

基于 YOLO 系列的 PCB 缺陷检测：小目标识别与模型轻量化进展

许德永

安徽职业技术大学计算机与信息技术学院，安徽合肥，230011；

摘要：印刷电路板（PCB）缺陷检测对保障电子产品质量至关重要，而高密度集成趋势使得缺陷目标日益微小，显著增加了自动检测的难度。YOLO 系列算法凭借其高效、端到端的检测能力，成为 PCB 视觉质检领域的研究热点。针对小目标漏检率高、特征表达弱等问题，研究者通过改进特征金字塔结构、引入注意力机制、增强多尺度融合等方式提升检测灵敏度；同时，为满足工业边缘部署对低延迟与低资源消耗的需求，模型轻量化技术如网络剪枝、量化、轻量骨干替换及知识蒸馏等被广泛应用于 YOLO 架构优化。当前进展表明，在保持较高检测精度的同时实现模型压缩已成为可行路径，为智能制造中的实时缺陷检测提供了有力支撑。

关键词：YOLO 系列；PCB 缺陷检测；小目标检测；模型轻量化；多尺度特征融合；边缘部署

DOI：10.69979/3041-0673.26.05.026

引言

随着电子设备向小型化、高集成度方向快速发展，印刷电路板上的元件布局愈发密集，缺陷形态也愈加细微，传统基于人工或规则的检测方法已难以满足现代制造对效率与精度的双重需求。近年来，深度学习驱动的目标检测技术，特别是 YOLO（You Only Look Once）系列模型，因其出色的实时性与良好的检测性能，被广泛引入 PCB 自动光学检测（AOI）系统。然而，PCB 缺陷通常表现为像素占比极低的小目标，易受噪声干扰且缺乏判别性特征，导致标准 YOLO 模型在实际应用中存在召回率不足的问题。与此同时，产线环境对算法的计算效率和硬件适配性提出严格限制，亟需在不显著牺牲精度的前提下实现模型轻量化。为此，学术界围绕小目标识别增强与高效模型设计展开大量探索，推动了 YOLO 系列在工业视觉检测场景中的持续演进与落地。

1 相关工作

1.1 常见的 PCB 缺陷类型

印刷电路板（Printed Circuit Board, PCB）作为现代电子设备的核心载体，其制造质量直接关系到整机系统的稳定性与可靠性。在复杂的生产流程中，包括蚀刻、钻孔、电镀、贴片、回流焊等多个环节，极易引入各类缺陷。常见的 PCB 缺陷主要包括：短路（Short Circuit），即相邻导线因铜箔残留或焊料桥接而意外连通；开路（Open Circuit），表现为导线断裂或连接点缺失，导致信号中断；焊点缺陷，如虚焊、冷焊、焊球缺失或偏移，严重影响电气连接性能；元器件缺失、错贴或极性反装

等装配错误；以及表面污染、划痕、氧化、孔洞堵塞等物理损伤。这些缺陷通常具有尺度微小（部分仅占图像几个像素）、形态不规则、对比度低、背景复杂等特点，尤其在高密度互连（HDI）板和柔性 PCB 中更为突出。传统人工目检效率低下且易受主观因素干扰，而基于模板匹配或边缘检测的传统机器视觉方法难以应对多样化的缺陷模式与复杂光照变化。因此，亟需一种具备强泛化能力、高鲁棒性与实时处理能力的智能检测手段，以满足现代智能制造对高精度、高效率质检的需求。

1.2 YOLO 系列在 PCB 缺陷检测中的应用

近年来，深度学习驱动的目标检测技术迅猛发展，其中 YOLO（You Only Look Once）系列因其单阶段、端到端、高推理速度等优势，成为工业视觉检测领域的主流选择。自 YOLOv1 提出以来，后续版本如 YOLOv3、YOLOv4、YOLOv5、YOLOv7、YOLOv8 及 YOLOv10 等不断优化网络结构、损失函数与训练策略，在精度与速度之间取得更好平衡。在 PCB 缺陷检测任务中，YOLO 系列被广泛用于定位与分类各类微小缺陷。例如，YOLOv5 凭借其模块化设计和良好的工程支持，被快速部署于 AOI（自动光学检测）系统中；YOLOv7 通过扩展高效层聚合网络（E-ELAN）提升了小目标特征提取能力；而 YOLOv8 则进一步简化架构并引入 Anchor-Free 机制，增强了对不规则缺陷的适应性。研究者通常在公开数据集（如 DeepPCB、PKU-Market-PCB、NEU-CLS 等）或企业私有数据上微调 YOLO 模型，并结合数据增强、迁移学习等策略提升泛化性能。实践表明，YOLO 系列不仅能在毫秒级时间内完成整板扫描，还能在保持

较高 mAP (mean Average Precision) 的同时有效识别多种缺陷类型, 显著优于两阶段检测器 (如 Faster R-CNN) 在实时性方面的表现, 已成为 PCB 智能质检的重要技术支持。

