

钢球缺陷检测机构的逆向运动特性研究

赵彦玲¹, 王弘博¹, 铨佳平², 夏成涛¹, 向敬忠¹, 苏相国¹

(1. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 沈阳航天三菱汽车发动机制造有限公司机械加工部, 辽宁 沈阳 110179)

摘 要: 为了研究钢球在检测过程中的运动形式及特点, 根据 AVIKO 缺陷自动检测设备的工作原理设计并搭建了钢球展开机构物理观测平台; 利用逆向动态分析的研究方法, 通过高速摄像机追踪被测钢球表面标记点的运动轨迹; 分析了工程中两类螺旋线的几何特点, 并结合检测探头相对于钢球的运动形式进行研究. 结果表明: 钢球在展开轮的作用下做空间等弧长螺旋线运动, 保证了钢球的全表面展开; 同时检测探头相对钢球以均匀子午线形式进行扫描, 实现球体全表面且无重复检测, 为展开轮的结构设计提供理论依据.

关键词: 钢球检测; 逆向分析; 展开轮; 空间运动轨迹

中图分类号: TH123+.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2014)05-0061-05

Research on Reverse Movement Characteristics of Defective Detection Mechanism for Steel Balls

ZHAO Yan-ling¹, WANG Hong-bo¹, XUAN Jia-ping², XIA Cheng-tao¹, XIANG Jing-zhong¹, SU Xiang-guo¹

(1. School of Mechanical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Shenyang Aerospace Mitsubishi Motors Engine Manufacturing CO., LTD, Ministry of Machinery, Shenyang 110179, China)

Abstract: In order to analyze the form of motion and characteristics of steel ball in the process of detection, based on the operating principles of equipment AVKIO detecting the defects automatically and produced by Czech company, the physical observation platform of deployable structure for steel balls was designed and established. Taking advantage of research method of inverse dynamic analysis, the high-speed camera was used to observe the movement trajectory of marker on steel ball surface. Then the geometric features of two types of spiral was analyzed respectively, combining with the form of movement of detection probe relative to steel ball. The results indicate that under the action of unfolding wheel, the steel ball rotates in a way of space helix with equal length of arc to ensure the unfolding of whole surface of steel ball, meanwhile the detection probe scans the surface in a way of homogeneous meridians relative to steel ball, which can guarantee the whole-surface unfolding and no duplicate detection of sphere and provide theoretical basis for structure design of unfolding wheel.

Key words: steel ball detection; reverse analysis; unfolding wheel; space trajectory

收稿日期: 2014-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(51275140); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12541151).

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

王弘博(1988—), 女, 硕士研究生;

铨佳平(1986—), 男, 硕士, 工程师.

0 引言

现代化工业中,随着机械高性能、高强度、高精度和高速度的发展要求,对机械零部件的设计标准要求越来越高.钢球作为轴承关键传动件,其表面质量对轴承的性能影响起着举足轻重的作用^[1-3].

很多发达国家已经广泛应用钢球自动检测设备对钢球进行缺陷检测.日本 AKS 公司^[4]让钢球在液体油中展开,分别利用激光探伤^[5]和超声波探伤技术^[6]检测钢球的表面和内部缺陷.德国 FAG 公司在钢球整个生产线上配备了电子控制系统,大大减少了人为因素的影响.捷克 SIMET 公司生产的 AVIKO 系列钢球检测设备^[7]分别利用光电传感器、振动传感器和电涡流传感器检测钢球的不同缺陷,并已在国内很多钢球厂家得到应用.国内对钢球自动检测设备也进行了大量研究.哈尔滨理工大学的刘献礼、赵艳玲教授对展开装置以及基于图像的钢球表面缺陷识别进行了深入分析^[8-12].在钢球表面图像处理和识别的研究方面还有马芸艳提出的 CCD 图像处理技术^[13]、徐淑琼采用的声发射检测技术^[14-15]、李自根探讨的渗透检测技术^[16]等.

