

基于五轴联动加工的木质汽车外观模型一体化成型技术研究

张浩^{1,2}, 张瑞华¹, 姚华平¹

(1. 仲恺农业工程学院机电工程学院, 广东广州510225; 2. 东莞市新法拉数控设备有限公司, 广东东莞523170)



摘要: 针对汽车设计验证环节对物理原型高效、低成本、环保的迫切需求, 提出一种基于五轴联动数控加工技术的木质汽车模型一体化成型方法。以高密度纤维板 (high-density fiberboard, HDF) 为基材, 通过优化刀轴矢量控制与刀路策略, 构建了适配HDF特性的数字化工艺链; 提出基于HDF材料性能的“材料-工艺-加工”耦合调控体系, 实现了复杂曲面汽车外观模型的一体化加工, 有效解决了木质材料复杂曲面加工精度难控、表面质量差的瓶颈。从应用与可持续发展层面来看, 加工周期短 (仅2700 min), 较油泥模型缩短60%以上; 综合成本仅为油泥模型的1/3、3D打印树脂模型的2/5; 30天静置整车轮廓关键线性尺寸变化量 ≤ 0.3 mm, 尺寸稳定性优异; 可重复性强的刚性原型解决方案, 适用于设计中期多方案快速迭代与批量验证需求、空气动力学初步评估及高端展示样机制作。作为一种可回收的木质材料, HDF的应用推动了原型制造从油泥等消耗性材料, 向可数字化全流程追溯、环境友好的可持续模式转变, 为木材科学与汽车工程交叉领域的智能制造技术融合提供了实践参考。

关键词: 汽车外观模型; 五轴联动加工; 高密度纤维板; 一体化成型; 耦合调控体系

中图分类号: TS652; TB332 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (XXXX) XX-0001-11

Research on Integrated Forming Technology of Wooden Automotive Exterior Models Based on Five-axis Linkage Machining

Zhang Hao^{1,2}, Zhang Ruihua¹, Yao Huaping¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou, Guangdong 510225, China; 2. Dongguan Xin Farra Numerical Control Equipment Co. Ltd., Dongguan, Guangdong: 523170, China)

Abstract: This study presents an integrated molding approach for wooden automotive models using five-axis simultaneous CNC machining, in response to the pressing demand for physical prototypes that are efficient, economical, and environmentally sustainable in design validation. High-density fiberboard (HDF) is employed as the substrate, and a full digital process chain is established by optimizing tool-axis vector control and tool-path strategies to accommodate the specific characteristics of HDF. Furthermore, a "material - process - machining" synergistic control system is proposed, grounded in the performance attributes of HDF, enabling the integrated high-precision fabrication of complex-curved automotive body surfaces. This effectively resolves the long-standing bottlenecks of poor accuracy and inadequate surface

收稿日期: 2026-01-06; 修改日期: 2026-06-17

作者简介: 张浩 (1990—), 男, 工程师。Email: 591233010@qq.com

quality in machining wood-based materials with intricate geometries. Application and sustainability assessments reveal that the machining cycle is only 2,700 minutes—a reduction of over 60% compared with traditional clay modeling. The total cost can be reduced to one-third that of clay models and two-fifths that of resin-based 3D-printed counterparts. The change in key linear dimensions of the vehicle contour after 30 days of static placement shall be ≤ 0.3 mm., demonstrating outstanding dimensional stability. This rigid prototype solution offers high repeatability and is well suited for rapid multi-scheme iteration during mid-stage design, batch validation, preliminary aerodynamic evaluation, and high-end display mock-up production. Notably, as a recyclable wood-based material, HDF facilitates a paradigm shift in prototype manufacturing—from consumable materials like clay toward a digitally traceable, full-process, and environmentally responsible production chain. This work provides a practical reference for the integration of intelligent manufacturing technologies at the intersection of wood science and automotive engineering.

Key words: Automotive exterior model; Five-axis machining; High-density fiberboard; Integrated molding; coupled control system

在汽车设计过程中，物理原型的制造与验证作为核心环节^[1]，不仅是评估造型美感、人体工程学适配性、空气动力学初步意向的直观载体，更是开展工程可行性分析、零部件装配验证、工艺规划与成本核算的关键依据^[2]，其研发成本占设计总投入的 20%~30%^[3]。在传统汽车设计流程中，物理原型的制造周期直接关系到产品的上市时间，每缩短 1 个月的原型制造时间，可为企业带来约 5%~8% 的市场先发优势^[3]。因此，优化物理原型的材料与制造工艺，对于提升设计效率、降低研发成本具有重要的现实应用价值。

当前，汽车原型制造已形成以手工油泥塑形、3D 打印增材制造与五轴联动数控减材加工为主的三大技术路线，各类方案均存在明显短板：

手工油泥塑形凭借可手工塑形和修改的高度可塑性在汽车造型推敲与定型阶段长期占据主导地位^[4]，设计师可以通过刮削、填补等方式快速调整曲面形态，实现创意构思的实体化表达。但传统纯手工或半手工油泥模型制作模式存在以下局限^[5]：（1）制作周期长，一个完整的外观模型通常需要 1-2 个月，难以适应现代汽车设计中“快速迭代、多方案比选”的需求；（2）油泥材料不可回收，且制作过程中产生大量粉尘和废弃物；（3）尺寸稳定性较差，易受温度、湿度影响变形，难以长时间满足高精度空气动力学测试的要求。随着全三维数字设计技术的普及、产品迭代速度的

加快以及绿色制造理念的推广，物理原型的选择标准已从单一的可塑性，升级为追求高保真转换效率、尺寸稳定性、可控成本及可持续性的综合权衡。木质材料在汽车原型制造中，相比传统材料具有独特优势。其中，高密度纤维板（high-density fiberboard, HDF）相比油泥材料，具有可长期保存且可回收的优势；相比金属材料，其加工能耗仅为铝合金的 15%~20%^[6]；相比 3D 打印材料，成本仅为光敏树脂的 1/3~1/5^[7]；相比实木，无节子、裂纹等天然缺陷，为木质材料应用于汽车原型制造提供了可能性。

