

测试技术

# 一种快速的绝对相位求解算法及其在高温锻件自动化测量中的应用

郭延艳<sup>1</sup>, 钟 凯<sup>2,3</sup>, 何万涛<sup>1</sup>, 张洪军<sup>1</sup>, 江 浩<sup>4</sup>

(1. 岭南师范学院 机电工程学院, 广东 湛江 524048; 2. 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;  
3. 深圳华中科技大学研究院, 广东 深圳 518000; 4. 武汉惟景三维科技有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为提高基于结构光的高温锻件在线自动化测量的光栅投影与相位计算速度、减小零件热辐射对测量精度的影响、降低环境振动造成的精度损失, 提出了一种只需要 4 幅不同频率光栅投影的、不需要相移的快速相位求解算法。在分析传统多频 4 步相移的相位求解对高温锻件测量效率与精度影响的基础上, 首先, 从余弦光栅图像中分离出交流分量, 对其利用离散信号的希尔伯特变换代替多步相移来计算相位; 然后, 根据多频外差法的频率混合得到合成频率的合成相位图; 最后, 根据相应的反三角函数的值域区间, 对合成相位进行平移计算展开相位。仿真结果表明, 该方法可以显著提高计算效率, 有效减少测量过程停留, 降低热辐射和振动对测量精度的影响。现场测量结果表明, 该方法可以满足锻件全尺寸数据的测量需求, 为锻造过程实时监控、及时消除异常波动、提高和控制锻件精度提供了保障。

**关键词:** 多频光栅; 相位计算; 高温锻件; 希尔伯特变换; 自动化三维测量

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.029

**中图分类号:** TH741

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 11-0207-07

## A fast absolute phase solving algorithm and its application in automatic measurement of high temperature forgings

Guo Yanyan<sup>1</sup>, Zhong Kai<sup>2,3</sup>, He Wantao<sup>1</sup>, Zhang Hongjun<sup>1</sup>, Jiang Hao<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China;  
2. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Research Institute of Huazhong University of Science and Technology in Shenzhen, Shenzhen 518000, China; 4. Wuhan Vision 3D Technology Ltd., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to improve the grating projection and phase calculation speed of on-line automatic measurement for high temperature forgings based on structured light and reduce the influence of part thermal radiation on measurement accuracy as well as reduce the accuracy loss caused by environmental vibration, a fast phase solving algorithm that required only four grating projections with different frequencies without phase shift was proposed. Based on the analysis of the influence of the traditional phase solving with multi-frequency and four-step phase shift on the measurement efficiency and accuracy of high temperature forgings, firstly, the AC component was separated from the cosine grating image, and the Hilbert transform of discrete signal was used to calculate the phase instead of multi-step phase shift. Then, according to the frequency mixing of the multi-frequency heterodyne method, the synthetic phase diagram of the synthetic frequency was obtained. Finally, according to the value range of corresponding inverse trigonometric function, the synthetic phase was shifted to calculate the unwrapped phase. The simulation results show that this method can significantly improve the calculation efficiency, effectively reduce the stoppage of the measurement process, and reduce the influence of thermal radiation and vibration on the measurement accuracy. The field measurement results show that this method can meet the measurement requirements of the full-size data for forgings and provide a guarantee for the real-time monitoring of the forging process, the elimination of abnormal fluctuations in time, and the improvement and control of the accuracy for forgings.

**Key words:** multi-frequency grating; phase calculation; high temperature forgings; Hilbert transform; automatic 3D measurement

热模锻件广泛应用于航空、航天、汽车等高端

装备的关键承力部位, 在成形过程中需经历多个热态变形过程, 精度难以控制。传统热模锻件是采用大余量模锻和机加工的方式生产, 导致模锻件流线紊乱, 严重影响模锻件性能, 且材料和能源浪费严重。为此, 对热模锻件在不同温度下的三维尺寸进行精确测量, 是明晰模锻件变形规律、优化锻造工艺的重要手段。在不同的锻造阶段进行在线测量, 可以及时发现不合格工序, 及时处理超差零件,

收稿日期: 2022-07-19; 修订日期: 2022-10-18

基金项目: 深圳市基础研究面上项目 (JCYJ20210324142007022);  
湖北省重点研发计划项目 (2021BAA049); 国家自然科学基金资助项目 (51675165, 51505134)