综上所述国外一些钢球缺陷自动检测设备依靠其可靠稳定的机械结构,使得钢球的检测效率,缺陷识别精度都大幅度领先国内研究水平.但是设备价格以及维护的高额费用,导致国内一些钢球生产厂商望而却步,现阶段大部分仍采用人工目测的方式.国内虽然对钢球就缺陷检测做出了一系列研究,但都是基于对钢球表面缺陷识别的研究^[17-20],意义在于如何提高钢球表面缺陷的识别率及准确率,但缺陷识别的前提是要保证钢球能够完全展开,否则单方面的提高图像处理精度将没有实际意义.对于钢球的全表面展开这一领域却鲜有人研究,大都依赖国外的进口零部件,而国外生产商只提供产品,从不进行技术支持,导致我国钢球检测设备在球体表面展开这个装置的研究遇到了很大的瓶颈.

针对上述问题,本文基于 AVIKO 系列钢球缺陷自动检测装置,搭建物理实验观测平台,使用逆向动态分析的研究方法,对钢球在展开轮作用下的运动形式进行深入分析,最终确定钢球的运动形式及特点,同时也为后期展开轮结构的设计提供了重要的理论依据.

1 展开轮结构的逆向功能研究

首先设计钢球自动检测装置的物理实验观测平台,如图 1 所示.物理实验装置由主动轮、支撑轮、展开轮、含有标记点的检测钢球、高速直流电机和高速摄像机(Mega Speed 加拿大生产的高速摄像设备 70KD2C2)组成.实验装置的工作原理为:主动轮在电机的带动下做高速转动,展开轮通过支撑杆连接,支撑杆的另一端由拉力弹簧产生作用力,使展开轮对钢球产生一个压紧力,并由他们各自的滚动摩擦力和摩擦力矩完成各部件之间的相互运动,即主动轮带动钢球转动,在钢球转动的同时,通过摩擦力又分别带动展开轮和支撑轮转动.由于展开轮的特殊几何结构,会导致钢球产生复杂的空间运动,使得表面完全展开.由于本实验只是观测在展开轮的作用下钢球的运动形式及钢球表面标记点的运动轨迹,并不对钢球的出入进行考虑分析,故没有进行钢球出入结构的具体设计.

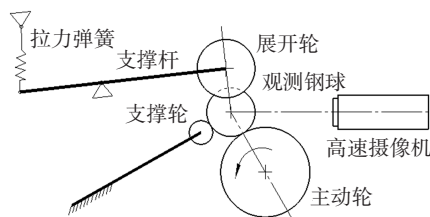


图1 实验装置基本原理

本实验通过高速摄像机观测钢球在展开轮作用下的运动形式,追踪球面标记点 A 的运动轨迹,采取等时采点法记录标记点的具体位置.由于篇幅有限,选取 12 个等间隔时刻点,来记录钢球表面标记点的空间运动轨迹,如图 2 所示.通过高速摄像机的拍摄,可以清楚的看到,标记点从观测方向的左端点,在展开轮的作用下做螺旋线运动,逐渐向右侧移动,并最终到达观测方向的最右端.

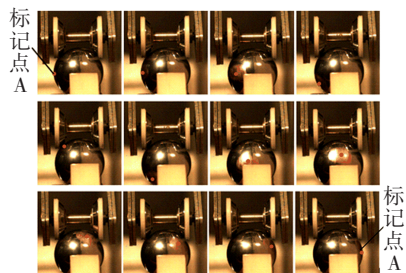


图2 钢球表面标记点等时刻的运动过程

依据此观测图绘制出相对应的标记点的空间轨迹曲线,如图3所示.由绘制的钢球标记点的运动轨迹,可以判断出,钢球在展开轮的作用下做螺旋线运动,并且标记点从观测方向的一侧向另一侧移动,最终标记点通过整个球面.

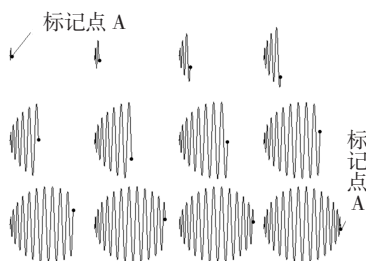


图3 钢球标记点的空间运动轨迹

通过上述观测分析可以得出结论:钢球表面的标记点从最左端运动到最右端,表明钢球在观测平面内完成了 180° 的侧偏运动.钢球这种回转运动的对称特性,说明钢球在检测过程中完成了表面全展开运动,即钢球表面全部通过探头检测区域.从展开原理角度分析,钢球在主动轮的带动下,做主旋转运动,轴线平行于主动轮转轴;在展开轮的作用下,又做侧偏运动,轴线垂直于主运动轴线.在这两种运动方式的合成下,钢球做绕主转轴的螺旋线运动.