3D 打印增材制造技术（光固化成型、选择性激光烧结等技术）近年来在汽车部件的原型制造中得到应用，可快速制造复杂结构件，打印精度可达 ± 0.1 mm。在此背景下，汽车物理原型制造体系正加速向“数字-物理”混合模式演进。然而，3D 打印材料成本高昂，成型尺寸受设备限制（通常不超过 1 m），且表面质量需要打磨后处理，难以满足大型整车模型的一体化成型需求。

五轴联动数控加工技术因其对复杂曲面的高精度加工能力和高效率，已在航空航天、医疗器械、精密模具等领域得到广泛应用。在家具与木制品制造领域应用也日趋成熟，尤其在椅腿、扶手、雕花装饰等带有三维曲面的部件加工中实现了规模化应用。目前，木质模型的五轴加工具有精度高、周期短、材料环保、成本可控等综合优

势，已成为不同设计阶段、不同验证目的的重要选项^[2]。然而，该技术目前存在以下局限性：（1）加工对象小。现有研究主要集中于家具等小尺寸、相对规整的部件，对于汽车模型这类大尺寸、复杂流线曲面、一体化结构的特殊应用场景缺乏针对性研究^[8]；（2）加工工艺参数缺乏。汽车模型对加工精度的要求远高于家具部件，且需满足空气动力学验证需求，现有工艺参数无法直接移植；（3）刀轴矢量动态控制不足。在复杂曲面加工中，刀轴矢量的平滑性直接影响表面质量。现有研究多采用固定前倾角或简单线性插值，缺乏对曲率变化的动态响应^[9]。当加工曲率变化剧烈的区域（如轮拱、腰线转折处）时，刀轴突变会导致明显的进给痕迹，影响表面光顺性和后续涂装效果。相关研究表明，刀轴矢量变化率控制在0.05以内可有效提升表面质量，但如何实现曲率自适应的动态调控仍是技术难点^[10]；（4）材料-工艺-加工耦合机制的缺失。HDF作为一种木质基复合材料，其密度、含水率、内结合强度等性能参数与切削参数之间存在复杂的耦合关系。现有研究多将材料性能与加工工艺割裂考虑，缺乏系统的“材料表征-工艺映射-加工验证”闭环调控体系^[11]。如HDF导热系数低（0.18 W/m·K），导致切削热量易积聚，若未能根据材料特性调整冷却策略和进给速度，容易引起热变形和表面碳化；（5）应用定位与评价体系的空白。在汽车设计流程中，木质五轴加工模型与油泥模型、3D打印模型之间的应用场景边界尚不清晰。现有研究缺乏从效率、精度、成本、环保性等维度的系统对比，难以为企业选择原型制造方案提供科学依据。

针对上述瓶颈，开展木质汽车外观模型一体化五轴加工研究：提炼汽车模型大尺寸、复杂曲面、一体化成型、高精度验证的核心特征，建立适配木质材料的加工技术框架；提出曲率自适应刀轴矢量控制方法，通过动态倾角规划与轨迹光顺实现稳定切削；构建“材料特性-工艺参数-加工质量”耦合调控体系，优化切削策略与内应力控制，提升大尺寸复杂曲面的成型精度与表面质量；明确木质汽车外观模型在汽车设计流程中的应用定位。对于木质材料在汽车设计中的应用具有重

要的理论价值和工程实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究选用E₁级HDF，其性能符合GB/T 31765—2015《高密度纤维板》标准。具体参数为：厂家出厂标称指标，密度880 kg/m³，吸水厚度膨胀率8.5%，甲醛释放量0.098 mg/m³，仅用于板材选型准入与环保性能判定。实验室实测指标，含水率5.2%，导热系数0.18 W/(m·K)，静曲强度38.6 MPa、内结合强度1.35 MPa，表面硬度（布氏）22 HB，上述实测数据作为构建耦合调控体系、匹配切削参数的核心约束边界。

HDF板材尺寸为：1 220 mm×2 440 mm×18 mm，共计110张。板材沿厚度方向同向铺装，板面平行于模型外形曲面，厚度方向沿模型高度堆叠。层间采用PVAc乳液胶黏剂均匀涂覆，经常温冷压固化形成整体实心坯料，不采用热压工艺以减小热变形。为防止加工过程中层板相对滑移，不仅通过胶层固化实现层间整体结合，还在坯料非关键区域设置定位销进行机械限位，并配合工作台刚性压紧与合理切削参数控制，保证五轴加工过程中坯料尺寸稳定、层间无错动。

1.2 加工设备选型

选用XFL-4070五轴联动加工中心，该设备采用双摆头五轴结构，具备X、Y、Z三个直线轴与A、C两个旋转轴，各轴行程分别为X=4 m、Y=7 m、Z=2.5 m、A=±120°、C=±360°，完全覆盖目标模型的加工范围，如图1所示。