作者简介: 郭延艳 (1982-), 女, 硕士, 副教授

**E-mail:** guoyy1@lingnan.edu.cn

通信作者: 何万涛 (1981-), 男, 博士, 讲师

**E-mail:** wantaohe@lingnan.edu.cn

防止其进入后续环节,节约能源;同时,还可以实时地掌握锻造模具状态,避免出现批量不合格产品,减少废品损失。在锻造过程中,通过获取大量的尺寸数据,了解锻造过程中关键尺寸的变化规律,从而为发展智能锻造提供数据基础<sup>[1-2]</sup>。

为了满足锻造行业对高温状态下零件的快速三维测量需求,国内外研究机构开展了广泛的技术研究<sup>[3]</sup>。线结构光<sup>[4]</sup>与面结构光<sup>[5]</sup>三维测量技术在众多的高温锻件测量技术中逐渐优势突显。He Q 等<sup>[6]</sup>将结构光测量技术应用于炼钢行业转炉的渣位测量,并提出信号增强方法,有效地从 1700 ℃ 以下的热熔渣表面提取投影激光条纹。Zhang Y C 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于线激光扫描的在线测量方法,实现了大型锻件热态尺寸测量。在该系统的基础上,王颖等<sup>[8]</sup>通过在被测量零件表面投影绿色激光并在图像采集端滤除红光成分,抑制了热态锻件自身红光辐射的影响,进一步提高了系统的测量精度。王邦国等<sup>[9]</sup>基于线激光器阵列投影的大型热锻件测量方案,解决了热锻件发出的辐射导致图像质量较差的问题。Liu Y 等<sup>[10]</sup>提出了一种改进的机器视觉测量热锻件的图像采集方法,在温度随着时间变化的情况下获取清晰图像的补偿参数,有效地提高了测量质量。但是,由于线激光的光条中心提取和完整测量数据获取需要依赖外部运动装置的限制,在测量速度和数据密度方面存在局限性。面结构光测量方法在被测量零件上投影特定光栅图案,可以单次快速获取高密度的三维数据。由于其在测量速度和数据密度方面的优势,并且能够搭载机械手实现自动化测量,在热锻件测量领域逐渐受到重视。美国 Twin Coast 3D Metrology 公司<sup>[11]</sup>基于面结构光测量技术研制了热锻件测量专用设备,可对 1100 ℃ 的热锻件成形后立即测量,为了快速实现全尺寸测量,采用了 16 台相机和 8 台投影转置构成了组合测量系统,系统复杂性高,而且由于相机公共区域的限制,仅适用于小型锻件的测量。美国 OG Technologies 公司<sup>[12]</sup>研制的 Hot-Eye 热态锻件测量传感器搭载在三坐标运动平台上,实现了 1450 ℃ 的小型锻件测量。上述设备均存在柔性差的问题,不能实现在线测量。国内的华中科技大学与武汉惟景三维科技有限公司<sup>[13]</sup>合作研发了系列基于面结构光的热锻件在线自动化三维测量设备,并进行了应用推广,在测量精度、测量速度、自动化程度和测量范围扩展能力等方面均有显著优势。Han L Y 等<sup>[14]</sup>采用双滤波器组和智能温度控制技术开发了高温锻件在线测量专用传感器,

提出了一种分时复用的加速结构光投影模式和改进的多频相移方法,提高了单幅的测量速度,减少了传感器在热环境中的暴露。在后续的工作中,为了减小锻造作业环境中振动导致的测量误差,提出了基于多频相移的三维传感器振动检测和运动补偿方法,通过修改相对相位来定量指示振动强度并补偿运动误差<sup>[15]</sup>。

综上所述,与线结构光测量技术相比,面结构光测量技术在测量速度、点云密度和实现自动化方面均具有一定的优势。但是,由于自动化测量过程中,为了减小零件热辐射对测量精度的影响,降低环境振动造成的精度损失,需要对面结构光的相位快速求解算法进行深入研究。为此,本文提出一种基于多频外差的免相移的绝对相位求解算法。该算法通过希尔伯特变换,仅需要投射 3 幅满足一定关系的相位光栅图像和 1 张背景图像,即可快速获得绝对相位。通过投射少量图像,实现绝对相位计算,不仅可以减少测量过程中传感器在热环境中的暴露,降低高温对测量精度的影响,同时,也可以大幅地降低振动环境对测量精度的影响。

