

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.06.10

基于过程解耦的硬度自动化检测系统 混合GR&R方法研究

孟薇, 石伟*, 陈诗琳

(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)

摘要: 为系统解决硬度自动化检测系统的测量系统分析(Measurement System Analysis, MSA)应用难题, 阐述了其MSA的特殊性, 指出传统重复性与再现性(Gage Repeatability and Reproducibility, GR&R)方法在变异源识别与实验设计上的局限性。在此基础上, 提出一种“过程解耦-混合GR&R”实验策略, 将硬度检测流程解耦为压痕生成(破坏性)与压痕测量(非破坏性)2个子过程, 分别采用嵌套设计与交叉设计进行变异源分离与量化。通过构建双检测单元自动化平台, 开展系统的MSA实验, 运用方差分析法评估设备重复性、再现性及交互作用的影响。研究结果表明: 所提出的方法能有效识别主导变异源, 为硬度自动化检测系统的性能评估与优化提供了可行的分析框架, 具有较强的工程适用性与推广价值。

关键词: 测量系统分析; 混合GR&R; 过程解耦; 破坏性测试; 自动化硬度检测; 重复性; 再现性; 嵌套设计

中图分类号: TB938.2; O212.4; TP274 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2025) 06-0116-12

Research on hybrid GR&R method of automatic hardness testing system based on process decoupling

MENG Wei, SHI Wei*, CHEN Shilin

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: To systematically solve the application problems of Measurement System Analysis (MSA) in the automatic hardness detection system, the particularity of its MSA is expounded, and points out the limitations of the traditional Gauge Repeatability and Reproducibility (GR&R) method in the identification of variation sources and experimental design. On this basis, a "process decoupling hybrid GR&R" experimental strategy is proposed, which decouples the hardness testing process into two sub processes: indentation generation (destructive) and indentation measurement (non-destructive). Nested design and cross design are used to separate and quantify the variation sources, respectively. Through the construction of an automation platform with double detection units, the systematic MSA experiment was conducted, and the analysis of variance was used to evaluate the influence of equipment repeatability, reproducibility and interaction. The results show that the proposed method can effectively identify the dominant variation sources, and provide a feasible analysis framework for the performance evaluation and optimization of the automatic hardness testing system, which has

收稿日期: 2025-09-24; 修回日期: 2025-11-12

基金项目: 工信部民用飞机“十四五”数字化项目(CYF2415301)

引用格式: 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GR&R方法研究[J]. 计测技术, 2025, 45(6): 116-127.

Citation: MENG W, SHI W, CHEN S L. Research on hybrid GR&R method of automatic hardness testing system based on process decoupling[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(6): 116-127.



strong engineering applicability and popularization value.

Key words: measurement system analysis; hybrid GR&R; process decoupling; destructive test; automation hardness testing; repeatability; reproducibility; nested design

0 引言

现代智能制造的质量管理体系高度依赖测量数据的准确性与可靠性,测量数据不仅是过程控制与能力评估的基础,更是进行质量决策的关键依据^[1]。在此体系中,测量系统分析(Measurement System Analysis, MSA)作为一套系统化的统计方法论,其核心目标在于量化并分离测量过程自身所引入的变异,从而确保观测到的数据变异能够真实反映产品与过程的实际状态,有效规避测量“噪声”对质量判断的干扰^[2]。

随着工业4.0和智能制造浪潮的推进,自动化检测系统凭借其高效率、高一致性及与生产线无缝集成的优势,正逐步取代传统人工检测,成为质量控制的核心环节^[3-4]。这一检测范式的转变,对经典MSA理论,特别是重复性与再现性分析,提出了新的挑战。在自动化检测系统中,传统MSA理论中由“操作员”主导的再现性变异,其内涵与表现形式已发生根本性重构^[5-7]。这意味着,即便测量设备已通过严格的计量校准实现了准确性与偏倚的有效控制,其在动态生产环境下稳定重复测量能力和抵抗条件变化的能力,仍需通过MSA进行独立且系统的评估。校准是设备合格的“准入证”,而MSA才是设备在实际工况下稳定工作的“能力证明书”。

硬度自动化检测系统作为自动化检测技术应用的典型代表,已广泛应用于轴承、齿轮、螺栓等关键零部件的质量把控过程^[8-9]。该系统的MSA具有特殊性,主要体现在2个方面:其一,硬度测试的破坏性本质,导致传统GR&R分析中“同一零件多次重复测量”的交叉实验设计无法直接应用;其二,在自动运行模式下,测量变异源已由“人”转向“机”与“交互”,再现性需重新定义为设备间、运行周期间及参数设置间的变异。

现有研究多集中于传统人工测量系统的MSA应用优化,或仅关注自动化检测设备的校准与单

体精度提升,针对“自动化”与“破坏性”双重特性融合下的MSA系统化研究尚存在明显空白。这一空白导致在实际工况下,即便拥有经校准的自动化系统,其测量数据的长期稳定性和变异构成依然存疑,为智能制造的质量可靠性埋下隐患。

基于上述分析,本研究旨在系统解决硬度自动化检测系统的MSA应用难题。核心研究工作包括:①剖析自动化检测系统变异源的演变与重构机制,阐明其MSA评估的特殊性;②针对破坏性测试的固有约束,提出一种“过程解耦-混合GR&R”创新策略,即对压痕生成(破坏性)过程采用嵌套设计量化运行周期变异,对压痕测量(非破坏性)过程采用交叉设计,分离设备重复性与再现性;③通过实验设计与方差分析量化系统综合性能,精确识别主导变异源,最终为硬度自动化检测系统的性能验收与持续改进提供一套科学、可推广的MSA评估框架。

