

塔式起重机臂架腹杆布局及尺寸优化设计

吴青龙¹, 周奇才¹, 熊肖磊¹, 焦洪宇^{1,2}
(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 常熟理工学院汽车工程学院, 江苏 苏州 215500)

摘 要: 为实现塔式起重机臂架布局和尺寸的优化, 提出了桁架结构拓扑及尺寸两阶段优化设计方法. 第一阶段先建立臂架的周期性板梁拓扑优化模型, 使用周期性 SKO 方法对腹板进行连续体拓扑优化, 得到优化的腹板拓扑构型, 并通过提取主应力路径将优化的腹板拓扑结构转化为离散的腹杆布局; 第二阶段以臂架腹杆截面半径为设计变量, 臂架柔度为目标函数, 材料体积为约束条件建立优化模型, 基于 Lagrange 乘子法和库恩塔克条件推导腹杆截面尺寸优化迭代准则, 基于欧拉公式推导了腹杆稳定性约束条件以保证尺寸优化过程中臂架稳定性. 数值分析结果表明, 该优化方法能有效地减轻臂架结构质量, 提高臂架的刚度, 减少变形并降低结构应力水平.

关 键 词: 起重机臂架; 拓扑优化; 尺寸优化; 周期性; SKO; 优化准则法
中图分类号: TH 122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)09-1309-06

Layout and Size Optimization Design of Tower Crane Boom Webs

WU Qing-long¹, ZHOU Qi-cai¹, XIONG Xiao-lei¹, JIAO Hong-yu^{1,2}
(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Automotive Engineering, Changshu Institute of Technology, Suzhou 215500, China. Corresponding author: ZHOU Qi-cai, E-mail: qczhou@tongji.edu.cn)

Abstract: For the layout and size optimization of tower crane booms, a two-stage topology and size optimization method was proposed. In the first stage, a periodic plate-beam topology optimization model of the boom was established, and the continuum topology optimization of the web plate was performed by using the periodic SKO method. After getting the optimized topology of web plate, the optimized web topology was transformed into a discrete web layout through the extraction of the principal stress path. In the second stage, the size optimization mathematical model was established with the web radius taken as the design variable, the boom compliance as the objective function and the material volume of the boom as the constraint. The size optimization criterion was deduced by the Lagrange multiplier method and Kuhn-Tucker condition. In addition, the stability constraints of the webs were proposed to ensure the boom stability during the size optimization process based on the Euler formula. By comparing the original boom with the optimal booms, the optimization method can effectively reduce the mass of the boom, increase the rigidity of the boom, and reduce the deformation and structural stress level.

Key words: crane boom; topology optimization; size optimization; periodicity; SKO (soft kill option); optimization criterion

塔式起重机是我国基础设施建设的重要保障, 目前针对塔式起重机的优化设计较多集中在尺寸优化层次. 冯政钧^[1]对塔式起重机臂架进行了参数化建模和分析, 以臂架杆件尺寸为设计变量, 质量为目标函数, 利用 ANSYS 软件内置的优化模块进行了优化设计. Jia 等^[2]利用 ANSYS APDL 语言建立 QTZ5010 塔架的有限元模型, 通过静力学分析得到应力应变分布及其强度和刚度余量, 以横截面尺寸为设计变量, 在极端工况下建立了动臂的应力和应变数学模型, 实现了塔式起

重机臂架结构的轻量化设计. 在形状优化和拓扑优化方面,研究相对较少. Aelmić 等^[3]对三角形塔式起重机臂架的截面进行了优化设计,推导出实用的优化公式. Mijailović 等^[4]以结构总质量为目标函数,应力为约束条件,对格构形塔式起重机吊臂横截面优化问题开展研究,总结了臂架梯形、三角形和矩形横截面的应用建议. Li 等^[5]基于桁架基结构,使用 SKO 方法得到了优化的臂架杆系布局形式. Wu 等^[6]改进了 SKO 方法并进行了塔式起重机腹杆拓扑布局优化.

