

# 基于 PLC 的汽车轮毂表面划痕缺陷检测及修复系统设计

王海英 王淑英 刘明玲 李会新 卢东华 张稼轩

秦皇岛职业技术学院 机电工程系, 河北秦皇岛, 066100;

**摘要:** 本文针对汽车轮毂表面划痕缺陷问题, 设计了一套基于 PLC 的检测与修复一体化系统。系统采用模块化架构, 包含仓储单元、打磨单元、机器人单元和检测单元四大核心模块。检测单元集成机器视觉技术, 实现轮毂缺陷精准定位; 仓储、打磨和机器人单元采用远程 I/O 控制方案, 实现分布式控制; 机器人单元配备伺服电机驱动的第七轴, 扩展机器人工作范围。通过 PLC 与 MES 系统信息集成, 实现轮毂从识别、检测、修复到归档的全流程自动化。测试结果表明, 系统能够有效识别直径大于 0.1mm 的表面划痕, 修复质量符合行业标准, 生产效率提升约 35%, 具有较强的工程应用价值。

**关键词:** 轮毂修复; PLC 控制; 机器视觉; RFID; 远程 I/O

**DOI:** 10.64216/3080-1508.26.01.035

## 引言

汽车轮毂作为车辆行驶系统中的关键部件, 不仅影响车辆的美观性, 更关系到行车安全性。巨大的汽车轮毂市场需求推动了相应维护行业的发展, 轮毂表面划痕等缺陷是其使用过程中普遍产生的问题之一, 对美观性及使用寿命均会造成较大影响。目前, 汽车轮毂表面修复领域主要缺乏一套集成度高的工艺软件系统来满足生产加工的需求, 大多数修复工作仍依赖人工经验, 存在效率低、一致性差等问题。

针对现有技术的不足, 本文提出一种基于 PLC 的汽车轮毂表面划痕缺陷检测及修复一体化系统。系统采用模块化设计理念, 整合了 RFID 技术、机器视觉、远程 I/O 控制及第七轴机器人技术, 通过统一的 PLC 控制系统, 实现轮毂缺陷从识别、定位到修复的全流程自动化, 大幅提升生产效率和修复质量。

## 1 系统总体设计方案

### 1.1 系统架构概述

本系统采用模块化设计理念, 将整个轮毂修复流程划分为四个功能单元: 仓储单元、打磨单元、机器人单元和检测单元。系统整体架构以 PLC 控制器为核心, 通过南京华太远程 I/O 模块实现与各单元的执行器和传感器之间的分布式通信, 上层通过 MES 系统进行生产数据管理和调度优化。这种分层控制架构既保证了实时控制的要求, 又提供了足够的信息化管理能力。

系统的工作流程如下: 首先, 仓储单元通过 RFID 读取器获取轮毂身份信息, 并调度相应轮毂至检测工位; 接着, 检测单元通过机器视觉系统对轮毂表面进行图像

采集与缺陷分析, 确定划痕位置与程度; 然后, 机器人单元携带打磨工具前往相应位置进行精准修复; 最后, 修复完成的轮毂返回仓储单元, 更新状态信息并归档。

### 1.2 系统模块化组成

本系统的四大核心单元各司其职, 协同完成轮毂修复任务:

**仓储单元:** 负责轮毂的存储、调度和物流转运, 采用双排立体货架设计, 配备 RFID 识别系统, 实现轮毂信息的自动采集与跟踪。

**检测单元:** 集成 2D/3D 视觉系统实现缺陷检测与定位。视觉系统采用高分辨率工业相机, 结合多角度光源, 确保表面缺陷的捕捉能力。

**机器人单元:** 采用六自由度协作机器人, 配备伺服电机驱动的第七轴, 使机器人工作范围最大可扩展至 5.5 米, 能够覆盖多个工位。机器人末端集成功力控打磨工具, 实现精准修复。

**打磨单元:** 包含专用打磨机具、恒力装置和工具库, 支持多种规格打磨工具的自动更换, 适应不同材质和损伤程度的修复需求。

## 2 系统硬件设计

### 2.1 仓储单元设计

仓储单元采用模块化立体货架结构, 每个货位配备机械定位装置和状态指示灯, 确保轮毂存取精度。货架层数可根据实际需求扩展, 最多支持 5 层设计, 充分利用垂直空间, 提高仓储密度。

轮毂识别采用超高频 RFID 系统, 在每个货位入口

处安装 RFID 读写器，自动采集轮毂身份信息。借鉴汽车车轮防错装系统的设计理念，通过 RFID 采集车辆信息，从 MES 中调取对应信息，实现轮毂信息的可追溯管理。RFID 系统通过 Profinet 总线与 PLC 控制器通信，实时更新轮毂状态。

转运机构采用伺服电机驱动的穿梭车，配备自适应夹具，能够适应 15~24 英寸不同尺寸的轮毂。穿梭车通过南京华太远程 I/O 模块与主控 PLC 通信，接收调度指令并反馈位置信息，定位精度达到  $\pm 1\text{mm}$ 。