1 硬度自动化检测系统的MSA特殊性

1.1 计量校准后进行MSA的必要性

在精密计量与质量管理领域,计量校准与MSA共同构成了保障测量数据可信度的两大基石,二者职能互补、各有侧重,不可相互替代^[10-11]。明确二者的本质区别与内在联系,是理解自动化检测系统全面性能评估的必要前提。

计量校准以确立测量设备的准确性为核心目的。其通过规定的标准条件下,将设备的示值与更高等级的标准器所复现的量值进行比对,以确定其偏倚,并确保其在全量程内的线性特性。以布氏硬度计为例,其校准过程需严格依据ISO 6506-2《金属材料布氏硬度实验》、JJG 150-2005《金属布氏硬度计》等标准,对其试验力、压头几何尺寸、保载时间等核心参数进行校准与修正^[12-13]。因此,校准证书能证明单台设备在理想、受控环境下“测得准”,是其量值溯源性与合法性的“准入证”。

然而,1台获得合格校准证书的设备,在被集成到复杂的自动化生产线后,其整体测量性能未必能满足实际质量监控的需求。核心原因在于:在实际工业环境下,影响生产决策的关键要素是由人(Man)、机(Machine)、料(Material)、法(Method)、测(Measurement)、环(Environment),即5M1E构成的完整测量过程的综合表现,而不仅仅是设备本身的静态精度。MSA正是在这一背景下用于评估完整测量过程精密度的系统方法论^[14]。其核心价值为量化测量结果的变异,主要包括稳定性、线性、偏倚、重复性(设备自身的固有波动)和再现性(不同测量条件引起的波动)^[15]。

对于集成化的硬度自动化检测系统,其变异来源远超出了单台设备的校准评定范围,主要包括:①系统集成引入的变异:多台自动化设备单元间的系统性差异(机械精度、传感器特性、软件版本);②工艺流程耦合的变异:自动上料、定位、打磨、测量各子流程间的交互作用与累积误差;③动态环境与时间维度变异:长期连续运行导致的热漂移、机械磨损、软件状态积累以及生产环境中振动、温度等因素的综合影响;④零件与测量交互变异:零件定位、表面状态与光学测量系统之间的相互作用。

上述由系统集成、工艺流程和动态环境引入的变异,无法通过针对单台设备的标准条件予以识别和控制。当前行业中存在的一个常见误区是:认为“设备校准合格即等同于整个测量系统可靠”。然而,校准主要控制测量数据的“中心位置”(即测量的准确性),MSA则用于评估数据的“离散程度”(即测量的精密度)。即便中心位置正确,过大的离散度也会导致系统无法有效区分产品间的微小差异,从而在统计过程控制中掩盖过程异常或产生误判,显著增加质量风险。

因此,计量校准是控制测量系统“准确性”的先决条件,而MSA则评估系统的“精度”与“稳定性”,是确保测量系统在实际工况下“测得稳”的最终保障。对经过计量校准的自动化系统开展MSA,并非重复性工作,而是对其在真实、动态、集成化的生产环境中综合性能的深度验证与必要确认,更是确保测量数据能够有效支撑智

能制造环境下精准决策的关键环节。

1.2 自动化检测系统MSA的特殊性

自动化检测系统的广泛集成从根本上重构了测量系统的误差模型,导致其变异来源相较于以人为主导的传统系统发生了根本性变迁。这种变迁并非简单的技术替代,而是系统性重构,其特殊性深刻影响了MSA的研究重点与方法设计。

首先,自动化检测系统的再现性内涵发生了偏移与扩展。在传统MSA中,再现性变异主要来源于不同操作员在测量手法、读数习惯与判断标准上的差异。自动化系统通过标准化程序与机器执行机制,几乎完全消除了“人”的干扰,但也导致了再现性主导因素的彻底转移,主要分为设备间变异、时序变异以及设置再现性:①设备间变异是再现性的核心来源,包括不同自动化检测单元之间因机械制造公差、伺服控制系统响应特性、力传感器标定曲线、光学系统分辨力及软件算法版本等固有差异所导致的系统性偏差。评估多台设备测量同一基准的一致性,是自动化系统MSA中再现性分析的主要任务。②时序变异是指系统在不同运行周期(如不同生产班次、设备重启前后)测量结果一致性。它揭示了由长时间运行带来的热漂移、机械部件磨损、光源老化、软件内存管理或环境条件缓慢累积变化所引发的性能漂移,是评估系统长期稳定性的关键指标。③设置再现性反映了系统在经历特定变更后恢复稳定测量的能力。这些变更包括更换工装夹具、关键参数调整、软件重启或计划性维护后的重新校准。优异的设置再现性是保障生产线灵活性与可重构性的基础。

其次,对自动化检测系统重复性的解读需结合系统动态特性。传统MSA中,重复性仅作为单纯评估设备短时静态精度的指标;而在连续动态运行的工况下,自动化系统的重复性变异是设备固有噪声与系统抗干扰能力的综合体现,更精准地反映了系统的短期稳定性与鲁棒性。该类变异敏感地揭示了伺服驱动与力控制环路的波动、视觉成像系统的噪声以及控制系统对微小波动、电磁干扰或环境因素变化的响应。因此,需在动态循环的场景中对其进行解读分析。