在针对细长结构的周期性优化方面, Huang 等^[7]提出了一种利用双向进化结构优化技术对周期性结构进行拓扑优化的方法. 焦洪宇等^[8]研究了基于变密度法的连续体周期性拓扑优化方法,并对桥式起重机箱型主梁进行了周期性拓扑优化.

与现有研究不同,本文提出的塔式起重机臂

架腹杆布局及截面尺寸优化方法的优化流程为:首先建立待优化结构的连续体单元有限元模型;接下来使用连续体拓扑优化方法寻求臂架最优材料布局,并依据主应力路径将连续体拓扑结构转化为离散桁架结构,即完成第一阶段拓扑优化;最后基于优化准则法对臂架杆件的截面尺寸进行优化,得到具有优化的杆件布局和截面尺寸的塔式起重机臂架,完成第二阶段优化.

1 QTZ63 塔式起重机参数

1.1 外形及载荷参数

以某 QTZ63 塔式起重机为对象开展臂架腹杆布局和尺寸的优化研究,臂架结构外形参数如图 1 所示,各杆件参数如表 1 所示.

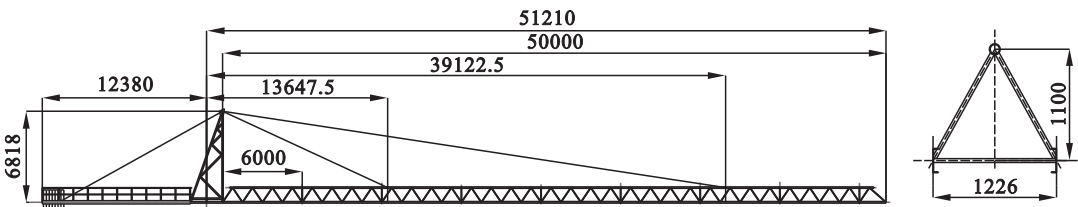


图 1 QTZ63 塔式起重机臂架整体与截面形状及尺寸参数 (mm)
Fig. 1 Shape and size of the overall QTZ63 crane boom and its section

表 1 臂架杆件参数

杆件	截面形状	尺寸/mm	材料
下弦杆	槽钢	12#	Q235C
上弦杆	空心圆管	φ108×8	20 钢
侧腹杆		φ42×4	
下横腹杆		φ38×4	
下斜腹杆		φ42×4	

本文选取 QTZ63 起重机不同幅度下的 3 种额定工况开展优化设计. 3 种工况分别为:工况 A,最大幅度工况;工况 B,最大应力工况;工况 C,最大起重工况. 工况参数如表 2 所示.

表 2 优化工况参数

参数	工况 A	工况 B	工况 C
幅度/m	50	24	14. 7
吊重/t	1. 3	3. 4	6

1.2 原始臂架性能分析

对原始塔式起重机模型进行分析,可得到 3 种典型工况下臂架的性能参数如表 3 所示.

表 3 原始臂架性能参数

参数	工况 A	工况 B	工况 C
应变能/J	1 363. 6	921. 8	606. 7
最大位移/m	0. 273	0. 130	0. 125
最大应力/MPa	93. 5	102	104
失稳因子	5. 8	10. 7	12. 4
臂架质量/kg	3 053. 7		

2 塔式起重机臂架优化模型

使用图 1 及表 1 中的参数建立 QTZ63 塔式起重机臂架优化有限元模型,如图 2 所示. 优化模型具体参数为:上、下弦杆采用梁单元模拟,腹杆采用杆单元模拟. 而待优化区域(即侧面腹杆区域)则将原臂架的侧腹杆删除,代以板壳单元.

