

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.02.13

面向复杂构件的布氏硬度数字化在线检测方法

石伟¹, 陈诗琳^{1*}, 孟薇¹, 饶哲宇², 聂静², 方华春²

(1. 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

2. 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司, 贵州 贵阳 550016)

摘要: 针对传统的实验室硬度检测方法存在抽样随机性、结果滞后性和数据孤立等固有局限, 提出一种面向航空发动机叶片等复杂构件的布氏硬度数字化在线检测方法, 突破异形工件在动态工况下的精准定位、表面自适应恒力打磨及工业现场低质量压痕图像高精度识别等关键技术难题, 建设了硬度数据准确测量、结果实时判断且可溯源的数字化在线检测产线。试验结果表明: 与传统检测方法相比, 面向复杂构件的布氏硬度数字化在线检测方法测量效率提升4倍, 测量系统分析(Measurement Systems Analysis, MSA)的量具重复性与再现性百分比(Gauge Repeatability & Reproducibility Percentage, GR&R%)为17.42%, 且长期运行结果符合要求。面向复杂构件的布氏硬度数字化在线检测方法能够实现原位实时、全自动化、可追溯的硬度测量, 为智能制造背景下的“计量检测一体化”提供了可行的技术路径。

关键词: 复杂构件; 硬度计量; 在线检测; 数字化产线; 智能制造; 量值溯源; 测量系统分析; 量具重复性与再现性

中图分类号: TB938.2; TP27

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 02-0147-08

Digital online Brinell hardness testing method for complex components

SHI Wei¹, CHEN Shilin^{1*}, MENG Wei¹, RAO Zheyu², NIE Jing², FANG Huachun²

(1. AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 10095, China;

2. AECC Guizhou Liyang Aviation Power Co.,LTD., Guiyang 550016, China)

Abstract: To address the inherent limitations of traditional laboratory hardness testing methods, such as random sampling, result latency, and data silos, this paper proposes a digital online Brinell hardness testing method tailored for complex components, exemplified by aero-engine blades. The proposed method overcomes critical technical bottlenecks, including the precise positioning of irregular workpieces under dynamic conditions, adaptive constant-force surface grinding, and the high-precision recognition of low-quality indentation images in industrial environments. Consequently, a digital online testing production line was established, enabling accurate hardness measurement, real-time result evaluation, and full data traceability. Experimental results demonstrate that compared to traditional methods, the proposed approach increases measurement efficiency by a factor of four. Furthermore, the Measurement Systems Analysis (MSA) yielded a Gauge Repeatability and Reproducibility percentage (GR&R%) of 17.42%, with long-term operational performance consistently meeting requirements. By facilitating in-situ, real-time, fully automated, and traceable hardness measurement,

收稿日期: 2026-02-25; 修回日期: 2026-04-06; 录用日期: 2026-04-17; 发表日期: 2026-04-28

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础科研项目

引用格式: 石伟, 陈诗琳, 孟薇, 等. 面向复杂构件的布氏硬度数字化在线检测方法[J]. 计测技术, 2026, 46(2): 147-154.

Citation: SHI W, CHEN S L, MENG W, et al. Digital online Brinell hardness testing method for complex components[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(2): 147-154.



this method provides a viable technical pathway for achieving the "integration of metrology and testing" within the context of intelligent manufacturing.

Key words: complex component; hardness measurement; online inspection; digital production line; intelligent manufacturing; traceability of measurement values; MSA; GR&R

0 引言

计量是国家质量基础设施的重要组成部分,是实现产业高质量发展的技术基石。2021年12月,国务院印发《计量发展规划(2021—2035年)》^[1],明确提出要“推动计量数字化转型”,构建以数字化、智能化为核心特征的现代先进测量体系,强调计量技术要深度融入先进制造、航空航天等国家战略性新兴产业,加快推进新型计量技术的研发与应用。规划指出,到2035年,要建成以量子计量为核心,数字计量为支撑,共建共享共用的现代先进计量体系,计量科技创新能力大幅跃升,关键领域计量技术取得重要突破。在这一国家战略引领下,推进计量技术与制造过程的深度融合,实现计量检测从静态离线向动态在线的范式转变,已成为支撑制造强国建设的关键课题。

