

起重机伸缩臂截面拓扑优化

王欣^{*1}, 黄琳^{1,2}, 高媛¹, 高顺德¹, 王益华³

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连重工·起重集团有限公司, 辽宁 大连 116013;

3. 71811 部队装备部, 河南 驻马店 463000)

摘要: 将拓扑优化应用在起重机臂架截面结构设计中, 可以解决起重机伸缩臂结构的最优分布问题, 从而提高起重机伸缩臂的力学性能, 减轻臂架自重. 分析拓扑优化中材料变密度法及其相关参数对拓扑优化结果的影响, 采用结构力学中的拓扑优化方法建立了伸缩吊臂的拓扑优化数学模型. 利用 HyperMesh 软件建立起重机臂架的有限元模型, 并用 OptiStruct 软件进行优化分析, 获得了最优的臂架截面拓扑图. 优化结果表明数学模型是合理的, 拓扑优化应用在起重机臂架截面设计中是有效的.

关键词: 拓扑优化; 变密度法; 起重机; 臂架截面

中图分类号: TH21 **文献标志码:** A

0 引言

起重机伸缩臂截面的设计是起重机结构设计中的重要问题. 伸缩臂截面的合理设计能够充分发挥材料的力学性能, 提高臂架的强度和抗屈曲能力, 从而大幅度提高整机的起重性能. 起重机逐渐地向大吨位和大起升高度方向发展, 对臂架的结构要求越来越高.

目前, 对臂架结构分析的方法有 3 种: 一是采用解析法^[1] 计算吊臂的强度及稳定性; 二是采用有限元软件——Ansys 进行强度分析; 三是采用不改变截面形式而改变臂架截面宽度和高度的方法进行尺寸优化. 这 3 种方法对起重机臂架结构的研究发挥了一定的作用. 但它们有一定的局限性: (1) 不能改变原结构的形状和拓扑形式; (2) 受初始边界的影响很大.

与上述方法相比, 拓扑优化的特点是: (1) 可以通过改变结构的拓扑形式来达到优化结构性能和组成的目的; (2) 可以根据材料“最佳传力路径”来决定单元的取舍, 并根据需要在结构内部自动开孔. 拓扑优化的特点恰恰弥补了上述 3 种方法的局限性, 因此, 拓扑优化在工程应用中的研究具

有重要的现实意义. 目前, 拓扑优化的研究已应用到离散结构和连续结构的优化设计中. Bendsoe 等对桁架结构最小柔顺性设计, 提出了处理非光滑问题的精致算法^[2]; 程耿东等提出了一种 ϵ -Relaxed 算法处理桁架结构奇异最优解问题^[3,4]; 左孔天等研究了热传导散热体的结构优化问题^[5].

本文通过详细分析材料密度法的惩罚因子对收敛结果的影响, 建立伸缩吊臂拓扑优化的数学模型, 并通过对三维伸缩臂架的优化设计验证伸缩吊臂拓扑优化数学模型的正确性及将拓扑优化引入伸缩臂结构设计这一思想的可行性, 为起重机臂架结构设计提供可行性参考.

1 结构拓扑优化模型的建立

1.1 SIMP 方法拓扑优化

变密度法 (solid isotropic microstructure with penalty, SIMP) 是较早采用的拓扑优化方法, 它以连续变量的密度函数形式用显式^[6] 表达单元相对密度与材料弹性模量之间的对应关系, 这种方法基于各向同性材料, 人为假定相对密度和材料特性之间对应关系是一种伪密度. 优化时

以材料密度为拓扑设计变量,这样结构拓扑优化问题被转换为材料的最优分布问题.该方法在多工况应力约束下的平面体结构、二维连续体结构、结构碰撞、汽车车架设计等问题上得到成功的应用.

变密度法引入一种假想的密度可变的材料,优化时以材料密度为拓扑设计变量,材料特性用单元密度的指数函数模拟,即

$$E(x) = E_0 \rho^p(x) \quad (1)$$

式中: E_0 为初始弹性模量; ρ 为单元密度; p 为惩罚因子.

