

基于拓扑优化的空冷岛拖链轻量化设计及随动适配性分析

王井武 左 航

通辽第二发电有限责任公司 内蒙古 通辽 028000

摘要：拓扑优化技术为结构轻量化设计提供新思路，将其应用于空冷岛拖链设计中，可实现材料高效分配。通过构建拖链拓扑优化模型，结合工况施加载荷与约束，经迭代计算得到优化方案，再经性能验证确保强度、刚度等达标。从运动学建模、动态响应分析及适配性评价入手，分析拖链随动适配性。通过协同优化模型与算法，实现轻量化与随动适配性协同提升，为拖链设计提供技术支撑，提升空冷岛系统稳定性与经济性。

关键词：拓扑优化；空冷岛拖链；轻量化设计；随动适配性

引言

空冷岛作为火力发电关键设备，其拖链性能关乎系统稳定。传统拖链设计存在重量大、随动适配性不足等问题，影响运行效率。拓扑优化在结构轻量化方面优势显著，可精准优化材料分布。本文将拓扑优化引入空冷岛拖链设计，构建轻量化设计方法，分析随动适配性，建立协同优化模型，旨在解决传统设计缺陷，为拖链设计提供创新方案，推动空冷岛技术发展。

1 拓扑优化与空冷岛拖链概述

1.1 拓扑优化

拓扑优化作为结构优化领域的关键数学方法，聚焦于在既定的负载状况、约束条件以及性能指标限定下，对给定区域内的材料分布予以优化。核心优势在于拥有相较于尺寸优化和形状优化更为广阔的设计自由度，能够解锁更大的设计空间。从操作方式来看，连续体拓扑优化会把优化空间的材料离散成数量众多的壳单元或者体单元，离散结构拓扑优化则是在设计空间内构建一个由有限个梁单元组成的基结构。依据特定算法来判定设计空间内单元的去留，最终留存下来的单元便构成了理想的拓扑方案。目前，连续体拓扑优化方法丰富多样，像均匀化方法、变密度法、渐进结构优化法（ESO）、水平集方法等都颇具代表性。在实际应用场景中，诸多行业借助拓扑优化技术，成功实现了结构性能的提升以及轻量化设计的目标，例如航空航天领域通过该技术减轻飞行器部件重量，进而提升燃油效率和飞行性能。

1.2 空冷岛拖链

空冷岛拖链作为保障空冷岛系统稳定运行的重要部件，在火力发电等相关领域扮演着不可或缺的角色。空冷岛平台采用直接空气冷却技术，以空气取代水作冷

却介质，节水优势突出，广泛应用于北方缺水地区火力发电厂。空冷岛拖链主要用于束缚电缆、电线、空压管及油压管等，保障这些管线在设备运行中能顺畅转动和运动。它由多个相互铰接的连接单元组成，部分设计精巧：在两侧板间连接减摩擦滚柱，可有效减小拖链相对运动产生的摩擦力；在拖链下方左右两侧安装导向片，能精准导向，防止拖链运动偏移，确保空冷岛上下两部分运动机构同步运行。实际运作中，运动机构的拖链较长，随着运动距离增加，拖链携带电缆重量上升，对导向槽的摩擦力也增大。空冷岛拖链的合理设计和良好性能尤为关键，其关乎整个空冷岛系统运行的稳定性和可靠性。

2 基于拓扑优化的空冷岛拖链轻量化设计方法

2.1 拖链拓扑优化模型构建

在构建拖链拓扑优化模型时，需综合考量拖链的实际工作状况。第一，精确勾勒出拖链的设计空间，将其复杂的几何形状进行合理简化，忽略对整体性能影响甚微的细节特征，以此降低计算的复杂度，同时确保关键结构得以完整保留。第二，依据空冷岛的运行工况，精准施加各类载荷，比如因运动机构移动引发的惯性力、电缆自身重力以及拖链运动时与导向槽间的摩擦力等。在约束条件设置上，不仅要对拖链的位移边界加以约束，模拟其实际安装与运行时的固定方式，还要针对拖链的强度、刚度等性能指标设定约束范围。材料属性方面，选用符合空冷岛工作环境的材料，并准确赋予其弹性模量、泊松比、密度等参数。借助有限元分析软件，将拖链离散为数量众多的单元，构建起能够精准反映拖链力学行为的有限元模型，为后续的拓扑优化奠定坚实基础。