在传统的制造模式下,硬度计量检测是一个独立的、“事后”的质量检验环节,其标准流程是从生产线上抽取样品,送到专门的计量实验室,由操作人员使用计量检测设备在规定的环境条件下进行测试。传统方法虽然可以得到较为准确的数据,但是存在抽样随机性、结果滞后性和数据孤立三方面的主要问题:根据统计学原理的抽样检验不能实现全检,存在漏检可能,这对于安全关键件来说是不可接受的;滞后性是指从取样、送检、测试到出具报告,周期较长,不能对正在进行的生产过程提供即时反馈,当发现某批次不合格时,往往已经制造了大量废品,质量风险和经济损失巨大;在数据孤立方面,检测结果和具体的生产工况、工艺参数没有实时、直接的联系,不能用于深度工艺分析和进一步技术优化^[2]。

为解决传统人工检测方法存在的局限性问题,国内外工作者在检测自动化与智能化方面开展了大量研究。国网湖北省电力公司研发了低压电流互感器自动化检定系统,采用无需拆卸设备的在线量值溯源方案,在不影响工况的情况下进行精

确测量。该方法缩短了量值溯源周期,提高了设备运行效率和可靠性^[3]。石伟等人^[4]研制了一套智能化洛氏硬度测试平台,检测效率可达312块/8h(624块/16h),显著高于人工操作的60块/8h,且测量一致性良好,最大硬度值测量偏差和重复性偏差均 ≤ 0.1 HR。中钢集团郑州金属制品研究院股份有限公司研制的金属制品全自动检测系统,采用机器视觉定位技术和伺服驱动控制策略,实现了预应力钢绞线、钢筋等金属制品全流程自动化检测。检测速度为24~60根/h,精度高于0.5级,显著提升了检测效率及准确性^[5]。北京首钢股份有限公司研发的热轧板卷全自动智能检验系统结合了图像识别、工业机器人等多项技术手段,极大降低了人为参与程度,提高了取样及检验效率。产品平均检验周期缩短了近40%,单批数据报出时间由小时级降低到了分钟级^[6]。HASSENSTEIN C等人^[7]针对燃气轮机叶片的壁厚测量难题,研发了一套机器人引导的超声阵列检测系统。该系统采用六自由度机械臂搭载浸入式超声阵列探头,通过两阶段自适应全聚焦成像算法,实现了复杂曲面叶片内外壁面的精确识别与壁厚测量,为涡轮叶片的维修决策提供了可靠的定量数据支持。LONAREVI Z等人^[8]提出并评估了一种自适应的、机器人辅助的视觉质量检查方法,该方法可以使机器人仅将摄像头转向与预测缺陷相关的视角,可应用于汽车行业生产线产品检测。ABDULRAHMAN Y等人^[9]对深度学习模型在航空发动机叶片缺陷检测中的应用进行了系统综述,指出卷积神经网络及其衍生架构在叶片表面裂纹、腐蚀等缺陷的自动识别中展现出优异性能。

尽管尺寸、形貌等领域的自动化与智能化在线检测技术已有一定发展,但目前尚无面向复杂曲面、不规则轮廓构件(如航空发动机叶片)的全流程、数字化在线硬度计量检测方法。针对此问题,本文提出了一种面向航空发动机叶片的布氏硬度数字化在线检测方法,突破异形工件柔性定

位、自适应恒力打磨工艺、压痕精密测量等关键技术难题，构建一套工业级布氏硬度数字化在线检测产线。开展试验对该方法的精度、效率、长期运行稳定性等进行测试，为促进硬度在线计量检测技术工程化应用提供重要支撑。