1.3 试验仪器与设备

三维激光扫描仪（蔡司T-SCAN hawk 2），基恩士VK-X200激光显微镜，表面粗糙度检测仪（TIME3200）。

1.4 外观模型质量检测方法

1.4.1 几何精度

采用三维激光扫描仪扫描，检测点120个。

1.4.2 表面质量

采用表面粗糙度检测仪测得Ra值，采用多点取样并取平均值判定

1.4.3 结构稳定性

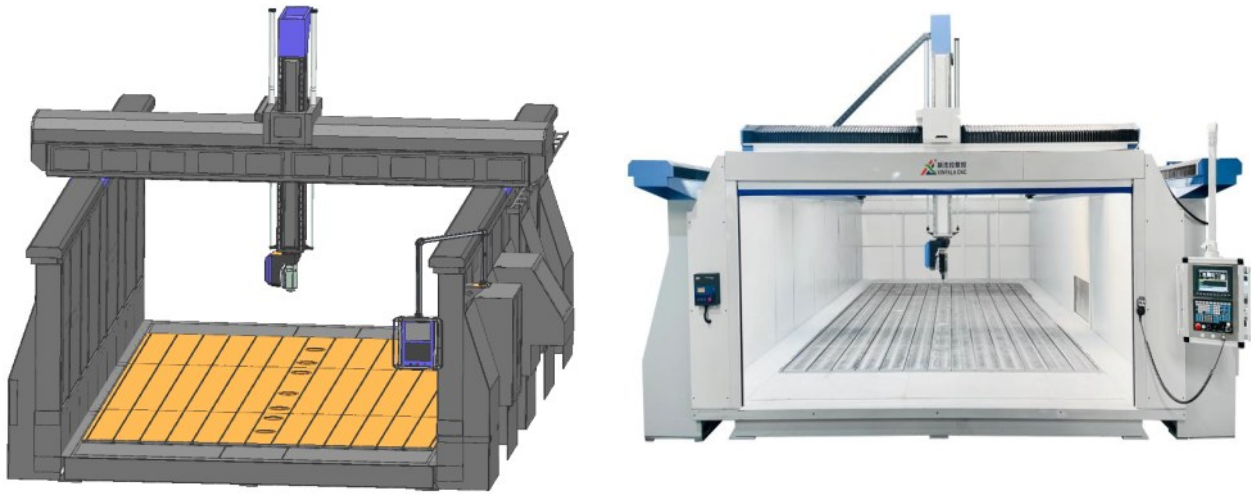


图1 加工机床模型图及装备实物图

Fig.1 Model diagrams of machining tools and physical images of equipment

采用30天常温静置实验评估结构稳定性，使用三维激光扫描仪检测与原始三维模型对比尺寸偏差，以模型自身初始尺寸为参照比对。

2 数字化工艺链构建

针对木质汽车外观模型五轴联动一体化加工，本文基于Siemens UG_NX软件构建了完整的数字化工艺链，包括工艺规划（Computer Aided Manufacturing CAM）、刀路策略制定与刀轴矢量控制、基于曲率自适应的刀轴矢量控制算法、仿真验证四个核心环节。

2.1 加工目标外观模型初始参数

以一款具备典型流线型特征的汽车为原型，提取其外观外壳作为加工目标模型，如图2所示。模型采用1:1比例，整体尺寸为3 800 mm（长）×1 400 mm（宽）×1 830 mm（高）。该模型包含典型的汽车曲面特征：发动机舱盖（曲率半径 $R=200\sim 300$ mm）、车顶（ $R=176\sim 500$ mm）、侧围腰线（ $R=1\ 200\sim 1\ 700$ mm）、轮拱（ $R=120\sim 600$ mm），对刀具可达性和刀轴控制提出了较高要求。

2.2 CAM工艺规划

基于预处理后的3D模型，开展CAM工艺规划，核心内容包括加工阶段划分、装夹方案设计与刀路策略制定。其中，加工阶段划分为粗加工、半精加工、精加工三个阶段，采用“由粗到精、



图2 加工目标汽车外观模型三维图像

Fig.2 3D image of exterior model for processed target vehicle

逐步逼近”的原则，确保加工精度与效率的平衡^[1]。

2.3 刀路策略制定与刀轴矢量控制

刀路策略的优化是实现复杂曲面高精度加工的核心，结合HDF的材料特性与模型的曲面特征，重点解决刀具干涉、表面质量不均等问题。针对不同加工阶段制定差异化刀路策略：

(1) 粗加工：采用自适应动态铣削策略。该策略通过实时分析材料残留情况，动态调整刀轨的步距与切深，保持恒定的切削负载，既能提高材料去除效率，又能有效保护刀具。粗加工目标为快速去除大部分多余材料，保留0.8 mm半精加工余量，自适应模式进给方式，避免突然的方向变化导致的切削力波动，因其可保持刀具连续切削，减少空行程。

(2) 半精加工：采用3+2定轴加工和五轴联动结合策略，沿模型等高线生成刀路，去除粗加工后的台阶状材料，保留0.3 mm精加工余量。

(3) 精加工：采用五轴联动策略，使刀具在曲面切削时进行±5°的微幅摆动，如图3所示，有效打破周期性进给痕迹。为实现高质量的刀轴控制，需提出一种基于曲率自适应的刀轴矢量控制算法。

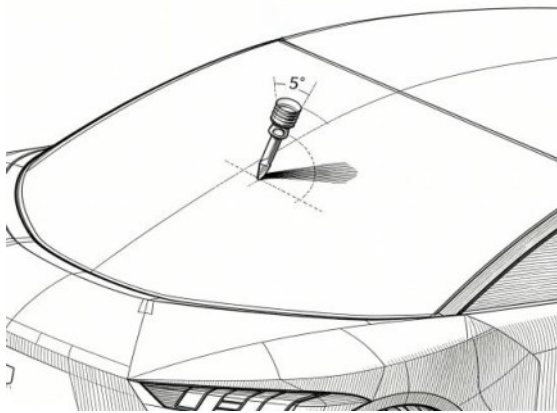


图3 刀具在曲面切削过程中微幅摆动示意图

Fig.3 Schematic diagram of slight tool swing during curved surface cutting

2.4 基于曲率自适应的刀轴矢量控制算法

刀轴矢量控制是实现复杂曲面高质量加工的关键。算法核心思想是：根据加工曲面各区域的曲率变化，动态调整刀具轴线方向，使刀轴矢量在曲率变化大的区域平滑过渡，避免突变，从而提高加工表面质量和机床运动稳定性。

