

拓扑优化轻量化腔体电磁兼容与结构设计协同方法

薛娟 孟宇 马佳宁 杨凯栋

西安开容电子技术有限责任公司 陕西 西安 710000

摘要: 针对拓扑优化轻量化腔体在电磁兼容性与结构刚度协同设计中面临的性能冲突、多场耦合精度不足及制造可行性差等问题,提出一种融合电磁-结构耦合建模与可制造性约束的协同优化方法。通过构建统一的有限元分析框架,实现电磁场与应力场的同步求解,提升多物理场仿真精度。引入电磁损耗密度作为关键约束变量,建立兼顾屏蔽效能与结构性能的多目标优化模型,有效缓解性能权衡矛盾。结合灵敏度过滤与投影函数策略,增强拓扑边界清晰度,同时构建面向增材制造的可加工性约束体系,提升设计结果的工艺适配性。该方法支持从仿真驱动设计到可制造性验证的闭环流程,适用于航空航天、高密度电子封装等领域。结果验证表明,协同优化方案在保障电磁屏蔽性能基础上显著提升结构刚度,实现轻量化与功能集成的平衡。

关键词: 电磁-结构耦合; 拓扑优化; 增材制造; 多目标协同; 可加工性约束

0 引言

拓扑优化在航空航天与电子装备轻量化设计中成效显著,变密度法与多目标策略可在满足约束下实现材料高效利用。但传统方法多聚焦单一物理场,忽视电磁与结构性能的耦合关系:提升电磁屏蔽常导致刚度下降,复杂环境下矛盾加剧,亟需电磁兼容与结构刚度的协同设计。当前研究存在电磁与结构仿真割裂、多场建模精度不足,边界简化削弱预测能力;拓扑结果几何复杂,缺乏可制造性约束,阻碍工程应用。为此,需构建统一电磁-结构耦合有限元模型,引入电磁损耗密度为关键约束,建立可验证的协同优化流程。通过协同迭代与灵敏度过滤,提升拓扑边界清晰度和制造可行性,推动设计从“理论可行”迈向“工程可实现”。

1 拓扑优化轻量化腔体电磁兼容与结构设计协同方法概述

1.1 拓扑优化基础理论

拓扑优化作为实现结构轻量化的关键手段,其本质是在给定设计域内通过算法搜索最优材料分布,以满足特定性能目标。变密度法作为主流实现方式,通过引入连续化材料密度变量,使优化过程可在数学上连续求解,避免传统离散拓扑优化中出现的“棋盘格”现象。多目标优化策略的引入进一步拓展了其适用范围,允许在减重与刚度提升之间进行权衡,使设计结果更贴近实际工程需求。为提升求解稳定性与收敛性,灵敏度过滤技术被广泛采用,通过平滑材料密度梯度降低局部不连续性,避免出现非物理性结构。协同迭代策略则进一步增强了优化过程的适应性,能够在不同设计阶段动态调整目标权重,确保最终方案同时满足载荷工况与制造约

束。优化建模流程需系统考虑目标函数、边界条件与物理约束,结合有限元验证与几何重构,形成完整闭环,确保设计方案具备可实现性与工程适用性。

1.2 电磁兼容关键技术

电磁兼容性能是轻量化腔体在复杂电磁环境中稳定运行的核心指标,其评价涵盖电磁屏蔽效能、电磁干扰抑制能力与抗扰度水平。在协同设计框架下,电磁兼容建模需基于多物理场仿真手段,综合考虑电场、磁场与结构变形之间的相互作用。电磁损耗密度分析作为关键工具,可定量评估结构内部电磁能量耗散分布,进而识别高热源区域与屏蔽薄弱点,为优化提供精确导向。仿真模型的准确性直接决定了优化结果的可信度,需通过与实测数据对比进行验证,确保理论预测与实际表现一致。特别是在高频工作条件下,结构尺寸与材料非均匀性对电磁场分布的影响不可忽视,需在建模中引入精细化网格划分与本构关系描述。仿真驱动的反馈机制使得电磁性能指标可被嵌入优化目标函数,实现电磁性能与结构性能的同步调优,显著提升整体设计质量。

1.3 结构设计协同需求

结构设计协同的关键在于打破电磁与结构分析的边界,建立二者之间的映射关系。电磁-结构耦合建模需综合考虑结构刚度对电磁场边界条件的扰动效应,以及电磁载荷对结构变形的反作用。3D打印技术的成熟为复杂拓扑结构的制造提供了可能,但需在优化过程中引入可加工性分析,避免出现悬臂、过薄或难以支撑的几何特征。联合仿真策略通过在不同仿真平台间传递数据,实现结构响应与电磁场分布的实时交互,支撑多场协同优化。仿真驱动的设计流程可大幅缩短研发周期,减少试