1 检测方法总体架构

布氏硬度数字化在线检测方法以实现复杂构件的原位、实时、全自动计量为核心目标。其技术原理是：以可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)中央控制系统为依托，集成多自由度机械臂、高精度视觉测量装置、专用柔性治具及自适应打磨头等模块，使用智能协同控制算法，实现叶片的自动上料、柔性精确定位、自适应恒力打磨、高精度自动加载测量、合格判别分拣和数据结果保存，全过程数据可追溯。

叶片布氏硬度数字化在线检测产线运行原理如图1所示。首先机械手从上料系统抓取叶片至治具中，然后传递到打磨工位，在打磨工位通过带砂轮头的机械手对叶片进行自动打磨；随后将打磨好的叶片运输至硬度打压工位，硬度计压头下降，对叶片打磨位置进行布氏硬度打压；最后传递至测量工位，基于叶片压痕测量硬度值。测量完成后，根据测量结果判断叶片硬度数据是否合格，通过机械手将合格叶片下料至合格区，不合格叶片放置于不合格区，数据同步保存于上位机数据库中，完成叶片加工车间数字化工作流程。叶片布氏硬度数字化在线检测产线如图2所示。

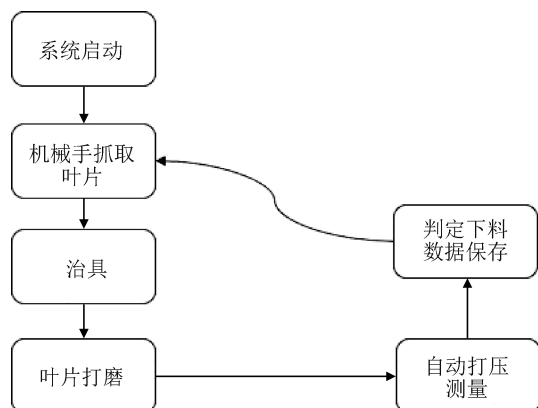


图1 叶片布氏硬度数字化在线检测产线运行原理图

Fig.1 Schematic diagram of blade Brinell hardness digital online testing production line



图2 叶片布氏硬度数字化在线检测产线

Fig.2 Digital online detection production line for Brinell hardness of blades

2 关键技术

在此布氏硬度数字化在线检测方法总体框架下，存在若干影响检测精度与可靠性的关键环节。不同于传统实验室或规则样件的检测，叶片复杂的自由曲面轮廓、待检表面一致性差异以及工业现场环境扰动，对方法的鲁棒性提出了严峻考验。本节重点对异形工件柔性定位、自适应恒力打磨方法与基于深度学习的压痕测量方法进行研究。

2.1 异形工件柔性定位方法

航空发动机叶片具有型面复杂、品种多的特点，其不同工序间的精确定位与重复装夹是实现在线自动化检测的前提。传统产线装夹方式依赖专用工装，换产效率低，且难以保证不同工件间的定位一致性。针对这一问题，本文提出了一种集成“位姿测量引导的机械柔顺抓取”与“自适应柔性装夹治具”的协同定位方法。

在抓取环节，为保证多品种叶片抓取的精准性与效率，设计了具有多级形状兼容能力的专用上料系统。该系统采用基于纵横活杆的机械柔顺结构，依托位姿中间测量工位被动顺应机制自适应不同叶片的外形轮廓，无需换产调整即可上料1~9级叶片。同时，为满足产线的“节拍要求”，抓手集成了双工位功能单元，在上料机械手进行一个叶片的抓取、放置动作的同时，另一工位同步完成下一个待检叶片的预装夹，将辅助时间融入动作周期，显著压缩了单件上料耗时。

