

# 基于光学原理的轴承球体表面缺陷检测方法研究

钱佳立, 陆惠宗, 袁巨龙, 吕冰海, 陈士豪

(浙江工业大学 超精密加工研究中心, 杭州 310014)

**摘 要:** **目的** 实现球体表面微小缺陷的非接触式检测。**方法** 基于激光散射和剪切干涉的光学原理, 设计了适用于微小缺陷检测的光路系统, 搭建了可适用于不同直径球体检测的精密可调节检测光路系统平台, 通过对标定板的检测及重复性实验, 确定光路系统的检测精度。采用高精度气浮主轴搭建了精密可调节的球体运动平台, 通过对直径 20 mm 的 G5 级高精度氮化硅陶瓷球的检测实验, 以及通过对一半抛光一半未抛光直径 20 mm 轴承钢球体的检测对比实验, 验证光路实验平台对于球体表面微小缺陷检测的可行性。**结果** 标定板上 4  $\mu\text{m}$  宽、63 nm 高的条纹的剪切干涉信噪比为 8 : 1, 具有相对较高的信噪比。G5 级高精度氮化硅陶瓷球的检测实验以及一半抛光一半未抛光轴承钢球体检测的对比实验, 验证了该光路实验平台中, 激光散射可灵敏地检测较深的微米级缺陷, 剪切干涉可灵敏地检测较浅的微米级缺陷。**结论** 基于光学原理搭建的球体表面微小缺陷检测平台, 可以实现对球体表面微米级别缺陷的检测。

**关键词:** 轴承球体; 激光散射; 剪切干涉; 表面缺陷; 光学检测

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)10-0309-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.10.042

## Inspection of the Surface Defects of Bearing Ball Based on Optical Theories

QIAN Jia-li, LU Hui-zong, YUAN Ju-long, LYU Bing-hai, CHEN Shi-hao

(Ultra-precision Machining Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**ABSTRACT:** The work aims to realize non-contact inspection for micro defects of spherical surface. Based on laser scattering and shearing interfere, the optical system applicable to micro defects was designed and the precise and adjustable optical system platform suitable for the balls with different diameter was established. The precision accuracy of optical system was determined by the inspection and repeatable experiments of calibration board. The precise and adjustable ball motion platform was built by high precision air bearing spindle. The feasibility of the optical experiment platform to inspect micro defects on ball surface was checked by the inspection experiment for G5  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic ball with diameter of 20 mm and the inspection comparison experiment for half-polished bearing steel ball with diameter of 20 mm. For a 4  $\mu\text{m}$  wide and 63 nm high stripe on the calibration board, the signal to noise ration of shearing interfere was 8 : 1 which was relatively high. The inspection experiment for 20 mm

收稿日期: 2018-02-22; 修订日期: 2018-03-26

**Received:** 2018-02-22; **Revised:** 2018-03-26

**基金项目:** 浙江省科技厅公益技术应用研究项目 (2015C31053); 浙江省科技厅公益技术应用研究项目 (2016C31042); 国家自然科学基金项目 (U1401247)

**Fund:** Supported by the Welfare Technology Application Study Project of Science Technology Department of Zhejiang Province (2015C31053), the Welfare Technology Application Study Project of Science Technology Department of Zhejiang Province (2016C31042), National Natural Science Foundation of China (U1401247)

**作者简介:** 钱佳立 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密检测技术。

**Biography:** QIAN Jia-li (1993—), Male, Master student, Research focus: precision inspection technology.

**通讯作者:** 陆惠宗 (1960—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为工业在线精密检测和测量技术及装备。邮箱: hzlu@zjut.edu.cn

**Corresponding author:** LU Hui-zong (1960—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision inspection and measurement technologies and instruments for in-situ manufacturing applications. E-mail: hzlu@zjut.edu.cn

G5 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic ball and the inspection comparison experiment for 20 mm half-polished bearing steel ball were carried out to verify that laser scattering optical path could sensitively inspect the deep micro defects and shearing interfere path could sensitively inspect shallow micro defects. The inspection platform for ball micro defects built based on optical theories can inspect defects of micron level on the ball surface.

