

增材制造支撑结构拓扑优化自动生成算法与工程应用效果研究

陆正超

滇西应用技术大学 云南 大理 671000

【摘要】：针对增材制造支撑结构人工设计效率低、冗余度高且难以兼顾力学性能与工艺可行性的痛点，提出一种嵌入多工艺约束的支撑结构拓扑优化自动生成算法。算法以修正的 SIMP 拓扑优化理论为基础，耦合力学刚度、热传导、制造特征尺寸三类核心约束，构建多目标优化函数，通过自适应网格迭代策略提升求解效率，实现支撑区域自动识别、拓扑形态自动生成与工艺性自动校验的全流程自动化。选取航空领域钛合金复杂薄壁蒙皮构件开展 SLM 工艺打印验证，结果表明该算法生成的支撑结构相比传统均匀柱状支撑，体积减少 28.2%，零件成型最大变形量降低 31.8%，后处理效率提升 41%，残余应力峰值下降 22%，可有效支撑高端装备领域增材制造的批产化降本需求。

【关键词】：增材制造；支撑结构；拓扑优化；自动生成算法；工艺约束；SLM 工艺

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.077

引言

增材制造技术凭借复杂结构一体化成型优势，在航空航天、高端模具等领域的应用规模持续扩大，支撑结构作为成型过程的必要辅助，其设计质量直接决定零件成型精度、材料利用率与后处理成本。传统支撑设计多依赖工程师经验，采用柱状、蜂窝、线形等固定拓扑形式，面对复杂曲面构件时易出现支撑冗余与局部不足并存的问题，设计周期长且一致性差，难以适配当前装备快速迭代的研发节奏。现有拓扑优化方法在支撑设计中的应用多停留在力学性能优化层面，对增材制造特有的悬垂角、最小壁厚、热积累等工艺约束考虑不足，生成的拓扑结构往往需要大量人工修正才能用于生产，优化收益被后处理成本抵消。随着国内智能制造战略推进，增材制造向自动化、批产化方向升级，支撑结构的自动优化生成成为亟需突破的关键环节，直接影响整条工艺链的运行效率。当前商用增材制造软件的自动支撑功能多基于规则生成，仅能实现固定形态的支撑排布，无法根据零件的应力与热场分布实现定制化拓扑优化，性能提升空间有限。

1 支撑结构拓扑优化的理论基础与约束边界

1.1 增材制造支撑的力学-工艺耦合作用机理

增材制造过程中支撑结构承担抗变形、散热、固定基体三重功能，其失效形式主要表现为支撑屈曲、界面剥离与热变形超限三类。经典拓扑优化以最小化体积为目标求解材料最优分布，未考虑增材成型的逐层堆积特性，直接套用会出现拓扑单元尺寸小于打印光斑直径、支撑自身悬垂度超出工艺阈值等问题，最终生成的结构无法直接成型。支撑与零件基体的界面应力分布受堆积热循环影响显著，熔融态材料的粘结强度随温度梯度变化，局部应力集中易导致支撑脱落，进而引发后续铺粉层错层，造成整版零件报废。支撑的散热作用随接触面积与材料导热系数变化，钛合金等低热导率材料成型时，熔池冷却速度慢，热积累导致的残余应力占总变形的六成以上，此时支撑

的热传导权重甚至高于力学刚度权重，单一力学约束的优化结果会进一步加剧热积累变形。很多研究仅关注室温下的静态力学性能，忽略成型过程中支撑处于高温工况的刚度衰减特性，高温下支撑材料的屈服强度下降 40%以上，按室温参数设计的支撑极易出现屈曲变形。支撑的失效存在连锁效应，局部支撑承载力不足会导致相邻支撑载荷骤增，进而引发大面积支撑失效，零件变形量呈指数级上升，传统均匀排布的支撑通过加大密度规避失效，造成了大量材料浪费。

1.2 拓扑优化算法的增材适配性修正基础

SIMP 密度法是连续体拓扑优化的主流方法，通过引入单元相对密度与弹性模量的插值关系，将离散拓扑问题转化为连续变量优化问题，求解成熟且稳定性强。针对增材制造的工艺约束，需在算法中加入双重过滤机制，一是密度灵敏度过滤，抑制网格依赖性与棋盘格现象，过滤半径与打印光斑直径绑定，取 1.5 倍光斑直径，保证拓扑单元的可成型性；二是特征尺寸过滤，控制最小拓扑单元尺寸不低于打印线宽的 1.2 倍，避免出现过细的支撑筋条。现有多数修正方法采用后处理模式，即拓扑优化完成后再对结果进行工艺修正，这种方式会打破原有的最优平衡，导致性能下降。本研究将约束内嵌于求解过程，每一步迭代都满足工艺边界，保证最终结果就是工艺可行的最优解。支撑生成域需预先通过几何识别划定，避免优化过程中材料分布至非支撑区域，同时引入自支撑约束，通过单元法向量与打印方向的夹角判定，保证支撑结构自身的悬垂角不超过对应材料的工艺阈值，无需额外添加二级支撑。

