

基于数字全息密封平面表面形貌测量及其模型重建

张小兵^{**}, 刘海江^{*}

同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804

摘要 表面形貌测量是研究密封平面加工工艺、加工质量及密封性的前提条件。为基于数字全息测量技术实现密封平面表面形貌的在线测量,并针对工业现场对测量结果的可视化显示及三维模型输出等特殊的技术需求,将数字全息测量技术与虚拟制造技术相结合,提出了一种密封平面表面形貌的测量方法。首先基于数字全息技术测量密封平面的表面形貌,并将测量结果转化为点云;再基于点云生成三维模型;最后利用平面度协同模型间距离分布的方法来评价测量及模型重建精度。所提方法亦可间接测量装配后密封平面上表面形貌间的配合关系。为验证上述方法的可行性,分别以某法兰面和某发动机缸体缸盖结合面为例进行实验。结果表明:所提方法能够实现密封平面表面形貌的快速测量,并将测量结果以三维模型的形式输出,可以满足工业现场对密封平面表面形貌测量的要求。

关键词 全息; 三维形貌; 测量; 点云; 泊松曲面重建; 曲面分割

中图分类号 O438.1; TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0912001

Measurement and Model Reconstruction of Topography of Sealing Plane Based on Digital Holography

Zhang Xiaobing^{**}, Liu Haijiang^{*}

School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China

Abstract The measurement of surface topography is a prerequisite for studying the processing technology, processing quality and sealing performance of the sealing plane. In order to apply the digital holographic measurement technology to the on-line measurement of the sealing plane surface topography and to meet the requirements of visual display and three-dimensional (3D) model output of the measurement results in the industrial field, we propose a method of measuring surface morphology of sealing plane. The method combines digital holography with virtual manufacturing technology. Firstly, the surface topography of the sealing plane is measured based on digital holographic measurement technology and the measurement results are transformed into point cloud. Then, the 3D model is generated based on the point cloud. Finally, the accuracy of the measurement and model reconstruction is evaluated by the method of coordinating flatness with distance distribution between models. In addition, the proposed method can also indirectly measure the mating relationship between the topography of the sealing plane after assembly. The effectiveness of the proposed method is validated by the examples of a flange surface and the cylinder head surface of an engine block cylinder. The results show that the proposed method can quickly measure the topography of the sealing surface and output the results as a 3D model, which meets the needs of the industrial field for surface topography measurement.

Key words holography; three-dimensional shape; measurement; point cloud; Poisson surface reconstruction; surface segmentation

OCIS codes 090.1995; 120.6650; 330.7326

1 引 言

密封平面在工业现场中有重要应用,如发动机的缸体缸盖结合面、法兰面等,其工作原理是通过两

个配对平面的接触及配合构成闭合的密封区域,从而实现密封的功能,因此密封平面的表面形貌及装配精度会直接影响其密封性^[1]。为此,许多学者纷纷基于重建模型研究密封平面表面形貌、装配精度

收稿日期: 2018-02-26; 修回日期: 2018-03-26; 录用日期: 2018-04-08

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划(15111103402)

* E-mail: defensec@tongji.edu.cn; ** E-mail: xiaobingzh@live.cn

与密封性之间的关系^[2]。然而,上述研究所用的模型多是基于局部测量数据或统计数据重建的,经常会出现重建模型与实际零件不符的情况^[3],这是由于测量技术水平的限制使得短时间内无法测量整个密封平面的表面形貌。

目前,机械零件表面形貌的测量方法有接触式测量和非接触式测量两类^[4-5]。在接触式测量中常用的方法有机械探针和三坐标测量机(CMM)等;在非接触式测量中常用的方法有光学探针法、扫描电子显微术以及激光扫描共聚焦显微术等。然而,上述方法均不适用于工业现场对密封平面表面形貌进行全局、高分辨率、经济高效的测量^[5]。数字全息测量技术具有非接触、无损伤、高分辨率以及处理迅速等优点,已成为物体表面形貌测量的新热点。随着技术的进步,数字全息测量技术的分辨率可以达到微米级,测量精度可以达到纳米级,测量视场可以达到厘米乃至分米级^[6],这基本满足了工业现场密封平面表面形貌的测量要求。目前,该技术已被用于发动机缸体缸盖结合面表面形貌的测量^[7]。在国内,许多学者纷纷基于数字全息测量技术来研究物体表面形貌的测量方法^[8-10],但他们的研究多局限于微小物体或局部小区域内表面形貌的测量,对较大视场或较大零件整个表面形貌的测量却鲜有文献介绍。为了扩大数字全息测量技术在工业现场的应用范围及提高密封平面表面形貌测量的水平,本文介绍了如何基于数字全息测量技术来实现密封平面表面形貌的测量。

测量结果的显示及输出是基于数字全息实现零件表面形貌测量的关键环节^[11],测量结果的显示及

输出形式决定着数字全息测量结果的应用范围及使用效率。在利用计算机描述物体表面三维形貌的全息测量结果时,最常用的算法有基于点云的算法和基于多边形面片的算法,其中基于点云的算法较为成熟,而基于多边形面片的算法目前尚不成熟^[11]。在利用三维模型模拟密封平面的密封性时需要连续的曲面模型,而点云却是离散的,如何将离散点云重建成满足要求的三维模型是一个关键的技术问题^[12];此外,如何测量装配后密封平面表面形貌间的配合关系是个技术难题,因为装配后密封平面间的区域是无法直接测量的。

针对上述问题,本文将数字全息测量技术与虚拟制造技术相结合,提出了一种密封平面表面形貌的测量及模型重建方法。

2 基于数字全息的表面形貌测量

2.1 表面形貌与密封平面的密封性

经机械加工获得的密封平面在微观状态下是粗糙的^[13],如图 1 所示。为了描述及归类零件的表面形貌,根据波长将表面形貌分为三类^[14]:粗糙度、波纹度和形状偏差。如图 2 所示,当传递系数为 50%时,波长小于 1 mm 的表面成分被认为是粗糙度,波长在 1~10 mm 之间的成分被认为是波纹度,波长在 10 mm 以上的成分则被看作是形状偏差。不同的表面成分对零件的功能具有不同的影响。以发动机缸体缸盖结合面为例,波纹度是影响其密封性的主要因素^[13]。因此,测量密封平面的表面形貌时必须满足波纹度特征的采样要求。