最后, 自动化检测系统中的交互作用已成为不可忽略的变异源。自动化系统作为一个复杂的机电光一体化系统, 其内部各子系统之间、系统与外部零件或环境之间的交互效应, 构成了新的显著变异来源。例如, 传送带或机器人的重复定位精度与零件本身的形位误差之间存在交互, 直接影响压痕生成位置的准确度; 自动打磨单元的加工表面质量(粗糙度、纹路)与光学测量系统的照明方案、镜头景深之间存在交互, 共同决定了压痕图像的对比度与边缘识别算法的有效性。这类交互作用在传统分析中常被忽略或归入随机误差, 但在自动化系统 MSA 中必须被明确地识别、量化和控制。

综上所述, 自动化检测系统的 MSA 特殊性源于其变异源的结构性重构, 研究焦点需从传统的“人”(操作员)转向“设备”、“时间”和“交互作用”。这意味着经典 MSA 中以操作员为核心因子的实验设计已不再适用, 必须开发新的策略以有效捕捉、分离和量化这些新的变异成分, 从而对自动化检测系统测量数据的准确性做出真实、全面的评价。

1.3 硬度检测系统 MSA 的特殊性

除自动化属性带来的普遍性挑战外, 硬度检测其本身固有的物理特性与测量原理, 为 MSA 实践引入了另一维度的经典性特殊性约束。此类约束源于其破坏性测试的本质, 并由此衍生出对实验设计的根本性制约及对样本一致性的更高要求。

首要且最根本的特殊性在于硬度检测系统的破坏性对经典 MSA 实验设计的制约。标准 GR&R 分析的核心是交叉设计, 其统计模型建立的基础是“同一零件的同一特性可被不同操作员或设备进行多次非破坏性重复测量”^[16]。然而, 硬度检测的基本原理是在特定试验力下将压头压入材料表面产生永久塑性变形, 从而形成用于硬度计算的压痕。该过程不可逆, 且同一测量位置无法实现第 2 次有效测试。这一制约是硬度检测 MSA 方法论面临的核心瓶颈, 因此必须发展超越经典框架的实验设计新策略。

其特殊性还在于样本内不均匀性导致的变异混淆风险。即便取自同一批次或同一零件, 不同

测量点位的材料在微观结构、残余应力、加工硬化程度上也可能存在微小差异。在非破坏性重复测量中, 这种差异可通过多次测量同一位置而消除, 其影响被归入零件间变异范畴。但在破坏性测试中, 每个测量点都是全新的、不可复现的, 其自身的不均匀性变异会直接融入单次测量结果中。因此, 在硬度检测的 MSA 中, “重复性”的评估实际上混杂了测量设备的固有波动和样本点位的固有差异。这使得估计测量系统本身的纯重复性变得异常复杂, 并且对实验样本的选择和统计模型的解释也提出了更高要求。

此外, 一个完整的硬度值并非直接测得, 而是通过“压痕生成”与“压痕测量”2 个前后紧密耦合的子过程间接求得。最终结果的变异是这 2 个子过程变异共同作用甚至放大后的综合体现。压痕生成子过程(加载力、保载时间)的变异会直接改变压痕的物理尺寸, 进而传递并影响后续压痕测量子过程(光学成像、直径测算)的结果。这种串联式过程结构意味着: 任何一个子过程的微小偏差都可能导致最终结果的显著变异。因此, 传统的 MSA 将测量系统视为“黑箱”进行整体评估虽有必要, 但无法满足精准改进需求——必须将总变异分解并溯源至这 2 个关键子过程, 才能识别出真正的薄弱环节并进行针对性优化。

综上所述, 硬度检测 MSA 的特殊性主要源于其破坏性、样本不均匀性及过程耦合性。针对破坏性测试的传统解决方案是采用嵌套实验设计。在嵌套设计中, 测量点(或试样)被唯一地分配给不同的运行周期或设备, 避免了同一测量点被重复测量的逻辑谬误。然而, 嵌套设计的局限在于其无法分离设备变异与样本点自身的固有变异, 导致“重复性”估计中混杂了样本不均匀性的影响。基于此, 本文提出了一种过程解耦的实验设计方案, 即针对“压痕生成”和“压痕测量”2 个子过程分别设计实验, 突破破坏性测试的限制, 实现对各环节变异的精准量化与溯源, 从而为系统优化提供清晰、可行的技术路径。

2 硬度自动化检测系统 MSA 方案设计

为系统评估硬度自动化检测系统的检测性能,

并精准量化其变异来源,将详细介绍本研究所采用的集成硬度自动化检测平台,基于该平台的物理流程与结构特点,提出一套具有针对性的MSA实验方案。

2.1 硬度自动化检测系统构成与工作流程

本研究构建的布氏硬度自动化检测系统如图1所示,集成了自动上料、高精度自动打磨、高精度试验力加载、自动压痕直径测量及自动分拣功能。在集成检测单元中,配置2个相同规格硬度计(设备A、B),对应单独的治具和压痕生成单元,共用上下料单元和打磨单元。

