智能制造环境下车辆装配精度在线检测研究

葛晶
正德职业技术学院，江苏 南京 211106
DOI:10.61369/ERA.2026060019

摘　　要： 车辆装配精度在线检测以智能制造生产线高节拍、高精度需求为核心，整合机器视觉、深度学习、数字孪生等技术构建完整检测体系。检测过程需先搭建适配场景的深度学习视觉检测系统，完成图像采集与预处理，再通过模型训练与亚像素级边缘定位提升检测精度，随后实施系统多维度校准与误差动态调控保障可靠性，最终依托数字孪生技术实现装配精度的实时映射、动态监测及全场景仿真优化，有效解决传统人工检测效率低、偏差大的问题，推动车辆装配检测向高效化、精准化、智能化转型。

关 键 词： 智能制造；车辆装配精度；在线检测

Research on Online Detection of Vehicle Assembly Accuracy in the Smart Manufacturing Environment

Ge Jing
Zhengde Polytechnic College, Nanjing, Jiangsu 211106

Abstract: Online detection of vehicle assembly accuracy centers on the high-tempo and high-precision requirements of smart manufacturing production lines, integrating technologies such as machine vision, deep learning, and digital twins to construct a comprehensive detection system. The detection process begins with the establishment of a deep learning-based visual detection system tailored to the specific scenario, encompassing image acquisition and preprocessing. Subsequently, detection accuracy is enhanced through model training and sub-pixel edge localization. System reliability is ensured by implementing multi-dimensional calibration and dynamic error adjustment. Ultimately, relying on digital twin technology, real-time mapping, dynamic monitoring, and full-scenario simulation optimization of assembly accuracy are achieved, effectively addressing the issues of low efficiency and significant deviations inherent in traditional manual detection methods. This drives the transformation of vehicle assembly detection towards greater efficiency, precision, and intelligence.

Keywords: smart manufacturing; vehicle assembly accuracy; online detection

引言

当前传统人工检测模式难以满足生产线高节拍、高精度的检测要求，现有视觉检测系统存在精度不足、易受工况干扰、误差调控不及时等问题。为破解上述困境，提升车辆装配检测的效率与可靠性，研究围绕车辆装配场景构建适配的深度学习视觉检测系统，优化图像采集与模型训练流程，建立多维度校准与动态误差调控机制，实现检测技术的优化升级，满足实际生产中的检测需求。

一、机器视觉在线检测法

（一）面向车辆装配场景的深度学习视觉检测系统构建与多工况图像采集

系统搭建人员首先需构建适配汽车总装车间复杂环境的深度学习视觉检测系统，核心在于整合高分辨率工业面阵相机、多角度环形补光模组与高性能嵌入式处理单元，并引入经过轻量化改进的 YOLOv8 目标检测模型，在保证检测精度的前提下最大限度提升推理速度，以满足智能制造生产线每分钟 4-6 辆的高节拍生产要求。现场调试人员需结合发动机舱、底盘、车门等不同关键装配工位的空间布局与检测范围要求，反复校准相机的安装倾角与垂直高度，确保镜头视场能够完整覆盖目标检测区域，同时有效规避装配过程中机械臂、零部件移动对成像造成的瞬时遮挡。同时对环形补光模组的光照强度与照射角度进行多轮迭代调试，通过漫反射补光技术最大限度削弱金属零部件表面的镜面反光、车间顶部照明造成的明暗不均以及设备阴影等干扰因素，保障采

作者简介：葛晶（1984-12），男，汉族，江苏省南京市人，本科，高级工程师，研究方向：智能制造。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

集图像的灰度值分布均匀且对比度适宜。

在图像采集阶段，数据采集人员需同步覆盖燃油车、纯电动车、混合动力车等不同车型以及正常装配、轻微偏差、严重缺陷等多种工况，全面采集包含螺栓漏装、连接件错位、装配间隙超标、线束插接不到位等典型装配缺陷的样本图像。随后将所有采集到的原始图像批量导入 Neuro-T 自动深度学习平台开展标准化预处理操作，先通过灰度化处理将三通道彩色图像转换为单通道灰度图像以降低计算量，再采用5×5高斯滤波算法平滑图像并消除椒盐噪声与高斯噪声干扰，进而运用动态感兴趣区域（DynamicROI）技术自动锁定螺栓孔、连接件边缘等关键检测部位，有效屏蔽车身钣金、背景设备等无关区域的干扰，从而大幅提升后续模型推理的速度与精度[1]。

