

板式家具数控开料机的数字孪生模型构建与虚拟调试技术的研究

吴炜康

南兴装备股份有限公司 广东 东莞 523981

摘要：本文研究板式家具数控开料机的数字孪生模型构建与虚拟调试技术，先阐述数字孪生基础概念、数控开料机核心原理及虚拟调试关键技术；再分析模型构建流程，包括物理实体信息采集、虚拟模型搭建与精度优化；最后探讨虚拟调试的场景搭建、功能实现及数据交互协同。为数控开料机高效调试与稳定运行提供支撑，减少实体调试成本，提升设备加工精度与效率。

关键词：数字孪生；数控开料机；虚拟调试；模型构建；精度优化

引言：当前板式家具生产中，数控开料机是核心设备，其调试效率与运行精度直接影响生产质量与成本。传统实体调试存在耗材多、周期长、风险高的问题，难以满足高效生产需求。数字孪生技术可构建与物理设备一致的虚拟模型，结合虚拟调试技术实现设备调试数字化，为解决传统调试痛点提供思路。本文聚焦相关技术研究，形成可行技术方案，助力提升数控开料机调试水平与生产效能。

1 相关基础理论与技术

1.1 数字孪生基础概念

数字孪生的核心内涵是通过数字化手段构建与物理实体高度一致的虚拟模型，实现对物理实体全生命周期的动态映射与协同交互。这一技术并非简单三维建模，而是融合多学科技术的复杂系统，核心价值在于打破物理与虚拟世界界限，让虚拟模型实时反映物理实体的运行状态与环境影响。数字孪生的基本逻辑围绕物理实体、虚拟模型与数据交互展开。物理实体是映射对象，所有特征与行为转化为数字化信息；虚拟模型是物理实体在虚拟空间的精准复现，涵盖几何形态、物理属性、运动规律及功能逻辑，可模拟不同场景下的运行状态；数据交互是连接二者的关键纽带，通过传感器获取物理实体实时信息传输至虚拟模型，同时将虚拟模型的仿真结果反馈至物理实体，形成双向动态交互闭环。在这一逻辑框架下，物理实体的变化会被实时捕捉并同步至虚拟模型，虚拟模型可据此仿真分析，预测运行问题，为物理实体的运维、优化提供依据^[1]。这种动态映射与交互能力，使数字孪生可应用于设备研发、生产调试等环节，提升物理实体的运行效率与可靠性。

1.2 数控开料机核心原理

板式家具数控开料机是用于板材切割、打孔、开槽的自动化设备，结构组成需满足高精度、高效率加工需求。机身作为基础支撑部件，需具备足够刚性与稳定性，避免加工中因振动产生精度偏差，通常采用高强度钢材焊接，表面经精密加工确保部件安装准确。刀具系统是实现加工功能的核心组件，包含刀库、主轴与各类刀具。刀库存放不同刀具并自动切换，常见类型有圆盘式与斗笠式，换刀速度与容量影响加工效率；主轴带动刀具旋转，转速与功率决定加工精度与速度，需匹配板材材质；刀具按加工任务分类，材质与刃口设计需适配加工需求以保证质量。控制系统是设备的指挥中枢，负责接收加工指令、解析工艺参数并控制各部件协同运行，由硬件（控制器、伺服驱动器、电机）与软件（数控系统程序、加工控制算法）组成。加工指令传输后，系统解析板材尺寸、加工路径等参数，驱动伺服电机带动机身运动部件与主轴协同工作，使刀具按预设路径完成加工。数控开料机的工作流程始于加工准备，操作人员固定板材、导入加工图纸并设置参数；随后控制系统生成加工路径，驱动刀库换刀；加工中，主轴带动刀具高速旋转，机身运动部件带动工作台按路径移动；加工后设备自动停止，操作人员取下板材，完成加工周期。

1.3 虚拟调试关键技术

虚拟调试依赖多项技术协同支撑，构建虚拟环境与物理设备的连接桥梁。三维建模技术是构建虚拟模型的核心基础，需遵循精准映射原则，通过专业软件对设备各部件逐一建模，还原尺寸、形状及运动约束，确保虚拟模型能模拟物理设备的运动状态，避免建模偏差导致调试结果失真。实时数据传输技术是实现二者动态交互的关键，通过传感器、数据采集模块获取物理设备的实

