

# 采用机器视觉的电梯曳引轮槽磨损在线检测

邵 扬, 龚根星

(武汉市特种设备检验检测研究院, 湖北 武汉 430040)

**摘 要** 针对电梯曳引轮槽长期运行后易发生磨损且人工检测效率低、主观性强的问题, 本研究提出一种基于机器视觉的在线检测方法, 系统通过构建在线图像采集装置获取运行状态下的轮槽图像, 结合畸变校正、双边滤波、一阶差分梯度计算、双阈值边缘提取以及轮廓拟合与遮挡补偿, 实现轮槽磨损量的连续测量和安全等级判定。试验结果表明, 该方法在复杂光照和遮挡条件下仍具有较高精度、重复性与实时性, 可为电梯曳引系统状态监测和预防性维护提供有效支撑。

**关键词** 电梯曳引轮槽; 磨损在线检测; 机器视觉; 边缘检测

**中图分类号**: TP206; TU857

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.002

## 0 引言

电梯行业的高速发展与存量市场的不断扩大, 给电梯全生命周期内的安全检验与运维管理带来了显著挑战。曳引式电梯作为当前应用最广泛的电梯品类, 整体运行性能优异, 但在长期服役过程中, 其内部诸多部件都会出现不同程度的磨损, 其中曳引轮轮槽的损耗问题尤为突出<sup>[1]</sup>。因此, 电梯行业在快速发展的同时, 安全隐患也不可避免地在逐渐上升。现阶段轮槽磨损检测多依赖停梯后人工观察、样板比对或接触式测量, 不仅效率较低而且难以满足在线、连续和定量评估的工程需求<sup>[2]</sup>。机器视觉具有非接触、信息丰富、响应速度快和便于智能分析等优势, 为轮槽磨损状态监测提供了新的技术路径。基于此, 本研究围绕在线工况下的图像采集、预处理、轮廓重建与磨损量判定展开研究, 构建了一套面向工程应用的曳引轮槽在线检测方法。

## 1 在线图像采集系统与畸变校正

为满足电梯运行状态下轮槽图像稳定获取的要求, 本研究设计了由工业相机、定焦镜头、条形 LED 补光源、编码器触发模块、减振安装支架与边缘计算单元组成的在线图像采集系统。相机安装在机房曳引机侧部, 以固定倾角对准目标绳槽区域, 配合窄脉冲补光和短曝光成像方式抑制高速运动造成的拖影; 编码器实时输出曳引轮转角信息, 用于在指定相位触发采样, 保证不同帧对应相近截面位置。考虑机房空间受限、镜头视场边缘弯曲以及安装偏置会引起轮槽轮廓的径向畸变和透视变形, 系统在安装标定阶段采用平面标定板求取相机内外参数及畸变系数, 建立从像素坐标

到实际测量坐标的映射模型, 对桶形、枕形畸变和倾斜投影误差进行统一校正, 并利用轮缘基准特征完成尺度归一化处理, 从而提高后续边缘提取、轮廓拟合和磨损量计算的准确性与一致性。

## 2 面向在线检测的图像预处理方法

### 2.1 基于双边滤波的图像降噪处理

在线采集的曳引轮槽图像通常同时含有机械振动模糊、粉尘散射噪声、油污纹理和钢丝绳股纹高频干扰, 若直接进行边缘检测, 极易将伪边缘误判为真实轮槽轮廓<sup>[3]</sup>。基于此, 本研究采用双边滤波对图像实施保边降噪处理, 其核心思想是在空间邻近性和灰度相似性双重约束下进行加权平均。设输入图像为  $I(p)$ , 输出为  $I_f(p)$ , 则  $I_f(p) = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in \Omega} G_s(|p-q|) \cdot G_r(|I(p)-I(q)|) \cdot I(q)$ , 其中  $W_p = \sum_{q \in \Omega} G_s(|p-q|) \cdot G_r(|I(p)-I(q)|)$ 。在实际实现中, 本研究将空间域标准差设为 2.6, 灰度域标准差设为 18, 并通过局部对比度自适应机制动态调整滤波窗口, 使平坦区域获得较强平滑, 而轮槽边缘附近的灰度突变得以保留。