制成本。同时,通过引入制造约束作为优化边界,确保最终设计方案不仅性能优异,且具备可量产性。该方法为轻量化腔体在航空、航天、轨道交通等高可靠性场景中的应用奠定了坚实基础^[1]。

2 拓扑优化轻量化腔体电磁兼容与结构设计协同方法关键问题

2.1 电磁性能与结构性能目标冲突

电磁屏蔽效能的提升往往依赖于材料导电性增强或连续导电路径的构建,这通常会导致结构材料分布不均,削弱整体刚度。反之,为提高结构刚度而增加材料密度或强化支撑结构,又可能破坏电磁场的均匀分布,降低屏蔽效率。现有优化策略多采用加权求和法处理多目标冲突,但该方法对性能边界敏感度低,难以捕捉电磁与结构性能之间的非线性交互效应。缺乏有效的权衡机制,使得优化结果在某一性能指标上取得突破的同时,另一性能显著退化。尤其在高频段,电磁场对结构表面不连续性的响应极为敏感,微小几何缺陷即可引发电磁波反射与绕射效应,加剧屏蔽性能波动。因此,需建立基于物理机制的协同优化模型,以实现电磁屏蔽效能与结构刚度的动态平衡。

2.2 多场仿真耦合精度受限

电磁仿真与结构仿真在建模过程中常采用独立的单元类型与边界条件,导致多场耦合分析中存在显著失真。电磁场边界条件设定常忽略结构表面微小凹凸引起的边缘效应,而结构仿真则难以准确反映电磁载荷对结构形变的影响。此外,现有仿真模型多采用理想化假设,如忽略材料非线性、热-电-力耦合效应,导致仿真结果与真实工况存在偏差。缺乏统一的建模框架,使得电磁场与应力场无法在相同网格体系下同步求解,限制了耦合分析的精度与效率。尽管已有研究尝试引入多物理场耦合有限元框架,但其在复杂几何结构中的适用性仍受限,尤其在高频、强电磁激励场景下,数值误差易累积并放大。提升仿真精度的关键在于构建统一的物理场建模机制,实现电磁与结构响应的同步更新与动态反馈^[2]。

2.3 优化结果制造可行性差

拓扑优化生成的结构形态常具有高度复杂性与非规则性,如细长悬臂、薄壁连接或多孔交织结构,此类几何特征在传统加工工艺中难以实现。即便采用增材制造技术,仍可能面临支撑结构过多、热应力集中、层间结合强度不足等问题。现有优化方法普遍缺乏面向制造工艺的约束机制,导致优化结果需经大量后处理才能适配实际生产流程。这不仅增加设计周期,也引入人为干预带来的不确定性。为解决该问题,需在优化过程中引入

可加工性约束,如最小特征尺寸、壁厚限制、悬垂角控制等,使结构形态在满足性能目标的同时具备制造可行性。基于增材制造的工艺特点建立约束体系,已成为提升拓扑优化工程适用性的关键路径。

2.4 协同优化算法动态响应机制缺失

现有协同优化算法多基于静态场假设,未考虑电磁损耗密度随频率与工况变化的动态特征。电磁损耗密度在局部区域集中时,可能引发局部温升,进而改变材料电导率与结构刚度,形成非线性反馈机制。若优化模型未纳入此类动态响应特性,易导致优化结果在实际运行中性能劣化。此外,电磁-结构耦合性能之间的量化映射关系尚未建立,难以实现性能协同预测。缺乏基于物理规律的映射模型,使得多目标优化难以实现全局最优。引入电磁损耗密度作为约束变量,可有效抑制局部过热与性能集中现象,提升结构稳定性。结合可加工性约束与动态响应机制,能够显著增强优化结果的鲁棒性与可靠性^[3]。

3 拓扑优化轻量化腔体电磁兼容与结构设计协同方法

3.1 建立电磁-结构耦合有限元模型

电磁场与结构响应在实际工况中相互影响,传统分离式建模难以准确反映真实物理行为。通过构建电磁-结构耦合有限元模型,可实现电场、磁场与位移场在相同网格空间内的协同计算,显著提升仿真精度。该模型在边界条件处理、材料非线性响应建模方面具备更强适应性,尤其适用于高频电磁环境下腔体结构的瞬态响应分析。在耦合策略上,采用双向顺序耦合方法,先将电磁场计算所得的麦克斯韦应力张量与焦耳热损耗作为载荷条件映射至结构场,再将结构变形后的几何位形反馈至电磁场,更新其边界与网格状态,从而形成闭合的物理信息循环。借助多物理场耦合框架,可有效捕捉电磁波反射、吸收与结构振动之间的相互作用机制,为后续优化提供可靠输入。模型验证阶段引入实验数据与参数辨识技术,通过对比标准腔体模型的屏蔽效能实测值与仿真值,校准材料本构参数与边界阻抗条件,进一步提升仿真可信度^[4]。

