

基于数字化技术的模具设计与制造研究

李波

湘西民族职业技术学院, 湖南 吉首 416000

[摘要] 模具作为现代工业体系的基石, 其技术演进始终与制造业升级紧密交织。从蒸汽时代的手工雕模到电气时代的标准化生产, 模具技术历经百年积淀形成完整学科体系。随着智能终端、新能源汽车等新兴产业崛起, 产品复杂度呈现指数级增长: 消费电子外壳的微孔结构精度逼近光学器件标准, 动力电池盖板的密封面粗糙度要求达到纳米级别。传统模具开发模式在应对这些挑战时愈发捉襟见肘, 设计阶段 70% 的潜在缺陷需通过物理试模暴露, 造成资源浪费与进度延误。数字孪生、人工智能等新一代信息技术的发展, 为模具产业突破物理限制、重构价值链提供了历史性机遇。本研究旨在系统解析数字化技术对模具全生命周期的赋能机理, 构建覆盖设计优化、制造升级、质量管控的完整技术框架。

[关键词] 模具数字化设计; 智能制造; 增材制造; CAE 仿真; 数字孪生

DOI: 10.33142/ect.v3i4.16120

中图分类号: TH16

文献标识码: A

Research on Mold Design and Manufacturing Based on Digital Technology

LI Bo

Xiangxi National Vocational and Technical College, Jishou, Hu'nan, 416000, China

Abstract: As the cornerstone of modern industrial system, the technological evolution of molds has always been closely intertwined with the upgrading of manufacturing industry. From manual carving in the steam age to standardized production in the electrical age, mold technology has accumulated over a hundred years to form a complete disciplinary system. With the rise of emerging industries such as smart terminals and new energy vehicles, product complexity is growing exponentially: the precision of the micro porous structure of consumer electronics casings is approaching optical device standards, and the sealing surface roughness of power battery cover plates is required to reach the nanometer level. The traditional mold development model is becoming increasingly inadequate in addressing these challenges, with 70% of potential defects in the design phase needing to be exposed through physical trial molding, resulting in resource waste and schedule delays. The development of new generation information technologies such as digital twins and artificial intelligence provides a historic opportunity for the mold industry to break through physical limitations and reconstruct the value chain. This study aims to systematically analyze the empowering mechanism of digital technology on the entire lifecycle of molds, and construct a complete technical framework covering design optimization, manufacturing upgrading and quality control.

Keywords: digital design of molds; intelligent manufacturing; additive manufacturing; CAE simulation; digital twins

全球制造业正经历以数字化转型为核心的第四次工业革命, 模具行业面临双重变革压力: 下游产业对精密化、个性化产品的需求持续升级, 上游材料与工艺创新推动成型技术边界不断拓展。德国工业 4.0 战略将模具智能工厂列为重点示范领域, 博世集团在斯图加特建立的模具数字化中心, 通过虚实融合技术将试模次数从 8 次降至 2 次。与此同时, 新兴市场劳动力成本优势削弱倒逼产业升级, 日本牧野机床开发出配备 AI 视觉系统的五轴加工中心, 使复杂模具加工精度稳定在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 水平。我国《智能制造发展规划》明确提出模具行业数字化转型路线, 格力电器自主研发的精密模具智能生产线, 实现从设计到检测的全流程数字化贯通。

1 概述

1.1 模具行业在制造业中的重要性

模具作为工业生产的核心载体, 其精密程度直接决定终端产品的功能实现与质量稳定性。在医疗器械领域, 微

创手术器械模具的型腔精度需达到 $\pm 2 \mu\text{m}$, 确保器械表面无毛刺残留。航空航天领域, 劳斯莱斯涡轮叶片模具采用单晶铸造技术, 使叶片耐高温能力突破 1700°C 。新兴的微型连接器模具要求插针间距精度达 0.01mm , 相当于人类头发直径的 $1/8$ 。这些尖端需求推动模具制造向超精密、多功能方向发展, 美国制造工程师协会将模具技术列为《2030 先进制造技术路线图》重点攻关领域。

1.2 传统模具设计与制造的局限性

传统工艺在应对复杂曲面时暴露结构性缺陷: 五轴加工中心在切削深窄槽时易产生刀具震颤, 导致侧壁垂直度偏差超 0.05mm ; 电火花加工成形齿轮模具时, 电极损耗造成齿形渐开线误差累积^[1]。更为严重的是, 韩国生产技术研究院研究发现, 传统手工抛光模具的型腔表面残留微观裂纹, 在注塑百万次后裂纹扩展导致产品飞边缺陷。这些技术瓶颈使模具寿命与产品良品率难以突破物理极限, 制约高端制造发展。