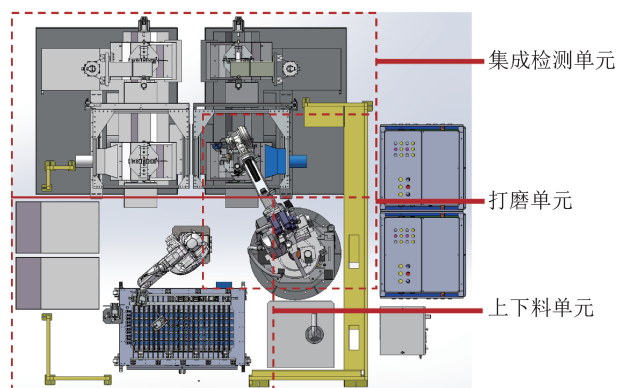


图1 布氏硬度自动化检测系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of automatic Brinell hardness testing system

该检测系统工作流程如图2所示,具体执行步骤:①系统自动识别A、B治具的空闲状态,由六轴机器人精准抓取并转运零件至空闲治具中;②其次,通过打磨机构进行零件表面预处理,以获得符合检测要求的表面状态;③打磨工序完成后,零件被移送至载荷施加工位A或B,由布氏硬度计精确施加试验力并保持,以生成标准压痕;④卸荷后,压痕测量系统自动采集压痕图像,通过图像处理算法计算压痕直径,得到硬度测量值。

该系统的双检测工位并行设计,为核心实验提供了至关重要的对比基础。在本MSA研究中,2个物理上独立、设计上一致的集成硬度检测单元被定义为“设备”因子,用以精确量化与分离自动化系统中固有的设备间系统差异(即再现性),从而深刻揭示其变异构成。

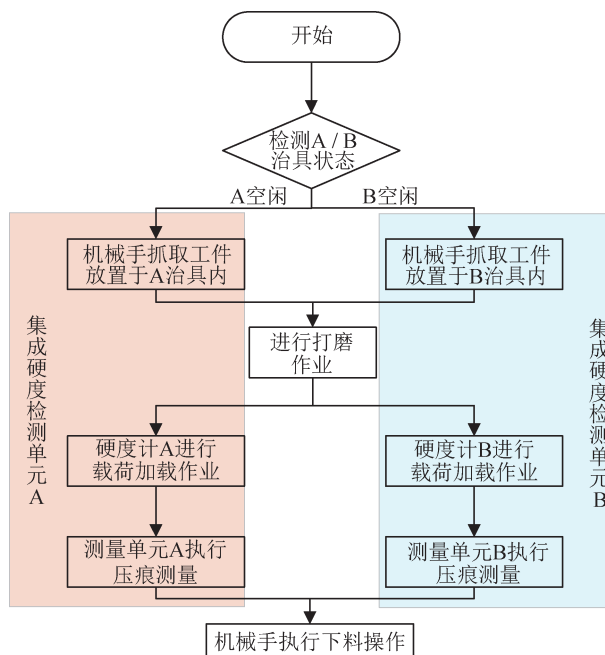


图2 布氏硬度自动化检测系统工作流程

Fig.2 Workflow of automatic Brinell hardness testing system

2.2 硬度自动化检测系统MSA实验方案设计

针对第1节所分析的自动化硬度检测系统特殊性(变异源重构与破坏性测试制约),本研究设计了一套针对性的MSA实验方案。该方案采用“过程解耦”策略,并据此为不同的子过程匹配最适宜的统计实验设计,以期精准量化系统总变异种的各个分量。

2.2.1 实验因子与水平定义

实验设计严格遵循MSA指导原则,并充分考虑自动化与破坏性特点,确定了以下因子与水平:

1) 零件因子

选取12个来自同一生产批次的试样,其材料与热处理状态一致,通过预筛选确保其硬度值覆盖实际过程的预期变异范围(以压痕直径表征)。

2) 设备因子

以2.1节所述的2个并行工作的集成硬度检测单元(设备A、B)作为再现性变异源的核心因子。该因子替代了传统MSA中的“操作员”,用于量化2个自动化单元之间的系统性差异。

3) 试验

鉴于压痕测量过程的非破坏性,设定重复测量次数为3次。即每个设备对每个零件上生成的单个压痕重复进行成像与直径测算3次。

2.2.2 GR&R 混合设计策略

本研究摒弃了单一的整体式 GR&R 分析方案，创新性地将完整的硬度检测流程解耦为 2 个物理阶段，并分别采用不同的实验设计方法，共同构成一套混合 GR&R 评估策略。

1) 压痕生成过程(破坏性):嵌套设计的应用

由于压痕生成的破坏性本质，同一试样的同一位置不可能被重复打压，传统交叉设计在此阶段完全失效。本研究对该过程采用嵌套设计：将 12 个试样随机分配至 2 个检测单元(设备 A、B)，每台设备检测 6 个试样，每个试样上只生成 1 个压痕。该设计的核心目的是量化设备运行周期内的再现性变异。然而，此设计下所得的“重复性”估计值实质上是设备固有波动、试样微观位置材料不均匀性变异以及环境随机波动的“混合体参数”，这是嵌套设计在此场景下的固有限制。

2) 压痕测量过程(非破坏性):交叉设计的应用

压痕生成后，其物理形态便固定下来，具备了可重复测量的物理基础。本研究充分利用这一特性，对压痕测量过程采用经典的交叉设计：由设备 A 和设备 B 的视觉测量系统，分别对已生成的所有 12 个压痕进行测量(每个压痕重复测量 3 次)。为了能评估整个测量过程的变异，每次测量时需重复上下料操作。该设计能够清晰、无偏地分离出设备的重复性与再现性。