### 2.2 基于一阶差分的图像梯度计算

轮槽磨损的直接视觉表现通常不是整体灰度变化, 而是槽口曲线、槽底转折和磨痕边界的局部梯度变化, 因此需要在降噪基础上进一步提取能够反映几何变化的方向性特征。本研究采用一阶差分算子计算图像在横向与纵向的梯度分量, 设滤波后图像为  $I_f(x, y)$ , 则  $G_x = I_f(x+1, y) - I_f(x-1, y)$ ,  $G_y = I_f(x, y+1) - I_f(x, y-1)$ , 梯度幅值表示为  $M(x, y) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$ , 梯度方向表示为  $\theta(x, y) = \arctan \frac{G_y}{G_x}$ 。由于曳引轮槽边缘在图像中主要表现为近

作者简介: 邵扬 (1990-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 特种设备检验。

似弧形连续结构,本研究并未简单依赖单一方向梯度,而是引入方向一致性约束,对相邻像素梯度方向的离散程度进行统计,构造局部方向置信度  $C_\theta = 1 - \sigma_\theta / \pi$ ,以剔除由油渍纹理和钢丝绳微细纹路造成的随机梯度响应<sup>[4]</sup>。当  $M(x, y)$  较高而  $C_\theta$  较低时,将该像素标记为疑似伪边缘而非直接保留。

### 2.3 基于双阈值的图像边缘提取

在获得梯度幅值与方向信息后,如何从复杂候选边缘中稳定提取轮槽真实边界,是在线检测算法能否保持高鲁棒性的关键,本研究借鉴 Canny 思想并结合曳引轮槽图像的特征分布,采用非极大值抑制与双阈值连接相结合的边缘提取方法。首先沿梯度方向比较邻域像素,仅保留局部极大值以获得细化边缘;随后设置高阈值  $T_h$  和低阈值  $T_l$ ,当  $M(x, y) \geq T_h$  时判定为强边缘,当  $T_l \leq M(x, y) < T_h$  时判定为弱边缘,若弱边缘与强边缘在 8 邻域内连通,则予以保留,否则剔除。为提高不同工况下阈值的稳定性,本研究依据轮槽区域内梯度直方图的分位数自适应确定阈值,令  $T_h = P_{85}(M)$ ,  $T_l = 0.42T_h$ 。该方法既避免了固定阈值在亮度波动条件下失效的问题,又能保持轮槽弧边的连续性。

## 3 曳引轮槽磨损在线检测算法构建

### 3.1 轮槽轮廓精准定位与边缘拟合

在边缘图基础上,本研究构建“候选区域约束、轮廓聚类、几何拟合、参数反演”的轮槽定位流程。首先依据曳引轮安装先验与编码器相位信息确定轮槽可能出现的感兴趣区域,通过连通域分析删除面积过小且曲率突变明显的离散边缘<sup>[5]</sup>。然后利用概率霍夫圆弧搜索获取轮槽边缘的粗定位结果,并将粗定位得到的边缘点集输入最小二乘圆弧拟合模型,求解槽口圆弧中心  $a$ 、 $b$  和拟合半径  $R$ ,其目标函数为  $\min \sum_{i=1}^n [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2]^2$ 。针对实际磨损后轮槽截面可能不再严格服从标准圆弧的情况,进一步采用三次 B 样条对边缘点进行局部精细拟合,形成连续轮廓函数  $C(s)$ ,并据此计算槽口宽度  $B$ 、槽底深度  $H$ 、左右壁夹角  $\alpha$  及截面等效曲率半径  $R_e$ 。在工程上,轮槽磨损并不总表现为单一深度增减,而往往伴随左右侧壁不均匀损耗,因此又定义偏磨系数  $\eta = |H_l - H_r| / (H_l + H_r)$  来表征轮槽受力不对称程度。

### 3.2 绳槽视觉遮挡在线补偿方法

由于曳引轮与钢丝绳处于接触包络状态,图像中轮槽底部和局部侧壁常被钢丝绳遮挡,尤其在运行状态下钢丝绳产生轻微摆动后遮挡区会呈现动态变化特征,若直接依据可见边缘拟合轮槽完整轮廓,容易低估槽底深度并误判磨损程度。为此,本研究提出一种基于几何投影与历史轮廓融合的在线遮挡补偿方法,

