头应处于同一直径方向上即相对两测头测量方向平行,但受限制于装配和调整工艺易产生摆角偏差。在摆角误差标定时应将其中一测头测量方向对准 aa' ,相对方向上另一测头的测量点与刻线 cc' 的距离可获取该直径方向上摆角偏差(另一直径方向上

摆角误差标定同上), 标定结果为后续的数学模型分析奠定基础。

2 数学模型分析

轴孔内径比较测量的条件是测棒上每个测头的测量方向均与被测轴孔上被测点的法线方向相重合以保证比较测量的对象为被测轴孔的直径值, 然而在测棒装配过程中测头的装配误差以及测棒在测量时测量中心位置的随机性导致比较测量的对象不为直径值, 因而, 评价测头相对于被测轴孔的摆放对测量结果的影响至关重要, 需要通过构建数学模型确定测量误差^[8]。

假定测棒单截面上 4 个测头相对于被测轴孔的摆放位置投影位置如图 3 所示, 其测量方向分别为 O_1A 、 O_1C 、 O_2B 和 O_2D , 其中 O_1 为 O_1A 、 O_1C 测量方向交点, O_2 为 O_2B 和 O_2D 测量方向的交点。

图 3 内径测量数学模型

现以被测轴孔的理想圆心 O 为极坐标系的极点, 选择与测量方向 O_1A 平行且经过极点 O 的射线为极轴。在此极坐标系下, 测棒对轴孔的两条直径 d_1 和 d_2 的测量值为

$$d_1 = O_1A + O_1C \quad (1)$$

$$d_2 = O_2B + O_2D \quad (2)$$

以直径测量方向 O_1A 、 O_1C 为例建立测量误差模型(O_2B 、 O_2D 方向的计算方法与此相同), 首先需要对测头在上述极坐标系下的位置作出如下描述: 交点 O_1 的位置用偏心距 L 和幅角 α 来表示; 测量方向 O_1C 与 O_1A 的夹角称其为摆角用 β 表示且规定其顺时针为正、逆时针为负; 同时假定被测轴孔的半径真实值为 R 。

由此可见式(1)中的 O_1A 存在于三角形 $\triangle OO_1A$ 中, 其中 $OA=R$, $OO_1=L$, $\angle O_1OA=\alpha$, 综合上述条

件, 则有

$$O_1A = \sqrt{R^2 - (L\sin\alpha)^2} - L\cos\alpha \quad (3)$$

直径测量值 d_1 的另外一部分 O_1C 则存在于三角形 $\triangle OO_1C$ 中, 但由于摆角 β 的方向不明确造成 $\angle OO_1C$ 的取值不定。如图 4 所示, 以在 OO_1 和 O_1A 所在的直线方向的夹角作为摆角 β 的临界值即以 OO_1 的延长线为界, 将幅角 α 分区间进行如下讨论以确定 $\angle OO_1C$ 的值。

(a) $0 \leq \alpha < 90^\circ$

(b) $90^\circ \leq \alpha < 180^\circ$

图 4 直径方向上测头摆放示意图

(1) $0 \leq \alpha < 90^\circ$ 。如图 4a 所示, 当测量方向 O_1C 在 OO_1 延长线之上如图 4a 中的 C_1 、 C_2 位置时

$$\angle OO_1C = \alpha + \beta \quad (4)$$

当测量方向 O_1C 在 OO_1 延长线之下如图中的 C_3 位置时

$$\angle OO_1C = -\alpha - \beta \quad (5)$$

此时摆角 β 的临界值为 $-\alpha$ 。

(2) $90^\circ \leq \alpha < 180^\circ$ 。如图 4b 所示, 当测量方向 O_1C 在 OO_1 延长线之上如图 4b 中的 C_1 位置时

$$\angle OO_1C = 2\pi - \alpha - \beta \quad (6)$$

当测量方向 O_1C 在 OO_1 延长线之下如图 4 中的 C_2 、 C_3 位置时

$$\angle OO_1C = \alpha + \beta \quad (7)$$

此时摆角 β 的临界值为 $\pi - \alpha$ 。

基于上述分析, 幅角 α 在其余两个关于极轴对称的区间内的分析过程与此相同。将各个区间内的 $\angle OO_1C$ 的值以及摆角 β 的临界值归纳如表 1 所示。