实验将严格依据上述混合设计执行。采集的原始数据为压痕直径(测量精确至 0.001 mm)。后续将采用双因子方差分析法(Analysis of Variance, ANOVA)对压痕测量过程(交叉设计部分)的数据进行统计处理^[17]。ANOVA 模型可提供无偏的方差分量估计，实现对表 1 中变异来源的精准量化。

表 1 变异源分离对照表
Tab.1 Comparison table of variation source separation

过程	变异来源	物理含义	MSA 统计量	可优化对象
压痕生成	设备间差异	设备 A 与设备 B 在试验力、加载速度等参数上的系统偏差	方差分量	重新校准设备力传感器；统一设备软件参数
	测量设备重复性(纯光学)	同一设备、同一位置、多次成像与测量时，由光学系统引入的随机波动	重复性(Equipment Variation, EV)	优化照明稳定性；改进图像处理算法；清洁光学镜头
	测量设备再现性	设备 A 与设备 B 的视觉测量系统在标定精度、放大倍率等方面的差异	再现性(Appraiser Variation, AV)	对 2 台视觉系统进行统一的高精度标定
压痕测量	设备-零件交互作用	不同设备测量具有不同特性的零件时，出现的不一致现象	交互作用 P 值	检查并优化所有零件的定位一致性、表面处理一致性
	机械结构重复定位精度	机械手抓取零件、治具定位过程中表现出的重复性定位误差	包含在重复性(EV)中	提高机器人的定位精度；优化夹具夹持稳定性；检查输送带稳定性
	零件自身变异	不同零件之间的真实硬度差异	部件间变异(Part Variation, PV)	不可优化，此为产品固有特性

3 MSA 实验数据处理与结果分析

基于 2.2 节的实验方案设计，对所搭建的布氏硬度自动化检测系统开展 MSA 实验。

3.1 压痕生成过程(嵌套设计)结果分析

针对压痕生成过程，采用嵌套设计方差分析评估 2 个检测单元(A、B)在试验力加载、压痕生成环节的一致性，实验测量数据如表 2 所示。双因子

方差分析及测量系统变异方差分量分析结果分别如表3、表4所示。

表2 GR&R 实验测量数据(压痕直径)
Tab.2 GR&R experimental measurement data
(indentation diameter)

零件	检测单元	测量值/mm	测量顺序
1	A	1.491	1
2	B	1.499	1
3	A	1.495	1
4	B	1.502	1
5	A	1.492	1
6	B	1.506	1
7	A	2.009	1
8	B	2.064	1
9	A	2.030	1
10	B	1.964	1
11	A	2.066	1
12	B	1.971	1

表3 双因子方差分析结果(设备×零件)
Tab.3 Results of two factor analysis of variance
(equipment × parts)

来源	DF	SS	MS	F值
零件(检测单元)	1	0.000 494	0.000 494	0.006
零件(设备)	10	0.820 127	0.082 013	
总和	11	0.820 621		

注: DF为自由度(Degree of Freedom); SS为方差和(Sum of Squares); MS为均方差(Mean Square)

表4 测量系统变异方差分量分析结果
Tab.4 Measurement system variance component
analysis results

来源	方差分量	方差分量贡献率/%
检测单元	0.000 000	0.00
零件(检测单元)	0.082 013	100.00
合计变异	0.082 013	100.00

计算 P 值为

$$P = P(F(1, 10) \geq 0.006 02) \approx 0.940 \quad (1)$$

基于嵌套设计的方差分析表明: 该硬度自动

化检测系统的2台设备在压痕生成过程中表现出极高的再现性, 设备间差异对总变异的贡献率为0%。系统的变异主要来源于试样本身的硬度差异, 证明该自动化系统在破坏性测试环节具有优异的稳定性和一致性, 完全满足高精度智能制造环境下的检测需求。

3.2 压痕测量过程(交叉设计)结果分析

压痕测量过程采用交叉设计方差分析, 评估2台检测单元(A与B)在压痕测量环节的重复性与再现性, 压痕测量过程的交叉实验数据如表5所示。

针对上述测量数据应用ANOVA进行处理, 得到的分析结果如表6、表7、表8所示。

根据表8可以得到以下结论: ① GR&R(基于公差)值为13.94%, 小于30%的可接受限值。这表明: 相对于工程公差要求, 该硬度自动化检测系统的测量误差处于可接受水平。② 可区分类别数(Number of Distinct Categories, NDC)为76, 远大于5的最低要求。这表明: 该系统具有非常高的分辨力, 能够有效地区分不同样品之间的微小差异。

本研究采用基于公差比(% P/T)的GR&R作为主要评价指标, 原因如下^[18]:

1) 样本代表性风险规避

在工业生产现场, 选取的GR&R研究样本必须精确覆盖实际过程变差(用于计算%SV), 这个要求相对苛刻且难以完全满足。采用公差比可以规避因样本未能完全覆盖过程变差, 或因偶然因素导致样本变差超出实际过程变差所带来的风险。

2) 分析标准统一性

分辨力要求及对过程能力指数计算的影响分析, 通常都是基于公差范围进行的, 为统一分析标准并与后续过程能力分析衔接, 采用研究变异比(%GR&R)进行MSA更具工程实际应用性和一致性。

