

# 钢球表面缺陷的双波长干涉数字相位检测

潘卫清<sup>1</sup> 赵晓波<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 浙江科技学院理学院, 浙江 杭州 310023  
<sup>2</sup> 杭州先临三维科技股份有限公司, 浙江 杭州 311215)

**摘要** 提出了一种基于双波长干涉数字相位测量的钢球表面缺陷检测方法。采用波前匹配照明光路对钢球进行照明成像,理论分析表明当入射光波前曲率半径与钢球表面曲率半径相等时,钢球将获得最大空间角的有效照明,其照明空间角取决于物镜的数值孔径。用双波长干涉和数字相位处理得到等效波长包裹相位,从而增大包裹相位的测量量程,避免相位解包裹处理,用相位掩模标定法对等效波长中的倾斜因子和二次球面波相位畸变进行校正,得到了高精度的钢球表面三维数据。通过实验对钢球表面的缺陷和粗糙度进行了检测与分析,实验结果证实了该方法的有效性。

**关键词** 测量;双波长干涉;钢球检测;数字相位测量;相位解包裹

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0508007

## Measurement of Steel Ball Surface Flaw Based on Dual Wavelength Interferometry and Digital Phase Detection

Pan Weiqing<sup>1</sup> Zhao Xiaobo<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Zhejiang Science and Technology University, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)  
<sup>2</sup> Hangzhou Shining 3D Technology Company Limited, Hangzhou, Zhejiang 311215, China)

**Abstract** A measurement method of steel ball surface flaw based on dual wavelength interferometry and digital phase detection is presented. An illumination optical path is designed based on a wavefront matching method. With this optical path the steel ball is illuminated with the max solid angle when the radius of curvature of the incident optical wave is equal to that of the steel ball. And the max solid angle of illumination is dependent on the numerical aperture of the objective lens. Dual wavelength interferometry and digital phase procession are applied to gain the wrapped phase at an equivalent wavelength. The phase ambiguities in the single wavelength phase data are removed to extend the axial measurement range using the equivalent wavelength results. The phase distortion of inclination and spherical aberration is adjusted with application of a phase mask calibrated beforehand. After that high precision three-dimensional data of the steel ball surface can be acquired and applied for surface flaw measurement. Experiments using this technique are shown for the measurement of steel surface flaw and roughness. The results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words** measurement; dual wavelength interferometry; steel ball measurement; digital phase measurement; phase unwrapped

**OCIS codes** 120.6660; 090.1995; 120.5050

## 1 引言

轴承作为机械设备中非常重要的基础件,在国民经济各个行业中应用极其广泛,各类机电设备对其的依赖性日益加剧。而钢球是轴承的最重要配件,它的质量直接影响着轴承的质量,如轴承的精度、运动性能以及使用寿命等,实验统计表明钢球的质量性能占