**KEY WORDS:** bearing balls; laser scattering; shearing interfere; surface defects; optical inspection

对于滚动球轴承而言, 轴承球体的表面质量对轴承的性能有重要影响<sup>[1-3]</sup>。有研究表明: 麻点缺陷会使轴承球体单体振动值高出 3 dB, 擦伤会使之高出 4 dB, 用这些球体装配的轴承振动噪声将高出 3.7 dB<sup>[4]</sup>。也有实验指出: 球体表面污物将引起轴承工作面擦伤, 磨损量增加, 致使轴承寿命急剧下降。而钢球表面的点状锈蚀, 将对轴承的工作稳定性和寿命造成严重影响<sup>[5]</sup>。虽然, 随着制造工艺水平的提升, 轴承球表面缺陷的种类和数量在一定程度上得到了控制, 但再精良的工艺控制也不可能保证没有表面缺陷出现, 因此, 最终还要依靠质量检测环节。

目前, 国外发达国家对球体检测技术的研究较为成熟。在捷克、日本等发达国家, 球体自动检测机已被研制出来并广泛应用。捷克 Stimtools 公司的 AVIKO 系列<sup>[6]</sup>以及 KROB SCANNERS s.r.o 公司的 BASC 和 BS 系列钢球表面自动检测仪, 其利用光电、振动、涡电流传感器进行检测, 能够检测钢球表面和亚表面缺陷以及材料的非均匀质等。日本 Daio 公司的球体自动检测机是通过光学探伤技术来检测钢球表面缺陷及表面粗糙度, 设备需要设置 33 个光电传感器组成传感器排, 同时捕捉反射光及散射光的变化, 然后利用集成电路判断钢球缺陷的有无、质量的好坏, 并进行自动振动分类<sup>[7]</sup>。国内对轴承球表面缺陷自动检测的研究起步较晚。目前, 国内主要采用人工检测的方法, 但人工检测球体存在无统一检测评判标准、漏检率高、耗时等缺点<sup>[8]</sup>, 并且由于表面检测工作内容枯燥、劳动量大, 长期工作易造成视力损伤, 导致检测工人越来越难招。工业界应用的检测方法还有触针法、激光散斑法、磁粉探伤法、涡流探伤法等。触针法测量是接触式测量, 被测表面易划伤, 且测量速度慢、效率低<sup>[9]</sup>。激光散斑法只能对被测表面粗糙度给出总体评价, 对麻点、划痕等少量缺陷不敏感<sup>[10]</sup>。尽管磁粉探伤法不仅可以检测表面裂纹, 而且可以检测近表面的内部裂纹, 但设备昂贵、工序复杂, 磁化检测后还需要进行退磁<sup>[11]</sup>。

值得指出的是, 对于轴承球表面缺陷, 世界发达国家普遍采用光电与涡流技术相结合的检测方法, 而我国当前研究热点主要集中在机器视觉上, 利用光学技术的表面检测方法还未获得足够重视。因此, 本文对激光散射和剪切干涉做了一定的理论分析。基于此, 设计出适用于球体表面非接触式在线检测的光路系统, 并搭建球体运动平台。通过对光学检测标定板

的检测试验验证本实验平台的检测精度。通过对 G5 级氮化硅陶瓷球表面缺陷以及经过剪切增稠抛光<sup>[12]</sup>半个轴承钢球体表面缺陷的检测试验, 研究了剪切干涉和激光散射对微小瑕疵的灵敏度。

## 1 光学检测原理及光路

### 1.1 激光散射原理

激光光束以一定的角度入射到球体表面时, 若球体表面光滑无缺陷, 则光在球体表面只发生发射现象。对于粗糙且存在缺陷的表面, 入射光除了发生一定的反射外, 还会产生散射现象。当汇聚激光束照射在一个缺陷上时, 根据缺陷与激光波长的相对尺寸, 主要会有两种散射, 即瑞利散射和米氏散射, 米氏散射主要对缺陷尺寸大于激光波长有效, 散射光与入射光的关系由式 (1) 决定<sup>[13]</sup>。

$$\sigma = k \cdot \frac{(2\pi)^4}{\lambda^4} \cdot a^6 \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为散射截面;  $a$  为缺陷的直径;  $\lambda$  为波长;  $k$  为散射系数。可见, 波长越短, 散射越强烈, 但散射强度会随散射缺陷直径的 6 次方下降, 因此, 缺陷越小, 检测越困难。在本研究中, 选择了波长较短的绿光 ( $\lambda=532$  nm) 的双倍频 Nd:YAG 激光器作为光源, 但考虑到整个光学装置的复杂性, 采用了相对简单的散射光收集方法。