图3为测量系统各变异分量贡献率的柱状图。由图3可知, 部件间变异(即零件间误差)为该系统的主要误差来源。

图4为按设备(A、B)分组的极差均值(R_{bar})控制图, 所有零件的极差点均在控制限内。这表明: 对于这2个零件, 2台设备的测量结果差异相对较小。

图5为样本均值(X_{bar})控制图, 所有零件的均

表5 GR&R 实验测量数据(压痕直径)
Tab.5 GR&R experimental measurement data (indentation diameter)

零件	检测单元	测量值/mm	测量顺序	零件	检测单元	测量值/mm	测量顺序
1	A	1.496	1	7	A	2.020	1
1	A	1.496	2	7	A	2.020	2
1	A	1.496	3	7	A	2.024	3
1	B	1.499	1	7	B	2.033	1
1	B	1.499	2	7	B	2.033	2
1	B	1.499	3	7	B	2.037	3
2	A	1.496	1	8	A	1.963	1
2	A	1.496	2	8	A	1.958	2
2	A	1.492	3	8	A	1.958	3
2	B	1.492	1	8	B	1.970	1
2	B	1.494	2	8	B	1.974	2
2	B	1.490	3	8	B	1.970	3
3	A	1.490	1	9	A	1.951	1
3	A	1.496	2	9	A	1.947	2
3	A	1.496	3	9	A	1.951	3
3	B	1.492	1	9	B	1.951	1
3	B	1.492	2	9	B	1.951	2
3	B	1.490	3	9	B	1.951	3
4	A	1.510	1	10	A	1.978	1
4	A	1.506	2	10	A	1.978	2
4	A	1.506	3	10	A	1.978	3
4	B	1.501	1	10	B	1.978	1
4	B	1.503	2	10	B	1.978	2
4	B	1.503	3	10	B	1.978	3
5	A	1.495	1	11	A	1.999	1
5	A	1.496	2	11	A	1.999	2
5	A	1.495	3	11	A	1.999	3
5	B	1.499	1	11	B	2.003	1
5	B	1.501	2	11	B	2.007	2
5	B	1.501	3	11	B	2.007	3
6	A	1.503	1	12	A	1.943	1
6	A	1.497	2	12	A	1.939	2
6	A	1.503	3	12	A	1.943	3
6	B	1.501	1	12	B	1.943	1
6	B	1.501	2	12	B	1.949	2
6	B	1.503	3	12	B	1.949	3

表6 双因子方差分析结果(零件×检测单元)

Tab.6 Results of two factor analysis of variance (equipment × parts)

来源	DF	SS	MS	F值/P值
零件	11	4.181 03	0.380 094	8 116.10/0
检测单元	1	0.000 17	0.000 165	3.52/0.087
零件×检测单元	11	0.000 52	0.000 047	11.63/0
重复性	48	0.000 19	0.000 004	
总和	71	4.181 91		

表7 测量系统变异方差分量分析结果

Tab.7 Measurement system variance component analysis results

来源	方差分量	方差分量贡献率/%
合计GR&R	0.000 021 6	0.04
重复性	0.000 004 0	0.01
再现性	0.000 017 6	0.03
检测单元	0.000 003 3	0.01
零件×检测单元	0.000 014 3	0.02
零件间	0.063 341 2	99.97
合计变异	0.063 362 8	100.00

值点都远远超出控制限范围,并且2个检测单元测量的样件均值曲线趋势高度一致。这表明:部件间的真实变异远大于测量系统的随机误差,测量系统能够非常清晰、准确地识别和区分不同部件之间的差异。值得注意的是:绘制该图的前提是

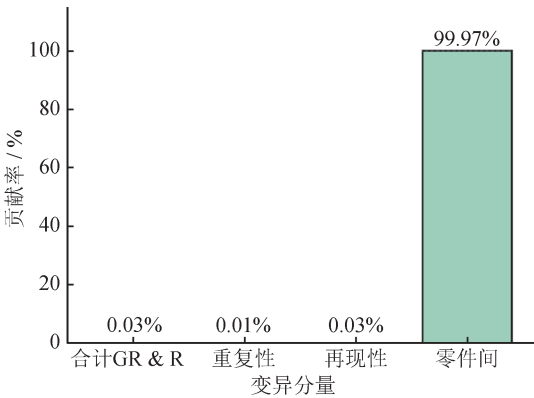
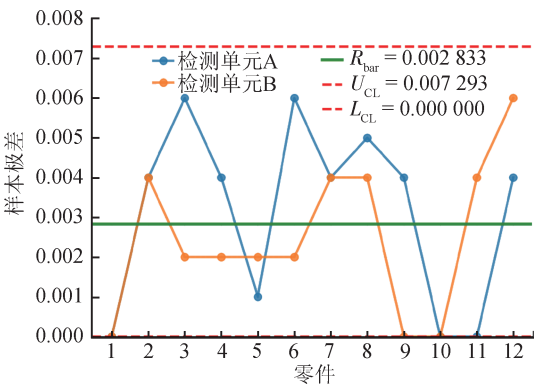


图3 测量系统各变异分量贡献率柱状图

Fig.3 Histogram of contribution rate of each variation component in the measurement system



注: 上限控制限(Upper Control Limit, UCL); 下限控制限 (Lower Control Limit, LCL)

