arXiv:2603.03504v1 [cs.CE] 3 Mar 2026

FusionCut：基于边界表示（B-Rep）且云就绪的虚拟加工刀具-工件啮合*

H.SinanBank †科罗拉多州
立大学系统工程系，美国柯林斯堡
sinan.bank@colostate.edu

N. Bircan Bugdayci
密歇根州立大学机械工程系，美国
东兰辛 bugdayci@msu.edu

摘要

刀具-工件啮合（CWE）是刀具与加工中工件之间瞬时的接触几何，在加工过程仿真中发挥着基础性作用，并直接影响切削力和过程稳定性的预测。CWE 判定的难点和挑战在于几何形状持续变化且十分复杂，尤其是在多轴铣削中。为了满足通用性要求——适用于任何刀具类型、工件形状或刀具路径——研究界主要沿着两条路径开展研究：几何精确实体建模和近似离散建模。前者虽然精确，却受限于对专有且无法访问的软件的依赖，阻碍了研究的可复现性与协作。后者则以牺牲几何保真度为代价换取算法通用性，往往导致计算权衡。

本文提出了一个名为 FusionCut 的框架，该框架利用易于获取的现代 CAD/CAM平台 Autodesk Fusion 360 的边界表示（B-Rep）实体建模内核；该平台可免费用于教育和非商业用途。我们的目标是为边界表示方法提供一个可复现的框架，同时质疑一种普遍看法：通用应用必须采用三角形网格等离散方法。通过提供易于获取的实现，并使用公开可用的模型和实验对其进行测试，我们旨在为高保真虚拟加工中计算上可行、科学上必要的内容确立基准。FusionCut 为先进加工仿真的普及提供了一条途径，有助于推动数字化制造领域形成更加开放、进步的科学生态系统。

关键词 刀具-工件啮合（CWE）· 虚拟加工 · 边界表示实体建模 · 计算机辅助设计与制造 ·可复现研究

1 引言

高保真仿真是现代数字化制造的基石，能够创建“数字孪生”，在实际切削开始之前预测并优化物理过程 [1]。虚拟加工的核心是对加工过程进行几何建模，其中准确确定刀具-工件啮合（CWE）——即刀具与工件之间瞬时接触几何——至关重要。CWE计算的质量直接决定了下游物理模型的保真度，这些模型用于预测切削力、颤振稳定性和热效应。在这一基础环节出现误差或效率低下，都会损害整个预测链条。

CWE 建模的核心挑战，本质上是一个几何计算表示问题：刀具与工件的形态持续变化，多轴铣削时尤为如此。为了满足

*引用：**H.S. Bank，N.B. Bugdayci**。《**FusionCut：基于边界表示且云就绪的虚拟加工CWE**》。**2026年IISE年度会议论文集**。