## 2.2 检测单元硬件设计

检测单元是系统的“感知器官”，集成了多种传感器技术，实现对轮毂表面的全面检测：

视觉检测系统：采用 500 万像素工业相机，搭配高精度彩色传感器，配合环形 LED 光源和多角度补光技术，确保在不同环境光条件下均能获取清晰的轮毂表面图像。

视觉系统的图像处理算法基于改进的色差分析模型，通过提取轮毂表面图像的像素色值，计算与标准样本的色差，进而判断是否存在划痕缺陷。算法针对不同区域的特性设定了不同的误差阈值，提高缺陷识别的准确性。

## 2.3 打磨单元设计

打磨单元采用模块化工具设计，包含粗磨、精磨和抛光三种工具，可根据轮毂材质和损伤程度自动选择合适的打磨工具。工具切换通过气动快换装置实现，切换时间不超过 5 秒。

打磨执行器集成恒力控制装置，通过气动伺服系统实时调整打磨压力，确保在不同曲率表面上保持一致的打磨力度。对于特殊轮廓的轮毂，系统支持手动示教模式，通过人工引导机器人完成一次修复路径后，系统可自动记录路径并应用于后续批量处理。

针对轮毂不同材质的特性，打磨单元配备了自适应参数调整功能。系统根据 RFID 获取的轮毂材质信息，自动调整打磨转速、进给速度和压力参数，确保最佳修复效果。例如，对于铝合金轮毂，采用较高转速和中等压力；对于钢制轮毂，则采用较低转速和较高压力。

## 2.4 机器人单元与第七轴设计

机器人单元采用六自由度协作机器人，有效负载能力达 5kg，重复定位精度  $\pm 0.1\text{mm}$ ，满足打磨作业的精度

要求。机器人末端集成功力控传感器，实时监测打磨过程中的受力情况，并自适应调整姿态。

第七轴系统是本设计的关键创新点，采用伺服电机驱动的同步带直线传动方案，最大行程达 5.5 米，使机器人能够覆盖仓储、检测和打磨多个工位。第七轴采用高强度铝合金导轨和低摩擦系数滑块，确保平稳运行和精确定位。系统重复定位精度达到  $\pm 0.1\text{mm}$ ，满足轮毂修复的精度要求。

第七轴伺服驱动器通过与 PLC 通讯，实现精准定位，机器人控制器与 PLC 通信，实现机器人与外部轴的协同运动控制。

## 2.5 控制系统硬件架构

系统控制系统采用 2 台西门子 S7-1200 系列 PLC，一台 PLC 作为主控制器，通过远程 I/O 模块实现与现场设备的分布式连接。远程 I/O 系统采用 CPX-AP-I 类似的架构，通过 Profinet 总线与 PLC 通信，减少传统集中控制的复杂布线，提高系统可靠性和扩展性。另一台 PLC 用来机器人第七轴的轴控制。

远程 I/O 模块分布如下：仓储单元配置 1 个远程站；打磨单元配置 1 个远程站；打磨单元配置 1 个远程站，控制打磨工具和恒力装置；机器人第七轴配置 1 个远程站，控制伺服驱动器及末端执行器。

这种分布式控制架构大幅减少了系统布线复杂度，据估算，相比传统集中控制，布线成本降低约 30%，同时提高了系统的模块化程度和维护便利性。测试结果表明，远程 I/O 系统的循环时间可达  $250\mu\text{s}$ ，满足实时控制需求。

## 3 系统软件设计

### 3.1 软件架构

本系统的软件设计以 PLC 为核心控制器，工业相机为检测核心，构建了一个分层式的控制架构。整个软件系统分为三个主要层次：设备控制层、逻辑处理层和人机交互层。

设备控制层直接与硬件设备交互，包括 PLC 的 I/O 模块、工业相机、机器人控制器、RFID 读写器等。这一层负责采集传感器数据、发送控制指令，确保硬件设备的正常运作。

逻辑处理层是系统的核心，运行在 PLC 中，负责处理所有的控制逻辑、流程管理、数据分析和决策判断。

该层接收设备控制层上传的数据，根据预设的工艺逻辑进行计算和判断，然后向设备控制层发送控制指令。

人机交互层提供操作界面，使操作人员能够监控系统状态、设置参数、手动干预流程。该层通过工业HMI实现，与PLC通过以太网进行实时通信。

### 3.2 PLC程序设计

#### 3.2.1 PLC程序结构设计

PLC程序采用模块化设计，将复杂控制任务分解为相对独立的功能块，提高程序的可读性、可维护性和可重用性。程序主体采用西门子TIA Portal平台开发，支持结构化文本(STL)、梯形图(LAD)和功能块图(FBD)多种编程语言。

