

面向汽车线束表面缺陷检测的轻量化图像异常识别算法研究

杨洁

山东科技大学 266590

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21184

[摘要] 汽车线束作为车辆电气系统的核心连接载体,其表面质量直接决定汽车电路运行的稳定性与行车安全。线束生产过程中易出现外皮破损、压接偏移、表面污渍、绝缘层褶皱等各类表面缺陷,传统人工检测与常规机器视觉算法存在检测效率低、泛化能力弱、部署成本高、适配性差等问题,难以满足流水线高速检测需求。为解决工业场景下汽车线束缺陷检测的实时性与精准性矛盾,本文以图像异常识别技术为核心,研究适配工业终端部署的轻量化算法模型。通过简化网络结构、优化特征提取模块、压缩模型参数,在保证缺陷识别精度的前提下降低算法运算量,有效适配嵌入式终端设备的算力限制。本文分析汽车线束表面缺陷检测的技术痛点,阐述轻量化异常识别算法的设计思路,探究算法优化与落地应用路径,为汽车线束自动化质量检测提供高效、低成本的技术方案,助力汽车零部件智能制造升级。

[关键词] 汽车线束; 表面缺陷检测; 图像识别; 轻量化算法; 异常检测

在汽车智能制造产业高速发展的背景下,汽车线束的生产质量管控成为零部件质量检测的关键环节。汽车线束承担全车电力传输与信号传递功能,表面微小缺陷都可能引发电路短路、信号故障等安全隐患,严重影响车辆使用安全。现阶段多数线束生产企业仍依赖人工目视抽检或传统重型视觉算法完成缺陷检测,人工检测主观性强、漏检率高、效率低下,传统深度学习算法模型参数庞大、推理速度慢,无法适配流水线实时检测与低成本终端部署需求。轻量化图像异常识别算法凭借小参数、低算力消耗、高推理速度的优势,能够精准适配工业流水线检测场景,有效解决线束表面缺陷检测的技术瓶颈,对提升线束生产质检自动化、智能化水平具有重要的工程应用价值。

一、汽车线束表面缺陷检测技术现状与痛点

(一) 传统检测技术存在局限

传统汽车线束表面缺陷检测以人工检测和传统机器视觉检测为主。人工检测依靠质检人员目视观察缺陷,对破损、偏移、污渍等表面异常进行判断,检测结果受人员状态、视觉疲劳、经验水平等主观因素影响较大,漏检、误检概率较高,同时人工检测效率有限,无法适配大批量、高速流水线生产模式,大幅增加企业人工成本。传统机器视觉检测依托固定阈值、边缘检测、模板匹配等算法开展识别,仅能针对

形态规整、缺陷特征单一的线束异常进行检测,对于纹理复杂、缺陷微小、形态不规则的线束表面缺陷识别精度不足,算法泛化能力较差,难以适配多样化的线束生产场景。

(二) 常规深度学习算法适配性不足

随着计算机视觉技术的发展,基于深度学习的图像识别算法逐步应用于工业缺陷检测。常规卷积神经网络模型具备强大的特征提取与模式识别能力,能够自主学习线束缺陷图像特征,实现多类型缺陷的智能识别。但此类模型网络层级深、参数体量庞大、运算复杂度高,需要高性能算力设备支撑推理运行。汽车线束生产车间多为嵌入式终端、边缘设备部署场景,设备算力、内存、功耗有限,重型深度学习模型存在推理延迟高、运行卡顿、部署难度大等问题,无法满足流水线实时检测的速度要求,难以实现规模化工业落地。

(三) 线束缺陷检测场景难度较高

汽车线束检测场景的复杂性与不确定性,是制约智能检测技术落地应用的核心难点,也是当前线束缺陷检测领域的重点技术痛点。在实际工业生产中,汽车线束产品品类丰富、规格跨度较大,不同用途的线束在线材粗细、外皮材质、颜色纹理、表层结构上存在显著差异,无统一的外观标准,大幅提升了统一检测的难度。同时,线束生产过程中产生的各类表面缺陷具备极强的随机性与不确定性,绝缘层褶皱、局

部破损、压接偏移、表面杂质污染等缺陷无固定形态、尺寸、位置规律，大量微小缺陷隐匿在线束纹理表层，特征辨识度极低，极易与线束本身的纹理细节、光影变化相互混淆，难以被算法精准识别。除此之外，工业流水线的动态拍摄环境存在大量干扰变量，车间光照强度不稳定、光源角度不固定、摄像头采集噪点、拍摄角度偏移、生产粉尘遮挡等各类外界因素，会进一步干扰图像质量，弱化缺陷特征与正常区域的差异化特征。常规检测算法抗干扰能力薄弱，无法有效剥离背景噪声、光影干扰与真实缺陷特征，极易出现将正常纹理判定为缺陷、遗漏微小隐性缺陷等问题，难以同时兼顾检测精准度与实时性，严重制约了自动化、智能化质检系统在汽车线束生产行业的普及落地。