惩罚因子 p 的作用是推动单元密度向 0 或 1 逼近,从而可以得到更加清晰的拓扑形式,它的取值与泊松比有关,如图 1 所示.

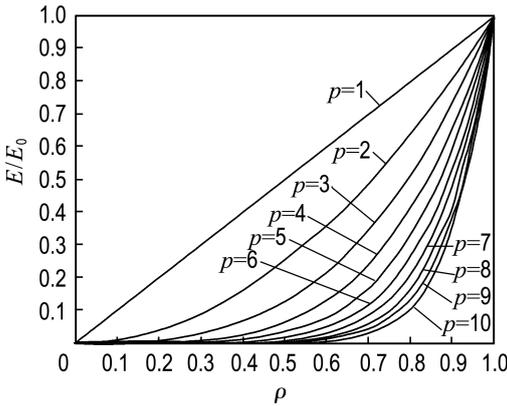


图 1 惩罚因子变化曲线

Fig. 1 The penalization factor variable curves

当密度惩罚项大于 1 时,0~1 的中间密度将逐渐减小,并向 0 或 1 的密度靠近,这样就能得到比较清晰的拓扑结构. p 值的选取,由下式决定^[7]:

二维单元

$$p \geq \max \left\{ \frac{2}{1-\mu}, \frac{4}{1+\mu} \right\} \quad (2a)$$

三维单元

$$p \geq \max \left\{ 15 \frac{1-\mu}{7-5\mu}, \frac{3}{2} \frac{1-\mu}{1-2\mu} \right\} \quad (2b)$$

式中 μ 为泊松比.

当 $\rho(x) = 1$ 时,单元由实材料填充,可以承受与实体材料组成的结构相同的荷载.

当 $\rho(x) = 0$ 时,单元内无材料,不承担荷载.

在拓扑优化一步迭代结束后,某些单元为无材料区域,但这样做的结果会使无材料区域一旦

去除便不能恢复,有很大的弊端.因此在实际操作时,往往不进行网格的重新划分,而是将空洞区域填充一种非常脆的材料,这样可避免有限元分析时产生奇异解,去除的材料可根据需要再次恢复.因此,密度的变化范围为 $\epsilon \leq \rho(x) \leq 1$,其中 ϵ 是一个很小的数,可取 0.001 或更小.

由于变密度法的惩罚因子可调,概念简单,易于实现,计算效率高,对某些问题可得到全局最优解,因此利用变密度法对起重机箱形臂架进行研究.

以结构的最小柔度设计问题为例,其拓扑优化模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & C = F^T U \\ \text{s. t.} \quad & f = \frac{V}{V_0} \\ & F = KU \\ & 0 \leq x_{\min} \leq x^e \leq x_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: C 为柔度矩阵; F 为所施加的荷载向量; U 为位移向量; f 为体积分数; V 为优化后臂架的体积; V_0 为优化前臂架的体积; K 为刚度矩阵; x_{\min} 、 x_{\max} 分别为相对材料密度的最小与最大值; x^e 为单元相对材料密度.

1.2 伸缩臂截面荷载的确定

伸缩式吊臂采用液压缸实现变幅动作.作用在臂架上的荷载有起升荷载、自重、回转惯性力以及风荷载等.臂架自重可视为沿臂架长度方向均匀分布,也可认为按重心位置分配至臂架根部铰点和顶端.图 2 表示臂架受力状态.

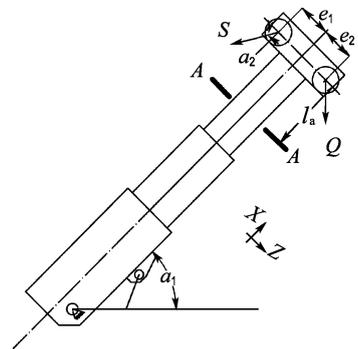


图 2 伸缩臂受力简图

Fig. 2 The sketch of force on telescopic boom

图 2 中,臂架轴线到起升绳导向滑轮中心的距离为 e_1 ;臂架轴线到吊钩定滑轮中心的距离为 e_2 ;臂架仰角为 α_1 ;钢丝绳与臂架轴线的夹角为

a_2 ; A 截面到臂架顶部铰点的距离为 l_a ; 吊重为 Q ; 钢丝绳拉力为 S .