通过一套通用柔性治具实现叶片在打磨、打压、测量等工位间的流转与定位。该治具在保持

叶片空间基准一致的前提下兼容多型号叶片，避免了设备频繁更换。该治具采用“基准面定位+侧向夹持+底部随动填充”的方案：以叶片榫头端面作为主定位基准，侧向气缸驱动夹持块实现快速夹紧；治具底部设置可升降的活动支撑机构，当叶片装夹后，支撑机构上升直至贴合叶片表面，填补异形曲面下方的空间，形成多点辅助支撑，有效抑制了薄壁叶片在打磨受力时的颤振和微位移，保证异形叶片在整条产线流转中的相对位置固定。经实际测量，采用上述柔性定位方法，叶片的重复装夹定位误差不超过 ± 0.5 mm，换产调整时间由传统方式的30 min以上缩减至5 min以内，为后续高精度打磨与打压测量提供了稳定的空间基准。

2.2 自适应恒力打磨方法

叶片进行布氏硬度测试前，要求被测表面具有足够的表面光洁度以准确识别压痕边界。针对叶片人工打磨一致性差、难以控制打磨深度的问题，本研究团队提出了一种基于六维力传感器的自适应恒力打磨方法。该方法的核心是在打磨机械臂的执行端集成一个高精度六维力矩传感器与浮动打磨头，形成一个力-位闭环控制系统。其控制原理如下：系统预先生成叶片理论打磨轨迹，打磨前，上料位姿测量单元提取叶片的空间位姿偏移量，控制器据此对理论轨迹进行平移与旋转补偿。打磨过程中，六维力传感器以高频率实时采集法向接触力，控制系统将其与预设的目标恒力值(经工艺实验优化)进行比较，通过比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制算法实时调整浮动机构的伸出量及机械臂的姿态，确保打磨砂轮与叶片复杂曲面始终维持在恒定的接触压力下。

与传统手工打磨相比，该方法将接触力波动范围从 ± 15 N以上控制在 ± 2 N以内，保证了材料去除量的一致性，避免了手工操作中因打磨较浅影响后续测量过程、因过度打磨导致表面损伤和硬化层改变的问题，提高了硬度测量的准确性^[10]，并且表面粗糙度可稳定控制在 $0.8 \mu\text{m}$ 以下，满足后续压痕检测的要求。

2.3 基于深度学习的压痕测量方法

压痕直径的精确测量是布氏硬度计算的核心。在工业现场，表面粗加工后的叶片压痕图像常面临边缘模糊、对比度低、表面纹理干扰等挑战，传统边缘检测算法(例如Canny、Sobel算子)在对边缘阈值设定方面存在较大不一致性，难以实现工业现场高精度自动化测量^[11]。针对此问题，本文提出一种结合YOLOv5深度学习网络与图像处理技术的压痕精密测量方法，该方法分三个阶段：

1) 压痕目标检测与粗定位

首先，基于YOLOv5架构训练一个轻量级目标检测模型。收集数千张在不同光照、角度下拍摄的叶片压痕图像并进行数据增强，精确标注压痕区域。训练后的模型能够在复杂的背景纹理中快速、准确地框选出感兴趣区域(Region of Interest, ROI)，排除周围划痕、污渍等干扰。

2) 边缘提取

在ROI内，运用中值滤波降噪后，采用Zernike矩算法对压痕圆形轮廓进行边缘提取。Zernike矩因其旋转不变性和对噪声的高鲁棒性，能够精确定位边缘点。

3) 直径拟合与硬度计算

基于提取的压痕边缘点集，利用最小二乘法拟合出最优圆，从而计算出精确的压痕直径。最终，系统依据标准布氏硬度计算公式，结合预设的试验力与压头直径，自动输出硬度值。

测量次数 $n = 30$ 条件下，不同测量方法重复性对比如表1所示，本文方法的重复测量标准差显著优于其他方法，所提出的先检测ROI再精密提取的策略有效解决了全局噪声干扰问题，实现了高鲁

表1 不同测量方法重复性对比

Tab.1 Repeatability comparison of different measurement methods

测量方法	单位: mm		
	平均值	标准差	极差
Canny 边缘检测	1.492	0.008 2	0.031
深度学习算法	1.490	0.004 5	0.018
本文方法(YOLOv5 + Zernike 矩 + 最小二乘)	1.491	0.111 8	0.007