2.2 拓扑优化迭代计算与结果处理

拓扑优化迭代计算依托特定的优化算法展开,以变密度法为例,在每一次迭代过程中,算法依据目标函数和约束条件,对拖链各单元的材料密度进行调整。通过不断迭代,逐步淘汰对结构性能贡献较小区域的材料,促使材料向关键受力部位聚集。在这一过程中,需密切关注迭代的收敛情况,设定合理的收敛准则,如目标函数的变化量小于特定阈值,或者材料分布的变化趋于稳定等。当迭代计算完成后,得到的结果往往呈现出复杂且不规则的形态,存在大量的细微特征与过渡区域。对此,需运用后处理技术,例如采用平滑算法对结果进行处理,去除不合理的锯齿状或尖锐特征,使其更趋近于可制造的形态。依据实际制造工艺的要求,对拓扑优化结果进行适当的简化与调整,为后续的轻量化设计方案制定提供清晰、可行的参考。

2.3 轻量化设计方案的性能验证

针对基于拓扑优化得出的轻量化设计方案,需进行全面且严格的性能验证。在强度验证环节,运用有限元分析,模拟拖链在满载、偏载等极端工况下的受力情况,计算其应力分布,确保拖链各部位的应力均低于材料的许用应力,避免出现强度失效的风险。刚度验证方面,通过施加与实际工作相当的载荷,分析拖链的变形情况,保证其变形量在允许范围内,以维持空冷岛系统的正常运行精度。还需对拖链的疲劳性能进行评估,考虑到空冷岛长期运行过程中拖链频繁往复运动的特性,借助疲劳分析理论与模型,预测拖链的疲劳寿命,确保其能够满足空冷岛的长期使用需求。若在性能验证过程中发现问题,需及时回溯优化过程,调整相关参数,重新进行优化与验证,直至轻量化设计方案的性能完全满足空冷岛的实际运行要求^[1]。

3 基于拓扑优化的空冷岛拖链轻量化的随动适配性分析

3.1 拖链随动运动学建模与仿真

拖链随动运动学建模需精准捕捉其在空冷岛系统中的动态轨迹特征,结合拖链多单元铰接的结构特性,构建包含旋转铰约束与刚性体运动参数的多体动力学模型。通过引入Denavit-Hartenberg参数法描述相邻单元间的位姿关系,将拖链的整体运动分解为各单元的平移与转动分量,同时考虑导向片与导向槽接触产生的约束条件,建立非线性运动学方程。仿真过程中,基于实际运行的加速度曲线与运动行程,采用多体动力学软件进行数值求解,模拟拖链在往复运动中的瞬时位置、速度及加速度变化规律,重点分析长距离运动时单元间铰接处

的相对转角分布,以及导向片与导向槽接触点的轨迹偏移量。通过引入虚拟样机技术,将电缆重量的分布特性转化为随运动位置变化的变载荷,实现拖链在动态工况下的运动学行为复现,为后续结构动态响应分析提供高精度的运动边界条件。

3.2 随动过程中的结构动态响应分析

随动过程中拖链的结构动态响应分析需结合运动学仿真结果,建立考虑惯性效应与接触碰撞的瞬态动力学模型。基于拓扑优化后的轻量化结构,将拖链离散为包含柔性单元的有限元模型,通过模态叠加法求解其在周期性运动激励下的振动响应,重点捕捉共振频率附近的位移幅值与应力集中区域^[2]。针对拖链与导向槽的动态接触,采用罚函数法处理接触界面的法向约束力与切向摩擦力,模拟不同运动速度下接触应力的时变特性,分析轻量化结构在高频往复运动中的局部塑性变形趋势。引入结构阻尼系数与材料黏弹性参数,修正动态响应计算结果,评估拖链在长期交变载荷作用下的能量耗散规律,特别关注单元铰接处的疲劳应力幅值与累积损伤程度。通过对轻量化前后拖链的动态响应差异,验证拓扑优化方案在保持结构动态稳定性方面的有效性,为随动适配性评价提供量化依据。

3.3 随动适配性评价指标与验证方法

随动适配性评价需构建多维度量化指标体系,突破传统单一性能指标的局限,从运动协调性、结构耐久性与能量损耗三个层面建立评价模型。运动协调性指标采用拖链实际运动轨迹与理论轨迹的偏差度,结合单元间最大相对转角与导向偏移量的加权值,量化结构在随动过程中的运动精度;结构耐久性指标引入动态安全系数与疲劳损伤等效值,通过雨流计数法处理应力时程曲线,评估轻量化结构在设计寿命内的抗疲劳性能;能量损耗指标以单位行程内的摩擦能耗与振动能耗之和为基准,反映拖链随动过程中的动力效率。验证方法上,采用物理样机试验与数字孪生仿真相结合的方式,通过高精度激光跟踪仪采集拖链运动轨迹数据,对比仿真结果与实测值的吻合度,同时利用疲劳试验台模拟长期往复运动,监测结构关键部位的损伤演化过程,最终通过指标权重赋值与综合评分,实现对轻量化拖链随动适配性的全面评估。