## 1 面结构光相移原理及自动化系统组成

### 1.1 面结构光相移原理

数字相移结构光三维测量是用于物体形状测量的应用最广泛的一种结构光技术,而相位展开是其关键步骤。假设条纹图像光强是标准正弦分布,则第  $i$  幅图像的光强分布函数  $I_i(x, y)$  为:

$$I_i(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta_i] \quad (1)$$

式中:  $I'(x, y)$  为图像的平均灰度;  $I''(x, y)$  为图像的灰度调制;  $\phi(x, y)$  为待计算的相对相位值;  $\delta_i$  为第  $i$  幅图像的相移。

为求解上述除却相移的 3 个未知量,至少需要 3 幅图像,目前已有多种相移算法用来求解绝对相位值,每次相移  $\pi/2$  的 4 步相移是数字结构光三维测量的经典方法,该方法具有可靠性好、准确性高的优点。4 步相移法的光强表达式为:

$$\begin{cases} I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y)] \\ I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi/2] \\ I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi] \\ I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + 3\pi/2] \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 、 $I_3(x, y)$  和

$I_4(x, y)$  分别为第 1 步、第 2 步、第 3 步和第 4 步相移的光强分布函数。

根据式 (2)，可以通过反正切函数计算出光栅图像的相对相位值：

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right) \quad (3)$$

计算出的相对相位值是周期为  $2\pi$  的不连续折叠相位，其范围为  $[-\pi, +\pi]$ 。之后，进行相位展开，获取绝对相位。对于相移方法，相位展开的关键步骤为计算周期数  $N(x, y)$ 。像素的绝对相位  $\psi(x, y)$  可以由  $\phi(x, y)$  和  $2\pi \times N(x, y)$  之和确定，即：

$$\psi(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi \times N(x, y) \quad (4)$$

## 1.2 自动化系统组成

面结构光传感器通常由一个数字光栅投影装置和两个工业相机组成，经由系统参数标定、光栅相位计算和三维匹配实现单幅三维点云的计算。针对锻造环境的特殊工况，为了降低锻件热辐射对结构光传感器精度的影响，设计了主动散热装置，使其内部温度保持在一定的范围内。耐热面结构光传感器与机械手组合，实现了热锻件在线自动化三维测量。主动散热装置如图 1 所示，其中，空气循环泵为冷空气进路和热空气回路提供驱动力；热交换器用来加速散热；固态致冷装置用于进一步降低空气温度并固定冷凝水；电源系统及散热系统控制器为全部装置提供电力供应和控制。

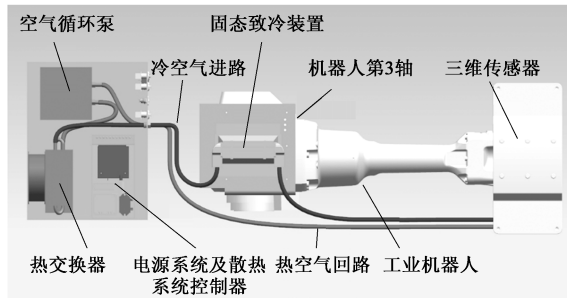


图 1 主动散热装置的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure for active heat dissipation device

## 2 绝对相位计算方法

### 2.1 多频外差相位计算

多频外差技术是一种经典的相位展开方法，其原理是通过混合两个不同频率的波来产生新的频率，也就是由高频信号合成低频信号，具有精度高、稳定性好、能够实现逐像素计算等优点。给定 3 个频率为  $f_1 > f_2 > f_3$  的周期信号，相应的周期分别为  $C_1$ 、

$C_2$  和  $C_3$ ，则：

$$f_1 = 1/C_1, f_2 = 1/C_2, f_3 = 1/C_3 \quad (5)$$

其合成频率  $f_{12}$ 、 $f_{23}$  和  $f_{123}$  可以通过  $f_1$ 、 $f_2$  和  $f_3$  得到：

$$\begin{cases} f_{12} = f_1 - f_2 \\ f_{23} = f_2 - f_3 \\ f_{123} = f_{12} - f_{23} \end{cases} \quad (6)$$

根据式 (5) 和式 (6)，可以计算其相应周期的关系为：

$$C_{12} = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1}, C_{23} = \frac{C_2 C_3}{C_3 - C_2}, C_{123} = \frac{C_{12} C_{23}}{C_{23} - C_{12}} \quad (7)$$

式中： $C_{12}$ 、 $C_{23}$  和  $C_{123}$  为合成频率  $f_{12}$ 、 $f_{23}$  和  $f_{123}$  对应的合成周期。