棒性、高精度的压痕自动测量,测量误差从传统人工检测的0.1 mm级别降低至0.01 mm级别。

3 试验验证与分析

为综合评估所提出的数字化在线检测方法的实际性能,以32个已知硬度规格的不同批次的叶片为测试对象,在所搭建的工业级布氏硬度数字化在线检测线上开展系统性试验,对产线效率、产线测量系统分析(Measurement Systems Analysis, MSA)、长期运行稳定性进行评价^[12]。产线中的硬度计、测量系统等参照JJG 150-2005《金属布氏硬度计检定规程》^[13]在现场完成计量检定,各计量指标均合格。

3.1 产线效率评价

经现场实测,传统人工检测模式下,完成打磨、打压、测量、记录的平均用时大于2 min/件,一个3人班组8 h内最多检测约500件。布氏硬度数字化在线检测方法的连续自动运行用时稳定在42 s/件,可稳定完成2 000件/24 h的检测任务,效率提升4倍以上,并实现了无人化作业,为生产提供了有力的支持和保障。

3.2 产线MSA整体评价

测量系统分析是评价检测方法可靠性的关键。由于叶片布氏硬度数字化在线检测产线为数字化复杂测量系统,本研究采用MSA-GR&R%(GR&R%即量具重复性与再现性百分比, Gauge Repeatability & Reproducibility Percentage)方差分析法对检测产线进行了测量系统分析^[14],试验中利用2条布氏硬度数字化在线检测产线进行测量,每个零件重复测量3次,在工厂常温环境下共获得96组数据。部分数据如表2所示。

统计分析结果如图3所示,可以看出:产线可区分类别数为59,符合大于5的要求;GR&R%为17.42%,符合小于30%的要求。

3.3 长期运行稳定性验证

本产线经过长期运行验证,已累计完成近5万件叶片的实际检测交付。期间,定期采用标准布氏块对产线进行点检,结果如图4所示。

连续运行期间的点检数据显示,系统最大值误差不超过 $\pm 1.0\%$,证明该方法具有良好的长

表2 叶片布氏硬度数字化在线检测产线试验数据(部分)

Tab.2 Test data of digital online detection production line for blade Brinell hardness (Partially)

测量顺序	零件	产线	直径测量值/mm
1	1	A	1.492
2	1	B	1.485
3	1	A	1.492
4	2	B	1.494
5	2	A	1.490
6	2	B	1.494
7	3	A	1.499
8	3	B	1.499
9	3	A	1.499
10	4	B	1.490

期稳定性。

以上试验验证结果表明:本文所提出的数字化在线检测方法在保证高精度与高可靠性的前提下,实现了检测效率、质量的提升。数字化在线检测产线与传统检测手段对比如表3所示,可以看出:本数字化在线检测产线技术成熟度高、稳定性好、经济性好。同时,产线采用模块化、可重构的设计,可以在不中断现有产线运行的情况下进行扩展,具有较好的工程落地性以及可推广性。

4 结论

针对传统硬度检测在智能制造范式下面临的核心挑战,提出并实现了一种面向复杂构件的布氏硬度数字化在线检测方法。研究得出以下主要结论:

