

# 基于机器视觉的零件表面缺陷检测系统设计

苗鑫 孙占跃

河北科技学院, 河北唐山 063200

**摘要:** 现代制造业规模化生产的零件表面缺陷直接影响产品质量和竞争力, 传统的人工检测由于主观因素、劳动强度等原因, 检测效率低、漏检率高, 标准不统一, 无法满足高精度、高节拍的生产要求。本文设计基于机器视觉的零件表面缺陷检测系统, 以工业应用为导向, 弱化理论指导, 更加关注系统的实践与可行性, 通过合理的硬件搭配, 高效的软件算法优化和集成, 实现零件表面划痕、凹陷、污渍等缺陷的自动检测, 系统分层分析, 以图像预处理和缺陷识别为重点, 提高检测精度和检测实时性, 直接集成到现有生产线上, 降低人工成本, 保证性能。实验表明检测准确率98%以上, 单件检测时间不超过0.3s, 能够满足工业生产的要求, 详细介绍系统的总体设计、核心模块和测试验证, 为零件表面缺陷检测的工程应用提供一些经验参考。

**关键词:** 机器视觉; 零件表面缺陷; 检测系统; 图像采集; 缺陷识别

## 0 引言

零件表面缺陷检测是制造业的重要工作, 包括机械加工、汽车零部件、电子元器件等, 零件表面划痕、凹陷、污渍、微裂纹等缺陷一旦检测出来, 会影响产品的装配质量、使用寿命、甚至安全问题。传统检测主要采用人工肉眼观测, 检测人员需长时间在零件表面长时间的观察, 根据经验判断缺陷类型以及严重程度, 劳动强度大且受疲劳、主观判断等因素影响, 漏检率和误检率居高不下。随着生产节奏的加快, 零件产量成倍增长, 人工检测速度已经不能满足流水线生产要求, 且人工成本逐年上涨, 增加了企业的生产成本。一部分企业采用简单的光学检测设备, 功能较少, 只能检测特定类型的缺陷, 适应性差, 不能适应不同尺寸、材质的零件检测需求, 检测精度无法满足高端零件的质量控制要求。机器视觉技术是一种非接触、高效、精准、可重复检测的检测技术, 已成为缺陷检测的主流方向, 但目前各类机器视觉检测系统针对性差、集成度低、调试不易等缺陷, 无法适应中小企业的生产场景, 因此针对性设计一套符合实际, 易于使用、性价比高的检测系统具有重要工业意义。

## 1 零件表面缺陷检测系统设计需求

### 1.1 系统设计核心需求

系统设计基于工业实际应用要求, 结合现有流水线布局与检测要求, 明确主要设计指标, 确保实用性和可落地性; 精度要求可识别尺寸大小小于0.1mm、直径小于0.05mm、面积大于0.0025mm<sup>2</sup>的污渍, 检测准确率要求高于98%, 误检率要求小于2%, 避免合格零件误判

或缺陷零件流入下道工序。检测速度要求符合流水线节拍, 单件检测时间不超过0.3s, 实现批量检测不影响生产; 适应性要求可对不同尺寸和材质的零件进行检测, 不需大量调整硬件参数, 只需简单软件设置即可完成适配; 操作简单, 人机交互界面简单, 操作人员通过简单的培训即可完成启动、参数设置、结果查看等操作。稳定性要求可在工业车间粉尘、振动、光照等复杂环境长时间稳定工作, 减少故障停机时间, 保证生产连续性, 检测结果存储、查询功能, 可用于质量追溯、工艺优化。

## 2 系统硬件选型与搭建

### 2.1 硬件选型原则

硬件选型的原则应以实用性、兼容性、稳定性和经济性为基准, 根据工业场景选择不盲目追求高端设备, 保证设备兼容检测和软件, 且控制采购维护成本。实用性设备以成熟、工业实践验证为原则, 考虑采集图像的清晰性和零件定位的准确性, 减少调试难度和故障发生率。兼容性设备以相机、光源、采集卡、PLC等为原则, 兼容现有流水线, 无需大规模改造。稳定性设备以抗粉尘、抗振动、抗光照干扰为原则, 延长设备寿命, 减少故障发生率。经济性设备以价格优势为原则, 控制投入成本, 适合中小企业, 且预留升级空间, 便于后期对硬件进行优化。

### 2.2 核心硬件选型与搭建调试

工业相机选用500万CMOS相机, 分辨率1920×1200, 帧率50fps, GigE接口进行图像传输, 速度快, 功耗低, 适应流水线工作, 支持外部触发和流水线同步, 无效采集。镜头选用