轴承质量因素的 60%以上,而由钢球表面缺陷造成的轴承失效率在 58.8%以上<sup>[1]</sup>。因此,实际生产过程中必须对钢球表面质量进行严格检测。

在钢球自动检测的研究方面,目前实际应用效果最好的是捷克 SOMET 公司的 AVIKO 系列钢球表面自动检测仪,它采用光电、振动和电涡流传感检

收稿日期: 2013-10-31; 收到修改稿日期: 2013-12-23

作者简介: 潘卫清(1976—),男,博士,副教授,主要从事信息光学和光电检测等方面的研究。

E-mail: pan\_weiqing@163.com

测<sup>[2]</sup>, 其次是日本大旺钢球株式会社研制的钢球自动检测仪, 它通过光学探伤法对球面进行检测, 并可同时检测钢球表面粗糙度<sup>[3]</sup>。国内尚未开发出具有自主知识产权的钢球表面缺陷自动检测设备<sup>[4]</sup>。但国内已有学者开展了基于机器视觉技术的钢球表面缺陷检测研究。潘洪平等<sup>[5-6]</sup>研究了钢球表面缺陷的检测体系评价, 为钢球检测的图像理论打下了基础, Wang 等<sup>[7-9]</sup>对基于数字图像技术的钢球表面缺陷检测进行了多方面的深入研究, 俞哲<sup>[10]</sup>提出了基于数学形态学的钢球瑕疵检测算法, 宋晓霞等<sup>[11]</sup>提出了基于彩色图像 RGB 特征的缺陷提取方法, 方胜等<sup>[12]</sup>利用机器视觉图像处理技术搭建了钢球表面缺陷检测系统。由此可见, 国内在基于机器视觉技术的钢球表面缺陷检测已取得了很大进展, 但同时也发现了很多较难解决的共性问题: 一是机器视觉图像处理所依据的是钢球表面的二维纹理信息, 缺失钢球表面的三维信息, 容易造成误判和漏判, 更无法对钢球进行粗糙度检测; 二是钢球表面接近镜面反射, 导致表面纹理信息易被反射光淹没, 采集的图像亮度分布不均, 而且会反射周围的影像, 增加了缺陷检测难度。

鉴于此, 本文提出一种基于双波长干涉测量的钢球表面缺陷检测方法, 具体包括光路和算法两部分, 利用所设计的光路可获取均匀清晰的干涉图像,

并给出理论上的最大检测视场, 然后用双波长相位解析算法快速获取钢球表面的三维质量信息, 从而实现钢球缺陷的准确提取, 并对表面粗糙度进行测量, 最后通过实验对该检测方法的效果进行了验证。

## 2 检测光路

如图 1(a) 所示, 波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的两个激光器发出的激光先经扩束准直后, 经反射镜 M 和分光棱镜 BS1 合束, 精确调节反射镜 M 使波长为  $\lambda_2$  的光与波长为  $\lambda_1$  的光方向高度平行重合, 然后每束光经棱镜 BS2 分成两束, 再经显微物镜 MO1 和 MO2 后会聚成球面波分别照射两个钢球。其中一个钢球的反射光作为参考光, 另一个钢球的反射光作为检测光, 两反射光经成像透镜 L 在 CCD 探测面成像, 得到钢球表面的清晰光学图像。小心调节参考光路中显微物镜和钢球的方位, 使参考光图像与检测光图像重合发生干涉, 得到细密的干涉直条纹图像。参考光路中的钢球作为质量检测的标准参照物, 其表面质量要比待检测钢球的表面质量高一个数量级, 表面不能有瑕疵。干涉光路一旦调节完成后, 则参考钢球和光路将被固化, 不需要再做调整, 而待检钢球则需要做旋转运动, 以便完成整个球面的展开和检测。

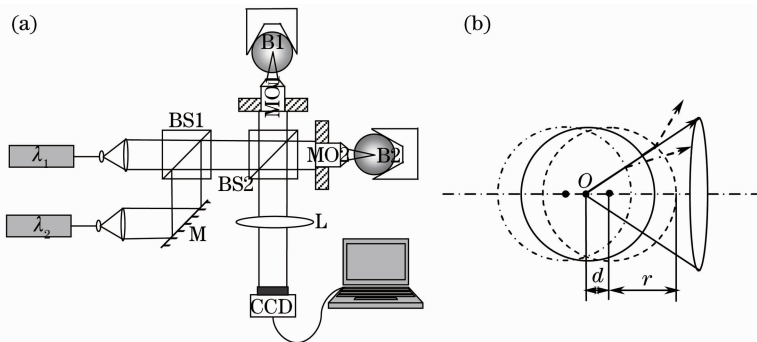


图 1 (a) 检测光路示意图; (b) 钢球相对物镜的位置关系图

Fig. 1 (a) Schematic layout of optical path for measurement; (b) schematic diagram of the relative location between steel ball and objective lens

