

# 基于空间全角度光源的钢球表面微缺陷检测

冯超, 蒋毅\*, 赵晓梦

江南大学机械工程学院江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122

**摘要** 针对金属球面高反光及高曲率对表面微缺陷检测的不利影响, 提出一种基于空间全角度光源和图像融合的检测方法。通过空间全角度光源系统提供不同照明方案扫描球面获得图像信息, 利用图像融合对有效检测区域内微缺陷与背景的差异性进行累积, 放大微缺陷与背景差异, 提升微缺陷检测能力。实验结果表明, 基于所提方法的检测装置对直径为 20 mm、精度为 G16 的轴承钢球表面不同位置微缺陷的检测效果显著, 解决了金属球面高反光引起的检测盲区问题, 并对轴承钢球表面各种微缺陷具有良好的检测能力。

**关键词** 测量; 空间全角度光源; 钢球表面缺陷检测; 图像融合; 机器视觉

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0212002

## Micro Defect Detection of Steel Ball Surface Based on Spatial Omni-Directional Light Source

Feng Chao, Jiang Yi\*, Zhao Xiaomeng

*Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China*

**Abstract** Aiming at the adverse effect of high reflection and high curvature of metal sphere on surface micro-defect detection, a detection method based on spatial omni-directional light source and image fusion is proposed. The image information is obtained by scanning the spherical surface through different illumination schemes provided by the spatial omni-directional light source system. Image fusion is used to accumulate the difference between micro defects and background in the effective detection area, enlarge the difference between micro defects and background, and improve the ability of micro defect detection. The experimental results show that the detection device based on the proposed method can detect the micro defects at different positions on the surface of bearing steel ball with a diameter of 20 mm and a precision of G16 significantly, and solves the problem of blind area caused by high reflection of metal sphere, and has good detection ability for various micro defects on the surface of bearing steel ball.

**Key words** measurement; space omni-directional light source; steel ball surface defect detection; image fusion; machine vision

## 1 引言

钢球不论是作为轴承的重要组件, 还是作为独立滚动体, 被广泛应用于机械制造、航空航天、精密

仪器仪表等领域, 其表面质量与产品性能有着直接关系。随着图像传感器技术及图像处理算法的日趋成熟, 机器视觉检测技术<sup>[1-2]</sup>以设备简单、自动化程度高、检测精度高、稳定性好、成本低等优点在钢

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-02-28; 录用日期: 2021-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(51675233)

通信作者: \*jiangyi@jiangnan.edu.cn

球检测领域应用越来越多。

范峥等<sup>[3]</sup>利用小波变换和多尺度形态学融合算法进行钢球表面缺陷的边缘检测,但由于采用的是固定光源的反射式照明方法,钢球顶点是检测盲区。为了克服钢球表面反光引起的检测盲区问题,栗琳等<sup>[4-5]</sup>利用自制的环形漫反射穹顶光源配合双图像传感器的球面展开方法,在球列滚动过程中不断采集图像实现钢球表面缺陷的高速在线检测,但由于采用的是散射照明,对钢球表面部分缺陷凸显能力较弱,会造成部分缺陷漏检。宋宇航等<sup>[6-7]</sup>根据反射条纹检测原理对高反射曲面表面缺陷进行了研究,但系统检测精度由物体表面条纹成像间距决定,这在一定程度上限制了对曲面表面细微缺陷的检测能力。王义文等<sup>[8]</sup>提出一种钢球表面缺陷检测算法,该算法利用图像差分获取待检测钢球与标准图像的差分图像,只提取指定环带区域二值化缺陷特征进行检测,通过摩擦控制钢球滚动进行钢球全表面检测,每组钢球拍摄 10 幅图,对钢球的运动控制及动态图像采集要求严格。钱佳立等<sup>[9]</sup>基于激光散射和剪切干涉的光学原理,搭建精密检测平台实现对球面微米级别缺陷的检测,但此平台对精度要求极高,大规模运用于工业现场存在一定困难。

为此,针对钢球表面缺陷检测中高反光导致的视野盲区以及表面细微缺陷检测的难点,本文设计空间全角度光源缺陷检测系统,提出一种基于空间全角度光源与图像融合的方法,利用表面缺陷对光照方向的敏感性,以空间全角度光源作为系统光源,以直径为 20 mm、精度为 G16 的轴承钢球作为目标检测物,对球面微缺陷进行检测实验与讨论,验证系统性能。

## 2 系统检测原理

光束照射到不透明物体表面时,会发生漫反射、镜面反射、折射和吸收等现象,当被测工件材质为光滑金属时,表面的漫反射比例相对于镜面反射几乎可以忽略。比较理想的瑕疵照明方案是让表面瑕疵反射的光线进入镜头,而避开表面直接反射的光线,这样使得缺陷与背景有较好的对比度。

当检测表面为平面时,瑕疵位置反射光线路径变化进入相机<sup>[10]</sup>,从而采集到较暗背景下的一系列亮瑕疵,如图 1(a)、(b)所示。但当检测表面为球面时,表面法线方向均不相同,反射光线路径也随之变得更加复杂,且反射点附近出现光亮集中区,导

