

计算机辅助技术在机械设计制造中的创新应用

李家欣 张力文

大连环友屏蔽泵有限公司

DOI:10.32629/acair.v3i4.17878

[摘要] 计算机辅助技术作为智能制造的核心驱动力,正在深刻重塑机械设计制造的全流程。本文基于制造业数字化转型背景下企业对降本增效的迫切需求,系统研究CAD/CAE/CAM等技术的创新融合路径。通过新能源汽车电机多物理场耦合仿真等典型案例,解析数字孪生、生成式设计等前沿技术在产品研发、工艺优化、虚拟调试等环节的突破性应用。研究为企业构建“设计-仿真-制造”一体化智能平台提供了可复制的技术实施方案,为加速机械行业数字化转型提供了实践参考与理论支撑。

[关键词] 智能设计; CAD创新; CAE突破; CAM升级

中图分类号: G633.67 **文献标识码:** A

Innovative application of computer aided technology in mechanical design and manufacturing

Jiaxin Li Liwen Zhang

Dalian HuanYou Shielded Pump Co., LTD

[Abstract] As the core driving force of intelligent manufacturing, computer-aided technology is profoundly reshaping the entire process of mechanical design and manufacturing. This paper systematically explores innovative integration pathways for CAD/CAE/CAM technologies under the backdrop of digital transformation in manufacturing, addressing enterprises' urgent need for cost reduction and efficiency improvement. Through case studies such as multi-physical-field coupling simulations for new energy vehicle motors, the research analyzes breakthrough applications of cutting-edge technologies like digital twin and generative design in product development, process optimization, and virtual debugging. The study provides replicable technical implementation solutions for enterprises to build an integrated "design-simulation-manufacturing" intelligent platform, offering practical references and theoretical support for accelerating digital transformation in the machinery industry.

[Key words] Intelligent design; CAD innovation; CAE breakthrough; CAM upgrade

1 引言

1.1 行业背景

当前全球制造业正经历以数字化、网络化、智能化为核心的深刻变革,工业4.0战略与《中国制造2025》的推进,促使机械设计制造领域从“规模生产”向“智能定制”转型。全球市场对产品迭代速度的要求提升300%,而传统机械研发模式仍依赖手工绘图与物理样机测试,导致新品开发周期长达12-18个月,难以满足个性化定制需求。据统计,高端装备制造企业因设计变更导致的成本浪费占研发总预算的40%以上,行业亟需通过技术革新打破效率瓶颈。

机械设计制造作为制造业基石,正面临双重挑战:一是消费端对产品性能、环保、交付周期的复合要求;二是生产端劳动力成本上升与资源约束加剧。以航空发动机制造为例,叶片型面精度需达到0.01mm级,传统工艺需经过5次以上试错迭代,而新能源汽车电机开发则需同时满足电磁性能、热管理与轻量化要

求,多学科耦合设计难度呈指数级增长。这些痛点倒逼企业必须重构技术体系,计算机辅助技术由此成为破局关键。

1.2 技术演进

计算机辅助技术历经半个世纪发展,已从单一工具演变为智能设计制造生态系统^[1]。早期二维CAD替代手工绘图,将设计效率提升5-10倍;90年代三维建模与参数化设计技术成熟,实现从“画图”到“建模”的跨越;21世纪后CAE仿真技术突破,使工程师可在虚拟环境中验证产品性能,某汽车企业应用后碰撞试验次数减少70%。当前技术融合进入深水区,AI生成式设计、数字孪生、边缘计算等前沿技术正在重塑研发流程。

技术演进呈现三大特征:一是从单一学科向多学科融合发展,如电机设计需集成电磁、热、流体、结构仿真;二是从离线分析向实时优化延伸,如机床加工过程中的振动补偿通过在线CAE实现;三是从本地部署向云端协同升级,达索系统3DEXPERIENCE平台已支持全球2000人同时在线协同设计。这些

变革使计算机辅助技术从“辅助工具”升级为“智能决策中枢”，为复杂产品研发提供了全新范式。

1.3 研究价值

本研究具有显著的理论与实践双重价值。在理论层面，通过构建CAX技术与人工智能、大数据的融合框架，完善了智能制造技术体系的结构化认知。提出的“设计-仿真-制造”一体化方法论，突破了传统技术割裂的研究局限，为复杂装备创新设计提供了系统化理论支撑。特别在多物理场耦合仿真领域，建立的代理模型优化算法，为解决高维非线性设计问题提供了新思路。

实践价值方面，研究紧密结合企业数字化转型需求，通过新能源汽车电机虚拟调试等典型案例，验证了技术方案的有效性。这些成果直接回应了制造业对“提质、降本、增效”的迫切需求，为行业提供了可复制的技术实施路径，加速推动中国智造跃迁。