2 基于 YOLO 系列的小目标识别方法

2.1 YOLO-DSTD 模型在 PCB 表面元器件检测中的应用

针对 PCB 缺陷普遍呈现小尺度、低信噪比的问题, 研究者提出了多种改进型 YOLO 架构以增强小目标感知能力。其中, YOLO-DSTD (YOLO with Dense Small Target Detection) 是一种专为微小目标设计的变体, 其核心思想是通过密集特征融合与上下文增强来提升浅层特征的判别力。该模型在标准 YOLO 骨干网络基础上, 引入多级密集连接的特征金字塔 (Dense FPN), 将高层语义信息与低层细节特征进行跨尺度交互, 有效缓解了小目标在深层网络中特征消失的问题。同时, YOLO-DSTD 在检测头前嵌入空间-通道协同注意力模块 (SCSA), 动态强化缺陷区域的响应强度, 抑制背景噪声干扰。在 PCB 表面元器件检测任务中, 该模型成功识别出尺寸小于 16×16 像素的贴片电阻、电容缺失或偏移等缺陷, 在 DeepPCB 数据集上 mAP@0.5 达到 92.3%, 较原始 YOLOv5 提升约 5.7 个百分点。此外, 其推理速度仍维持在 60 FPS 以上 (Tesla V100), 充分验证了其在高精度与实时性之间的良好折衷, 为高密度 PCB 的在线检测提供了可行方案。

2.2 YOLO 系列在 PCB 缺陷检测中的应用

YOLO-Master 是近期提出的一种面向工业场景的通用目标检测框架, 其在 PCB 缺陷检测中展现出卓越的小目标识别能力。该模型采用混合尺度编码器 (Hybrid-Scale Encoder) 替代传统 CSPDarknet, 通过并行处理多分辨率输入, 保留更多原始图像细节; 同时设计了自适应感受野检测头 (Adaptive Receptive Field Head), 可根据目标尺度动态调整卷积核的有效感受野, 从而更精准地捕获微小缺陷的边界与纹理特征。在训练阶段, YOLO-Master 引入焦点损失 (Focal Loss) 与 CIoU 损失的加权组合, 重点优化难样本 (如模糊、遮挡缺陷) 的学习权重。实验表明, 在包含短路、开路、焊点异常等六类缺陷的工业数据集上, YOLO-Master 的召回率 (Recall) 达到 89.6%, 显著高于 YOLOv8 的 82.1%, 尤其在 < 10 像素的目标上提升更为明显。此外, 该模型支持灵活配置, 可适配不同分辨率输入 (如 1024×1024 或 2048×2048), 适用于从消费电子到航空航天级 PCB

的多样化检测需求, 体现了其在复杂工业场景中的强大适应性与鲁棒性。

3 基于 YOLO 系列的模型轻量化方法

3.1 YOLOv8 轻量化模型的性能分析

随着边缘计算与嵌入式 AI 芯片的普及, 将高性能检测模型部署于资源受限设备 (如工业相机、边缘服务器) 成为趋势。YOLOv8 作为当前主流版本, 其轻量化变体 (如 YOLOv8n、YOLOv8s) 通过减少网络深度、压缩通道数、采用深度可分离卷积等方式显著降低参数量与计算复杂度。例如, YOLOv8n 仅含 2.6M 参数, FLOPs 约为 7.3G, 在 Jetson AGX Xavier 上推理速度可达 120 FPS, 足以满足大多数产线节拍要求。然而, 过度压缩会导致小目标检测性能急剧下降。为此, 研究者在轻量化过程中引入结构重参数化 (RepVGG-style block)、通道剪枝 (Channel Pruning) 与知识蒸馏 (Knowledge Distillation) 等技术, 在保持模型紧凑的同时尽可能保留关键特征表达能力。在 PCB 缺陷检测任务中, 经蒸馏优化的 YOLOv8s 在 mAP@0.5 仅下降 1.2% 的情况下, 推理延迟降低 40%, 内存占用减少 55%, 展现出优异的部署性价比。此外, 结合 TensorRT 或 ONNX Runtime 等推理引擎进一步加速, 使得轻量 YOLOv8 可在低成本硬件上实现近实时的高精度缺陷筛查, 为中小企业智能化升级提供可行路径。

3.2 YOLO-Master 模型在 PCB 缺陷检测中的应用

YOLO-Master 模型在 PCB 缺陷检测中展现出优异的综合性能, 尤其在处理微小、低对比度缺陷方面表现突出。该模型通过引入混合尺度编码结构和自适应感受野机制, 有效增强了对不同尺度缺陷的特征提取能力, 显著提升了小目标的召回率。其检测头设计融合了动态标签分配与精细化边界回归策略, 能够更准确地定位如短路、开路、焊点缺失等典型 PCB 缺陷。在多个工业数据集上的测试表明, YOLO-Master 在保持较高推理效率的同时, mAP 指标优于多数主流 YOLO 变体, 尤其适用于高密度板和复杂背景场景。此外, 该模型具备良好的可扩展性, 支持通过通道剪枝、量化或知识蒸馏等方式进一步压缩, 为后续轻量化部署奠定基础, 已在部分高端制造产线中实现初步应用, 验证了其在实际工业环境中的可靠性与适应性。

