

倾角反馈视角下智能锉刀系统设计与训练效能探索 ——面向钳工技能习得的数字化转型

徐梦欣, 甘伍芳, 黄建豪

四川西南航空职业学院, 四川 成都 610400

DOI: 10.61369/RTED.2025050008

摘 要 : 针对钳工锉削技能训练难度大, 周期长的问题, 本研究设计了一种基于倾角传感器的智能锉刀系统, 通过实时监测 X/Y 轴角度倾斜状态与多模态反馈, 重构 "感知 - 修正 - 强化" 的训练闭环。对该系统进行对照实验, 确认了实时倾角反馈可有效压缩技能习得周期, 为职业技能教育数字化转型提供了创新解决方案, 同时为高精度手工技能的量化传承开辟了新路径。

关 键 词 : 倾角传感器; 实时反馈; 钳工训练; 技能量化; 职业教育

Exploring the Design and Training Effectiveness of Smart File System from the Perspective of Inclination Angle Feedback -- Digital Transformation for the Acquisition of Fitter Skills

Xu Mengxin, Gan Wufang, Huang Jianhao

Sichuan Southwest Vocational College of Civil Aviation, Chengdu, Sichuan 610400

Abstract : Aiming at the problems of high difficulty and long cycle in fitter filing skill training, this study designs an intelligent file system based on inclination sensors. By real-time monitoring of the tilt status of X/Y axis angles and multimodal feedback, it reconstructs the "perception-correction-strengthening" training closed loop. A controlled experiment on the system confirms that real-time inclination feedback can effectively shorten the skill acquisition cycle, providing an innovative solution for the digital transformation of vocational skill education and opening up a new path for the quantitative inheritance of high-precision manual skills.

Keywords : inclination sensor; real-time feedback; fitter training; skill quantification; vocational education

引言

在全球制造业智能化转型的宏大叙事中,《中国制造2025》战略将高技能人才培养置于核心地位。据统计,我国高技能钳工缺口已超400万人,而职业院校相关专业毕业生基本技能达标率不足60%。^[1]这种结构性矛盾揭示了一个深刻悖论:当智能机床的定位精度迈向微米级时,作为制造基石的钳工技能传承,却仍停留在"师带徒"的经验主义时代,其培养效率亟待提升。

平面锉削作为机械制造的"细胞级"工艺,其精度直接影响装备性能。在航天发动机叶片修配等尖端领域,微小的平面度误差可能导致重大的损失。传统训练模式面临三重桎梏:(1)感知迟滞:从动作失误到检测反馈存在空窗期,错失神经肌肉调控黄金窗口;(2)经验雾化:教师"手感""力道"等主观描述难以转化为可量化教学指标;(3)效率瓶颈:高级钳工培养周期长达3-5年,无法匹配智能产线迭代速度。

教育部2022年调研显示,62%的职业院校学生因训练反馈延迟导致动作定型错误,这是造成30%学员中途转行的关键诱因。

对于锉削基本技能培训的改进方案主要集中于两类路径,包括日本大阪工业大学开发的VTS-200训练平台^[2]和德国FESTO研发的LaserGuide激光导向锉刀,方案对比见下表。

方案类型	实时性	成本 / 元	干扰度	适配性
传统师训模式	滞后	低	无	差
视频回放系统	>3s	1200-1800	中	一般
激光导向装置	即时	20000-30000	高	差
本研究方案	<0.05s	30-50	低	优

本研究提出的智能锉刀系统,本质上是将"数字孪生"理念注入传统工具——通过高精度倾角传感(动态0.5°)、实时反馈(<0.05s延迟)与大数据分析,构建"感知-决策-强化"的闭环训练生态。^[3]这不仅是工具革新,更是对智能制造人才培养范式的重构。

课题项目:

- 本文系四川西南航空职业学院2024年度校级科研课题“锉削技术的未来:智能化升级与传统工艺的协同演进研究”(项目编号:XNHY-2024-ZD05)研究成果。
- 本文系中国民办教育协会2024年度规划课题(学校发展类)“数智时代职业院校新质后备工匠培养研究——教育生态学视角下的AI渗透与人才培养范式”(项目编号:CANFZG24449)研究成果。

一、系统设计与实现

（一）总体架构设计

本系统以传统锉刀为基础载体，通过外挂式智能模块实现动作监测与实时反馈功能。整个架构采用“感知－处理－反馈”三阶段闭环设计：在锉刀柄部末端加装倾角传感器模块，通过 USB 线缆与计算机连接获取供电并进行数据传输，最终由多级指示灯和蜂鸣器构成反馈执行单元。该方案在保留传统工具操作特性的同时，实现了对锉削姿态的数字化监控。