(1) 算法数学模型

在五轴数控加工中，刀轴矢量通常由两个角度定义，前倾角 λ —刀具轴线与曲面法矢在进给方向的夹角；侧倾角 θ —刀具轴线绕曲面法矢的旋转角，如图4所示。

算法的目标函数为最小化相邻刀轴矢量的变化，同时满足约束条件：

$$\min \sum_{i=1}^n (\mathbf{V}_{i+1} - \mathbf{V}_i)^2$$

约束条件：a. 前倾角 $\lambda \in [3^\circ, 8^\circ]$ ；b. 侧偏角 $\theta \in [0^\circ \pm 5^\circ]$ ；c. 相邻刀位点间刀轴角度变化率 $\leq 0.5^\circ/\text{mm}$ ；d. 无刀具-工件干涉

(2) 算法实现流程

算法完整流程如图5所示，主要包含曲面曲率

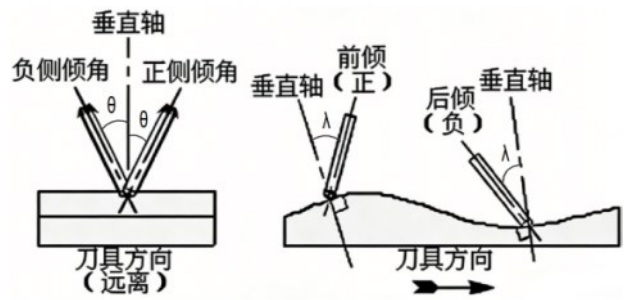


图4 角度定义示意图

Fig.4 Schematic diagram of angle definition

分析、区域划分、刀轴矢量规划和光顺优化四个模块。

首先通过计算曲面各点的高斯曲率 K 和平均曲率 H ，识别不同几何特征区域（平坦区、凹面区、凸面区、双曲点区），如图6所示。然后根据曲率半径 ρ 建立前倾角 λ 的映射函数：

$$\lambda(\rho) = \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \times \frac{\rho_{\max} - \rho}{\rho_{\max} - \rho_{\min}}$$

其中 $\lambda_{\min}=3^\circ$ ， $\lambda_{\max}=8^\circ$ ， ρ_{\min} 和 ρ_{\max} 为曲面最小和最大曲率半径。该函数确保曲率大的区域（小 ρ ）采用大前倾角以避免干涉，曲率小的区域（大 ρ ）采用小前倾角以提高效率。

在生成初始刀轴矢量后，检测相邻刀位点的刀轴变化率 $\Delta\lambda$ 。若 $\Delta\lambda$ 超过阈值 5° ，则采用三次B样条插值或四元数插值对刀轴序列进行光顺处理，确保刀轴矢量平滑过渡。优化前刀轴突变，优化后平滑过渡，验证表明，采用本算法后，刀轴矢量变化率控制在0.05以内，优于常规五轴加工的 $0.08^{[10]}$ ，有效提升了曲面过渡区的加工质量。

2.5 仿真加工验证

为确保加工过程的安全性及可靠性，先利用Vericut仿真软件开展全过程仿真验证。内容包括：机床运动仿真各轴的运动轨迹，检查是否存在轴行程超限、运动干涉等问题、材料去除仿真和碰撞检查^[11-12]。重点检查刀具、刀柄与工件、夹具之间的碰撞风险，确保加工过程安全，仿真过程中若发生碰撞，系统会以红色标识并记录日志，如图7。优化后的刀路经再次仿真验证，无干涉、过切等问题，满足加工要求，最终仿真成果如图7所示。

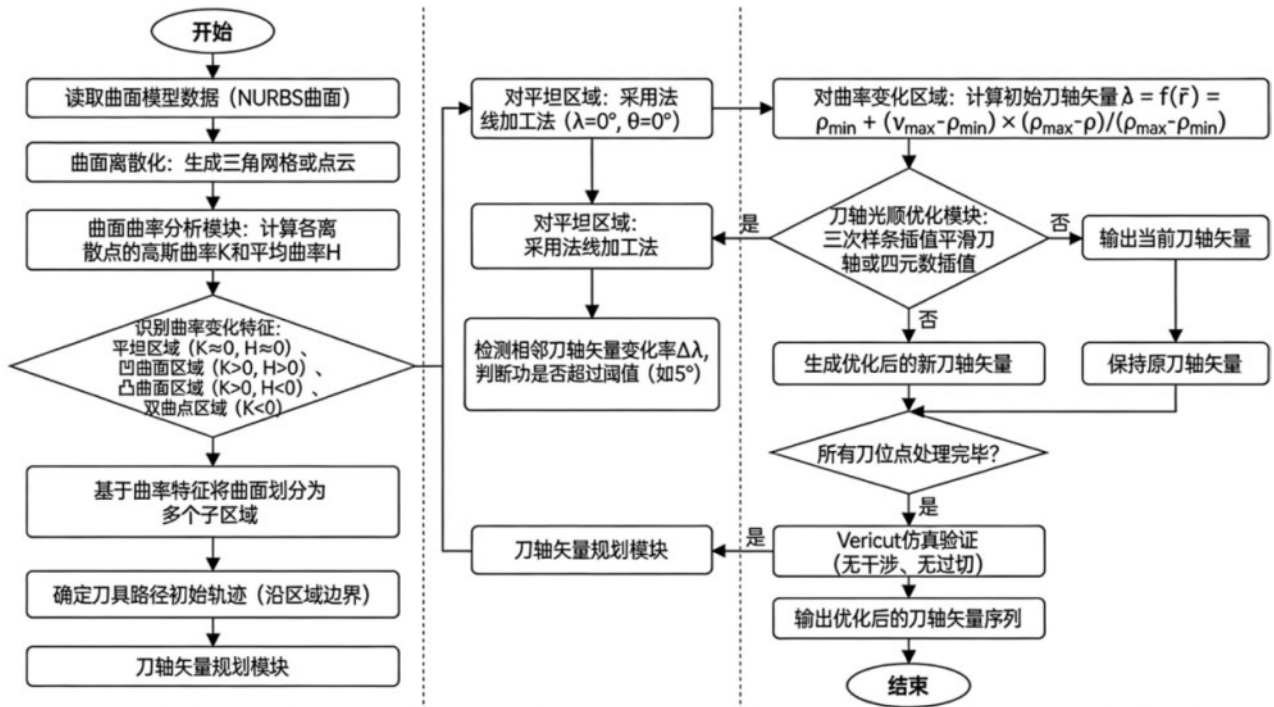


图5 基于曲率自适应的刀轴矢量控制算法流程图

Fig.5 Flowchart of tool axis vector control algorithm based on curvature adaptation