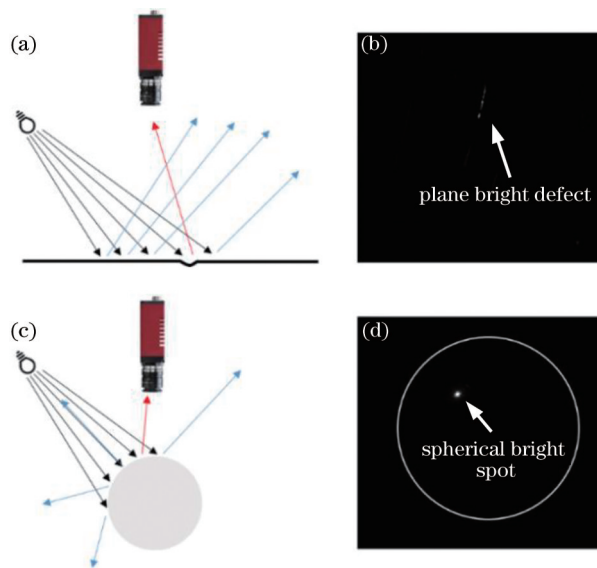


图 1 光照示意图。(a)(b)平面光照示意图;(c)(d)球面光照示意图

Fig. 1 Illumination diagrams. (a) (b) Plane illumination diagrams; (c) (d) spherical illumination diagrams

致球面部分区域过曝,产生高亮光斑,从而掩盖此处的表面图像信息,如图 1(c)、(d)所示。

当一束方向集中的光束照射到球面时,获得的被检测钢球图像可以分为 5 个不同的区域:S0 为背景区域,S1 为目标钢球区域;S2 为此条件下光束无法照射到的非识别区域;S3 为此方向点光源照射条件下的目标检测区域(ROI),如果此区域表面存在缺陷,则会改变表面光线反射情况,使缺陷区域呈现出与周围区域不同的亮度情况;S4 为此方向点光源照射条件下由于镜面反射导致的高光区域,表面图像信息全被淹没,如图 2 所示。

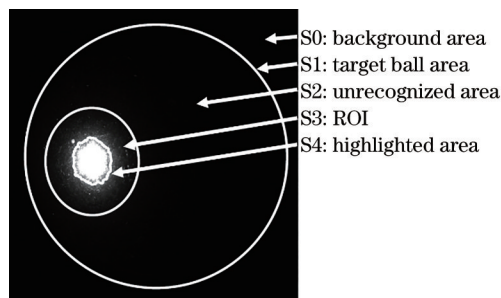


图 2 钢球表面区域分割示意图

Fig. 2 Schematic diagram of steel ball surface area division

另外,在相同条件下,光束在各个方向上的辐射亮度是不对称的,对表面各种缺陷的显现力也不同。当划痕或裂纹走向与光束入射方向垂直时,图像中缺陷表现最清晰;而当划痕或裂纹缺陷走向与

入射光方向一致时,在图像中几乎看不到这种缺陷<sup>[11]</sup>。若采集的图像信息中缺陷信息与背景差异较小,会对后续的图像处理提出更高的要求,甚至会造成缺陷漏检。因此,为更好凸显钢球表面缺陷

信息,多角度照明是一种可行的方案。图 3 为两种不同照明情况下钢球表面图像信息及同一擦痕缺陷对应的局部放大图,可以看出不同方向的照明对钢球表面同一缺陷的显现能力有着明显的区别。

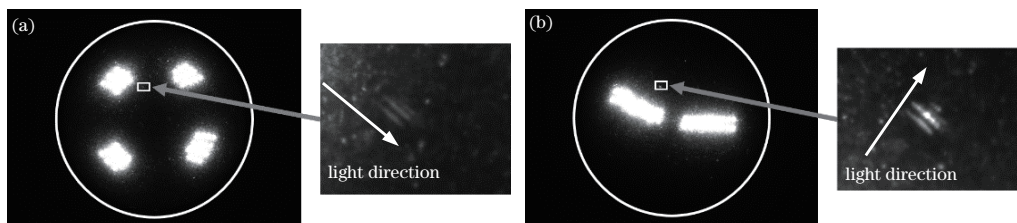


图 3 不同照明对同一擦痕缺陷的凸显情况。(a)区域照明缺陷凸显效果;(b)条形照明缺陷凸显效果

Fig. 3 Highlight of same scratch defect by different lighting. (a) Effect of regional lighting; (b) effect of strip lighting

综合以上分析,设计了一种空间全角度光源系统,以单个 light-emitting diode (LED)光源作为最小光照单元,组合半球空间中各个位置的光照单元形成多种不同的照明方案<sup>[12]</sup>。在不同照明方案下扫描获取钢球表面图像信息,通过图像分割提取有效检测区域,合理设计照明方案,使得钢球表面有效检测区域相互重叠,利用图像融合对有效区域内缺陷信息进行叠加放大,提升系统对球面微缺陷检测能力。

### 3 空间全角度光源设计

空间全角度光源由多个均匀分布在半球空间上的点光源组成,为保证光源系统的稳定性和快速响应能力,选用白色 LED 灯珠作为点光源,为保证足够的光照度,选用功率为 3 W 的白色 LED (CREE) 灯珠。为防止多余杂光影响系统照明效果,设计导光管限制 LED 光束发光角度。综合考虑光源系统的制作及 LED 单元组合光照效果,采用多层等间距的空间排布方式,将平面内等间隔分布的点跟随球面形状投影至球面上,形成 9 层轴向和周向等间隔均匀分布的球面阵列,将 LED 单元安装至各阵列点,组成空间全角度光源,如图 4 所示。

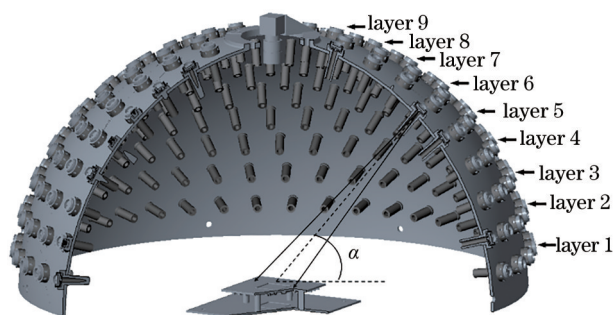


图 4 空间全角度光源模型

Fig. 4 Spatial omni-directional light source model

空间全角度光源由 9 层周向均布的 LED 单元组成,每一层 LED 单元的轴向仰角  $\alpha$  和周向间距  $\beta$  及 LED 单元数量如表 1 所示。

