

基于图像钢球缺陷检测有效面积分析

向敬忠¹, 赵成岩¹, 赵彦玲¹, 谭玉华², 姜成浩³,
邓洁³, 张士横¹, 胡冬冬¹, 闫钊⁴

- (1. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 齐齐哈尔大学 应用技术学院, 黑龙江 齐齐哈尔 160006;
3. 齐齐哈尔大学 通信与电子工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 160006;
4. 哈尔滨市双琦环保资源利用有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150039)

摘要:基于图像检测钢球表面缺陷时有效面积选择不当严重影响检测精度和效率,首先对钢球表面检测最佳范围进行研究确定理想弧长;其次基于球带理论建立了有效面积与球带重叠关系模型,以此控制展开次数来降低重叠面积;最后利用有效弧长覆盖效率公式来直观地控制弧长冗余量所带来的重叠面积,达到提高检测效率的目的,并为钢球直径系列化检测系统开发奠定了重要理论基础。

关键词:理想弧长; 球带理论; 重叠面积; 展开次数; 覆盖效率

DOI: 10.15938/j.jhust.2017.01.011

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2017)01-0065-05

Analysis of Effective Area of Steel Ball Defect Detection Based on Image

XIANG Jing-zhong¹, ZHAO Cheng-yan¹, ZHAO Yan-ling¹, TAN Yu-hua², JIANG Cheng-hao³,
DENG Jie³, ZHANG Shi-heng¹, HU Dong-dong¹, YAN Zhao⁴

- (1. School of Mechanical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. Qiqihar University Institute of Applied Technology, Qiqihar 160006, China;
3. Qiqihar University Institute of Communication and Electronic Engineering Institute, Qiqihar 161006, China;
4. Harbin Shuangqi Environmental Resource Utilization Co., Ltd., Harbin 150039, China)

Abstract: Based on the image detection of steel ball surface defects, the accuracy and efficiency of detection are seriously impacted by the effective area selected improperly. Firstly, the surface detection of steel ball optimal range is studied to determine the ideal arc length; secondly, in view of the sphere zone theory establishes effective area and zonal overlapping relationship model, in order to restrict detection times by reducing the overlap area; finally, the formula of effective arc covering efficiency is utilized to directly control arc length redundancy caused by the overlap area to improve the detection efficiency and laid the important theoretical basis for system development of ball diameter series detection.

Keywords: ideal arc length; sphere zone theory; overlap area; detection times; covering efficiency

收稿日期: 2016-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(51275140).

作者简介: 向敬忠(1962—),男,教授,硕士研究生导师;

赵成岩(1989—),男,硕士研究生.

通信作者: 赵彦玲(1963—),女,教授,硕士研究生导师, E-mail: zhaoyanling@sina.com.

0 引言

随着自动化水平不断提高,对于机械设备的求也在与日俱增。轴承作为机械设备中主要零部件之一,其性能好坏直接影响机械设备工作性能^[1]。钢球是滚动轴承核心元件,它在加工过程中难免会发生碰撞、摩擦、腐蚀等情况,这些不利因素容易使钢球表面产生缺陷^[2],严重影响钢球在轴承中的运转精度、承载能力和寿命。目前所用方法为人工检测^[3-5],这种检测方式对工人视力损伤较大。操作时受情绪干扰,易发生过检或漏检影响检测效率和检测效果。