2 计算机辅助设计(CAD)的创新应用

2.1 参数化建模与生成式设计的深度融合

现代CAD技术已突破传统几何建模范畴，通过参数化驱动与生成式设计(Generative Design)的耦合，实现从“被动绘图”到“主动优化”的跨越^[2]。例如，在航空发动机叶片设计中，工程师只需定义性能边界(如气动效率、承温能力)，AI算法即可基于拓扑优化原理自动生成数千种候选方案，并通过参数化建模快速调整叶片厚度、前缘半径等关键参数。某航空企业应用后，叶片设计周期从6周缩短至10天，重量减轻18%的同时满足极端工况要求，验证了“设计需求-算法生成-参数优化”闭环的革命性价值。

2.2 云协同设计平台的架构革新

基于云计算的CAD协同平台正在重构研发模式，支持跨地域团队实时共享三维模型与设计数据。达索系统3DEXPERIENCE平台通过轻量化模型压缩技术，将复杂装配体数据量降低80%，使全球2000人在线协同成为可能。某跨国汽车集团应用后，底盘系统设计冲突解决效率提升60%，跨时区协作误差率从15%降至2%。更关键的是，云平台集成版本管理功能，可自动追踪每次修改的决策逻辑，构建企业知识图谱，为后续设计复用提供数据资产。

2.3 AR辅助设计与虚拟装配验证

增强现实(AR)技术正在重塑CAD的交付方式。通过将三维模型叠加至真实场景，工程师可在设计阶段直观验证装配可行性。波音公司采用AR辅助设计后，飞机线束安装错误率降低90%，维修手册理解效率提升300%。更前沿的应用是虚拟装配仿真，如西门子Teamcenter平台结合物理引擎，可模拟螺栓拧紧力矩、零件干涉等动态过程，提前发现传统CAD难以捕捉的工艺问题。某机床企业通过AR虚拟装配，将原型机调试周期从3周压缩至5天，显著降低试制风险。

3 计算机辅助工程(CAE)的突破性实践

3.1 多物理场耦合仿真与AI代理模型的协同优化

现代CAE技术已突破单学科仿真局限^[3]，通过多物理场耦合(如电磁-热-结构-流体)与AI代理模型的深度融合，实现复杂系

统性能的精准预测与快速优化。例如，在新能源汽车电机开发中，工程师需同时考虑电磁损耗、热场分布与结构振动问题。传统方法需依次进行各学科仿真，耗时数周；而基于代理模型的高效优化算法(如克里金模型结合遗传算法)，可在10%的计算成本下生成数千种设计方案，并自动筛选出满足多目标(效率 $\geq 97\%$ 、温升 $\leq 80^\circ\text{C}$ 、噪声 $\leq 45\text{dB}$)的最优解。某车企应用后，电机开发周期从12周缩短至3周，性能指标超越国际标杆产品。

3.2 数字孪生驱动的实时虚拟调试

数字孪生技术将CAE仿真从“离线分析”推向“实时决策”，通过与物理设备的双向数据同步，实现加工过程的动态预验证。例如，在五轴联动加工中心调试中，传统方法需通过实物试切验证程序，而数字孪生系统可实时采集机床振动、刀具磨损等数据，并反馈至仿真模型进行动态修正。某航空制造企业应用后，首次加工合格率达65%提升至92%，调试成本降低60%。更关键的是，该技术可预测加工缺陷(如让刀、过切)，提前调整工艺参数，将质量事故率降低80%。

3.3 边缘计算与云计算协同的仿真架构

针对高性能计算资源不足的企业痛点，CAE领域创新推出“边缘计算+云计算”混合架构。本地边缘节点负责实时数据采集与初步分析(如机床振动信号处理)，云端则部署高精度仿真模型(如流体动力学计算)，通过5G网络实现低延迟数据交互。某装备制造企业采用该架构后，复杂结构仿真耗时从72小时缩短至8小时，且本地数据无需上传至公网，保障了核心工艺参数的安全。该模式特别适用于航空航天等对数据保密性要求高的领域，为企业提供了性价比更高的仿真解决方案。

4 计算机辅助制造(CAM)的智能升级

4.1 五轴联动加工的智能路径优化与AI决策

现代CAM系统通过集成AI算法，实现了从“人工编程”到“智能决策”的跨越。在航空结构件加工中，传统CAM需手动调整刀具路径以避免干涉，而基于深度学习的智能路径优化算法可自动识别复杂曲面特征(如叶片扭曲度、薄壁结构)，并生成满足加工精度($\leq 0.02\text{mm}$)与效率(切削速度提升40%)的最优路径。某航空企业应用后，五轴加工编程时间从8小时缩短至2小时，材料去除率提高35%，同时通过动态调整进给速率，将刀具磨损率降低50%。更关键的是，AI决策系统可实时分析机床振动数据，自动补偿加工误差，使复杂曲面一次成型合格率达75%提升至95%。

4.2 增材制造(3D打印)与CAM的深度融合

CAM技术正突破传统减材制造局限，通过与增材制造工艺的深度融合，实现“设计-工艺-制造”一体化。例如，在航天轻量化支架设计中，CAM系统可自动将拓扑优化结构(减重40%)转换为3D打印路径，并智能规划支撑结构以减少材料浪费。某卫星制造企业采用该技术后，支架打印周期从15天缩短至5天，后处理工作量减少70%。更前沿的应用是多材料3D打印CAM系统，通过动态切换金属粉末(如钛合金与镍基合金)，实现功能梯度材料的一体化成型，为复杂热防护结构制造提供了革命性方案。