表 1 LED 单元球面分布参数表

Table 1 Spherical distribution parameters of LED unit

Layer No.	Number of LED units	$\alpha / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$
1	42	7.9298	8.5714
2	40	16.1369	9.0000
3	38	24.3439	9.4737
4	35	32.5509	10.2857
5	32	40.7579	11.2500
6	28	48.9649	12.8571
7	23	57.1719	15.6522
8	18	65.3790	20
9	12	73.5860	30

空间全角度光源由 268 个 LED 单元组成,上位机实时发送 LED 阵列的控制指令至下位机光源控制器,下位机收到控制指令后进行指令解析,控制数模转换器输出模拟量,经放大电路放大后驱动每个 LED 单元。

### 4 图像处理算法

空间全角度光源系统可设计多种照明方案以获得多幅钢球表面图像信息,对每一照明情况下获得的图像进行图像分割和缺陷提取融合,进而完成钢球表面有效检测区域内的检测。图像处理过程分为 6 步,如图 5 所示。

1) 滤波降噪,对原图像进行滤波去除高频噪声干扰。高频噪声影响缺陷信息的提取,采用自适应中值滤波<sup>[13]</sup>平滑图像来消除该类噪声。



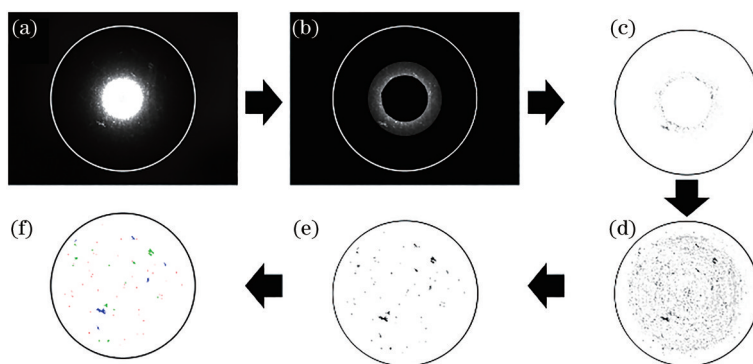


图 5 图像处理。(a)滤波降噪;(b)图像分割;(c)图像差分(反色);(d)图像融合(反色);(e)缺陷提取(反色);(f)缺陷分类  
Fig. 5 Image processing. (a) Filtering and noise reduction; (b) image segmentation; (c) image difference (reverse color); (d) image fusion (reverse color); (e) defect extraction (reverse color); (f) defect classification

2) 图像分割,提取 ROI。以标准无缺陷钢球为参考,利用阈值分割<sup>[14]</sup>提取各照明情况下有效区域作为模板,利用模板进行 ROI 提取。

3) 图像差分,去除光照背景。首先以标准无缺陷钢球为参考,获得此光照条件下的图片,利用形态学顶帽变换结合图像滤波算法<sup>[15]</sup>提取此光照条件下的球面光照背景。然后以此光照背景为基础,使用图像差分<sup>[8]</sup>获得去除光照背景的钢球表面图像信息,从而消除钢球表面的光照不均对缺陷提取的影响。

4) 图像融合,重复步骤 1)~3)对各照明情况下去除光照背景的图片进行叠加。为消除待检测钢球表面与标准无缺陷钢球表面细微差异引起的噪音,只提取差分图像中像素灰度大于等于  $T_d$  的像素进行融合,利用缺陷区域在各照明情况下与标准背景灰度的差异性,通过图像加法累积缺陷区域的差异,实现对缺陷信息的放大,从而将微缺陷与噪音分离。

5) 缺陷提取,通过阈值分割及特征选择提取缺陷信息。对于去除光照背景后的待检测图像,像素

灰度  $g \in [0, 255]$ ,把图像中的像素依据阈值  $T$  分为背景区域类  $S_b = [0, T)$  和目标缺陷区域类  $S_o = [T, 255]$ 。为提高对不同缺陷的识别准确率,设置灰度分割阈值为  $T_1$  和  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ),区域面积阈值为  $A_1$  和  $A_2$  ( $A_1 < A_2$ ),分两次提取缺陷信息<sup>[16]</sup>。设像素点  $(x, y)$  处的像素灰度为  $g(x, y)$ ,第  $i$  个像素连通域为  $R_i$ ,该连通域的面积  $A_i$ ,若  $R_i = \{g(x, y) \geq T_1 \& A_i > A_1\}$ ,此连通域为缺陷区域;  $R_i = \{g(x, y) \geq T_2 \& A_i > A_2\}$ ,此连通域也为缺陷区域。

6) 缺陷分类,对步骤 5)中提取到的缺陷区域进行形态学处理后,通过缺陷的形状特征与缺陷间位置信息进行缺陷的分类。

## 5 实验与讨论

为验证空间全角度光源检测系统的检测效果,搭建软硬件系统,以直径为 20 mm、精度等级为 G16 的轴承钢球为检测目标进行实验,检测系统如图 6(a)所示,目标检测钢球如图 6(b)所示。