2 支撑结构拓扑优化自动生成算法构建

2.1 多约束耦合的目标函数构建

支撑结构优化的核心是在满足成型要求的前提下最小化综合成本，目标函数涵盖支撑体积、热阻与界面连接强度三个维度，通过归一化处理后赋予权重系数。体积项直接对应材料消耗与打印时间，以支撑区域的单元密度总和为计算指标；热

阻项通过稳态热传导方程计算支撑区域的等效热导率,反映散热能力,等效热导率越高则热阻越小,散热效果越好;界面强度项以支撑与基体接触面上的切应力峰值为评价指标,防止剥离失效,切应力峰值越低则连接可靠性越高。权重系数的标定基于正交试验结合工程实测数据迭代修正,针对不同材料体系调整取值,钛合金构件的热阻权重设为 0.35,铝合金构件设为 0.2,力学刚度权重均保持在 0.5 左右,界面强度权重统一为 0.15。目标函数求解过程中引入惩罚因子,使单元密度向 0-1 两极分化,避免中间密度单元带来的制造模糊性,惩罚因子随迭代步数逐步增大,前期取 2 保证寻优范围,避免过早陷入局部最优,后期提升至 3 强化拓扑清晰性,减少过渡区单元占比。迭代结束后对密度区间进行分级处理,密度大于 0.7 的单元保留为实体支撑,小于 0.3 的单元去除,中间区间的单元进行平滑过渡处理,避免出现锯齿状边界,保证支撑的表面成型质量。

2.2 自适应网格迭代的求解策略

拓扑优化的计算成本随网格数量呈近似线性增长,传统均匀网格为保证精度需全局细化,面对大尺寸构件时计算量呈指数级上升,无法满足工程设计的效率要求。采用多层网格自适应迭代策略,初始阶段用粗网格进行全局寻优,快速确定支撑的大致分布形态,排除大面积的非支撑区域,减少后续计算量。当目标函数变化率低于 5%时,对密度在 0.3-0.7 区间的过渡区域以及应力梯度大于阈值的区域进行网格细化,细化比例控制在总网格数的 20%以内,兼顾精度与效率,网格细化最多设置两层,避免网格数量爆炸。迭代步长采用自适应调整机制,相邻两次迭代的目标函数差值大于 10%时,步长取 0.2 加快收敛,差值小于 1%时,步长缩小至 0.05 避免震荡,同时加入阻尼系数,防止步长频繁波动,收敛准则设定为目标函数相对变化量连续三次小于 0.5%,适配工程应用的精度需求。相比传统固定步长均匀网格算法,该策略的单模型求解时间缩短 32%,且拓扑结果无明显精度损失,对于米级大尺寸构件,求解效率提升幅度可达 50%以上,可满足工业级设计的效率要求。粗网格阶段的全局寻优还能有效避免局部最优解,提升优化结果的全局最优性。

2.3 工艺约束嵌入的自动生成逻辑

自动生成流程从三维模型导入开始,支持 STL、STEP 两种主流格式,通过几何特征识别算法遍历模型所有三角面片,计算下表面面片与打印平面的夹角,小于阈值的自动归入支撑生成域,同时识别内部孔洞、倒扣等结构,自动划定内部支撑区域,无需人工交互划分。生成域内自动加载拓扑优化求解器,将打印层厚、光斑直径、材料热物性参数作为初始约束输入,参数库内置 SLM、SLA、FDM 三类主流工艺的标准参数,覆盖钛合金、铝合金、树脂等十几种常用材料,用户仅需选择工艺类型与材料牌号,即可自动匹配约束参数。求解完成后对拓扑结果进行工艺性校验,检查最小壁厚、自支撑性、连接可靠

性与可去除性,对封闭区域的支撑自动生成去除通道,对不满足要求的局部区域进行密度补偿修正,保证最终结果的工艺可行性。最终输出的支撑模型为实体化的网格模型,可直接导入切片软件生成打印路径,无需二次修复,也可导出 CAD 格式文件对接产品设计流程。