### 1.2 剪切干涉原理

当两束有一定小角度的激光束经过表面反射后, 表面形貌将会对光斑的波阵面产生影响, 如果在其中一个光斑中有微小缺陷存在, 则当两个激光光束经后续的干涉光路后, 将产生干涉。剪切干涉的光强由式 (2)—(3) 决定。

$$V_x = A_0 e^{i(\omega\sigma + kL + 2kd + \phi_0)} \quad (2)$$

$$V_y = A_0 e^{i(\omega\sigma + kL)} \quad (3)$$

式中:  $V_x$ 、 $V_y$  分别代表两个相互正交的线偏振光的振幅;  $k$  为波数,  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\sigma$  为时间;  $\omega$  为圆频率;  $L$  为光程;  $d$  为两束光所照射部分的光程差;  $\phi_0$  为第一束光相对于第二束光的常量位相差。当两束光在光电传感器上相互干涉后, 合成的光强见式 (4), 其中  $I_0 = 4V_x^2$ 。

$$I_1 = I_0 \cos^2 \left( kd + \frac{\phi_0}{2} \right) \quad (4)$$

这里假定两束光的振幅相等, 如果两束光的振幅不等, 则式(4)会有一个常数项。由式(4)可见, 最大光强是非相干光强的 4 倍, 最小光强是 0, 如果事先调节  $\phi_0$  使得式(4)为零, 则当两束相干光之间有缺陷出现时, 光强会偏离零点, 因此这种方法检测微小缺陷是非常灵敏的, 具有光学中暗场测量的效果。

### 1.3 缺陷检测光路系统

基于上述光学原理, 将一个基于激光剪切干涉原理的干涉显微系统和一个基于激光散射原理的暗场检测系统共同设计于一个光路中, 如图 1 所示。其工作原理: 偏振激光器发出的一束准直光经偏振片后入射到一个分光棱镜 BS 上, 偏振片的作用是将由偏振激光器发出的光的线偏振性进一步提高。调整 1/2 波片的光轴与入射偏振光的偏振方向成一个  $22.5^\circ$  的角度, 所以偏振光束经过该 1/2 波片后, 其偏振方向将旋转  $45^\circ$ , 但与波片光轴夹角的绝对值仍为  $22.5^\circ$ 。

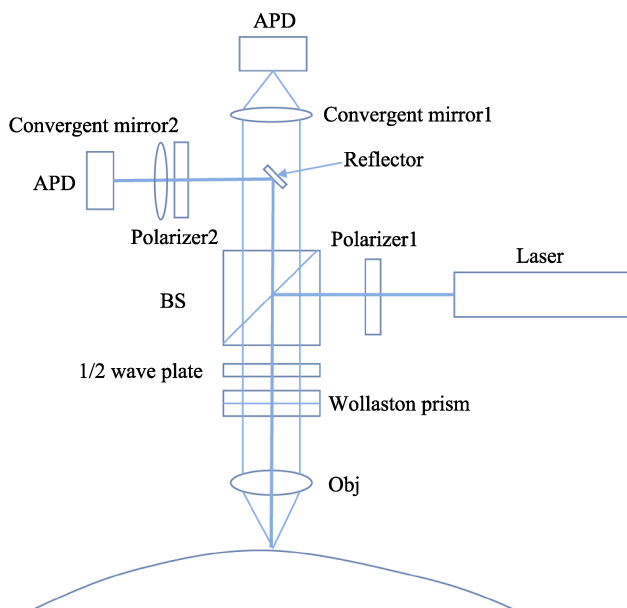


图 1 缺陷检测光路图

Fig.1 Optical path diagram for the inspection of defects

随后, 该光束再入射到一个渥氏棱镜中, 该渥氏棱镜的 o 光轴与入射光的偏振方向成  $45^\circ$ , 偏振光束经过该渥氏棱镜后, 50% 的光强将成为 o 光束, 另外 50% 的光强将成为 e 光束, o 光和 e 光的偏振方向相互垂直。渥氏棱镜将使 o 光和 e 光在离开渥氏棱镜时产生一个很小的角度, o 光和 e 光之间的夹角及物镜焦距决定了经过物镜聚焦后两光点之间的距离, 如果 o 光和 e 光之间的夹角很小, 则可以使两光点之间的距离达几个微米。