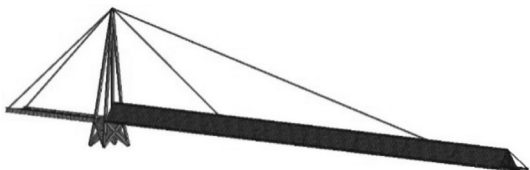


图 2 臂架有限元优化模型
Fig. 2 FEM optimization model of the boom

3 臂架结构腹杆周期性布局优化

使用周期性 SKO 方法对起重臂腹板开展拓扑优化设计^[6], 3 种工况下腹板拓扑优化结果如图 3 所示。可以看出, 各工况下所得臂架腹板优化拓扑虽有一定差异, 但整体布局十分接近, 为简化处理, 本文直接采用工况 A 的拓扑优化结果作为 3 种工况拓扑优化结果的代表。图 4 为工况 A 优化结果的三维详细图示。

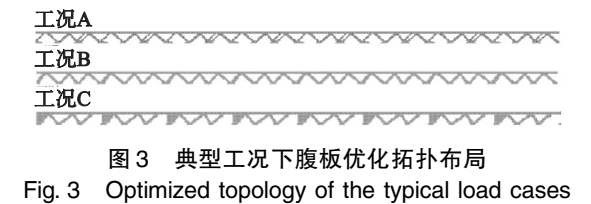


图 3 典型工况下腹板优化拓扑布局
Fig. 3 Optimized topology of the typical load cases

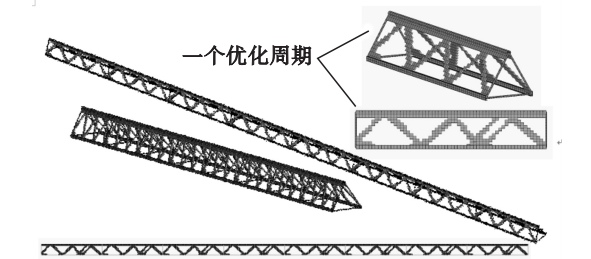


图 4 臂架腹板工况 A 拓扑优化结果
Fig. 4 Web topology optimization result of load case A

提取连续体拓扑优化模型中的主应力路径, 按此路径提取骨架并转化为离散的桁架结构, 得到的优化臂架腹杆布局如图 5 所示。骨架提取算法的详细理论可参见文献[9]。图 5 所示臂架中杆件截面尺寸采用表 1 中所列杆件截面。该结构即为第一阶段拓扑优化后所得臂架, 其性能参数如表 4 所示。

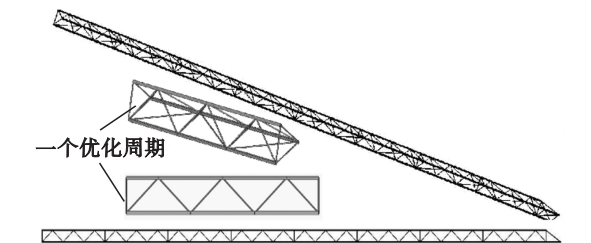


图 5 提取骨架所得拓扑优化臂架
Fig. 5 Topology optimization boom after skeleton extraction

4 臂架结构尺寸优化

4.1 优化数学模型

臂架腹杆尺寸优化数学模型如式(1)所示,

其中设计变量为起重臂腹杆截面参数, 状态变量为腹杆材料体积, 目标函数为起重臂总体柔度。

表 4 拓扑优化臂架性能参数
Table 4 Performance parameters of the topology optimization boom

参数	工况 A	工况 B	工况 C
应变能/J	1 269. 4	874. 8	591. 2
最大位移/m	0. 257	0. 123	0. 116
最大应力/MPa	89. 7	97. 2	98. 7
失稳因子	5. 7	10. 9	12. 4
臂架质量/kg	2 854. 8		

$$\left. \begin{aligned} \text{find } \mathbf{R} &= (r_{1,1}, r_{1,2}, r_{2,1}, r_{2,2}, \cdots, r_{i,j}, \cdots, r_{n,1}, r_{n,2}); \\ \min C(\mathbf{R}) &= \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{i=1}^n \mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_i \mathbf{u}_i; \\ \text{s. t. } \mathbf{K} \mathbf{U} &= \mathbf{F}, \quad i=1, 2, \cdots, n, j=1, 2; \\ V &= \sum_{i=1}^n \pi (r_{i,2}^2 - r_{i,1}^2) l_i \leq V^*; \\ r_{\min} &\leq r_{i,1} < r_{i,2} \leq r_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $r_{i,1}, r_{i,2}, \mathbf{u}_i, \mathbf{k}_i$ 分别为腹杆 i 的内、外半径、节点位移和刚度矩阵; \mathbf{R} 为全部腹杆半径参数向量; $C, \mathbf{U}, \mathbf{K}, \mathbf{F}$ 分别为臂架柔度、位移向量、刚度矩阵和载荷向量; V, V^* 为腹杆体积及约束; r_{\max}, r_{\min} 为半径上下限。