对应的相位可以通过式 (8) 计算：

$$\begin{cases} \phi_{12} = \text{mod}[(\phi_1 - \phi_2), 2\pi] \\ \phi_{23} = \text{mod}[(\phi_2 - \phi_3), 2\pi] \\ \phi_{123} = \text{mod}[(\phi_{12} - \phi_{23}), 2\pi] \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\phi_1$ 、 $\phi_2$  和  $\phi_3$  为频率  $f_1$ 、 $f_2$  和  $f_3$  对应的相对相位； $\phi_{12}$ 、 $\phi_{23}$  和  $\phi_{123}$  为合成频率  $f_{12}$ 、 $f_{23}$  和  $f_{123}$  对应的合成相位； $\text{mod}(\ast)$  为求余数计算符号。

### 2.2 希尔伯特变换

希尔伯特变换 (Hilbert Transform, HT) 是一种信号的时频分析方法，是为一种解决数学物理中特殊条件下的积分方程而被引入的积分变换。与传统的傅里叶变换和小波变换等时频分析方法相比，它能够克服传统算法由于谐波分量引起的不准确性，是线性和平稳信号分析方法的重大突破。对任意一个时域内的时间序列  $X(t)$ ，可对其进行 HT 得到  $Y(t)$ ：

$$Y(t) = H[X(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (9)$$

式中： $t$  为时间； $\tau \in [-\infty, +\infty]$ ，为积分变量； $H$  为希尔伯特变换函数。

HT 也可以写成卷积形式：

$$Y(t) = \frac{1}{\pi t} \otimes X(t) \quad (10)$$

以  $X(t)$  为实部，其 HT 得到的  $Y(t)$ ，为虚部，构造信号的复信号  $z(t)$  为：

$$z(t) = X(t) + jY(t) = A(t)e^{j\phi(t)} \quad (11)$$

式中： $j$  为复数变量； $X(t)$  和  $Y(t)$  形成共轭对，是幅度-相位变化的三角函数对  $X(t)$  的局部最佳拟合； $A(t)$ 、 $\phi(t)$  分别为解析信号的振幅和相对相位。



进一步可得:

$$A(t) = [X^2(t) + Y^2(t)]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\phi(t) = \arctan \left[ \frac{Y(t)}{X(t)} \right] \quad (13)$$

根据上述推导, 解析信号的瞬时频率  $f(t)$  满足以下关系:

$$f_1 - 2f_2 + f_3 = 1 \quad (14)$$

式 (1) 中包含图像的平均灰度  $I'(x, y)$ , 即图像的直流分量。通过减去图像的直流分量获得新的仅包含交流分量 (本文算法无需相移) 的图像光强分布函数  $I_i^a(x, y)$ , 为:

$$I_i^a(x, y) = I''(x, y) \cos[\phi_i(x, y)], \quad i = 1, 2, 3 \quad (15)$$

根据第 2.2 节的分析, 对式 (15) 进行 HT, 可以获得具有  $\pi/2$  相移的新光强分布函数  $I_i^{ah}(x, y)$ :

$$I_i^{ah}(x, y) = I''(x, y) \sin[\phi_i(x, y)], \quad i = 1, 2, 3 \quad (16)$$

通过计算  $I_i^a(x, y)$  和  $I_i^{ah}(x, y)$  之间商的反正切, 可以逐像素获得第  $i$  幅图像的相对相位  $\phi_i(x, y)$ :

$$\phi_i(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{I_i^{ah}(x, y)}{I_i^a(x, y)} \right) \quad (17)$$

在获得相对相位后, 可以通过第 2.1 节中的式 (8) 获得合成相位  $\phi_{12}$ 、 $\phi_{23}$  和  $\phi_{123}$ 。为了分步执行相位展开过程, 首先应根据式 (4) 使用相对相位和合成相位逐像素计算周期数:

$$N_{12}(x, y) = \text{round} \left[ \frac{\phi_{123}(x, y) \times f_{12}/f_{123} - \phi_{12}(x, y)}{2\pi} \right] \quad (18)$$