†通讯作者：sinan.bank@colostate.edu

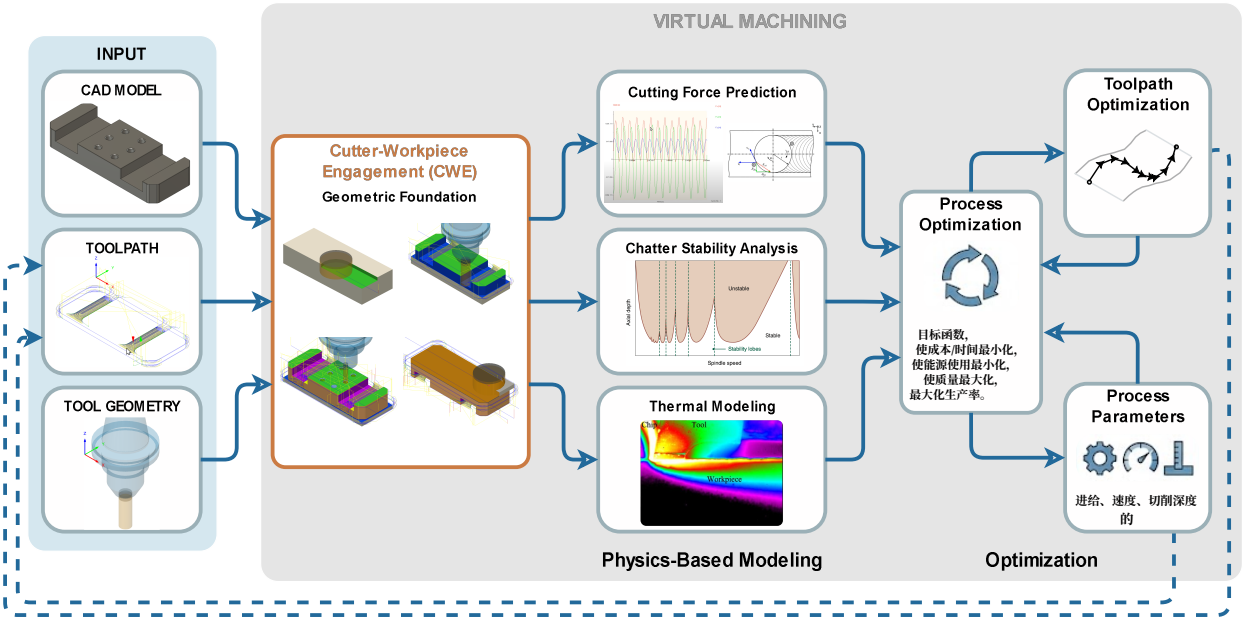


图 1：虚拟加工工作流程以及切削-工件啮合（CWE）的 rol e.

通用性要求——适用于任何刀具类型、工件形状或刀具路径——研究界主要探索了两种途径：几何精确实体建模和近似离散建模。然而，该领域一直受制于几何精度与易用性之间的根本性权衡，造成了关键的研究缺口，阻碍了虚拟加工领域的可复现研究与协作发展。

本文介绍 FusionCut，以解决这一长期存在的僵局。通过利用 Autodesk Fusion 360 的应用程序接口，我们旨在普及基于 B-Rep 的切削工件包络仿真的获取途径，并质疑近似的必要性。该方法表明，商用级实体建模内核可以有效地用于研究，从而建立一个完全可复现且透明的基准 [2]。为确保端到端的完全可复现性，所有验证均使用公开可用的标准化模型和制造输入进行 [3]。通过将易于获取的工具与开放数据相结合，我们为虚拟加工研究的未来奠定了坚实基础，促进更加开放的科学生态系统，并为数字化制造中的基于模型的系统工程提供基础工具。

2 相关工作

多轴铣削中刀具-工件啮合的确定已通过两种根本不同的方法途径加以解决，二者各有明显的优势与局限。第一种方法基于边界表示（B-Rep）实体建模，将几何形状表示为数学上精确的实体，并采用布尔运算，通过从工件中减去刀具的扫掠体来模拟材料去除 [4]。该方法通常使用 Parasolid 等商用几何内核实现，可提供无与伦比的几何保真度，并被广泛视为衡量所有其他 CWE 方法的“基准真值”基准 [5]。实体建模器方法对复杂几何形状表现出更高的精度，尤其是在需要精确啮合角计算以进行切削力预测和颤振稳定性分析的应用中 [6, 7]。然而，该方法论中最强大的实现历来是在专有的闭源系统中开发的，从而对可复现性、验证以及协作研究进展造成了重大障碍。

针对实体建模方法在可访问性方面的局限，研究界开发了多种离散近似方法，包括基于体素的表示、Z 缓冲方法、dexel 和 tri-dexel 场方法，以及基于三角网格的技术 [8]。这些离散方法具有多项实用优势：无需专有几何内核，便可利用开源几何库实现；适用于面向对象软件架构；并且非常适合通过 GPU 并行化利用现代硬件加速 [9]。然而，这些方法固有地以牺牲几何精确性来换取计算效率。这类表示的离散特性会引入近似误差，包括曲面上的阶梯效应、切削接触角随分辨率变化而产生的波动，以及因离散化伪影而可能对接触区域产生的误判