本方案中, 显微物镜不直接对钢球做显微成像, 钢球表面位于物镜的焦距内, 如图 1(b) 所示。设钢球的曲率半径为  $r$  且  $r > 0$ , 钢球球心到物镜焦点  $O$  的距离为  $d$ , 则钢球表面入射球面波的曲率半径为  $R = -(d + r)$ , 钢球表面在物镜焦距内则  $d > -r$ 。根据矩阵光学 ABCD 定律可求出钢球反射光的曲率半径为

$$R' = \frac{R}{2R/r + 1} = \frac{r(r + d)}{2d + r}. \quad (1)$$

根据(1)式, 当  $d = -r$  时,  $R' = 0$ , 则入射光正好聚焦在钢球表面, 钢球被照射的面积等于 0 达到最小。然后随着  $d$  的增大, 钢球表面被照射的面积随之增大, 当  $d = -r/2$  时,  $R' = \infty$ , 经钢球反射的光为平行光, 发散角为 0, 因此反射光可全部通过物镜被成像, 之后随着  $d$  的增大反射光的曲率半径随之变小, 而发散角随之增大; 当  $d = 0$  时,  $R' = r = -R$ , 此时反射光的曲率半径与入射光的曲率半径相同, 方向相反, 说明反射光刚好沿入射光方向原路返回, 反射

光的发散角等于入射光的会聚角；当  $d > 0$  时，则  $R' < -R$ ，此时反射光的曲率半径小于入射光的曲率半径，反射光的发散角大于入射光会聚角，说明钢球被照明区内反射光发散角大于入射光汇聚角的部分光线将无法通过物镜被成像。因此为了使钢球得到最大的有效照明，应该将其放置在  $d = 0$  的位置，即钢球的球心与物镜焦点重合。此时钢球被有效照射的立体角为

$$\Omega = 2\pi(1 - \sqrt{1 - NA^2}), \quad (2)$$

式中  $NA$  为物镜的数值孔径，根据(2)式为了对钢球做全面展开检测，则最少需要对钢球做  $4\pi/\Omega$  次旋转扫描测量。

### 3 双波长干涉数字相位测量原理

设参考光的波前相位为  $\varphi_r$ ，对于高质量的理想参考钢球，该波前仅为反映钢球形状的标准球面波，而待检测钢球反射的波前相位为  $\varphi_o$ ，是包含有表面缺陷信息的球面波，通过对这两束光的离轴干涉图做滤波处理则容易得到两波前的相位差  $\Delta\varphi = \varphi_o - \varphi_r$ ，由于钢球的直径相同，因此球面波因子在干涉过程中被基本抵消去除，干涉相位中剩下的是待检测钢球的表面质量信息，具体可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi\Delta h}{\lambda}, \quad (3)$$

式中  $\Delta h$  为待测钢球表面起伏相对理想钢球光滑表面的差值， $\lambda$  为波长。由(3)式可看出通过干涉相位即可精确测出钢球的表面形貌。但受限制的是该相位只能测量表面起伏在一个波长  $\lambda$  范围内的参数，如果钢球的表面缺陷阈值超过了一个波长，则需要用相位解包裹算法<sup>[13-15]</sup>对  $\Delta\varphi$  进行相位展开，虽然相位解包裹算法已经比较成熟，但运算比较复杂，而且对包裹相位图的质量要求较高，因此不适合用于实时性要求很高的钢球检测。

通过双波长干涉测量<sup>[16-17]</sup>可绕开这个问题，其方法是采用两个不同波长  $\lambda_i$  的光分别记录两幅干涉图，得到两个数字相位分布，即  $\Delta\varphi_1 = \frac{4\pi\Delta h}{\lambda_1}$ ，

$\Delta\varphi_2 = \frac{4\pi\Delta h}{\lambda_2}$ ，然后对两个相位做相减运算得到

$$\Psi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = \frac{4\pi\Delta h}{\Lambda}, \quad (4)$$

式中  $\Lambda = \frac{\lambda_1\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ ，显然(4)式中的双波长相位差  $\Psi$  相当于等效波长  $\Lambda$  的相位图，而等效波长  $\Lambda$  要比任意一个记录波长  $\lambda_i$  都大，波长差  $|\lambda_1 - \lambda_2|$  越小，

等效波长越大，因此只要选取合适的两个记录波长，保证等效波长  $\Lambda$  大于两倍表面缺陷筛选阈值  $2\Delta h_i$ ，则通过双波长数字相位测量就可以实现钢球表面缺陷的快速检测。