式中:  $N_{12}(x, y)$  为合成的周期数;  $\text{round}()$  为取整函数符号。

可以很容易地获得相对合成相位  $\phi_{12}$  和绝对合成相位  $\psi_{12}$  的解析表达式。

$$\psi_{12}(x, y) = \phi_{12}(x, y) + 2\pi \times N_{12}(x, y) \quad (19)$$

类似地, 第 1 幅图像的绝对相位  $\psi_1(x, y)$  的计算如下:

$$N_1(x, y) = \text{round} \left( \frac{\psi_{12}(x, y) \times f_1/f_{12} - \phi_1(x, y)}{2\pi} \right) \quad (20)$$

$$\psi_1(x, y) = \phi_1(x, y) + 2\pi \times N_1(x, y) \quad (21)$$

式中:  $N_1(x, y)$  为第 1 幅图像的周期数。

$\phi_2(x, y)$  和  $\phi_3(x, y)$  的绝对相位可以通过相同的步骤计算得到。

### 3 实验验证

#### 3.1 相位展开实验与比较分析

为了验证上述相位展开算法的可行性和稳定性, 首先, 用红色纸板模拟零件红热状态, 进行光栅的投射与采集, 结构光三维测量传感器投射蓝光, 并在镜头前加装蓝光滤光片。采集到的 3 幅频率分别为 64、59 和 55 的光栅图像, 图像分辨率为  $1280 \times 768$ , 如图 2 所示。采用本文提出的方法, 展开的相位效果如图 3 所示, 由图 3 可以看出, 展开相位是单调和连续的。将该算法与经典 4 步相移算法进行了比较, 比较过程中截取展开相位的第 300 行, 截取位置如图 3f 中的横线所示, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 有效相位范围约从第 100 列到第 900 列, 其余是无光栅的黑色部分, 该范围内相位的平均偏差为 0.0183。该结果证明, 本文所提出的算法可以达到与 4 步相移算法相近的精度。然而, 该算法仅需要 4 幅图像, 而 4 步相移算法需要 12 幅图像。本实验中采用的光栅投影装置每秒可以投影 30 帧图像, 从投射的角度比较, 本文方法投影时间是 4 步相移法的  $1/3$ 。通过程序计时, 相位展开时间是 4 步相移法的 38.25%, 大幅地提高了计算效率。