50mm 焦距工业镜头, 镜头距离 250mm, 无畸变, 无几何失真, 10% 视场冗余, 零件表面全覆盖采集。光源选用环形 led 光源, 倾斜 15° 安装, 均匀照亮零件表面, 弱化反光, 增强缺陷和背景对比度, 亮度 0-100% 可调, 控制器和软件联动实现自适应调节。图像采集卡选用高速 GigE 采集卡, 采集速率 1000Mbps, 图像高速传输无延迟缓存。定位装置选用高精度传送带和红外定位传感器, 定位精度在 0.01mm 以内, 传送带速度可调, 零件在采集区位置稳定。硬件按照“定位-采集-传输”逻辑搭建, 调试重点针对定位精度、图像质量及设备联动, 调整传感器灵敏度、相机参数和光源亮度, 定位误差在 0.01mm 以内, 清晰无反光, 各设备协同无卡顿, 工作 24 小时故障率在 0.5% 以内。

### 2.3 硬件抗干扰优化

工业车间存在粉尘、振动、电磁干扰等导致的硬件设备异常, 图像采集精度和系统稳定性降低, 需要针对性优化硬件抗干扰, 在工业相机、镜头外部做防尘密封罩, 选用 IP65 以上的设备, 避免粉尘进入设备内部, 影响镜头成像和相机工作; 在传送带与设备支架连接处加装减震垫, 避免流水线振动对相机、传感器的影响, 避免因振动导致图像模糊、定位失准; 针对电磁干扰, 在图像采集卡、PLC 等设备电源端加装滤波模块, 屏蔽工业车间其它设备产生的电磁信号干扰, 保证数据传输可靠, 同时将设备接地, 降低电磁干扰对硬件设备造成的破坏; 优化光源线路, 光源线路与数据传输线路分开布置, 避免线路的干扰, 保证光源亮度稳定, 给图像采集提供较为稳定的光照。

## 3 系统软件设计与优化

### 3.1 软件整体架构

软件系统基于 python 语言开发, 采用 OpenCV 和 segmentation\_models.pytorch 框架设计, 包括图像采集、预处理、缺陷识别、结果输出和存储等模块, 模块之间互不干扰, 便于维护升级。图像采集模块将相机与采集卡连接, 通过控制相机启停, 单帧与连续采集, 可按生产需求实现变换采集模式, 将图像信息实时传输至预处理模块; 图像预处理模块去除采集时声音、光线的干扰, 强调缺陷特征; 缺陷识别模块, 通过优化的 Unet 深度学习模型进行缺陷识别, 进而分类, 量化缺陷尺寸与面积; 结果输出与存储功能将检测结果存入数据库, 支持历史查询与统计, 具有参数设置, 可以根据零件类型设置参数。

### 3.2 图像预处理算法优化

原始图像由于车间粉尘、光照、振动, 容易导致噪声、反光、亮度不均匀, 需要进行预处理优化提高精度。简化冗余操作步骤依次进行去噪、灰度化、对比度增强。去噪采用高斯滤波, 设定标准差  $\sigma=1.2$ ,  $3 \times 3$  滤波模板平滑图像, 去除噪声但保留缺陷细节, 避免滤波太过使特征模糊。灰度化用 OpenCV 函数获取红色通道, 彩色图像转换成 8 位灰度图, 减少 75% 运算负担提高处理速度, 避免彩色通道冗余干扰; 对比度通过直方图均衡化算法调整灰度, 增强缺陷和背景对比, 光照不均匀的图像使用自适应均衡化局部调整亮度, 避免失真。同时加入图像对齐操作, 纠正零件定位偏差造成图像偏移, 预处理耗时不超过 0.1s。

### 3.3 缺陷识别算法优化与人机交互设计

缺陷识别基于 UNet 架构深度学习模型, 选择 ResNet50 作为预训练骨干网络, 采用 ImageNet 数据集预训练权重, 减少训练量, 加强泛化能力, 防止过拟合。模型输入为灰度图(适配 RGB 格式输入), 输出为背景与缺陷两部分, 用 Sigmoid 激活函数二分类, 轮廓分析量化缺陷尺寸、面积与位置。训练选择工业零件缺陷数据集, 经过图像增强、掩码生成等增加规模, 50 个训练轮次, 采用交叉熵损失函数与 Adam 优化器调整学习率避免梯度异常。优化过程中减少网络结构, 减少冗余卷积层提高推理速度, 动态权重分配策略降低细微缺陷漏检率, 优化后模型推理速度不小于 3 帧/秒, 识别率在 98% 以上。人机交互界面基于 PyQt5, 分为采集控制、参数设置、结果显示、历史查询四个区, 按钮、参数标识明确, 使用易懂, 异常提示功能, 使操作人员快速处理设备故障与参数异常, 无需专业软件知识即可上手。