2 被测钢球运动轨迹的分析

在工程应用领域中,常用的空间螺旋曲线大致可以分为两类:一类是等螺距螺旋线,一类是等弧长螺旋线.顾名思义,等螺距螺旋线是指相邻两线圈间的距离相等;等弧长螺旋线是指相邻线圈所包含的圆弧长度相等,如图4所示.针对这两种螺旋线我们做以下具体分析.

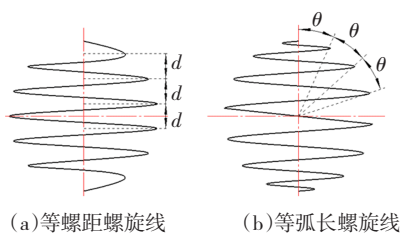


图4 两类螺旋线

假设钢球半径为 R ,选取球面坐标系,令球面任一点为 P ,如图5所示,则球面坐标方程为:

$$\begin{cases} x = R \sin \theta \cos \varphi \\ y = R \sin \theta \sin \varphi \\ z = R \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为指定半径与 Z 轴夹角; φ 为指定半径在水平面 XOY 上的投影与 X 轴的夹角.

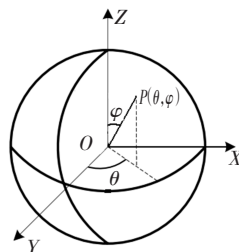


图5 球面坐标系

由球面坐标方程(公(1))可知,若得到 θ 和 φ 的关系,便可以确定一条空间螺旋线,即可以确定任意时刻球面一点的运动轨迹.

2.1 等螺距螺旋线

将 $\theta = \cos^{-1}(\varphi/N\pi - 1)$ 代入式(1),得到球体表面螺旋线球面坐标方程为:

$$\begin{cases} x = R \cos \varphi \sqrt{1 - \left(\frac{\varphi}{N\pi} - 1\right)^2} \\ y = R \sin \varphi \sqrt{1 - \left(\frac{\varphi}{N\pi} - 1\right)^2} \\ z = R \left(\frac{\varphi}{N\pi} - 1\right) \quad 0 \leq \varphi \leq 2N\pi \end{cases} \quad (2)$$

式中: N 为螺旋线圈数.

螺旋线相邻线圈之间的 φ 差值为:

$$\Delta \varphi = 2\pi \quad (3)$$

螺旋线相邻线圈之间的螺距为:

$$\Delta z = R \frac{\Delta \varphi}{N\pi} = \frac{2R}{N} = \frac{D}{N} \quad (4)$$

式中: D 为球体直径.

由公式(4)可知,球体的轴线方向的直径被螺旋线 N 等分,因此这种球面螺旋线被称为等螺距螺旋线,如图6所示.

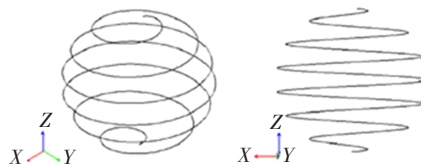


图6 等螺距螺旋线

2.2 等弧长螺旋线

令 $\theta = \varphi/2N$,此时螺旋线圈数为 N 的球面坐标

方程为:

$$\left. \begin{aligned} x &= R \sin\left(\frac{\varphi}{2N}\right) \cos(\varphi) \\ y &= R \sin\left(\frac{\varphi}{2N}\right) \sin(\varphi) \\ z &= R \cos\left(\frac{\varphi}{2N}\right) \quad 0 \leq \varphi \leq 2N\pi \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: N 为螺旋线圈数.

将式(3)代入 $\theta = \varphi/2N$ 中, 得到螺旋线相邻线圈之间的 φ 差值为:

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

故螺旋线相邻线圈之间的弧长为:

$$l = R\Delta\theta = \frac{\pi R}{N} = \frac{C}{2N} \quad (7)$$

式中: C 为经过球心的平面与球体交线长.

