

橡胶管接头扣压视觉检测系统的设计与实现

何海军

浙江金豪管业有限公司 311800

【摘要】针对橡胶管接头扣压工艺中人工检测效率低、精度差的行业痛点，本研究开发了一套基于机器视觉的自动化检测系统。该系统旨在提高检测效率，确保扣压质量的稳定性和一致性，从而提升橡胶管接头在汽车零部件及其他工业应用中的可靠性。系统采用双光源多角度成像方案，结合改进的YOLOv5算法，实现了扣压长度、同心度、表面压痕深度、扣压角度、橡胶层厚度及外套直径等6项关键参数的在线测量。经过实际产线验证，该系统检测速度达到150件/分钟，测量精度达到 $\pm 0.05\text{mm}$ ，漏检率低于0.3%。目前，该系统已成功应用于3家汽车零部件企业，显著提升了产品质量管控水平，降低了不良品率，提高了生产效率和客户满意度。

【关键词】橡胶管接头；机器视觉；扣压检测；YOLOv5；工业自动化

Design and implementation of visual detection system for rubber pipe joint buckle

He Haijun

Zhejiang Jinhao Pipe Industry Co., Ltd. 311800

【Abstract】Aiming at the industry pain points of low efficiency and poor accuracy in rubber pipe joint buckle process, this research developed an automatic detection system based on machine vision. The system is designed to improve the detection efficiency, ensure the stability and consistency of the buckle quality, thus improving the reliability of rubber pipe joints in automotive parts and other industrial applications. The system adopts the dual-light source multi-angle imaging scheme and combined with the improved YOLOv5 algorithm to realize the online measurement of six key parameters, including buckle length, concentricity, surface indentation depth, buckle angle, rubber layer thickness and coat diameter. After the actual production line verification, the detection speed of the system reached 150 pieces / minute, the measurement accuracy reached $\pm 0.05\text{mm}$, and the leakage detection rate was less than 0.3%. At present, the system has been successfully applied to three auto parts enterprises, significantly improving the level of product quality control, reducing the rate of bad products, and improving the production efficiency and customer satisfaction.

【Key words】rubber pipe joint; machine vision; buckle test; YOLOv5; industrial automation

1 引言

橡胶管接头在汽车液压系统中扮演着至关重要的角色，其扣压质量的好坏直接关系到整个系统的性能和安全性。传统的检测方法大多依赖于人工操作，不仅效率低下，而且容易受到人为因素的影响，导致检测结果的不准确。因此，开发一套高效、精确的橡胶管接头扣压检测系统显得尤为重要。

本研究旨在利用机器视觉技术，结合先进的图像处理算法，设计并实现一套自动化检测系统。该系统能够实现对橡胶管接头扣压质量的全面检测，包括扣压长度、同心度、表面压痕深度等关键参数的测量和评估。通过该系统的应用，

可以显著提高检测效率和准确性，降低不良品率，提升产品质量和安全性。

2 系统设计原理与架构

2.1 检测需求分析

橡胶管接头作为汽车液压系统中的关键部件，其扣压质量直接影响到系统的密封性能和安全性。典型的橡胶管接头结构包含芯管、外套和橡胶层，扣压过程中需要严格控制扣压长度、同心度、表面压痕深度等关键参数。具体检测指标要求如下：

扣压长度公差： $\pm 0.1\text{mm}$ ，确保扣压紧密且不过度压缩

橡胶层。

同心度误差： $\leq 0.05\text{mm}$ ，保证芯管与外套的同轴度，避免偏心导致的密封失效。

表面压痕深度： $< 0.2\text{mm}$ ，防止压痕过深损伤橡胶层，影响使用寿命。

扣压角度、橡胶层厚度及外套直径等也需符合设计规范。

2.2 硬件系统设计

硬件系统是本系统的核心组成部分，主要包括成像模块、照明模块、机械结构和气动分拣装置等。

成像模块：采用 Basler acA2440-75uc 相机，分辨率高达 2448×2048 ，能够捕捉到橡胶管接头的细微特征，确保检测的准确性。

照明模块：设计了组合式照明方案，包括同轴光和低角度环形光。同轴光用于提供均匀照明，便于检测表面缺陷；低角度环形光则用于突显边缘特征，增强扣压区域的对比度。

机械结构：配备了伺服旋转平台，重复定位精度达到 $\pm 0.01^\circ$ ，确保每次检测时接头的位置一致性。此外，还设计了稳定可靠的机械结构，以保证系统的长期稳定运行。

气动分拣装置：响应时间 $\leq 0.3\text{s}$ ，能够快速将合格品与不良品分离，提高检测效率。

2.3 软件系统架构

软件系统采用四层结构设计，包括图像采集层、处理层、分析层和控制层。

(1) 图像采集层：负责相机的初始化、参数设置及多线程同步控制，确保帧率 $\geq 60\text{fps}$ ，满足高速检测需求。

(2) 处理层：包括图像增强和特征提取等预处理步骤。图像增强采用 CLAHE 算法提高图像对比度，使特征更加鲜明；特征提取则采用改进 Canny 边缘检测算法，增强边缘识别能力。

(3) 分析层：采用 YOLOv5s+DeepSort 目标追踪算法，实现快速定位扣压区域并追踪目标。这一步骤为后续测量提供了准确的位置信息，确保了测量的准确性。

(4) 控制层：通过 Modbus TCP 协议与 PLC 通信，实现检测结果的实时反馈和分拣控制。这一层的设计使得系统能够与生产线上的其他设备进行无缝对接，提高了整体的生产效率。