物镜聚焦后的两光点 (o 光和 e 光) 经过被测表面的反射和散射, 沿与原来相反的方向依次经过物

镜、渥氏棱镜、1/2 波片、BS, 然后经过一小口径反射镜反射再经过偏振片 2 (由于 o 光和 e 光振动方向相互垂直, 不满足相干条件, 因此设置偏振片 2)。偏振片 2 的作用是将 o 光和 e 光中沿偏振片 2 光轴方向的分量取出, 并经过一个汇聚镜 2 后在光电探测器上形成干涉。调整渥氏棱镜沿水平方向的位置, 可以使得被测表面是一个平面时, o 光和 e 光沿偏振片 2 光轴方向的分量干涉相消, 使得光电探测器上的光强接近零, 实现暗场检测条件。

当被测表面在两光点之间有微小的高度差时, 如划痕、麻点、凹坑、污渍等, 则 o 光和 e 光的光程差将发生变化, 使得在光电探测器上的干涉不再相消。此时光电探测器的光强大于零, 产生光电信号。光电信号的强弱取决于两个光点之间的光程差, 在光程差达到 1/4 波长或其奇数倍时, 信号最强, 从而可以非常灵敏地检测到光滑表面上的微小缺陷<sup>[14]</sup>。

## 2 球体缺陷检测平台搭建

本实验平台由光学检测平台、球体运动装置以及信号采集系统三部分组成。此光学平台固定于可实现空间三个方向调整的滑台上, 精度达到 0.01 mm, 从而针对不同大小的球体都可以实现精密的聚焦测量。

在两个光学系统中, 探测器都采用了 APD 探测器, 通过前置放大电路将光电信号在模拟段进行放大, 放大后的信号直接输入到一个信号采集卡 (阿尔泰 PCI8602 多通道信号采集卡, 最大采样频率为 250 kHz), 信号采集卡将信号数字化后由计算机记录。

信号采集过程中, 被测轴承球体安放在一个有调心装置的气浮主轴旋转平台上, 该气浮主轴的回转精度为 100 nm, 以防止在测量过程中, 由于主轴的偏心运动造成过大的测量误差。气浮主轴的旋转由电脑通过运动控制卡控制 (阿尔泰 USB1020 运动控制卡)。轴承球体旋转与信号采集同步进行。

## 3 实验

### 3.1 光路系统检测精度及灵敏度实验验证

通过上述搭建的实验平台对光路系统的检测精度和灵敏度进行实验验证。实验验证通过标定板实现, 如图 2 所示。由图 2 可知, 标定板上条纹宽度分

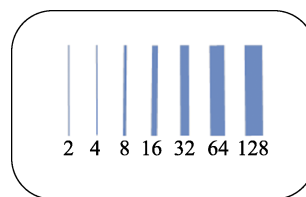


图 2 标准板条纹参数

Fig.2 Parameters of calibration board stripes

别为 2、4、8、16、32、64、128  $\mu\text{m}$ ，长度为 5 mm，条纹之间的间隔为 2 mm，条纹高度为 63 nm。实验时，将标准板放置在光学聚焦面上。

将标准板条纹中的一条 4  $\mu\text{m}$  宽的条纹移动到聚焦光点附近。沿  $x$  方向手动调节精密位移调节器，移动光学系统平台，软件自动记录散射和剪切干涉信号。结果显示，散射信号没有观察到信号明显变化，原因是对于深度较浅（<60 nm）的缺陷，散射信号不明显。图 3 是剪切干涉的测量结果。