(1) 垂直荷载 Q_0

$$Q_0 = \varphi_2 Q + \frac{1}{3} \varphi_1 G_b \quad (4)$$

式中: φ_1 为起升冲击系数; φ_2 为动荷载系数; G_b 为吊臂重力.

(2) 根据力平衡方程算出 A-A 截面所受的臂架轴向力

$$F_a = S \times \cos a_2 + Q_0 \times \sin a_1 \quad (5)$$

A-A 截面所受的剪切力

$$F_t = Q_0 \times \cos a_1 - S \times \sin a_2 + \varphi_3 P_{w_1} \quad (6)$$

式中: φ_3 为风荷载转化到臂端的转化系数; P_{w_1} 为背向风荷载.

(3) A-A 截面在变幅平面内所受的弯矩

$$M_y = \varphi_2 \times Q_0 \times \sin a_1 \times e_1 - S \times \cos a_2 \times e_2 + \frac{1}{2} P_{w_1} \times l_a^2 \quad (7)$$

(4) A-A 截面在回转平面内所受的弯矩

$$M_z = \frac{1}{2} P_{w_2} \times l_a^2 + \tan a_3 \times Q \times (l_a \times \cos a_1 + e_2 \times \sin a_1) \quad (8)$$

式中: P_{w_2} 为侧向风荷载.

由以上受力分析可知, 起重机伸缩臂架是以受弯为主的双向压弯构件.

1.3 臂架截面拓扑优化数学模型

以臂架结构最小柔顺性为目标, 以位移为约束来对箱形臂进行拓扑优化设计.

臂架的平均柔顺性为

$$\bar{C} = \int_0^L \theta^T \psi dl \quad (9)$$

式中: L 是梁长, $\{\theta\}_{4 \times 1}$ 和 $\{\psi\}_{4 \times 1}$ 分别为臂架截面上的内力和截面应变.

$$\theta = (F_a \quad F_t \quad M_y \quad M_z)^T \quad (10)$$

根据梁理论, 截面内力和应变存在如下关系:

$$C\theta = \psi \quad (11)$$

因此, 臂架的柔顺性还可表示为

$$\bar{C} = \int_0^L \theta^T C \theta dl \quad (12)$$

上式中 θ 与设计变量无关, 而截面柔度矩阵 C 则依赖于设计变量 ρ_i , $i = 1, 2, \dots, N$.

臂架截面拓扑优化的目标是在给定材料用量的条件下, 使臂架具有最大刚度(最小柔顺性). 因此, 约束应包含材料体积的约束:

$$\sum_{i=1}^N \rho_i A_i \leq A_0 \quad (13)$$

式中: A_i 表示第 i 个单元的面积, A_0 表示给定截面面积的上限值.

为了避免奇异, 空心材料用相对较弱的材料代替. 因此, 对单元材料密度设置下限. 当达到该下限值时, 则认为该部分材料可删除. 设计变量的界限约束为

$$\rho_{\min} \leq \rho_i \leq 1.0; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

式中 ρ_{\min} 为材料相对密度的下限值.

臂架截面拓扑优化数学模型可表示成设计变量

$$\mathbf{X} = (\rho_1 \quad \rho_2 \quad \dots \quad \rho_N)^T$$

求目标函数最小

$$\bar{C} = \int_0^L \theta^T C(\rho_1 \quad \rho_2 \quad \dots \quad \rho_N) \theta dl \quad (15)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^N \rho_i A_i \leq A_0$$

$$\rho_{\min} \leq \rho_i \leq 1.0; \quad i = 1, 2, \dots, N$$

整个优化过程是借助 Altair 公司的 HyperWorks 系列软件的结构分析工具和优化工具来实现的. 其中 OptiStruct 采用变密度拓扑优化方法来定义材料流动规律, 用近似法和可靠的优化方法搜索得到最优的加载路径设计方案.