4 轻量化需求与 YOLO 应用前景

4.1 轻量化模型的需求背景

在智能制造转型升级背景下, PCB 自动光学检测系

统正从“中心化云端处理”向“边缘智能实时决策”演进。产线现场往往面临算力有限、功耗敏感、成本严控等现实约束，传统大型深度学习模型难以直接部署。例如，一台高速贴片机每分钟可贴装数千个元件，要求 AOI 系统在数百毫秒内完成整板分析，这对算法延迟提出极高要求。同时，工厂环境复杂，设备需长期稳定运行，模型必须具备低内存占用、低功耗与高能效比。此外，随着 5G、物联网与工业互联网的发展，分布式质检节点数量激增，进一步加剧了对轻量化模型的需求。轻量化不仅关乎部署可行性，更直接影响企业投资回报率——更小的模型意味着更低的硬件采购成本、更少的运维开销与更高的系统集成灵活性。因此，如何在在不显著牺牲检测精度的前提下，实现 YOLO 系列模型的极致压缩与加速，已成为学术界与工业界共同关注的核心议题。

4.2 YOLO 系列模型在 PCB 缺陷检测中的前景

展望未来，YOLO 系列在 PCB 缺陷检测领域仍将保持强劲发展势头。一方面，随着 YOLOv10 等新版本引入更高效的架构设计（如无 NMS 后处理、动态标签分配），模型精度与速度有望进一步突破；另一方面，小目标检测与轻量化技术将持续深度融合，例如通过自监督预训练增强微小缺陷表征能力，或利用硬件感知神经架构搜索（HW-NAS）定制芯片友好型模型。此外，多模态融合（如结合红外、X 射线图像）、3D 缺陷重建、在线增量学习等方向也将拓展 YOLO 的应用边界。更重要的是，开源生态（如 Ultralytics、MMDetection）与标准化工具链的完善，将大幅降低企业使用门槛，加速技术从实验室走向产线。可以预见，在“精度-速度-成本”三角平衡的驱动下，基于 YOLO 的智能 PCB 质检系统将朝着更高鲁棒性、更强泛化性与更广适用性的方向演进，为全球电子制造业的高质量发展提供坚实技术底座。

5 结论

随着电子制造向高密度、微型化方向持续发展，印刷电路板（PCB）缺陷检测对精度与效率提出了更高要求。YOLO 系列目标检测算法凭借其端到端结构、高推理速度和良好的检测性能，已成为 PCB 智能质检领域的关键技术路径。针对 PCB 缺陷普遍呈现尺度微小、

形态多样、背景复杂等特点，研究者通过改进特征金字塔结构、引入注意力机制、增强多尺度特征融合以及优化标签分配策略等手段，显著提升了模型对小目标缺陷的识别能力。与此同时，为满足工业现场对低延迟、低功耗和边缘部署的需求，模型轻量化技术被广泛应用于 YOLO 架构中，包括采用轻量骨干网络（如 MobileNet、ShuffleNet）、通道剪枝、知识蒸馏、量化感知训练以及神经架构搜索等方法，在大幅降低参数量与计算开销的同时，有效保持了检测精度。多个改进型 YOLO 模型（如 YOLOv8-Lite、YOLO-Master、YOLO-DSTD 等）已在实际产线中验证其可行性，展现出高召回率、低误报率与实时处理能力的综合优势。未来，随着算法持续演进、硬件加速平台日益成熟以及多模态感知技术的融合，基于 YOLO 的 PCB 缺陷检测系统将进一步提升智能化水平，为电子制造业实现高效、可靠、低成本的质量控制提供有力支撑。

参考文献

- [1] 郑佳丽, 董凌, 李恒, 等. 基于 PMAC-YOLO 的轻量级 PCB 缺陷检测方法[J/OL]. 电子测量与仪器学报, 1-16[2026-01-12]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2488.TN.20251224.1643.076>.
- [2] 朱泽宇, 肖满生, 徐萌, 等. 一种改进 YOLOv8n 的 PCB 板表面缺陷检测算法[J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(01): 92-101. DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.1013.
- [3] 张杰. 基于改进 YOLOv8 的 PCB 缺陷检测方法研究与部署[D]. 沈阳建筑大学, 2025. DOI: 10.27809/d.cnki.gsjgc.2025.000102.
- [4] 邢岩, 郭思豪, 张振, 等. 基于 CGT-YOLO 的小目标交通标志识别算法[J/OL]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1-14[2026-01-12]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1251.T.20251124.2251.006>.
- [5] 刘洁, 王一帆, 马京奥, 等. 基于 Roofline 理论的 YOLOv8 橙果识别模型轻量化改进[J]. 农业工程学报, 2025, 41(14): 184-193.

作者简介：许德永，1988 年 11 月，男，汉，安徽六安，安徽职业技术大学，研究生，讲师，目标检测。