4.2 优化准则推导

基于 Lagrange 乘子法构建数学模型(1)的拉格朗日函数(2), 并基于库恩塔克条件推导得到腹杆尺寸优化准则(3), 并进一步得杆件截面尺寸的迭代公式(4)。该准则的详细推导可参见文献[10]。

$$\begin{aligned} L = C + \boldsymbol{\lambda}_1^T (\mathbf{K} \mathbf{U} - \mathbf{F}) + \mu_1 (V - V^* + x_1^2) + \sum_{i=1}^n \mu_2 (r_{\min} - r_{i,1} + x_2^2) + \sum_{i=1}^n \mu_3 (r_{i,1} - r_{i,2} + x_3^2) + \sum_{i=1}^n \mu_4 (r_{i,2} - r_{\max} + x_4^2). \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\lambda}_1, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ 为拉格朗日乘子, $\boldsymbol{\lambda}_1$ 为矢量, $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ 为标量; x_1, x_2, x_3, x_4 为松弛变量。

$$f_i = \frac{2e_i}{\mu_1 v_i} = 1, \quad (3)$$

其中, $\mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_i \mathbf{u}_i = 2e_i$, e_i 为 i 单元应变能。

$$r_{i,j}^{(k+1)} = \begin{cases} (f_i^{(k)})^\delta r_{i,j}^{(k)}, & r_{\min} < (f_i^{(k)})^\delta r_{i,j}^{(k)} < r_{\max}; \\ r_{\min}, & (f_i^{(k)})^\delta r_{i,j}^{(k)} \leq r_{\min}; \\ r_{\max}, & (f_i^{(k)})^\delta r_{i,j}^{(k)} \geq r_{\max}. \end{cases} \quad (4)$$

式中, δ 为稳定系数, 用于减慢优化速度, 稳定优化进程。

4.3 拉格朗日乘子计算

式(4)中, $f_i^{(k)} = 2e_i^{(k)} / (\mu_1^{(k)} \cdot v_i^{(k)})$, $\mu_1^{(k)}$ 是体积约束 Lagrange 乘子. 假设在 $k + 1$ 次迭代时满足体积约束条件, 即

$$\sum_{i=1}^n \pi((r_{i,2}^{(k+1)})^2 - (r_{i,1}^{(k+1)})^2) l_i = V^* . \quad (5)$$

将 $r_{i,j}^{(k+1)} = f_i^{(k)} r_{i,j}^{(k)}$ 代入式(5), 经整理得到

$$V^* = \sum_{i=1}^n \pi(\frac{2e_i^{(k)}}{\mu_1^{(k)} v_i^{(k)}})^2 \times ((r_{i,2}^{(k)})^2 - (r_{i,1}^{(k)})^2) l_i = \sum_{i=1}^n \frac{4(e_i^{(k)})^2}{(\mu_1^{(k)})^2 v_i^{(k)}} , \quad (6)$$

$$(\mu_1^{(k)})^2 = \frac{4}{V^*} \sum_{i=1}^n \frac{(e_i^{(k)})^2}{v_i^{(k)}} . \quad (7)$$

4.4 稳定性约束条件

依据稳定安全系数法, 对臂架中斜腹杆施加稳定性约束:

$$\sigma \leq \frac{\sigma_{cr}}{n_{st}} = [\sigma_{cr}] . \quad (8)$$

式中: n_{st} 为稳定安全系数; $[\sigma_{cr}]$ 为稳定许用应力. 钢制压杆的 $n_{st} = 1.8 \sim 3.0$, 本文选取 $n_{st} = 2.5$.