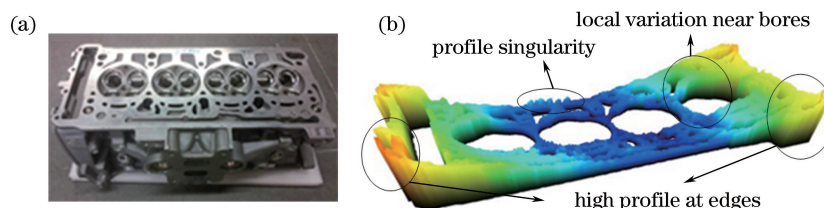


图 1 (a)缸盖结合面;(b)表面模型

Fig. 1 (a) Head deck face of cylinder head; (b) surface model

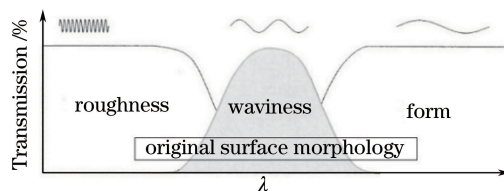


图 2 表面形貌的分类

Fig. 2 Classification of surface topography

2.2 数字全息测量技术

2.2.1 测量原理

为了保证密封平面的密封性,必须要严格控制其表面形貌^[2,13]。按照工业现场的要求,整个密封平面的起伏在 10~100 μm 之间,相邻形貌间的起伏在 4~10 μm 之间,因此应基于双波长数字全息测量技术测量密封平面的表面形貌^[9]。双波长数字全息测量技术通过 CCD 记录两束波长分别为 λ₁、λ₂ 的物光与参考光在 CCD 表面发生干涉的图样, CCD 表面的光强分布为

$$I_h(x, y) = |R_1|^2 + |O_1|^2 + |R_2|^2 + |O_2|^2 + R_1O_1^* + R_1^*O_1 + R_2O_2^* + R_2^*O_2, \quad (1)$$

式中: x, y 为全息面的坐标; R_1 和 R_2 为物光的复振幅分布; O_1 和 O_2 为参考光的光强; * 表示复共轭。CCD 记录的是离散化的全息图光强分布, 设 CCD 的像素大小为 $a_x \times a_y$, 像素的间隔为 d_x, d_y , 感光面积为 $L_x \times L_y$, 像素数为 $M \times N$, 则 CCD 记录的数字化全息图可以表示为

$$I_d(x, y) = \left[I_h(x, y) * \text{rect}\left(\frac{x_h}{a_x}, \frac{y_h}{a_y}\right) \right] \cdot \text{comb}\left(\frac{x_h}{d_x}, \frac{y_h}{d_y}\right) \text{rect}\left(\frac{x_h}{L_x}, \frac{y_h}{L_y}\right), \quad (2)$$

式中: x_h 和 y_h 分别为全息图的坐标; $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数; $\text{comb}(\cdot)$ 为梳状函数。

在 CCD 记录的全息图中, 每个像素记录的光场

强度 I_d 可通过傅里叶变换求得波长(频率)与测量高度 h 的对应关系^[14-15], 则(2)式可以改写为

$$I_d(h) = \left| \sum_{n=1}^N \exp[-i(\Phi_n - \varphi_n)] \right|^2 = \left| \sum_{n=1}^N \exp\left(-i \frac{4\pi f_n h}{c} + i\varphi_n\right) \right|^2 = N + 2 \sum_{n=1}^N \sum_{m>n}^N \cos\left[-\frac{4\pi h}{c}(f_n - f_m) + \varphi_n - \varphi_m\right], \quad (3)$$

式中: 合成相位 Φ 为两个波长相位之差, 即 $\Phi = 2\pi \frac{2h}{\lambda_1} - 2\pi \frac{2h}{\lambda_2} = \frac{4\pi h}{c}(f_1 - f_2) = \frac{4\pi h}{\Delta}$; φ 为包裹相位; c 为光速; f 为激光频率。基于峰值搜索算法^[6,15-16], 根据峰值的返回值确定表面形貌的相对高度 H :

$$H = \text{argmax}[I_d(h)]. \quad (4)$$

2.2.2 高分辨率测量系统介绍

高分辨率测量系统(HDM)基于数字全息测量技术来实现整个密封平面表面形貌的高速测量, 系统的构造如图 3 所示。该系统是基于 SHAPIX 表面侦测仪的光学器件改造升级而成的, 其激光器为可调谐半导体激光器, 波长可调范围为 770~850 nm; 该系统测量的视场范围为 300 mm × 300 mm, CCD 的分辨率为 2048 pixel × 2048 pixel, 在测量视场内分辨率可达 0.146 mm, 点云的采样密度约为 50 point/mm² (7 point/mm)。

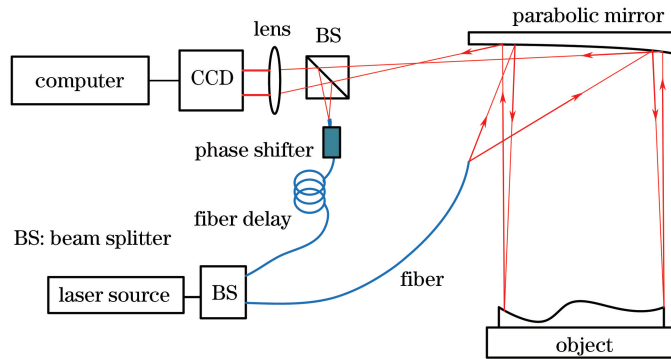


图 3 HDM 系统示意图

Fig. 3 Schematic of HDM system

2.2.3 密封平面表面形貌的测量

本节将基于 HDM 系统测量法兰面的表面形貌。法兰面的直径为 200 mm, 材料为高强度合金钢, 表面的质量要求为平面度小于 25 μm (0.0250 mm), 粗糙度 $R_a = 1.6 \mu\text{m}$ 。先利用粗糙度仪测量法兰的表面粗糙度, 在测得的粗糙度轮廓上, 相邻波峰波谷间的最大距离为 1.6 μm, 然后利用

CMM 测量图 4(a) 中划线处的波纹度轮廓, 依照 ISO 11562—1996 提取其波纹度轮廓, 如图 4(b) 所示, 该平面的波纹度轮廓的波长为 2~5 mm, 波幅为 4~10 μm, 在一个波纹度周期内 HDM 将采集 10~40 点, 这完全满足波纹度的测量需求。