时运行数据（部件位置、转速等），经网络传输协议发送至虚拟模型；同时将虚拟调试生成的控制指令传输至物理设备，实现数据双向流通。需选择适配的传输协议与硬件，减少延迟与丢失，确保虚拟模型及时反映设备状态。虚拟仿真引擎技术为虚拟模型提供运行环境，模拟物理世界的力学特性与运动规律，如数控开料机加工中的刀具受力，使虚拟调试贴近实际场景。同时其具备可视化功能，可直观展示设备运行状态，方便操作人员观察细节、调整参数。此外，控制逻辑仿真技术将物理设备的控制系统逻辑转化为虚拟程序，模拟指令解析过程，确保调试覆盖控制环节，验证控制系统稳定性。

2 板式家具数控开料机数字孪生模型构建

2.1 物理实体信息采集

物理实体信息采集是数字孪生模型构建的前提，需全面获取数控开料机关键信息。结构参数采集覆盖设备整体与核心部件尺寸，记录机身基础数据及工作台、刀库、主轴关键参数，这些参数直接影响虚拟模型部件装配，偏差会导致运动模拟失真。运动特性采集聚焦各运动部件运行规律，明确运动方式、范围与约束。工作台记录平移方向、速度、加速度及定位精度；主轴记录转速范围、正反转方式及Z轴升降参数；刀库记录换刀速度、路径及时间间隔，为换刀流程仿真提供依据。硬件性能采集关注核心硬件参数与能力边界，控制器记录支持的指令类型、处理速度及接口；伺服电机采集功率、转速与扭矩；传感器记录安装位置、类型及精度；还需采集设备负载能力，避免虚拟模型超物理能力运行。

2.2 虚拟模型构建流程

虚拟模型构建遵循清晰流程，分阶段完成从几何形态到功能逻辑的复现。三维几何建模是第一步，依据结构参数通过专业软件搭建设备数字化框架，先构建机身主体框架，按尺寸确定厚度与支撑结构分布，再依次搭建工作台、刀库、主轴，还原工作台表面平整度与定位孔，刀库卡槽形状与间距，主轴外部轮廓与电机连接结构，最后按物理设备装配关系组合部件，调整相对位置确保装配间隙与连接方式一致，形成完整三维几何模型。物理属性添加为模型赋予物理特性，按部件实际材质设置参数，机身用高强度钢材则匹配密度、硬度与弹性模量，保证抗振动仿真一致；工作台表面用耐磨板材则添加摩擦系数，模拟板材移动阻力^[2]。结合运动特性为部件添加约束，工作台设X轴、Y轴平移约束，主轴设旋转与Z轴升降约束，部件连接部位设固定或传动约束，避免部件脱离或异常碰撞。建立与物理设备的映射关系是动态交互核心，搭建数据接口时选择与控制器匹配的通

信协议，对接虚拟模型控制指令输出与物理设备指令接收接口，连通传感器反馈数据与虚拟模型输入接口，实现实时数据传输。制定状态映射规则，将物理设备工作台位置、主轴转速转化为虚拟模型对应参数，同时制定故障映射规则，物理设备出现主轴高温、刀库卡刀时，虚拟模型通过颜色变化、运动停止等同步反馈，实现状态协同。

2.3 模型精度优化

模型精度优化缩小虚拟与物理差异，提升一致性以保障调试可靠性。参数匹配度调整修正前期建模偏差，结构参数上对比虚拟与物理部件尺寸，发现工作台长度、主轴高度偏差时按实际数据调整；运动参数通过实际测试与仿真对比优化，设定固定运动场景，记录二者轨迹与时间数据，调整加速度、旋转角速度等参数，直至运动状态同步。运动误差修正处理仿真失真问题，先排查运动约束，工作台卡顿偏移时重新核对物理特性调整约束参数；再修正部件协同误差，测试多部件协同动作，虚拟仿真后观察配合情况，出现碰撞或换刀时机偏差时调整运动时序；还需修正动力学误差，对比相同负载下运动状态，调整伺服电机扭矩与功率，使虚拟模型动力特性匹配物理设备。细节优化关注影响精度的易忽略部分，部件表面需还原定位刻度、刀具识别标识，避免调试定位偏差；连接部位细化结构，主轴与电机传动处添加齿轮齿形与咬合方式，工作台与导轨处添加凹槽与滑块形状，确保传动与滑动仿真一致；还需优化物理场仿真细节，模拟切削力对主轴的影响并添加力学反馈，使虚拟模型在外观、运动及物理效应上均与物理设备精准匹配。