细长压杆临界压力和应力由式(9)和式(10)计算.

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} , \quad (9)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{F_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2 A} = \frac{\pi^2 E}{(\frac{\mu l}{i})^2} . \quad (10)$$

式(10)中, 取 $\lambda = \mu l / i$ 表示柔度或长细比, $i = \sqrt{I/A}$ 为惯性半径. 式(11)为新的临界应力表达式:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} . \quad (11)$$

将式(11)代入式(8)并整理得到

$$\lambda^2 \leq \frac{\pi^2 E}{\sigma n_{st}} . \quad (12)$$

通过提取单元的应力及材料弹性模量等, 计算式(12)的右侧部分, 然后提取杆件的面积及惯性矩, 计算式(12)左侧长细比, 对比式(12)不等式两侧是否满足要求, 以限制长细比在稳定范围内. 若不符合要求, 则不接受本次优化所得该杆件的结果, 而依然采用该杆件上次迭代的优化结果, 保证杆件的稳定性.

4.5 臂架腹杆尺寸优化

基于上述桁架结构尺寸优化算法, 使用 ANSYS 软件及 APDL 语言编写优化程序, 对 QTZ63 塔式起重机臂架腹杆开展尺寸优化. 3 种工况优化过程中材料体积和臂架应变能的变化如

图 6 所示, 优化后臂架性能分析结果如表 5 所示.

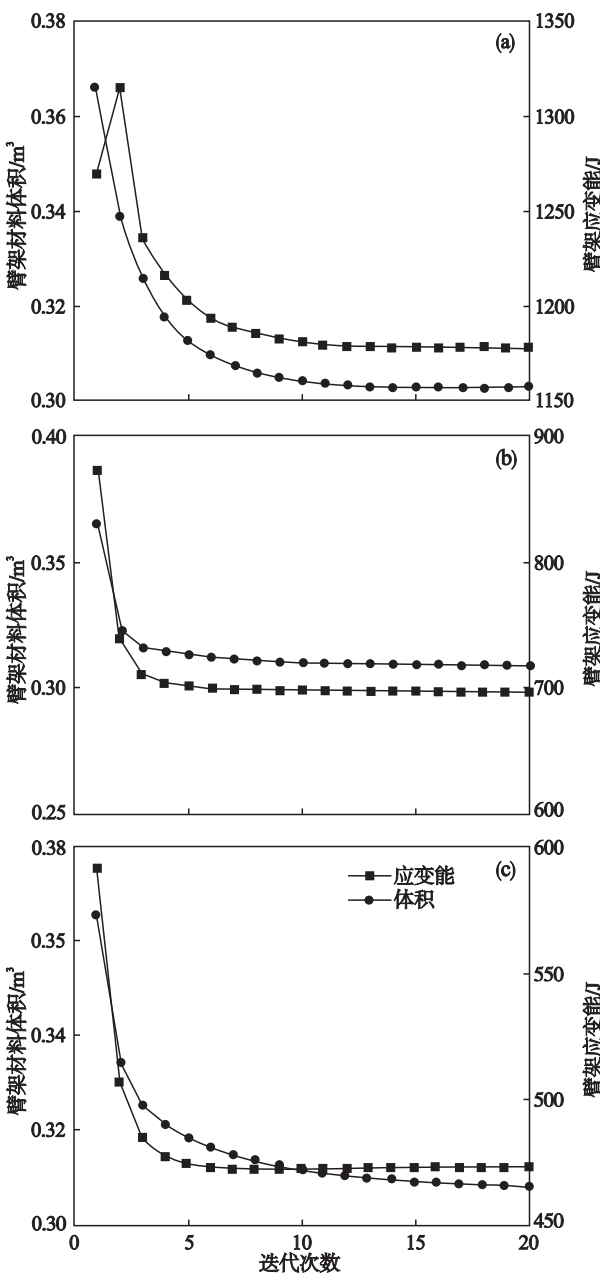


图 6 3 种工况尺寸优化过程中参数变化
Fig. 6 Parameters variation in the size optimization process for 3 load cases

(a)—工况 A; (b)—工况 B; (c)—工况 C.