首先建立相机光心、钢丝绳中心与轮槽截面之间的投影关系,设钢丝绳半径为  $r_s$ ,相机到轮槽截面的垂直距离为  $Z_c$ ,成像焦距为  $f$ ,像元尺寸为  $s_p$ ,则当前遮挡宽度可表示为  $L_o = \frac{f \cdot r_s}{Z_c \cdot s_p} \cos \beta$ ,其中  $\beta$  为钢丝绳法向与相机视线夹角;再结合轮槽标准槽型先验与相邻帧未遮挡边缘,构建补偿轮廓  $C_c(s) = \lambda C_h(s) + (1 - \lambda) C_m(s)$ ,其中  $C_h(s)$  为历史稳定轮廓,  $C_m(s)$  为当前可见轮廓拟合结果,  $\lambda$  由遮挡比例自适应确定。为防止异常帧传递误差,引入卡尔曼滤波对补偿参数进行时序平滑,使轮槽截面恢复结果能够随运行过程连续更新。

### 3.3 磨损量在线量化与安全判定

在获得当前轮槽完整轮廓后,本研究以新轮槽标准截面为基准,建立磨损量在线量化模型。设标准轮槽轮廓为  $C_0(s)$ ,当前补偿后的轮廓为  $C_t(s)$ ,则最大磨损深度定义为  $W_d = \max_{s \in \Omega} [C_t(s) - C_0(s)]$ ,截面磨损面积定义为  $W_a = \int_{\Omega} |C_t(s) - C_0(s)| ds$ ,其中  $\Omega$  为轮槽有效接触区域。考虑轮槽失效并不仅取决于单一点的最大磨损,还与槽口展宽、偏磨程度和接触包角变化相关,研究进一步构建综合健康指数  $HI = w_1 \frac{W_d}{W_{d,lim}} + w_2 \frac{W_a}{W_{a,lim}} + w_3 \eta + w_4 \frac{\Delta B}{B_0}$ ,其中  $(w_1, w_2, w_3, w_4)$  根据专家经验与现场样本训练确定,满足  $\sum w_i = 1$ 。当  $HI < 0.60$  时判定为安全状态,  $0.60 \leq HI < 0.85$  判定为预警状态,  $HI \geq 0.85$  则判定为需检修或更换。

## 4 在线检测方法试验与性能验证

### 4.1 在线检测试验平台与方案设计

为验证所提方法在真实工况下的有效性,本研究搭建了由现场电梯与实验室样机共同组成的联合试验平台,现场平台选取一台额定载荷 1 000 kg、额定速度 1.75 m/s、曳引轮直径 520 mm、钢丝绳直径 10 mm 的曳引式乘客电梯,检测装置布置在机房曳引机侧;实验室平台则配置可更换轮槽试块和可调光源系统,用于模拟轻度、中度和重度磨损状态,并通过激光轮廓仪提供基准测量值。试验方案分为三部分:第一部分验证在线图像采集与畸变校正效果,在不同安装角度和照度条件下记录轮槽成像质量;第二部分验证图像预处理与轮廓拟合效果,比较不同算法对边缘连续性和槽型恢复精度的影响;第三部分验证磨损定量结果,将机器视觉测量值与接触式轮廓仪测量值进行对比,同时统计系统在连续运行 8 h 条件下的丢帧率、误报警率和单帧处理时长。

### 4.2 图像采集与预处理效果验证

从图像质量验证结果看,本研究构建的在线采集与预处理方法能够在复杂背景下稳定突出轮槽边缘特征,原始图像受油污反射和钢丝绳股纹影响较大,局部区域存在灰度压缩和条纹伪边缘;经过畸变校正后,轮缘圆

弧投影更加集中, 轮槽横向尺寸的一致性明显增强。再经双边滤波、一阶差分梯度与双阈值边缘提取处理后, 轮槽边缘由原始图像中的模糊灰带转变为连续清晰的单像素级轮廓, 尤其在槽口与侧壁过渡位置, 边缘断裂现象得到明显抑制。统计结果显示, 预处理后图像平均对比度由 18.7 提升至 31.4, 边缘清晰度指标由 0.46 提升至 0.81, 连续边缘占比由 72.3% 提高至 91.5%。此外,