本实验选用的激光波长范围为 770~781 nm。在实验过程中, 分别选取 8 种不同波长的激光来测

量法兰面的表面形貌,法兰面的再现像如图 5 所示。由图 6 可知,在进行全息再现时,每种波长对应的再现像上的最高点、最低点、平均值以及最高点与最低

点的差值均不相同,结合粗糙度及波纹度的测量结果可知,采用单波长测量法兰面时会受到包裹相位的限制,导致测量结果发生波动。

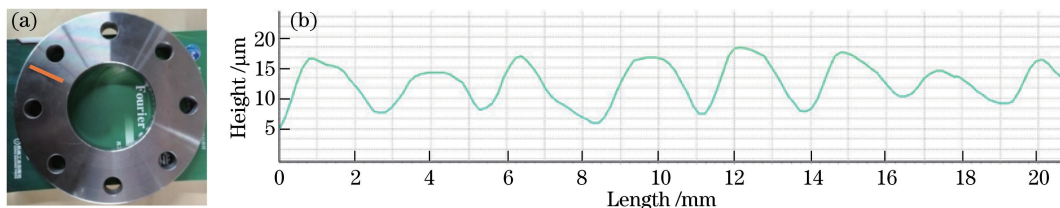


图 4 (a)法兰面;(b)图 4(a)中划线处的波纹度轮廓

Fig. 4 (a) Flange surface; (b) waviness profile along marked line in Fig. 4(a)

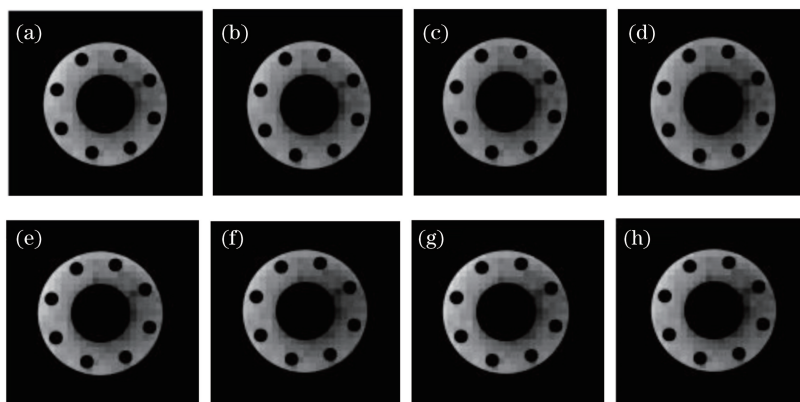


图 5 基于不同波长激光测量的法兰面的再现像。(a) 770.28 nm;(b) 770.51 nm;(c) 770.71 nm;
(d) 774.26 nm;(e) 777.87 nm;(f) 779.75 nm;(g) 780.51 nm;(h) 780.56 nm

Fig. 5 Reconstructed images of flange surface using different wavelengths of laser. (a) 770.28 nm; (b) 770.51 nm;
(c) 770.71 nm; (d) 774.26 nm; (e) 777.87 nm; (f) 779.75 nm; (g) 780.51 nm; (h) 780.56 nm

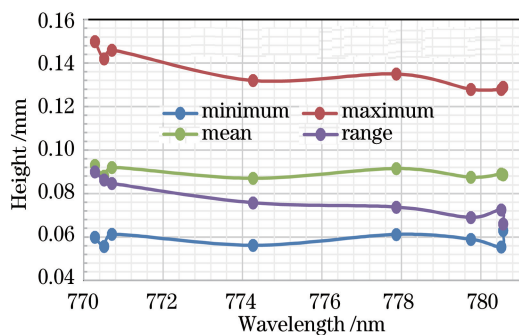


图 6 再现像上极值点的高度

Fig. 6 Height of extreme points in reconstructed images

本课题组尝试采用双波长方法来测量法兰面的表面形貌。为了研究不同的等效波长对测量结果的影响,设置多种波长组合(见表 1)。采用 770.51 nm 和 780.51 nm 激光进行双波长全息测量时,法兰面的全息图及相位图如图 7 所示。基于全息图计算被测对象的对应高度时,首先利用(3)式与(4)式计算 CCD 上某点处的对应高度,高度响应函数曲线如图 8

所示,该函数的最大值出现在“0”处,则 0 就是该点的高度值,图中其他处的极大值受多波长及系统噪声的影响;然后依次计算 CCD 上其他点的对应高度。由表 1 可知,当采用双波长全息测量时,所得的测量结果保留 3 位有效数字均为 0.119 mm,故其测量精度可以精确到微米级,较单波长测量的结果更加稳定,说明采用双波长测量时可以克服包裹相位的限制。

为验证 HDM 系统的测量精度,本课题组依据 GB/T 11337—2004 标准通过平面度指标来对比 HDM 系统与 SHAPIX 表面检测仪的测量精度,SHAPIX 平面度的测量精度为 $1 \mu\text{m}$ ^[16]。HDM 系统测得的法兰面的总平面度为 0.0187 mm,SHAPIX 的测量结果为 0.0186 mm,两者相对误差小于 1%。为了进一步验证测量精度,采用局部平面度来检验测量点云的精度,即将整个平面划分成 20 个小区域,分别计算每个区域的平面度,结果如图 9 所示。由上述平面度结果的比较可知,HDM 系统的测量精度可达 $1 \mu\text{m}$ 。

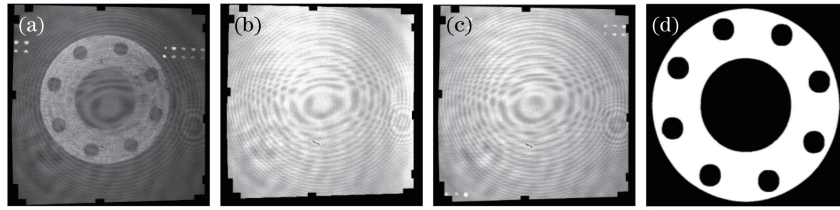


图 7 法兰面测量的实验结果。(a)全息图;(b) 770.51 nm 波长的相位图;
(c) 780.51 nm 波长的相位图;(d)法兰面的点云(正视图)

Fig. 7 Experimental results of flange surface measurement. (a) Hologram; (b) phase diagram at 770.51 nm wavelength;
(c) phase diagram at 780.51 nm wavelength; (d) point cloud of flange surface (front view)

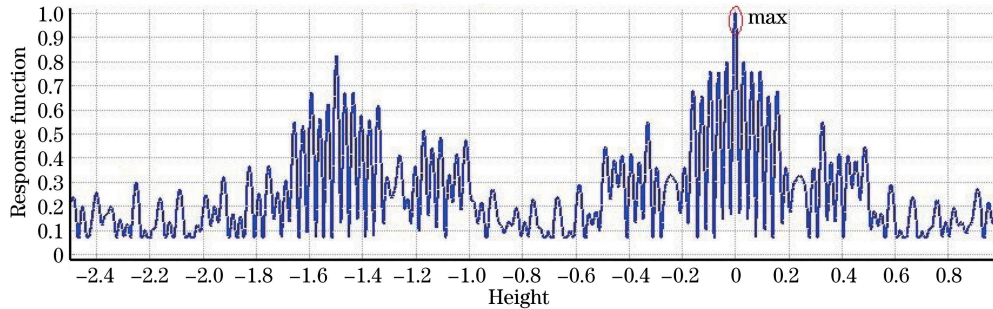


图 8 CCD 中某点处功率高度响应函数曲线

Fig. 8 Power height response curve at a point on CCD

表 1 双波长测量的结果

Table 1 Results of dual wavelength measurement

Wavelength 1 /nm	Wavelength 2 /nm	Equivalent wavelength / μm	Average distance between extreme points /mm	Standard deviation
770.51	780.51	60.14	0.1194	0.0002
770.51	774.26	159.09	0.1191	0.0006
770.51	777.87	81.43	0.1193	0.0005
774.26	777.87	166.83	0.1194	0.0009
774.26	780.51	96.69	0.1192	0.0005

