融合计算机视觉与机器学习的微孔锥度自动评估方法

贺梓修，王国安，程嵩岐，黄文庆，卓义勇

（广东喜珍电路科技有限公司，广东 肇庆 526000）

摘　要： 微孔作为航空航天、精密模具、医疗器械及电子制造等领域的重要结构，其锥度参数直接影响装配精度、流体传输性能及产品使用寿命。传统微孔锥度检测主要依赖光学显微镜、三坐标测量仪等设备，不仅检测效率较低，而且人工判读存在一定主观误差，难以满足智能制造背景下的在线质量检测需求。针对上述问题，提出一种融合计算机视觉与机器学习的微孔锥度自动评估方法。首先采用工业视觉系统获取微孔高分辨率图像，通过图像预处理、边缘增强及轮廓提取实现微孔几何信息自动获取；其次构建多尺度几何特征和纹理特征融合模型，提取孔径、边缘梯度、轮廓倾斜角及灰度分布等关键特征；最后利用机器学习算法建立微孔锥度预测模型，实现锥度参数的智能评估。

关键词： 计算机视觉；机器学习；微孔检测；锥度评估；智能检测

中图分类号： TP391　　**文献标识码：** A

Automatic evaluation method for micro-hole taper integrating computer vision and machine learning

HE Zixiu，WANG Guoan，CHENG Songqi，HUANG Wenqing，ZHUO Yiyong

（Guangdong SEEGEM Circuit Technology Co.，Ltd.，Zhaoqing，Guangdong 526000，China）

Abstract：Microholes，as important structures in fields such as aerospace，precision molds，medical devices，and electronic manufacturing，their taper parameters directly affect assembly accuracy，fluid transmission performance，and product lifespan. Traditional microhole taper detection mainly relies on equipment such as optical microscopes and coordinate measuring machines，which not only have low detection efficiency but also have certain subjective errors in manual interpretation，making it difficult to meet the online quality inspection requirements in the context of intelligent manufacturing. To address these issues，a microhole taper automatic assessment method integrating computer vision and machine learning is proposed. Firstly，an industrial vision system is used to obtain high-resolution images of microholes，and image preprocessing，edge enhancement，and contour extraction are employed to automatically acquire the geometric information of microholes. Secondly，a multi-scale geometric feature and texture feature fusion model is constructed to extract key features such as hole diameter，edge gradient，contour inclination angle，and gray distribution. Finally，a machine learning algorithm is utilized to establish a microhole taper prediction model，enabling intelligent assessment of taper parameters.

Key words：computer vision，machine learning，micro-hole detection，taper evaluation，intelligent inspection

1　引言

微孔结构广泛应用于航空航天精密部件、医疗器械及微电子制造等领域，其锥度参数直接影响流体通道性能、装配精度及整体结构可靠性。随着精密制造向微型化与高一致性方向发展，传统依赖显微测量和三坐标仪的检测方法逐渐暴露出效率低、人工依赖强及难以实现在线检测等问题。近年来，计算机视觉技术在工业缺陷识别与尺寸测量中得到广泛应用，机器学习方法也在复杂特征建模和参数预测方面展现出良好性能，为微孔几何参数的智能化评估提供了新思路。然而，现有方法在特征表达完整性与锥度预测精度方面仍存在不足[1]。

为提高微孔锥度检测效率和测量精度，本文提出一种融合计算机视觉与机器学习的自动评估方法。该方法通过构建“图像采集—视觉处理—特征学习—锥度预测”的完整流程，实现微孔锥度的智能检测，为精密制造在线质量控制提供技术支持。

2　微孔锥度自动评估总体方案

2.1　系统总体架构

为实现上述自动评估方法，本文构建了微孔锥度自动检测系统。该系统面向微孔锥度自动检测任务，构建

“图像采集—图像处理—特征提取—机器学习预测—结果输出”的一体化流程。首先由工业相机获取微孔高分辨率图像，依次进行图像预处理和边缘检测，提取微孔轮廓信息；在此基础上计算孔径、锥角及形状等关键特征，并输入机器学习模型完成锥度预测，最终输出检测结果与质量判定信息。系统整体由视觉采集模块、图像处理模块、特征提取模块、机器学习预测模块及结果显示模块五部分组成，实现从图像到参数的自动映射[2]。