（二）基于改进 YOLOv8的模型训练与亚像素级边缘精准检测技术实现

在完成图像采集与标准化预处理工作后，算法工程师需依托 Neuro-T 深度学习平台开展模型训练与优化工作，核心在于将改进后的 YOLOv8目标检测模型与多项式插值亚像素边缘检测算法深度融合，从而突破传统像素级检测技术的精度瓶颈，满足汽车装配行业对毫米级检测精度的严苛要求。算法工程师首先需使用专业标注工具对预处理后的所有图像进行像素级精准标注，清晰标注出螺栓、螺母、线束插头、钣金连接件等目标对象的边界框位置、几何尺寸以及对应的标准装配参数，随后按照8:2的比例将标注完成的高质量数据集随机划分为训练集与验证集，将训练集导入经过网络结构优化的 YOLOv8模型中进行多轮迭代训练。

模型训练完成并通过验证集精度测试后，算法工程师需引入亚像素边缘检测算法对目标对象的边缘进行亚毫米级精准定位，首先通过3×3Sobel 算子计算图像在水平与垂直方向的梯度幅值与梯度方向，从而准确识别出图像中灰度变化最为剧烈的边缘区域，随后采用非极大值抑制算法对初步检测到的边缘点进行细化处理，筛选出连续且单像素宽的边缘轮廓，最后利用二次多项式插值法对边缘点的梯度幅值进行拟合，通过求解拟合抛物线的顶点坐标得到精确的亚像素偏移量，最终将系统的边缘检测精度提升至0.1个像素级别，完全满足汽车装配行业对间隙、面差等关键参数的检测要求[2]。

二、视觉检测系统的校准与误差动态调控

（一）实施系统多维度校准以保障检测基准精准

技术运维人员必须定期对机器视觉检测系统开展全维度标定校验工作，这是保障汽车装配精度检测结果可靠性与一致性的核心前提，需综合运用相机内参标定、空间几何校准与灰度响应校准三类技术手段形成协同校验体系。相机内参标定环节采用行业通用的张正友标定法，技术人员将高精度棋盘格标定板依次放置在检测区域内的不同空间位置与倾斜角度，采集至少20帧不同姿态的标定图像，通过非线性优化算法求解相机的内部参数矩阵（包含焦距、主点坐标、像素物理尺寸）与畸变系数，从根源上消除相机镜头径向畸变与切向畸变带来的系统性检测偏差。

空间几何校准环节以整车装配的设计基准坐标系为唯一参考，在检测工位的固定位置布设不少于6个高精度标准标记点，视觉系统自动采集各标记点的图像坐标并与理论设计坐标进行逐点比对，通过坐标变换矩阵修正系统的空间几何偏移误差，确保视觉检测坐标系与整车装配坐标系实现毫米级精准重合。灰度响应校准环节使用经过计量认证的标准灰度卡，采集车间不同时段、不同光照强度下的灰度响应数据，建立环境光照强度与图像灰度值之间的非线性映射关系，有效规避车间照明波动、设备老化导致的灰度值漂移对检测精度的不利影响[3]。

（二）构建工业大数据驱动的运行偏差动态自适应调控机制

构建基于工业大数据分析的运行偏差动态自适应调控机制，以应对智能制造环境下车辆装配工况复杂多变、零部件批次质量波动、环境参数实时变化等多重因素带来的检测精度挑战，其核心在于将迁移学习理论与实时数据反馈闭环深度融合，实现系统偏差的自主感知与智能调整。算法工程师需搭建多源异构数据融合平台，实时采集视觉检测系统的运行数据、生产线的装配工艺参数、车间的环境温湿度数据以及零部件的批次质量信息，构建覆盖全生产要素的动态数据库，通过相关性分析与机器学习算法挖掘系统偏差产生的内在规律，精准识别出环境温度变化、零部件表面粗糙度差异、生产线振动等影响检测精度的关键变量。

针对这些关键影响因素，算法工程师引入迁移学习中的领域自适应算法，将在大量标注数据上训练完成的基础检测模型与新工况下采集的少量标注样本相结合，通过微调模型的高层特征提取网络快速适配新的装配场景与零部件类型，无需从零开始重新训练模型即可实现检测精度的快速恢复，大幅降低模型迭代的时间成本与数据标注成本。

三、数字孪生与全场景模拟仿真

（一）依托数字孪生技术构建车辆装配精度在线检测体系

（1）搭建高保真数字孪生模型，夯实在线检测基础

检测人员需以车辆装配线物理实体为核心，依托数字孪生五维模型（物理实体、虚拟模型、数据链路、服务支撑、孪生应用）理论，系统搭建高保真虚拟孪生体，为在线检测工作筑牢基础。首先，检测人员要全面梳理车辆装配线的核心构成，涵盖零部件输送单元、装配工位、检测传感器等所有与精度相关的物理组件，明确各组件的几何参数、运动特性及约束关系，确保虚拟模型与物理实体的几何一致性和行为一致性。其次，检测人员需融合边缘计算技术与数字孪生建模方法，将装配过程中的实时数据通过工业物联网（IIoT）终端采集并传输至虚拟模型，实现数据驱动下的模型动态更新，打破传统静态模型的局限性。同时，检测人员要运用模型校准算法，对比虚拟模型仿真结果与物理实体实测数据，不断修正模型参数，降低建模误差，确保虚拟孪生体能够精准复刻物理装配过程中的精度变化规律，为后续在线检测提供可靠的模型支撑[4]。