由公式(7)可知, 球体被圈数为 N 的螺旋线 $2N$ 等分, 因此这种球面螺旋线被称为等弧长螺旋线, 如图7所示.

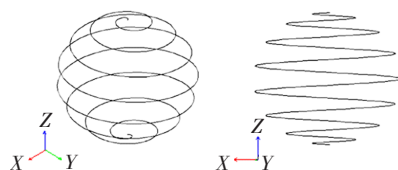


图7 等弧长螺旋线

基于上述对螺旋线空间几何特点的分析可知: 通过高速摄像机绘制的标记点 A 的运动轨迹为这两类螺旋线中的一种, 究竟是等弧长螺旋线还是等螺距螺旋线, 我们可以通过检测探头相对钢球的相对运动关系进行分析.

3 探头相对钢球的检测形式

根据上面对两类螺旋线的具体分析, 同时依据钢球检测机构的检测原理, 可知检测探头在对钢球表面进行检测时, 钢球表面应该均匀的通过检测探头, 也就是说, 钢球表面是我们需要关注的重点, 其表面的弧长自然应该是我们着重研究的. 下面我们分别让钢球做等螺距螺旋线和等弧长螺旋线运动, 来观察检测探头相对于钢球表面的检测形式.

钢球以等螺距螺旋线方式进行展开运动时, 探头对应的检测轨迹如图8所示.

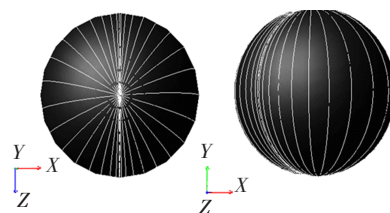


图8 等螺距展开时检测线轨迹

钢球以等弧长螺旋线方式进行展开运动时, 探头对应的检测轨迹如图9所示.

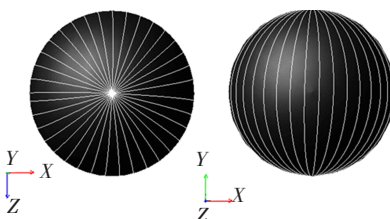


图9 等弧长展开时检测线轨迹

通过两组图片的对比, 可以看出, 当钢球以等螺距螺旋线展开时, 其表面检测曲线为非均匀子午线, 即轨迹线在钢球表面非均匀分布(如图8所示); 当钢球以等弧长螺旋线展开时, 其表面检测曲线为均匀子午线, 即轨迹线在钢球表面均匀分布(如图9所示). 由此可确定钢球在展开轮的作用下做空间等弧长螺旋线运动.

4 结 语

通过搭建钢球物理实验观测平台, 利用高速摄像机追踪钢球表面标记点的运动轨迹, 确定了钢球空间螺旋线的运动形式. 根据两类螺旋线的空间几何特点, 分别让钢球以等弧长螺旋线和等螺距螺旋线的形式在检测探头下运动. 结果表明: 只有等弧长的运动形式可以保证钢球的表面完全被扫描, 实现无重复检测, 且检测效率达到最大. 同时本文的研究结果为后期的展开轮结构的设计提供了重要的理论依据.

参 考 文 献:

- [1] BRANCH N A, ARAKERE N K, FORSTER N, et al. Critical Stresses and Strains at the Spall Edge of a Case Hardened Bearing Due to Ball Impact [J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE, 2013, 47: 268 - 278.
- [2] ALLISON B D, SUBHASH G, ARAKERE N K, et al. Extraction and Testing of Miniature Compression Specimens From Bearing