2 臂架三维有限元模型

(1) 分析模型选取

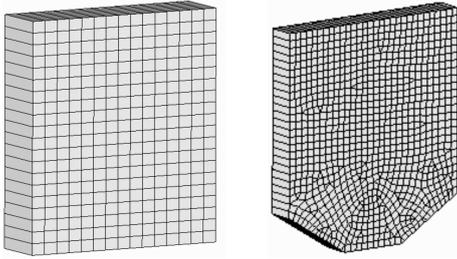
起重机伸缩吊臂一般很长, 屈曲波形很多, 若取一节完整的臂来进行优化分析^[8], 计算量非常大. 此外, 伸缩吊臂由多节臂组成, 共同承受外载, 除基本臂外其他的臂节, 由于边界条件难以确定, 不适宜单独取出作分析. 为此, 进行吊臂的优化分析时, 一般均是在吊臂受载时的危险截面(大应力值)附近处取出一个失稳半波段, 即取出一段长度为半波长大小的吊臂结构进行分析. 半波长处于 $0.5h \sim h$ (h 为吊臂截面高度).

(2) 模型的建立

① 利用 HyperMesh 软件建立臂架实心截面, 并加载 OptiStruct 模板.

② 创建材料属性, 并将其属性分配给各组件集合器. 设置初始弹性模量 $E = 200 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$.

③在 2D 组件内创建一层壳单元,用 linear Solid 面板创建实体单元. 利用 solid map 面板将现有的二维有限元网格拉伸成实体单元网格. 如图 3 所示.



(a) 四边形截面模型 (b) 六边形截面模型

图 3 结构优化模型示意图

Fig. 3 The diagram of structure optimal model

④在臂架截面上创建 rigidlinks 单元.
 (3)在模型上施加边界条件
 在臂架一端施加 x, y, z 方向的位移约束和 \hat{x}, \hat{y} 方向的转动约束,在臂架另一端的 rigid 上施加荷载. 本文以 QY50t 汽车起重机的数据为例进行分析,即臂架轴向力 $F_a = 5 \times 10^5$ N,吊载后臂架截面的弯矩 $M_y = 1.5 \times 10^7$ N · mm、 $M_z = 2.7 \times 10^6$ N · mm 及剪切力 $F_t = 8.68 \times 10^4$ N.

采用 3 种加载工况:

- ①臂架截面仅受弯矩 M_y 作用的情况,如图 4(a)所示;
- ②臂架截面受弯矩 M_y, M_z 及 F_a 作用的情况,如图 4(b)所示;
- ③臂架截面受弯矩 M_y, M_z 及 F_a, F_t 作用的情况,如图 4(c)所示.

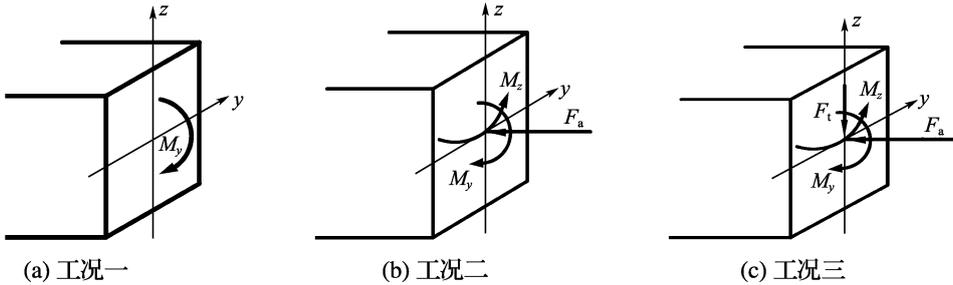


图 4 各工况加载显示

Fig. 4 Loading conditions under three cases

(4)拓扑优化设置

①设置优化参数

设计目标:柔度最小

约束:体积分数的上限值为 0.35

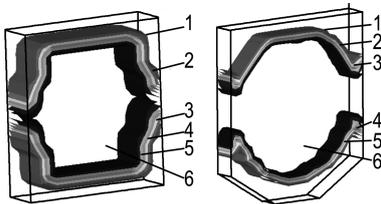
②定义两个响应

在 responses 子面板中定义 volumefrac 和 wcomp 两个响应. 选择 objective 面板将响应

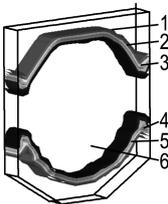
wcomp 定义成目标函数;选择 dconstraints 面板将响应 volumefrac 定义成约束条件.