表 5 3 种工况优化臂架性能参数
Table 5 Performance parameters of the 3 load cases' optimization boom

参数	工况 A	工况 B	工况 C
应变能 /J	1 177.4	696.1	473.0
最大位移/m	0.243	0.101	0.091
最大应力/MPa	85.2	87.3	91.4
臂架质量/kg	2 296.7	2 334.6	2 327.1

图 6 和表 5 为 3 种工况下分别优化所得结果. 为满足多工况的工作需求, 对单一工况下的优

化结果进行包络处理. 即对某一特定杆件, 取 3 种工况优化结果的最大值, 如式 (13) 所示, 以保证承载要求.

$$r_i = \max(r_i^{LS1}, r_i^{LS2}, r_i^{LS3}). \tag{13}$$

式中: r_i 表示包络后杆件 i 的半径参数; $r_i^{LS1}, r_i^{LS2}, r_i^{LS3}$ 分别表示 3 种工况下杆件 i 优化后的半径参数.

尺寸优化结果经包络处理后臂架的性能参数如表 6 所示. 由图 7 可以直观地看出拓扑优化、拓扑及尺寸优化后的臂架与原始臂架的性能变化情况, 其中绘制出了臂架质量、应变能、最大位移及最大应力在优化过程中的变化情况, 而臂架的稳定性基本没有变化, 故未绘制稳定性变化曲线. 与原始臂架相比, 优化后的臂架在钢材使用量减少、

质量减轻的情况下, 加强了臂架的刚性并降低了结构中的最大应力. 图 8 显示了 3 种典型工况下, 原始臂架与两阶段优化臂架的变形情况及性能参数的计算截图.

表 6 拓扑及尺寸优化臂架性能参数

参数	工况 A	工况 B	工况 C
应变能 / J	1 187. 5	743. 3	523. 6
最大位移/m	0. 247	0. 113	0. 105
最大应力/MPa	86. 5	90. 3	95. 5
失稳因子	4. 9	10. 0	12. 2
臂架质量/kg	2 675. 4		

