面向车身生产线调试周期缩短的多技术融合路径构建与验证

支昕 陈聪 王晓隽 段宇 董功杰

（北京奔驰汽车有限公司，北京 100176）

摘要：针对车身生产线调试过程中离线程序可用性低、调试周期长及设备易干涉等问题，采用3D大空间激光扫描、Delmia仿真与EKS虚拟调试等技术，提出一套系统性数字化解决方案。应用结果表明，该方案使机器人离线程序一次利用率超过50%，调试效率提升约30%，并基于统计方法预测了车间整体仿真模型与现场一致性水平，识别出设备类型对偏差的影响从而为车身集成项目的设备安装与调试周期缩短提供有效参考。

关键词：车身生产线 3D扫描 机器人仿真 虚拟调试 调试周期

中图分类号：U466；TP391.9 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250263

Construction and Validation of a Multi-Technology Integration Path for Body Production Line Commissioning Period Reduction

Zhi Xin, Chen Cong, Wang Xiaojun, Duan Yu, Dong Gongjie

(Beijing Benz Automotive Co., Ltd., Beijing 100176)

Abstract: This paper addresses the issues of low offline program availability, long commissioning periods, and frequent equipment collisions in the commissioning phase of body integration projects. It proposes a systematic digital solution that integrates 3D large-space laser scanning, Delmia-based robot simulation, and EKS virtual commissioning with Scout verification. It achieved over 50% first-time utilization of robot offline programs and raised commissioning efficiency by approximately 30%. Statistical analysis further predicted the consistency between simulation model and actual conditions across the entire workshop and identified the influence of equipment type on deviations. The research provides an effective methodological reference for equipment installation and commissioning period reduction in body integration projects.

Key words: Body production line, 3D scanning, Robot simulation, Virtual commissioning, Commissioning period

1 前言

车身生产线规划通常采用数字化仿真平台验证方案可行性，并输出机器人与可编程逻辑控制器（Prgrammable Logic Contraller, PLC）的离线程序用于现场设备调试。然而在实际集成项目中，离线程序往往存在可用性不足的问题，具体表现为程序点位偏差、动作时序冲突、设备物理干涉，以及新车型设备融入过程中的新老程序兼容性冲突。这些问题可能导致项目调试周期延长，影响老车型序列化生产，甚至引发设备干涉，造成经济损失。

目前行业主流解决思路如下：一是通过完善项目标准化开发体系提升集成项目调试效率；二

作者简介：支昕（1998—），女，工程师，硕士学位，研究方向为汽车车身规划、机器人仿真与数字化技术应用。

参考文献引用格式：

支昕，陈聪，王晓隽，等. 面向车身生产线调试周期缩短的多技术融合路径构建与验证[J]. 汽车工艺与材料，2026(5)：53-66.

ZHI X, CHEN C, WANG X J, et al. Construction and Validation of a Multi-Technology Integration Path for Body Production Line Commissioning Period Reduction[J]. Automobile Technology & Material, 2026(5): 53-66.

是采用线体测量技术修正仿真模型提升离线程序精度；三是引入虚拟调试技术在设备安装前完成调试和问题预消解。

第一种思路中，某公司通过建立涵盖离线程序生成的数字化工厂标准，从设备资源结构管理层面进一步压缩了新车型的调试周期[1]。该方法依赖于丰富的项目经验积累，并需在项目启动前，系统规划流程指导、技术实施标准及过程质量评估体系。

第二种思路中，主机厂多采用激光划线、三坐标测量等方式修正仿真模型中设备位置，提高离线程序准确性，从而提升现场调试效率。例如，某公司借助测量和仿真修正，单台机器人调试时间缩短约2.5 h[2]。某公司借助Roboguide软件计算仿真和现场安装偏差，将离线程序精度优化至1 mm级，显著增强了仿真与现场的一致性[3]。该方法虽能有效保证机器人与工装的相对位置精度，但在实际调试中，机器人与其他设备间仍可能干涉，因此其他设备的仿真与现场一致性问题仍需进一步解决。

第三种思路中，虚拟调试技术将生产线调试和工艺验证环节迁移至数字化环境，能够在设备入厂前发现问题并优化。研究显示，其可帮助缩短现场调试时间20%~30%[4]。近年来，该技术在车身项目中应用日趋广泛。例如，某车身项目通过虚拟调试优化机器人轨迹，实现调试时间缩短12天，并有效降低现场干涉风险[5]。

尽管上述思路各有侧重，但在技术应用和全局一致性方面仍存在优化空间。为此，本文提出一种融合3D大空间扫描、生产线规划仿真与虚拟调试的数字化解决方案。该方案通过统一提高工装、机器人及其他关键设备的仿真与现场一致性，优化PLC及机器人离线程序的逻辑和精度，从而提升现场调试效率。方案已在北京奔驰A车间某车型集成项目的试点区域完成验证。

进一步地，本文基于试点区域设备偏差数据，运用统计分析方法，对试点区域和A车间整体进行仿真与现场一致性情况的评估与预测，并通过方差分析和事后检验识别不同设备类型对偏差的影响，以期为后续项目设备安装与调试提供数据支持与决策依据。

2 问题及现状

2.1 车身集成项目现场调试现状

车身集成项目是指在装焊车间现有车型生产线的基础上融入新车型的设备，使得老车型和新车型共线生产。与新建生产线项目相同，集成项目需要经过多轮设计方案的审核和仿真验证，最终投入现场安装调试。然而，在实际项目中，新车型设备的调试阶段仍会遇到很多问题，如经仿真验证的离线程序导入现场设备后无法使用、手动调试时设备干涉、多设备联动调试时发生碰撞、老车型程序执行时与新增设备碰撞、老车型程序执行时停机等。上述问题直接导致项目调试周期延长、人力物力资源浪费，同时伴随经济损失和安全隐患。依据既往项目经验，上述问题通常由多种因素综合造成：设计方案缺陷、仿真模拟及验证疏漏、现场调试人员经验缺失、历史项目遗留隐患、设备质量问题及老化等。本文着重从仿真模拟的角度分析并定位核心问题。

2.2 核心问题定位

集成项目现场设备安装完毕后，将仿真验证过的离线程序导入现场机器人。经过基本配置，在离线程序的基础上示教现场机器人轨迹，进行适当调整后完成机器人程序调试。因此，离线程序质量是决定调试周期长短的关键因素。

2.2.1 仿真和现场数据不一致影响离线程序质量

在某车企集成项目的调试阶段，某区域离线程序导入后发现机器人工具中心点（Tool Center Point, TCP）校准程序现场无法使用，调试人员需手动创建机器人轨迹，导致该区域调试时间增加。该案例中，仿真模型的TCP支架位置和现场TCP支架的实际安装位置存在严重偏差导致离线程序无法使用。集成项目的仿真工作一般使用老车型的仿真模型，在此基础上添加新车型设备并创建新的机器人程序。受到地面水平度、设备自身及安装方式等因素的影响，现场实际安装位置和仿真模型的理论值一般有10 mm~20 mm左右的偏差。然而，老车型项目现场安装完成后，没有测量设备实际安装位置并反馈给仿真进行模型更新。此

外,在老车型的序列化生产期间存在由产品变更引发的线体改造,现场设备位置变化后没有修正仿真模型,导致老车型的仿真模型与现场最新设备状态不一致,新车型离线程序无法使用。因此,解决集成项目中仿真模型和现场设备的不一致是提升离线程序质量的关键之一。