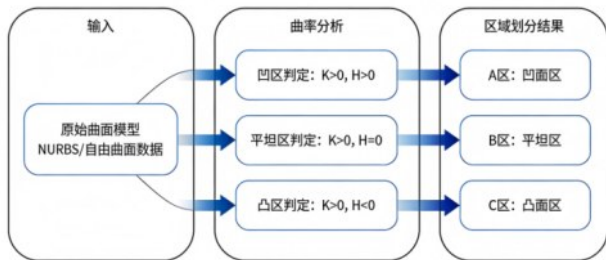


图6 外观模型曲面区域划分示意图

Fig.6 Schematic diagram of surface region division for exterior model

3 基于HDP的材料-工艺-加工耦合调控体系构建

3.1 耦合调控体系概念模型的提出

汽车外观模型的一体化加工应充分考虑木质材料的特性开展。本文基于HDF材料特性构建材料-工艺-加工耦合调控体系进行加工参数的迭代优化。通过系统表征材料性能，建立与工艺参数的定量关系，并采用针对性加工策略，形成闭环调控，最终实现高精度加工。基于HDP的材料-工艺-加工耦合调控体系如图8所示，包含材料维度、工艺参数、加工策略和耦合调控核心四个部分。以HDF材料本征性能为基准约束，以工艺参数为核心调控变量，以加工策略为实施保障，三者围绕

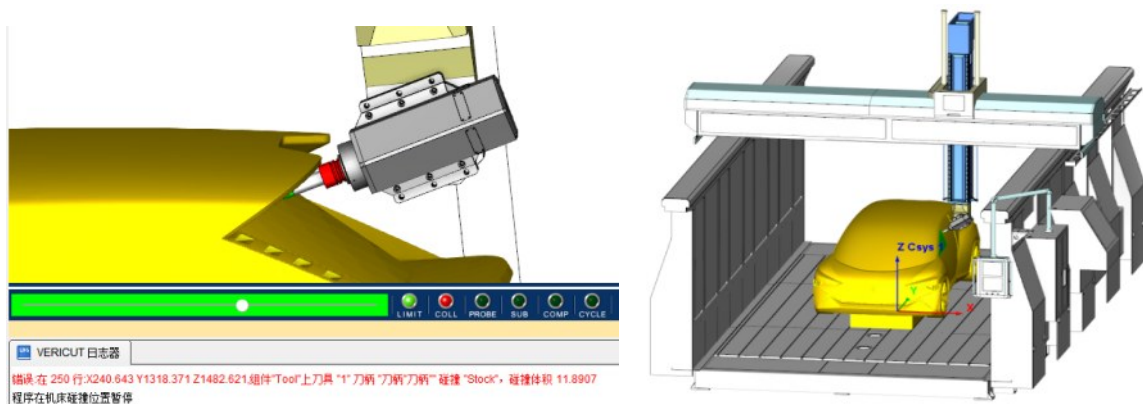


图7 仿真碰撞及仿真加工示意图

Fig.7 Schematic diagram of simulated collision and simulation machining

高精度加工目标形成闭环迭代。其中，材料维度决定了工艺参数的可行边界，是体系的基础前提；工艺参数是直接作用于材料的调控手段，需在材料性能允许范围内优化；加工策略是对工艺参数的补充与强化，用于降低切削振动、减少材料变

形。体系以最终加工效果为反馈，反向修正“材料-工艺匹配关系”与“工艺-加工协同方案”，实现“材料约束→工艺调控→策略补偿→效果验证→迭代优化”的完整闭环，三者相互影响，形成迭代优化。

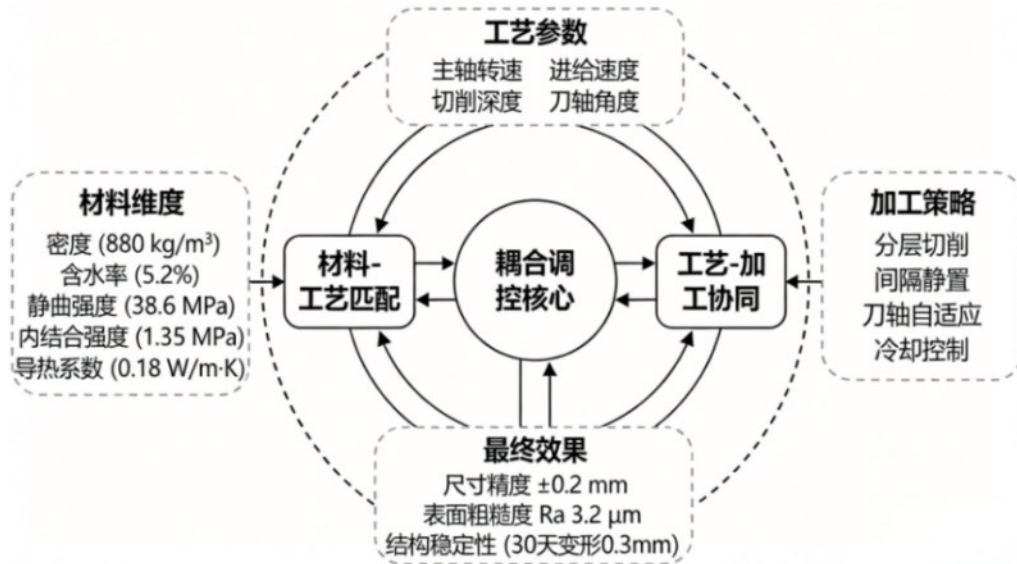


图8 基于HDF材料特性的材料-工艺-加工耦合调控体系

Fig.8 Material-process-processing coupling control system based on the characteristics of HDF materials

