

文章编号 1004-924X(2009)10-2431-09

锻压制件及其模具的三维光学测量系统精度评价

张德海, 梁 晋, 郭 成

(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: VDI2614/2634 是三维光学测量系统精度评价的通用方法。为制订国标《锻压制件及其模具光学三维几何量检测规范》, 提出了一种应用于锻压制件的光学测量系统精度评价新方法, 并制定了测量方案。以每组为一个子系统, 分别计算出每组的极差、平均差和标准差, 然后定义平均差和测量平均值的比值为子系统的系统相对误差, 定义极差和测量平均值的比值为子系统的偶然相对误差。综合考虑各子系统的相对误差和权重, 计算出测量系统的系统精度和偶然精度。为统一评价标准, 提出了标准系统精度、标准偶然精度和标准精度的概念和计算方法。利用此方法对自主开发的 XJ-TUOM 光学测量系统进行了评价, 得出其标准精度为 0.89 的结论, 该方法为锻压制件检测的国标制定提供了参考。

关键词: 光学测量; 精度评价; 标准精度; 锻压制件

中图分类号: TH74; TB92 **文献标识码:** A

Precision evaluation of 3D optical measuring system for forgings & stampings and its dies

ZHANG De-hai, LIANG Jin, GUO Cheng

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

Abstract: VDI2614/2634 is a kind of common method of precision evaluation for 3D optical measuring systems. In order to formulate a national standard named Measurement Specification of Optical 3D Geometry for Forgings & Stampings and Its Dies, a new evaluation method for optical measuring system imposed on forgings/stampings is proposed and the testing project is also drafted. With the evaluation, each group measuring value is considered as a single subsystem, and the minmax-difference, mean difference and the mean square value of each group are calculated. Then, the ratio of the mean difference to the measurement mean value is defined as the system-relatively error of subsystem and the ratio of the minmax difference to the measurement mean value is defined as the accident-relatively error of the subsystem. In consideration of the relatively error and weights completely, the system errors and accident errors of the measurement system are calculated. For the reunification of evaluation standard, the concept and the calculation method comprised of standardized system precision, standard accidental precision and standardized precision are put forward. The XJTUOM optical measuring system developed by ourselves has been evaluated by the proposed approach, then the standard preci-

收稿日期: 2008-10-24; **修订日期:** 2008-12-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50975219); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA04Z124); 江苏省科技支撑计划(工业部分)资助项目 (No. BE2008058)

sion of 0.89 is obtained, which provides a reference for formulating national standards.

Key words: optical measurement; precision evaluation; standardized precision; forgings & stampings

1 引言

随着我国制造业的快速发展,许多行业的产品大量采用了中大型和复杂曲面工件,特别是在汽车、飞机、船舶、军工、风电等行业中比较普遍。鉴于这种情况,国家也越来越重视大中型工件制造及其相关技术与设备的研发工作。

目前,对于 $<1\text{ m}$ 长度工件的三维尺寸质量检测,多采用三坐标测量机、关节臂、激光扫描仪等完成,基本不存在问题。而对于 $1\sim 30\text{ m}$ 长度的工件,如大型机械设备等各种大型铸件、锻件,多采用龙门式三坐标机、激光跟踪仪、关节臂、经纬仪等设备的检测,存在繁琐的移站问题,要全方位测量中大型工件^[1-2]非常繁琐,测量设备昂贵,一般企业无法承受。

从2000年开始,国际上便携式移动光学三维坐标系统逐渐应用于中大型复杂工件的质量检测^[3-4],解决了中大型工件全尺寸检测的难题,性价比较好,便于推广使用,国内也在推广采用该技术。但是目前由于缺少相关的技术标准,企业应用的并不规范。国际上德国和日本等国都有了暂行标准可以借鉴,而我国的制造业(尤其是锻压模具行业)迫切需要制定自己的光学三维工业测量检测标准,提升我国制造业的技术水平,同时规范企业的产品生产、质量检测、国内外贸易等行为。