。这些几何误差可能会传递至下游物理模型，降低切削力预测和工艺稳定性分析的准确性，尤其是在薄壁加工或航空航天零部件制造等要求高精度的应用中。

因此，该领域一直面临一个根本性的权衡：要么采用实体建模方法追求几何上的完美，但这类方法对于更广泛的研究群体而言仍基本难以使用；要么接受离散方法带来的几何近似，以优先保证计算效率和算法通用性。这种两难局面凸显了文献中的一个空白：缺少一个通用且易于使用的平台，能够在实现高保真切削-工件啮合仿真的同时，兼具边界表示方法的几何精度，以及协作式科学发展所需的可复现性与透明度。这一空白与长期以来关于建立统一“建模学科” [10] 以及构建于权威几何基础 [11]之上的集成系统的呼吁背道而驰。本研究通过推出 FusionCut 来弥补这一空白。FusionCut 是一个利用现代 CAD/CAM平台易于使用的应用程序接口，实现基于边界表示的 CWE 计算，并确保完全可复现和透明的框架。

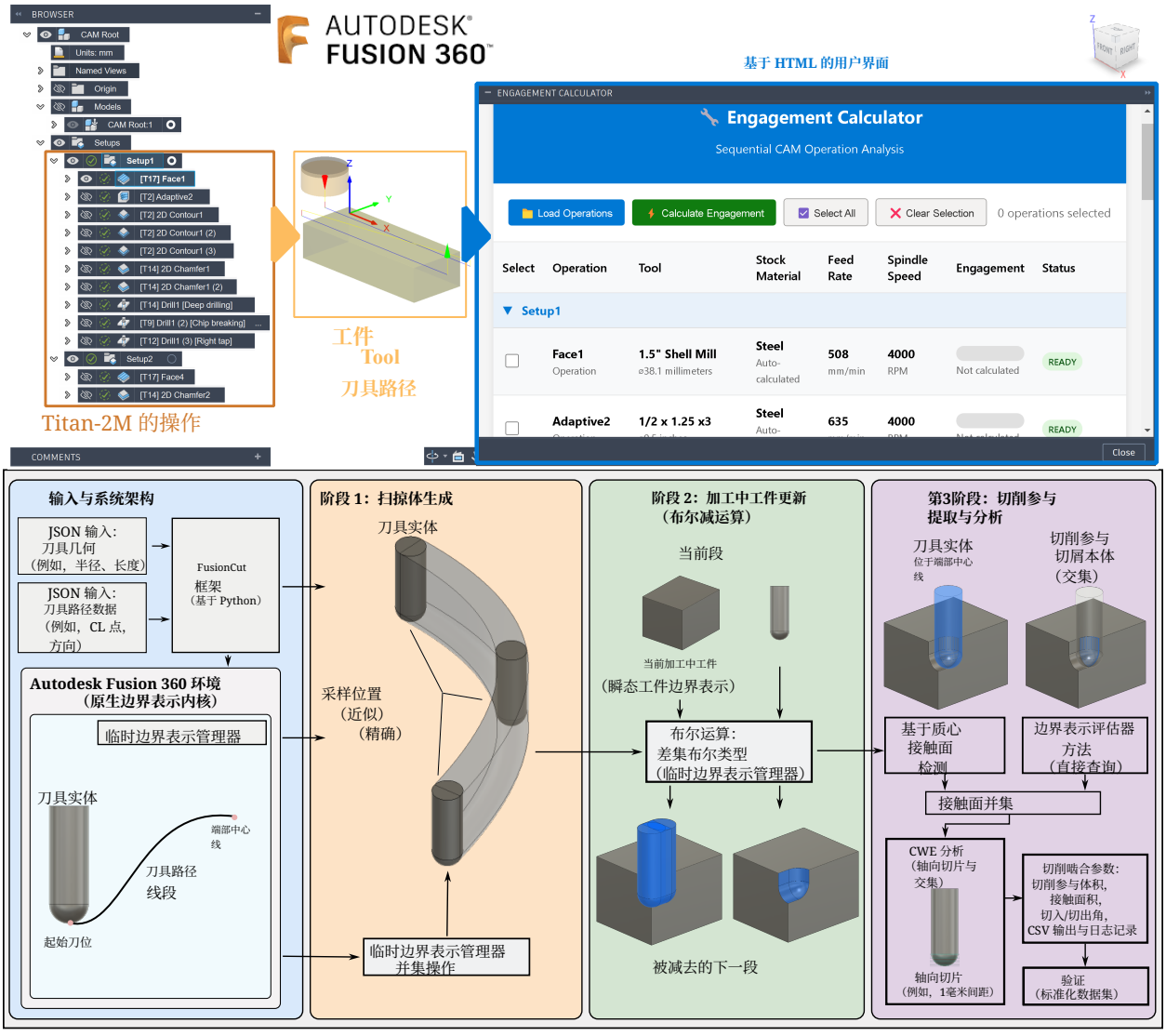


图2：FusionCut云就绪前后端框架架构。

3 方法

FusionCut 是一个基于 Python 的框架，它利用 Autodesk Fusion 360 应用程序接口（API）执行基于边界表示的 CWE 计算。该框架完全运行于 Fusion 360 环境中，所有实体建模操作均使用平台原生的几何建模内核。系统接受 JSON格式的刀具几何定义和刀具路径数据，沿刀具路径依次处理各刀具位置，并输出每个刀位点的切削啮合参数，包括切削参与体积、接触面积和切削接触角。这种方法在架构上的主要优势是直接使用 CAD/CAM平台所采用的同一边界表示几何建模内核，从而确保几何一致性，并免去对外部几何库的需求。