为解决人工检测带来的各种弊端,国内外学者开始着力于钢球表面自动化检测设备的研究^[6]。研究趋势有两大方面,一方面是图像采集与数据处理的研究^[7-9],潘洪平^[10]做了钢球表面缺陷的自动检测与识别,利用计算机图像处理,对已获得的钢球表面图像进行降噪、滤波、轮廓跟踪,得到缺陷性质、几何特征和纹理特征;Ng T W^[11]做了关于钢球表面缺陷识别的研究,提供了一种高品质的图像分析技术,能够清晰显示钢球表面各种缺陷。另一方面是钢球表面展开机构的研究^[12-14],龚凌云^[15]做了正弦机构在钢球展开中的应用,利用正弦机构的特点将钢球进行展开运动,使钢球在正弦机构的驱动下延水平轴方向上进行旋转,旋转一周后将球绕垂直轴旋转一定角度,并在正弦机构的驱动下进行旋转直至整个钢球完全展开。Akano O^[16],首先做了基于 ADAMS 钢球表面检测运动学分析,提出钢球表面展开的重要性;其次介绍 STEP 函数的用法,列出了参加展开的主要构件在 ADAMS 中的碰撞参数,并列举了 STEP 函数在主要构件工作时的具体应用。令钢球分别沿 X 轴、Y 轴方向旋转,并分析了在此过程中的受力;最终得出碰撞、振动给钢球展开带来运动不确定性的结论。以上研究虽然提供了钢球表面光学检测方法,但均缺乏在漏检或过检方面的详细分析。因此需要对检测有效面积、效率进行深入研究。

本文首先对钢球表面检测最佳范围进行研究确定理想弧长,再根据球带理论得出该弧长对应球带包裹在钢球表面上的面积。利用三条球带引出球带重叠现象并计算出多条球带重叠面积和极限重叠面积。根据实际情况确定钢球理想展开次数及对应理想球带宽度,达到减少展开时间提高效率的目的。

利用有效弧长覆盖效率公式来直观地控制弧长冗余量所带来的重叠面积,达到提高检测效率的目的。

1 钢球表面有效检测区域

1.1 钢球表面检测区域

在钢球表面图像采集时,因拍摄条件限制钢球表面不能够完全地被拍摄到,在图像采集过程中能够捕捉到的最大图像范围是钢球水平面直径所在圆周以上钢球表面,在这部分球面上某点切线斜率随着摄像头与某点距离增加而增大,因此球冠顶端斜率最小,接近水平面直径所在圆周上的点斜率最大。由于斜率较小点附近的钢球表面易于提供图像信息,斜率较大点处附近的表面不易提供图像信息,甚至不能够提供完整信息。综上所述将水平面直径所在圆周以上钢球表面划分为 3 个区域,即钢球中心区域 S_1 、钢球检测理想区域 S_2 和钢球边缘区域 S_3 ^[17],如图 1 所示。

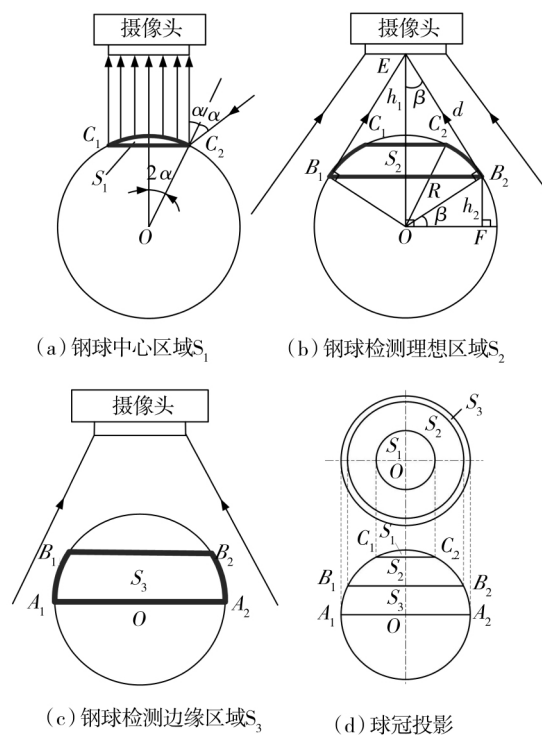


图1 检测区域 S_1 、 S_2 、 S_3

1.2 检测区域划分

钢球中心区域 S_1 : 根据光路可逆原理,可以通过反射光线和反射角推出入射光线位置与入射角大小。由于钢球镜面反射作用,使得部分反射光线竖直向上进入探头,并将部分反射光线所对应球冠部分称为钢球中心区域,如图 1(a) 所示,该部分特点