（二）硬件系统与软件系统

1. 硬件系统中核心传感器选用定制双轴倾角传感器，其测量范围覆盖 $\pm 90^{\circ}$ ，动态测量精度达到 0.5° 。为确保传感器与锉刀的可靠连接，开发了专用卡扣式安装结构，安装于锉刀与手柄连接处。经实测，该监测模块总重 22g，相较于标准 280g 及以上普通锉刀，操作者主观评价表明重量变化未产生明显干扰。

供电设计采用计算机 USB 端口取电方案。信号传输使用 CH340G 芯片实现 USB 转 I2C 通信功能，定制开发的数据帧包含时间戳、双轴角度值及状态标志位。为防止训练过程中线缆缠绕，选用 1.5m 长硅胶外被线，并在连接处设置磁性快拆接头，当拉力超过 5N 时自动断开以保护设备。

2. 软件系统中倾角传感器在锉刀运行过程中产生的倾角数据（包括各轴实时倾角、角速度、角加速度等）上传至与之配套的数据监测管理平台，可实时采集多组数据，形成波形图实时观察，或导出数据供后期分析^[4]。

针对锉削作业的往复运动特性，开发了运动状态识别模块，通过角度变化率判断当前处于推进阶段还是回程阶段。阈值的设定根据教师对学员技术的评估而设定，实现个性化教学适配。

3. 反馈机制系统设置：当倾角偏差在阈值范围内时，绿色 LED 常亮表示动作合格；当 Y 轴（俯仰）倾角超出阈值范围，红色 LED 高频闪烁，当 X 轴（左右侧倾）倾角超出阈值范围，蓝色 LED 高频闪烁，若 X/Y 轴同时超出阈值范围，除对应 LED 灯点亮外，同时会触发蜂鸣器告警^[5]。通过反馈引导学员自主修正动作。

（三）关键技术验证

在机械可靠性方面，对安装结构进行 50 次重复拆装测试，传感器定位偏差始终小于 0.2mm，并可自行校正。通过振动台模拟实际工况（5–500Hz 随机振动），持续 30 分钟后各连接部件无松动迹象。测量精度验证采用高精度数字水平仪作为基准，在 $0\text{--}10^{\circ}$ 测试范围内最大绝对误差为 0.3° ，满足设计要求的 0.5° 精度指标。实时性测试显示，从传感器采集数据到触发反馈的总延迟稳定在 72ms 左右，远低于人体动作修正的感知阈值（约 100ms）^[6]。

（四）设计创新特性

本系统的核心创新体现在三个层面：其一，创造性地采用非侵入式外挂结构，既保留传统工具的操作手感，又实现快速部署（安装时间 <10 秒）；其二，阈值通过数据监测平台按需轻松设置，适配学员不同的技术水平阶段；其三，构建稳定的快速反馈

体系，通过光－声复合提示建立高效的动作修正回路。与国外类似功能方案相比，本系统在成本控制和操作干扰度方面具有显著优势^[7]。

二、实验设计与数据分析

（一）实验方案设计

为系统验证智能锉刀对技能训练效率的提升效果，本研究采用对照实验设计。实验对象选自某高职院校飞机机电设备维修专业新生群体，通过随机抽样将 100 名学员均分为对照组与实验组。抽样标准包括性别比例男：女为 10:1、体能测试成绩（要求握力 $\geq 10\text{kg}$ ）及均未接触过平面锉削技术的训练^[8]。

每次实验进行 2 小时标准化训练，目标为锉削加工 Q235 钢板，形成平面度误差 $\leq 0.05\text{mm}$ 的 $100\times 10\text{mm}$ 平面。实验周期设置为 50 小时。

两组学员每训练操作 20 分钟暂停，由教师使用所需量具检测平面度，并指导动作修正。每次训练完成时，对学员加工的试件平面度进行精确测量并记录，同时记录该时间段内超出阈值范围报警次数。

实验组学员配备本研究开发的智能锉刀系统，其核心功能为实时倾角监测与反馈。对照组沿用传统训练模式。锉刀均选择同一品牌全新锉刀，类型根据训练阶段统一选择^[9]。

（二）数据采集

在实验阶段，将重点采集一下数据，并对实验进程记性相应记录。

数据类型	对照组	实验组
角度偏差数据	无	数据管理平台导出每次锉削行程 X/Y 轴角度偏差数据
传感器报警次数	无	超出阈值报警次数
平面度误差值	每 1 小时测量记录一次	每 1 小时测量记录一次