核心 CWE 计算算法针对每对相邻刀具位置之间的每个刀具路径线段，按三个阶段执行。第一阶段为扫掠体生成：框架在内存中创建一个临时边界表示实体，用于表示刀具从一个刀具位置移动到下一个刀具位置时形成的材料去除包络。实现采用精确的采样策略，将刀具实体置于沿路径线段分布的多个中间位置；采样密度由刀具半径决定，以确保覆盖完整且没有间隙。随后，使用 Fusion 360 TemporaryBRepManager 将所有采样得到的刀具位置合并，生成一个连续的扫掠体实体，准确表示刀具的运动包络。

第二阶段为加工中工件（IPW）更新：通过布尔减运算从当前工件状态中去除扫掠体。框架维护一个临时边界表示体，以表示仿真过程中不断变化的工件几何形状。在每个刀具路径线段处，使用 TemporaryBRepManager 的 booleanOperation 方法和 DifferenceBooleanType，从该临时工件中减去扫掠体，从而生成更新后的 IPW，反映当前段的材料去除情况。随后将更新后的工件状态用作下一线段的输入，从而依次处理整个刀具路径，同时通过精确的边界表示运算保持几何精度。

第三阶段，即啮合提取与分析，确定每个线段末端刀位处的瞬时 CWE。该框架首先计算位于末端刀位的刀具实体与更新后的加工中工件之间的交集，生成一个啮合切屑体，用以表示与刀具接触的材料。接触面检测采用两种互补的方法：基于质心的方法用于识别质心位于刀具表面上的面；边界表示评估器方法则直接查询面几何，以判断其是否与刀具实体接触。合并两种方法识别出的面，可确保全面检测接触面。随后，CWE 分析通过对接触几何进行轴向切片来提取啮合参数。框架创建一系列垂直于刀具轴线的平面，并按可配置的间隔（例如，1毫米和0.2毫米）排列；再将这些平面与接触面求交，以确定每个轴向高度处的切入角和切出角。这种切片方法能够生成完整的啮合轮廓，包括总接触面积、啮合体积和角度啮合边界，可直接用于切削力预测模型。