1) 基于所提出的检测方法,搭建了高精度硬度数字化在线检测系统,突破了异形叶片从定位、打磨到测量的全流程自动化硬度检测技术瓶颈。

2) 提出的异形工件柔性定位方法、自适应恒力打磨方法和基于YOLOv5深度学习与Zernike矩的压痕测量方法,解决了异形工件在动态工况下

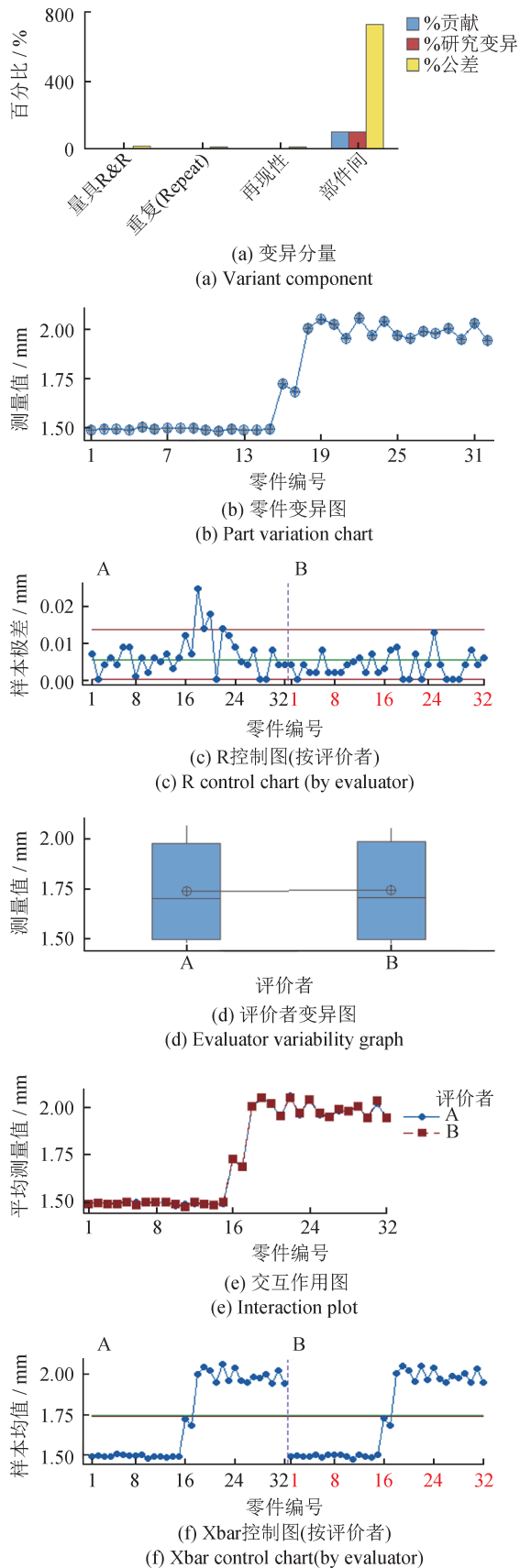


图3 产线MSA分析结果

Fig.3 MSA analysis results of production line

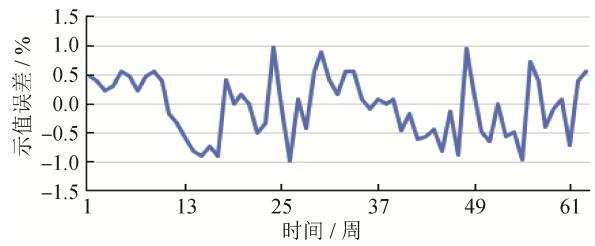


图4 连续运行期间的点检数据

Fig.4 Point inspection data during continuous operation

难以精准定位、复杂曲面表面制备质量一致性差和低对比度压痕识别精度低的关键技术难题，上料重复定位误差不超过 ± 0.5 mm，打磨表面粗糙度 $\leq 0.8 \mu\text{m}$ ，测量误差在0.01 mm级。

3) 实验结果证明：该方法效率较传统人工模式提升4倍，测量系统分析GR&R%为17.42%，可区分类别数达59，长期运行稳定可靠，为工业场景下的质量全检与数据追溯提供了切实可行的工程方案。

5 未来发展展望

本文所提出的硬度数字化在线检测方法，是计量检测技术向数字化、智能化方向演进的一次重要技术验证与探索，为计量检测技术从实验室走向工业现场提供了成功的工程实践范例。未来，随着人工智能、边-云计算与通信技术的发展，数字化计量检测将向三个方向演进：多模态传感融合、人工智能深度驱动、加速标准化和生态化建设。