2.2.2　仿真干涉区设置影响离线程序质量

仿真环境中机器人间干涉区的设置对现场调试效率影响较大。例如,离线程序中未添加某两台机器人抓件程序的干涉区,导致机器人执行各自抓件程序时工件发生干涉;某机器人在执行老车型程序时与新车型设备的某一状态发生干涉;某工位导入离线程序时发现机器人干涉区名称冲突等。以上案例均增加了现场调试的工作量,影响调试效率。因此,机器人的干涉区在不同情景下的有效设置、干涉区标准的严格执行是提升离线程序质量的关键。

3　系统性数字化解决方案的设计与构建

3.1　总体方案设计框架

本文构建了一个包含2条并行技术路线的系统性框架:路线1通过多技术融合直接提升离线程序质量(图1纵向箭头路线);路线2侧重于对仿真与现场一致性进行量化评估与预测,从而为方案的优化与推广提供数据支撑(图1横向箭头路线)。

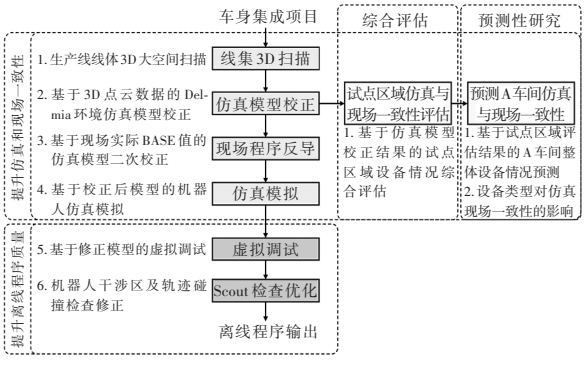


图1　总体框架与技术路线

路线1涵盖数据采集、模型校正、仿真验证、虚拟调试与程序优化,旨在系统提升仿真与现场一致性、程序逻辑合理性及干涉区设置有效性。通过3D大空间激光扫描获取包含现场设备实际位置信息的点云数据,据此校正Delmia仿真模型;结合现场机器人程序反导进行双重验证,确保模型可靠性;随后基于校正后的仿真模型进行机器人轨迹示教与离线程序创建;最后,依托EKS平台及其Scout模块,对程序进行虚拟调试与碰撞检测,迭代优化后输出可用性高的离线程序。

路线2旨在对路线1的实施效果进行量化分析,并延伸其指导价值。基于试点区域的偏差数据,运用统计方法评估该区域的仿真与现场一致性,进而预测车间A的整体情况。通过方差分析等方法,分析设备类型对偏差的影响,从而识别关键设备种类,为后续项目的安装与调试提供数据驱动的决策依据。

3.2　基于3D大空间扫描的现场数据获取与处理

3D大空间扫描用于获取生产线当前实际设备位置数据,过程主要包括2个部分:指定线体区域的扫描和点云数据处理。线体扫描的目标是采集所有设备在*XYZ*空间的位置信息以及部分设备的姿态。为实现设备位置数据的完整获取,需预先规划激光扫描测量站布设方案,确保覆盖所有设备轮廓及特征。采集得到各个测量站点的点云数据后,需经过基准点对齐、拼接、无关元素清除、点云去噪、点云抽稀、数据精度检查等处理,最终生成生产线点云数据模型。

3.2.1　生产线扫描的主要问题

对生产线的3D大空间扫描中面临的主要问题如下:

a. 问题1:3D大空间扫描测量精度限制不能满足部分设备位置精度要求。3D大空间扫描的精度一般由激光扫描仪的精度决定。在试点项目中,采用图2所示激光扫描仪,在10 m距离范围内测量三维精确性可达2 mm(参数如表1所示)。对于非工艺相关设备,如安全围栏、阀岛等,2 mm的测量位置精确度不会影响工艺执行。对于工艺执行的关键设备,需基于车身坐标系进行工艺点定位,如工装、机器人等,其设备位置精度一般建议为0.5 mm左右,因此,大空间扫描无法确保此类设备的测量位置精度。

b. 问题2:点云模型数据格式与仿真环境不兼容。点云数据经处理后导出模型的常见格式为xyz、las等。试点项目使用的生产线仿真环境

Delmia没有支持xyz等点云数据格式的处理模块，导致线体点云模型无法直接导入仿真环境进行后续校正。

c. 问题3：点云数据在仿真环境显示卡顿、操作中软件崩溃闪退。本项目线体扫描区域面积约700 m^2，包含主要设备109个。扫描仪采用中等分辨率采集，得到线体点云数据点规模可达7×10^8个。在仿真模型校正中，点云模型导入Delmia仿真环境后需进行大量动态查看操作，然而多数计算机的显卡配置无法支持此规模数据点的动态显示，导致操作中出现模型频繁卡顿、显示延迟和软件崩溃闪退的问题，严重影响模型校正效率。



图2 本项目使用的扫描仪FARO Focus Premium Laser Scanner

表1 激光扫描仪相关参考

参数项	参数
最大速度	2 Mpts/s
三维精确性	2 mm @ 10 m, 3.5 mm @ 25 m
测距误差	±1 mm
角度精确性	19″
LaserHDR	是
温度范围	操作温度5~40 ℃，延时操作温度-10~55 ℃，存储温度-10~60 ℃

3.2.2 扫描问题的解决方法

针对以上3D大空间扫描中出现的问题，解决方法如下：

a. 问题1解决方法：通过扫描方案的优化弥补测量精度限制。在执行扫描前进行线体预评估，识别对位置精度要求高的重点设备，根据各重点设备的自身特点确定设备关键特征。在扫描现场勘察阶段，依据重点设备位置及其关键特征轮廓有针对性地设计扫描测量站点布设方案。通过缩短测量距离的方式增加重点设备及其关键特征采集的点密度，缩小理论测距误差，使得点云数据精度在仪器能力范围内尽可能提升（可达到1 mm左右）。

b. 问题2解决方法：通过CATIA三维设计平台进行点云模型格式转换，兼容Delmia仿真环境。将线体点云模型导入至CATIA的数字曲面编辑器（Digitized Shape Editor，DSE）模块，基于CATIA和Delmia平台的数据同源机制，直接保存点云模型为Delmia环境支持的CATPart格式，实现线体点云模型在仿真环境的导入。

c. 问题3解决方法：通过数据轻量化的手段改善点云模型在Delmia环境的显示效果及操作流畅性。本文从点云抽稀、数据分割、逆向建模3个方向进行了数据轻量化。首先，采用曲率自适应采样法对整体点云进行抽稀，在保留设备复杂轮廓特征的前提下显著降低数据量；其次，依据设备种类将整体点云分割成多个独立模型文件，有效减少单体模型的数据大小；最后，对重点设备关键特征区域进行逆向建模，生成实体模型后导入仿真环境，从根本上缓解显卡资源压力。上述优化整体提升了模型动态显示的稳定性和流畅性。

3.3 基于点云数据的线体仿真模型校正

线体点云模型导入到Delmia仿真环境后，通过将各设备仿真模型和其对应的点云模型轮廓重合的方式完成仿真模型的校正。为提高校正效率和准确性，不同设备的校正标准不同。例如：对于工装、机器人等重点设备，需根据其关键特征的点云轮廓调整仿真模型；对于安全围栏、阀岛等其他设备，根据其地面安装板X、Y方向的点云轮廓对仿真模型进行校正。