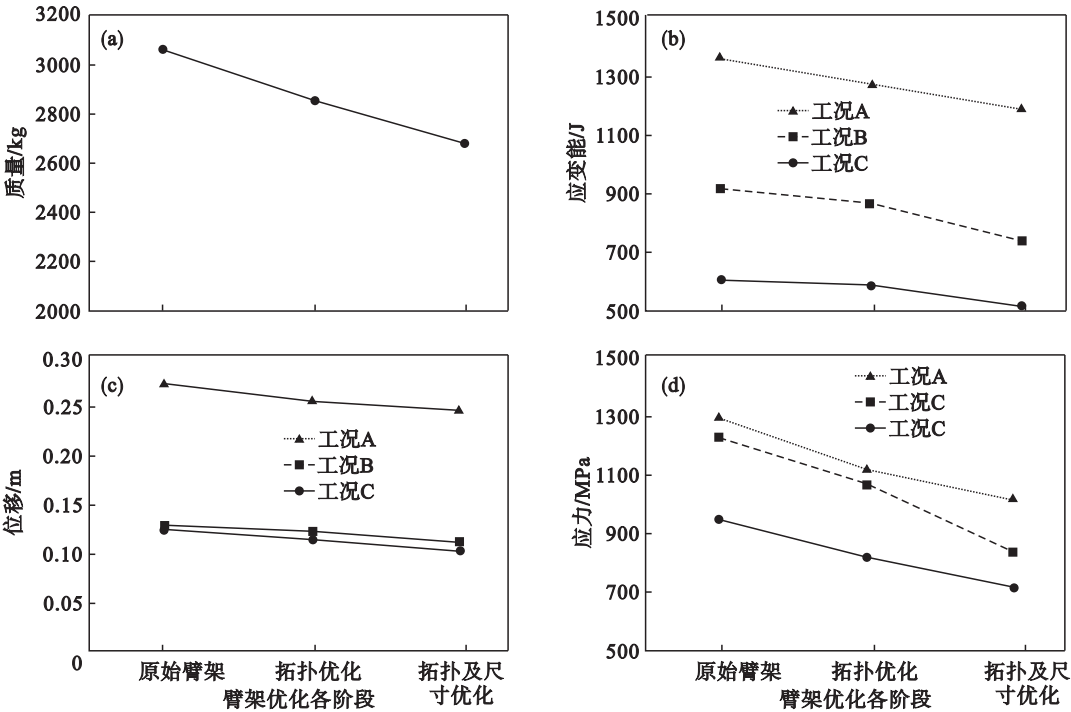
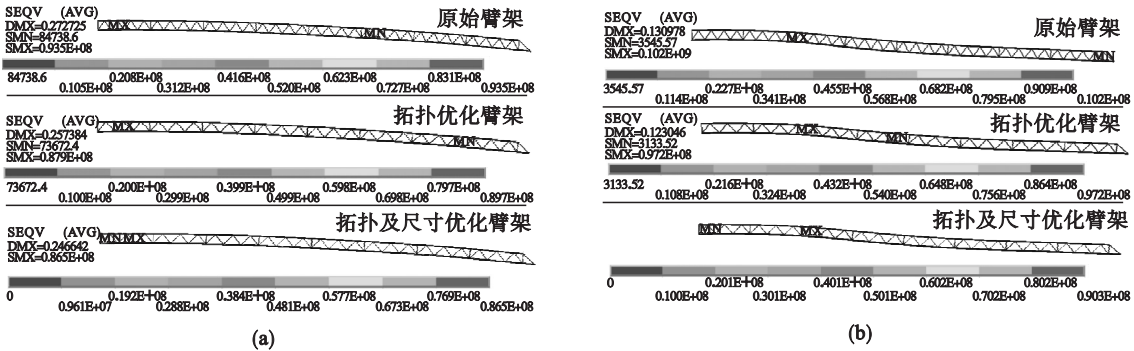


图 7 2 阶段优化过程中臂架性能参数变化
Fig. 7 Performance variation of the boom in the two-stage optimization process
(a)—臂架质量变化; (b)—臂架应变能变化; (c)—臂架最大位移变化; (d)—臂架最大应力变化.



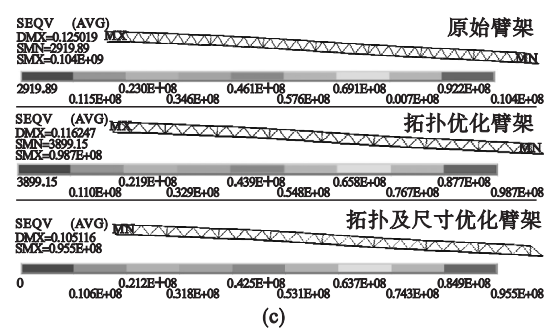


图 8 原始臂架与 2 阶段优化臂架分析结果
Fig. 8 Analysis results of the original boom and two-stage optimization booms
(a)—工况 A; (b)—工况 B; (c)—工况 C.

5 结 论

总体来说,通过 SKO 拓扑优化技术及尺寸优化准则法的应用,本文提出的基于连续体拓扑优化的塔式起重机臂架腹杆布局及尺寸的优化方法依次经过拓扑、尺寸两个阶段的优化过程,拓扑优化得到受力更为合理的腹杆布局,尺寸优化达到最优,减少冗余材料. 详细的数据分析表明,由原始臂架、拓扑优化臂架到拓扑及尺寸优化臂架,不仅质量减轻,臂架的强度、刚度等力学性能得到提高,稳定性也并没有因为材料的减少而遭到破坏. 此外,周期性优化一方面可以克服臂架细长难以优化的问题,同时也有利于优化臂架的实际工程应用.