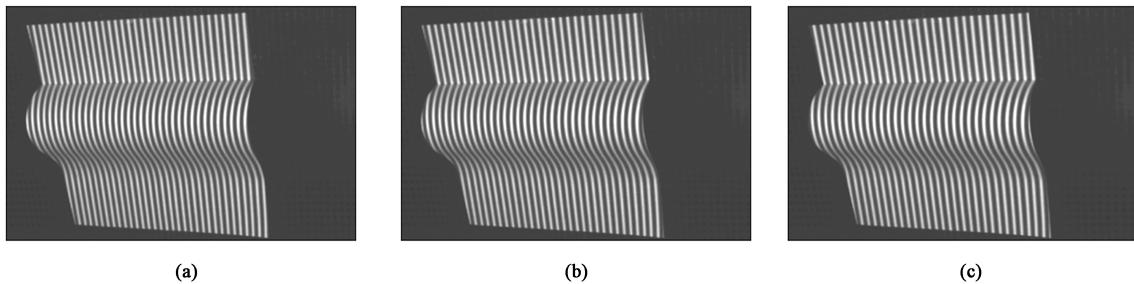


图 2 采集到的不同频率的光栅图像  
(a)  $f_1 = 64$  (b)  $f_2 = 59$  (c)  $f_3 = 55$

Fig. 2 Grating images acquired at different frequencies

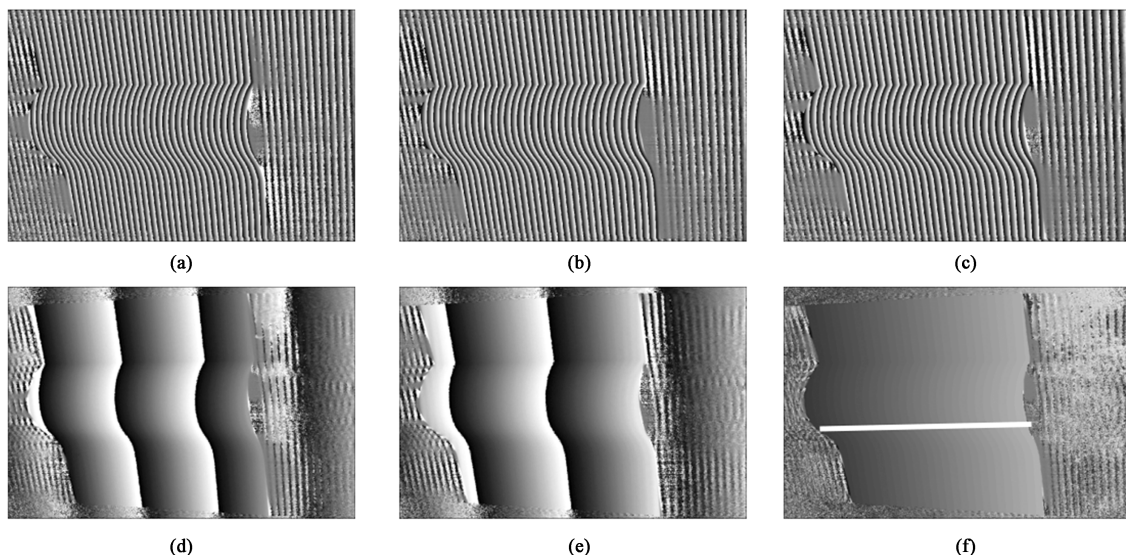


图 3 采用本文方法计算的相位

(a) 相对相位  $\phi_1$  (b) 相对相位  $\phi_2$  (c) 相对相位  $\phi_3$  (d) 合成相位  $\phi_{12}$  (e) 合成相位  $\phi_{23}$  (f) 合成相位  $\phi_{123}$ 

Fig. 3 Phase calculated by proposed method in this paper

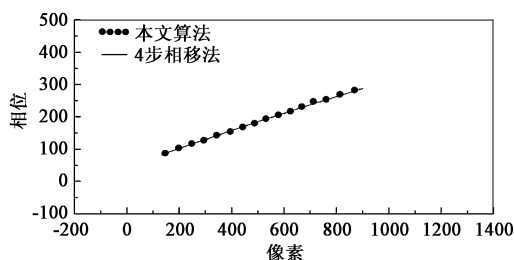
(a) Relative phase  $\phi_1$  (b) Relative phase  $\phi_2$  (c) Relative phase  $\phi_3$   
(d) Equivalent phase  $\phi_{12}$  (e) Equivalent phase  $\phi_{12}$  (f) Equivalent phase  $\phi_{123}$ 

图 4 本文算法与经典 4 步相移法的计算结果比较

Fig. 4 Comparison of calculation results between method in this paper and classical four-step phase shifting method

由仿真结果可知，本文相位展开算法针对高温零件测量更具有优势，大幅缩短了展开时间，在同样的测量规划下，可以有效地减少测量设备在高温零件上的驻留时间，减小热辐射对测量精度的影响；由于只需要 4 幅图像就可以计算出完整的三维数据，可以减小复杂生产车间振动引起的相位误差，提高测量精度。

### 3.2 测量实验与精度验证

为了验证本文提出的相位计算方法的测量精度，采用同一组标定参数，对标准哑铃球分别采用 4 步相移法和本文算法进行了 10 次测量。标准哑铃球如图 5 所示，两个陶瓷标准球的球心距离为  $D=160.007\text{ mm}$ ，两个陶瓷标准球的直径分别为  $d_1=\Phi 80.001\text{ mm}$ ， $d_2=\Phi 79.999\text{ mm}$ 。其中的一次测量结果如图 6 所示，本文算法测量获得的球心距离为

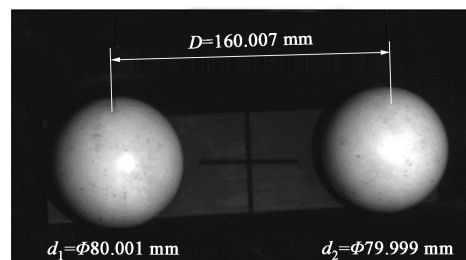


图 5 标准哑铃球

Fig. 5 Standard ball-bar

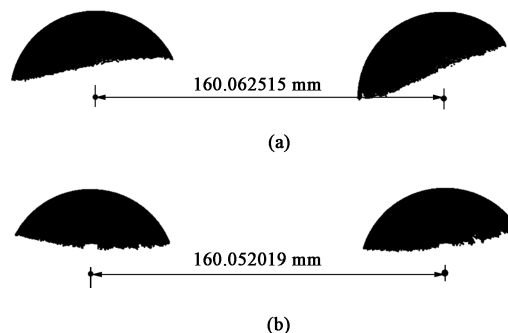


图 6 标准哑铃球的测量结果与分析

(a) 本文算法的误差分析结果  
(b) 4 步相移法的误差分析结果

Fig. 6 Measurement results and analysis of standard ball-bar

(a) Error analysis result of method in this paper  
(b) Error analysis result of four-step phase shifting method

160.062515 mm，4 步相移法测量获得的球心距离为 160.052019 mm，与标准值比较其误差分别为 0.0555 和 0.0450 mm。由于两种方法用的是同一组标定数据，产生的误差主要来源于相位的求解及匹配计算。10 次测量结果的比较分析如表1所示，本