西安交通大学模具与先进成形技术研究所承担了国标《锻压制件及其模具光学三维几何量检测规范》的制定工作,在日常实验中基于VDI2614/2634标准,以锻压制件及其模具为对象,提出了正确评价光学测量系统精度的新方法,该项工作对于指导实验算法的创新改进,定量评价测量系统并对国外和国内不同的测量系统进行比较分析,具有极大的理论意义和实用价值。

2 德国 VDI/VDE 2634 标准对于光学测量系统的评价^[5]

VDI/VDE2634 是德国工程师协会起草的光学测量系统检测标准。衡量指标主要是围绕长度来诠释判定。长度测量误差、球面误差、探测误差、球体空间误差和平面测量误差都是以 mm 来计算的,并有相应的误差范围供选择(图1)。

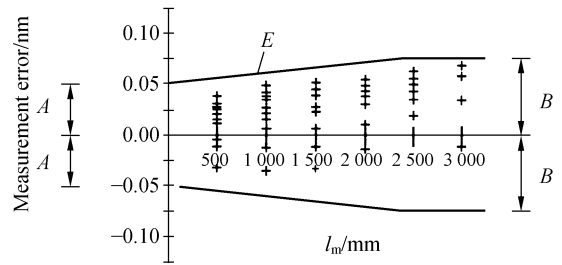


图1 长度测量误差排列

Fig. 1 Array of length measurement errors

2.1 长度测量误差和质量参数定义

测量是将被测物理量与选作标准单位的同类物理量进行比较的过程,即以确定量值为目的的一组操作。三维的长度测量误差值等于两点间的测量值和校准值之差,质量参数取决于所测量的长度值,参照允许范围内的操作环境和测量方式得出:

$$\Delta l = l_m - l_k, \quad (1)$$

$$E = A + K \quad L \leq B. \quad (2)$$

式中: Δl 为长度测量误差, l_m 为长度测量值, l_k 为长度校准值, E 为长度测量误差的偏差值, A 为 E 的最小偏移量, B 为 E 的最大偏移值, K 为常量, L 为待测长度。

2.2 基于哑铃的球径探测误差和球间距误差

探测误差是测量点到最佳球面的径向距离,是基于区域扫描的光学三维测量系统在小部分测量体内的特征误差(图2),误差^[6]大小取决于各种因素(如数字误差、相位测量误差、像素和图像

坐标测量误差、横向结构决议等)。球体间距误差由测量值和校准值的两个球体的中心点的距离决定,要在整个测量体内确定,通过 7 种不同位置的采样决定,推荐使用图 3 的排放规则。

$$\begin{cases} L_p \geq 0.3 \times L_0 \\ 0.1 \times L_0 < D_p < 0.2 \times L_0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: L_p 为哑铃球的球间距, D_p 为哑铃的球径, L_0 为包围着测量体的最小立方体的体对角线。