在多模态传感融合方向，数字化在线检测系统会突破单一参数检测的局限，多模态传感融合是主要的发展趋向之一。将几何尺寸、力学性能、环境条件等各类检测数据进行整合，形成多参数一体化同步检测的综合性质量感知平台，给产品质量评价提供全面、立体的数据支撑，促进质量评价体系的精准化^[15]。

在人工智能深度驱动方向，人工智能技术会在数字化在线计量检测全流程中得到应用。利用深度学习算法，可以对各个环节的参数进行关联分析，快速找到检测过程中异常产生的根本原因；根据历史检测数据和实时生产工况来动态推荐最优的检测点位和加载参数，实现检测过程的自适

表3 数字化在线检测产线与传统检测手段对比

Tab.3 Comparison between digital online inspection production line and traditional inspection methods

检测手段	安全(S)		质量(Q)			成本(C)		
	打磨方式	打磨效果	打压方式	压痕测量	数据存储	效率	用时	上下料方式
传统检测	手工打磨, 高转速、噪声、粉尘	一致性低	手动加载, 力值误差: ±1%	人工测量 误差: 0.01 mm	记录批次范围区间, 纸质数据单	1 000 件/16 h	大于2 min/件	3人手动操作
数字化在线检测	自动打磨, 零风险	一致性高, 表面粗糙度 ≤ 0.8 μm	自动加载, 力值差: ±0.4%	自动测量 误差: 0.001 mm	记录实际硬度值, 数据库容量大于100万行	1 000 件/12 h	小于等于42 s/件	自动化运行, 无需人工操作, 兼容1~9级叶片, 100件/盘

应调节; 通过监测系统自身传感器信号和测量结果来预警潜在的设备故障或者性能漂移; 建立多源在线检测数据和最优工艺参数的逆向映射, 可以实现生产工艺的实时优化^[16]。

在标准化和生态化建设方向, 行业标准化体系会不断改进完善, 随着欧盟相关项目的推进以及全球产业协同发展的需要, 预计未来5~10年, 对于在线检测领域的技术规范、校准方法、测量不确定度评定标准以及软件验证规范等会陆续出台, 逐步填补目前在线、动态、实时测量过程中计量标准缺失的空白。建立动态校准链, 利用可信区块链技术, 进一步保证测量数据的准确性、完整性和可追溯性, 推动数字化在线计量检测领域工程化、规模化、产业化发展, 形成“设备-软件-标准-服务”的完整生态^[17]。

参考文献

[1] 国务院. 计量发展规划(2021—2035年)[Z]. 北京: 国务院, 2021.
State Council. Metrology Development Plan (2021—2035)[Z]. Beijing: State Council, 2021. (in Chinese)

[2] 殷绪强, 蔡煜, 王林辉, 等. 对实验室计量确认的探讨[J]. 物理测试, 2025(4): 69-72.
YIN X Q, CAI Y, WANG L H, et al. Discussion on metrological confirmation of laboratories [J]. Physical Testing, 2025(4): 69-72. (in Chinese)

[3] 蔡文嘉, 唐登平, 李亮波, 等. 低压电流互感器自动化检定系统在线计量检测[J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44(6): 613-619.
CAI W J, TANG D P, LI L B, et al. On-line metrological detection of automatic verification system for low-voltage current transformers [J]. Journal of Shenyang University

of Technology, 2022, 44(6): 613-619. (in Chinese)

[4] 石伟, 陈诗琳, 陶继增. 无人值守智能化洛氏硬度测试平台[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 95-100.
SHI W, CHEN S L, TAO J Z. Unattended intelligent Rockwell hardness testing platform [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 95-100. (in Chinese)

[5] 黄帅, 解宏昌, 张吉祥, 等. 金属制品全自动检测系统设计与应用[J]. 金属制品, 2025, 51(5): 38-42.
HUANG S, XIE H C, ZHANG J X, et al. Design and application of fully automatic detection system for metal products [J]. Metal Products, 2025, 51(5): 38-42. (in Chinese)

[6] 赵乃胜, 杨艳龙, 赵鑫, 等. 热轧板卷全自动智能检测系统的设计与应用[J]. 河北冶金, 2025(3): 67-72.
ZHAO N S, YANG Y L, ZHAO X, et al. Design and application of fully automatic intelligent detection system for hot rolled coil [J]. Hebei Metallurgy, 2025(3): 67-72. (in Chinese)

[7] HASSENSTEIN C, HECKEL T, TOMASSON I, et al. Automated wall thickness evaluation for turbine blades using robot-guided ultrasonic array imaging [J]. Journal of Non-destructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems, 2024, 7(2): 021005.