图4 极差控制图(按设备分组)

Fig.4 Range control chart (grouped by equipment)

所选取的样本能够代表实际的过程变差范围,否则可能导致结果失效或误判。

表8 GR&R评估指标结果

Tab.8 GR&R evaluation index results

来源	标准差 (Standard Deviation, SD)	研究变异 (6 × SD)	%研究变异 (%GR&R)	%公差 (%P/T)
合计量具R&R	0.004 645	0.027 87	1.85	13.94
重复性	0.002 007	0.012 04	0.80	6.02
再现性	0.004 189	0.025 14	1.66	12.57
设备	0.001 812	0.010 87	0.72	5.44
零件×检测单元	0.003 777	0.022 66	1.50	11.33
零件间	0.251 677	1.510 06	99.98	755.03
合计变异	0.251 720	1.510 32	100.00	755.16
可区分类别数			76	

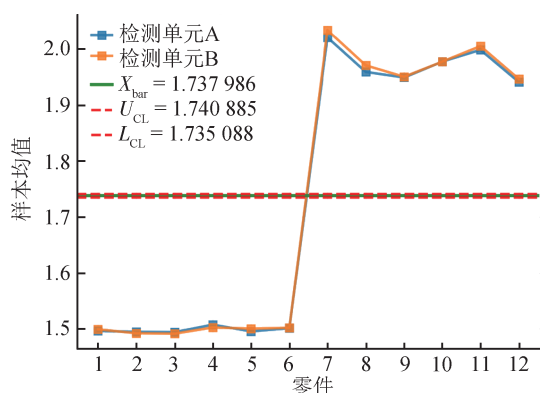


图5 样本均值控制图

Fig.5 Sample mean control chart

图6为12个零件的测量值分布图,其中,红色三角形代表每个零件的总平均值,即该零件6次测量的均值,蓝色标识相对分散,因此抽样较为合理。针对每个零件,蓝色圆点代表2台设备对该零件各自3次测量的数据点。对于单个零件而言,蓝色圆点相对集中(即同一设备对同一零件的多次测量值比较接近),说明该设备的测量重复性好。

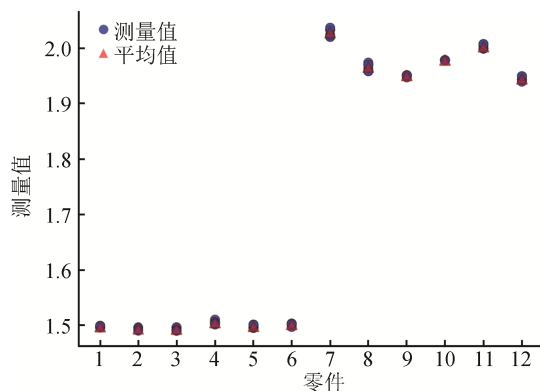


图6 各零件测量值分布图

Fig.6 Distribution of measured values of each workpiece

图7为按检测单元(A、B)分组的箱线图,2个箱体的宽度和位置相近,且连接2个检测单元各自零件均值的连线接近水平直线。这表明:2台设备测量的整体分布特征和中心位置非常接近,具有良好的再现性(设备间一致性)。

图8为检测单元与零件的交互作用图,2条均值连线近似平行。这表明:检测单元(A、B)与不同的被测零件之间不存在显著的交互作用。即设备A、B对不同零件的测量差异模式是一致的,验

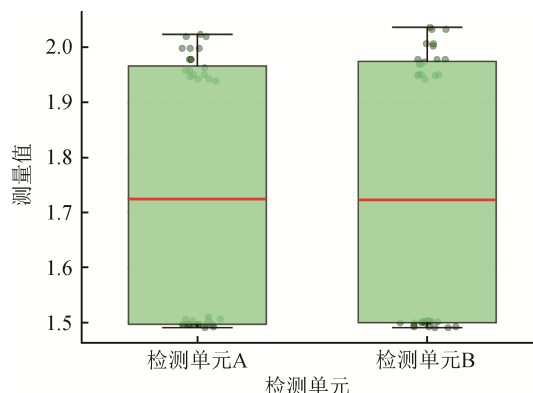


图7 按检测单元分组的箱线图

Fig.7 Box diagram grouped by measuring equipment

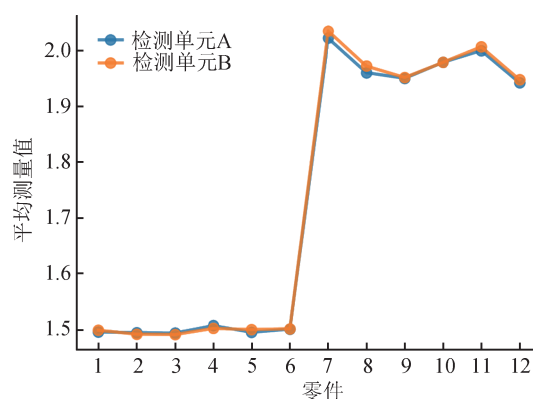


图8 检测单元与零件的交互作用图

Fig.8 Interaction diagram of measuring equipment and components

证了系统设计的合理性和评估结果的稳健性。

综上所述,该硬度自动化检测系统的MSA结果表明:测量系统性能表现良好,关键指标满足工业应用要求。后续研究可使用更多规格的零件进行进一步验证或长期稳定性监控。

4 结论

本研究首先明确了硬度自动化检测系统变异源的根本性重构:再现性主体由“操作员”转变为“设备间差异”与“时序变异”,同时破坏性测试导致传统交叉实验设计失效。针对这一特殊性问题,本文提出了“过程解耦-混合GR&R”这一核心技术方案,通过将检测流程解耦为“压痕生成(破坏性)”与“压痕测量(非破坏性)”2个子过程,并分别匹配嵌套设计与交叉设计,有效实现了对系统综合变异的分离与量化。基于双检测单