- Balls Subjected to Rolling Contact Fatigue [J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2014, 136(2).
- [6] 平静艳. 球轴承振动产生的原因及改进措施 [J]. 哈尔滨轴承, 2008, 29(1): 47-49.
- [7] 张永乾, 吴朝阳. 我国钢球加工工艺设备的现状及发展趋势 [J]. 轴承, 2011, 4: 59-62.
- [8] 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): 1-6.
- [9] LIU H Y, XU Z N, XI J J. The Design of Seamless Steel Tube Ultrasonic Flaw Detection System. Sensors&Transducers, 2013, 157(10): 82-87.
- [10] 梁华, 王姗姗, 仇亚军, 等. 轴承钢球表面缺陷分析方法 [J]. 轴承, 2013, 6: 46-48.
- [11] 赵彦玲, 车春雨, 铉佳平, 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.
- [12] 赵彦玲. 基于图像技术的钢球表面缺陷分析与识别 [J]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008: 2-3.
- [13] 赵彦玲, 刘益智, 郝焕瑞, 等. 钢球球表面展开装置: CN, 201373822Y [J]. 2009-12-30.
- [14] 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: 5-6.
- [15] 王义文, 张中然, 青克尔, 等. 摩擦式钢球表面缺陷检测仪的控制系统设计 [J]. 机械工程师, 2010, 3: 26-28.
- [16] 马芸艳. 基于 CCD 的钢球外观检测技术的研究 [J]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 25-30.
- [17] 徐淑琼, 蒋沂萍. 轴承球的声发射检测技术 [J]. 无损检测, 2003, 25(7): 358-359.
- [18] 刘国昌, 徐淑琼. 声发射检测技术在轴承球检测中的应用 [J]. 机械制造, 42(479): 63-64.
- [19] 李自根, 李自根, 吴楠松, 等. 陶瓷轴承球渗透检验自动分选系统 [J]. 无损检测, 25(6): 296-301.
- [20] 王鹏, 吴春亚, 刘德利, 等. 基于 LabVIEW 的钢球表面缺陷图像纹理分析与检测 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 208-212.
- [21] YANG J X, ZHANG F Y, SONG X X, et al. New Method of Spherical Surface Defect Detection Based on Machine Vision [J]. Advanced Materials Research, 2011, 6: 1274-1278.
- [22] 栗琳, 王仲, 裴芳莹, 等. 双图像传感器的球表面展开方法 [J]. 仪器仪表学报, 2012: 33(7): 1641-1646.
- [23] 全燕鸣, 陈佳佳, 柯志勇. 成批抛光钢球表面缺陷自动检测的图像预处理方法 [J]. 测试技术学报, 2010, 24(6): 518-521.

(编辑: 关毅)

(上接第60页)

- [1] 刘战强, 艾兴. 高速切削刀具磨损表面形态研究 [J]. 摩擦学学报, 2002(22): 468-471.
- [2] 王潇屹, 张晓辉. 新型涂层刀具干式铣削加工 SKD11 切削性能研究 [J]. 工具技术, 2009, 43(2): 8-11.
- [3] XIE L J, SCHMIDT J SCHMIDT C. 2D FEM Estimate of Tool Wear in Turning Operation [J]. Wear, 2005, 258: 1479-1490.
- [4] 刘献礼, 肖露, 侯世香, 等. PCBN 刀具的磨损机理和干切削 GCr15 时的磨损与寿命 [J]. 工具技术, 2002, 36(5): 3-7.
- [5] 文东辉, 刘献礼, 严复钢, 等. PCBN 刀具的磨损机理 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2002, 7(1): 56-59.
- [6] ROLAND Meyer, JENS Köhler, BEREND Denkena. Influence of the Tool Corner Radius on the Tool Wear and Process Forces During Hard Turning [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2012, 58: 933-940.
- [7] COSTES J P, GUILLET Y, POULACHON G, et al. Tool-life and Wear Mechanisms of CBN tools in machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(7-8): 1081-1087.
- [8] ARAMCHAROEN A, MATIVENGA P T. White Layer Formation and Hardening Effects in Hard Turning of H13 Tool Steel with CrTiAlN and CrTiAlN/MoST-coated Carbide Tools [J]. International Journal of Sustainable Manufacturing, 2008, 36: 650-657.
- [9] POULACHON G, ALBERT A, SCHLURAFF M, et al. An Experimental Investigation of Work Material Microstructure Effects on White Layer Formation in PCBN Hard Turning [J]. Machine and manufactures, 2005, 45: 211-218.
- [10] HIROYUKI Sasahara, TOSHIYUKI Obikawa, TAKAHIRO Shirakashi. Prediction Model of Surface Residual Stress Within a Machined Surface by Combining Two Orthogonal Plane Models [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(7-8): 815-822.
- [11] GUO Y B, SAHNI J. A comparative Study of Hard Turned and Cylindrically Ground White Layers [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44: 135-145.

(编辑: 温泽宇)