3.2 材料性能与切削参数的对应关系

以材料实测性能为约束边界，结合多组预切削试验与木质复合材料高速切削工艺经验综合确定。如密度越高，粗加工需用较低转速以保证切削稳定性；内结合强度越高，精加工可采用更高进给速度。整套工艺参数迭代遵循“材料实测约

束→车顶、机盖、轮拱、腰线四类典型曲面小样正交试切→刀轴参数协同优化→仿真校验→整车实体终验证”闭环流程。通过试切验证、指标评价与参数迭代，形成适用于该批次HDF的五轴加工参数匹配方案，材料性能与切削参数的对应关系如表1所示。

表1 HDF材料性能与切削工艺参数对应关系

Tab.1 Correlation between HDF material properties and cutting process parameters

材料性能	数值	对应工艺参数优化
密度	880 kg/m ³	粗加工转速:12 000 rpm; 精加工转速:18 000 rpm
含水率	5.2%	控制切削热,温度超45°C降速
静曲强度	38.6 MPa	粗加工进给:6 000 mm/min; 切深:3~5 mm
内结合强度	1.35 MPa	精加工进给:3 000 mm/min; 切深:≤0.5 mm
导热系数	0.18 W/m·K	开启高压气冷(8~10 bar)
吸水率	8.5%	环境湿度控制50%,避免长时间暴露

3.3 基于材料-工艺映射关系的加工策略

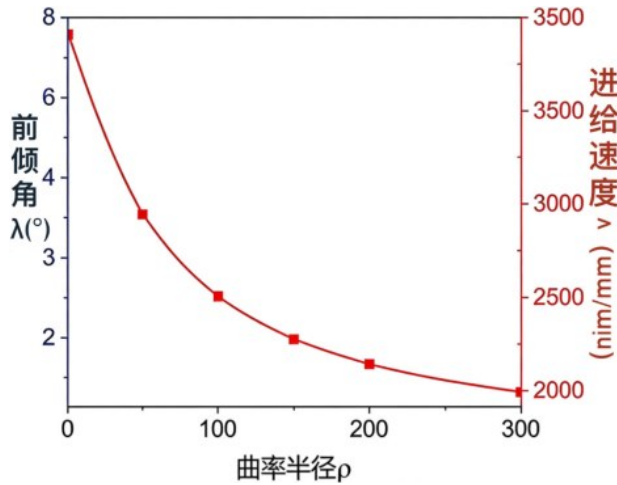
①分层切削策略：粗加工采用大切深（ $a_p=5$ mm）快速去除余量，半精加工减小切深（ $a_p=3$ mm）以均匀化余量，精加工采用微切深（ $a_p \leq 0.5$

mm）保证表面质量。

②间隔静置工艺：为释放切削应力，每完成50%材料去除量暂停加工15分钟，时序安排如图9所示。



a 间隔静置时序图



b 前倾角与切削参数协同调控曲线

图9 基于材料-工艺映射关系的加工策略

Fig.9 Processing strategies based on the material-process mapping relationship

③刀轴自适应与切削参数的协同：在曲率大的区域自动增大前倾角至 8° ，同时降低进给速度10%，以补偿切削力波动，如图14所示

4 外观模型加工与质量评估

4.1 外观模型加工

仿真加工验证成功之后，基于 HDF 的原料性能，将仿真优化后的刀路参数生成符合五轴加工中心要求的 G 代码，确保切削参数与 HDF 的切削特性匹配，随后开展实时加工，为保障加工质量与过程稳定性，实施关键控制措施：

(1) 切屑与温度控制：全程开启高压气冷系统，气压稳定在 8-10bar，确保切削区域的木质粉尘快速排出，避免粉尘堆积导致的表面划伤与刀具堵塞；同时借助机床主轴温度监控系统，实时监测主轴温度，当温度超过 45°C 时自动降低进给速度 10%，防止刀具过热磨损及材料热变形。

(2) 内应力释放控制：除半精加工后 60min 静置外，在板材预处理阶段，将 HDF 板材置于 25°C 、湿度 50% 的恒温恒湿环境中静置 2880min，提前释

放材料自身内应力；加工过程中采用“分层切削+间隔静置”模式，粗加工每完成 50% 材料去除量，暂停加工 15min，减少切削应力累积。

外观模型如图 15 所示。



图10 五轴联动加工的木质汽车外观模型一体化成型加工
Fig.10 Integrated molding processing site for exterior model of wooden auto using five-axis coordinated machining

4.2 质量评估与分析

4.2.1 几何精度

120 个检测点中，95% 以上的点云偏差（点云数据与真实模型或目标点云之间存在的位置、姿态等方面的差异）控制在 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 内。偏差主要集中在深幅轮拱与腰线转折处，分析原因是该区域曲面曲率变化大，刀具切削角度调整频繁，导致局部切削力轻微波动。刀轴矢量控制效果通过表面纹理检测进行验证。采用自适应刀轴控制策略的区域，表面纹理方向一致性好，无明显刀痕突变；而固定刀轴角度加工的区域，在曲率变化处出现明显的刀痕转折。这表明刀轴矢量的平滑控制有效提升了曲面过渡区域的光顺性，与吕玉等的研究结论一致^[10]。

4.2.2 表面质量评估结果

精加工后模型表面 Ra 值为 $3.2 \mu\text{m}$ ，表面无明显

显砂纸划痕、粉尘残留等缺陷, 触感平滑, 曲面过渡自然, 符合表面质量要求。这一结果得益于五轴联动加工中刀轴微幅摆动策略, 有效打破了周期性进给痕迹, 同时高压气冷系统确保了切削区域的清洁度。