二、轻量化图像异常识别算法的设计思路

（一）轻量化网络结构优化

为适配工业边缘设备的算力限制，算法以轻量化网络架构为基础，对传统卷积网络结构进行精简重构。通过采用深度可分离卷积替代标准卷积，拆分通道卷积与空间卷积运算，大幅降低网络参数量与计算量，在保留核心特征提取能力的同时缩减模型体积。精简冗余网络层级，删减无效特征节点，优化网络通道配比，聚焦线束表面缺陷的纹理、边缘、灰度等核心特征，摒弃无关特征运算，有效降低算法推理耗时。优化后的网络结构更加精简高效，能够在低算力设备上快速完成图像推理，满足流水线实时检测的速度需求。

（二）特征提取模块改良

针对汽车线束缺陷特征微弱、易受环境干扰的问题，算法优化特征提取模块，构建适配线束缺陷识别的轻量化特征融合结构。通过浅层网络提取线束轮廓、表面纹理等基础特征，深层网络聚焦微小破损、细微褶皱等精细缺陷特征，实现多尺度特征融合，强化微弱缺陷特征的特征能力。引入注意力机制对特征权重进行动态分配，自动强化缺陷区域特征响应，抑制背景光影、纹理噪点等无效干扰特征，提升模型对微小、不规则线束缺陷的识别敏感度，有效降低误检率与漏检率，保障复杂场景下的检测精度。

（三）异常识别机制优化

区别于传统分类检测模式，本文采用图像异常识别思路，以正常线束图像样本为基准，学习正常线束表面的特征分布规律，将偏离正常特征分布的区域判定为缺陷异常区域。该

机制无需大量各类缺陷样本进行训练，有效解决工业场景下线束缺陷样本稀缺、样本不均衡的难题。通过优化异常阈值判定机制，结合线束缺陷的形态特征自适应调整判别标准，适配不同规格、不同纹理的线束产品，提升算法的泛化能力，让模型能够精准识别未知、新型线束表面缺陷，适配复杂多变的工业生产场景。

三、轻量化算法在线束缺陷检测中的应用优势

（一）兼顾检测精度与实时性

优化后的轻量化算法摒弃了重型模型冗余运算的弊端，通过结构精简与特征优化，实现精度与速度的双向平衡。算法在保留多类型缺陷识别能力的基础上，大幅提升图像推理速度，能够同步适配流水线高速运行节奏，实时完成线束图像采集、分析、缺陷判定全流程工作。相较于传统机器视觉算法，该算法具备更强的抗干扰能力与泛化能力，可精准识别微小、不规则缺陷；相较于常规深度学习模型，其算力消耗更低、延迟更小，更适配工业实时检测场景。

（二）降低工业部署成本

传统智能检测系统需要搭配高性能工控设备支撑算法运行，设备采购与运维成本较高，难以在中小型线束生产企业普及。轻量化图像异常识别算法模型体积小、算力需求低，可直接部署在嵌入式边缘设备、普通工业工控机等低成本终端设备中，无需高端算力硬件支撑。算法部署便捷、运维简单，能够快速适配现有生产线设备体系，无需大规模改造生产设备，大幅降低企业智能化质检的升级成本，具备极强的工业落地价值。

（三）适配多样化生产场景

汽车线束生产具备多规格、多批次、定制化的特点，产品外观、纹理差异较大，缺陷形态无统一标准。本文设计的轻量化异常识别算法依托无监督异常检测逻辑，不依赖固定缺陷样本模板，能够自适应不同型号、不同颜色、不同纹理的线束产品。面对生产过程中出现的新型未知缺陷，算法可通过特征比对快速完成异常判定，无需重新训练模型、调整算法参数，具备良好的场景适配性与可扩展性，能够满足流水线多样化、动态化的质检需求。