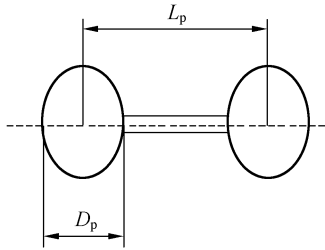


图 2 哑铃状结构简图

Fig. 2 Structure diagram of dumbbell

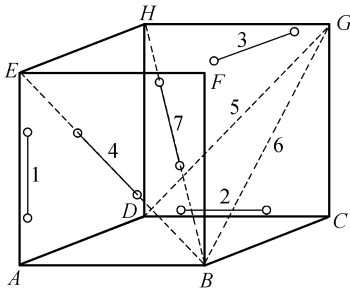


图 3 推荐的哑铃放置结构

Fig. 3 Recommended placement of dumbbell

2.3 平面测量精度

平面测量^[7]误差,是测量点到最佳平面的距离,最佳平面由最小二乘法计算得到。使用长方体来确定平面测量误差,材料为陶瓷,钢,铝或其

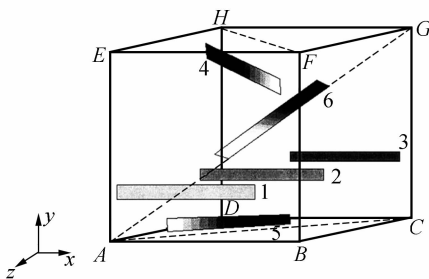


图 4 推荐的平面测量放置结构

Fig. 4 Recommended placement of plane measurement

他合适的平面散射材料(非容积散射)。该长方体要求宽度平行,至少应为 50 mm,其长度不得少于 $0.5L_0$ 。测试表面本身的平整度误差须少于确定精度的 1/5,摆放规则推荐使用图 4。2.2 使用的哑铃球和本节提到的长方体均为几何尺寸已知的标准件。

3 标准系统精度和标准偶然精度的提出

由式(1)~(3)可以看出,VDI2614/2634 标准侧重于长度方向的测量,对于在单个方向、整体拟合方面有较高要求,但是忽视了系统误差和偶然误差的精度,对于在多次测量使用统计规律得出结论,评价系统鲁棒性方面做的不够全面^[8]。

针对锻压制件及其模具的实际情况,结合企业生产现场和光学测量系统本身的工作原理和使用方法,参考 VDI2614/2634 和 GB/T 12979-91 近景摄影测量规范,本文提出一个较为可行,能在较短时间内全面评价锻压制件及其模具三维几何量检测规范的光学测量系统精度的方法。基于统计学原理,制定了能够全面测量系统的方案和准则。通过计算,最终得出一个数值作为系统的测量精度,此数值可以作为评价系统精度优劣的依据。

3.1 标准系统精度和标准偶然精度的计算方法

假设某一系统使用不同的方案组 $y_m (m=1, 2, \dots, l)$ 作精度测试,以每组测量值作为一个子系统,每组的测量物理量有 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 个组成,分别对其作多次等精度独立测量,以 mm 为有效单位,确保测量所得数值都真实有效,得出算术平均值:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4)$$

由贝塞尔法得,每组测量标准差估计值的贝塞尔公式^[9]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}. \quad (5)$$

由 m 组方案,它们的方差为 $\sigma_m^2 (m=1, 2, \dots,$

l), 得出^[10]:

$$p_1 : p_2 : \dots : p_m : \dots : p_l = \frac{1}{\sigma_1^2} : \frac{1}{\sigma_2^2} : \dots : \frac{1}{\sigma_m^2} : \dots : \frac{1}{\sigma_l^2}, \quad (6)$$

式中: p_m ($m=1, 2, \dots, l$) 为对应 y_m ($m=1, 2, \dots, l$) 的权。对于一组观测值, 其权之比等于相应方差倒数之比, 这就表明, 方差越小, 其权越大, 或者说, 精度越高, 其权越大。权可以作为比较观测值之间精度高低的指标。

将每组测量值按照数值大小筛选出最大值 $\max(x_m)$ 和最小值 $\min(x_m)$, 得出:

$$x_m^{\text{jc}} = \max(x_m) - \min(x_m), \quad (7)$$

式中: x_m^{jc} ($m=1, 2, \dots, l$) 为第 m 组的极差。

将测量平均值减去模型真值并取绝对值, 得出平均差 x_m^{pc} ($m=1, 2, \dots, l$):

$$x_m^{\text{pc}} = \text{ABS}(\bar{x}_m - x_m^{\text{zhen}}), \quad (8)$$

式中: \bar{x}_m ($m=1, 2, \dots, l$) 为第 m 组的平均值, x_m^{zhen} ($m=1, 2, \dots, l$) 代表第 m 组测量物体的真值。

将极差和平方差分别单独除相应组的测量平均值, 得出:

$$\left. \begin{aligned} y_m^{\text{sysr}} &= \frac{x_m^{\text{pc}}}{x_m} \\ y_m^{\text{oulr}} &= \frac{x_m^{\text{jc}}}{x_m} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