### 4 实验与分析

光路结构如图 1(a)所示，实验所采用的激光器分别为 632.8 nm 波长的氦氖(He-Ne)激光器和 650 nm 波长的半导体激光器，显微物镜选用的是放大倍率为 10 倍，数值孔径为 0.25，焦距约为 8 mm，检测钢球选用的是直径为 10 mm 的一级不锈钢球，表面比较光亮，如图 2(a)所示。选用其中表面光洁度相对较高的钢球作为参考钢球，置于参考光路中，然后将其他待检钢球放在测量光路中。调节物镜方位，使入射到钢球表面的光斑成均匀的圆盘分布，然后调节钢球到物镜的距离和 CCD 到成像透镜的距离，观察钢球在 CCD 上所成的像，如图 2(b)所示，图像成均匀圆盘分布，其中可清晰看到钢球表面的微小瑕疵，随着钢球往物镜方向移动，成像的圆盘区域随之扩大，当钢球球心与焦点重合时圆盘面积最大，再继续移动钢球时，则圆盘边缘将出现毛刺和扭曲。完成成像调节后，再对参考光路进行微调，使参考光图像与检测光图像重合发生干涉，微调参考钢球位置使干涉条纹平直细密。

用两个不同波长的光分别对钢球拍摄干涉图像，如图 3(a)和(b)所示，由于干涉图提取的钢球表面

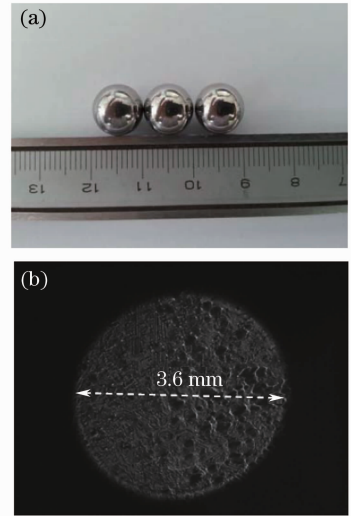


图 2 (a) 一级钢球实物照片；(b) 用检测光路拍摄的钢表面图像

Fig. 2 (a) Picture of a first class steel ball; (b) steel ball surface image taken by the measurement optical path illustrated in Fig. 1



波前相位如图 3(c)和(d)所示,从相位图中可见钢球表面的形貌起伏变化很剧烈,而且变化深度远超过激光波长的范围,导致相位产生了很明显的包裹现象。将两个包裹相位做相减处理,然后对相位差中小于零的相位值加上  $2\pi$ ,得到等效波长为  $\Lambda = 0.0239$  mm的相位分布,如图 3(e)所示。显然等效波长的相位图中也存在相位包裹现象,但不难发现,该相位包裹是由相位中的线性倾斜因子造成的,该倾斜因子主要来源于相位提取时的滤波窗口位置误差和两不同波长光束间的平行度误差。另外从略带弧度的等相位线中还可以发现等效波长相位中存在曲率较小的球面波相位因子,该相位因子是由参考光波前与检测光波前的曲率差造成的。为了消除这些相位偏差,这里采用一种简单的相位掩模标定法<sup>[18]</sup>予以解决。该相位掩模的数学模型可表示为

$$\Gamma(x,y) = \exp\left\{-j\left[2\pi(f_x x + f_y y) + \frac{\pi}{\Lambda\Delta r}(x^2 + y^2)\right]\right\}. \quad (5)$$

式中需要标定的参数有空间载波频率( $f_x, f_y$ )和曲率半径  $\Delta r$ ,其中参数  $f_x$  和  $f_y$  是对相位中的倾斜因

子进行补偿,而参数  $\Delta r$  是对相位中的球面波因子进行补偿。参数( $f_x, f_y$ )的标定方法是将图 3(e)中的等效波长相位  $\Psi$  转换为光波复振幅函数即  $\exp(j\Psi)$ ,然后对该复振幅函数做傅里叶变换,提取频谱极大值的频谱坐标,该坐标即为( $f_x, f_y$ )。然后用该坐标构建的平面波函数乘以等效波长光波函数,即  $\exp(j\Psi) \cdot \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)]$ ,再提取其相位  $\Psi - 2\pi(f_x x + f_y y)$ ,并对该相位做二阶最小二乘拟合得到其中的球面波曲率半径  $\Delta r$ ,从而实现(5)式给出的相位掩模构建。然后用标定好的相位掩模(5)式乘以等效波长相位对应的复振幅函数  $\exp(j\Psi)$ ,并提取其中的相位数据如图 3(f)所示,显然经相位掩模补偿后的等效波长相位已经不存在相位包裹现象。对图 3(f)进行圆形区域内的数据提取得到图 3(g),从中可清晰分辨出钢球表面的瑕疵分布情况。图 3(h)是由等效波长相位图 3(g)转换而来的钢球表面瑕疵三维分布图,可见钢球瑕疵分布在  $[-0.01, 0.01]$ (单位:mm)区间,未超过等效波长  $\Lambda = 0.0239$  mm的范围。