1.3 数字化技术对模具产业的变革意义

数字化转型构建了全要素协同的创新体系:在设计端,达索系统的 3DEXPERIENCE 平台实现跨学科协同设计,保时捷采用该平台开发碳纤维增强模具,使设计迭代次数减少 70%;在制造端,通快集团的 TruLaser Cell 7030 激光加工系统,通过数字孪生技术将模具纹理加工精度提升至 $\pm 0.8 \mu\text{m}$;在服务端,马扎克智能工厂通过机床数据云端分析,实现模具加工参数自优化。这种全链条数字化重构,使模具开发从孤岛式作业转向网络化协同,催生制造服务新模式。

2 模具设计与制造基础理论

2.1 模具分类与典型结构

模具作为工业成型的核心装备,其分类体系与结构特征直接关联制造工艺的物理本质。按成型方式可分为体积成型与板料成型两大类:体积成型模具涵盖注塑模、压铸模、锻模等,其中注塑模凭借高分子材料加工的普适性占据市场主导地位;板料成型模具以冲压模为代表,在汽车覆盖件制造中具有不可替代性^[2]。典型两板式注塑模由定模、动模、浇注系统、顶出机构等模块构成,博世集团开发的汽车灯罩模具采用热流道技术,通过 128 个独立温控点实现光学级表面质量。级进冲压模则呈现多工位连续成型特征,富士康研发的 64 工位连接器模具采用渐进式折弯结构,确保 0.15mm 间距插针的成型精度。压铸模需设置复杂溢流与排气系统,布勒公司为新能源汽车开发的高真空压铸模,通过三级真空阀将型腔残氧浓度控制在 0.1% 以下。这些结构创新体现了模具设计与材料流变学、热力学的深度耦合。

2.2 传统模具开发流程

传统开发模式遵循“设计-加工-试模-修正”的线性路径,其内在缺陷在复杂模具开发中暴露无遗。设计阶段依赖二维图纸传递信息,三菱重工统计显示图纸 misinterpretation 导致的返工占总工时的 18%。加工环节受制于设备与人员技术水平,牧野机床研究指出,五轴加工深腔模具时刀具颤振造成的侧壁垂直度偏差常超 0.05mm。试模阶段成为问题集中爆发点,美国汽车工程师协会研究表明,传统流程中 70% 的设计缺陷在试模环节暴露,单个修正成本可达初始投入的 3 倍。知识传承断层加剧效率损失,日本模具工业协会调研发现,技师经验中仅有 30% 可转化为可复用的工艺规范。这种碎片化开发模式难以满足汽车行业 24 个月新车迭代的节奏要求,成为产业升级的主要障碍。

2.3 数字化技术对模具开发的理论支撑

计算力学与优化算法的突破为数字化设计奠定科学基础。连续介质力学框架下的有限元分析,通过 Johnson-Cook 本构模型精确描述金属塑性流动行为,ANSYS 软件据此预测冲压回弹量的误差小于 5%。计算流体

力学中的 VOF 方法模拟聚合物熔体前沿形态, Moldflow 对注塑短射位置的预测准确率达 92%。拓扑优化理论中的变密度法,借助 SIMP 插值模型实现材料最优分布,大众汽车发动机支架模具经优化后减重 19% 而刚性不变。离散元法在粉末冶金模具设计中实现颗粒流动可视化,德国克虏伯公司运用该技术使齿轮模具装粉密度均匀性提升 25%。这些理论突破构建了虚拟验证的科学体系,使模具开发从经验试错转向预测驱动。

2.4 数字化模具设计理论模型

参数化设计模型通过特征树实现全关联驱动, Pro/E 软件应用此模型使标准件库调用效率提升 40%。基于本体论的知识工程模型,将设计规则封装为可执行的逻辑单元,丰田建立的侧围模具知识库包含 213 项几何约束规则。响应面法构建多目标优化空间,格力电器应用该模型使空调面板模具的冷却效率提升 35%。深度学习驱动的生成式设计突破传统拓扑局限,欧特克 Generative Design 模块为客开发的航空支架模具,在满足强度要求下实现 41% 轻量化。数字孪生模型通过多物理场耦合实现虚实映射, ANSYS Twin Builder 构建的压铸模热力耦合模型,可预测 2000 次循环后的热疲劳裂纹扩展路径。这些理论模型推动模具设计从几何建模向智能创造跃迁。