3 基于数字孪生的虚拟调试技术

3.1 虚拟调试场景搭建

虚拟调试场景搭建需还原数控开料机实际工作环境与任务流程，为调试提供贴近真实的仿真基础。加工任务设置依据板式家具生产需求，设定板材切割任务时，在虚拟场景中定义板材材质、尺寸及成品形状，标注切割路径关键节点，确保与实际生产参数一致；打孔与开槽任务明确孔位坐标、孔径、孔深及槽口参数，与生产图纸技术要求同步。物料输送模拟复现板材流转过程，在虚拟场景中搭建与物理设备匹配的上料机构，定义其运动速度、定位精度及板材输送路径，确保板材准确放置在工作台加工区域；加工中实时反馈板材位置、进度及加工后转移流程，覆盖物料流转全环节。环境因素模拟考虑外部影响，温度模拟设置与车间匹配范围，记录部件运动特性变化；振动模拟根据车间地面与周边设备

情况添加参数,观察对工作台精度、刀具稳定性的影响;同时模拟设备周边空间布局,避免实际应用中设备碰撞或操作不便。

3.2 调试功能实现

程序预运行检测重点排查加工程序潜在风险,避免实体调试中的碰撞事故与加工缺陷。加工路径碰撞检测在虚拟场景中模拟程序运行全过程,实时追踪刀具、主轴、工作台与板材的空间位置关系,当刀具运动轨迹可能与其他部件发生重叠时,系统及时预警并标记碰撞位置,方便调试人员调整加工路径参数^[3]。同时需检测刀具与板材的软碰撞风险,通过模拟切削受力判断加工参数是否超出板材承受范围,提前修正可能导致加工质量问题的程序设置。加工精度预检测通过虚拟仿真验证成品精度,程序运行结束后,虚拟系统自动测量成品关键尺寸,并与预设精度标准对比生成偏差报告。若成品尺寸超出允许误差范围,调试人员回溯程序参数分析偏差原因,在虚拟场景中调整参数后重新运行程序,直至成品精度满足要求。这种方式无需实际耗材,可反复测试优化程序,大幅降低实体调试的材料浪费与时间成本。

参数优化围绕加工效率与质量平衡展开,刀具转速优化根据板材材质与刀具类型,在虚拟场景中测试不同转速下的切削效果,选择既能保证切割质量又能降低设备损耗的最优转速。进给速度优化结合刀具转速与加工路径长度,测试不同进给速度下的加工时间与切削稳定性,找到效率与精度兼顾的参数。同时需优化刀具补偿参数,根据刀具实际磨损情况调整补偿值,确保加工尺寸精度不受刀具磨损影响。

3.3 数据交互与协同

数据交互与协同需建立虚拟模型与物理设备的高效数据传输与同步机制。实时数据传输依托稳定通信网络与适配协议,虚拟模型生成的加工程序参数需实时传输至物理设备控制器,确保数据完整准确,避免因丢失或延迟导致参数错误。物理设备的实时运行状态数据需反向传输至虚拟模型,虚拟系统根据这些数据更新状态,

形成数据双向流通闭环,使虚拟调试实时反映物理设备运行情况。调试指令同步确保虚拟模型发出的控制指令被物理设备准确执行,指令类型涵盖设备启停、参数调整、程序切换等。调试人员发出主轴启动指令时,指令通过数据接口传输至物理设备控制器,控制器解析后驱动主轴按设定转速启动;调整进给速度参数时,新参数指令需实时同步至物理设备,确保二者运行参数一致。为避免指令冲突,需在数据交互系统中设置优先级机制,按紧急程度依次执行指令,保障设备运行安全。调试结果反馈与应用需建立清晰转化流程,虚拟调试完成后系统自动生成包含优化参数、精度检测结果、设备运行记录的报告。调试人员审核报告确认合理后,将优化程序导入物理设备指导实际生产。同时需将虚拟调试中发现的设备潜在问题反馈至维护部门,提前检查维护避免实际生产故障。此外,将调试数据与结果存储至数据库形成案例库,为后续同类设备调试提供参考,实现经验积累与复用,提升整体调试效率与质量。

结束语

板式家具数控开料机数字孪生模型构建与虚拟调试技术研究,从理论到实践,为设备研发调试提供了新途径。通过全面采集信息、精准构建模型、搭建虚拟场景及实现数据交互协同,可提前发现并解决问题,降低调试成本。未来,该技术有望在更多领域推广,推动制造业智能化升级。

参考文献

- [1]刘国强,段明峰,王堃宇,王继航,张南,赵南.基于数字孪生的国产五轴数控机床虚拟调试系统的研究与实现[J].组合机床与自动化加工技术,2025(4):13-17+22.
- [2]孙雪皓,张凤丽,周正飞,王金江,黄祖广,薛瑞娟.数控机床数字孪生建模技术及智能应用研究[J].计算机集成制造系统,2024,30(3):825-836.
- [3]张曦阳,林旭升,周瑞,胡毅.数控系统数字孪生体系结构及应用研究[J].系统仿真学报,2025,37(1):183-198.