为确保结果可复现且过程透明，所有验证测试案例均采用 Titans of CNC Academy [3], 公开提供的制造数据集，该平台提供开放访问的 CAD模型和刀具路径数据。所有输入数据文件，包括刀具定义、刀具路径和毛坯几何形状，均由云就绪前端（如图2所示）以 JSON格式提供，从而确保模拟结果完全可复现。该框架会输出全面的 CSV文件，其中包含每个刀位的 CWE参数，并详细记录所有几何运算，以便完整追溯计算过程。所有实验均在配备 NVIDIA RTX 4090 Mobile GPU 的系统上使用 Autodesk Fusion 360（版本 2605.1.52）进行，处理期间内存占用为 2–4 GB，GPU 利用率为 5–15%。完整的实现和验证数据集[2] 均已公开，以确保完全可复现。

4 结果与讨论

表1展示了 FusionCut 在两个轴向采样间隔（1毫米和0.2毫米）下各测试用例的计算性能指标。表中报告了计划的刀具位置数量（# of CLs），以及用于计算分段平均计时的已处理刀位段数量（# of Proc. CLs）。对于 Titan-2M Setup 1，FusionCut 在1毫米采样下每个已处理刀位段的平均耗时为168.37–346.3毫秒，在0.2毫米采样下为373.21–600毫秒；总仿真时间分别为5912.9秒（1毫米）和10,073秒（0.2毫米）。在0.2毫米采样间隔下（与文献对比 [5], 所采用的分辨率一致），二维轮廓运算每个已处理线段的耗时为478.6–600毫秒，与 Boz等人报告的 dexelfield 计时处于同一量级 [5]（2.5轴加工的每个刀位段约为528毫秒——278秒处理527个线段），不过由于几何形状、刀具路径和测量定义存在差异，直接比较仍有局限。值得注意的是，FusionCut 能够成功处理

表 1：FusionCut 在 Titan-2M [3] 上的计算性能（上：1毫米轴向采样；下：0.2毫米轴向采样）。

零件/操作	# 加工刀位数/ # 刀位数	加工仿真总时间（秒）	每段加工刀位平均时间 (ms)
Titan-2M Setup 1	19,460/ 36,695	5912.9 s	303.85 ms
面1	352/ 361	59.1 秒	168.37 毫秒
自适应2	18,320/ 35,097	5,580 秒	304.6 毫秒
二维轮廓1	388/ 451	139 秒	308.89 毫秒
二维等高线1（2）	258/ 535	89 s	346.3 毫秒
二维轮廓1 (3)	142/ 251	45.8 秒	324.82 毫秒
Titan-2M Setup 1	19,460/ 36,695	10,073 s	517.62 ms
面1	352/ 361	131 秒	373.21 毫秒
自适应2	18,320/ 35,097	9,480 秒	517.5 毫秒
二维轮廓1	388/ 451	270 秒	600 毫秒
二维等高线1（2）	258/ 535	123 秒	478.6 毫秒
二维轮廓1 (3)	142/ 251	69 s	489.4 毫秒

复杂的 Adaptive2 刀具路径，其中包含35,097个计划刀位（18,320个已处理刀位段），展现了其扩展能力，可用于需要在大型刀具路径数据集上评估切削参与的工业级刀具路径。尽管当前版本的 FusionCut 性能慢于基于 Parasolid 的实现，但考虑到实现架构不同（Fusion 360 API 与直接访问 Parasolid 内核）、所用编程语言不同（Python 与 C++），以及我们的测试受益于更新、更先进的硬件平台，这一差异是意料之中的。尽管如此，FusionCut 对复杂零件的总仿真时间仍在可控范围内，这表明在易于获取的平台上，高保真度的基于 B-Rep 的切削-工件啮合仿真在计算性能上可与近似离散方法相竞争。

通过对复杂加工操作进行验证，展示了 FusionCut 的几何保真度。图 3 展示了通过 Titan-2M Setup 1 的第一道工序（端面铣削）对 CWE 几何进行验证的多面板可视化结果。图 3(a) 上半部分展示了刀具几何、加工中工件（IPW）以及带有进入/退出线的切削参与线段的 3D 等轴测视图，呈现了刀具与工件之间的瞬时接触几何。图 3(a) 下半部分提供了 2D 俯视图，显示刀具圆周上的啮合角和切削参与段，展示了对 CWE 的精确角度表征。图 3(b) 展示了虚拟加工零件的 3D 视图，并通过放大部分突出显示几何细节。图 3(a) 中所示的切削参与段和角度展示了边界表示（B-Rep）所实现的精确几何表示；这与离散方法所具有的近似误差形成对比，尤其是在涉及复杂自由曲面的应用中 [12]。该可视化结果展示了基于边界表示的方法能够为虚拟加工应用提供几何精确的 CWE 表征。