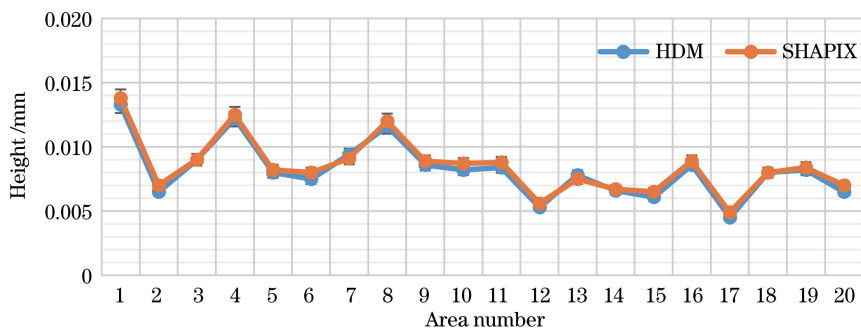


图 9 局部平面度的测量结果

Fig. 9 Measurement results of local flatness

3 密封平面表面形貌模型的重建

测量结果的显示及输出形式决定着数字全息测量结果的应用范围及使用效率。目前,许多学者都是基于 CAD\CAM\CAE 系统,利用三维模型来研

究密封平面表面形貌与加工工艺、密封性之间的关系,若 HDM 系统的测量结果能够直接以三维模型的形式输出,就会大大提高该系统在工业现场的使用效率。然而,基于多边形面片算法将密封平面表面形貌的测量结果直接生成三维模型的方法尚未成

熟,但是基于点云来重建三维曲面模型的方法已经成熟。基于点云的模型重建方法^[17-20]主要有基于多边形网格法、参数曲面重建法、隐函数法等。多边形网格法对噪声处理不理想,数据噪声处容易出现“褶皱”现象^[19],而参数曲面重建法具有计算过程复杂、重建曲面的光滑性差等缺点^[18],这两类方法不适于密封平面模型的重建。隐函数方法是用过原始数据点的隐函数来表示曲面,可以直接逼近重构表面^[18-19]。隐函数方法可分为全局隐式曲面重建法和局部隐式曲面重建法^[19],例如径向基函数法、 α -shape、泊松重建法等,其中泊松重建算法兼具全局隐式重建算法和局部隐式重建算法的优点。针对传统泊松算法过度圆滑的缺陷,Kazhdan等^[19]提出了基于筛选的泊松曲面重建算法,该算法大大提高了泊松算法在模型重建精度、非均匀点云处理、非封闭点云数据处理等方面的能力。参考文献^[19]中的建模实例,本课题组拟采用基于筛选的泊松曲面重建算法重建密封平面的三维模型。

由于模型的重建精度及细节保留程度取决于点云法向量估计的准确性^[21],因此,本课题组将根据密封平面的加工纹理及表面形貌的特征来研究点云法向量的估计方法。此外,由于密封平面上的点云是非封闭的,且带有孔洞,因此在进行泊松曲面重建时会产生大量无效曲面,这些无效曲面会将开放平面封闭起来^[18]。针对该问题,本课题组将通过适当的曲面分割方法来去除“无效曲面”。

3.1 点云法向量的估计

准确的法向量估计是运用泊松曲面重建算法精确重建密封平面模型的前提。对于法向量的估计方法主要有以下三种^[22]:基于局部表面拟合的方法、基于Delaunay/Voronoi的方法和基于鲁棒统计的方法。上述方法对边界处点的法向量估计精度较差^[23],Boulch等^[24]提出了基于随机霍夫变换的方法来估计边界处点的法向量,但该方法要求足够高的点云密度。

针对密封平面表面形貌的纹理特征(如图10所示),本课题组采用局部平面拟合法结合随机霍夫变换法来估计密封平面点云的法向量。首先基于局部表面拟合的方法^[22]计算点云中每个点 k -邻域内最小二乘意义上的局部拟合平面,并取该平面的法向量作为该点的法向量;然后基于随机霍夫变换法^[23]对属于不同加工面片上的法向量进行识别归类;最后确定全局法向量的方向,从而完成整片点云的法向量。估计点云法向量的步骤如下。

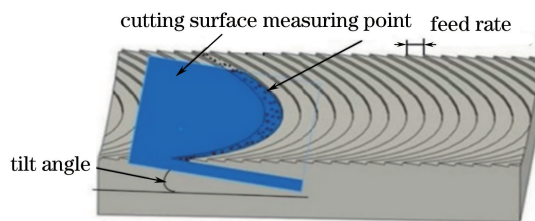


图10 机械加工平面纹理示意图

Fig. 10 Texture schematic of machined surface

1) 假设 N 个采样点 $p(p \in \mathbf{R}^3)$ 的邻域点集 $P: \{p_1, p_2, \dots, p_N\} \subset \mathbf{R}^3$, 设该点集的局部拟合平面 $H_n = \{p_n | \langle n, p_n \rangle - D = 0, p_n \in \mathbf{R}^3\}$, 通过最小化 $\sum_{n=1}^N (\langle n, p_n \rangle - D)^2$ 可得到该邻域点集内最小二乘意义上的局部拟合平面, 取其法向量 \mathbf{X}_i 为点 p_i 的近似向量。

2) 基于随机霍夫变换的法向量估计。首先将点云数据按照机械加工的纹理分布划分成 M 个小区块, 则小区块 $m \in \{1, 2, \dots, M\}$; 选取 T' 个小平面, 则小平面 $t \in \{1, 2, \dots, T'\}$, m 和 t 均满足独立分布; 当小平面的法向量与小区块的法向量共线时记 $Y_{(m,t)} = 1$, 否则记 $Y_{(m,t)} = 0$ 。令小平面的法向量与小区块的法向量共线的期望值是 Y_m , 则实验平均值 $\bar{Y}_m = \frac{1}{T'} \sum_{t=1}^{T'} Y_{(m,t)}$ 。为了平衡向量估计的精度和速度, 依据文献^[25]选取平面数量的最小值 $T'_{\min} \geq \frac{1}{2\delta^2} \ln \left(\frac{2M}{1-\alpha} \right)$, 其中 δ 为 Y_m 与 \bar{Y}_m 之差的最大值; 为避免对小区块进行重复计算, 设置信度 $\alpha = 0.95$ 。通过法向量估计的结果(如图11(a)所示)可清晰地地区分出不同切面片处的法向量。