(5)求解

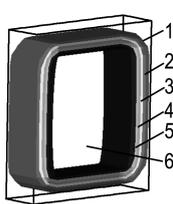
采用变密度法,通过 OptiStruct 的拓扑优化模块进行求解. 为了消除拓扑优化数值计算中的棋盘格和网格依赖现象,惩罚因子 p 取为 3. 优化结果如图 5~7 所示.



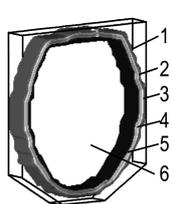
(a) 四边形截面优化结果



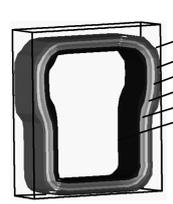
(b) 六边形截面优化结果



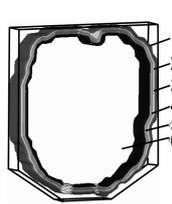
(a) 四边形截面优化结果



(b) 六边形截面优化结果



(a) 四边形截面优化结果



(b) 六边形截面优化结果

图 5 工况一臂架结构优化最终拓扑图

Fig. 5 The final topology diagram of optimal boom structure under the first case

图 6 工况二臂架结构优化最终拓扑图

Fig. 6 The final topology diagram of optimal boom structure under the second case

图 7 工况三臂架结构优化最终拓扑图

Fig. 7 The final topology diagram of optimal boom structure under the third case

3 优化结果分析

图 5~7 所获得的臂架最终拓扑图形显示,不同的区域代表不同密度分布,具体数值见表 1.

表 1 相对密度分布表

Tab. 1 The distribution table of relative density

区域名称	相对密度范围
1 区	>0.859
2 区	$0.717\sim 0.859$
3 区	$0.576\sim 0.717$
4 区	$0.434\sim 0.576$
5 区	$0.293\sim 0.434$
6 区	<0.293

分析如下:

(1) 密度分布都是按层分布的,最外层相对密度值最大并趋近于 1,最内层相对密度值最小趋近于 0.

说明主要承受荷载的位置是在相对密度值最大的区域,即截面四周的单元.在截面中心的单元几乎不传递力也不承受荷载.

(2) 工况一仅弯矩作用,优化结果显示截面的上部和下部区域的相对密度值很大,而中间区域即臂架腹板的位置相对密度值很小.

说明仅受弯矩作用时,主要承载单元为臂架截面上部和下部区域,即臂架的上翼缘板和下翼缘板是主要承载部分.

(3) 工况二的荷载作用下,对于给定四边形初始区域优化结果为相对密度分布在形状趋近于大圆角环形区域上.对于给定六边形初始区域,优化结果为相对密度分布趋近于椭圆环形区域.

说明工况二荷载作用下的臂架截面,主要承载位置是呈环形分布的单元上,即大圆角形截面和椭圆形截面由直接承载单元组成,这与文献[5]计算结果一致,表明本文建立的模型及分析方法是合理的.

(4) 工况三荷载作用下,密度分布对比工况二所得的图形有所差异,六边形截面的密度分布趋近于 U 形分布.

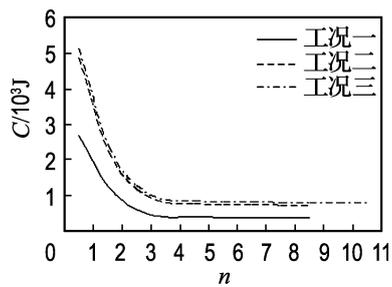
说明工况三荷载作用下,主要承载是呈 U 形分布的单元上.由此可知分析时是否加剪切力对臂架截面形状的影响是较大的.