式中: y_m^{sysr} ($m=1, 2, \dots, l$) 表示第 m 组的系统相对误差, 为子系统的系统相对误差, y_m^{oulr} ($m=1, 2, \dots, l$) 表示第 m 组的偶然相对误差, 为子系统的偶然相对误差。

对于整个系统, 综合考虑各子系统评价指标和权重, 把待测系统作为一个系统, 提出:

$$\left. \begin{aligned} \chi_z^{\text{sysr}} &= \frac{\sum_{m=1}^l (y_m^{\text{sysr}} \cdot p_m)}{\sum_{m=1}^l p_m} \\ \chi_z^{\text{oulr}} &= \frac{\sum_{m=1}^l (y_m^{\text{oulr}} \cdot p_m)}{\sum_{m=1}^l p_m} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

式中: χ_z^{sysr} 代表测量系统的系统相对精度, χ_z^{oulr} 代表测量系统的偶然相对精度。

为了对不同的待测物体的精度做对比, 统一考虑到一个标准, 提出归并到 1 m 长度来计算比

较, 得出:

$$\left. \begin{aligned} \chi_{\text{st}}^{\text{sysr}} &= 1\,000 \times \chi_z^{\text{sysr}} \\ \chi_{\text{st}}^{\text{oulr}} &= 1000 \times \chi_z^{\text{oulr}} \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

式中: $\chi_{\text{st}}^{\text{sysr}}$, $\chi_{\text{st}}^{\text{oulr}}$ 分别定义为光学测量系统的标准系统精度和标准偶然精度(无量纲), 为每米数值上的毫米精度。

3.2 标准精度的计算方法

考虑测量不确定度一般包含若干个分量, 其中一些分量(A类)可用统计方法(如贝塞尔法、最大误差法、最大残差法、极差法和最小二乘法等)评定, 并可用实验标准差 s_i 表征, 其它分量(B类)只能基于经验或其它信息做评定, 可由假设分布的置信因子及估计的误差限, 求得近似标准差 u_j , A类分量和B类分量的合成仍应按方差合成原理进行^[11], 即,

$$\sigma_{\text{hecheng}} = \sqrt{\sum s_i^2 + \sum u_j^2 + \beta}, \quad (12)$$

其中, β 为协方差项, 即任意两误差间协方差之和。由于相关系数的计算非常麻烦, 应尽可能避开它的计算。设有两个误差 σ_1, σ_2 , 它们合成后得出:

$$\sigma_{12} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\rho_{1,2}\sigma_1\sigma_2}, \quad (13)$$

式中, $\rho_{1,2}$ 为相关系数, 当两误差完全相等时, $\rho=1$; 当两误差不相等时, $\rho=0$ ^[12]。综合式(10)、(12)得出:

$$\chi_{\text{st}}^{\text{sys}} = \sqrt{(\chi_{\text{st}}^{\text{sysr}})^2 + (\chi_{\text{st}}^{\text{oulr}})^2 + 2\rho_{\text{st}}^{\text{sysr,oulr}} \chi_{\text{st}}^{\text{sysr}} \chi_{\text{st}}^{\text{oulr}}}, \quad (14)$$

式中, $\chi_{\text{st}}^{\text{sys}}$ 为测量系统的标准精度, 为每米数值上的毫米精度, $\rho_{\text{st}}^{\text{sysr,oulr}}$ 为相关系数。

4 精度评价方法的组成

4.1 单幅面扫描精度

以扫描一次所能覆盖的物体特征为准, 验证系统的一次扫描精度。

(1) 以单个圆球为对象(如图 5), 一次扫描, 在后处理软件 Imagewave 中求出球径^[13](如图 6), 计算探测误差;

(2) 以因瓦合金标尺为对象(如图 7), 只包含两端的两个标志点, 检测标志点的间距, 计算长度测量误差;