3) 法向量的重新定向。通过2)得到的法向量没有统一的指向, 如图11(a)所示, 需要对其重新定向^[23,26]。设法向量初始点的位置角为 (θ, ϕ) , 以初始点的法向量为基准, 沿该点切平面的方向进行传播, 若相邻两向量的夹角为钝角, 则将法向量翻转。重新定向后的法向量如图11(b)所示。

3.2 基于点云数据的密封平面表面模型的重建

本节将基于筛选的泊松曲面重建算法^[19]重建密封平面的三维表面模型(下文简称模型)。在建模过程中, 为保证重建曲面能贯穿点云中的每个点, 要求点云中每个点相关 Kernel 内核的大小及宽度要根据采样密度自动调整^[19], 但这会导致孔洞等特征被光滑的曲面填充, 这些曲面被称为无效曲面。此外, 受 Dirichlet 边界条件约束, 密封平面的重建模型会被无效曲面密封成水密型结构, 如图12(a)所

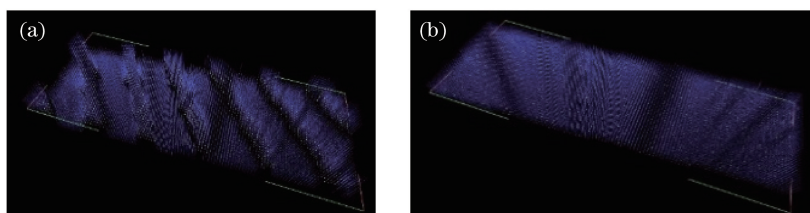


图 11 法向量估计结果。(a)未经定向;(b)重新定向

Fig. 11 Estimation results of normal vector. (a) Without orientation; (b) reorientation

示。对此可采用阈值分割法将无效曲面从重建模型中剔除,从而保留重建曲面,步骤如下。

1) 定义计算对象。在重建模型中存在着大量的无效曲面,且无效曲面上三角面的密度远大于重建曲面上三角面的密度,如图 12(b)所示。因此可将三角面的边长作为计算对象。假设重建模型上共有 Q 个三角面,则第 i 个三角面的边长集合 $A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}\}$ 。

2) 计算切割阈值。由于 HDM 测得的点云是基于均匀采样的,设三角面边长(点云间的距离)为切割阈值 T ,首先计算测量点云中相邻点的平均欧氏距离,即从测量点云中随机取 M 对相邻点,并计算样本点间的欧氏距离 d_j ;然后计算样本点间的平均欧氏距离 $\bar{d} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M [r'_j]$;设 $T = k\bar{d}$ 为重建曲面

与无效曲面的切割阈值,其中 k 为阈值调节系数。

3) 曲面分割,基于切割阈值将重建模型中的无效曲面剔除。设第 i 个三角面的最短边长为 $L_i = \min\{a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}\}$,当 $L_i < T$ 时,将该三角面标记为 1,否则标记为 0;剔除标记为 0 的三角面,保留标记为 1 的三角面,从而得到重建曲面,如图 12(c)所示。

3.3 重建模型的质量评价

为验证模型的重建精度,本课题组以拉线方式对重建模型进行取样抽检,分别选取重建模型(M)与测量点云(P)上对应位置的拟合曲线,通过观察两条拟合曲线的重合程度评价重建模型的精度。由如图 12(d)所示的拉线抽检结果可知,本课题组重建法兰面的三维模型能够准确保留其加工纹理,因此重建模型具有很高的重建精度,然而抽检的准确

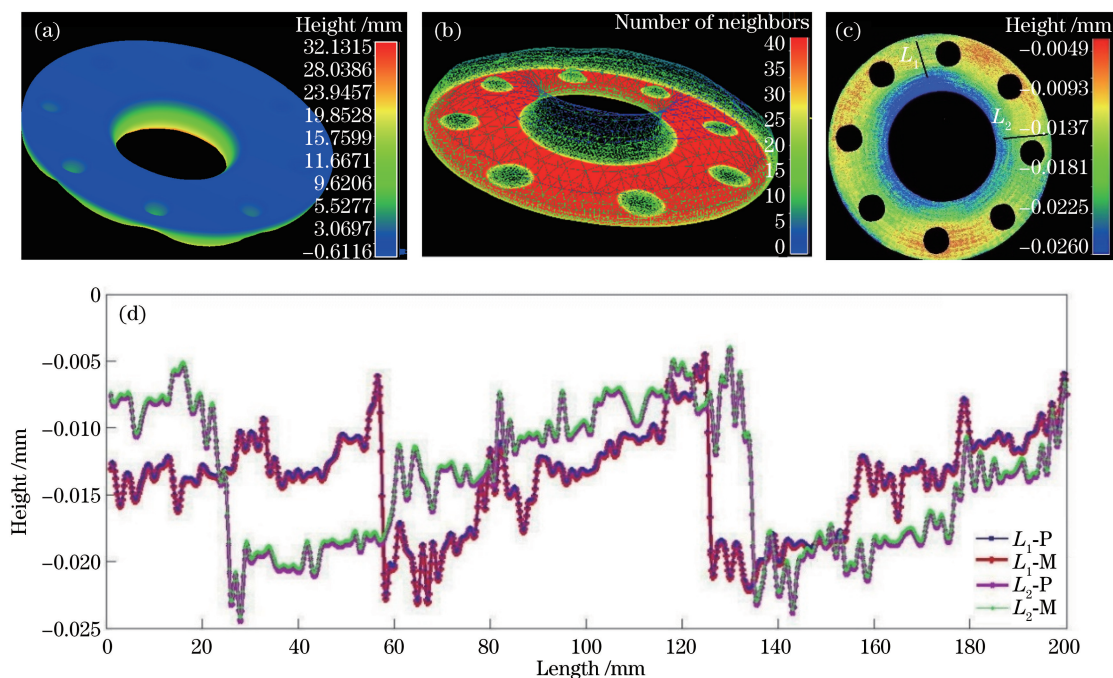


图 12 法兰面的重建模型。(a)重建泊松模型;(b)模型的线框图及密度;(c)重建模型;