为进一步验证 FusionCut 切削接触计算的几何精度，我们将计算得到的切削接触角与一项独立解析解进行了比较，该解析解基于三角函数圆-直线相交与圆圆相交计算。图 3(b) 展示了刀位点 138 的这一比较，该情形属于刀具退出毛坯边界的边界情形，从而形成两个不同的切削参与区域。解析模型通过将毛坯建模为矩形来考虑加工中工件的几何形状，其中材料由跑道形刀具扫掠体积从

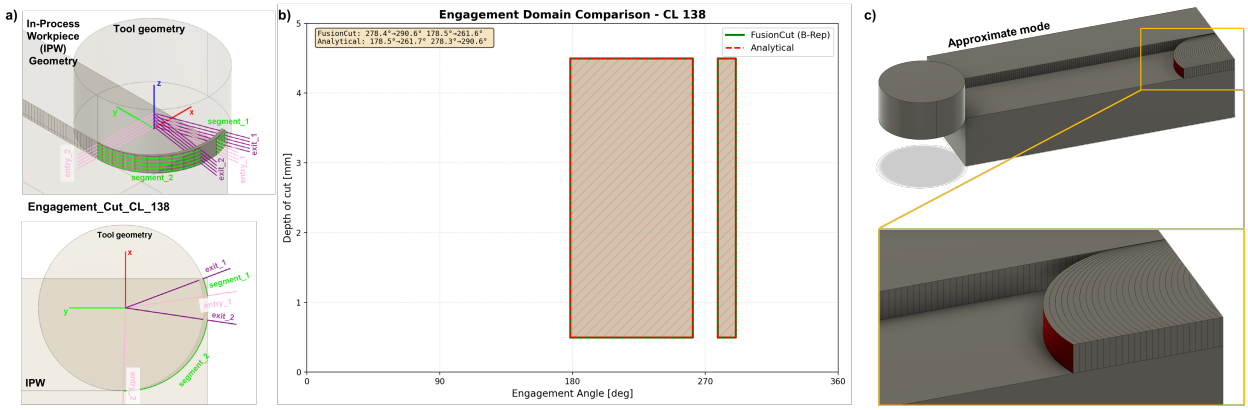


图 3： (a) 3D/2D CWE，(b) 用于解析验证的切削接触域，(c) 虚拟加工的零件 t.

先前刀具位置去除。如图所示，FusionCut 基于边界表示的结果（绿色）与解析解（红色阴影线）高度吻合，角度差异在 0.25° 以内。对于简单的走刀中段情形，一致性在 0.01–0.02° 以内，有效验证了 FusionCut 啮合角提取的三角函数正确性。该解析验证独立地确认了基于边界表示的方法能够产生几何精确的 CWE 表征。

综合计算性能与几何保真度结果的研究发现，FusionCut 在一个易于获取且可复现的平台上，成功以切实可行的计算性能实现了传统边界表示方法的几何保真度。本工作为长期界定该领域的保真度与可及性之间的权衡提供了可行解决方案。精确几何表示与切实计算性能的结合表明，精度与可及性之间的二分并非根本性的，而是实现选择的结果。通过利用现代、易于获取的计算机辅助设计与制造技术，我们证明高保真虚拟加工仿真既可以在几何上精确，又可以广泛可及，从而推动数字化制造中新一代可复现研究。