图 5 单个圆球

Fig. 5 Single pellet

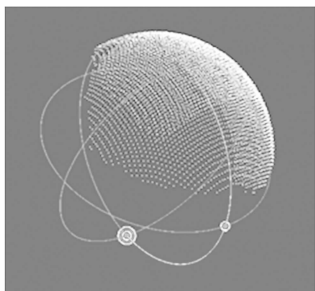


图 6 Imagewave 拟合的球

Fig. 6 Draft sphere fitted by Imagewave



图 7 因瓦合金标尺

Fig. 7 Standard-ruler of Yin-wa alloy

(3)以双哑铃球为(如图 2)对象,一次扫描,测量球间距误差。

4.2 单幅面拼接精度,验证系统的拼接性能

以单个哑铃球(如图 5)为对象,从 5 个不同的角度拍摄物体,以物体为圆心环绕均分 72° ,在后处理软件 Imagewave 中对点云合并(merge)后,求出球径。

4.3 单幅面联合摄影测量的精度测试

(1)摄影测量软件测量计算标定板上编码点之间的距离,编码点数字已经知道,测量其对角线距离和平面测量误差;

(2)在间隔约 2 m 距离,放置两个哑铃球,先使用摄影测量计算出标志点,扫描 7 次直接拟合求出球径,求出球间距的偏差,极差。

4.4 两种标定结果精度测试

所有方案按照水平标定和垂直标定两种结

果,重复 4.1~4.3。

4.5 三种扫描姿态精度测试

对于扫描姿态是否随测量头角度呈现线性和非线性变化,是否恒定不变,扫描时要求在水平扫描、 45° 扫描、垂直扫描 3 种姿态进行测试,结合标定结果组合测试,重复 4.1~4.4,共有 6 次循环。

5 实验数据及精度处理相关性分析

根据上述精度评价方法和试验流程,以西安交通大学模具与塑性加工研究所自主开发的 XJTUOM 三维光学面扫描系统(图 8)为测量对象,结合自主开发的 XJTUDP(图 9)摄影测量系统,单次扫描幅面 $400\text{ mm} \times 300\text{ mm}$,以水平标定,水平扫描为状态,安排得出试验数据。考虑软件对测试方案中物体几何形状描述的数学意义和测量精度舍入误差的需要,表 1 中所得数值的小数点位数保留到三位;考虑光学测量的物理意义和工程价值,最终的标准系统精度、标准偶然精度和标准精度的计算结果保留两位小数,实际计算过程中采用保留 4 位小数,根据式(4~9),得出表 1。



图 8 XJTUOM 的硬件组成

Fig. 8 Hardware of XJTUOM



图 9 XJTUDP 硬件组成

Fig. 9 Hardware of XJTUDP

表 1 水平标定水平扫描试验数值表格

Tab. 1 Experimental data of horizontal calibration and scanning

测量次数	单幅面扫描			单幅面拼接		单幅面联合摄影测量	
	单个哑铃球	因瓦合金标尺	双哑铃球间距	单个哑铃球	标定板上编码点距离	大距离哑铃的球心距	
1	9.938	220.912	172.479	10.024	320.378	1 977.177	
2	9.936	220.909	172.489	9.956	320.366	1 977.278	
3	9.941	220.911	172.493	9.995	320.372	1 977.241	
4	9.943	220.908	172.498	10.01	320.367	1 977.294	
5	9.948	220.906	172.503	10.028	320.381	1 977.301	
6	9.942	220.909	172.492	9.997	320.371	1 977.265	
7	9.942	220.911	172.579	10.012	320.336	1 977.251	
8	9.956	220.908	172.580	10.003	320.342	1 977.288	
9	9.942	220.906	172.580	10.003	320.349	1 977.23	
10	9.952	220.909	172.579	10.024	320.377	1 977.233	
\bar{x}	9.944	220.908	172.527	10.006	320.363	1 977.256	
σ	0.006	0.002	0.045	0.021	0.016	0.037	
x^{jc}	0.019	0.006	0.100	0.072	0.045	0.124	
x^{zhen}	10.001	221.001	172.575	10.001	320.291	1 977.018	
x^{pc}	0.057	0.092	0.047	0.004	0.072	0.237	
y_m^{sysr}	0.006	4E-4	3E-3	5E-4	2E-4	1E-4	
y_m^{our}	0.002 0	2.72×10^{-5}	0.000 6	0.007 2	0.000 1	6.27×10^{-5}	
p	27 216.562	243 902.4	484.112	2 271.942	3 959.699	705.683	