(d)图 12(c)中沿线 L_1 与 L_2 的轮廓曲线

Fig. 12 Flange surface reconstructed models. (a) Reconstructed Poisson model; (b) wireframe and density of model; (c) reconstructed model; (d) contour curves along L_1 and L_2 in Fig. 12(c)

性因受采样区域及采样长度等影响而导致检测结果发生波动^[9]。为对模型的重建精度实现高效、全面的评价,受文献[27]的启示,本课题组采用平面度评定方法结合距离分布的方法对模型进行重建精度评价。

基于平面度对模型进行重建质量评价是针对单个零件模型的重建精度进行评价。依据 GB/T

11337—2004 标准,在平面度误差的评定方法中,最小包容区域法符合最小条件,其评定结果最准确且唯一。因此,本课题组采用最小二乘法求得基准面 S_{MZ} ,令在该平面方向上包容所有测量点的两平行平面之间的距离最小,如图 13 所示。本课题组将通过计算整个零件表面及不同区域的平面度来验证不同采样条件下模型的重建精度。

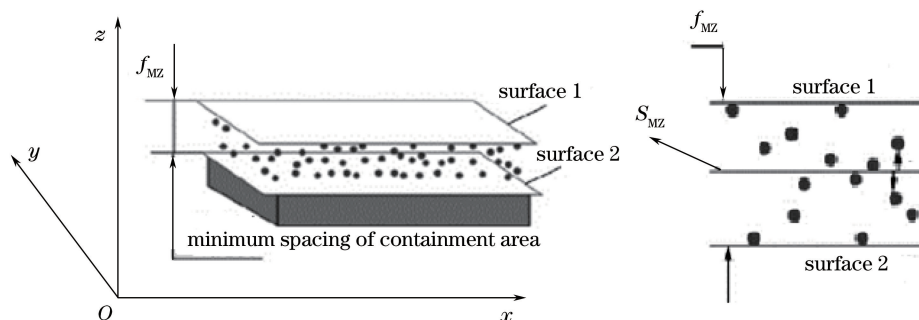


图 13 平面度误差评定示意图

Fig. 13 Schematic of flatness error assessment

通过模型间距离的分布来评价模型的重建质量主要是为检验两个重建模型的位置精度,并协同检验两个模型的重建精度。单凭平面度指标尚不能确定基准面 S_{MZ} 的位置及角度。通过重建模型间距离的分布来约束 S_{MZ} 的位置,进而提高模型重建质量评价的准确性。

4 发动机缸体缸盖结合面表面形貌的测量

密封平面的密封性取决于互相配对的两个密封平面表面形貌的配合关系,然而在装配后,密封平面

上表面形貌间的空间位置关系是无法直接测量的。若将数字全息测量技术与虚拟制造技术相结合便可间接测量装配后密封平面表面形貌间的配合关系,该方法的技术路线如图 14 所示,可分为以下三部分:第一,基于数字全息测量技术分别测量两个配对密封平面的表面形貌;第二,将测量结果转换成点云并进行点云处理;第三,基于点云重建装配后的密封平面模型。本节以某发动机的缸体缸盖结合面为例验证该方法的有效性,该发动机缸体缸盖结合面的加工精度要求是平面度小于 0.050 mm。装配定位采用一个定位销加两个定位套筒的定位方式。

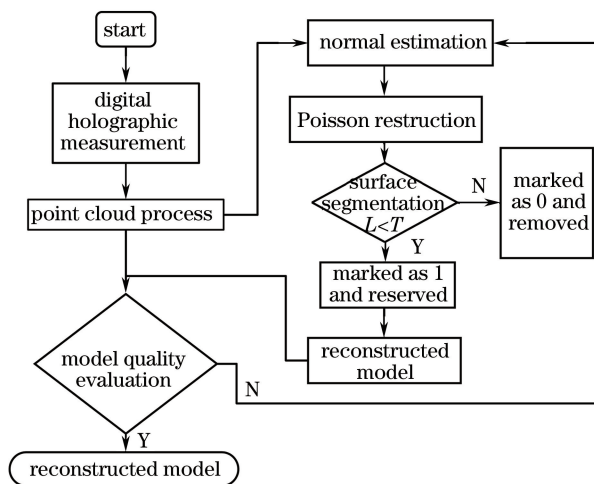


图 14 密封平面全息测量及模型重建流程图

Fig. 14 Flow chart of seal plane holographic measurement and model reconstruction

4.1 测量点云及点云处理

缸体缸盖结合面上表面形貌的测量过程与法兰面的测量过程类似。在利用 HDM 系统测量缸体缸盖结合面的表面形貌时,设激光波长为 785 nm 和 790 nm,则其合成波长约为 0.126 mm。测得的点云如图 15 所示,其中缸体缸盖结合面上表面形貌的高度值分别服从 $X_b \sim N(0.0393, 0.0627^2)$ 和 $X_h \sim$

$N(0.6150, 0.219^2)$ 的高斯分布,这符合机加工平面表面形貌的高度分布规律^[12]。由于发动机缸体缸盖的配合位置是由定位销及定位套筒等因素决定的,因此本课题组拟采用基于特征点的点云配准方法,即在测量时依据装配定位基准设置标记点(A、B、C),再以缸体为基准,以标记点为特征点完成点云配准,点云的配准过程如图 16 所示。

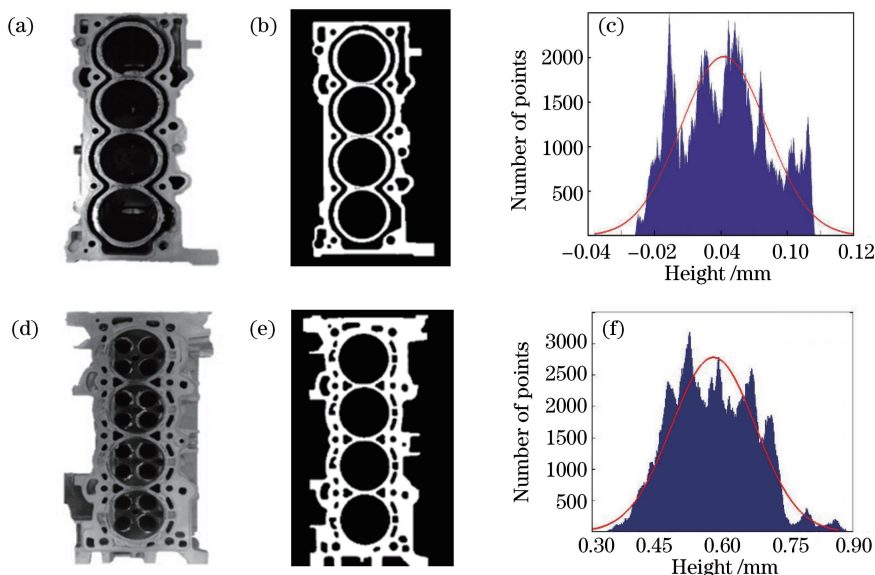


图 15 (a)缸体结合面;(b)缸体结合面的点云;(c)缸体结合面表面形貌的高度分布;