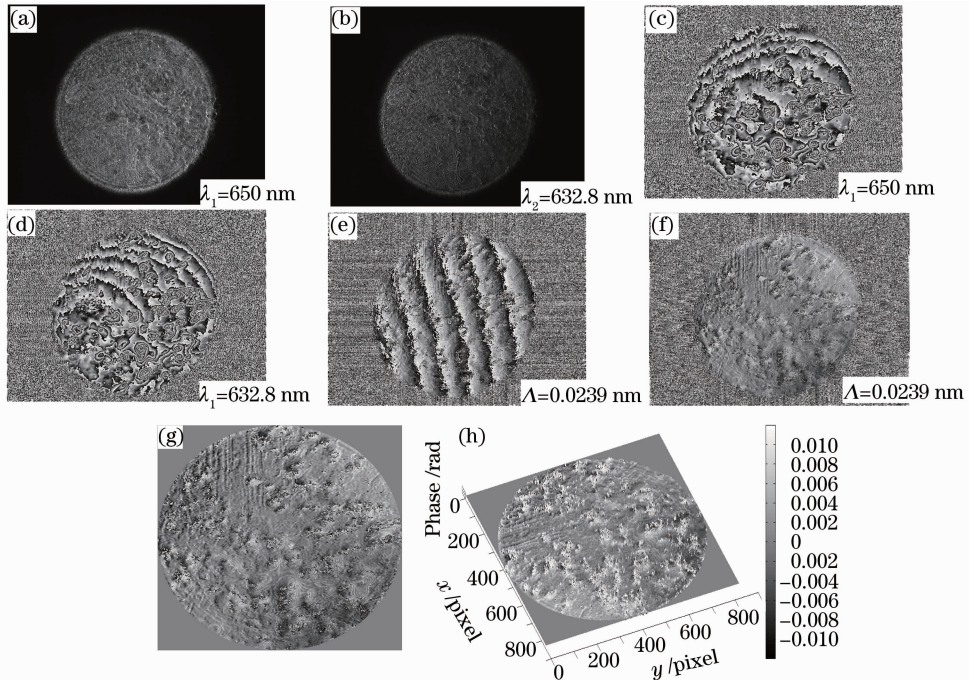


图 3 用两个不同波长记录的干涉图。(a)  $\lambda_1 = 650$  nm; (b)  $\lambda_2 = 632.8$  nm; (c) 由  $\lambda_1$  干涉图提取的包裹相位图; (d) 由  $\lambda_2$  干涉图提取的包裹相位图; (e)  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  包裹相位差即等效波长  $\Lambda = 0.0239$  mm 相位; (f) 用相位掩模去除相位畸变后的等效波长相位; (g) 去除背景噪声后的相位图; (h) 由等效波长相位转换得到的钢球表面三维形貌分布

Fig. 3 Interference image obtained with two laser wavelengths. (a)  $\lambda_1 = 650$  nm; (b)  $\lambda_2 = 632.8$  nm; (c) wrapped phase obtained from  $\lambda_1$  interference image; (d) wrapped phase obtained from  $\lambda_2$ ; (e) phase map for equivalent wavelength  $\Lambda = 0.0239$  mm; (f) phase map for equivalent wavelength after phase distortion correction; (h) 3D profile of the measured steel ball surface