表中： \bar{x} 代表平均值， σ 代表标准差， x^{jc} 代表极差， x^{zhen} 代表真值， x^{pc} 代表平均差， y_m^{sysr} 代表组系统相对误差， y_m^{our} 代表组偶然相对误差， p 代表表权。

根据表 1 和式(10)计算得出测量系统的系统相对精度 χ_z^{sysr} 为 0.000 937，偶然相对精度 χ_z^{our} 为 0.000 277，根据式(11)计算得出测量系统的标准系统精度 χ_{st}^{sysr} 为 0.94，标准偶然精度 χ_{st}^{our} 为 0.28。

对表 1 中测量平均值与极差、平均差、标准差作相关性分析，得图 10。从图 10 可以看出，标准差始终小于极差和平均差，测量数值 < 328 时，极

差大于平均差，测量物体数值 > 328 时，平均差开始大于极差，且随着数值的增大也趋于增大，说明随着数值加大，系统误差的增加幅度要高于偶然误差的增加幅度，拼接精度小于单幅面扫描精度，系统的鲁棒性降低。测量平均值与系统相对误差和偶然相对误差做分析，得图 11。从图 11 可以看出，随着测量数值的增大，系统相对误差和偶然相对误差均呈现明显减小的趋势，说明系统对于

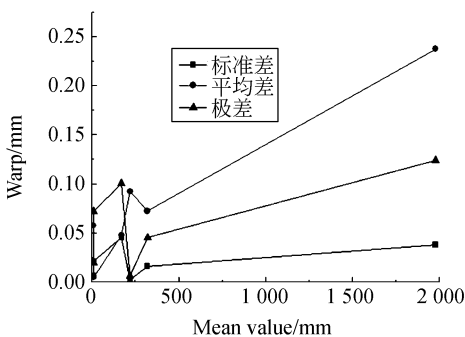


图 10 偏差与测量平均值分布

Fig. 10 Distribution of warp and mean value

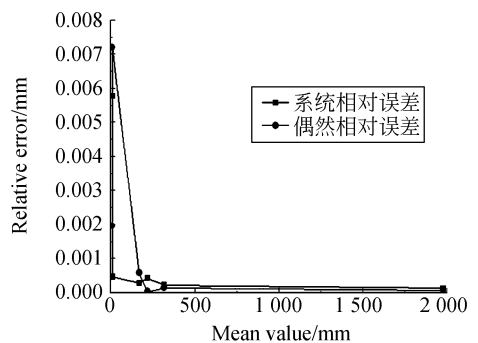


图 11 相对误差与测量平均值分布

Fig. 11 Distribution of relatively error and mean value

大尺寸物体的检测精度要优于小尺寸物体。系统相对误差和偶然相对误差作线性相关性分析,得到图 12。从图 12 可以看出,系统相对误差和偶然相对误差两者没有必然的联系,是不相关的、非线性的。

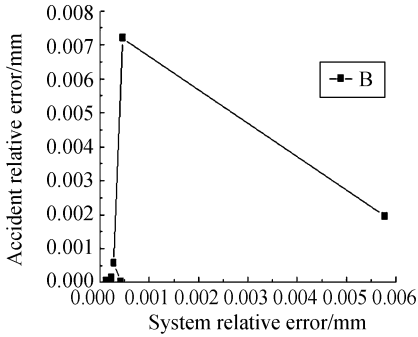


图 12 系统相对误差与偶然相对误差相关性

Fig. 12 Relation of system relative error and accident relative error

由式(14)可得,当两误差不相关时, $\rho_{st}^{sys, oul} = 0$ 。将两者合成得:

$$\chi_{st}^{sys} = \sqrt{(\chi_{st}^{sys})^2 + (\chi_{st}^{oul})^2} = 0.89,$$

即此光学测量系统的标准精度为 0.89。

6 应用实例

利用该测量规范对国内某公司的大型水轮机叶轮毛坯(2 000 mm×2 500 mm×600 mm),进行了现场拍摄,图 13 为粘贴标志点的叶片,图 14 为使用摄影测量软件自动匹配点云,图 15 为在 Geomagic studio 中处理点云,得出数模后,输入 Geomagic Qualify,与 CAD 数模对齐后进行对比分析^[14],红色代表正偏差,绿色代表负偏差。从图 15 可以看出,叶轮毛坯和 CAD 数模绝大部