四、算法应用的优化保障策略

（一）优化图像预处理流程

工业流水线现场拍摄环境具备复杂性与不确定性，光照

强度波动、设备拍摄噪点、拍摄角度偏差以及现场粉尘干扰，都会造成采集图像质量参差不齐，直接影响轻量化算法的特征提取效果与缺陷识别准确性。为有效规避环境干扰、提升算法检测稳定性，需搭建一套适配汽车线束检测场景的标准化图像预处理体系，为后续算法推理提供高质量图像数据支撑。结合线束表面缺陷细微、纹理细腻的特征特点，采用专业数字图像处理技术对原始图像进行优化校正，通过自适应光照均衡算法改善画面明暗不均问题，依托降噪滤波算法剔除图像高斯噪点与椒盐噪点，有效解决现场拍摄带来的画面模糊、光影杂乱等问题。同时对原始图像进行自适应裁剪、尺寸归一化与像素标准化处理，精准锁定线束主体检测区域，剔除背景杂物、多余画面等无效信息，大幅减少模型运算过程中的冗余数据量。标准化的预处理流程能够统一流水线图像输入标准，强化缺陷区域与正常区域的特征差异，在提升算法推理运行速度的同时，显著提高微小缺陷、隐性缺陷的识别精度，从数据源头保障检测系统的稳定性与可靠性。

（二）完善模型迭代更新机制

汽车线束生产工艺处于动态更新状态，随着生产规格调整、原材料迭代、生产设备升级，线束外观纹理、结构形态以及缺陷产生类型均会发生动态变化，固定参数的算法模型无法长期适配多样化的生产质检需求，极易出现后期误检、漏检、适配性下降等问题。为此，需要建立常态化、可持续的模型迭代更新机制，实现算法模型与生产线工况的动态适配。依托流水线智能检测设备持续采集实时生产图像数据，不断扩充正常线束样本与新型缺陷样本数据库，丰富模型训练数据集的多样性与完整性。针对日常检测过程中出现的识别误差案例，分类梳理误检、漏检的成因，结合全新的样本数据对轻量化网络模型进行微调训练，针对性优化网络特征提取权重与异常判定阈值。

（三）搭建轻量化部署体系

轻量化算法的核心优势在于适配低算力嵌入式终端的工业落地场景，为最大化发挥算法的工程应用价值，需结合工业终端设备的内存、算力、功耗限制，搭建完整、高效、稳定的轻量化部署体系。在模型部署前，对训练完成的网络模型进行结构化剪枝与量化压缩处理，剔除网络冗余参数与无效计算节点，在不损失缺陷识别精度的前提下进一步压缩模

型体积、降低运算功耗与推理延迟，完全适配工业工控机、嵌入式开发板等低端算力设备的运行要求。基于优化后的轻量化模型，搭建集成化智能检测系统，整合实时图像采集、智能算法推理、缺陷自动标注、异常声光预警、检测数据统计与存储等多功能模块，形成一体化流水线检测方案。系统操作流程简化适配车间一线人员使用需求，无需专业算法操作基础即可完成质检工作。同时建立完善的设备运维与算法调试机制，定期检测终端设备运行状态、排查系统运行故障，根据生产线工况微调算法运行参数，全方位保障轻量化检测系统持续高效运转，充分释放轻量化算法在工业质检中的高效、低成本应用优势。

五、结语

汽车线束表面缺陷检测是汽车零部件质量管控的重要环节，传统检测技术与常规智能算法难以适配现代智能制造的高速、精准、低成本检测需求。面向汽车线束缺陷检测场景设计的轻量化图像异常识别算法，通过网络结构精简、特征模块优化、异常识别机制改良，有效解决了传统模型算力消耗大、部署难、泛化能力弱等问题，在保障缺陷检测精度的同时，大幅提升检测实时性，降低工业落地成本。算法能够良好适配复杂工业生产场景，精准识别各类线束表面异常缺陷，满足流水线自动化质检需求。未来可持续优化算法特征融合能力与多场景适配性能，进一步提升模型的智能化水平，为汽车线束智能制造、质量精准管控提供可靠的技术支撑，推动汽车零部件检测行业的数字化、智能化升级。

【参考文献】

- [1] 张磊, 王洪涛. 基于轻量化深度学习的工业零件表面缺陷检测算法研究[J]. 机械设计与制造, 2023(08): 289-292.
- [2] 李锡兰, 路红, 张龙孝. 基于改进图像拼接和深度学习网络的焊件检测[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2025, 25(10): 97-104.
- [3] 由梦奇, 魏伟波, 潘振宽, 等. 面向嵌入式设备的轻量化目标检测算法研究[J]. 物联网技术, 2025, 15(20): 15-20.
- [4] 赵鑫. 汽车零部件表面缺陷智能检测系统的设计与优化[J]. 制造业自动化, 2024, 46(02): 156-159.
- [5] 赵俊, 赵涓涓. 工业图像表面异常定位的无监督学习方法综述[J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(23): 38-58.