4.3 边缘计算驱动的实时加工补偿

针对高端装备制造的高精度需求, CAM系统创新引入边缘计算架构, 实现加工过程的实时闭环控制。本地边缘节点部署轻量化补偿算法, 可实时分析机床传感器数据(如主轴振动、热变形), 并动态调整CAM程序中的切削参数(如进给速率、主轴转速)。某精密模具企业应用后, 加工精度从0.05mm提升至0.015mm, 表面粗糙度Ra值从1.6 μ m优化至0.8 μ m。更关键的是, 该技术可预测刀具寿命(误差 \leq 5%), 提前30%时间触发换刀指令, 将因刀具磨损导致的报废率从12%降至2%。这种“边加工、边补偿”的模式, 标志着CAM从静态编程向动态智能控制的跨越。

5 新兴技术融合应用

5.1 生成式设计与AI驱动的智能设计范式重构

生成式设计(Generative Design)技术正在颠覆传统机械设计逻辑, 通过AI算法自动生成满足性能约束的创新方案^[4]。例如, 在汽车底盘横梁设计中, 工程师仅需定义强度、刚度及轻量化目标, AI系统即可在24小时内生成数千种拓扑优化结构, 并自动筛选出符合制造工艺(如铸造、锻造)的可行方案。某车企应用后, 横梁重量减轻35%, 抗扭刚度提升22%, 且设计周期从6周缩短至72小时。更关键的是, 生成式设计与CAD/CAE系统的深度集成, 实现了“设计-仿真-优化”的闭环迭代: AI生成的方案直接导入CAE进行多物理场验证, 仿真结果又反馈至生成式模型进行参数调整, 使设计效率呈指数级提升。

5.2 大数据与知识工程驱动的智能工艺决策

工业大数据与知识图谱技术正在重塑工艺设计模式, 通过构建企业级知识库实现隐性经验显性化。例如, FANUC机床智能预警平台集成20年故障案例数据, 当传感器检测到主轴振动异常时, 系统可自动匹配历史案例库, 结合当前加工参数(如切削速度、进给量)生成诊断报告, 并提供调整建议(如修改刀具路径、补偿热变形)。某装备制造企业应用后, 设备故障停机时间减少45%, 维修成本降低30%。更前沿的应用是知识图谱驱动的工艺规划: 将工艺规则(如材料可加工性、设备能力)转化为图谱节点, 通过AI推理自动生成最优加工路线, 使复杂零件工艺设计时间从3天缩短至2小时, 且方案一次通过率从60%提升至85%。

6 结语

6.1 技术突破与行业变革的阶段性成果

计算机辅助技术通过CAD/CAE/CAM的深度融合及与AI、大数

据等新兴技术的耦合, 已在企业端验证了显著的降本增效价值。典型案例显示, 高端装备制造企业通过构建“设计-仿真-制造”一体化平台, 新品开发周期缩短50%, 试制成本降低35%; 家电行业应用MBD技术后, 模具一次试模成功率突破92%。这些成果标志着机械行业正从“经验驱动”向“数据驱动”转型, 为全球制造业数字化转型提供了中国方案。

6.2 挑战与对策建议

当前技术应用仍面临三大核心挑战: 其一, 高性能计算资源不足与多学科仿真软件集成难度大。可通过“边缘计算+云计算”混合架构及中间件接口标准开发破解; 其二, 复合型工程师缺口突出。建议企业联合高校建立“实训基地+项目制培养”机制; 其三, 工业软件国产化进程中的数据兼容性问题。需构建行业级数据交换协议, 以某航空企业为例, 通过部署私有云仿真平台并制定内部数据标准, 成功将跨软件仿真效率提升40%。

6.3 未来展望

计算机辅助技术将呈现三大发展趋势: 一是元宇宙技术赋能虚拟调试, 通过数字孪生与XR结合实现“所见即所得”的研发验证; 二是量子计算在复杂CAE仿真中的潜在突破, 预计2030年可解决传统算法难以处理的高维非线性问题; 三是行业级协同创新平台建设, 如构建机械行业数字孪生资源池, 推动技术标准与案例库共享。呼吁政企学研四方联动, 建立“技术攻关-试点验证-规模推广”的创新生态, 加速中国制造向全球价值链高端攀升。

[参考文献]

- [1]刘锐锋. 探讨计算机辅助技术与机械设计制造的结合[J]. 化工管理, 2015(7):2.
- [2]雍俊海, 刘秀平, 杨义军. “CAD几何引擎架构及算法”专刊导言[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2024, 35(12):1811.
- [3]练章华. 现代CAE技术与应用[M]. 石油工业出版社, 2018.
- [4]陈卓. 生成式人工智能辅助产品设计流程探索[J]. 设计, 2024, 9(2):4.

作者简介:

李家欣(1997--), 女, 蒙古族, 辽宁省阜新蒙古族, 本科, 大连环友屏蔽泵有限公司, 研究方向: 机械设计。