由于实际的起重机吊臂属于细长梁结构,根据经典梁理论,细长梁的剪切变形很小可忽略,但

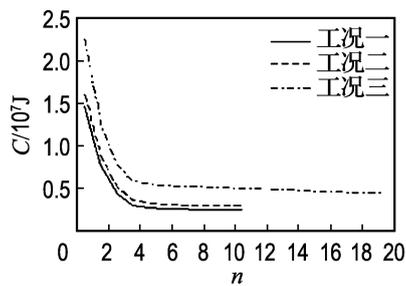
在取出半波长度的臂架模型时,剪切力的取舍需要考虑.

从图 8 可知,目标函数迭代曲线平滑下降,收敛速度很快.对于初始四边形截面,工况一目标函数值下降了 86.0%,工况二目标函数值下降了 85.1%,工况三目标函数值下降了 84.6%.对于初始六边形截面,工况一目标函数值下降了 83.3%,工况二目标函数值下降了 81.9%,工况三目标函数值下降了 80.6%.

说明 3 种工况下,采用拓扑优化方法能够大量地减少结构柔度,从而提高结构的刚度.合理而有效的刚度分布设计,能大量地减少原材料的浪费,减轻臂架的重量,节省能源.



(a) 四边形截面



(b) 六边形截面

图 8 臂架结构优化目标函数迭代图

Fig. 8 The iterative diagram of optimal boom structure objective function

4 结论

本文将拓扑优化技术引入到起重机伸缩吊臂截面设计中,建立了起重机吊臂的拓扑优化模型,实现了典型臂架截面的拓扑优化设计.分析了不同工况下,荷载作用对相对密度分布的影响.优化结果证明将拓扑优化技术引入起重机伸缩吊臂截面设计这一思路是可行的.这一思路将为改进和增强臂架结构提供设计依据.

参考文献:

- [1] 孙在鲁, 陈佳伟. 箱形伸缩臂腹板局部稳定临界应力的计算[J]. 工程机械, 1980(12):14-24
- [2] BENDSOE M P, RODRIGUES H C. Integrated topology and boundary shape optimization of 2-D solids [J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1991, **87**(1):15-34
- [3] 程耿东. 关于桁架结构拓扑优化中的奇异最优解[J]. 大连理工大学学报, 2000, **40**(4):379-383
(CHENG Geng-dong. On singular optima of structural topology optimization of trusses [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2000, **40**(4):379-383)
- [4] CHENG Geng-dong, GUO Xiao. ϵ -Relaxed approach in structure topology optimization [J]. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 1997, **13**:258-266
- [5] 左孔天, 陈立平, 张云清, 等. 用拓扑优化方法进行热传导散热体的结构优化设计[J]. 机械工程学报, 2005, **41**(4):13-21
- [6] 陈义保, 罗震, 钟毅芳, 等. 基于拓扑描述函数的结构拓扑优化设计[J]. 华中科技大学学报, 2007, **35**(1):102-105
- [7] BENDSON M P, SIGMUND O. **Topology Optimization Theory Methods and Applications** [M]. Berlin:Springer Verlag, 2003
- [8] 纪爱敏, 张培强, 彭铎, 等. 起重机伸缩臂局部稳定性的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2004, **35**(6):48-51

Topological optimization for crane telescopic boom-section

WANG Xin^{*1}, HUANG Lin^{1,2}, GAO Yuan¹, GAO Shun-de¹, WANG Yi-hua³

- (1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. DHI • DCW Group Co., Ltd., Dalian 116013, China;
3. Armament Department of PLA 71811 Command, Zhumadian 463000, China)

Abstract: The topological optimization method is applied to the design of crane telescopic boom-section, which can work out the optimal distributing problem of crane telescopic boom structure, improve the mechanics capability of telescopic boom structure, and alleviate the weight of boom. The solid isotropic microstructure with penalty (SIMP) method used in topological optimization and parameters related to the effect of result of topological optimization are analyzed. The mathematic model of topological optimization to telescopic boom-section is built. The finite element model of crane boom is built by HyperMesh software. And the analysis of topological optimization is made by OptiStruct software, which is used to attain the best boom-section topological figure. The optimization results prove that the mathematic model is reasonable. It is valid that topological optimization is applied to the design of crane boom-section.

Key words: topological optimization; solid isotropic microstructure with penalty (SIMP); crane; boom-section