为探头部分完全映现在钢球球冠上,因此,可以确定 C_1 、 C_2 点具体位置和钢球中心区域面积。

钢球检测理想区域 S_2 : 过探头中心点向钢球表面作切线,切点位置为 B_1 、 B_2 , C_1 、 C_2 、 B_2 、 B_1 部分所形成的球面部分称为钢球检测理想区域,如图 1(b) 所示。

该区域特点是区域内各点斜率较小,对应投影面积较大,能够清晰地表达出钢球表面上该区域内信息, B_1 、 B_2 点位置可由式 (1) 确定,即

$$\sin\beta = \frac{h_2}{R} = \frac{R}{h_1} \quad (1)$$

式中: β 为直线 OE 与直线 EB_2 的夹角; R 为钢球半径; h_2 为点 B_2 与点 F 间的距离; h_1 为点 O 与点 E 间的距离。

根据式 (1) 可以看出,随着探头与钢球球心间距离逐渐增大, B_1 、 B_2 点沿着钢球边界圆弧向钢球水平面直径所在圆周移动,使得钢球检测理想区域面积逐渐增大,由于检测空间限制探头高度不能够无限地增大,因此可根据实际情况将探头高度调整至合适位置。

钢球边缘区域 S_3 : 如图 1(c) 所示, A_1 、 A_2 、 B_2 、 B_1 所围成的部分称为钢球边缘区域,该区域特点是区域内各点切线斜率随点到探头中心距离的增加而急剧增大,如图 1(d) 所示,投影面积随切线斜率增大而减小。虽然该区域面积较大,但投影面积较小,因此探头不能够捕捉到钢球表面上该区域内的完整图像信息,综上所述该区域图像内容不适于对钢球表面进行分析。

当钢球沿水平轴方向旋转时,上一时刻 S_1 区中部分点将移至下一时刻的 S_2 区中,同理 S_2 区中的部分点向 S_3 区域移动。在移动过程中 B_1 点左侧至钢球边界部分与 B_2 点右侧至边界部分没有被检测到,因此本文以弧 B_1 、 B_2 为检测弧长,重点研究该段弧长旋转一周后的有效检测面积。

2 有效球带面积确定

2.1 球带理论

如图 2(a) 所示,钢球上任意两点 C 、 D 向通过圆心的 x 轴做垂线交于 A 、 B 两点,圆弧 CD 绕直线 AB 旋转一周所生成的图形称为球带,球带形状根据 C 、 D 两点是否关于 y 轴对称分为对称球带和球冠球带,如图 2(b)、2(c) 所示,两种球带区别在于角度积分区间不同,对称球带积分区间上、下限角度值等值异号,如图 3(a) 所示,角度为任意值所形成的球带称为球冠球带,如图 3(b) 所示。下面对两种

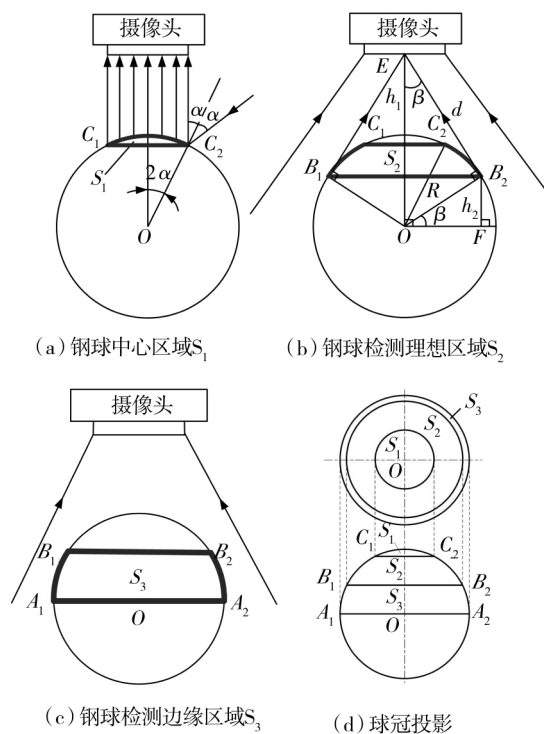


图 2 球带定义与分类

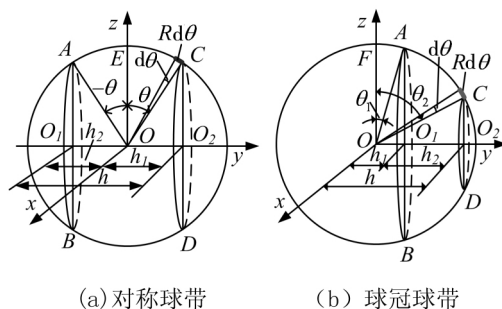


图 3 两种球带数学模型

球带进行面积求解。

对称球带面积 S_1 :