5 结论与未来工作

本文介绍了 FusionCut，一个用于基于 B-Rep 的切削工件包络仿真的可复现框架，旨在弥补虚拟加工研究中的一个关键缺口：缺乏易于获取的高保真几何仿真工具。本工作的首要科学贡献在于证明，现代 CAD/CAM平台应用程序接口可以作为研究级 CWE 计算的可行基础，从而在难以获取的专有内核与几何近似的离散方法之间提供一条替代路径。通过将易于获取的平台（Autodesk Fusion 360）与公开数据集（Titans of CNC Academy）及开源实现相结合，我们建立了一个可复现基线，使研究界能够验证、扩展并在我们的结果之上继续构建——从而应对该领域的可复现性挑战。

当前工作存在若干局限，也由此确定了未来研究的方向。首先，尽管 FusionCut 的性能可与离散体素场方法相媲美，但由于测试几何形状、刀具路径和硬件配置存在差异，因此难以直接与文献中的结果进行比较。未来将建立包含完整几何形状和刀具路径规范的标准化基准案例，以便严格比较不同方法。其次，当前框架按顺序处理刀具位置；未来将探索基于云的并行化，以提升处理大型工业刀具路径时的可扩展性。第三，将开发 C++ 实现，以降低 API 开销，并能够更直接地与优化后的实现进行性能比较。第四，将通过切削力测量开展实验验证，以确认 FusionCut 的几何精度能否转化为更准确的物理预测。最后，将扩展该方法以支持五轴刀具路径和复杂的刀具几何形状，从而在更广泛的工业应用中进行验证。这些工作旨在推动虚拟加工研究，迈向更宏大的目标：创建能够准确预测和优化制造过程的逼真数字孪生 [1]。

致谢

本文是一篇初稿，已被接受在2026年IISE年度会议暨博览会上宣读。作者衷心感谢Titans of CNC Academy（https://academy.titansofcnc.com）提供了用于本工作验证的公开CAD模型与制造数据。

参考文献

[1] Hankang Lee 和 Hui Yang。 制造流程的数字孪生仿真与优化。载于国际制造科学与工程会议，第87240卷，第V002T07A013页。美国机械工程师学会，2023年。[2] Hasan Sinan Bank。 FusionCut: 基于边界表示的虚拟加工CWE——代码与数据。 https://github.com/bankh/FusionCut，2025年。访问于2026年。[3] TITAN-2M。 https://academy.titansofcnc.com/series/titan-2m，2025年。访问于2025年。[4] IE Yigit、Ismail Lazoglu 等。 用于五轴球头铣削的基于实体建模器的切削参与模型。 *ProcediaCIRP*，31：179–184，2015年。

[5] Y Boz、H Erdim 和 I Lazoglu。比较实体模型方法与三正交体素场方法在三轴和五轴虚拟铣削中的刀具-工件啮合计算效果。《国际先进制造技术杂志》，81(5)：811–823，2015年。[6] I Lazoglu、Y Boz 和 H Erdim。复杂自由曲面的五轴铣削力学。《CIRP年鉴》，60(1)：117–120，2011年。[7] Yusuf Altintas。《制造自动化：金属切削力学、机床振动与数控设计》。剑桥大学出版社，2012年。[8] Eyyup Aras。多轴铣削中的刀具-工件啮合识别。博士论文，英属哥伦比亚大学，2008年。[9] Masatomo Inui、Masayoshi Kobayashi 和 Nobuyuki Umezu。利用三重体素表示工件模型和GPU并行处理功能提取刀具啮合特征。《计算机辅助设计与应用》，16(1)，2019年。[10] Douglas A Bodner 和 Leon F McGinnis。制造系统仿真建模的结构化方法。载于 IISE年度会议论文集，第1页。工业与系统工程师学会（IISE），2002年。[11] L Liu、S Holland、A Krishnamurthy、Q Li 和 Z Zhang。变形CAD模型以匹配实测几何，从而促进无损检测测量的融合。载于 IISE年度会议论文集，第1–7页。工业与系统工程师学会（IISE），2023年。[12] Matthew Frank、Sanjay B Joshi 和 Richard A Wysk。CNC-RP：一种在产品/工艺开发中将数控加工用作快速原型制造工具的技术。载于 IISE年度会议论文集，第1页。工业与系统工程师学会（IISE），2002年。