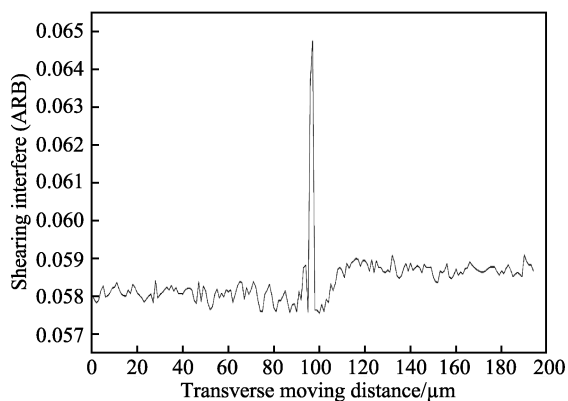


图 3 4  $\mu\text{m}$  条纹剪切干涉测量结果  
Fig.3 The inspection result of 4  $\mu\text{m}$  stripe under shearing interfere

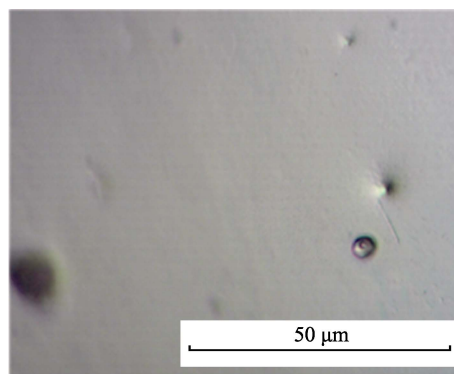
将光学系统沿  $x$  方向来回移动，记录每次经过 4  $\mu\text{m}$  条纹处的信号，对多次测量的结果进行处理后获得重复性数据，见表 1。重复性实验的结果显示，4  $\mu\text{m}$  宽、63 nm 高的条纹的剪切干涉信噪比为 8:1。可以得出，该光路系统具有良好的稳定性，可实现微米级别的缺陷检测。

表 1 标定板 4  $\mu\text{m}$  条纹重复性测量结果  
Tab.1 Repeatability measurements for 4  $\mu\text{m}$  stripe on the calibration board

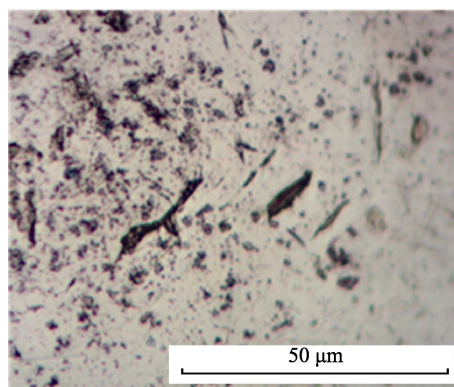
| Groups | The signal value of voltage/V | Groups             | The signal value of voltage/V |
|--------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 1      | 0.066                         | 7                  | 0.065                         |
| 2      | 0.065                         | 8                  | 0.062                         |
| 3      | 0.063                         | 9                  | 0.063                         |
| 4      | 0.064                         | 10                 | 0.064                         |
| 5      | 0.065                         | Mean value         | 0.064                         |
| 6      | 0.066                         | Standard deviation | 0.0011                        |

### 3.2 球体缺陷检测实验

首先用 20 mm 轴承钢球体作为检测对象，轴承钢球体一半经过剪切增稠抛光，另一半未抛光，如图 4 所示。激光散射测量结果如图 5 所示，可知在一个周期中，前半段的散射信号明显低于后半段的散射信号。这是因为半个球体经过抛光后，其表面更光滑，



a 未抛光



b 抛光60 min

图 4 抛光前后球体表面显微照片  
Fig.4 Micrographs of the spherical surface before and after polishing: a) before polishing; b) after 60 minutes polishing