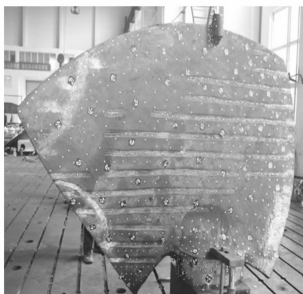


图 13 粘贴标志点的叶轮

Fig. 13 Impeller vane stucked by symbol points

分区域重合较好,偏差在 4.625 mm 之内,局部偏差为 0。根部局部偏差较大,约在 15.5 mm 左右,在叶片后续的精加工中偏差将作为切削余量去除,并保证叶片尺寸精度,证明叶轮完全可以满足工业现场的使用。

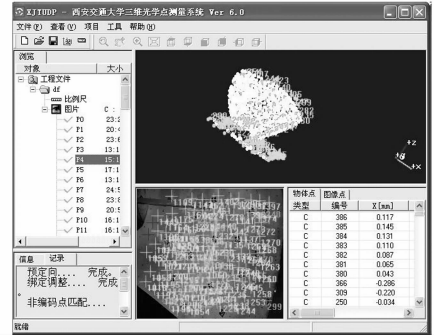


图 14 XJTUDP 点云匹配的叶轮模型

Fig. 14 Impeller model of point matching in XJTUDP

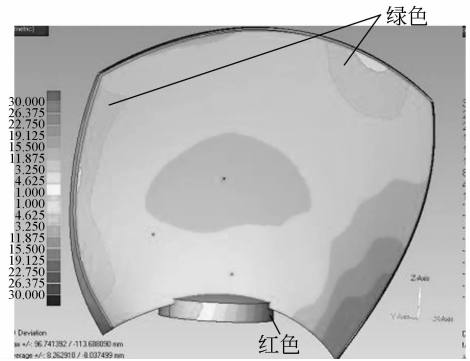


图 15 Geomagic Qualify 中与数模对比的叶轮

Fig. 15 Impeller compared with CAD model in Geomagic qualify

7 结论

本文提出了国标《锻压制件及其模具三维几何量检测规范》光学测量系统标准系统精度、标准偶然精度、标准精度的概念和计算方法。对自主研发的 XJTUOM 光学面扫描系统进行了测试,得出其标准系统精度为 0.94,标准偶然精度为 0.28,标准精度为 0.89 的结论。以水轮机叶片为对象实施精度评价,证明了此方法的可行性。

参考文献:

