

基于倾角反馈的智能锉刀系统设计与训练效能研究

——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)

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

1. 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重构。

2. 系统设计与实现

2.1 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。

2.2 硬件系统与软件系统

2.2.1 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。

2.2.2 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。

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。

2.2.3 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 灯点量外,同时会触发蜂鸣器告警。通过反馈引导学员自主修正动作。

2.3 关键技术验证

在机械可靠性方面,对安装结构进行 500 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 0-10° 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)。

2.4 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。

3. 实验设计与数据分析

3.1 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 $\geq 10\text{kg}$ ）及均未曾接触过平面锉削技术的训练。

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。

3.2 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

3.3 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	1	2	3	4	5	6	
对照组	2.31mm	2.261mm	1.98mm	1.88mm	1.75mm	1.70mm	
实验组	1.82mm	1.75mm	1.67mm	1.64mm	1.58mm	1.44mm	

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	1.5mm	1.2mm	0.5mm
训练次数			
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%。

3.4 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[3]，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大幅度提升训练效率的首要因素。

（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。

4. 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.

课题项目：1. 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。2. 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。