2.2　微孔视觉成像

系统采用CMOS工业相机作为图像采集设备，结合远心镜头和环形LED光源构建成像环境。其中，远心镜头可有效消除透视畸变，提高微孔边缘测量精度；环形LED光源能够提供均匀稳定的照明条件，减少阴影与反光对边缘提取的干扰，从而保证图像质量的一致性，为后续特征提取提供可靠的数据基础[3]。

2.3　图像处理流程

图像处理流程主要包括中值滤波去噪、CLAHE对比度增强、Canny边缘检测、轮廓跟踪及亚像素级边缘拟合等步骤。该流程通过多级处理，可有效提升微孔边缘的清晰度和连续性，并抑制噪声干扰。最终精确提取微孔入口直径、出口直径及完整边缘轮廓信息，为锥度计算与机器学习模型输入提供高精度几何数据支撑。

3　基于计算机视觉的微孔特征提取

3.1　微孔轮廓定位

在微孔图像分析中，轮廓定位是实现几何参数计算的关键步骤。本文采用OpenCV实现微孔边界提取，首先通过Canny算子完成边缘检测，增强孔壁灰度突变区域的响应；其次利用FindContours函数对连通边缘进行轮廓提取，并筛选出目标微孔区域。为提高边界拟合精度，引入最小二乘法对轮廓点进行曲线拟合，从而获得微孔的上下边界轮廓曲线，为后续锥度计算提供高精度几何基础[4]。

3.2　锥度几何特征提取

在获得轮廓信息后，构建微孔锥度的多维几何特征体系，包括入口孔径D_u、出口孔径D_l、孔深H、平均倾角θ_L和θ_R、轮廓曲率C以及圆度R等指标。上述特征共同组成特征向量：

$$\boldsymbol{F}=[D_u, D_l, H, \theta_L, \theta_R, C, R] \tag{1}$$

通过对孔径变化与边缘倾斜关系的刻画，实现对微孔锥度几何结构的全面表达，为机器学习模型提供有效输入。

3.3　图像纹理特征

本文进一步引入纹理特征，以增强模型对表面状态的感知能力。采用灰度共生矩阵（GrayLevel Co-occurrence Matrix，GLCM）提取能量、熵、对比度和同质性等统计特征，以描述微孔区域灰度分布规律；引入局部二值模式（Local Binary Pattern，LBP）特征，用于表征局部纹理微结构变化。将GLCM与LBP特征融合，可有效提升对复杂表面和加工纹理差异的表达能力，从而提高锥度预测的鲁棒性与精度[5]。

4　基于机器学习的锥度预测模型

4.1　数据集构建

为验证所提方法的有效性，本文构建微孔锥度数据集，共采集约3 200幅微孔图像，覆盖不同材料和加工工况。每幅图像对应的真实锥度值均由三坐标测量仪高精度标定，并作为监督学习标签。数据集按70%，15%，15%的比例划分为训练集、验证集与测试集，以保证模型训练和泛化能力评估的合理性。数据输入与标签的关系可表示为：

$$D=(x_i, y_i)_{i=1}^{N} \tag{2}$$

其中，x_i为图像特征输入；y_i为真实锥度值。

4.2　特征选择

为降低特征冗余并提升模型泛化能力，采用随机森林对特征重要性进行排序分析，依据节点分裂增益评估各特征贡献度，筛选出关键特征子集，最终保留15维高相关性特征用于模型训练。特征重要性可表示为：

$$I(f)=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\Delta G_m(f) \tag{3}$$

其中，$\Delta G_m(f)$表示特征f在第m棵树中的增益贡献。

4.3　锥度预测模型

本文对比了支持向量回归（Support Vector Regression，SVR）、随机森林（Random Forest，RF）、XGBoost及LightGBM 4种模型的锥度预测性能。结果表明，XGBoost在非线性拟合能力与鲁棒性方面表现最佳，故将其作为最终预测模型：

$$\hat{y}=f(F)=\sum_{k=1}^{K}f_k(F) \tag{4}$$

其中，f_k表示第k棵回归树。

4.4　自动评估流程

系统自动评估流程包括图像输入、视觉定位、特征提取、模型预测及结果输出5个步骤。首先对输入图像进行轮廓定位和特征计算，其次将特征向量输入训练完成的模型以获取预测锥度值，并依据工艺标准进行质量分级。整体决策过程可表示为：

$$Q=\begin{cases}1, |\hat{y}-y_0|\leqslant\delta\\ 0, |\hat{y}-y_0|>\delta\end{cases} \tag{5}$$