元平台的实证分析表明：该方案能够精准识别设备重复性、再现性及交互作用等关键变异源，验证了其在实际工程应用中的有效性。研究成果为智能制造环境下高可靠性测量系统的性能验收与持续改进提供了方法论依据，具有重要的理论价值及较强的工程适用性。

参考文献

- [1] Automotive Industry Action Group (AIAG). Measurement systems analysis reference manual [M]. 5th ed. AIAG, 2022.
- [2] International Organization for Standardization. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — part 1: general principles and definitions: ISO 5725-1: 2023 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2023.
- [3] LU Y. Industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2017(6): 1-10.
- [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] PERUCHI R S, BALESTRASSI P P, DE PAIVA A P, et al. A new multivariate gage R&R method for correlated characteristics [J]. International Journal of Production Economics, 2013, 144(1): 301-315.
- [6] ZHONG R Y, XU X, KLOTZ E, et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review [J]. Engineering, 2017, 3(5): 616-630.
- [7] 刘丁丁, 郑世魁, 侯潇帅. 在线测量设备的测量系统分析过程研究[J]. 内燃机与配件, 2024(16): 77-80.
LIU D D, ZHENG S K, HOU X S. Research on analysis process of measurement system for online measurement equipment [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2024 (16): 77-80. (in Chinese)
- [8] BROITMAN E. Indentation hardness measurements at macro-, micro-, and nanoscale: a critical overview [J]. Tribology Letters, 2017, 65(1): 23-41.
- [9] BHADESHIA H K D H, HONEYCOMBE R W K. Steels: microstructure and properties [M]. Butterworth - Heinemann, 2017.
- [10] 白露, 张世安, 孙志琪. 基于测量系统分析的减少显示屏镜面反射率测量不确定度方法[J]. 科技和产业, 2024, 24(23): 329-339.
BAI L, ZHANG S A, SUN Z Q. Method to reduce the uncertainty of display specular reflectance measurement based on measurement system analysis [J]. Science Technology and Industry, 2024, 24(23): 329-339. (in Chinese)
- [11] 邱晓军, 张坤. 基于MSA方法的计量标准分析与评价 [J]. 仪器仪表与分析监测, 2022(4): 32-36.
QIU X J, ZHANG K. Analysis and evaluation of measurement standard based on MSA method [J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2022(4): 32-36. (in Chinese)
- [12] International Organization for Standardization. Metallic materials — Brinell hardness test — part 1: verification and calibration of testing machines: ISO 6506-2: 2017 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 150-2005 金属布氏硬度计 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2005.
State Administration for Market Regulation. JJG 150-2005 metallic Brinell hardness testers [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2005. (in Chinese)
- [14] 李亮波, 王雪, 李海蓉, 等. 电能计量器具自动化检定流水线MSA分析研究[J]. 计量科学与技术, 2024, 68(4): 71-78.
LI L B, WANG X, LI H R, et al. MSA analysis and research on automatic verification assembly lines for electric energy measuring instruments [J]. Metrology Science and Technology, 2024, 68(4): 71-78. (in Chinese)
- [15] 王芮文, 欧定福, 曹妍. 测量系统分析技术在构件钢筋保护层厚度检测中的应用[J]. 计测技术, 2017, 37(2): 22-26, 31.
WANG R W, OU D F, CAO Y. Application of measurement system analysis technology in structural steel bar position detection [J]. Metrology & Measurement Technology, 2017, 37(2): 22-26, 31. (in Chinese)

- [16] HEMMING B. Measurement traceability and uncertainty in machine vision applications[D]. Espoo: Mikes Metrology Publication J, 2007.
- [17] 戴金辉, 韩存. 双因素方差分析方法的比较[J]. 统计与决策, 2018, 34(4): 30-33.
- DAI J H, HAN C. A comparative study on two - way ANOVA [J]. Statistics & Decision, 2018, 34(4): 30-33. (in Chinese)
- [18] 高珍琪, 杨操, 孟令印, 等. 测量系统分析(MSA)浅析及其在发动机冷却液 pH 值测量中的应用[J]. 石油商技, 2025, 43(1): 66-71.
- GAO Z Q, YANG C, MENG L Y, et al. Analysis of Measurement System Analysis(MSA)and its application in pH measurement of engine coolant [J]. Petroleum Products Application Research, 2025, 43(1): 66-71.

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 孟薇(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为硬度自动化检测技术、自动化检测系统集成技术。



通信作者: 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。负责重点科研项目 10 余项, 获各等级奖项 5 项, 建立国家副基准 2 项, 申请发明专利 10 余项, 发表论文 20 余篇, 制修订各类国家计量技术规范 10 余项。擅长力学计量标准装置研建及测试设备开发, 尤其在数字化实验室建设及非标自动化检测方面具有较为丰富的经验。