3.3.1 仿真模型校正的主要问题及原因

在基于点云模型校正设备仿真模型时，普遍存在仿真模型与点云轮廓难以完全匹配的问题。以工装设备为例，在根据工装地面安装板点云轮廓调整工装仿真模型时，工装上的多个支撑件无法与对应的点云重合，且无法通过微调模型位置和偏转角解决。其主要原因为：工装地面安装板件是非标件，其尺寸和螺栓定位孔存在公差；现场地面实际水平度偏离设计零位，导致点云模型和仿真模型存在转角；此外，工装自身也存在一定的

装配累积误差。

类似地,根据机器人底座的点云轮廓调整仿真模型位置时,机器人各轴、管线包支架等关键特征无法与点云对齐,主要原因为地面水平度、安装偏差和装配误差的累积导致机器人底座和机器人本体整体结构无法和标准仿真模型完全重合。

3.3.2　本文方案针对校正问题的解决方法

针对上述问题,本文指定重点设备关键特征的校正优先级,以优先级高的特征的点云轮廓为主要校正参照,在此基础上调整仿真模型的位置和偏转角度,按照优先级顺序依次重合其他特征轮廓。校正优先级高的设备特征对应设备安装或装配尺寸链的末端。例如,对于工装,第一校正优先级特征是工装基准板,第二优先级是工装地脚(由于工装设备执行精密测量,因此工装基准版上装配的定位组件位置默认为准确,不进行基于点云的位置校正);对于机器人和机器人底座整体结构,第一优先级是位于机器人第6轴的管线包支架的姿态特征,第二优先级是机器人本体底面安装孔,第三是机器人底座圆柱体表面,最后是机器人底座和地面的定位螺栓。通过这种基于优先级的校正方案,能够有效控制安装误差在尺寸链上的叠加,提升校正准确性。

3.4　基于机器人程序反导的模型二次校验

在完成基于点云数据的仿真模型校正后,将老车型的现场实际程序导入Delmia仿真环境的对应机器人,利用反导入程序对模型的仿真和现场一致性进行二次验证。

3.4.1　机器人实际BASE与理论BASE

机器人的基坐标(BASE)定义了其对应工装在机器人足部坐标系中的位置,即工装和机器人的相对位置(图3)。现场一般通过三点法等方式获取某工装相对于机器人的位置,记为该机器人的实际BASE值。相应地,仿真环境中该工装与机器人的相对位置为理论BASE值。由此,可以通过比较2个参数的差异获得现场和仿真的差异信息。

作为比较的前提,选定机器人为校验基准进行模型的调整,并认定经点云校正过的机器人模型位置为准确位置。

值得注意的是,实际项目中一般不测量其他设备与机器人的相对位置,无法获取其与机器人的实际相对位置坐标。因此,程序反导进行二次校验的方法仅适用于工装设备。

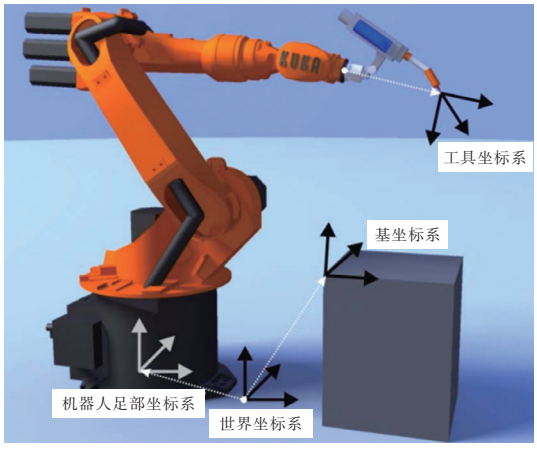


图3　KUKA机器人坐标系系统

3.4.2　基于机器人BASE值的程序反导校验方法

根据反导入程序中现场实际的机器人BASE值和仿真中理论BASE的差值,计算得出工装模型位置移动参考。设实际的机器人BASE坐标为(X_{act}, Y_{act}, Z_{act}, 0, 0, 0),仿真模型中机器人的BASE坐标为(X_{sim}, Y_{sim}, Z_{sim}, 0, 0, 0)。为降低问题复杂度,二次校正中不考虑工装旋转分量。工装模型在X、Y、Z方向的调整量参考值可以由如下公式计算,移动方向分别为+X、+Y、+Z:

$$\Delta X = X_{act} - X_{sim} \tag{1}$$

$$\Delta Y = Y_{act} - Y_{sim} \tag{2}$$

$$\Delta Z = Z_{act} - Z_{sim} \tag{3}$$

如果计算得到的ΔX、ΔY、ΔZ参考值中任一值大于5 mm,即判定该工装位置超差。对于超差工装,综合其调整参考值和点云轮廓数据进行修正,进而输出二次验证后的仿真模型。

3.5　虚拟调试与基于Scout的检查优化

虚拟调试集成仿真输出的机器人离线程序、PLC离线程序及三维仿真数据,在虚拟环境中构建生产线数字化模型,架构如图4所示。该技术能够模拟真实工况下的设备交互,实现PLC和设备特殊功能模块的提前测试与逻辑验证,有效完成机器人轨迹优化及PLC安全联锁的协同防护。能够显著降低现场调试风险,识别潜在设计缺陷,并通过“虚实结合”的预验证手段缩短生产线爬坡

周期。

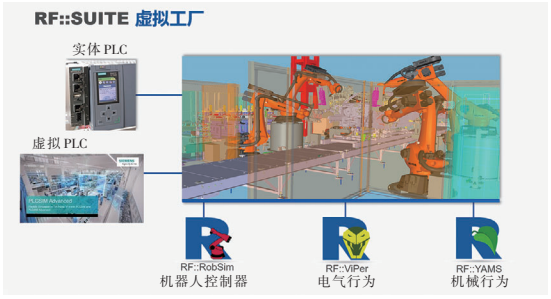


图 4 虚拟调试系统架构示意

试点项目虚拟调试使用 EKS 平台软件架构(图 5),并在传统技术应用基础上,引入 EKS 的 Scout 分析软件进行机器人互锁配置检查和机器人轨迹碰撞检查。Scout 软件集成 Interlock Checker 和 Process Analysis 运算模块。Interlock Checker 模块能够检查机器人互锁设置中机器人干涉区的注释错误、重复调用错误,并将报错位置高亮定位在可视化设备关系图中,同时在提示窗格显示错误描述指导错误更正。Process Analysis 模块能够融合时空概念,检查所有机器人所有程序轨迹在任意时间节点的路径干涉情况,并在机器人互锁关系图谱中高亮显示碰撞位置,同时可以在三维窗格中查看具体碰撞的时间节点、路径点位置、碰撞情况等信息,从而辅助机器人离线程序中干涉区范围设置的修改和优化。通过以上 2 个运算模块,Scout 软件可以高效支持机器人互锁配置、机器人离线程序干涉区范围定义及逻辑优化工作,提升离线程序的质量。



图 5 虚拟调试核心软件系统及功能

3.6 基于欧氏距离评估试点区域仿真与现场一致性

对各设备模型校正偏差值进行记录,默认点云模型的位置为准确值,各设备的校正偏差计算公式为:

$$dX=X_{cloud}-X_{origin} \tag{4}$$

$$dY=Y_{cloud}-Y_{origin} \tag{5}$$

$$dZ=Z_{cloud}-Z_{origin} \tag{6}$$

式中:dX、dY、dZ 为该设备的校正偏差值,X_{cloud}、Y_{cloud}、Z_{cloud} 为基于点云轮廓调整过的该设备中心坐标值,X_{origin}、Y_{origin}、Z_{origin} 为该设备原始仿真模型中心坐标值。