相位掩模的标定过程虽然简单,但其中要涉及到多次傅里叶变换和二阶最小二乘拟合,因此会延长数据处理时间,但比较幸运的是,该相位掩模的参数主要取决于光路结构的调整参数,如两个不同波长照明光之间的平行度和两显微物镜到 CCD 的距离差等,因此只要光路结构固定,在测量不同钢球或钢球的不同位置表面时相位掩模都不需要重新标定,这就大大提高了数据处理速度。为了验证该方法的有效性,这里进行了大量的测量实验,结果证实该相位补偿法确实很有效,而且钢球旋转时的径跳影响也不显著。图 4 是实验中任选的四个不同钢球(记为 A, B, C, D)的表面相位检测结果,其中图 4 (a)~(l)中每 3 个图为一组,某一组图属于某一个钢球在三个不同表面位置的检测。从实验结果可看出,钢球的表面三维形貌在双波长干涉和相位掩模补偿处理下获得了清晰的三维数据,通过这些数据就可以对钢球表面质量进行精确的检测和评估,比如测量反映钢球表面粗糙度的  $R_a$  值,其定义为

$$R_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\Delta h_{ij} - E)^2}{MN}}, \quad (6)$$

式中  $\Delta h_{ij}$  为  $(i, j)$  像素对应的表面高度,  $M, N$  为数字图像的像素行列数,  $E = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta h_{ij}}{MN}$  为钢球表面形貌的平均高度。

在检测实验中每次测量数据的处理流程为:1) 从两幅不同波长的干涉图中提取相位;2) 做相减运算得到等效波长相位分布;3) 将等效波长相位转换成复振幅,并用已标定好的相位掩模乘以等效波长复振幅,消除倾斜因子和二次球面波相位畸变;4) 提取经过畸变校正的等效波长数字相位。实验中数据处理的规模是  $1040 \text{ pixel} \times 1392 \text{ pixel}$ , 数据处理使用的 CPU 型号是 Pentium(R) Dual-Core CPU E5200@2.5 GHz, 处理软件选用 Matlab, 最后经统计每一次测量的平均处理时间为 1.2635 s, 其中时间占用较多的是图像读取和傅里叶变换, 显然若采用更高配置的计算机和选用 C 语言程序数据处理速度可以更快, 另外实际应用中图像采集也不需要选用这么高的像素规模。

钢球检测的最终目的是要获取钢球表面的缺陷特征, 然后用模式识别和分类算法对其进行质量评估和等级分选。而缺陷提取的关键在于阈值的确定, 利用钢球表面的深度信息可以直接确定缺陷的分割阈值, 因为钢球在轴承中的工作特性直接与钢

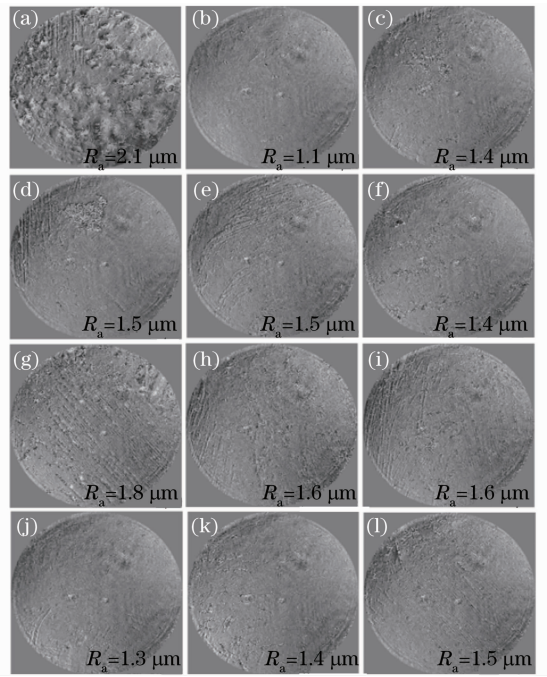


图 4 四个钢球(A, B, C, D)分别在三个不同表面区域测得的三维形貌以及相应的粗糙度值

Fig. 4 Measured 3D surface profiles located in three different areas on four steel balls noted as A, B, C, D, and the surface roughness are measured as  $R_a$