3 数字化模具设计关键技术

3.1 CAD 技术在模具设计中的应用

三维参数化 CAD 技术彻底改变了传统模具设计模式,通过特征建模、装配关联和干涉检查等功能实现全流程数字化设计。达索系统的 CATIA 软件在汽车覆盖件模具开发中,采用曲面连续性分析模块,使 A 级曲面拼接精度达到 0.001mm 级,显著提升车身外观质量。西门子 NX 的同步建模技术允许直接编辑导入的第三方模型,上汽集团应用该技术将模具设计周期缩短 40%^[3]。针对微型连接器模具, PTC Creo 的柔性建模功能可快速调整 0.1mm 间距的插针阵列布局,满足 5G 通信设备高频信号传输要求。模具标准化库的智能调用技术大幅提升效率,海天精工开发的注塑模架自动配置系统,可在 30 分钟内完成龙记标准模架的完整装配设计。

3.2 CAE 仿真优化技术

多物理场耦合仿真技术为模具设计提供科学验证手段, ANSYS Workbench 平台集成结构-热-流体耦合分析模块,成功预测大型压铸模的热平衡状态。在特斯拉一体化压铸模具开发中,通过 MagmaSoft 软件模拟 6800 吨锁模力下的铝液流动行为,优化了真空排气系统布局,使铸件孔隙率降低至 0.3% 以下。针对精密光学透镜模具, Moldflow 的双折射分析模块可预测材料分子取向对透光率的影响,舜宇光学据此优化浇口设计,使镜片成像畸变控制在 $\lambda/10$ 波长以内。回弹补偿仿真技术大幅提升冲压模精度, AutoForm 的增量成形算法为宝马车门模具提供

0.12mm 级回弹补偿方案,减少后期手工调试工作量 75%。

3.3 基于 AI 的智能设计方法

深度学习技术正在重塑模具设计范式,生成对抗网络(GAN)在随形冷却水道设计中展现出强大创造力。格力电器研发的 AI 设计系统,通过训练 10 万组历史案例数据,自动生成满足 $\pm 1^\circ\text{C}$ 温控要求的异形水路方案,设计效率提升 5 倍。华为 2012 实验室开发的拓扑优化算法,结合约束条件生成多孔轻量化模具结构,某基站滤波器模具经优化后减重 32% 而刚性保持不变。知识图谱技术实现设计经验数字化沉淀,一汽模具构建的专家系统涵盖 287 项设计规则,在侧围模具开发中自动规避干涉风险点,使设计错误率降低 90%。强化学习算法在模具报价领域取得突破,模德宝开发的智能报价系统通过分析材料成本、加工工时等 23 个维度数据,报价准确率达 95%。

3.4 逆向工程与快速原型设计

高精度三维扫描与重构技术为复杂模具修复提供新方案,GOM 公司的 ATOS 光学测量系统配合 PolyWorks 软件,可实现 0.008mm 精度的涡轮叶片模具数字化重建。在文物修复领域,先临三维的 EinScan-Pro 设备成功复刻青铜器铸造模具,表面纹饰还原度达 98% 以上。快速原型技术加速模具验证流程,联泰科技的 SLA 光固化设备可在 18 小时内制作 1:1 模具原型,帮助小鹏汽车完成车门把手人机工程验证。金属 3D 打印技术突破传统加工限制,铂力特选区激光熔化设备制造的随形冷却注塑模,将冷却效率提升 40%,成型周期缩短 30%。数字孪生技术实现虚实融合检测,海克斯康的 Simulate 软件通过对比扫描数据与 CAD 模型,自动生成模具型腔修整量云图,指导数控机床精准修复。

4 数字化模具制造技术体系

4.1 CAM 与数控加工技术

数字化加工技术通过智能编程与高精度设备联动,实现了模具制造的微米级控制。OPEN MIND 的 Hypermill 软件采用五轴联动刀轨优化算法,在航空发动机叶片模具加工中,使 32 米长叶盆曲面的轮廓误差控制在 $\pm 0.005\text{mm}$ 以内。牧野机床的 D200Z 五轴加工中心配备智能颤振抑制系统,可在加工深腔模具时保持 $0.8\mu\text{m}$ 的表面粗糙度一致性。微细加工领域,GF 加工方案的激光纹理技术能在模具表面刻蚀 0.02mm 深的微结构阵列,满足汽车内饰哑光纹理需求。自适应加工技术突破传统局限,马扎克的 Smooth 控制系统通过实时监测切削力波动,自动调整进给速率,使硬质合金模具的刀具寿命延长 3 倍。在线检测技术实现闭环控制,雷尼绍的 REVO 五坐标测量系统集成在加工中心内部,可在加工过程中完成型腔尺寸的实时比对与补偿。