其中，y_0为标准锥度；δ为公差阈值。

5　实验验证与结果分析

5.1　实验平台与数据集

本文构建了基于工业级软硬件一体化的实验平台，用于验证微孔锥度自动评估方法的有效性。硬件方面，

采用工业PC作为计算核心，配置Intel i7处理器、32 GB内存及RTX 4060显卡，以保证图像处理和模型推理的实时性与稳定性；视觉采集设备选用500万像素工业相机，配合0.5×远心镜头以降低成像畸变，并采用稳定环形光源提升边缘对比度。软件环境基于Windows 11系统，主要开发工具包括Python，OpenCV，Scikit-learn及XGBoost，实现从图像处理到模型预测的全流程开发。数据集共采集3 200个微孔样本，涵盖不锈钢、钛合金及铝合金等典型工程材料，孔径范围为0.3~2 mm，锥度范围为0.2°~6°。所有样本的真实锥度均由高精度三坐标测量设备获取，并作为监督学习标签。数据按比例划分为训练集、验证集和测试集，用于模型训练与性能评估。

5.2 对比实验与消融分析

为验证本文方法的优越性，将其与人工测量、传统图像测量及多种机器学习方法进行对比分析。实验结果表明，本文方法在误差控制和计算效率方面均表现最优，其中平均绝对误差（Mean Absolute Error，MAE）最低，仅为0.035°，显著优于其他方法。整体误差评价指标可表示为：

$$MAE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\hat{y}_i-y_i| \tag{6}$$

同时，通过消融实验验证各模块的贡献度。结果显示，当去除纹理特征、机器学习模型或亚像素拟合模块时，预测误差均明显上升，说明三者在提升检测精度方面具有协同作用。其中，亚像素拟合对边界精度影响显著，而机器学习模块决定非线性映射能力。

5.3 可视化分析与结果讨论

为进一步分析模型性能，对预测结果进行可视化展示，包括预测值和真实值散点分布、误差分布直方图以及特征重要性排序图。由散点分布可见，预测值整体紧密分布于45°理想拟合线附近，表明模型具有良好的拟合能力与泛化性能。误差分布呈近似正态分布特征，说明预测结果稳定且无明显系统性偏差。此外，特征重要性分析显示，几何特征（如入口孔径和出口孔径）贡献度最高，纹理特征则对模型鲁棒性起到辅助作用。整体结果表明，所提方法能够有效实现微孔锥度的高精度自动评估，具备较好的工程应用价值与推广意义。

6 结束语

本文提出了一种融合计算机视觉与机器学习的微孔锥度自动评估方法，构建了涵盖图像采集、轮廓提取、特征融合及智能预测的完整检测流程，实现了微孔锥度参数的快速、准确评估。实验结果表明，该方法在预测精度、检测效率及稳定性方面均优于传统图像测量方法，能够有效降低人工检测误差，提升在线质量检测能力。未来可进一步引入深度学习目标检测网络和轻量化神经网络模型，实现复杂背景下微孔自动识别、多参数联合检测及边缘设备实时部署，从而进一步提升智能制造场景中的在线检测能力与工程应用价值。

参考文献：

[1] 曲永强，许金凯，于朋.磁场对微细电火花加工Ti-6Al-4V微孔的影响[J].工具技术，2021，55(7)：23-27.

[2] 王鹏，段友智，刘波，等.聚氨酯微孔弹性体加速老化评估及使用寿命研究?[J].聚氨酯工业，2016，31(5)：37-40.

[3] 陈加媛，贺勤，宋鹏飞，等.铒激光微剥脱联合微孔点阵模式治疗痤疮瘢痕的疗效评估[J].中国美容医学，2015，24(18)：44-47.

[4] 郭益冰，邵健，郑成，等.红景天苷类似物合成及微孔板定量法评估其抗氧化能力[J].交通医学，2012，26(1)：16-19+28.

[5] 肖仕初，夏照帆，杨珺，等.微孔异种无细胞真皮复合移植用于烧伤创面F功能评估[J].中国临床康复，2003，7(32)：4311-4313.

作者简介：

贺梓修（1990—），硕士，研究方向：人工智能应用。