表 1 夹角 $\angle OO_1C$ 取值一览表

幅角 α	摆角 β	夹角 $\angle OO_1C$
$0 \leq \alpha < 90^\circ$	$\beta \geq -\alpha$	$\alpha + \beta$
	$\beta < -\alpha$	$-\alpha - \beta$
$90^\circ \leq \alpha < 180^\circ$	$\beta \geq \pi - \alpha$	$2\pi - \alpha - \beta$
	$\beta < \pi - \alpha$	$\alpha + \beta$
$180^\circ \leq \alpha < 270^\circ$	$\beta \geq -(\pi - \alpha)$	$2\pi - \alpha - \beta$
	$\beta < -(\pi - \alpha)$	$\alpha + \beta$
$270^\circ \leq \alpha < 360^\circ$	$\beta \geq 2\pi - \alpha$	$\alpha + \beta - 2\pi$
	$\beta < 2\pi - \alpha$	$2\pi - \alpha - \beta$

根据上述对摆角 β 的情况分析, 直径测量值中 O_1C 需在三角形 $\triangle OO_1C$ 中求解。

现假设 $\angle OCO_1 = \gamma$, $\angle OO_1C = \theta$, 则有

$$\frac{OC}{\sin \theta} = \frac{OO_1}{\sin \gamma} \quad (8)$$

可得出

$$\gamma = \arcsin(L \sin \theta / R) \quad (9)$$

由此可得出直径测量值中 O_1C 值, 即

$$O_1C = \sqrt{R^2 + L^2 - 2RL \cos(\pi - \theta - \gamma)} \quad (10)$$

式(10)中 θ 即夹角 $\angle OO_1C$, 它的取值如表 1 所示, γ 的值由式(9)计算所得。

由此, 结合直径测量值式(3)和式(10)两部分, 可求得实际测量结果 d_1 。

综上所述, 任意方向上的直径测量值 d 是包含 L 、 R 、 α 、 β 四个参数的函数, 即

$$d = f(L, R, \alpha, \beta) \quad (11)$$

函数中 α 是测棒测量中心与轴孔中心位置有关的随机误差, 随机性决定 α 作为幅角其取值是在 $[0, 360^\circ]$ 圆周内的任意值; β 作为装配过程引入的摆角误差, 根据现有装配技术条件完全可将其控制在 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 范围之内。现假定将测棒深入半径真实值为 $R=46.000\ 0\ \text{mm}$ 的轴孔中, 同时假设测量中心 O_1 与理想心 O 之间的偏心距 $L=100\ \mu\text{m}$, 通过 Matlab 绘制三维形貌曲面来描述直径测量值 d 与 α 、 β 之间的关系, 如图 5 所示。

从图 5 中可看出, 随摆角 α 和幅角 β 的变化, 直径测量结果存在极值点, 即在直径方向上测头按此极值位置摆放时有最大测量误差, 即

$$\Delta d_{\max} = |d - 2R|_{\max} \quad (12)$$

图 5 测量结果三维曲面图

3 基于遗传算法的误差分析

3.1 测量极值位置计算

多元函数求极值点以及对应的自变量问题一般采用函数多阶求导的方法, 然而在面临复杂函数问题时, 该方法虽能获得极值点的精确位置但却耗费大量计算时间。在实际应用中, 只需要获得测头摆放极值误差的大致位置即可完成测量的可行性分析。遗传算法具有计算简单、鲁棒性好和并行处理的突出优点, 是优化非线性、多目标的复杂函数的最佳方法, 贴合测头布局极限位置的计算需要。遗传算法通过选择、交叉、变异等遗传运算, 使群体进化到包含或者接近最优解的状态。直径三维测量曲面是在已知被测轴孔半径 R 和测棒偏心距 L 的情况下关于幅角 α 和摆角 β 等两个自变量的函数。利用遗传算法可求得测量最大误差及其对应的自变量, 其计算过程如下。