### 3.4 软件系统兼容性优化

软件系统是否兼容决定了工业场景落地效果, 对于不同工业计算机、操作系统和硬件设备的优化配置要求进行适配, 优化时应该适配 WINDOWS10/11 工业版, 处理不同系统下驱动兼容性问题, 保证相机、采集卡等硬件设备的驱动正常加载, 避免设备无法识别、数据中断的情况发生。对于不同工业计算机, 优化软件运行内存占用, 切换冗余后台进程, 将软件运行内存保持在 2GB 左右, 保障中低配置计算机也可以流畅运行, 降低企业硬件升级费用。优化软件与 PLC 系统的通信兼容性, 对于不同主流的通信协议, 软件可灵活对接不同品牌的 PLC, 而不需要开发通信接口, 提高软件的适配性, 保证缺陷识别结果在快速、准确传输至 PLC, 实现缺陷零件自动删除的联动控制。

## 4 系统集成与测试验证

### 4.1 系统集成实现

系统集成主要完成硬件与软件对接,全流程自动化检测,对接现有的生产流水线。GigE接口实现相机、采集卡与计算机通信,采集图像,通过串口通信到PLC,从PLC输出识别结果,由PLC控制缺陷剔除装置剔除缺陷零件;软件各模块采用模块化接口,通过模块化接口,实现图像采集、预处理、识别、结果输出等全过程联动,并同步到人机界面和PLC系统。集成过程统一设备通信协议,解决兼容问题,保证各设备共用,同时硬件防尘防振动,软件校验数据,不受工业环境影响,保证系统长期稳定运行。

### 4.2 测试方案与结果分析

测试围绕检测精度、速度、稳定性、适应性四大核心指标设计,选用1000件不同尺寸、材质的零件作为样本,其中缺陷零件500件,涵盖多种缺陷类型与程度。检测精度通过对比系统与人工精准检测结果,统计准确率、漏检率与误检率;检测速度记录连续检测1000件零件的总时间,计算单件平均检测时间;稳定性测试让系统连续运行72小时,记录故障情况;适应性测试更换不同零件,仅通过软件设置适配,测试识别精度与速度。测试结果显示,系

统检测准确率达98.1%,漏检率1.8%,误检率1.9%,单件平均检测时间0.29秒,连续运行72小时仅出现1次光源调节轻微故障,重启后恢复正常,更换零件后检测精度仍保持在98%以上,各项指标均满足设计需求,人机交互顺畅,缺陷剔除联动可靠,完全适配工业生产场景。

## 5 结论

本文针对工业零件表面缺陷检测的实际痛点,设计并实现了基于机器视觉的缺陷检测系统,有效解决传统人工检测的弊端,实现缺陷的快速、精准、自动化检测。系统采用分层架构,硬件层选用高性价比、高稳定性工业设备,搭建高效采集与定位系统;软件层重点优化预处理与缺陷识别算法,简化运算流程,提升检测性能,设计便捷人机交互界面降低操作难度;集成层实现软硬件无缝对接,可与现有流水线协同工作,完成缺陷零件自动剔除。测试结果表明,系统检测准确率达98%以上,单件检测时间不超过0.3秒,稳定性与适应性良好,能有效降低人工成本,提升生产质量与效率,适配多领域零件检测需求。该系统贴合工业实际,少理论多实操,核心模块突出、实用性强,为机器视觉技术在工业质检领域的工程化应用提供了实用参考。

## 参考文献:

- [1] 贾全忠,孟祥斌.基于偏振光成像技术的机械零件早期损伤检测研究[J].激光杂志,2026,47(02):222-227.
- [2] 白引弟,高军年,张茜,等.混合先验分析的零件表面缺陷检测方法研究[J].计算机时代,2026,(01):74-80.
- [3] 张静.基于机器视觉的复杂零件智能检测系统设计[J].现代制造技术与装备,2026,62(01):41-43.

**作者简介:** 苗鑫(2004.09—),男,汉,河北省张家口市,专科,研究方向:机械制造及自动化。