(d)缸盖结合面;(e)缸盖结合面的点云;(f)缸盖结合面表面形貌的高度分布

Fig. 15 (a) Head deck face of engine block; (b) point cloud of head deck face of engine block;

(c) height distribution of head deck surface of engine block; (d) head deck face of cylinder head;

(e) point cloud of head deck face of cylinder head; (f) height distribution of head deck surface of cylinder head

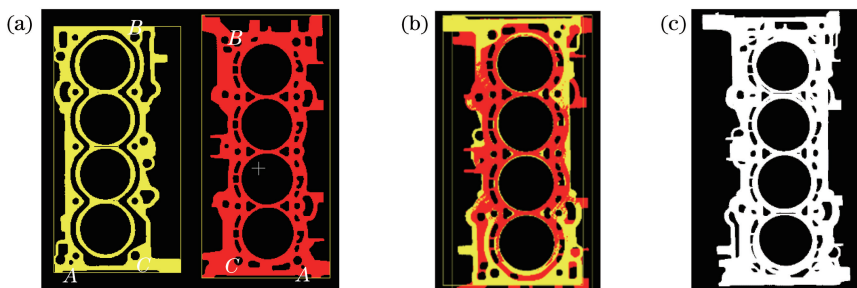


图 16 发动机缸体缸盖结合面点云配准过程。(a)原始位置;(b)初始配准;(c)配准后的点云

Fig. 16 Process of register point cloud of head deck faces. (a) Original position; (b) initial registration;

(c) registered point cloud

4.2 缸体缸盖结合面表面模型的重建

基于配准的点云重建缸体缸盖结合面配合模型的过程主要包括法向量估计、基于筛选的泊松曲面重建和曲面分割三部分。首先,在估计点云的法向量时,依据缸体缸盖结合面机加工工艺参数(进给量为 0.5 mm/r,刀盘的直径为 200 mm)以及点云的分辨率 150 μm ,利用 3.1 节的方法设

定点云的邻域值 K 为 9,选取平面的数量为 300;然后,基于筛选泊松算法重建缸体缸盖结合面的模型,其中定义八叉树的最大深度为 10,基函数 $n=8$;最后,将重建模型中的无效曲面剔除,依据均匀采样点云间距 150 μm ,选用阈值调节系数 $k=\sqrt{2}$,则分割阈值 $T=0.21$ 。重建的模型如图 17 所示。

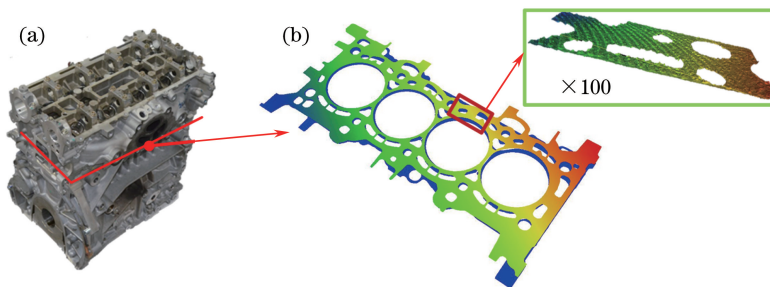


图 17 (a)发动机缸体缸盖的装配模型;(b)缸体缸盖结合面的三维模型

Fig. 17 (a) Assembly model of cylinder heads and blocks; (b) three-dimensional model of head deck face

5 测量效率及模型重建质量评价

5.1 建模质量分析

利用平面度评价模型的重建质量。通过对比重

建模型及测量点云的整体(A)平面度及4个缸口(G1~G4)处的局部平面度可知,两者误差均低于1%,如图18所示,这说明模型的重建精度较高。在平面度检测的基础上通过模型间距离的分布规律进

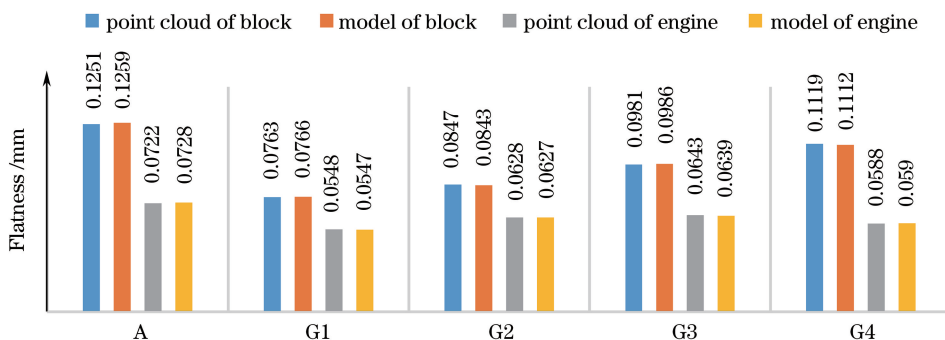


图 18 重建模型平面度与零件平面度的对比

Fig. 18 Flatness comparison between reconstruction model and parts

一步评价模型的重建质量。

由图19可知,重建模型上对应点间的距离分布与测量点云上对应点间距离的分布趋势一致,进一步说明重建模型具有较高的精度。此外,缸体缸盖

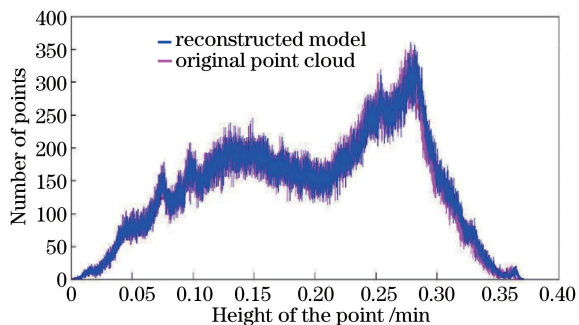


图 19 发动机缸体缸盖结合面上对应点间的距离分布

Fig. 19 Distance distribution between corresponding points on head deck faces of engine

结合面间距离的最大值与最小值的差为0.369 mm,大于缸体缸盖结合面的平面度之和0.199mm,说明装配定位方式对缸体缸盖结合面间的距离分布影响较大,因此在配准点云时必须考虑两片点云的空间位置与定位点的关系,这说明本课题组选用的点云配准方法是合理的。