球表面形貌的变化深度有关。若钢球表面起伏变化小, 则钢球滚动就顺滑, 磨损也小, 反之则钢球工作时就会出现大的振动和磨损, 从而影响钢球的寿命, 因此钢球表面的深度信息是鉴别缺陷的最直接依据。这里的处理方法是先计算钢球表面形貌高度的平均值  $E = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta h_{ij}}{MN}$ , 然后计算所有数据与平均值的绝对距离  $|\Delta h_{ij} - E|$ , 若该距离超过阈值高度  $\Delta h_t$ , 则相应的数据归为缺陷数据令其等于 255, 反之则令其等于 0。这里的阈值  $\Delta h_t$  可根据钢球具体的质量检验标准或实验测试给予确定。作为效果验证, 设  $\Delta h_t = 3.25 \mu\text{m}$  然后对图 4 中的测量数据进行了二值化, 结果如图 5 所示。显然, 经过二值化后, 钢球表面缺陷分布更为明显了, 缺陷形态各异, 主要以类似刮擦留下的线条痕迹为主, 如 C 钢球三幅检测图[图 5(g)~(i)]和 B 钢球的后两幅检测图[图 5(e)~(f)], 从 B 钢球的第一幅检测图图 5 (d) 还可看到箭头所示的一块大面积缺陷。此外, 对比观察还可以发现, 所有钢球检测图中都存在两个相同的点状缺陷, 如圆环所示, 对照图 4 可以看得更清楚。显然这两个点缺陷不应该是待检钢球上的, 而是存在于参考钢球, 因此为了避免误检, 所提方法



必须选用高质量的参考钢球。

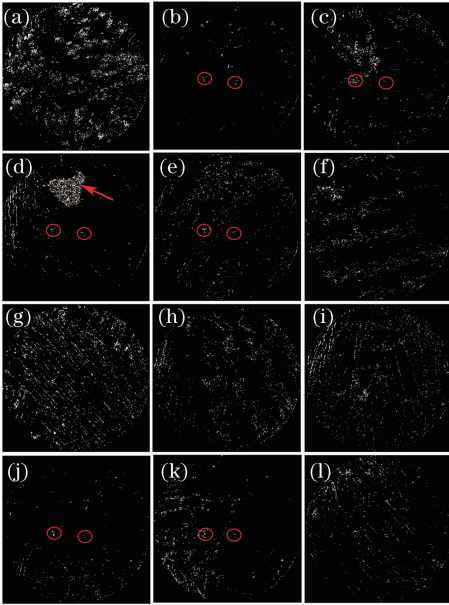


图 5 四个钢球(A,B,C,D)在缺陷阈值取  $\Delta h_t = 3.25 \mu\text{m}$  时的二值化表面缺陷分布图

Fig. 5 Binary images of steel balls (A, B, C, D) surface flaw with binary threshold of  $\Delta h_t = 3.25 \mu\text{m}$

## 5 结 论

钢球是轴承的最重要配件,它的质量直接影响着轴承的质量,实际生产过程中必须对钢球表面质量进行严格检测。本文提出了一种基于双波长干涉数字相位测量的钢球表面缺陷检测方法,其照明光路采用波前匹配照明和双波长激光干涉光路,使物镜入射的会聚光波前曲率半径正好与钢球表面曲率半径相等,此时钢球将获得最大的有效照明,其有效照明的空间立体角取决于物镜的数值孔径大小,从而获得均匀清晰的表面图像。利用双波长数字相位解析算法很好地避开了相位解包裹问题,针对其中的倾斜因子和二次球面波相位畸变,本文提出采用相位掩模标定法进行有效处理,该方法没有复杂的算法,计算量小,可以适用于实时性要求很高的钢球缺陷在线检测,大量钢球检测实验验证了所提文方法的有效性。

### 参 考 文 献

- 1 Yongzhi Lin, Xianli Liu, Haiying Han, *et al.*. Detection and recognition of steel ball surface defect based on MATLAB[J]. Key Engineering Materials, 2009, 416: 603-608.
- 2 Kakimoto Akira. Detection of surface defects on steel ball bearing in production process using a capacitive sensor[J]. Measurement, 1996, 17(1): 51-57.
- 3 Donelson J, Dicus R L. Bearing defect detection using on-board accelerometer measurements[C]. Washington: Proceedings