其中,设备模型中心值根据设备自身安装特点定义。例如,机器人和底座整体的中心为底座中心,工装中心为工装基准板的中心,TCP 校准支架为支架底面中心。

采用欧氏距离评估各设备模型的综合偏差值。各设备的欧氏距离 d_E 计算公式如下:

$$d_E=\sqrt{dX^2+dY^2+dZ^2} \tag{7}$$

通过计算综合偏差数组的平均值、中位数、标准差、均值标准误、最小值、最大值、四分位数,对各设备模型偏差值进行描述分析,从而评估试点区域仿真与现场一致性水平。

3.7 基于中心极限定理预测 A 车间整体情况

基于试点区域的设备偏差数据,运用中心极限定理对 A 车间整体的设备偏差情况进行统计推断,找到置信度 95% 的车间整体设备偏差均值区间。计算公式如下:

$$\bar{X}-t_{\frac{\alpha}{2},n-1}\frac{S}{\sqrt{n}}<\mu<\bar{X}+t_{\frac{\alpha}{2},n-1}\frac{S}{\sqrt{n}} \tag{8}$$

式中:μ 为 A 车间设备仿真和现场实际位置偏差均值;$\bar{X}$ 和 S 为试点区域设备偏差的均值和标准差;α 为显著性水平,取 α=0.05;1−α 为置信水平;n−1 为样本自由度;$t_{\alpha/2,n-1}$ 为 t 分布在 100α/2 的尾部临界值。

值得注意的是,该车间各区域的设备遵循奔驰统一安装标准,且零件类型、设备类型、执行工艺、线体布局逻辑基本一致,因此可认为该车间各生产区域具备工程同质性。即,试点项目区域偏差值数据视为 A 车间设备偏差值随机抽样样本。

3.8 基于方差分析研究设备类型对偏差的影响

采用单因素 ANOVA 方差分析法研究设备类型的差异对仿真模型与实际安装位置偏差的影响。根据分析结果,采用 Dunnett 检测进行事后验证,进一步定位偏差值大的重点设备类型。

方差分析需要满足 3 个条件:各组数据的独立性、正态性和方差齐性。首先,在本项目中,试点

区域的设备偏差值由各自点云测量数据获得,满足数据独立性。其次,通过Shapiro-wilk检验,验证各设备类型偏差值分布正态性。最后,通过Levene测试,验证不同类型设备偏差值数据的方差齐性。在3个前提均验证满足后,进行单因素ANOVA方差分析,设计的假设检验如下:

$$H_0:\mu_1=\mu_2=\cdots=\mu_k=\mu \tag{9}$$

$$H_1:\exists\mu_i\neq\mu\ (i=1,2,\cdots,k) \tag{10}$$

式中:H_0为零假设;k为设备类型总数,所有设备类型的平均偏差相同,意味着仿真模型和现场实际偏差值与设备种类无关;H_1为备择假设,即至少有一种设备类型平均偏差和其他设备不同。

ANOVA统计量计算如表2所示。

表2　试点项目区域设备偏差值ANOVA统计量

变异来源	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F值
组间(设备类型影响)	SS_G	df_G	MS_G	$\frac{MS_G}{MS_E}$
组内(误差影响)	SS_E	df_E	MS_E	
总计	SS_T	df_T		

表2中,SS_G组间平方和为各设备类型偏差均值和总体偏差均值的误差平方和,用于衡量由不同类型导致的设备偏差值误差,其计算公式和自由度df_G如下:

$$SS_A=\sum_{i=1}^{k}n_i(\overline{x_i}-\overline{x})^2 \tag{11}$$

$$df_G=k-1 \tag{12}$$

均方MS_G计算公式为:

$$MS_G=\frac{SS_G}{df_G} \tag{13}$$

表2中,SS_E组内平方和为各设备类型偏差值x_{ij}和其组内均值$\overline{x_i}$误差平方和的汇总,用于衡量由其他因素或随机因素导致的偏差值误差,其计算公式和自由度df_E为:

$$SS_E=\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij}-\overline{x_i})^2 \tag{14}$$

$$df_E=n-k \tag{15}$$

均方MS_E计算公式为:

$$MS_E=\frac{SS_E}{df_E} \tag{16}$$

表2中,SS_T总平方和为所有设备偏差值和总体偏差均值误差的平方和,计算公式为:

$$SS_T=\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij}-\overline{x})^2 \tag{17}$$

式中:n为试点区域偏差值样本总数,n_i为某设备类型的偏差值样本数,$\overline{x_i}$为某设备类型的偏差均值,$\overline{x}$为试点区域整体偏差均值,x_{ij}为单个设备偏差值。

F统计值是组间和组内均方的比值,公式如下:

$$F=\frac{MS_G}{MS_E} \tag{18}$$

F统计值大,说明至少有一类设备的偏差值分布和其他类型距离较远,且各类型设备偏差均值相对集中,则拒绝H_0假设。F值较小,说明各类型设备偏差均值近似,且方差较大,则无法拒绝H_0假设。通过比较显著性p值和显著性水平α=0.05来评估各设备类型偏差值统计显著性,从而判断是否接受或拒绝H_0假设:

$$\begin{cases}p\leqslant\alpha,\ \text{拒绝}H_0\text{假设}\\ p>\alpha,\ \text{不拒绝}H_0\text{假设}\end{cases} \tag{19}$$

式中,p值由python scipy的统计学模型计算得出。p值小于α,说明不同类型的设备偏差均值差异显著,则拒绝H_0假设,即不同的设备类型对仿真模型和现场实际偏差有影响;否则不能拒绝H_0假设,即设备类型和偏差值无关。

根据ANOVA方差分析结论,结合各设备偏差值描述性分析结果,选出一种仿真和实际偏差值综合评估最小的设备作为参照组,其他种类设备为试验组,进行Dunnett事后检验。类似地,检验的H_0假设为试验组设备偏差均值和参照组相同,否则为H_1。采用python scipy.stats的dunnett模型,计算出事后检验的p值,与显著性水平0.05比较,找出和参照组差异显著的设备类型。通过计算Cohen's d效应量,进一步量化事后检验的分析结论。Cohen's d计算如下:

$$d=\frac{\overline{x_1}-\overline{x_2}}{s} \tag{20}$$

$$S=\frac{\sqrt{(n_1-1)s_1^2+(n_2-1)s_2^2}}{n_1+n_2-2} \tag{21}$$

式中:$\overline{x_1}$、$\overline{x_2}$分别为计算影响效应对象的偏差均值,对应参照组设备和试验组设备;S为汇总标准差;

n_1、n_2分别为参照组和试验组样本数量；s_1、s_2分别为对应的标准差。

如果 d<0.2，属于小效应，即参照组和试验组之间的差异较小，可能没有实际意义。d≈0.5 为中等效应，即两组之间的差异具有一定的实际意义。d≥0.8 为大效应，即两组之间的差异非常显著，具有较大的实际意义。

4 多技术融合方案的应用与验证

4.1 3D大空间扫描优化方案与数据处理效果

4.1.1 测量站点优化方案对关键设备扫描精度的提升验证

针对机器人与工装等重点设备，将平均测量站点密度提升至≥4 站每设备，并对具有二层结构的复杂设备（如精定位料框）增设平台站点。试点区域共布设 200 个测量站点，安全围栏内、外侧所有测量站点间距均控制在 10 m 以内，以确保 2 mm 的整体数据可信度。