4.2.3 结构稳定性评估结果

模型关键尺寸的最大变化量仅为0.3 mm, 尺寸稳定性优异, 这得益于HDF材料低含水率与加工过程中的内应力释放控制。抗冲击测试后, 模型冲击区域无破损、变形, 仅出现轻微底漆划痕, 表明模型具备足够的结构刚性。可满足设计评审、展示等应用场景的使用需求。

5 应用价值与行业适配性讨论

5.1 加工效率与成本分析

加工周期统计显示, 从装夹校准到成品交付, 整体加工周期为2 700 min, 其中粗加工720 min、半精加工480 min、精加工900 min、后处理600 min, 较传统实木分段加工缩短30%以上, 较油泥模型单版本制作周期缩短60%以上^[13]。

成本核算结果表明, 该方案材料与加工综合成本, 仅为油泥模型的1/3, 为3D打印树脂模型的2/5^[6-7], 具备显著的成本优势。这一效率与成本优势, 契合了中小车企与初创设计团队研发预算有限、迭代速度快的核心需求。

从行业需求来看, 当前中小车企与初创设计团队面临着研发预算有限、产品迭代速度快的核心痛点, 而大型车企也在推动设计流程的绿色化转型。因此, 提出的木质汽车五轴加工模型方案恰好契合这些需求: 在成本层面, 综合成本低于油泥模型、3D打印树脂模型, 批量制作时成本优势更显著, 极大降低了中小主体的设计验证门槛; 在效率层面, 2 700 min/件的加工周期较传统实木加工缩短30%以上, 可实现1~2周内完成3~5个版本的批量验证, 适配快速迭代的设计需求^[2-3]; 在环保层面, E1级环保材料与≥90%的回收率, 符合汽车产业绿色制造的发展趋势, 可替代油泥等不可回收材料, 减少环境负担。

5.2 应用场景

从应用场景来看, 木质汽车五轴加工模型也

可在以下场景使用: (1) 制造中期评审, 在制造中期, 汽车模型需精准传递数字设计的曲面特征 (2) 多方案对比, 支持多方案的快速对比, 木质汽车模型的高精度与低成本特性可完美适配; (3) 院校教学, 技能培训中, 其可回收性与加工安全性, 结合数字化工艺链的可追溯性, 能有效提升学生对“数字-物理”协同设计与制造的理解, 适配工程教育实践需求。

在设计后期定型、概念车精修等场景, 油泥模型的手工修改灵活性仍具备优势, 因此木质模型并非替代油泥模型, 而是形成互补, 完善汽车设计原型体系。

5.2 场景适配性对比

为明确HDF五轴加工模型的应用定位, 将其与传统油泥模型、3D打印树脂模型从加工效率、精度、成本、环保性、应用场景等维度进行对比, 如表3所示。对比结果表明, 木质汽车五轴加工模型在加工效率、成本控制、环保性与尺寸稳定性上具备显著优势, 尤其适配设计中期多方案快速迭代、批量验证的需求; 而油泥模型更适用于后期造型精修, 二者可形成互补, 共同支撑“数字-物理”混合原型体系的构建。

6 结论

针对汽车设计验证对高效、低成本、高稳定性原型的需求, 创新性地将高密度纤维板与五轴联动数控加工技术相结合, 开发了一套完整的木质汽车外观模型一体化成型技术解决方案。

(1) 通过工艺规划、刀路策略制定与刀轴矢量控制、基于曲率自适应的刀轴矢量控制算法、仿真验证四个环节, 构建了适配HDF材料特性的数字化工艺链,

(2) 通过系统表征HDF的密度、静曲强度、内结合强度等关键性能, 构建了材料性能与切削参数的定量映射关系, 配套制定分层切削、间隔静置、高压气冷等针对性加工策略, 形成“材料约束→工艺调控→策略补偿→效果验证→迭代优化”的闭环调控机制, 构建了基于HDF“材料-工艺-加工”耦合调控体系, 实现了复杂曲面汽车模型的一体化加工。

表3 与传统油泥汽车模型方案核心特性对比

Tab.3 Comparison of core characteristics with traditional oil clay car model scheme

对比维度	木质汽车模型 (HDF 基材, 五轴数控加工)	油泥汽车模型 (工业油泥, 手工精修)	3D 打印树脂模型 (光固化/SLA, 光敏树脂)
核心适用阶段	汽车造型初期验证、快速原型开发、批量方案对比; 风洞试验基础模型; 院校教学/技能实训	汽车造型精细化打磨、曲面最终定型; 高端车型/概念车造型评审; 设计师创意实时调整	小尺寸细节验证、功能样件试制、局部结构验证; 内饰/零部件快速成型
开发周期需求	适配“快速迭代”场景(1~2周完成3~5个版本模型)	适配“精细化打磨”场景(1~2个月逐步优化1个版本模型)	适配“小批量快速试制”场景(3~7天完成1~2个局部模型)
造型修改需求	适合“少修改/一次性定型”方案, 修改需重新编程加工, 成本高(约为初始加工的50%)	适合“多次调整/实时优化”方案, 手工刮擦调整, 无额外材料成本	适合“局部修改”方案, 需重新切片打印, 修改成本约为初始的30%
精度水平	轮廓误差 $\leq 0.1\text{mm}$ (最优)/ $\leq 0.2\text{mm}$ (常规), 满足曲面基础验证	曲面平顺度误差 $\leq 0.1\text{mm}$ (手工精修), 几何尺寸误差 $\pm 0.3\text{mm}$	尺寸精度 $\pm 0.1\text{mm}$, 细节分辨率高(最小特征 0.2mm), 适合复杂结构
成本控制目标	材料+加工成本为油泥模型的1/3~1/2 (HDF 单价约80元/□, 工业油泥约200元/□)	材料+人工成本高(人工成本占比60%, 需5年以上经验雕刻师)	材料成本高(光敏树脂约200~300元/kg), 小批量场景成本为HDF模型的2~3倍
环保与保存需求	可长期保存(干燥环境下5年无明显变形), 废弃材料回收率 $\geq 90\%$, 符合E1级环保标准	短期使用(温度 $> 30^\circ\text{C}$ 易软化), 须恒温($18\sim 25^\circ\text{C}$)干燥保存, 不可回收, 无环保污染	光敏树脂不可降解, 废弃模型需专业处理; 常温避光可保存1~2年, 易黄变
应用主体	中小车企、初创设计团队、院校、技能培训基地	大型车企设计中心、高端造型工作室、概念车研发团队	零部件研发部门、创新设计工作室、小批量功能验证场景
配套条件需求	需五轴联动加工中心、木材干燥处理设备(含水率控制4%~6%); 无需专用保存环境	需专业雕刻师、油泥加热/塑形工具(温度控制 $50\sim 60^\circ\text{C}$); 恒温保存空间	需光固化3D打印机、后处理设备(清洗/固化); 对模型尺寸有上限限制(通常 $< 1\text{m}$)