$$S_1 = \int_{-\theta}^{\theta} 2\pi R^2 \cos\theta d\theta = 4\pi R^2 \sin\theta \quad (2)$$

由 $h_1 = R\sin\theta$ 得:

$$S_1 = 4\pi R h_1 \quad (3)$$

式中: θ 为直线 OE 与直线 OC 的夹角; $-\theta$ 为直线 OA 与直线 OE 的夹角; h_1 为点 O_2 与点 O 间的距离。

球冠球带面积 S_2 :

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} 2\pi R^2 \cos\theta d\theta = 4\pi R^2 (\sin\theta_2 - \sin\theta_1) \quad (4)$$

由 $h_1 = R\sin\theta_1$, $h_2 = R\sin\theta_2$ 得:

$$S_2 = 4\pi R h_2 \quad (5)$$

式中: θ_1 为直线 OF 与直线 OA 的夹角; θ_2 为直线 OF

与直线 OC 的夹角; h_1 为点 O_1 与点 O 间的距离; h_2 为点 O_1 与点 O_2 间的距离; h 为点 O_2 与点 O 间的距离。

虽然积分区间形式不同,但两种球带面积公式推导结果相同,因此,为便于说明以对称球带结构进行球带面积求解及性质分析。

2.2 球带重叠建模及面积计算

如果采用三条球带将钢球表面全部包裹的方法,则首先将钢球圆周六等分,然后求得每段弧长为 $\pi R/3$,最后将圆弧绕轴线旋转三次形成三条球带包裹钢球表面,具体操作如下:首先圆弧绕水平轴旋转一周形成第一条球带,如图 4(a) 所示,将旋转轴逆时针旋转 60° 圆弧绕轴旋转一周形成第二条球带,如图 4(b) 所示,最后将旋转轴逆时针旋转至 120° 圆弧最后绕轴旋转一周形成第三条球带,如图 4(c) 所示。

圆弧绕轴旋转三次,即钢球展开三次,三条球带形成,在形成过程中重叠现象发生,重叠方式包括两条球带重叠和三条球带重叠如图 4(d) 所示。

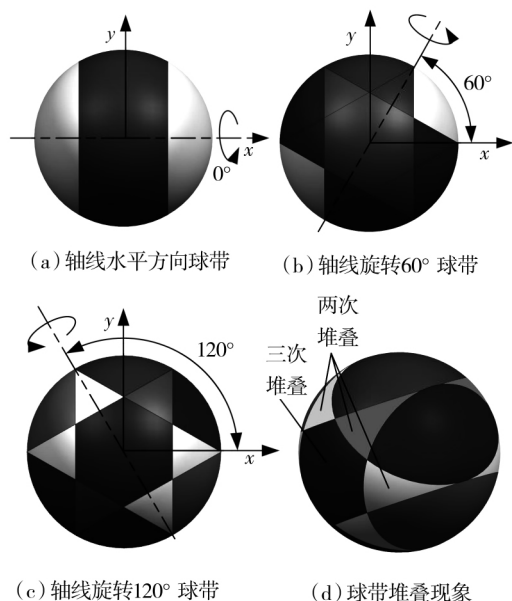


图4 球带生成与堆叠

根据对称球带的积分特点利用单侧角度变化对多条球带包裹钢球表面时的面积和重叠面积进行计算求解,如图 3(a) 所示, θ 的范围为 $[\frac{\pi}{2}, \pi]$ 因此球带条数 N 为

$$N = \frac{\pi}{2\theta} \quad (6)$$

由式(6)可以得出 N 条球带包裹钢球表面时的面积 S_N :

$$S_N = 4\pi R^2 N \sin \frac{\pi}{2N} \quad (7)$$

$$S_{\text{球}} = 4\pi R^2 \quad (8)$$

由式(7)、(8)可以求出 N 条球带重叠面积 $S_{\text{叠}}$:

$$S_{\text{叠}} = S_N - S_{\text{球}} = 4\pi R^2 N \sin \left(\frac{\pi}{2N} \right) - 4\pi R^2 \quad (9)$$