(1) 初始化。两个变量幅角 α 和摆角 β 采用 20 位的标准二进制编码, 预先设置最大遗传代数为 50, 建立区域描述器确定编码解码规则, 随机产生初始群体 $P(0)$, 种群规模为 40。

(2) 计算适应度。遗传算法以个体适应度的大小来判断个体的优劣, 以直径测量误差最大值时用 $\Delta d_{\max}$ 作为个体适应度。

(3) 选择运算。按照适应度大小将个体排序, 选择常用的比例选择算子, 将当前群体中适应度较高的优秀个体按照 10% 的比例遗传到下一代。

(4) 交叉变异运算。交叉和变异运算是产生新个体的关键操作。选取交叉概率 $p_c=0.7$ 的两点交叉算子, 变异概率 $p_m=0.5$ 对个体基因进行变异, 从而

产生选择运算后剩余的新个体构建新群体 $P(t)$ 。

(5) 对新群体 $P(t)$ 进行新一轮的选择、交叉、变异操作, 直至最大遗传代数输出适应度最高的个体及其目标函数值^[9-11]。

经过 50 代迭代后群体中个体的目标函数值即最大误差值如图 6 所示。此时, $\alpha_1=272.581\ 6^\circ$, $\beta_1=-5.000\ 0^\circ$, $\Delta d_{\max}=8.940\ 8\ \mu\text{m}$, 同时有 $\alpha_2=88.567\ 7^\circ$, $\beta_2=5.000\ 0^\circ$, $\Delta d_{\max}=8.940\ 8\ \mu\text{m}$, 并且上述两对自变量 α 和 β 值在关于极轴对称的两个位置上的极值点。

图6 最终群体计算结果

上述分析过程的前提是限制摆角 β 的变化区间和固定偏心距 L 。在不同的摆角 β 变化区间和不同的偏心距 L 情况下, 利用遗传算法计算测量最大误差 $\Delta d_{\max}$ 以及对应的自变量 α_1 、 β_1 和 α_2 、 β_2 , 如表 2 所示, 并以此数据作为分析测量误差影响因素的基础, 同时也发现 $|\beta_1|=\beta_2=\beta_{\max}$, 即最大测量误差是在最大摆角位置上。

3.2 计算结果分析

在实际测量过程中, 幅角 α 是与测棒的深入位置有关的随机变量且较难预测和调整, 而另一变量摆角 β 却可在机械结构和装配工艺上进行调整。与此同时, 当幅角不能用来作为限制测量最大误差的要素时, 偏心距 L 则可替代幅角作为误差控制要素。偏心距的定义是表示测棒测量中心与被测孔理想圆心之间的距离, 即在一定的误差要求下, 以被测孔理想中心为圆心、偏心距为半径作圆, 当摆角范围一定时, 测棒测量中心在此圆内进行测量时最终测量误差在此要求范围之内。通过表 2 同样可知, 摆角越大, 测量最大误差越大; 同时偏心距越大, 测量最大误差也越大。因而, 建立摆角、偏心距与测量最大误差的数值关系非常重要, 通过分析可找出减小测量误差的最优方法。