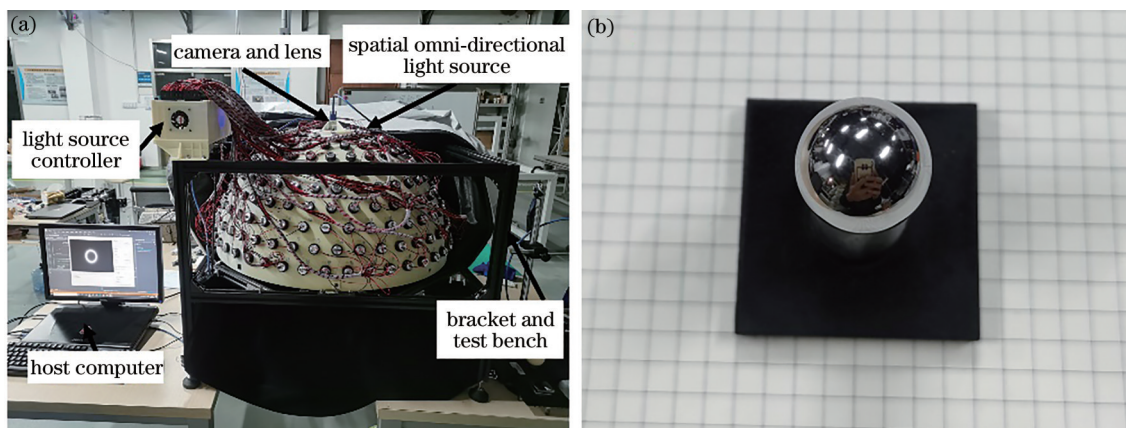


图 6 检测系统及目标检测钢球。(a)检测系统;(b)目标检测钢球

Fig. 6 Detection system and target detection steel ball. (a) Detection system; (b) target detection steel ball

硬件系统由上位机、光源控制器、空间全角度光源、相机、镜头、支架及检测台组成,上位机硬件配置为 Core i5-4210H CPU 及 16 GB RAM,下位机控制器包含主控芯片(STM32F103ZET6)及外围拓展电路,上位机软件由 VS2015 结合 HALCON 完成开发,图像采集设备为大恒 MER2-1220-32U3M 相机搭配远心镜头 XF-5MDT024X150 V5,图像采集参数如表 2 所示。

表 2 图像采集参数表

Image acquisition parameter	Value
LED unit power / W	2
Pixel resolution / ( $\mu\text{m}\cdot\text{pixel}^{-1}$ )	8
Exposure time / ms	80
Image gain / dB	3

### 5.1 照明方案设计

照明方案需满足钢球表面区域至少一次成为有效检测区域和检测快速性的要求,考虑到 LED 单元球面分布特性,条形扫描照明的球顶有效区域重合度高,而底部有效区域覆盖不全,环形扫描照明和区域扫描照明的球面有效区域覆盖较完整,因此设计环形扫描照明和区域扫描照明两种不同照明策略进行实验。环形扫描照明方案中将图 4 所示的 9 层 LED 按照相邻层数两两组合的方式生成不同的照明情况,如图 7(a)所示;区域扫描照明方案则将

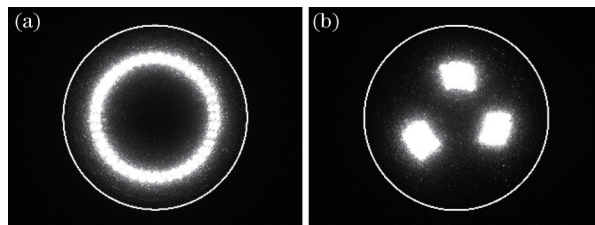


图 7 环形照明方案与区域照明方案。(a) 环形照明方案示例;(b) 区域照明方案示例

Fig. 7 Annular lighting scheme and regional lighting scheme. (a) Example of annular lighting scheme; (b) example of regional lighting scheme

球面分为 24 个区域,通过间隔组合不同区域形成不同的照明情况,如图 7(b)所示。

对于同一钢球采用以上两种不同照明方案进行拍摄,对比两种照明方案对缺陷的凸显效果。同一钢球图像中环形照明方案的有效检测区域相较于区域照明方案较为连续,光照方向发散且背景均匀,不同位置的划痕和擦痕等缺陷能被较完整地凸显,对于斑点、麻点和凹坑等缺陷也具有较好的凸显能力。通过多次实验比较,环形照明方案对缺陷的凸显能力整体优于区域照明方案,因此暂选用环形照明方案。

结合钢球表面图像情况,设钢球表面图像灰度值  $g(x, y) \geq 25$  的区域为有效检测区域,照明方案及有效检测区域如图 8 所示,其中有效区域中的灰色区域为累计有效检测区域,累积有效区域与球面