对多条球带重叠面积取极限得到极限球带包裹面积 $S_{N\text{lim}}$:

$$S_{N\text{lim}} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(4\pi R^2 N \sin \frac{\pi}{2N} \right) = 2\pi^2 R^2 \quad (10)$$

因此可以求出极限球带重叠面积 $S_{\text{叠lim}}$:

$$S_{\text{叠lim}} = S_{N\text{lim}} - S_{\text{球}} = 2\pi^2 R^2 - 4\pi R^2 \quad (11)$$

球带重叠现象是由球带在覆盖钢球表面过程中球带面积叠加原因造成的,此种现象的发生不可避免。

根据式(6)可以得到展开次数 N ,但 N 通常不是整数,理想情况是 N 为整数,若 N 向上取整的整数为 n ,则 N 次展开时的球带宽度 e_N 大于 n 次展开时所对应球带宽度 e_n ,如图 5(a) 所示。若 e_N 小于 e_n 则会发生漏检现象,如图 5(b) 所示;若 e_N 过大则会发生过检现象。因此,在展开次数 N 确定的情况下,将 e_N 调整到略大于 e_n 达到增大检测效率的目的。

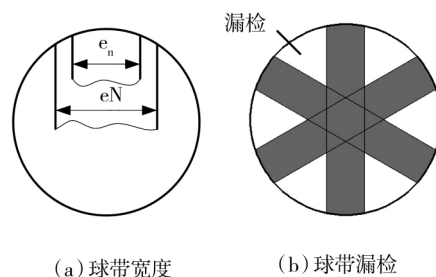


图5 球带宽度

由式(7)可以看出球带包裹钢球的面积随着展开次数增加而增大,因此需要对展开次数进行控制。在球带宽度确定的情况下可适当减少展开次数,防止展开次数过多导致展开时间过长使检测效率降低。

3 有效弧长覆盖效率

在检测时,由于干扰因素如振动、相对滑动等影响,导致理想弧长发生波动,为了保证钢球全表面展开,需要增加理想弧段长度,随着理想弧长增加重叠面积也在逐渐增大,因此需要对理想弧段有效弧长

覆盖效率进行分析。

球带宽度取决于探头检测弧段长度,如图6所示,理想情况是检测弧 B_1B_2 (对应弧长 C) 恰好是 n 次展开所对应的弧 C_1C_2 (对应弧长 C_n),即 $C = C_n$ 。

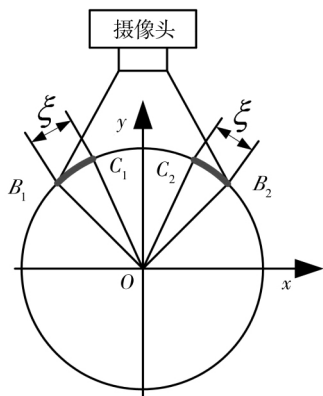


图6 弧长增量效率分析

在实际检测时,由于易受干扰因素影响,因此将原理想弧段两端各增大 ξ (即 B_1C_1 、 B_2C_2 弧段长度) 来满足实际要求,增大的 ξ 量称为弧长冗余量,因此增大后的理想检测弧长 C :

$$C = C_n + 2\xi \quad (12)$$

由 $C_n = \frac{2\pi R}{n}$ 得:

$$C = \frac{2\pi R}{n} + 2\xi \quad (13)$$

有效弧长覆盖效率 η :

$$\eta = \frac{C_n}{C} = 1 - \frac{2\xi}{\frac{2\pi R}{n} + 2\xi} \quad (14)$$

由式(14)可以看出随着 ξ 值增大,效率 η 逐渐降低,因此在能够保证完全展开的情况下,可适当缩小 ξ 值。虽然弧长冗余量会引起球带宽度增加,导致重叠面积增大,但可以将其限制在适当的范围内。利用 η 直观地了解 ξ 对有效弧长覆盖效率的影响及弧长有效利用率,通过控制 ξ 来减小重叠面积,达到提高检测效率的目的。

