

基于拓扑优化的工业厂房钢结构轻量化设计

谢佳伟

北京首钢国际工程技术有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i8.17149

[摘要] 针对工业厂房钢结构传统设计存在的材料冗余问题,拓扑优化技术成为轻量化设计的关键手段。通过分析二者适配性,明确设计目标与约束,构建力学模型并迭代优化拓扑形态,结合荷载精准分析、材料性能匹配、局部结构优化等策略,在保障结构安全与功能需求的同时,减少钢材用量、降低成本,并延伸全周期价值,为工业厂房钢结构设计向精准化、高效化转型提供有力支撑,推动行业绿色发展。

[关键词] 拓扑优化; 工业厂房; 钢结构; 轻量化设计

中图分类号: TU391 文献标识码: A

Lightweight Design of Steel Structures for Industrial Plants Based on Topology Optimization

Jiawei Xie

Beijing Shougang International Engineering Technology Co., Ltd.

[Abstract] In response to the material redundancy issues in traditional steel structure design for industrial plants, topology optimization technology has become a key method for lightweight design. By analyzing the compatibility between the two, design objectives and constraints are defined, mechanical models are constructed, and topological forms are iteratively optimized. Combined with strategies such as precise load analysis, material performance matching, and local structural optimization, the approach reduces steel usage and costs while ensuring structural safety and functional requirements. Furthermore, it extends the full lifecycle value, providing robust support for the transition of industrial plant steel structure design toward precision and efficiency, thereby promoting green development in the industry.

[Key words] Topology Optimization; Industrial Plants; Steel Structures; Lightweight Design

引言

随着工业建筑对经济性与安全性要求不断提高,传统工业厂房钢结构设计因过度预留安全冗余,易出现材料浪费、综合性能受限等问题。拓扑优化可依据受力情况优化材料布局,与钢结构轻量化需求高度契合。但当前设计中,荷载分析精度不足、多目标平衡欠缺等问题仍存,因此需系统探讨适配性、基础流程与关键策略,为轻量化设计提供清晰路径,助力行业技术升级。

1 拓扑优化与工业厂房钢结构的适配性分析

拓扑优化与工业厂房钢结构的适配性,源于二者在技术逻辑与功能需求上的深度契合,是轻量化设计落地的核心前提。从钢结构特性看,工业厂房钢结构需承受吊车移动荷载、设备静载及风、雪荷载,且跨度大、布局复杂,传统设计易因过度预留安全冗余导致材料浪费。拓扑优化依托有限元分析,可精准定位结构受力关键区与低应力冗余区,实现“强处强化、弱处精简”,与钢结构“高强度、轻量化”的设计诉求高度匹配。从厂房功

能需求看,生产区、仓储区等分区荷载与空间要求差异显著,拓扑优化的参数化优势可定制化优化局部拓扑形态,如针对吊车梁集中荷载优化截面布局,针对屋面檩条均布荷载简化非受力构件。同时,轻量化带来的结构自重降低,能减少钢材成本与基础荷载,还可提升抗震性能,适配厂房对经济性与安全性的双重需求。这种技术与需求的双向适配,使拓扑优化成为钢结构设计从经验驱动向数据化转型的关键支撑^[1]。

2 基于拓扑优化的工业厂房钢结构轻量化设计基础流程

2.1 明确设计目标与约束条件

设计目标需兼顾轻量化与安全性,核心目标为在满足结构强度、刚度与稳定性的前提下,最小化钢材用量与结构自重;同时可关联经济目标,如降低材料成本、缩短施工周期等。约束条件需全面覆盖工业厂房钢结构的实际工作场景,包括荷载约束(吊车最大起重量、设备静荷载、风荷载与雪荷载的取值)、几何约束(厂房跨度、柱距、净空高度的限制)、性能约束(结构最

大挠度、应力限值需符合工业建筑设计规范), 以及制造约束(优化后的拓扑形态需便于钢材加工、焊接与安装, 避免出现复杂异形结构)。需通过现场调研与规范梳理, 将约束条件量化为拓扑优化的输入参数, 确保优化方向符合实际需求。

2.2 构建结构力学模型与设计空间

结构力学模型的构建需以工业厂房钢结构的实际结构形式为基础, 包括刚架、桁架、排架等典型结构类型。先确定设计空间, 即钢结构可优化的范围, 如厂房柱、梁、吊车梁等关键构件的截面与长度方向, 明确不可优化区域(如构件连接节点、螺栓孔位置); 再通过有限元软件划分网格, 将钢结构离散为多个单元, 准确模拟构件的几何形态与连接方式。力学模型需准确加载荷载, 根据工业厂房的荷载特性, 将吊车荷载按“移动荷载”模拟, 设备荷载按“集中荷载”布置, 风荷载与雪荷载按规范要求的分布系数施加; 同时考虑荷载组合, 如“永久荷载+可变荷载”“永久荷载+地震荷载”等极端工况, 确保模型能反映结构在不同工况下的受力状态, 为后续拓扑优化提供精准的力学分析基础。