(3) 评估了木质汽车外观模型五轴加工的质量、效率、成本。通过对比木质汽车模型、油泥汽车模型、3D 打印树脂模型三种方案的差异, 明确了木质汽车外观模型在汽车设计流程中的应用定位。

该技术方案“整体减材制造”的逻辑与汽车工业一体化设计理念高度契合, 可精准、高效地通过数字设计制造可用于中期评审、多方案对比及初步空气动力学评估的刚性实体原型, 解决中小车企、设计机构或实训教学提供了低成本、短周期、高保真的刚性原型方案。不仅为汽车设计前端验证提供了创新的技术路径, 也为木质复合材料在高端智能制造领域的跨学科应用提供了重要实践参考。

参考文献:

- 朱学斌, 张军伟, 孙博华, 等. 汽车整车正向设计技术发展展望[J]. 前瞻科技, 2025.
ZHU X B, ZHANG J W, SUN B H, et al. Development and prospect of vehicle forward design technology[J]. Frontier Science and Technology, 2025.
- 潘体湃. 机械加工汽车产品质量工艺优化策略的研究[J]. 汽车维修技师, 2025(14): 103-105.
PAN T P. Research on quality process optimization strategy of machined automobile products[J]. Automobile Maintenance Technician, 2025(14): 103-105.
- 秦学林. 汽车油泥模型在风洞测试中的应用研究[J]. 大众汽车,

2025(07): 58-60.

QIN X L. Application research of automobile clay model in wind tunnel test[J]. Auto Popular, 2025(07): 58-60.

- 谢杨. 浅谈汽车油泥模型曲面质量检查及优化[J]. 时代汽车, 2023(11): 107-109.
XIE Y. Discussion on surface quality inspection and optimization of automobile clay model[J]. Auto Time, 2023(11): 107-109.
- 郭上清. 汽车外饰油泥模型制作工艺的优化[J]. 汽车零部件, 2020(07): 19-22.
GUO S Q. Optimization of manufacturing process for automobile exterior clay model[J]. Automobile Parts, 2020(07): 19-22.
- 陈晓芳. 数控加工技术在汽车轻量化材料加工中的应用[J]. 汽车测试报告, 2024, (21): 86-88.
CHEN X F. Application of CNC machining technology in the processing of automotive lightweight materials [J]. Auto Test Report, 2024, (21): 86-88.
- 闫健卓, 姜缪文, 陈继民, 等. 面向光固化3D打印技术的汽车车身整体化制造及层厚优化[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(4): 551-556+482.
YAN J Z, JIANG M W, CHEN J M, et al. Integral manufacturing and layer thickness optimization of automobile body based on stereolithography 3D printing technology [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(4): 551-556+482.
- 孙鑫淼, 李黎, 刘红光, 等. 国内外木结构数控加工中心产品技术现状与发展[J]. 世界林业研究, 2023, 36(1): 79-84.
SUN X M, LI L, LIU H G, et al. Present situation and development of domestic and foreign CNC machining centers for wood structures [J]. World Forestry Research, 2023, 36(1): 79-84.
- 阮晓伟. 机械自动化加工技术在汽车制造行业中的应用[J]. 汽车知识, 2024, 24(11): 125-127.
RUAN X W. Application of mechanical automatic processing technology in automobile manufacturing industry[J]. Auto Knowledge, 2024, 24(11): 125-127.
- 吕玉, 辜桂香, 聂江勇. 面向五轴数控加工刀轴运动控制的平滑控制算法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(12): 85-88.

- LYU Y, GU G X, NIE J Y. Research on smooth control algorithm for tool axis motion control in five-axis NC machining[J]. Automation & Instrumentation, 2023(12): 85-88.
- [11] 叶龙. 基于五轴数控加工工艺的复杂曲面零件加工轨迹分析[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(03): 192-194.
- YE L. Machining trajectory analysis of complex surface parts based on five-axis NC machining technology[J]. Modern Manufacturing Technology & Equipment, 2024, 60(03): 192-194. [14]SunZ, WuT, ZuoX, et al. An improved genetic algorithm for dynamic matching of five-axis probe orientation in measurement path planning[J]. Measurement, 2026, 257(PA).
- [12] 王海宾. 基于数字孪生的复杂曲面零件五轴数控加工过程仿真与优化研究[J]. 互联网周刊, 2025(18): 31-33.
- WANG H B. Research on simulation and optimization of five-axis NC machining process of complex surface parts based on digital twin[J]. China Internet Weekly, 2025(18): 31-33.
- [13] 秦学林. 汽车油泥模型在风洞测试中的应用研究[J]. 大众汽车, 2025, (7):58-60.
- QIN X L. Research on application of automobile clay model in wind tunnel test [J]. Popular Automobile, 2025, (7): 58-60.