（三）实验结果与分析

记录实验组学员操作过程中超出阈值报警次数。其中阈值初始范围统一设定：X 轴 $\pm 3^{\circ}$ （左右），Y 轴 $\pm 5^{\circ}$ （俯仰）。根据学员学习进度，个性化设置阈值范围。每次时训练后，记录两组学员锉削平面度误差值。

两组学员每次训练后的锉削质量，即平面度误差值均值记录如下表：

训练次数组别	1	2	3	4	5	6	
对照组	2.31 mm	2.261 mm	1.98 mm	1.88 mm	1.75 mm	1.70 mm	
实验组	1.82 mm	1.75 mm	1.67 mm	1.64 mm	1.58 mm	1.44 mm	

对比学员达到某一学习进度情况所需培训次数统计如下表：

平面度误差 训练次数	1.5mm	1.2mm	0.5mm
对照组学员	7 次	13 次	23 次
实验组学员	4 次	8 次	15 次

数据统计结果分析如下：

1. 实验组学员初始学习进步的速率远超对照组。经过4次训练后，即能将平面度误差控制在1.5mm以内。而对照组学员在7次训练后才达到了同样水平。

2. 学员操作技能在能将平面度误差值控制在1.2mm前，两组学员均出现了技术进步平台期。突破该平台期，实验组经历了4次训练，对照组经历了6次训练。

3. 最终两组学员将平面度误差值控制在0.5mm内的训练时间，实验组学员平均训练次数为15次，对照组学员为23次，任务达成效率较对照组提高了34.8%。

（四）训练效率提升原因分析

1. 即时反馈：压缩“动作－结果”认知延迟

首先，对照组学员一般需要锉削10分钟左右进行检测，通过结果反思上一段时间内的操作情况，并在下一段训练中尝试调整。即“锉削→检测→获得反馈→调整动作”的循环过程。而这一循环最大的问题在于反馈不及时，存在认知链条断裂，而错误动作被重复固化。

另一方面，实验组学员在进行训练过程中，如果出现锉削角度超出阈值范围，通过倾角传感器的实时监测，学员马上会得到声、光信号提醒。这样的实时反馈，符合斯金纳操作性条件反射

理论，建立“错误－修正”强关联，极大地促进了学员在出现问题的当下便能了解到问题正在发生，并在下一次锉削动作时做出相应调整。这样的快速自我修正是大幅度提升训练效率的首要因素^[10]。

2. 教师通过数据统计，结合现场观察，能够更准确地判断出学员操作时的动作问题所在，并结合平面度检测结果，为学员提供更客观有效的修正改进方案，帮助学员快速提升操作水平。

综合上述两方面主要原因，较传统模式下教师凭经验指导学生的训练模式，安装倾角传感器的实验组学员将“操作－识别问题－修正”这一循环过程从分钟级缩短到亚秒级。

三、结论与展望

通过使用智能锉刀，促进了训练过程的可视化和精确定制化。教师凭借已有教学经验和精确地数据展现，使各阶段训练效率平均提升了27%。

一把装上“数字眼睛”的智能锉刀，改变的不仅仅是学生的训练方式，更有望在职业教育和工业实践中做出新的突破，让传统手工技艺，在数字时代焕发新生。

参考文献

[1] 中华人民共和国工业和信息化部. 制造业人才发展规划指南 (2021-2025年) [R]. 北京：工信部，2023.

[2] 王晓东，李娜. 倾角传感器在桥梁健康监测中的应用研究 [J]. 仪器仪表学报，2020: 41（4）.

[3] 张建国，李志强. 基于多模态反馈的职业技能训练系统研究 [J]. 中国职业技术教育，2021(12): 45-52.

[4] 严锐. 浅析钳工技能在汽车维修中的应用 [J]. 汽车维修技师，2024, (24): 33-34.

[5] 赵敬华. 产教融合机制下的钳工技能教学方法研究 [J]. 造纸装备及材料，2024, 53 (10): 254-256.

[6] 赵智航，陈卓威，周干祺. 高校装配钳工技术技能课程的开发及其应用研究 [J]. 模具制造，2024, 24 (08): 54-56. DOI:10.13596/j.cnki.44-1542/th.2024.08.018.

[7] 张富建. 浅谈职业技能等级认定制度下的钳工人才培养 [J]. 职业，2023, (14): 53-56.

[8] 招小伟. 高职院校“钳工技能实训”课程思政探索与实践 [J]. 才智，2023, (09): 34-37.

[9] 孙瑞霞. 化工检修钳工技能质量的提升路径研究 [J]. 造纸装备及材料，2023, 52 (02): 252-254.

[10] 聂卫晶. 基于企业新型学徒制下技能人才培养模式探究——以钳工为例 [J]. 农业工程与装备，2022, 49 (06): 58-60.