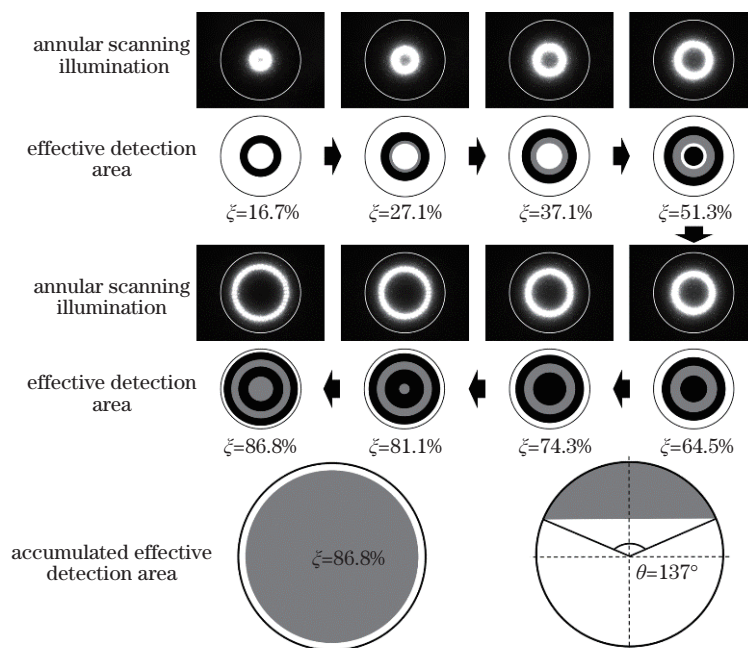


图 8 环形扫描照明光照区域示意图

Fig. 8 Schematic diagram of illumination area of annular scanning illumination

投影面积的比为  $\xi$ , 有效区域中的黑色区域为此光照下新增有效检测区域。

经过环形扫描照明后, 钢球表面累积有效检测区域占比  $\xi$  约为 86.8%, 钢球的有效检测角  $\theta$  约为 137°。图 9 为有效检测区域叠加示意图, 从图 9 中可以看出, 成为有效检测区域至少 2 次的球面区域占比为 81.1%, 有效区域重叠部分可融合缺陷信息、放大缺陷差异, 从而提升微缺陷检测能力。

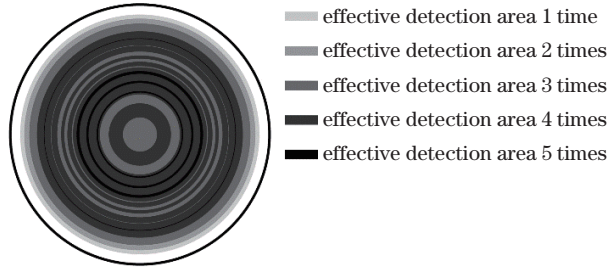


图 9 有效检测区域叠加示意图

Fig. 9 Schematic diagram of effective detection area overlay

### 5.2 系统参数的确定

检测系统待设定参数主要有图像融合中噪声分割阈值  $T_d$  与缺陷提取中的阈值  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $A_1$  和  $A_2$ 。对比滚动轴承钢球表面缺陷图册<sup>[17]</sup>可知, 轴承钢球表面细微缺陷主要分为斑点、擦痕、麻点、划条和凹坑等, 合理设置上述参数使系统对各类缺陷达到最优检测性能。

对于图像融合中噪声分割阈值  $T_d$ , 在其他参数相同时, 不同的  $T_d$  导致缺陷信息融合后图像中的噪声干扰程度不同。  $T_d$  过小导致融合图像存在较多干扰噪音, 如图 10(a) 所示; 而  $T_d$  过大导致细微缺陷提取不完整, 如图 10(b) 所示; 多次调参实验结果表明, 当  $T_d=30$  时, 噪声消除效果最佳, 缺陷提取效果如图 10(c) 所示。

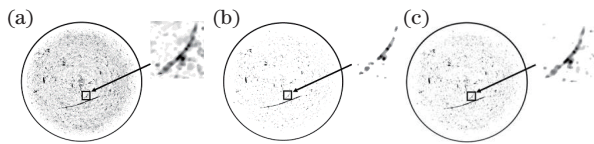


图 10 噪声分割阈值  $T_d$  对缺陷提取的影响。(a)  $T_d=10$ ;  
(b)  $T_d=50$ ;(c)  $T_d=30$

Fig. 10 Influence of noise segmentation threshold  $T_d$  on defect extraction. (a)  $T_d=10$ ; (b)  $T_d=50$ ; (c)  $T_d=30$

所提检测系统中, 相机像素分辨率为  $8 \mu\text{m}/\text{pixel}$ , 假设系统的缺陷区域提取能力为 80%。设定系统最小可检测缺陷面积  $A_1=30$ , 则理论上当钢球表面缺陷面积超过  $2400 \mu\text{m}^2$  时, 缺陷能够被

缺陷检测系统识别, 以实现表面斑点、擦痕及凹坑缺陷的检测; 设置  $A_2=400$  以满足表面麻点和划条缺陷的检测要求。

对于参数  $T_1$ 、 $T_2$ , 先通过多次实验确定大致范围:  $T_1 \in [205, 220]$  和  $T_2 \in [115, 130]$ , 再对多幅图像以人工局部阈值分割提取的缺陷区域作为参考进行提取, 所得钢球缺陷参考区域为  $R_r$ , 面积为  $A_r$ 。而以图 8 中环形扫描照明方案作为检测系统光源, 利用以上图像处理算法提取缺陷, 所得缺陷检测区域为  $R_t$ , 面积为  $A_t$ , 建立以下标准评判系统缺陷检测性能。

$$R_c = R_r \cap R_t. \quad (1)$$

区域  $R_c$  的面积为  $A_c$ , 则此照明方案下的缺陷提取正确率  $\eta_a$  的表达式为

$$\eta_a = A_c / A_r. \quad (2)$$

此照明方案下的缺陷检测准确率  $\eta_p$  的表达式为

$$\eta_p = A_c / A_t. \quad (3)$$

检测系统应优先保证缺陷被完全检出, 其次尽可能减小误检率, 即应优先保证缺陷检测准确率  $\eta_p$ , 在保证检测准确率的前提下提高缺陷提取正确率  $\eta_a$ 。因此, 以综合检测率  $\eta$  作为综合评判标准。

$$\eta = (\eta_a + 2\eta_p) / 3, \quad (4)$$

则  $M$  幅图像的综合检测率均值  $\bar{\eta}$  的表达式为

$$\bar{\eta} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \eta_m. \quad (5)$$