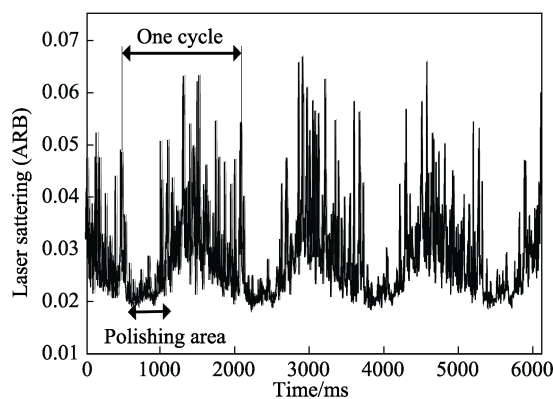


图 5 半抛光球体激光散射信号  
Fig.5 Signal of laser scattering of the half-polished ball

图 5 中的尖峰为球体表面缺陷。

剪切干涉信号如图 6 所示，可以看出，剪切干涉信号变化不明显，这是因为在半个球体经过 60 min 抛光后，球体表面的缺陷仍然比较深。

对超精密 G5 级氮化硅陶瓷球进行检测实验，其最大表面粗糙度为 0.014  $\mu\text{m}$ <sup>[15]</sup>，直径为 20 mm。检测结果中，激光散射信号如图 7 所示，剪切干涉信号如图 8 所示。从图 7—8 可以看出，对于高精度 G5 级氮化硅陶瓷球，激光散射和剪切干涉信号均没有明显的变化，这是由于高精度球体表面质量较高。但是

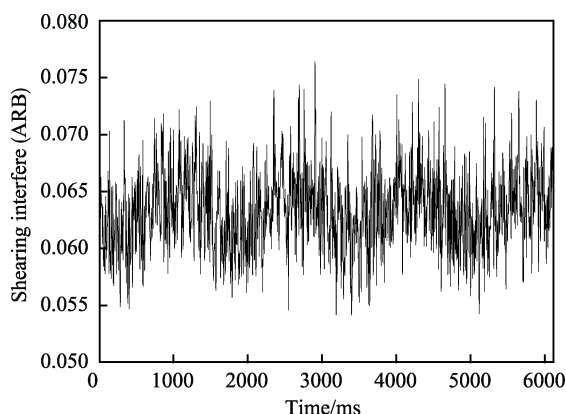


图 6 半抛光球体剪切干涉信号

Fig.6 Signal of shearing interference of the half-polished ball

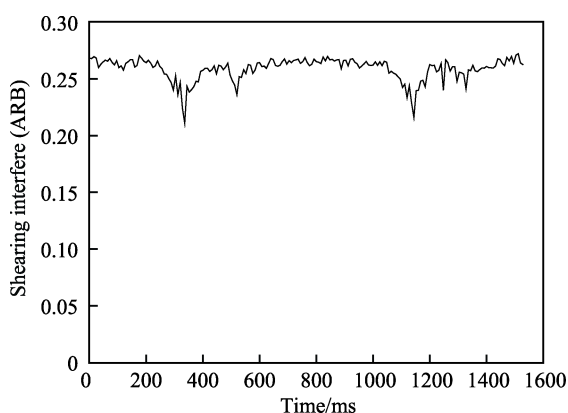


图 7 氮化硅球体激光散射信号

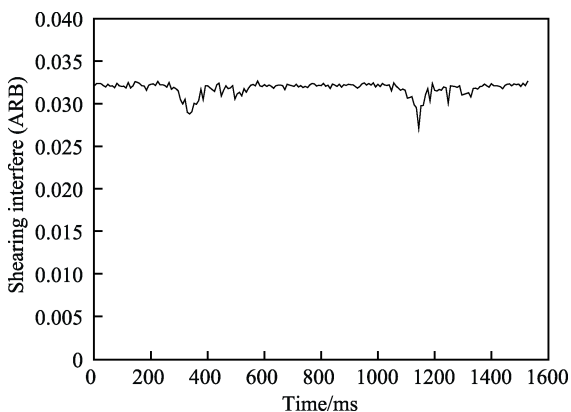
Fig.7 Signal of laser scattering of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball

图 8 氮化硅球体剪切干涉信号

Fig.8 Signal of shearing interference of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball

在 330 ms 和 1130 ms 处的激光散射信号和剪切干涉信号都有明显的向下峰,这是由于气浮主轴调心误差引起的,在后期处理时可以通过滤波将其滤掉。

## 4 结论

1) 通过对激光散射和剪切干涉的理论研究,建立缺陷检测光路平台,通过对标定板的检测,该光路系统可以检测微米级别的缺陷,且其具有相对较高的

信噪比 ( $>8:1$ )。

2) 通过对半抛光球体及 G5 级陶瓷球体的检测试验,剪切干涉对于较浅的 ( $<60\text{ nm}$ ) 缺陷比较敏感,而激光散射对于较深的 ( $>60\text{ nm}$ ) 缺陷比较敏感。整个光学检测平台可以很灵敏地检测球体表面的缺陷,达到非接触快速检测的目标。