2.3 迭代优化拓扑形态与参数调整

迭代优化是拓扑优化的核心环节, 需基于力学模型输出的应力、应变数据, 逐步调整材料布局。先设定优化目标函数, 以“结构体积最小化”(对应轻量化)为核心目标, 以“应力不超过材料许用值”“挠度不超过规范限值”为约束函数; 通过拓扑优化算法(如变密度法、水平集法), 在设计空间内迭代更新单元材料密度, 删除应力值低于阈值的单元, 保留并强化高应力区域单元, 形成初始拓扑形态。迭代过程中需动态调整优化参数, 如初始材料密度、迭代步长、收敛准则, 避免出现拓扑形态畸变(如局部过度减材导致结构断裂风险); 当迭代结果满足收敛条件(如连续两次迭代的体积变化率小于5%)时, 输出优化后的拓扑模型。同时需结合工业厂房钢结构的构造要求, 对初始拓扑形态进行平滑处理, 如将不规则的材料边界调整为便于加工的直线或圆弧, 确保优化结果具备可制造性^[2]。

2.4 拓扑优化结果的可行性校验

可行性校验是确保轻量化设计落地的关键步骤, 需从结构性能、制造施工、经济成本三个维度展开。结构性能校验通过重新加载荷载, 验算优化后结构的应力分布、挠度值、抗震系数, 确认是否满足设计约束条件, 若存在局部应力超标, 需回溯调整拓扑形态, 如在高应力区域补充材料; 同时校验结构的稳定性, 如柱的长细比、梁的整体稳定系数, 避免因轻量化导致结构失稳。制造施工校验需结合钢结构加工工艺, 评估优化后的拓扑形态是否便于切割、焊接、拼装, 如复杂镂空结构需确认是否可通过数控切割实现, 异形截面是否可通过轧制或焊接成型; 经济成本校验对比优化前后的钢材用量、加工工时、运输费用, 计算成本节约率, 确保轻量化设计能实现经济收益。通过多维度校验, 剔除不可行的优化方案, 形成最终的轻量化设计方案。

3 基于拓扑优化的工业厂房钢结构轻量化设计关键策略

3.1 荷载精准分析: 优化设计的前提基础

(1) 区分荷载类型与特性, 永久荷载(如结构自重、固定设备重量)需通过详细的设备参数与构件尺寸计算, 确保数值准确; 可变荷载中, 吊车荷载需考虑吊车的工作级别(如A3-A8级)、起重量、运行速度, 通过动态力学分析模拟吊车启动、制动时的冲击荷载, 避免按静态荷载取值导致的优化偏差; 风荷载与雪荷载需结合厂房所在地的气象数据, 参考建筑结构荷载规范, 确定基本风压、雪压值, 并根据厂房高度、体型系数调整荷载分布, 如迎风面的风荷载系数需高于背风面。(2) 注重荷载传递路径分析, 通过有限元模型追踪荷载从作用点到基础的传递过程, 识别荷载传递的关键构件与薄弱环节, 如吊车荷载通过吊车梁传递至柱, 需重点优化吊车梁与柱的连接区域拓扑形态; 同时考虑荷载组合的极端工况, 如“最大吊车荷载+最大风荷载”“设备荷载+地震荷载”, 确保拓扑优化在最不利工况下仍能满足安全要求。通过荷载精准分析, 为拓扑优化提供可靠的力学输入, 避免因荷载取值偏差导致的材料冗余或安全隐患^[3]。

3.2 材料性能匹配: 提升轻量化设计效率

(1) 根据优化后的结构应力分布选择钢材牌号, 高应力区域(如吊车梁受拉段、柱脚节点)需选用高强度钢材(如Q355、Q460), 利用其高抗拉强度特性减少材料用量; 低应力区域(如梁的非受力翼缘、柱的中间段)可选用普通强度钢材(如Q235), 在保证强度的前提下降低材料成本, 实现“高应力区用高强钢、低应力区用普通钢”的差异化材料布局。(2) 考虑材料的加工性能与拓扑形态的适配性, 如优化后若存在复杂弯曲或焊接节点, 需选用焊接性能好的钢材(如Q355ND), 避免因材料脆性导致焊接开裂; 若拓扑形态以直线切割、简单拼装为主, 可选用加工性能更优的钢材, 提升施工效率。同时注重材料的疲劳性能, 工业厂房中吊车梁、设备支撑梁等构件需承受反复荷载, 需选择疲劳强度高的钢材, 并在拓扑优化中避免应力集中区域(如锐角、突变截面), 减少材料疲劳损伤风险, 通过材料性能与拓扑形态的精准匹配, 在轻量化的同时提升结构耐久性。