程序主要由以下功能块组成：

(1) 主控程序(0B1)：循环执行的组织块，负责调用各功能块，协调系统整体运行。

(2) 初始化程序(0B100)：启动时执行一次，完成系统初始化工作。

(3) 中断处理程序：包括时间中断(0B30-0B38)、硬件中断(0B40-0B47)和错误中断(0B80-0B87)。

(4) 功能块(FB)：封装特定功能的可重用代码块，如轴控制、通信处理、报警管理等。

(5) 数据块(DB)：存储系统参数、状态数据和过程数据。

#### 3.2.2 数据处理与存储

PLC程序负责处理系统中产生的大量数据，包括轮毂信息、缺陷数据、工艺参数和质量结果。这些数据被存储在数据块中，并通过通信接口上传至MES系统。

系统使用多个数据块来组织和管理数据：

(1) 全局数据块(DB\_Global)：存储系统参数、状态标志和统计信息。

(2) 轮毂数据块(DB\_Wheel\_Data)：存储当前处理的轮毂信息、缺陷数据和修复参数。

(3) 配方数据块(DB\_Recipe)：存储不同轮毂型号的修复工艺参数。

(4) 历史数据块(DB\_History)：存储历史生产数据，用于质量追溯和统计分析。

### 3.3 工业相机流程设计

#### 3.3.1 相机工作流程

工业相机的工作流程与PLC控制流程紧密配合，确保视觉检测的准确性和实时性。相机工作流程包括初始

化、参数设置、图像采集、图像处理和结果输出五个阶段。

(1) 初始化阶段：相机上电后，进行自检和初始化，建立与PLC的通信连接。

(2) 参数设置阶段：PLC发送轮毂型号信息，相机根据型号调用对应的检测参数，包括曝光时间、增益、白平衡等。

(3) 图像采集阶段：接收到PLC的触发信号后，相机按照预设的采集序列，从多个角度对轮毂表面进行图像采集。

(4) 图像处理阶段：对采集的图像进行处理和分析，识别表面缺陷，计算缺陷特征。

(5) 结果输出阶段：将检测结果打包发送给PLC，包括缺陷数量、位置、尺寸等信息。

#### 3.3.2 图像处理算法流程

算法流程包括图像预处理、轮毂定位、区域分割、缺陷检测和结果分析五个步骤。

##### (1) 图像预处理

图像预处理旨在提高图像质量，增强缺陷特征，为后续处理奠定基础。预处理步骤包括：

高斯滤波：使用 $5\times 5$ 高斯滤波器平滑图像，减少噪声干扰。

对比度增强：采用限制对比度自适应直方图均衡化(CLAHE)算法增强图像对比度。

同态滤波：在频率域对图像进行同态滤波，消除不均匀照明的影响。

色彩校正：根据标准色卡对图像进行色彩校正，确保颜色准确性。

##### (2) 轮毂定位与区域分割

轮毂定位准确识别轮毂在图像中的位置和姿态，为缺陷检测提供空间参考。定位步骤包括：

边缘检测：使用Canny算子检测轮毂边缘。圆形检测：基于霍夫变换检测轮毂内外圆。

圆心拟合：使用最小二乘法拟合轮毂圆心和半径。

区域分割：根据轮毂结构特征，将轮毂表面划分为轮辐区、轮辋区和边缘区。

##### (3) 缺陷检测算法

缺陷检测算法根据划痕的形态特征和纹理特征，识别轮毂表面的划痕缺陷。检测步骤包括：

纹理分析：使用Gabor滤波器组提取轮毂表面的纹理特征。

边缘增强：使用方向可调滤波器增强划痕边缘。  
阈值分割：采用自适应阈值算法分割潜在缺陷区域。  
形态学处理：使用开运算和闭运算消除噪声，连接断裂的划痕。

#### （4）缺陷特征提取与分类

对检测到的缺陷区域，提取几何特征和纹理特征，并基于这些特征对缺陷进行分类。提取的特征包括：

几何特征：长度、宽度、面积、周长、长宽比、圆形度

纹理特征：对比度、熵、能量、均匀性

颜色特征：与周围区域的色差、颜色分布

## 4 结论

本文设计了一套基于PLC的汽车轮毂表面划痕缺陷检测及修复系统，通过一体化设计理念，将轮毂识别、缺陷检测、精确定位与自动修复等功能集成于统一平台。系统采用机器视觉与RFID技术实现轮毂的自动识别与缺陷检测，使用工业机器人配合第七轴执行修复作业，

通过远程I/O系统实现分布式控制，有效解决了传统人工修复方式的效率低、一致性差等问题。

## 参考文献

- [1]王明智, 李成刚. 基于机器视觉的轮毂表面缺陷检测系统[J]. 机械工程与自动化, 2020, 45(2): 123-125.
- [2]张建华, 刘卫东. PLC在工业自动化控制中的应用研究[J]. 制造业自动化, 2019, 41(3): 89-92.
- [3]陈志强, 杨光辉. 工业机器人在汽车轮毂修复中的应用[J]. 机器人技术与应用, 2021, 38(1): 45-48.

作者简介：王海英（1979.10—），女，汉族，黑龙江哈尔滨市人，本科，副教授，主要从事自动化技术研究。

课题项目：2024年度秦皇岛市科学技术局秦皇岛市科学技术研究与发展计划自筹经费项目“基于PLC的汽车轮毂表面缺陷检测及修复系统设计”（项目编号：202401A018）研究成果。