## 参考文献:

- [1] 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.  
SUN Hong, WANG Zhong, FU Lu-hua, 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.
- [2] 杨东林,于正林.轴承钢球表面缺陷的快速检测方法[J].兵工学报,2009,30(6):797-802.  
YANG Dong-lin, YU Zheng-lin. Rapid detection method of surface defects of steel ball for balling[J]. Acta armamentarii, 2009, 30(6): 797-802.
- [3] HAO Shen, SHU Xiao-li, DUO Yu-gu, et al. Bearing defect inspection based on machine vision[J]. Measurement, 2012, 45(4): 719-733.
- [4] 杨阳.钢球表面缺陷视觉检测技术的研究[D].南昌:华东交通大学,2009:1-2.  
YANG Yang. Detection of surface defects on steel balls using machine vision[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2009: 1-2.
- [5] 刘秀莲,班君,罗燕,等.高温轴承钢球表面缺陷分析[J].失效分析与预防,2015,10(4):258-262.  
LIU Xiu-lian, BAN Jun, LUO Yan, et al. Surface defect analysis of high-temperature bearing steel ball[J]. Failure analysis and prevention, 2015, 10(4): 258-262.
- [6] 潘卫清,赵晓波.钢球表面缺陷的双波长干涉数字相位检测[J].中国激光,2014,41(5):211-216.  
PAN Wei-qing, ZHAO Xiao-bo. Measurement of steel ball surface flaw based on dual wavelength interferometry and digital phase detection[J]. Chinese journal of lasers, 2014, 41(5): 211-216.
- [7] Daio Steel Ball Mfg. Co., Ltd. Surface inspection apparatus of spherical matter: USA, US5457326A[P]. 1995-10-10.
- [8] 铨佳平.钢球全表面展开装置关键零件结构研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014:1-10.  
XUAN Jia-ping. Structure research for crucial component of steel ball whole surface development equipment[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014: 1-10.
- [9] 唐文彦,张军,李慧鹏.触针法测量表面粗糙度的发展及现状[J].机械工艺师,2000(11):40-42.  
TANG Wen-yan, ZHANG Jun, LI Hui-peng. Development and present situation of measuring surface rough-

- ness by needle contact method[J]. Machinery manufacturing engineer, 2000(11): 40-42.
- [10] 宁维莲, 甘永进, 胡良红, 等. 激光散斑测量物体表面粗糙度的研究[J]. 玉林师范学院学报, 2017, 38(2): 37-41.  
NING Wei-lian, GAN Yong-jin, HU Liang-hong, et al. The study of surface roughness measurement by laser speckle method[J]. Journal of Yulin Normal University, 2017, 38(2): 37-41.
- [11] 袁达. 圆棒磁粉探伤线的自动控制[J]. 江苏冶金, 2005, 33(2): 26-28.  
YUAN Da. Automatic control of magnetic particle inspection line for round bar[J]. Jiangsu metallurgy, 2005, 33(2): 26-28.
- [12] 李敏, 袁巨龙, 吕冰海. 剪切增稠抛光磨料液的制备及其抛光特性[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2513-2521.  
LI Min, YUAN Ju-long, LYU Bing-hai. Preparation of shear thickening polishing abrasive slurries and their polishing properties[J]. Optics and precision engineering, 2015, 23(9): 2513-2521.
- [13] 王峥, 徐平, 王文文, 等. 瑞利散射和米氏散射现象的实验演示[J]. 物理实验, 2010, 30(7): 27-29.  
WANG Zhen, XU Ping, WANG Wen-wen, et al. Demonstration experiment on rayleigh scattering and mie scattering[J]. Physics experimentation, 2010, 30(7): 27-29.
- [14] 陆惠宗, 钱佳立. 一种球体表面微小瑕疵的光学快速检测装置: 中国, CN105911072A[P]. 2016-08-31.  
LU Hui-zong, QIAN Jia-li. An optical fast detection device for tiny defects on the surface of sphere: China, CN105911072A[P]. 2016-08-31.
- [15] 彭岩. 高精度陶瓷球材料性能及加工表面质量评价方法的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013: 15-26.  
PENG Yan. Research on material properties and evaluation method of machined surface for high precision ceramic balls[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013: 15-26.