表2 遗传算法计算结果

摆角 $\beta/(^\circ)$	偏心距 $L/\mu\text{m}$	计算结果		
		误差 $\Delta d_{\max}/\mu\text{m}$	$\alpha_1/(^\circ)$	$\alpha_2/(^\circ)$
2°	100	3.307 8	88.795 5	271.121 8
	140	5.312 6	88.975 8	271.058 0
	180	6.987 0	89.024 2	271.006 6
	220	8.730 9	88.882 0	271.137 3
	260	10.544 4	89.010 4	271.030 7
3°	100	5.452 6	88.454 9	271.510 7
	140	7.755 3	88.502 0	271.496 5
	180	10.127 6	88.443 8	271.596 1
	220	12.569 3	88.555 5	271.431 4
	260	15.080 6	88.625 6	271.520 4
4°	100	7.196 9	87.995 3	272.012 3
	140	10.197 4	87.997 7	272.002 3
	180	13.267 3	87.924 1	272.071 5
	220	16.406 7	87.895 0	272.097 9
	260	19.615 5	88.009 6	271.905 8
5°	100	8.940 8	87.536 1	272.558 7
	140	12.638 7	87.414 1	272.635 9
	180	16.406 0	87.560 5	272.498 0
	220	20.242 7	87.482 2	272.569 4
	260	24.148 7	87.525 9	272.498 0

提取表 2 中关于摆角、偏心距与测量最大误差的数据建立二维曲线模型, 其中 x 轴表示为偏心距 L , y 轴表示为模型计算最大误差, 如图 7 所示。

图7 L 与 Δd 关系曲线

通过图 7 分析可得出, 在偏心距一定和幅角位置随机的前提下, 通过控制摆角大小可明显降低测量误差; 反之, 当测量误差一定时, 通过减小摆角, 可降低对测棒偏心距的要求。实际应用中, 在装配阶段应尽量减小摆角误差从而为测量阶段测量中心的深入位置带来更大容许空间。经计算, 当摆角在 $[-2^\circ, 2^\circ]$ 内变化且测量误差在 $10\ \mu\text{m}$ 以内时, 只须限制偏心距在 $0.25\ \text{mm}$ 内即可。

4 试验数据

被测箱体以及测棒运动执行机构, 如图 8 所示。测量时, 测棒经装配调整后深入标准环规中进行校

准以获取基准位置 x_1 ，其目的是提供比较测量的基准；然后将校准后的测棒深入到被测发动机轴孔中进行测量以获取被测轴孔位置 x_2 ，通过比较测量得出被测轴孔内径值。测棒单次测量即可获取发动机箱体五层轴孔的被测内径值，大大缩短测量时间。

被测轴孔的测量值 d 还应与标称值 D 进行比较，以检验此装置的测量准确度。被测箱体的轴孔内径标称值是经中国计量院通过三坐标测量机检定得出，内径测量值与标称值作比较，测量误差 Δd 如试验数据如表 3 所示。

结合校准和比较测量过程，同时已知被测标准件的内径值为 92.000 00 mm 可计算出当前被测轴孔的内径测量值，如表 3 所示。由此可见，此方法测量轴孔内径的最大测量误差不超过 5 μm 。根据发动机轴孔高精度的配合需求，轴孔孔径测量不确定度

应优于 2 μm ，因此在满足 3 σ 原则下实际轴孔测量精度应低于 6 μm ，而本文提出的测量方法最终测量精度明显低于上述要求，进而证明该方法的可行性。

图 8 试验装置实物图

表 3 试验测量数据

截面	内径专用量仪				三坐标测量机 标称值 D/mm	测量误差 $\Delta d/\mu\text{m}$
	序号	校准位置 $x_1/\mu\text{m}$	测量位置 $x_2/\mu\text{m}$	被测直径值 d/mm		
1	1	330.01	349.15	92.004 25	92.001 11	3.14
	2	340.41	346.46			
	3	-340.1	-368.95			
	4	-148.09	-152.93			
2	1	382.12	406.27	92.001 25	91.999 87	1.38
	2	314.14	319.05			
	3	-62.15	-85.97			
	4	-161.82	-163.9			
3	1	47.04	69.05	92.005 96	92.002 63	3.33
	2	285.01	291.03			
	3	93.94	64.05			
	4	-137.99	-148.05			
4	1	64.45	97.77	91.999 32	91.994 71	4.61
	2	210.27	213.99			
	3	-103.97	-132.83			
	4	-169.86	-172.94			
5	1	389.01	407.11	91.996 74	91.999 69	-2.95
	2	172.07	168.98			
	3	24.01	-0.46			
	4	-542.03	-546.02			