3.2 构建多目标优化模型

为兼顾电磁屏蔽效能与结构刚度需求,需建立包含多目标函数与约束条件的综合优化框架。目标函数中引入电磁屏蔽效能指标与电磁损耗密度,前者反映腔体对电磁波的抑制能力,后者表征能量耗散水平,二者共同决定电磁兼容性表现。同时,将结构刚度与质量作为关键性能指标纳入优化过程,形成多目标优化问题。在目标函数构建中,电磁屏蔽效能指标基于腔体表面电场透射系数与反射

系数的比值进行定量刻画,而电磁损耗密度则通过求解时谐场下的功率损耗密度分布获取,以此表征内部能量耗散的空间不均匀性。通过加权法或Pareto前沿分析策略,可获取在性能与轻量化之间具有最优平衡的设计方案。特别地,在加权法中引入动态权重调节机制,依据当前迭代步中目标函数的相对变化率自动调整各子目标的优先级,避免固定权重导致的优化方向偏移。该模型在求解过程中引入梯度信息与灵敏度分析,采用伴随变量法高效计算目标函数对设计变量的敏度,提升收敛效率与解的稳定性。优化过程充分考虑电磁场对结构变形的反作用,避免忽略耦合效应导致的性能偏差^[5]。

3.3 提升拓扑边界清晰度与制造可行性

拓扑优化结果常呈现模糊边界与复杂几何特征,难以直接用于制造。为解决此问题,采用灵敏度过滤与水平集投影函数相结合的方法,对设计变量进行空间平滑处理,有效提升边界清晰度与结构可制造性。具体而言,在每次迭代更新后,首先对灵敏度场进行基于Helmholtz偏微分方程的过滤操作,抑制高频振荡与棋盘格分布,随后通过投影函数将连续密度场映射为逼近0-1二值分布的锐利拓扑形态,显著减少灰色过渡区域,降低加工过程中材料界定不确定性。此外,优化求解策略中引入自适应步长控制与局部更新机制,根据相邻迭代步中目标函数与约束违反量的变化幅度动态调整移动限,避免因步长过大引发设计变量剧烈振荡或局部失稳现象。在边界清晰度提升的同时,该方法还有效减少了后处理修复所需的几何重构工作量,使结构形态在保持高性能的前提下,对增材制造工艺的兼容性得到实质性改善。

3.4 构建可加工性约束模型

针对增材制造工艺特点,构建可加工性约束模型,明确限制悬臂结构长度与薄壁特征厚度。通过设定最小支撑长度与最小壁厚阈值,避免因结构悬空或过薄导致打印失败或结构失效。在约束建模中,将悬臂长度约束转化为对设计域内局部密度梯度的几何限制,采用基于投影距离的悬垂角检测算法,逐单元判定需添加支撑的区域,并将其几何尺寸控制在工艺允许范围内。同时,

引入壁厚约束函数,以结构骨架中轴为参考,约束两侧材料堆积半径不低于预设下限,从而保障粉末床熔融工艺中未烧结粉末的有效排出与层间结合强度。约束模型嵌入优化流程中,形成带工艺约束的拓扑优化框架,在每轮迭代中采用拉格朗日乘子法将工艺约束以惩罚项形式引入增广目标函数,确保可行域的有界性与光滑性。结合工艺参数库与材料特性数据库,可实现从设计到制造的无缝衔接,为不同打印设备与材料体系提供定制化约束参数。该模型不仅提升结果的可实现性,还有效降低后期加工成本与返工风险,推动设计结果向工程落地转化。

结束语

综上所述,本研究构建电磁-结构耦合有限元模型与多目标优化框架,引入损耗密度与可加工性约束,实现电磁兼容与结构刚度的协同优化。该方法缓解性能目标冲突,提升多场耦合精度与制造可行性。主要贡献在于提出面向增材制造的协同设计范式,为轻量化腔体提供理论与工程方案。但当前动态响应建模不足,未考虑装配服役影响。未来将探索多工况动态响应机制,结合监测数据完善模型,推动航空航天工程应用。

参考文献

- [1]范琳琅,李天箭,王瀚.结构-能量流协同拓扑优化设计方法[J].农业装备与车辆工程,2025,63(04):104-109.
- [2]张磊,寇若洋,岳之斌,等.面向轻量化结构设计连续体拓扑优化研究进展[J].西北工业大学学报,2025,43(04):702-722.
- [3]刘磊,刘杨,刘书田.基于拓扑优化的曲面薄壁结构加筋布局与高度协同优化设计方法[J].计算力学学报,2025,42(04):523-528.
- [4]董伟,李扬,辛克浩,等.基于拓扑优化的点阵-加筋板式结构设计方法[J].西北工业大学学报,2021,39(06):1233-1239.
- [5]阮相当,许孟辉,李萍,等.结构可靠性拓扑优化的深度学习协同方法[J].宁波大学学报:理工版,2024,37(04):103-109.