（2）基于数字孪生模型实现装配精度实时映射与动态监测

技术团队首先需搭建物理装配实体与数字孪生虚拟模型之间

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

的双向实时数据交互通道，通过在各关键装配工位分布式部署高精度工业视觉传感器、激光位移测距仪与扭矩采集终端，同步采集零部件装配间隙、螺栓拧紧力矩、车身三维姿态等与装配几何精度直接相关的多维度数据，所有原始数据经边缘计算节点完成滤波降噪与格式标准化预处理后，通过工业以太网高速传输至云端数字孪生系统，从而保证虚拟模型能够以毫秒级延迟同步复现物理装配现场的每一个动态细节。

在此基础上，算法工程师运用数字孪生驱动的多维度实时监测算法，对虚拟模型中映射的所有装配精度参数进行连续动态分析与异常值识别，一旦系统识别到虚拟模型中映射的精度偏差超出预先设定的合格阈值，将立即触发分级声光预警机制，并通过数据溯源算法反向定位物理装配过程中导致偏差产生的具体工序与设备节点，为现场工程师及时介入调整提供精准的技术指引。

（二）基于全场景数字孪生仿真的车辆装配精度在线检测流程优化

（1）多体动力学与有限元耦合仿真模拟及检测难点预判

算法工程师需基于已构建的高精度数字孪生虚拟模型，综合运用多体动力学仿真理论与有限元分析方法，开展车辆装配全流程、全场景的数字化仿真模拟，全面预判在线检测过程中可能遇到的各类技术难点与潜在风险。在仿真建模阶段，技术人员需明确仿真模拟的核心覆盖范围，不仅要包含零部件输送、精准定位、面差贴合、扭矩紧固等所有关键装配工序，还要充分融入实际生产过程中存在的各类不确定性因素，如零部件加工尺寸公差波动、装配工具的系统精度误差、车间环境温湿度变化以及生产线振动干扰等，从而构建高度还原真实生产场景的数字化仿真环境，确保仿真结果的真实性与工程应用价值。

（2）通过仿真迭代优化检测策略，提升在线检测效能

首先，检测人员要针对仿真过程中发现的检测难点和干扰因素，优化检测点位的布置方案，结合装配工序的特点，将检测点位设置在精度影响最大、偏差最易出现的关键位置，同时调整传感器的安装角度和检测参数，提升传感器的数据采集精度，减少信号干扰对检测结果的影响。其次，检测人员需基于仿真数据优化检测算法，融合机器视觉识别技术与深度学习算法，对采集到的装配精度数据进行精准分析，提升偏差识别的准确率和速度，同时简化检测流程，减少不必要的检测步骤，缩短检测周期，满足智能制造环境下高效检测的需求。此外，检测人员要建立仿真迭代优化闭环，将实际在线检测过程中获取的数据反馈至仿真系统，不断修正仿真参数、完善仿真场景，使仿真结果更贴合实际生产情况，进而基于优化后的仿真结果持续改进检测策略。

四、结束语

总体来说，车辆装配精度在线检测体系通过多技术融合与全流程优化，实现了检测模式从被动排查向主动监测的转变，有效提升了装配检测的精度、效率与稳定性，为智能制造背景下的车辆装配质量管控提供了可靠支撑。该体系的应用不仅解决了传统检测模式的核心痛点，更构建了“采集、检测、校准、优化”的闭环机制，为后续同类产品装配检测提供了可借鉴的技术思路。未来可进一步深化数字孪生与多技术的融合应用，优化仿真场景的真实性与模型迭代效率，推动车辆装配精度在线检测技术向更高精度、更全场景、更智能化方向发展。

参考文献

[1] 王平让，韩军祥，邵景松，等 . 车辆荷载下预制装配式箱涵受力特征分析 [J]. 建筑科技，2026，10(01)：26-30.

[2] 齐振国，侯秀娟 . 轨道车辆车体多层次结构装配偏差传递分析方法研究 [J]. 铁道机车车辆，2025，45(04)：81-88.

[3] 王宣 . 装配式建筑预制构件配送车辆调度研究 [J]. 中国储运，2025，(02)：110-111.DOI：10.16301/j.cnki.cn12-1204/f.2025.02.079.

[4] 苟建汶，严猛，何苗苗 . 预制装配式桥梁下部结构在车辆撞击下的损伤行为研究 [J]. 公路，2024，69(12)：190-195.

 | Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.