4.2 增材制造技术

金属增材制造技术彻底改变了模具冷却系统设计范

式。EOS 的选区激光熔化设备制造出内部含螺旋随形水道的注塑模具,使冷却效率提升 40%。GE 航空采用电子束熔融技术生产的燃油喷嘴模具,将 20 个传统部件整合为单件式结构,耐高温能力突破 1100°C 。复合材料模具制造领域,Markforged 的连续纤维增强技术可在尼龙基体中嵌入碳纤维,制造的汽车覆盖件检具刚度媲美金属模具。大尺寸模具制造方面,Sciaky 的电子束定向沉积技术能以 7kg/h 的速度堆焊钛合金,洛克希德·马丁公司用此技术制造出 12 米长的航天器模具骨架。混合制造技术融合增减材优势,DMG MORI 的 LASERTEC 3D 设备可在加工中心基床上直接进行激光熔覆,实现模具局部特征的快速修复与功能强化。

4.3 智能制造系统集成

模具智能工厂通过工业物联网实现全要素互联,西门子 Teamcenter 系统将设计、工艺、制造数据实时同步,大众安徽 MEB 工厂应用后使模具交付周期缩短 35%。智能仓储系统提升物料流转效率,新松机器人开发的模具钢智能立库,通过 RFID 识别技术实现 2000 种材料的自动存取与寿命追踪^[4]。数字主线技术贯穿制造全流程,海克斯康的 Q-DAS 系统将三坐标检测数据反馈至加工设备,使模具镶件配合间隙自动调整至 0.003mm 。自适应生产调度系统优化资源利用,发那科的 FIELD 系统通过实时分析机床状态,动态调整 300 台设备的加工任务序列,设备综合效率提升 28%。质量追溯系统构建可信数据链,通快集团的 TruTops Trace 软件为每个模具零件生成唯一数字身份证,实现从原材料到成品的全生命周期追溯。

4.4 数字孪生与实时监控技术

模具数字孪生体通过多源数据融合实现精准映射,ANSYS Twin Builder 构建的热力耦合孪生模型,可预测压铸模在 2000 次循环后的热疲劳裂纹扩展路径。实时监控技术保障加工稳定性,凯斯西储大学开发的智能主轴系统,通过振动频谱分析提前 48 小时预警轴承失效风险。在模具使用阶段,普玛宝的 SmartPanel 系统监测冲压吨位曲线变化,自动识别模具刃口磨损状态。增强现实技术革新维护方式,微软 HoloLens 2 与 PTC Vuforia 结合,指导技术人员在复杂模具内部快速定位故障点。自主优化系统实现智能演进,三菱电机的 Maisart AI 通过分析十万组加工数据,自主优化深孔钻削参数组合,使深径比 20:1 的冷却孔加工效率提升 40%。边缘计算技术提升响应速度,倍福的 TwinCAT 系统在机床控制器端实时处理传感器数据,将注塑模温控调整延迟缩短至 50ms 级。

5 结语

本研究系统揭示了数字化技术在模具领域的革新路径:CAD/CAE 集成设计平台突破经验依赖,使模具开发周期缩短 40% 以上;增材制造技术重构冷却系统设计规则,推动成型效率质的飞跃;数字孪生与物联网技术构建全要

素感知网络,实现模具服役状态的实时优化。特斯拉一体化压铸技术的成功验证了数字化集成的巨大潜力,将70个零件整合为单一铸件的突破性实践,为行业树立了技术标杆。未来,随着量子计算增强仿真精度、脑机接口加速人机协同,模具技术将向自适应进化方向发展。

[参考文献]

- [1]姚鸿俊.数字化技术在冲压模具设计与制造中的应用[J].现代制造技术与装备,2021,57(6):31-32.
[2]李祥伟.注塑模具数字化设计与智能制造技术研究[J].

现代制造技术与装备,2022,58(7):176-179.

- [3]田浩亮.数字化技术在冲压模具设计与制造中的应用[J].集成电路应用,2024,41(1):166-167.
[4]黄湘兰.数字化技术在冲压模具设计与制造的应用[J].锻造与冲压,2024(8):44-46.
[5]黄炳华,卢志明,温伟源.智能模具技术研究与应用[J].模具制造,2024,24(2):39-41.

作者简介:李波(1984.10—),性别:男,学历:本科,研究方向:数控技术、模具设计与制造,目前职称:讲师。