经验证，优化后的测量站点布局将重点设备关键特征的点云采集精度提升至约 1 mm，达到了预设的精度目标，有效解决了大空间扫描局部精度不足的问题。图 6 所示为测量站点优化方案，图 7、图 8 所示为现场测量站点布设及测量实施示意。

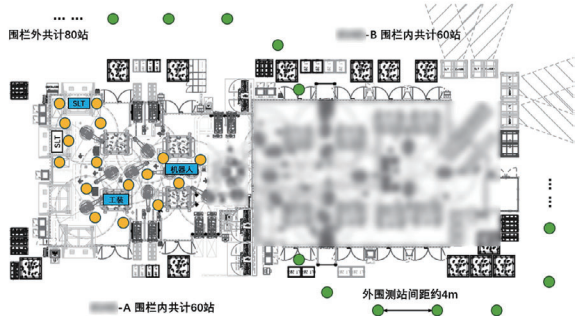


图 6 试点项目优化的扫描测量站点布设方案

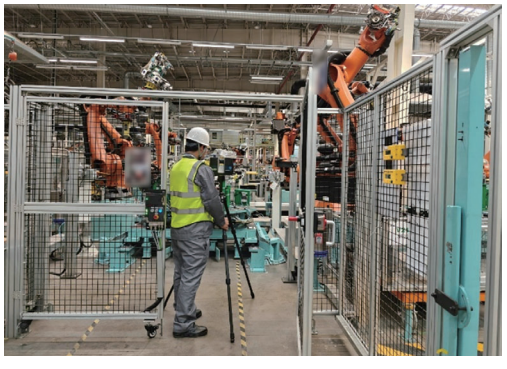


图 7 试点项目某区域按照扫描方案布设测量站点

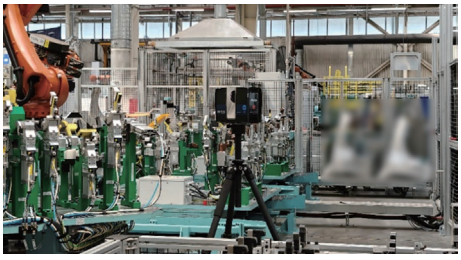


图 8 试点项目某区域扫描测量站点执行扫描

4.1.2 点云格式转置与仿真兼容性实现

依托 CATIA 平台将 3D 扫描的线体 xyz 格式点云数据导出为 CATPart 格式，实现点云数据在 Delmia 仿真环境的兼容。如图 9、图 10 所示为试点项目点云模型。

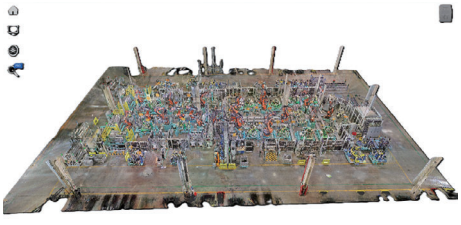


图 9 试点项目区域全局点云扫描模型

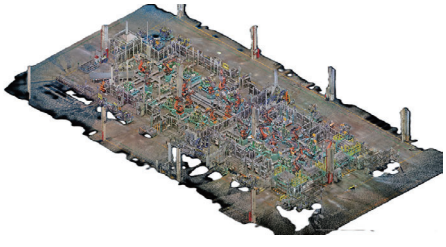


图 10 试点项目区域点云扫描模型格式转置

4.1.3 点云数据轻量化处理效果

按照设备类别对点云数据模型进行分割，分割后的单体模型主要包含机器人、工装和线槽整体，如图 11~图 13 所示。

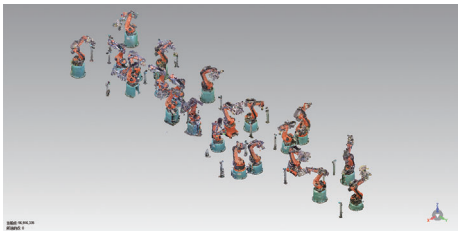


图 11 试点区域所有机器人及其附属设备点云分割模型

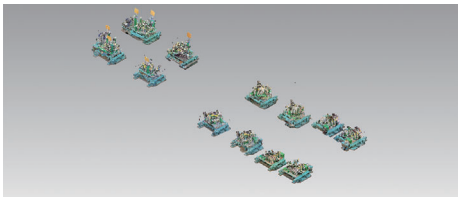


图 12 试点区域所有工装点云分割模型

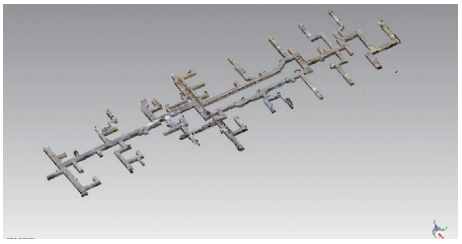


图 13　试点区域线槽整体结构点云分割模型

通过曲率采样法对点云模型进行抽稀,从而有效缩减点云文件大小,使其在 Delmia 仿真环境下可以流畅地动态显示。经过抽稀处理后,部分机器人点云样式如图 14 所示,图 15 所示为该组点云数据的三角面片显示样式,可以更清晰地观察到设备部分轮廓的残缺,由此说明描述设备的点云数据密度经抽稀后降低,对应点云数据量缩减。

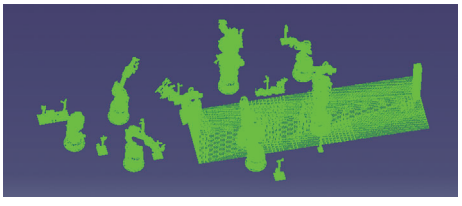


图 14　经抽稀的部分机器人点云数据模型-点云样式

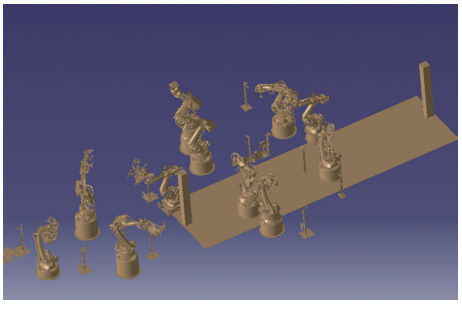


图 15　经抽稀的部分机器人点云数据模型-三角面片样式

此外,对机器人底座、机器人第 6 轴管线包支架、部分关键特征进行逆向建模,生成实体文件,有效节约显卡计算资源,如图 16 所示。

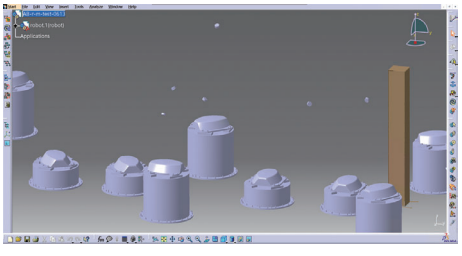


图 16　机器人底座、机器人第 6 轴管线支架的逆向建模实体

通过以上 3 种数据轻量化方法,成功实现了在计算资源有限的条件下,点云数据在 Delmia 仿真环境显示及动态操作的流畅性,极大地提高了仿真模型校对效率。

4.2　基于点云数据的仿真模型校正效果

经轻量化处理的点云数据模型以 CATPart 格式导入 Delmia 仿真模型。如图 17 所示,以蓝色厂房立柱为坐标系基准完成对齐后,可直观识别出仿真模型与点云轮廓间的位姿偏差。随后,依据 3.3 节所述的校正优先级方法调整仿真模型的位置和偏转角度,使其与点云数据匹配。