表 1 本文算法与 4 步相移法的 10 次测量结果比较 (mm)  
Table 1 Comparison of ten measurement results between method in this paper and four-step phase shifting method (mm)

序号	本文算法		4 步相移法	
	测量值	误差	测量值	误差
1	160.0625	0.0555	160.0520	0.0450
2	160.0519	0.0449	160.0411	0.0341
3	160.0610	0.0540	160.0326	0.0256
4	160.0573	0.0503	160.0452	0.0382
5	160.0499	0.0429	160.0439	0.0369
6	160.0522	0.0452	160.0524	0.0454
7	160.0601	0.0531	160.0320	0.0250
8	160.0613	0.0543	160.0331	0.0261
9	160.0481	0.0411	160.0429	0.0359
10	160.0663	0.0593	160.0406	0.0336
平均值	—	0.0501	—	0.0346

文算法的平均误差为 0.0501 mm，4 步相移法的平均误差为 0.0346 mm，可以看出本文算法与 4 步相移法具有相近的精度，对于锻造测量，完全满足测量需要。

3.3 现场测量应用

为了进一步验证所提出算法的可靠性，将本文方法应用至开发的高温转向臂零件的测量中，测量现场如图 7a 所示。采用本文提出的算法，投射 4 幅光栅图像进行相位展开，采用与 4 步相移法相同的标定参数和匹配算法计算测量的三维点云数据，计算结果如图 7b 所示。获得的点云数据与零件的 CAD 模型进行比较，分析测量误差，结果如图 7c 所示，精度满足锻件测量的需求。