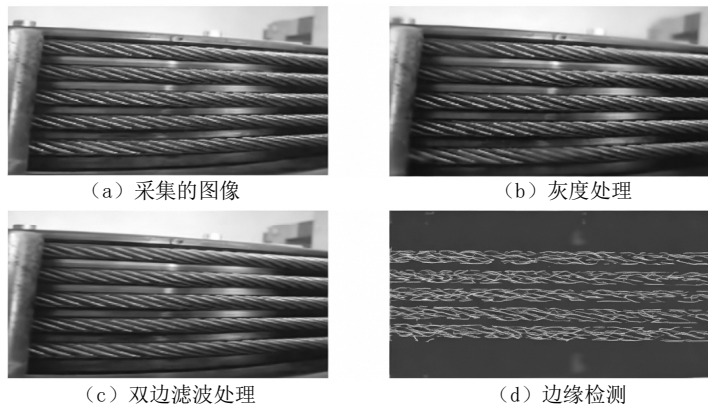


图 1 原始图像、畸变校正图像、双边滤波图像与边缘提取结果对比图

差为 0.018 mm, 说明该方法不仅具备较高精度, 而且具有良好的重复性。进一步从安全判定角度分析, 当综合健康指数接近阈值区间时, 系统仍能保持稳定分类, 没有出现临界工况下频繁跳变的现象, 这与研究引入的遮挡补偿及多指标综合判定机制密切相关。对连续三天的重复采样结果进行统计, 系统误报警率为 2.1%, 漏报警率为 1.4%, 满足在线监测工程应用对可靠性的要求。尤其值得注意的是, 在第 9 和第 10 检测点, 轮槽已出现明显展宽与偏磨叠加特征, 传统人工样板对比仅判断为“存在磨损”, 而研究方法则进一步给出了量化磨损值及预警等级, 体现出更强的工程决策支撑能力(见表 1)。

表 1 机器视觉法与接触式测量结果对比

| 检测点 | 接触式测量值/mm | 机器视觉测量值/mm | 绝对误差/mm | 综合健康指数 HI | 判定结果 |
|-----|-----------|------------|---------|-----------|------|
| 1   | 0.82      | 0.85       | 0.03    | 0.31      | 安全   |
| 2   | 0.97      | 1.01       | 0.04    | 0.36      | 安全   |
| 3   | 1.12      | 1.09       | 0.03    | 0.42      | 安全   |
| 4   | 1.26      | 1.30       | 0.04    | 0.47      | 安全   |
| 5   | 1.38      | 1.43       | 0.05    | 0.54      | 安全   |
| 6   | 1.57      | 1.52       | 0.05    | 0.63      | 预警   |
| 7   | 1.69      | 1.74       | 0.05    | 0.71      | 预警   |
| 8   | 1.86      | 1.81       | 0.05    | 0.79      | 预警   |
| 9   | 2.03      | 1.96       | 0.07    | 0.87      | 检修   |
| 10  | 2.14      | 2.09       | 0.05    | 0.91      | 检修   |

在 300 lx、500 lx 和 800 lx 三种照度条件下, 算法均能够自动调整阈值范围并维持较高边缘保真度, 说明所提预处理链条对光照波动具有较强适应能力(见图 1)。

#### 4.3 磨损检测精度与可靠性验证

研究结果表明: 机器视觉法在各检测点上的测量值与基准值高度一致, 平均绝对误差为 0.043 mm, 最大误差为 0.07 mm, 平均相对误差为 2.86%, 重复测量标准

#### 5 结束语

本研究围绕电梯曳引轮槽磨损在线检测需求, 提出了一种基于机器视觉的完整技术方案, 并从在线图像采集、畸变校正、图像预处理、轮廓拟合、遮挡补偿到磨损量量化与安全判定进行了系统构建。试验验证显示, 该方法在不同照度、不同速度和不同绳径条件下均具有较高精度与较好实时性, 具备较强工程应用前景。未来研究可进一步结合深度学习分割网络和多源传感信息融合技术, 以提升电梯曳引系统状态评估的智能化水平。

#### 参考文献:

- [1] 张雍, 董灵军, 王涤宇, 等. 电梯曳引轮槽磨损定量检测算法的设计 [J]. 中国电梯, 2023, 34(05): 55-58.
- [2] 肖承垠, 聂敏, 王佳宁, 等. 浅析电梯曳引轮槽磨损机理危害及其应对措施 [J]. 上海轻工业, 2025(06): 145-147.
- [3] 国树东, 江凡, 陈健, 等. 多规格电梯曳引轮槽磨损检测仪器设计研究 [J]. 特种设备安全技术, 2025(02): 40-43.
- [4] 申伟, 叶有俊, 陈建文, 等. 电梯曳引轮磨损检测及应对策略 [J]. 石油和化工设备, 2025, 28(02): 29-32.
- [5] 傅亮, 贡伟建. 机器视觉技术支持下的电梯曳引轮磨损检测方法研究 [J]. 技术与市场, 2024, 31(09): 23-27.