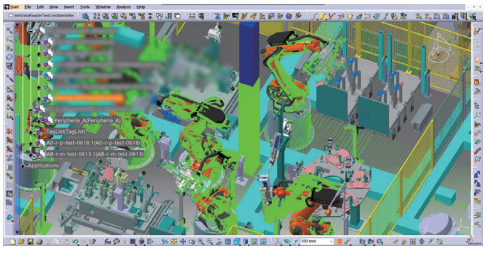


图 17　点云数据模型导入仿真模型并对齐坐标系基准示意

图 18 进一步展示了某上件工位相机支架的校正案例,其点云数据直观呈现了仿真模型与现场实际姿态间的差异。通过对支架模型进行校正,有效避免了因仿真和现场不一致可能引发的机器人轨迹程序和相机支架间的干涉问题。该校正过程从根本上提升了仿真模型的位置精确度,从而为生成高质量的机器人离线程序奠定了基础。

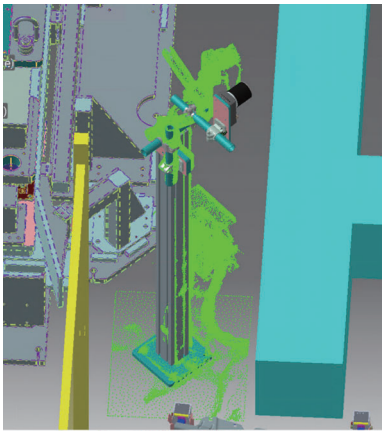


图 18　设备仿真模型和现场实际不一致示意

4.3　程序反导二次校验的应用效果

从反导入程序中获取机器人对应工装的 BASE 坐标值,即机器人实际 BASE 值,记作“反导入 BASE 坐标”。工装仿真模型基于点云数据校正后,在 Delmia 环境直接读取校正后工装模型的基准坐标值,即机器人的理论 BASE 值,记作“校正后的仿真模型 BASE 坐标”。表 3 所示为试点区域部分工装的实际和理论 BASE 坐标记录。依据 3.4 节中的超差判定原则识别出 2 个工装在 X 方向超差,

根据调整参考值公式计算，将这 2 个工装仿真模型沿 X 轴负方向分别移动约 7 mm、9 mm，同时根据其点云数据轮廓重合度综合调整模型位置。

表 3 试点项目部分工装反导入的实际 BASE 值和校正后的模型理论 BASE 值记录表 mm

设备号	150EWW021	150EWW022
X_{act}	25 039.559	25 039.559
Y_{act}	45 867.515	49 207.408
Z_{act}	350.439	350.42
X_{sim}	25 047.387	25 049.422
Y_{sim}	45 871.851	49 211.716
Z_{sim}	347.438	347.438
ΔX	−7.828	−9.863
ΔY	−4.336	−4.308
ΔZ	3.001	2.982

4.4 虚拟调试及 Scout 检查的优化效果

在完成虚拟调试基本功能测试的同时，使用 Scout 运算模块进一步检查仿真输出的机器人离线程序质量。根据软件运行的报告，检查出试点区域离线程序中机器人互锁配置存在干涉区重复定义、干涉区注释错误的问题，如图 19 所示；检查出 2 机器人同时执行不同程序时由于定义的干涉区添加范围不足导致发生碰撞，如图 20、图 21 所示。

试点区域虚拟调试的结果验证了引入 Scout 运算模块对机器人离线程序质量优化、虚拟调试效率提升、现场调试时机器人间轨迹干涉发生率降低等方面的显著作用。

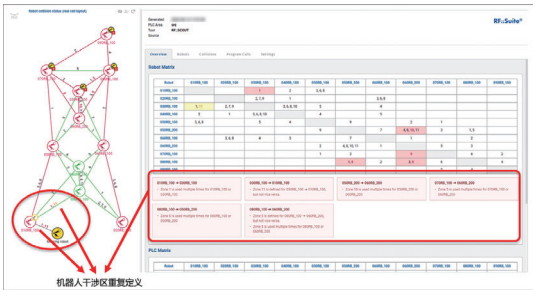


图 19 Scout 检查出机器人干涉区重复定义或注释错误

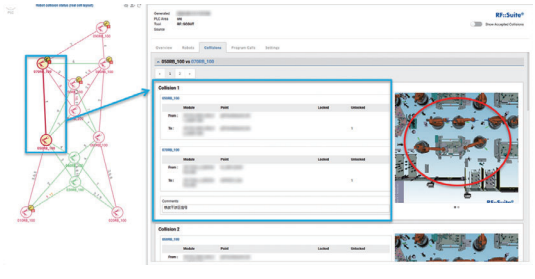


图 20 Scout 检查出机器人轨迹碰撞并定位离线程序位置

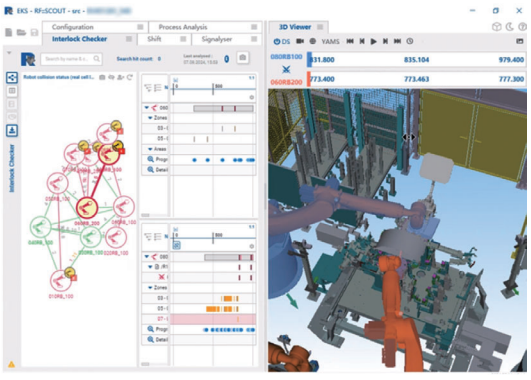


图 21 Scout 检查出机器人轨迹碰撞并显示碰撞发生时间节点及相应三维模型状态

5 仿真与现场一致性的统计评估与预测分析

5.1 基于欧氏距离的试点区域一致性综合评估

试点区域 109 个主要设备的校正偏差值记录如表 4 所示，每种设备仅展示一组数据作为示例。

表 4 试点项目区域部分设备校正偏差值 mm

设备名称	X 偏差分量值 dX	Y 偏差分量值 dY	Z 偏差分量值 dZ
机器人底座	−14.854	17.37	−15.339
TCP 校准支架	−42.971	−15.272	−16.388
GEO 工装	−10.832	15.556	−13.088
堆放式料架	−1.242	9.469	0.025
抽屉式料架	−1.688	13.965	−2.833
工具停放站	−1.283	12.300	5.018
其他设备	−11.309	18.209	−0.033

表 4 中其他设备主要包含打号机、定位件、非定位工装和移出小车 4 类设备。

本文对各设备偏差数据进行去异处理。设定各设备种类偏差值样本 3 倍标准差为阈值，对 dX、dY、dZ 数据点进行筛选，其中任一值超过 3 倍标准差即判定为异常值。同时，基于偏差值数据的散点图，结合经验值识别出异常数据点。各设备偏差数据异常值筛选如图 22 所示。

试点区域设备综合偏差的特征值如表 5 所示。其中，经过去异处理后的数据容量为 84。取偏差值欧氏距离作为偏差综合评估对象。由表 5 可知，试点区域设备仿真模型和现场实际位置综合偏差最大约 250 mm，设备偏差中位数约 20 mm。