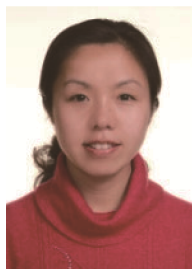
[8] LONAREVI Z, REBEREK S, ELA S, et al. Adaptive visual quality inspection based on defect prediction from production parameters [J]. IEEE Access, 2024 (12): 93899-93910.

[9] ABDULRAHMAN Y, ELTOUM M A M, AYYAD A, et al. Aero-engine blade defect detection: a systematic review of deep learning models [J]. IEEE Access, 2023, 11: 53048-53061.

[10] 韩志国, 吴忠法. 基于人工智能的数控加工工艺自动生成优化研究[J]. 2025(22): 13-16.

- HAN Z G, WU Z F. Research on automatic generation and optimization of NC machining process based on artificial intelligence[J], 2025(22): 13-16. (in Chinese)
- [11] CHEN S, LI Z, JUN Y, et al. Research on Brinell hardness measurement method based on three - dimensional point cloud data[J]. Measurement: Sensors, 2025, 38: 101452.
- [12] ANDRÉS C, ANGELA G, JOSÉ L. On the relevance of NDC indicator in measurement systems analysis[J]. International Journal for Quality Research, 2021, 15 (3) : 977-982.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 金属布氏硬度计: JJG 150-2005 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Metallic brinell hardness tester: JJG 150-2005 [S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2005. (in Chinese)
- [14] 孟薇, 石伟, 陈诗琳. 基于过程解耦的硬度自动化检测系统混合 GRR 方法研究[J]. 计测技术, 2025, 45(6): 116-121.
MENG W, SHI W, CHEN S L. Research on hybrid GRR method of hardness automatic detection system based on process decoupling[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(6): 116-121. (in Chinese)
- [15] 李坤宇, 张新延. 多模态传感数据融合在隧道结构监测中的应用研究[J]. 计算机应用文摘, 2025, 41(22): 249-251.
LI K Y, ZHANG X Y. Research on application of multi-modal sensing data fusion in tunnel structure monitoring [J]. Computer Application Abstracts, 2025, 41 (22) : 249-251. (in Chinese)
- [16] WAVRE S P, KUKNOR S, DHAKTOD P. Digital technology for Natyashastra's "Rasa" measurement to interpret online learning engagement [C]// Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD), 2023: 1-6.
- [17] 李鹏举, 张平萍, 史铭楷, 等. 金属材料全自动洛氏硬度测试系统设计应用[J]. 金属制品, 2022, 48(5): 29-31, 37.
LI P J, ZHANG P P, SHI M K, et al. Design and application of fully automatic Rockwell hardness testing system for metallic materials[J]. Metal Products, 2022, 48(5): 29-31, 37. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 石伟(1972—), 女, 研究员, 专业副总师, 全国力值硬度重力计量技术委员会委员, 全国试验机标准化技术委员会委员, 国家一级考评员。主要研究方向为硬度等力学量计量校准技术、数字化计量与检测技术研究。负责科研项目 10 余项, 获各等级奖项 5 项, 申请发明专利 10 余项, 发表论文 20 余篇。



通信作者: 陈诗琳(1997—), 女, 工程师, 主要研究方向为硬度等力学量计量校准技术、数字化计量与检测技术研究。参与科研项目 6 项, 申请发明专利 10 项, 发表论文 10 余篇。