以 1 为步长, 通过网格搜索寻找双阈值  $T_1$  和  $T_2$  组合使综合检测率均值  $\bar{\eta}$  最大, 搜索得到的最优分割阈值  $T_1$  和  $T_2$  组合为  $T_1=210$ ,  $T_2=125$ , 此时  $\bar{\eta}=94.38\%$ , 双阈值搜索结果如图 11 所示, 将以上所得参数作为系统检测参数应用于钢球检测实验。

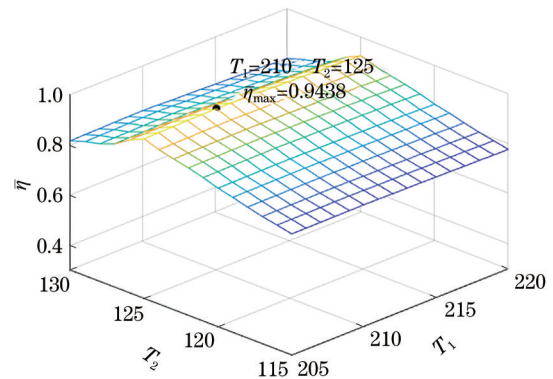


图 11 网格搜索最优双阈值结果

Fig. 11 Result of grid search optimal double threshold

### 5.3 钢球表面微缺陷检测实验结果

为验证所提系统的检测性能, 对若干直径为



20 mm、精度为 G16 的轴承钢球进行多组实验,对钢球表面浅划痕、凹坑、微擦痕和斑点等微缺陷的检测结果如图 12 所示(图中所给数值为标尺实际长度)。对于长度约为 1500  $\mu\text{m}$  浅划痕,虽然单一照明情况下缺陷与背景相近,浅划痕特征不连续,但经过图像

融合对缺陷信息累加后可以从背景中较完整地提取出浅划痕缺陷轮廓。对于表面凹坑缺陷,在一定方向的照明下,缺陷与背景的区别较为明显。对于长度约为 500  $\mu\text{m}$  微擦痕和直径约为 100  $\mu\text{m}$  斑点缺陷,所提检测系统也具有较好的检测能力。

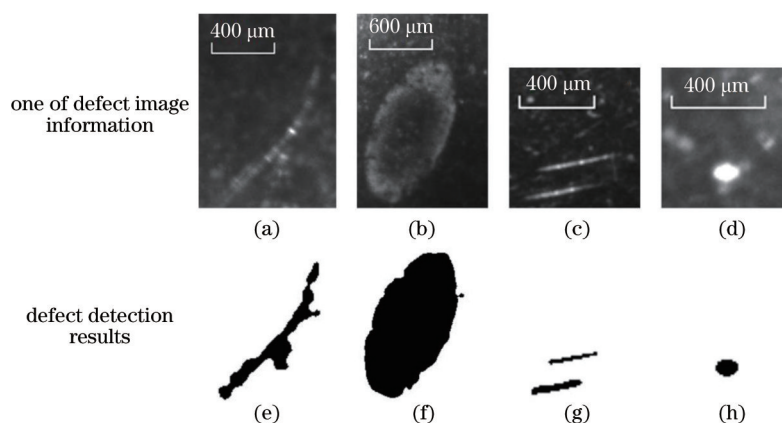


图 12 钢球表面微缺陷检测结果。(a)(e)浅划痕缺陷;(b)(f)凹坑缺陷;(c)(g)擦痕缺陷;(d)(h)斑点缺陷  
Fig. 12 Detection results of micro defects on surface of steel balls. (a)(e) Shallow scratch defect; (b)(f) pit defect; (c)(g) striation defect; (d)(h) spot defect

对于出现在不同位置的同一缺陷,所提检测系统的检测效果如图 13 所示,同一浅划痕缺陷出现在视场位置 1 和位置 2 时,受噪声影响,虽然提取到的

缺陷区域不完全一致,但浅划痕缺陷的基本轮廓大致相同,能被系统检测并分类。

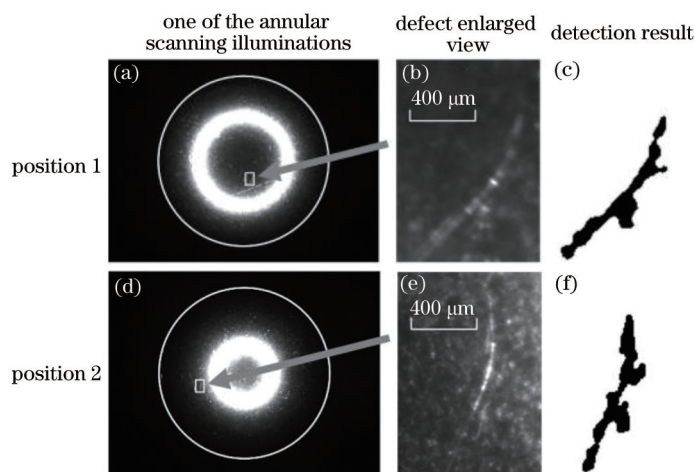


图 13 同一缺陷不同位置缺陷检测效果对比。(a)~(c)位置 1;(d)~(f)位置 2  
Fig. 13 Comparison of defect detection effects in different positions of same defect. (a)~(c) Position 1; (d)~(f) position 2

#### 5.4 照明方案优化

在实验中发现,当微擦痕、浅划痕缺陷以轴向近似竖直姿势出现时,此时环形扫描照明方案对此种微擦痕、浅划痕缺陷的凸显能力较弱,而区域扫描照明方案对缺陷的凸显能力较好,这是因为当划痕或擦痕走向与光束入射方向垂直时,缺陷凸显最清晰,如图 14 所示,其中白色箭头方向为缺陷区域