参考文献:

[1] 冯政钧. 基于参数化建模的塔式起重机稳定性分析及优化设计[D]. 太原:太原科技大学,2013.
(Feng Zheng-jun. Stability analysis and optimization of tower crane based on parametric modeling[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology,2013.)

[2] Jia J, Wan Y P. Light-weight design of tower crane boom structure based on multi-objective optimization [C]// International Conference on Mechanical Science and Engineering. Qingdao: Atlantis Press,2016:1-6.

[3] Aelmić R, Cvetković P, Mijailović R, et al. Optimum dimensions of triangular cross-section in lattice structures [J]. *Meccanica*,2006,41(4):391-406.

[4] Mijailović R, Kastratović G. Cross-section optimization of tower crane lattice boom [J]. *Meccanica*, 2009, 44(5):599-611.

[5] Li W, Zhou Q, Jiang Z, et al. Stability-ensured topology optimization of boom structures with volume and stress considerations [J]. *Structural & Multidisciplinary Optimization*,2017,55(2):493-512.

[6] Wu Q L, Zhou Q C, Zhang R C, et al. Periodic topology optimization of crane boom based on improved soft kill option method[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2017,22(4):459-465.

[7] Huang X, Xie Y M. Optimal design of periodic structures using evolutionary topology optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*,2008,36(6):597-606.

[8] 焦洪宇,周奇才,吴青龙,等. 桥式起重机箱型主梁周期性拓扑优化设计[J]. *机械工程学报*,2014,50(23):134-139.
(Jiao Hong-yu, Zhou Qi-cai, Wu Qing-long, et al. Periodic topology optimization of the box-type girder of bridge crane [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(23):134-139.)

[9] Wu Q L, Zhou Q C, Xiong X L, et al. Layout and sizing optimization of discrete truss based on continuum [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2017, 17(1):43-51.

[10] 周奇才,吴青龙,熊肖磊,等. 桁架结构拓扑及截面尺寸优化设计方法[J]. *西安交通大学学报*,2016,50(9):1-10.
(Zhou Qi-cai, Wu Qing-long, Xiong Xiao-lei, et al. Optimal design of topology and section size of truss structures[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*,2016,50(9):1-10.)

(上接第 1252 页)

[8] Kuang S B, Li Z Y, Yan D L, et al. Numerical study of hot charge operation in ironmaking blast furnace [J]. *Minerals Engineering*,2014,63:45-56.

[9] Zhang W, Zhang J, Xue Z, et al. Unsteady analyses of the top gas recycling oxygen blast furnace [J]. *ISIJ International*, 2016,56(8):1358-1367.

[10] 项钟庸,朱仁良. 降低燃料比和提高富氧率增加高炉产量 [J]. *钢铁*,2010(10):9-12.
(Xiang Zhong-yong, Zhu Ren-liang. Reducing fuel ratio while increasing oxygen enrichment to enhance blast furnace output[J]. *Iron and Steel*,2010(10):9-12.)

[11] 糜克勤. 富氧鼓风在高炉冶炼上的应用 [J]. *钢铁*,1977(1):44-48.
(Mi Ke-qin. Application of oxygen-enriched blast in blast

furnace smelting [J]. *Iron and Steel*,1977(1):44-48.)

[12] 叶才彦. 富氧鼓风强化高炉冶炼的探讨 [J]. *钢铁研究学报*,1988(4):89-94.
(Ye Cai-yan. A discussion on oxygen-enriched blast to intensify blast furnace smelting [J]. *Journal of Iron and Steel Research*,1988(4):89-94.)

[13] 孙国龙,罗果萍,郭卓团,等. 包钢 4 号高炉富氧喷煤强化冶炼实践 [J]. *炼铁*,2007,26(2):34-37.
(Sun Guo-long, Luo Guo-ping, Guo Zhuo-tuan, et al. Practice of intensifying smelting via oxygen-enriched blast and pulverized coal injection operation in No. 4 blast furnace of Baotou steel [J]. *Ironmaking*,2007,26(2):34-37.)

[14] Omori Y. Blast furnace phenomena and modelling [M]. London:Elsevier,1987:51.