4 基于拓扑优化的空冷岛拖链轻量化设计与随动适配性的协同优化

4.1 协同优化模型的构建

(1) 融合拖链轻量化设计与随动适配性的多元目标,将拖链质量最小化、随动运动精度偏差最小化以及

结构疲劳寿命最大化等作为核心目标函数。综合考量拖链材料特性、几何尺寸限制、运动学与动力学约束等因素，构建涵盖材料力学、运动学方程以及动力学平衡方程的复杂约束条件体系，以此搭建起完整的协同优化数学模型框架。（2）基于多物理场耦合理论，将拖链的结构力学场、运动学场以及热场等进行耦合分析。在模型中精确描述各物理场之间的相互作用关系，如运动产生的摩擦热对材料性能及结构变形的影响，以及结构变形反过来对运动精度的干扰等，使模型能够更真实地反映拖链在实际工况下的综合性能。（3）引入虚拟样机技术，构建拖链的虚拟模型，并赋予其与实际一致的材料属性、几何参数以及连接特性。通过在虚拟环境中模拟拖链的工作过程，获取丰富的性能数据，对协同优化模型进行验证与校准，不断优化模型参数，提高模型的准确性与可靠性，为后续的协同优化计算提供坚实基础^[3]。

4.2 协同优化算法与迭代过程

（1）采用智能优化算法与传统优化算法相结合的混合算法策略。以遗传算法为基础，利用其强大的全局搜索能力在广阔的解空间中寻找潜在的优化方向；引入序列二次规划算法，在遗传算法确定的局部区域内进行精确搜索，提高优化解的精度，实现优势互补，加快收敛速度。（2）在迭代过程中，依据每次迭代得到的优化结果，动态调整算法参数。例如，根据目标函数的变化趋势自适应调整遗传算法的交叉概率与变异概率，当算法趋于收敛时，适当降低变异概率以稳定搜索方向，而当陷入局部最优时，增大变异概率以跳出局部区域，确保算法能够持续高效地搜索到更优解。（3）构建协同信息交互机制，使轻量化设计与随动适配性两个子优化过程能够实时交换信息。轻量化设计模块传优化结构参数至随动适配性模块，助其更新分析模型；随动适配性模块回传结构动态响应、运动精度等反馈，引导轻量化设计优化材料分布与结构，通过此交互，实现两个子过程的协同进化。

4.3 协同优化结果的验证与应用

（1）制作物理样机，在模拟空冷岛实际运行环境的

试验台上进行测试。运用高精度传感器监测拖链在不同工况下的运动轨迹、结构应力应变以及疲劳损伤情况等关键性能指标，将测试数据与协同优化仿真结果进行对比分析，验证优化方案的准确性与可靠性。（2）将协同优化后的拖链应用于实际空冷岛项目中，进行长期的现场运行验证。跟踪记录拖链在实际运行过程中的工作状态，统计其故障率、维护周期等数据，评估其对空冷岛系统整体运行稳定性与可靠性的提升效果，以及在实际应用中带来的经济效益与社会效益。（3）根据验证过程中发现的问题与不足，对协同优化模型与算法进行进一步的改进与完善。通过不断迭代优化，形成一套成熟、高效的基于拓扑优化的空冷岛拖链轻量化设计与随动适配性协同优化方案，为该领域的工程实践提供强有力的技术支持与参考范例，推动空冷岛拖链技术的持续发展与创新应用^[4]。

结语

综上所述，基于拓扑优化的空冷岛拖链轻量化设计及随动适配性分析，突破了传统设计的局限。通过拓扑优化实现拖链轻量化，兼顾强度与刚度；结合运动学与动态响应分析，保障随动适配性；协同优化模型实现两者协同提升。该研究不仅为拖链设计提供新方法，还为类似结构优化提供思路。未来可进一步探索新材料与拓扑优化结合，以及智能化适配性调控，持续提升空冷岛系统性能。

参考文献

- [1] 丁伟,刘亚龙,陶贊,等.基于拓扑优化的卫星支架轻量化设计[J].制导与引信,2025,46(2):30-33.
- [2] 彭宗和,张仲曦,户群艳.基于拓扑优化的复杂机械构件轻量化设计研究[J].现代工业经济和信息化,2025,15(3):114-116.
- [3] 王雪涔.空冷岛清洗系统的自动化改造设计[J].电力系统装备,2024(9):81-83.
- [4] 王川保.空冷岛温度场重建装置设计[J].现代工业经济和信息化,2020,10(7):46-47.