3 关键技术创新

3.1 动态标定算法

温度变化对相机成像的影响是一个不可忽视的问题。为了应对这一挑战，本系统提出了基于移动最小二乘法的在线标定方法。该方法通过最小化加权平方和误差来优化标定参数，权重随温度变化自适应调整。实验结果表明，该方法能够将标定误差控制在 $< 0.005\text{mm}$ 的范围内，确保了测量结果的准确性和稳定性。

3.2 复合检测模型

构建了双通道神经网络架构，结合定位网络和测量网络的优势，实现高效准确的检测：

定位网络：采用 YOLOv5s 算法，快速定位扣压区域，处理速度达到 25ms/帧 ，满足实时检测需求。

测量网络：基于 U-Net 架构，精确分割边缘轮廓，IoU（交并比）达到 0.92，确保测量精度。

3.3 抗干扰设计

橡胶反光和油污干扰是影响检测系统性能的重要因素。为了解决这些问题，本系统采取了以下抗干扰设计：

(1) 橡胶反光抑制：使用偏振片+漫反射板组合，有效减少了反光对图像质量的影响。这一设计使得系统能够在各种光照条件下稳定工作，提高了检测的准确性。

(2) 油污干扰处理：采用频域滤波技术，如 Butterworth 低通滤波器，去除了油污造成的图像噪声。这一步骤确保了图像的质量，为后续处理提供了可靠的基础。

4 系统实现与验证

4.1 实验环境搭建

为了验证系统的性能，搭建了实验环境，测试样本包括 SAE 100R2 标准接头 500 件合格品和 50 件缺陷品。对比设备选用三坐标测量机（CMM），其精度为 0.001mm ，作为系统测量精度的参照。

4.2 性能测试数据

对系统进行了全面性能测试，结果如下表所示：

检测项目	人工检测	本系统	提升幅度
单件检测时间	4.2s	0.4s	90.5%
长度测量精度	$\pm 0.15\text{mm}$	$\pm 0.03\text{mm}$	80%
缺陷检出率	92.3%	99.1%	6.8%

数据显示，本系统在检测速度、测量精度和缺陷检出率

方面均显著优于人工检测。特别是在检测速度上，本系统实现了近 10 倍的提升，大大提高了生产效率。

4.3 产线应用案例

在浙江某管业公司实施了本系统，取得了显著成效：

不良品流出率从 0.8% 降至 0.05%，大幅提高了产品质量。

检测人工成本降低 73%，由原本的 2 班次减少至 0.5 班次。

产品投诉率下降 65%，提升了客户满意度。

5 应用优势与发展前景

5.1 技术优势

本系统具有以下技术优势：

(1) 高适应性：支持 $\Phi 10-\Phi 50\text{mm}$ 不同规格接头的检测，满足多样化生产需求。这一特点使得系统能够广泛应用于各种型号的橡胶管接头检测中，提高了生产的灵活性。

(2) 易维护性：模块化设计支持快速换型，换型时间小于 30 分钟。这一设计降低了系统的维护成本，提高了生产效率。

(3) 数据追溯：自动生成检测报告，包含时间戳与过程影像，便于质量追溯和管理。这一功能为企业的质量管理提供了有力的支持。

5.2 市场前景

随着橡胶管接头的市场需求持续增长。据 MarketsandMarkets 预测，2025 年全球汽车软管市场规模将达 380 亿美元。国内液压接头年产量超 20 亿件，按 10% 的设备替换率计算，潜在市场规模约 15 亿元。本系统作为高效、精确的检测解决方案，具有广阔的市场前景。随着技术的不断进步和应用范围的拓展，本系统有望在更多领域发挥重要作用。

5.3 行业价值

本系统的应用推动数字化升级，提高了检测效率和准确

性。同时，助力实现“黑灯工厂”无人化检测，降低了人工成本，提升了生产自动化水平。此外，本系统的成功应用还为行业树立了检测标准，有助于推动行业标准的建立和完善。这些价值使得本系统在汽车制造、航空航天、机械制造等领域具有广泛的应用前景。

6 结论与展望

本研究成功设计并实现了一套基于机器视觉的橡胶管接头扣压视觉检测系统。该系统通过创新性技术设计，实现了微米级精密检测（精度达 $\pm 0.03\text{mm}$ ），构建了软硬件协同的实时处理架构（延时 $< 50\text{ms}$ ），并开发了自学习补偿模型（温漂误差降低 82%）。这些技术创新显著提升了橡胶管接头扣压检测的效率和准确性，为汽车零部件及其他工业领域提供了可靠的检测解决方案。

未来，我们将继续深入研究，拓展系统的应用范围和功能。具体研究方向包括：

(1) 集成 3D 线激光扫描技术，实现橡胶管接头的全尺寸测量。这一技术的引入将进一步提高检测精度和全面性，满足更高要求的检测需求。

(2) 开发基于数字孪生的预测性维护系统。通过模拟实际运行过程，提前发现潜在故障，降低维护成本和生产中断风险。这一系统的开发将为企业的设备管理提供有力的支持。

(3) 建立行业检测标准数据库，扩展 ISO 18752 等国际标准的应用范围。这一举措将为行业提供更加规范、统一的检测标准和方法，推动行业的健康发展。

综上所述，本系统的设计与实现不仅解决了橡胶管接头扣压检测中的行业痛点，还为工业自动化和智能化发展提供了新的思路和方向。我们相信，随着技术的不断进步和应用范围的拓展，本系统将在更多领域发挥重要作用，为工业生产和质量控制提供有力支持。

参考文献

- [1] 朱长发. 开缝衬套成形质量的单目视觉检测技术研究[D]. 2017.
- [2] 郑剑斌. 基于机器视觉点胶机伺服系统的设计与研究[D]. 2018.
- [3] 王峰, 程自豪, 邹俊逸, 闫玉销, 邢广兴. 基于机器视觉的电缆接头缺陷检测系统设计 [J]. 电子设计工程, 2024, 32(24).