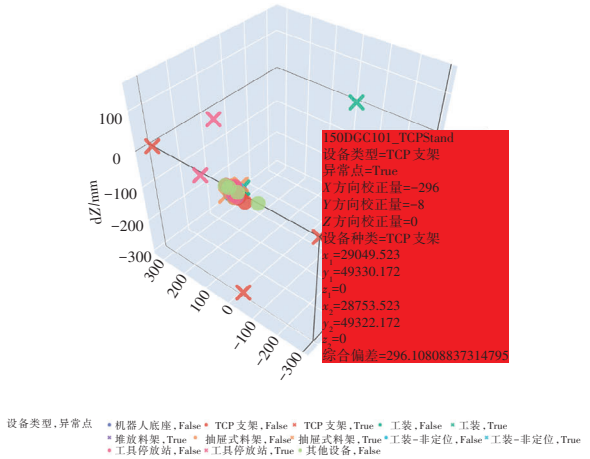


图 22　各设备偏差值三维散点图

表 5　试点项目区域设备综合偏差特征描述　mm

设备综合偏差特征	特征值
均值	24.864
中位数	20.314
标准差	29.298
均值标准误	3.197
最小值	3.781
最大值	250.072
四分位数	12.031
四分之三位数	27.024

根据对所有设备在 X、Y、Z 方向偏差(dX、dY、dZ)的描述性分析,发现各设备的 dX 数据具有工程分析意义,因此本文取设备在 X 方向的偏差值进行分析,如图 23~图 25 所示。

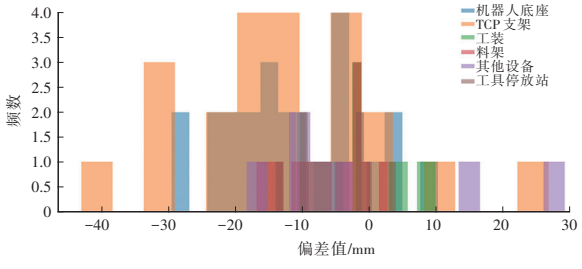


图 23　不同设备类型 X 方向偏差分布-直方图

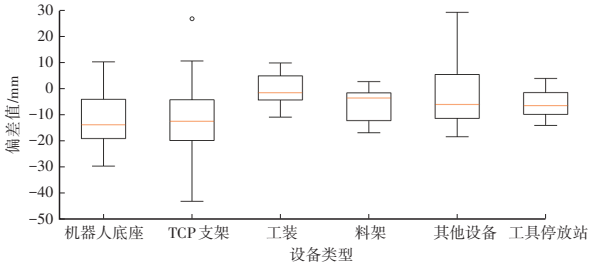


图 24　不同设备类型 X 方向偏差分布-箱线图

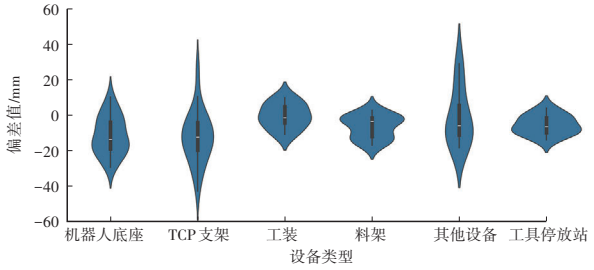


图 25　不同设备类型 X 方向偏差分布-小提琴图

可以看出,工装整体偏差最小,上件料架、工具停放站设备偏差值整体偏小,机器人底座、TCP 校准支架设备偏差值较大。所有设备均呈现 X 轴正方向的偏差趋势(dX 值为负即仿真值大于实际值,仿真模型较实际位置存在 X 轴正方向偏移)。

5.2　A 车间设备整体偏差的统计推断与预测

通过中心极限定理,预测 A 车间设备仿真模型与实际位置偏差均值 95% 置信区间(Confidence Interval, CI),如表 6 所示。

表 6　A 车间设备仿真与实际 X 方向偏差预测-95%CI　mm

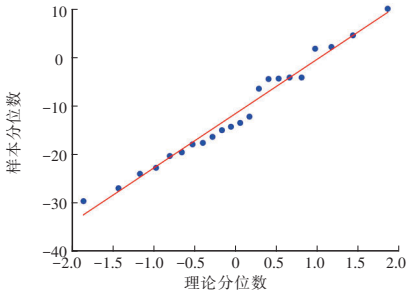
设备类型	区间下限	区间上限
所有设备	-10.70	-5.50
机器人底座	-12.96	-9.94
TCP 校准支架	-13.88	-10.85
工装	-1.93	1.10
料架	-8.00	-4.98
工具停放站	-7.05	-4.02
其他设备	-2.51	0.52

预测结果显示,A 车间所有类型设备的仿真模型位置较实际均有在 X 正方向的偏差趋势。设备综合偏差均值落在-10~-5 mm 区间;机器人底座、TCP 校准支架设备预测偏差均值较大,为-15~-10 mm;料架、工具停放站设备预测偏差均值为-8~-5 mm;工装设备预测的偏差均值最小,位于-1.93~1.1 mm 区间。其中,工装、其他设备的区间宽度在 5 mm 以下,说明 A 车间这两类设备的偏差均值预测结果更具确定性;机器人底座、TCP 校准支架的区间宽度较大,目前不能确认 A 车间中这两类设备的偏差均值处于此区间,建议作为偏差参考值。

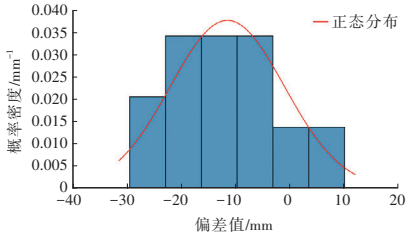
5.3　设备类型对偏差影响的方差分析结果

采用单因素 ANOVA 方差分析法,研究不同设备类型与偏差值的关系。Shapiro-Wilk 方法检验 6 类设备在 X 方向偏差值数据的正态性如图 26~图

31 所示，所有类型设备数据 p 值均大于 0.05，因此验证均符合正态分布。

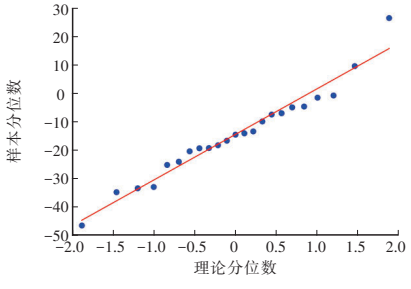


(a)分位数-分位数图

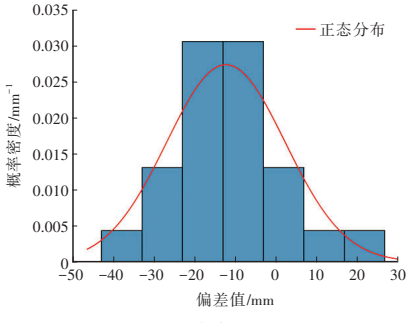


(b)分布图

图 26　机器人底座设备正态性检验(p值为 0.686 7)

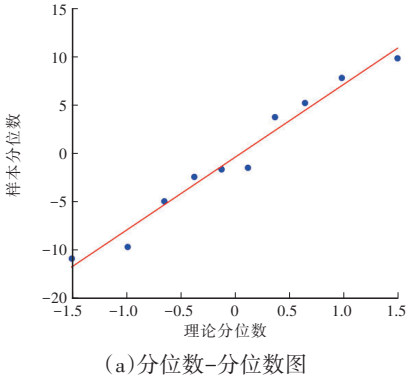


(a)分位数-分位数图

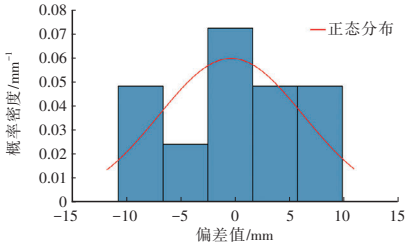


(b)分布图

图 27　TCP 校准支架设备正态性检验(p值为 0.736 3)