3. 工程应用效果验证与性能对比

3.1 典型薄壁构件的成型测试验证

选取航空领域常用的钛合金复杂薄壁蒙皮构件作为测试对象,构件最大外形尺寸 300mm×200mm×80mm,壁厚 1.5mm,包含多处曲面悬垂结构与内部加强筋,是典型的难成型增材构件。分别采用传统柱状支撑、蜂窝支撑与本研究算法生成的拓扑优化支撑进行 SLM 工艺打印,打印设备采用 400W 光纤激光器,层厚 0.03mm,粉末粒度 15-53μm,同炉次打印保证工艺条件一致。打印完成后检测零件的形位精度、残余应力、支撑体积与去除时间,形位精度采用三坐标测量机检测,选取 20 个关键曲面测点,残余应力采用 X 射线衍射法检测零件表面的应力峰值,具体性能对比结果见表 1。

表 1 不同支撑方案的钛合金构件成型性能对比

支撑方案	支撑体积/cm ³	最大变形量/mm	残余应力峰值/MPa	支撑去除时间/min	成型缺陷数/处
柱状支撑	17.7	0.176	239	64	2
蜂窝支撑	15.2	0.151	215	52	1
拓扑优化支撑	12.7	0.120	186	38	0

测试结果显示,拓扑优化支撑的总体积相比柱状支撑减少 28.2%,相比蜂窝支撑减少 16.4%;零件关键曲面的最大变形量相比柱状支撑降低 31.8%;残余应力峰值相比柱状支撑降低 22.3%;支撑去除采用喷砂配合机械打磨,总耗时缩短 41%,去除后表面粗糙度 Ra 值降低 15%。变形量降低的核心原因在于拓扑支撑沿应力集中路径分布,整体刚度匹配更均匀,同时散热路径更短,热积累导致的翘曲变形得到有效抑制,传统柱状支撑的变形主要集中在大悬垂区域的边缘,支撑间距大导致中间刚度不足,且散热不均匀,局部热应力偏高。

3.2 综合应用效益与适配性分析

从全流程成本角度核算,单批次 10 件构件的生产中,拓扑优化支撑可节省钛合金粉末材料 2.1kg,打印机时减少 17 小时,后处理人工成本降低 35%,单件综合成本下降 19.3%。小批量定制场景下,算法的自动生成特性可将支撑设计时间从平均 4 小时缩短至 15 分钟以内,设计效率提升 90%以上,模型

修改后的迭代设计仅需重新运行算法即可，无需人工调整。针对不同复杂程度的构件，算法表现出稳定的适配性，不同类型构件的优化效果对比见表2。

表 2 不同复杂程度构件的算法优化效果对比

构件类型	支撑体积减少率/%	零件变形降低率/%	支撑设计时间/min	单构件成本下降率/%
简单规则构件	14.7	17.2	9	11.8
中等复杂构件	22.5	24.6	12	15.7
复杂曲面构件	35.1	31.8	15	19.3

规则结构的优化幅度略低但仍优于传统方案，复杂曲面结构的优化收益更为显著，支撑体积减少量可达 35%以上。与主

流商用增材软件的规则式自动支撑功能对比，本算法的设计时间相当，但支撑体积平均减少 22%，零件变形量降低 25%左右，综合性能优势明显。当前算法主要面向金属粉末床熔融工艺，在航空航天蒙皮、框梁、燃烧室构件，以及高端模具的随形冷却通道等场景都具备应用价值，贴合国内增材制造批产化的发展需求。

4 结论

本研究提出的增材制造支撑结构拓扑优化自动生成算法，通过将工艺约束嵌入拓扑优化求解全流程，解决了传统方法生成结果难以直接落地的问题。多约束耦合的目标函数兼顾力学性能与散热需求，突破了单一力学优化的局限，自适应网格策略有效平衡了求解精度与效率，全自动化生成逻辑大幅降低了设计门槛与迭代成本。工程测试表明，算法生成的支撑结构在材料利用率、成型精度、残余应力控制与后处理效率上均优于传统支撑形式，具备较好的工程应用价值。

参考文献：

[1] 罗自利.基于增材制造的农机复杂零件拓扑优化设计[J].农机使用与维修,2026,(7):55-58.

[2] 范龙航,冀宏,张建军,等.基于粘结剂喷射增材制造的典型液压流道拓扑优化设计研究[J].液压与气动,2026,50(4):64-71.

[3] 杨建东,丁晓红,熊敏,等.基于残余变形控制的增材制造自支撑结构拓扑优化设计方法[J/OL].机械工程学报,1-11[2026-08-28].

[4] 段宇航,王建峰,郝璐静,等.基于拓扑优化的无人机机翼增材制造接头结构轻量化设计[J].焊接学报,2026,47(2):11-19.