大致光照方向。

为提高系统对钢球表面细微缺陷的检测能力,对系统照明方案进行优化,采用环形扫描照明配合区域扫描照明的方案,照明方案及有效区域如图 15 所示,其中灰色区域为累计有效检测区域,黑色区域为此光照下新增有效检测区域。

照明方案优化后,钢球表面总有效检测区域较

优化前并未增加,  $\xi$  仍为 86.8%。但从图 16 可以看出, 照明方案优化后, 此系统对于表面细微擦痕、划

痕及斑点的检测能力大幅提升, 此钢球表面综合检测率  $\eta$  从 81.36% 提升至 96.45%。

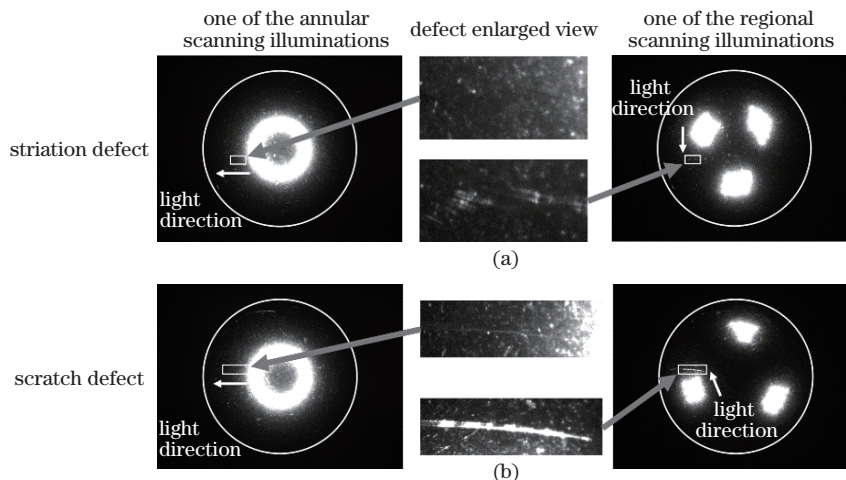


图 14 环形照明与区域照明缺陷凸显能力对比。(a)同一微擦痕照明实验;(b)同一浅划痕照明实验

Fig. 14 Comparison of defect highlighting ability between annular lighting and regional lighting. (a) Illumination experiment of same micro striation; (b) illumination experiment of same micro scratch

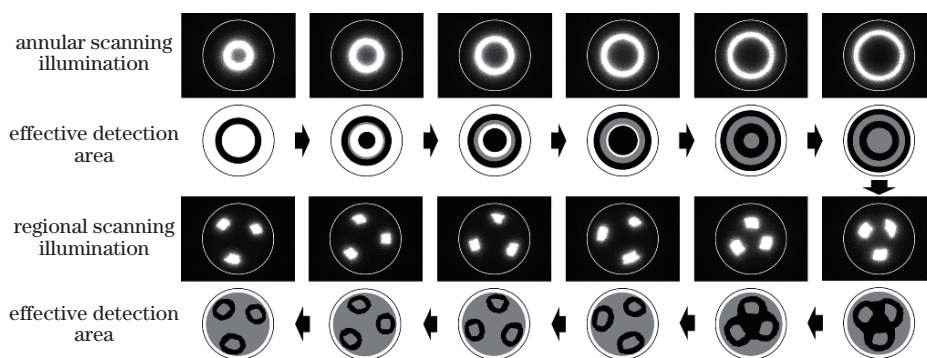


图 15 照明方案优化后光照区域示意图

Fig. 15 Schematic diagram of illuminated area after lighting scheme optimization

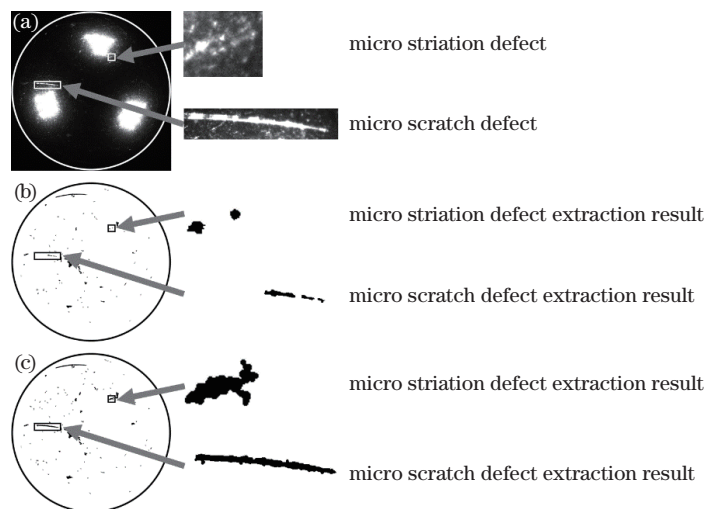


图 16 照明方案优化前后同一缺陷提取效果对比。(a)缺陷图像信息;(b)优化前提取效果;(c)照明方案优化后缺陷提取

Fig. 16 Comparison of same defect extraction effects before and after lighting scheme optimization. (a) Defect image information; (b) extraction effect before optimization; (c) extraction effect after optimization



从上述实验结果可以看出,通过合理设计检测系统照明方案,所提检测系统对于球面不同位置的微缺陷具有较好检测效果,可为金属球面等高反射曲面表面微缺陷检测提供一种可靠的新检测方法。