4 结论

(1) 本文提出了一种基于希尔伯特变换的多频外差相位展开算法，实验结果表明，该算法不需要相移即可以获得高精度的相位展开结果。与经典的

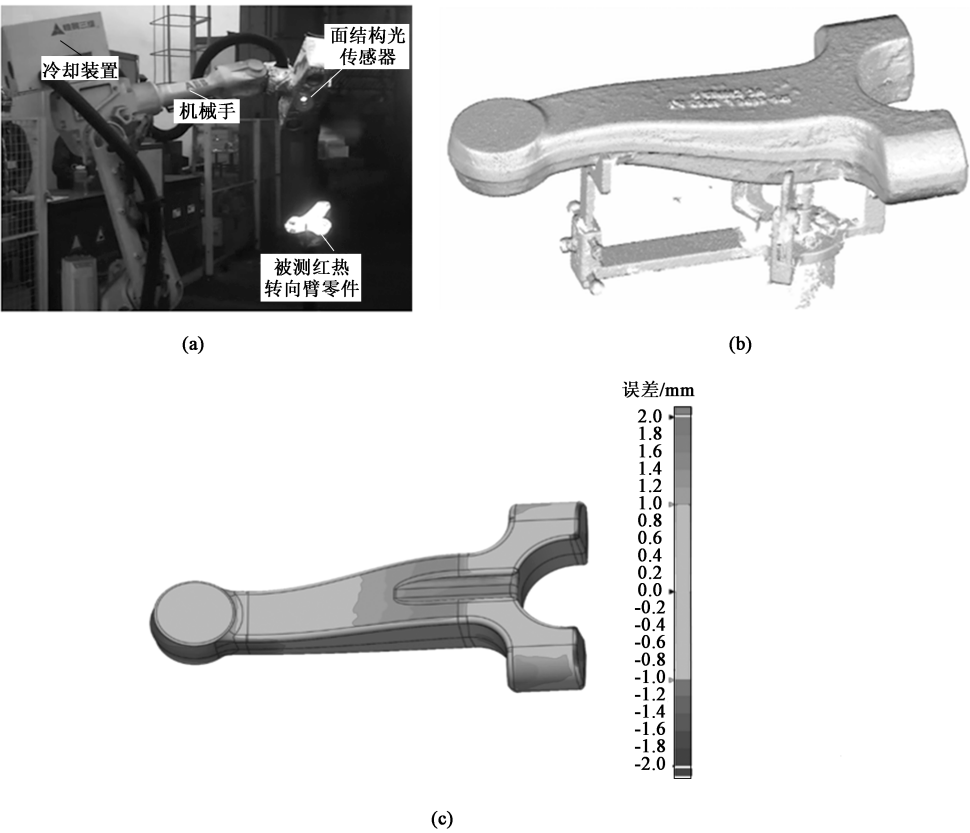


图 7 高温转向臂测量现场及测量结果

(a) 测量现场 (b) 测量点云 (c) 误差分析结果

Fig. 7 Measurement site and results of high-temperature steering arm

(a) Measurement site (b) Measured point cloud (c) Error analysis results

4 步相移法比较, 该算法具有投射图像数量少、计算效率高、相位展开可靠性好等优势。由于图像投射数量由 12 幅减少至 4 幅, 测量过程对振动干扰更具鲁棒性。

(2) 通过高温转向臂零件的测量, 采用 Geomagic Qualify 软件对测量点与 CAD 模型进行了对比分析, 从数据可以看出, 本文提出的相位展开方法可以满足锻造现场的精度需求, 可以快速获得锻件的全尺寸三维数据, 为后续多个零件的关键尺寸分析, 实现生产过程的实时监控提供了一种有效的技术手段。

#### 参考文献:

- [1] 韩利亚. 热成形件在线自动化三维测量技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [2] 刘阳. 大型热态锻件视觉测量中图像处理关键技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [3] Wen X, Wang J P, Zhang G Y, et al. Three-dimensional morphology and size measurement of high-temperature metal components based on machine vision technology: A review [J]. *Sensors*, 2021, 21: 4680.
- [4] Fu X B, Liu B, Zhang Y C. Measurement technology of the hot-state size for heavy shell ring forging [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 65 (1): 543-548.
- [5] Wen X, Song K C, Niu M H, et al. A three-dimensional inspection system for high temperature steel product surface sample height using stereo vision and blue encoded patterns [J]. *Optik*, 2017, 130: 131-148.
- [6] He Q, Zhang X Z, Ji Z W, et al. A novel and systematic signal extraction method for high-temperature object detection via structured light vision [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 5013314.
- [7] Zhang Y C, Han J X, Fu X B, et al. An online measurement method based on line laser scanning for large forgings [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70 (1-4): 439-448.
- [8] 王颖, 张玉存. 基于绿激光图像识别的热态大型锻件长度尺寸测量 [J]. *计量学报*, 2018, 39 (3): 5-8.
- [9] 王邦国, 贾振元, 刘巍, 等. 基于结构光的大锻件尺寸测量中光条纹中心线提取方法 [J]. *大连理工大学学报*, 2012, 52 (2): 203-208.
- [10] Liu Y, Jia Z Y, Liu W, et al. An improved image acquisition method for measuring hot forgings using machine vision [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2016, 238: 369-378.
- [11] Twin Coast 3D Metrology. Twin Coast Metrology-Be Industry Best™ [Z]. <https://twincoastmetrology.com/products/metrology/hot-part-measurement/>.
- [12] OG Technologies. HotEye (tm) based coordinate measuring machine for forging industry [R]. Colorado: Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2003.
- [13] 韩利亚, 陈天赋, 甘万兵, 等. 高温转向节锻件自动化三维测量与精度检测技术 [J]. *塑性工程学报*, 2018, 25 (5): 53-59.
- [14] Han L Y, Cheng X, Li Z W, et al. A robot-driven 3D shape measurement system for automatic quality inspection of thermal objects on a forging production line [J]. *Sensors*, 2018, 18: 4368.
- [15] Han L Y, Li Z W, Zhong K, et al. Vibration detection and motion compensation for multi-frequency phase-shifting-based 3D sensors [J]. *Sensors*, 2019, 19: 1368.
- [16] 张赵宁. Fe-Si 合金钢板高温氧化与氧化层去除问题的研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [17] 孙炳红, 王嘎, 许少普, 等. 中厚板矫直环节三次氧化铁皮压入的研究 [J]. *中国冶金*, 2015, 25 (4): 56-59.
- [18] Liu X J, Cao G M, Nie D M, et al. Mechanism of black strips generated on surface of CSP hot rolled silicon steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2013, 20 (8): 54-59.
- [19] 徐蓉. 热轧氧化铁皮表面状态研究和控制工艺开发 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [20] Sun B H, Wang G, Xu S P, et al. Study of press of cubic iron oxide during the straightening stage for plates [J]. *China Metallurgy*, 2015, 25 (4): 56-59.
- [21] Li H, Lu J D, Yue C X, et al. Influence of coiling temperature on oxide scale of 1.5%Si non-oriented electrical steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41 (10): 73-79.
- [22] Zhang Z N. Study on High Temperature Oxidation and Descaling of Fe-Si Alloy Steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [23] Xu R. Study on Surface State and Development of the Control Process of the Hot-rolled Oxide Scale [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.

(上接第 171 页)