5.2 效率分析

本实验是在配置为英特尔 i7 处理器(主频 2.6 GHz)、16 GB 内存、NVIDIA GTX960M 显卡的便携式计算机上完成的。

本课题组统计了表面测量、法向量估计、泊松曲面重建和曲面分割环节的时间消耗,结果如表2所示。整个密封平面测量及模型重建的时间消耗为2~5 min,基本可以满足装配线对密封平面装配质量及密封性在线检测的需求。

表 2 模型重建过程中的时间消耗

Table 2 Consumption of time during model reconstruction

Object	Number of points	Consumption time /s			
		Surface measurement	Surface reconstruction	Surface segmentation	Normal vector estimation
Flange surface	797072	40	25	13	19
Head deck face of cylinder head	1748360	51	49	28	20
Head deck face of engine block	1239582	50	36	24	13

6 结 论

基于数字全息测量技术实现了整个密封平面表面形貌的测量,并将其测量结果转化为三维模型。密封平面表面形貌测量效率、测量结果的可视化及模型的重建精度完全满足工业现场对密封平面加工质量在线检测的需求。将数字全息技术与虚拟制造技术相结合,解决了装配后密封平面上表面形貌间配合关系无法测量的问题。基于数字全息测量结果重建的三维模型可以模拟装配后密封平面间表面形貌的配合位置关系。

参 考 文 献

- [1] Davim J. Surface integrity in machining[M]. Berlin: Springer, 2012: 1-10.
- [2] Pérez-Ráfols F, Larsson R, Almqvist A. Modelling of leakage on metal-to-metal seals [J]. Tribology International, 2016, 94: 421-427.
- [3] Zhang X B, Liu H J, He Y N, *et al.* Analysis of sealing performance analysis of sealing path on the matched surfaces of cylinder head based on high definition metrology [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2017, 38(2): 146-150.
张小兵, 刘海江, 何燕妮, 等. 基于高精度测量的内燃机缸盖结合面密封路径的密封性能分析[J]. 内燃机工程, 2017, 38(2): 146-150.
- [4] Liu B, Feng Q B, Kuang C F. Survey of measurement methods for surface roughness [J]. Optical Instruments, 2004, 26(5): 54-58.
刘斌, 冯其波, 匡萃方. 表面粗糙度测量方法综述[J]. 光学仪器, 2004, 26(5): 54-58.
- [5] Chen X R, Cai P, Shi W K. The latest development of optical non-contact 3D profile measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(5): 528-532.
陈晓荣, 蔡萍, 施文康. 光学非接触三维形貌测量技术新进展[J]. 光学精密工程, 2002, 10(5): 528-532.
- [6] Aleksoff C, Yu H. Discrete step wavemeter [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7790: 77900H.
- [7] Nguyen H T, Wang H, Hu S J. Characterization of cutting force induced surface shape variation in face milling using high-definition metrology[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013, 135(4): 041014.
- [8] Kou Y L, Li E P, Di J L, *et al.* Surface morphology measurement of tiny object based on dual-wavelength digital holography [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209010.
寇云莉, 李恩普, 邸江磊, 等. 利用双波长数字全息术测量微小物体表面形貌[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209010.
- [9] Zeng Y N, Wang F, Lei H, *et al.* Surface profile measurement of microstructures based on dual-wavelength digital microscopic image-plane holography[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1009001.
曾雅楠, 汪飞, 雷海, 等. 双波长数字显微像面全息术测量微结构表面形貌[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1009001.
- [10] Deng L J, Huang X Y, Zeng L M, *et al.* Dual-wavelength image-plane digital holographic microscopy based on bi-color led chips [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0111004.
邓丽军, 黄星艳, 曾吕明, 等. 基于双色 LED 芯片的双波长像面数字全息显微术[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0111004.
- [11] Wang H. Digital holographic three-dimensional display and detection [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2013: 215-220.
王辉. 数字化全息三维显示与检测[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013: 215-220.
- [12] Qiu C. Theory and method of hybrid dimensional part surface modeling and its application in prediction of product assembly quality[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 20-28.
裘迪. 零件表面混合维建模理论、方法及其在产品装配质量预测中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2012:

- 20-28.
- [13] Suriano S, Wang H, Shao C, *et al.* Progressive measurement and monitoring for multi-resolution data in surface manufacturing considering spatial and cross correlations [J]. IIE Transactions, 2015, 47(10): 1033-1052.
- [14] Yi L. Extraction of 3D machined surface features and applications [D]. Michigan: The University of Michigan, 2010: 15-30.
- [15] Yu H, Aleksoff C, Ni J. Accuracy of a multiple height-transfer interferometric technique for absolute distance metrology [J]. Applied Optics, 2012, 51(21): 5283-5294.
- [16] Yu H. A multiple height-transfer interferometric technique and its applications [D]. Michigan: The University of Michigan, 2012: 10-35.
- [17] Zhang Y Y, Guo Q L, Yang D G, *et al.* Calculation method of damage parameters on high speed sliding electric contact component surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0504007.
张玉燕, 郭全丽, 杨德功, 等. 高速滑动电接触构件表面损伤参数计算方法 [J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0504007.
- [18] Kazhdan M, Bolitho M, Hoppe H. Poisson surface reconstruction [C] // Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2006: 61-70.
- [19] Kazhdan M, Hoppe H. Screened poisson surface reconstruction [J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(3): 1-13.
- [20] Estellers V, Scott M A, Soatto S. Robust surface reconstruction [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2016, 9(4): 2073-2098.
- [21] Wang X C, Cai J P, Wu Z K, *et al.* Normal estimation and normal orientation for point cloud model based on improved local surface fitting [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(4): 614-620.
王醒策, 蔡建平, 武仲科, 等. 局部表面拟合的点云模型法向估计及重定向算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(4): 614-620.
- [22] Li B, Schnabel R, Klein R, *et al.* Robust normal estimation for point clouds with sharp features [J]. Computers & Graphics, 2010, 34(2): 94-106.
- [23] Wang Y T, Feng H Y, Delorme F, *et al.* An adaptive normal estimation method for scanned point clouds with sharp features [J]. Computer-Aided Design, 2013, 45(11): 1333-1348.
- [24] Boulch A, Marlet R. Fast and robust normal estimation for point clouds with sharp features [J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(5): 1765-1774.
- [25] Hoeffding W. Probability inequalities for sums of bounded random variables [J]. Journal of the American Statistical Association, 1963, 58(301): 13-30.
- [26] Liu J, Cao J J, Liu X P, *et al.* Mendable consistent orientation of point clouds [J]. Computer-Aided Design, 2014, 55(5): 26-36.
- [27] Luo J, Wang Q, Fu L. Application of modified artificial bee colony algorithm to flatness error evaluation [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 422-430.
罗钧, 王强, 付丽. 改进蜂群算法在平面度误差评定中的应用 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 422-430.