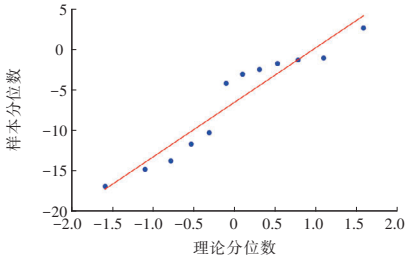


(a)分位数-分位数图

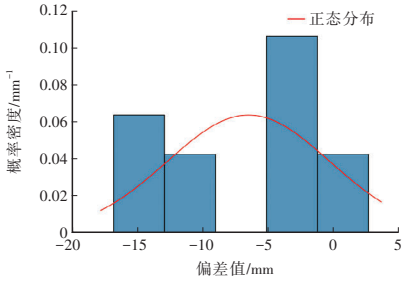


(b)分布图

图 28　工装设备正态性检验(p值为 0.709 0)

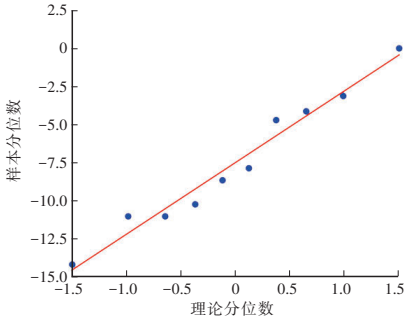


(a)分位数-分位数图

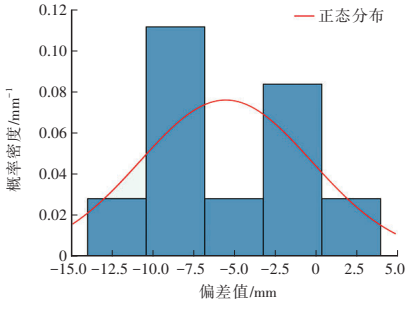


(b)分布图

图 29　料架设备正态性检验(p值为 0.169 1)

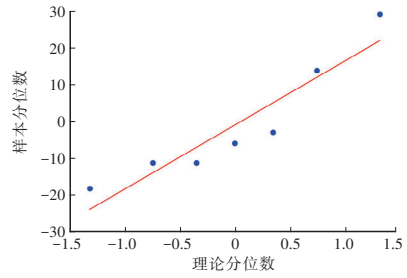


(a)分位数-分位数图

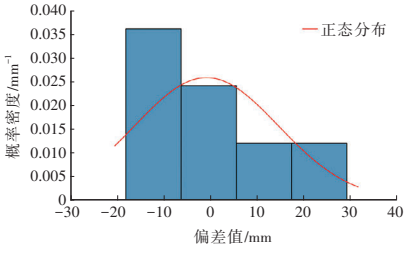


(b)分布图

图 30　工具停放站设备正态性检验(p值为 0.846 5)



(a)分位数-分位数图



(b)分布图

图31　其他设备正态性检验(*p*值为0.231 9)

采用levene法进行方差齐性检验的结果如表7所示。其中,*p*值大于0.05,可认为6类设备间方差无显著差异,满足ANOVA方差分析的前提假设。

表7　试点区域设备levene方差齐性检验

Levene检测	统计量	*p*值
检测值	1.828 3	0.133 6

基于python的scipy库中的f_oneway函数模型,计算得到单因素ANOVA方差分析的统计值和*p*值如表8所示。

表8　试点区域设备偏差单因素ANOVA方差分析结果

ANOVA检测	统计量	*p*值
检测值	2.608 7	0.031 0

表8中*p*值小于0.05置信水平,因此拒绝零假设,说明不同设备类型的偏差均值不完全相同,即不同设备类型对偏差值影响显著。

由此,采用Dunnett检验进一步分析哪些设备类型对仿真与实际偏差值有更大的影响。基于前期数据的描述性分析、设备偏差值箱线图等结果,可认为工装设备仿真模型与现场实际位置的偏差最小。因此,在Dunnett检测中,将工装的偏差值设定为参照组。其他设备为试验组,依次和工装进行差异性检测。基于python的scipy库中的dunnett函数模型,得到事后检验结果如表9所示。

表9　试点区域设备偏差Dunnett事后检验结果

Dunnett检测对象	统计量	*p*值
工装-机器人底座	-2.530	0.052
工装-TCP校准支架	-2.759	0.029
工装-料架	-1.241	0.577
工装-工具停放站	-1.001	0.747
工装-其他设备	-0.104	1.000

由表9可知,只有TCP校准支架的*p*值小于0.05,即和工装偏差均值差异显著,说明TCP支架设备仿真和实际设备位置偏差更大。此外,可以观察到机器人底座设备的*p*值与0.05相近,处于临界状态,故可认为这类设备与工装偏差均值差异仍具备显著性可能。

为进一步研究其他种类设备与偏差值的影响关系,引入Cohen's *d*效应量计算,结果如表10所示。

表10　试点区域设备偏差Cohen's *d*效应量

设备类型	*d*值(效应大小)
机器人底座	1.212
TCP校准支架	1.025
料架	0.898
工具停放站	0.809
其他设备	0.046

从表10中各设备与工装效应量结果可以看出,机器人底座、TCP校准支架和工装偏差均值有显著差异,料架、工具停放站和工装偏差均值有中等差异,其他设备偏差情况和工装基本一致。

因此,基于上述检测试验得到结论:设备种类对仿真和实际位置偏差有影响。其中,工装设备偏差值最小;机器人底座、TCP校准支架设备仿真模型和现场设备实际位置偏差较大;料架、工具停放站及其他设备偏差情况适中。对于未来车身新建项目,建议在设备安装阶段重点关注机器人底座、TCP校准支架的仿真模型和现场实际设备位置一致性。对于集成项目,重点对机器人底座、TCP校准支架、料架、工具停放站设备的仿真模型和现场实际设备位置进行测量复核,必要时实施线体激光测量。

6　结束语

本文提出了一套融合3D扫描、模型校正与虚

拟调试的数字化解决方案，有效解决了现场调试中离线程序可用性低的问题。

在试点项目中，该方案显著提升了机器人离线程序的现场利用率，超过50%的设备在导入离线程序后基本实现“上电即用”，人工调试工作量大幅降低，整体调试效率提升约33%，验证了其在缩短项目周期方面的实际成效。

进一步通过统计分析发现，不同设备类型对安装偏差具有影响，该结论为后续项目的设备安装优化提供了明确的数据依据，有助于实现精准定向管控。

参考文献

[1] 杨昆. 汽车焊装车间数字化工厂关键技术研究[J]. 机械制造, 2020, 58(11): 28-31

[2] 蒋红娅, 胡荣辉, 谭兴盛, 等. 长安汽车某焊接项目机器人离线程序运用浅谈[C]// 重庆汽车工程学会2024年论文汇编. 重庆长安汽车股份有限公司, 2025: 26-29.

[3] 陈快, 梁国山, 滕培欣. 离线编程在车身柔性线调试中的应用研究[J]. 汽车工艺与材料, 2021(1): 68-72.

[4] 智能制造委员会. 汽车行业智能制造典型场景指南：虚拟调试及工艺验证[G]//北京: ENI经济和信息化网案例库. 2024.

[5] 山东中科先进技术有限公司. 突破汽车焊装生产线三项核心技术，进入吉利、比亚迪、长城等汽车厂商供应链[EB/OL]. (2024-06-13)[2026-03-04]. https://www.chinaautosupplier.com/show_article-71791.html.

AT&M