5 结论

(1) 研究现有内径测量方法，提出一种光学式多测头轴孔内径快速在线测量方法，该方法基于气动量仪的布局并以被测轴孔的复杂结构为依据设计与被测轴孔的长度和层数相匹配的测棒，同时通过激光位移传感器获取被测轴孔的位置信息。

(2) 分析测头的布局并构建内径测量的数学模型，利用遗传算法确定摆角误差为影响测量精度的

关键因素，分析表明在测头装配中减小摆角误差可放宽对偏心距的要求。

(3) 试验过程中，测棒在利用标准环规进行校准后测量被测轴孔内径，测量值与计量院检定值相比测量误差优于 5 μm ，表明该方法可实现轴孔内径的高精度自动化测量。

参 考 文 献

- [1] 云鹏, 周彩虹, 梁雅军, 等. 深微孔内径测量技术研究[J]. 宇航测试技术, 2012, 32(4): 6-9.

- YUN Peng, ZHOU Caihong, LIANG Yajun, et al. Research on measurement technology of micro-and deep aperture[J]. Journal of Astroantic Metrology and Measurement, 2012, 32(4): 6-9.
- [2] 孙长库, 王小兵, 刘斌, 等. 电容传感微小孔径的测量方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2006, 4(2): 103-107.
- SUN Changku, WANG Xiaobing, LIU Bin, et al. Capacitance sensor measurement method for micro-aperture[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2006, 4(2): 103-107.
- [3] 王正明, 何雪明, 刘伟, 等. 三坐标测量机自动测量技术的研究[J]. 机床与液压, 2009, 37(12): 127-129.
- WANG Zhengming, HE Xueming, LIU Wei, et al. Research on automatic measurement technology of coordinate measuring machine[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37 (12): 127-129.
- [4] 刘志敏, 叶怀储. 气动量仪测量不确定度分析[J]. 计量与测试技术, 2009(6): 69-70.
- LIU Zhimin, YE Huaichu. Measurement measuring instrument[J]. Metrology & Measurement Technique, 2009(6): 69-70.
- [5] LI Yangsheng, XUE Lijun. Surface contour measurement using a short range laser displacement sensor[C]//Solid Freeform Fabrication Proceedings, 2009: 11-21.
- [6] 于光平, 李延吉, 冯英荐. 基于 PSD 的一维位移测量系统[J]. 仪表技术与传感器, 2008 (12): 1-3.
- YU Guangping, LI Yanji, FENG Yingjian. One-dimension displacement measure system based on PSD[J]. Instrument Technique and Laser, 2008 (12): 1-3.
- [7] VERBEEK P K, STEENVOORDEN G K, YOUNG I T. The PSD transfer function[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2002, 49 (1): 202-206.
- [8] 尹国鑫, 王高, 李仰军, 等. 基于小波理论的 PSD 测试系统的数据分析[J]. 光电技术应用, 2011, 26(3): 85-88.
- YIN Guoxin, WANG Gao, LI Yangjun, et al. Data analysis of PSD test system based on wavelet theory[J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(3): 85-88.
- [9] 廖平. 基于遗传算法和分割曲面逼近法精确计算复杂曲面轮廓误差[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 1-7.
- LIAO Ping. Calculating of complex surface profile error based on subdivision approach algorithm and genetic algrithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 1-7.
- [10] ZINCHENKO L A, KUREUCHIK V M. Multialternative genetic algorithms for the search of a function extremum[J]. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2003, 42(4): 575-583.
- [11] CAI Guozhong, LU Congda, WEN Donghui. Extraction profile feature points of complex parts based on genetic algorithms[J]. Digital Design and Manufacturing Technology, 2010(102-104): 116-120.
-
- 作者简介: 陈浩, 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为激光测距, 光电检测。
E-mail: tochenhaox@163.com
- 郑继贵, 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为激光及光电测试技术。
E-mail: jiguizhu@tju.edu.cn