- [1] 王立鼎, 姜志峰, 王晓东, 等. 超精密渐开线齿形的测量方法[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(6): 980-985. WANG L D, LOU ZH F, WANG X D, *et al.*. Measuring methods of ultraprecision involute tooth profile[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 980-985 (in Chinese)
- [2] 田庆国, 葛宝臻, 杜朴, 等. 基于激光扫描的人体特征尺寸测量[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(1): 84-88. TING Q G, GE B ZH, DU P, *et al.*. Measurement of human figure size based on laser 3D scanning[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 40-44. (in Chinese)
- [3] YU Y L, ZHAO H X. A novel demodulation scheme for fiber Bragg grating sensor system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(1): 166-168.
- [4] CAUCHETEUR C, WUILPART M, BETTE S. Wavelength dependency of degree of polarization for uniform Bragg grating written into polarization maintaining optical fibers[J]. *Optical Communications*, 2005, 20(247): 325-333.
- [5] 德国工程师协会标准 VDI/VDE 2634 Blatt 1-2002 [S]. Germany engineer institute standard VDI/VDE 2634 Blatt 1-2002[S].
- [6] 贾红辉, 常胜利, 杨建坤, 等. 单次散射近似研究非视线光传输中的误差[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(1): 40-44. JIA H H, CHANG SH L, YANG J K, *et al.*. Study on error of non-line-of-sight light propagation by single-scattering model[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 40-44. (in Chinese)
- [7] 叶松, 方勇华, 洪律, 等. 空间外差光谱仪系统设计[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(6): 959-964. YE S, FANG Y H, HONG L, *et al.*. System design of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 959-964. (in Chinese)
- [8] KIM Y H, CHO J R, JEONG H S, *et al.*. A study on optimal design for CONFORM process[J]. *Journal of Materials processing Technology*, 1998, (80-81): 671-675.
- [9] 肖明耀. 实验误差估计与数据处理[M]. 北京: 科学出版社, 1980. XIAO M Y. *Estimation of Experimental Error and Data Processing* [M]. Beijing: Science Technology Press, 1980. (in Chinese)
- [10] 喻国荣. 论测量平差中的权和权阵[M]. 北京: 测绘通报, 2007. YU G R. *On Weight and Weight Matrix in Surveying Adjustment* [M]. Beijing: Mapping Public Paper, 2007. (in Chinese)
- [11] 李化平. 物理测量中的误差评定[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993. LI H P. *Error Evaluation During Physics Measuring* [M]. Beijing: High Education Press, 1993. (in Chinese)
- [12] 王岩, 隋思涟, 王爱青. 数理统计与 MATLAB 工程数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. WANG Y, SUI S L, WANG A Q. *Statistics and Engineering Data Analysis of MATLAB* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
- [13] 单岩, 谢斌飞. Imagewave 逆向造型应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. SHAN Y, XIE B F. *Reapplications Instances of Imagewave* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
- [14] 解则晓, 张梅凤, 张志伟. 全场视觉自扫描测量系统[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 189-193. JIE Z X, ZHANG M F, ZHANG ZH W. Full field of view laser scanning system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(11): 189-193. (in Chinese)

作者简介:



张德海(1973—),男,河南新乡人,机械工程师,博士研究生,1997年于郑州工业大学获得学士学位,2006年于西安交通大学获得硕士学位,主要研究方向为三维光学测量和板料成型。E-mail: zhangdehai0318@163.com

作者副导师:



梁 晋(1968—),男,河南郑州人,副教授,博士,博士生导师,分别于1990年、1993年、2001年于西安交通大学获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为三维光学检测技术。E-mail: liangjin@mail. xjtu. edu. cn

作者导师:



郭 成(1948—)男,山东潍县,教授,博士,博士生导师,分别于1975年、1981年、1999年于西安交通大学获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为冲压件质量控制与模具 CAD/CAE/CAM/PDM、金属材料近净成形和先进材料制备与成形过程控制方面的研究。E-mail: guocheng@mail. xjtu. edu. cn

●下期预告

FBG 旁瓣对复用解调结果的影响分析及其实验

陈伟民,张娅玲,章 鹏,张 亮

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室 光电工程学院,重庆 400044)

为了解决光纤光栅传感器性能蜕化对复用解调结果的影响,基于 FBG 应变传感器的解调原理,分析了光纤布拉格光栅串联复用反射谱旁瓣对解调结果的影响。通过理论推导及模拟仿真,发现 FBG 传感器性能蜕化时存在反射谱的带宽变大、峰值降低以及旁瓣增大等现象,并且详细分析了反射谱旁瓣以及链路连接损耗对 FBG 复用解调结果产生的影响。针对这个问题,提出了利用浮动解调阈值以及抑制反射谱旁瓣的解决方法,最后,通过实验证实了相关理论的正确性与方法的可行性。实验结果表明:FBG 复用解调结果的出错率由原来的 11.36%降低为 0,极大地提高了应变测量结果的准确性。