- of the 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conference, 2002. 95-102.
- 4 Liu Deli, Liu Xianli, Hao Huanrui, *et al.*. Study for steel ball surface quality detecting based on vision technique[C]. SPIE, 2008, 6836: 683611.
- 5 Pan Hongping, Dong Shen, Liang Yingchun, *et al.*. Automatic detection and recognition of steel ball's surface flaws[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(4): 369-372.  
潘洪平,董申,梁迎春,等. 钢球表面缺陷的自动检测与识别[J]. 中国机械工程, 2001, 12(4): 369-372.
- 6 Pan Hongping, Dong Shen, Liang Yingchun. Modeling of steel ball's grade based on image texture feature [J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2000, 36(4): 45-48.  
潘洪平,董申,梁迎春. 基于图像纹理特征的钢球等级分类建模[J]. 机械工程学报, 2000, 36(4): 45-48.
- 7 Wang Peng, Zhao Yanlin, Liu Xianli. The key technology research for vision inspecting instrument of steel ball surface defect[J]. Key Engineering Materials, 2008, 392-394: 816-820.
- 8 Zhao Yanling, Wang Hongyun, Zhu Xianchen, *et al.*. Parametric design of steel ball meridian unfolding wheel based on UG[J]. J Harbin University of Science and Technology, 2007, 12(3): 141-143.  
赵彦玲,王洪运,朱宪臣,等. 基于UG的钢球子午线展开轮参数化设计[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2007, 12(3): 141-143.
- 9 Wang Y W, Ding K, Jia D K, *et al.*. Kinematic analysis of detection of steel ball surface defect based on ADAMS [J]. Advanced Materials Research, 2010, 102-104: 83-87.
- 10 Yu Zhe. Study of Steel Ball Flaw Detection Algorithm and Realization Based on FPGA[D]. Shanghai: Fudan University, 2010. 19-30.  
俞哲. 钢球瑕疵检测算法的研究及FPGA实现[D]. 上海: 复旦大学, 2010. 19-30.
- 11 Song Xiaoxia Yang Jianxi, Xu Hongzhe. Method for surface defect detection of steel ball based on machine vision[J]. Bearing, 2010, (5): 45-48.  
宋晓霞,杨建玺,徐红哲. 钢球表面缺陷的机器视觉检测方法[J]. 轴承, 2010, (5): 45-48.
- 12 Fang Sheng, Li Yousen, Li Weiwei, *et al.*. Application of machine vision in surface detection of steel ball based on NI vision assistant[J]. Instrumentation Technology, 2008, (5): 27-29.  
方胜,李有森,李巍巍,等. 基于NI Vision Assistant的机器视觉在钢球表面检[J]. 仪表技术, 2008, (5): 27-29.
- 13 D C Ghiglia, M D Pritt. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1998.
- 14 Zhang Yizhuo, Wang Dayong, Zhao Jie, *et al.*. Investigation on phase unwrapping algorithms in digital holography [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3323-3327.  
张亦卓,王大勇,赵洁,等. 数字全息中实用相位解包裹算法研究[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3323-3327.
- 15 Wang Huaying, Yu Mengjie, Liu Feifei, *et al.*. Four phase unwrapping algorithms based on fast Fourier transform[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(5): 1129-1133.  
王华英,于梦杰,刘飞飞,等. 基于快速傅里叶变换的四种相位解包裹算法[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(5): 1129-1133.
- 16 J Kuhn, T Colomb, F Montfort, *et al.*. Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition[J]. Opt Express, 2007, 15(12): 7231-7242.
- 17 Wang Yujia, Jiang Zhuqing, Gao Zhirui, *et al.*. Investigation on phase unwrapping in dual-wavelength digital holography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1009001.  
王羽佳,江竹青,高志瑞,等. 双波长数字全息相位解包裹方法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1009001.
- 18 Pan Weiqing, Zhu Yongjian, Lang Haitao. Phase-contrast imaging technology with digital holographic microscope based system calibration[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1812-1820.  
潘卫清,朱勇建,郎海涛. 基于系统标定的相衬显微数字全息方法[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1812-1820.

栏目编辑:何卓铭