## 6 结 论

通过设计空间全角度光源,提出一种基于空间全角度照明和图像融合的缺陷检测新方法。对同一钢球采用多种不同照明方式获取多幅图像信息,分区域对缺陷信息进行提取,能较好解决由金属球面高反光引起的检测盲区问题;通过图像融合累积不同照明方式下缺陷区域与标准无缺陷区域的差异,将缺陷信息放大进而从背景中分离,对球面微缺陷检测效果显著,理论上对于直径为 20 mm 轴承钢球表面缺陷检测分辨率可达  $2400 \mu\text{m}^2$ 。实验结果表明,通过合理设计检测系统照明方案,可实现对轴承钢球表面有效检测区域内各位置划痕、凹坑、擦痕和斑点等微缺陷的检测,具有较大的工业应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou H C, Dong C C, Chen F, et al. A review on detection method of steel ball surface defect[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2018(10): 7-11, 47.  
周杭超, 董晨晨, 陈锋, 等. 钢球表面缺陷检测方法综述[J]. *装备制造技术*, 2018(10): 7-11, 47.
- [2] Lu R S, Wu A, Zhang T D, et al. Review on automated optical (visual) inspection and its applications in defect detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815002.  
卢荣胜, 吴昂, 张腾达, 等. 自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815002.
- [3] Fan Z, Liu G. Research on steel ball defect detection technology based on machine vision and modified morphological edge detection algorithms[J]. *Tool Engineering*, 2019, 53(9): 102-106.  
范峥, 刘刚. 基于机器视觉和改进形态学边缘检测算法的钢球缺陷检测技术研究[J]. *工具技术*, 2019, 53(9): 102-106.
- [4] Li L. Study on the key technology of surface defects inspection on highly reflective sphere based on vision [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 24-37.  
栗琳. 基于视觉的高反射球面缺陷快速检测关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2013: 24-37.
- [5] Sun H, Wang Z, Fu L H, et al. Analysis and implementation of novel method for steel ball surface detection[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2016, 35(1): 118-121.  
孙虹, 王仲, 付鲁华, 等. 一种新型钢球表面检测方法的分析与系统实现[J]. *机械科学与技术*, 2016, 35(1): 118-121.
- [6] Song Y H, Wang Z, Fu L H, et al. Detection of surface defect on highly reflective curved surface using reflective fringe pattern[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2017, 36(8): 1250-1254.  
宋宇航, 王仲, 付鲁华, 等. 一种高反射曲面表面缺陷的反射条纹检测方法[J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(8): 1250-1254.
- [7] Xiong X M, Shi H Q, Zeng X Y. Surface defect detection on polished surface based on reflection moiré [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(14): 141501.  
熊显名, 石红强, 曾星宇. 基于反射云纹的抛光曲面表面缺陷检测研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(14): 141501.
- [8] Wang Y W, Qu G T, Liu X L, et al. Image subtraction detection algorithm for surface defect of steel ball[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(10): 1699-1704.  
王义文, 屈冠彤, 刘献礼, 等. 钢球表面缺陷的图像差分检测算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28(10): 1699-1704.
- [9] Qian J L, Lu H Z, Yuan J L, et al. Inspection of the surface defects of bearing ball based on optical theories [J]. *Surface Technology*, 2018, 47(10): 309-314.  
钱佳立, 陆惠宗, 袁巨龙, 等. 基于光学原理的轴承球体表面缺陷检测方法研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(10): 309-314.
- [10] Jiang S, Yang L H, Ren Y J, et al. Defect detection in mirror-like object surface based on phase deflection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 031201.  
姜硕, 杨凌辉, 任永杰, 等. 基于相位偏折的类镜面物体表面缺陷检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 031201.
- [11] Qu X H, He Y, Han F, et al. Illumination system for detecting random defects on strongly reflective and complex surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(5): 547-551.  
曲兴华, 何滢, 韩峰, 等. 强反射复杂表面随机缺陷检测照明系统分析[J]. *光学学报*, 2003, 23(5):

- 547-551.
- [12] Wang D Y, Wang X K, Yu W W, et al. Off-axis LED curved array lighting design for leather defect detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 082202.  
王德宇, 王雪琨, 于文文, 等. 面向皮革缺陷检测的离轴 LED 曲面阵列照明设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 082202.
- [13] An Z Q, Wang Y. A metal surface defect detection method based on nonlinear diffusion and image difference[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(6): 277-283.  
安宗权, 王匀. 一种非线性扩散与图像差分的金属表面缺陷检测方法[J]. *表面技术*, 2018, 47(6): 277-283.
- [14] Zhang J R, Mo J Q, Cao J Y, et al. A robust image segmentation method of outdoor metal mark[J]. *Machine Design & Research*, 2016, 32(3): 31-37.  
张婧茹, 莫锦秋, 曹家勇, 等. 一种鲁棒的室外金属标记物图像分割算法[J]. *机械设计与研究*, 2016, 32(3): 31-37.
- [15] Zhao W, Ju M Y, Li Z S. A license plate image enhancement algorithm under complicated illumination [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(6): 976-985.  
赵伟, 鞠美玉, 李子双. 复杂光线下的车牌图像增强算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28(6): 976-985.
- [16] Li C, Yang Y Y, Xiong H L, et al. Dual-threshold algorithm study of weak-scratch extraction based on the filter and difference[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(7): 103-110.  
李晨, 杨甬英, 熊浩亮, 等. 基于滤波差分的双阈值弱划痕提取算法[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(7): 103-110.
- [17] National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Machinery Standard of the People's Republic of China: rolling bearings: atlas and the assessment methods for surface imperfections of steel balls. JB/T 10861—2008[S]. Beijing: China Machine Press, 2008.  
中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中华人民共和国机械行业推荐性行业标准: 滚动轴承 钢球表面缺陷 图册及评定方法 JB/T 10861—2008[S]. 北京: 机械工业出版社, 2008.