3.3 局部结构拓扑优化: 满足功能分区需求

(1) 生产区钢结构需重点优化吊车梁与柱的拓扑形态, 因生产区常配备重型吊车, 吊车梁需承受集中移动荷载, 拓扑优化中需强化梁的受弯段与支座连接区域, 采用“变截面”拓扑形态, 即梁的跨中区域根据弯矩分布减薄腹板厚度, 支座区域加厚腹板与翼缘, 提升抗剪与抗弯能力; 柱的拓扑优化需结合吊车荷载的水平力, 在柱的中部区域优化截面形态, 如采用“工字形”向“箱形”过渡的拓扑结构, 增强抗侧移稳定性。(2) 仓储区钢结构以承受均布荷载(如货物堆载)为主, 屋面梁与檩条的拓扑优化需注重整体受力均匀性, 屋面梁可采用“桁架式”拓扑形态, 通过优化腹杆的数量与布置方式, 减少非受力腹杆, 保留关键受力腹杆, 实现轻量化; 檩条的拓扑优化可采用“冷弯薄壁”形式, 根据屋面荷载分布优化截面高度与壁厚, 在荷载较小区域减小截面尺寸, 降低材料用量。设备区钢结构需适配设备的固定与安装需求, 拓扑优化中需预留设备螺栓连接孔位, 在孔位周边强化

材料布局,避免孔位导致的应力集中,同时根据设备的振动特性,优化支撑结构的拓扑形态,增加结构刚度,减少振动传递,满足设备运行的稳定性需求^[4]。

3.4多目标协同优化:平衡安全与经济

(1)建立多目标优化函数,以“钢材用量最小化”(轻量化目标)、“结构应力最大值最小化”(安全性目标)、“建造成本最低化”(经济性目标)为核心目标,通过权重分配明确各目标的优先级,如在重型工业厂房中,安全性目标权重高于经济性目标,需适当降低轻量化程度以保证结构安全;在轻型工业厂房中,经济性目标权重可提升,可进一步加大轻量化力度。(2)采用多目标优化算法(如非支配排序遗传算法),迭代生成多个Pareto(帕累托)最优解,每个解对应不同的轻量化程度、安全冗余与成本水平,设计人员可根据厂房的实际需求(如投资预算、安全等级)选择最优方案。在协同优化过程中,需重点校验轻量化与稳定性的平衡,如当钢材用量减少超过20%时,需重新验算结构的整体稳定系数(如刚架的侧移刚度、柱的长细比),若稳定系数不满足规范要求,需调整拓扑形态,在关键区域补充材料;同时校验经济性与施工效率的平衡,优化后的拓扑形态若过于复杂导致加工成本上升,需适当简化形态,确保轻量化带来的成本节约大于加工成本增加,通过多目标协同优化,实现“安全可靠、经济高效、轻量化”的综合设计效果。

3.5全周期拓扑优化考量:延伸轻量化价值

(1)在设计阶段,拓扑优化需考虑结构的检修与维护空间,如在屋面梁、吊车梁等关键构件的拓扑形态中,预留检修通道与检测孔位,避免因结构封闭导致检修困难,减少后期维护成本;同时优化结构的防腐与防火构造,在拓扑形态中避免积水区域(如凹陷截面),减少钢材锈蚀风险,为防腐涂层施工提供平整表面,提升防腐效果。(2)运营阶段,拓扑优化需适配结构的改造与升级需求,工业厂房常面临设备更新、产能提升等改造需求,拓扑

优化后的钢结构需具备一定的承载冗余,如在柱的设计中预留一定的截面余量,便于后期增加设备荷载时无需大规模改造结构;同时优化结构的可拆卸性,采用“螺栓连接”为主的拓扑形态,减少焊接连接,便于后期结构局部拆除与重建,提升改造灵活性。维护阶段,拓扑优化需降低维护难度,如优化支撑结构的拓扑形态,避免复杂节点(如多杆交汇节点),减少维护时的检测与修复工作量;同时通过拓扑优化减少应力集中区域,降低结构损伤概率,延长维护周期,通过全周期考量,使轻量化设计不仅能降低建设成本,还能提升运营与维护阶段的效率,延伸轻量化的综合价值^[5]。

4 结束语

基于拓扑优化的工业厂房钢结构轻量化设计,以适配性分析为基础,借规范流程保障实施,靠关键策略提升效果,实现安全、经济与轻量化的协同统一,突破传统设计局限,延伸全周期价值,为相关设计提供科学范式。未来需进一步深化技术融合,持续优化设计方案,推动工业厂房钢结构设计向更高效、绿色、经济的方向迈进,为工业建筑发展注入新动力。

[参考文献]

- [1]姚正康,龚鹏,姬书得.基于拓扑优化的多栖无人飞行器机身结构轻量化设计[J].机械设计,2024(09):58-65.
- [2]王普毅,范天峰.武器装备轻量化结构正向设计方法及应用[J].兵器装备工程学报,2024(06):150-158.
- [3]白红,邢鹏飞,吴孟武.连续体结构多工况拓扑优化与轻量化设计研究[J].拖拉机与农用运输车,2024(02):76-83.
- [4]韩玮,王小芬,刘立平,等.双臂悬架零件结构的轻量化设计[J].兰州石化职业技术大学学报,2025,25(02):26-30.
- [5]李鑫,刘畅辉,杜祥永,等.多工位料机旋转部件轻量化优化设计[J].机械研究与应用,2025,38(02):81-84+87.