4 结 论

本文基于钢球表面图像采集特点,对球带覆盖钢球表面面积及弧长冗余量进行分析得到如下结论:由钢球球冠成像特点,确定钢球中心区域、钢球检测理想区域和钢球边缘区域,获得理想检测弧长。利用球带表达式得到球带面积和多条球带重叠面积,在保证钢球完全展开的前提下,通过限制展开次

数和实际球带宽度,达到提高检测效率的目的。根据实际检测条件控制弧长冗余量,获得理想弧长;由弧长覆盖效率直观地了解弧长冗余量的变化情况,达到提高检测效率的目的。

参 考 文 献:

- [1] 赵彦玲,赵志强,孙蒙蒙,等. 钢球展开过程球面点运动轨迹分析及实验验证 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2016,21(1):13-17.
- [2] 赵彦玲,夏成涛,向敬忠,等. 钢球检测机构驱动面磨损寿命预测方法 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2015,20(3):8-12.
- [3] 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.
- [4] 赵彦玲,王弘博,铎佳平,等. 钢球缺陷检测机构的逆向运动特性研究 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2014,19(5):61-65.
- [5] 赵彦玲,李积才,赵志强,等. 钢球展开机构的接触碰撞特性 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2015,20(6):37-41.
- [6] ZORRIASSATINE F, WYKES C. Engineering Manufacture [A]. Kinematic Analysis of Detection of Steel Ball Surface Defect Based on ADAMS [C] // Germany, Trans Tech Publications, Hangzhou, Zhejiang, China,2010:83-87.
- [7] 蒋新苗,刘献礼,王鹏. 基于图像技术的钢球表面缺陷检测研究 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2006,2(3):108-111.
- [8] 刘军,刘献礼,王鹏. 钢球表面缺陷检测仪的嵌入式控制系统设计 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2007,2(2):44-47.
- [9] 王义文,蔺勇智,刘献礼. 空气与油液介质下钢球表面缺陷检测效果对比分析 [J]. 轴承,2010,5(4):37-39.
- [10] 潘洪平,董申,梁迎春,谢水生. 钢球表面缺陷的自动检测与识别 [J]. 中国机械工程,2001,04(4):10-13.
- [11] NG T W. Optical Inspection of Ball Bearing Defects [J]. Measurement Science & Technology,2014,18(9):73-76.
- [12] SMITH Wilison. Automatic Inspection System for Surface Detect of Precision Steel Ball [J]. Applied Mechanics and Materials,2014,685(5):405-409.
- [13] 赵彦玲,夏成涛,刘献礼. 钢球展开过程运动学及动力学分析 [J]. 机械工程学报,2015,2(2):185-192.
- [14] 赵彦玲,云子艳,向敬忠. 钢球全表面展开机构模型建立及其运动分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报,2015,2(4):237-242.
- [15] 龚凌云. 正弦机构在球面展开中的运用 [J]. 机电工程技术,2015,44(5):144-146.
- [16] AKANO O. Kinematic Analysis of Detection of Steel Ball Surface Defect Based on ADAMS [J]. Advanced Materials Research,102(6):83-87.
- [17] 杨怀玉. 钢球检测中的运动分析 [J]. 中国水运. 2006,6(10):33-34.
- [18] 赵彦玲,车春雨,铎佳平,等. 钢球全表面螺旋线展开机构运动特性分析 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2013,18(1):37-40.
- [19] 赵彦玲,王弘博,铎佳平. 钢球缺陷检测机构的逆向运动特性研究 [J]. 哈尔滨理工大报,2014,5(2):61-65.
- [20] 王义文. 钢球表面缺陷检测关键技术研究及样机研制 [J]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2010.

(编辑:温泽宇)