

# 基于连续体拓扑优化的轻质化舟桥桁架结构优化

彭华,曾标,张迎新,汪田

(中国船舶重工集团应急预警与救援装备股份有限公司,湖北 武汉 430223)

**摘要:**基于一种改进的 SIMP 拓扑优化方法,在指定载荷和边界条件下,针对不同材料、体积分数和插值函数系数对舟桥桁架结构进行优化。优化结果表明,通过改变材料能够在载荷不变的情况下保证桁架结构的性能满足使用要求;另外将材料使用比例从 0.5 改为 0.3 后依然能够使桁架结构的性能满足使用要求。通过修改密度插值函数系数,得到了更利于制造的结构。这些结果说明了采用该方法,舟桥结构的轻质化目标是可行的。

**关键词:** SIMP; 轻质化; 舟桥结构; 体积分数

**中图分类号:** TP273+.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5276(2020)04-0095-02

## Structure Optimization of Lightweight Pontoon Bridge Frame Based on Continuum Topology

PENG Hua, ZENG Biao, ZHANG Yingxin, WANG Tian

(China Harzone Industry Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

**Abstract:** Based on the optimization method of the improved SIMP topology, this paper optimizes the pontoon bridge frame structure under specified loads and boundary conditions according to different materials, volume fractions and interpolation function coefficients. The optimization results show that the performance of the bracket structure can be guaranteed by changing the material without changing the load. In addition, the material usage ratio is changed from 0.5 to 0.3, it still meets the requirement of its performance. By modifying the coefficient of density interpolation function, the bracket structure convenient for manufacturing is obtained. The results show that the goal of the lightweight pontoon bridge structure can be attained by using this method.

**Keywords:** SIMP; lightweight; pontoon bridge structure; volume fraction

## 0 引言

舟桥是连接舟或浮体而成的浮桥,在现代战争和应急方面有重要应用价值<sup>[1-2]</sup>。而作为应急技术装备,则要求其具有高强度、低质量和高效率等特点,这也使得大跨度快速舟设计过程中需要同时实现载重目标下刚度的最大化和材料质量最小化这两个看似冲突的目标。这在传统的机械设计中似乎是很难得到最优结果的,但是拓扑优化中只需对刚度最大和质量最小的权重根据实际情况进行系数分配,就可以得到最优解集方案。因此,连续体拓扑优化研究的重要性就变得不言而喻了,尤其在复杂的工况下,权衡多项目标并提出折中方案占据了更重要的地位。

连续体的拓扑优化,即在指定的域中寻求材料的最优分布。优化过程中,对指定域进行网格划分,通过预先设定的基础法则对域内材料进行增减并验证是否实现目标要求。当所有材料已经不能再继续增减后,优化停止。连续体结构的拓扑优化设计从产生到现在经历了不断发展和完善,形成了均匀化方法<sup>[3]</sup>、变密度方法<sup>[4]</sup>、水平集方法<sup>[5]</sup>等。变密度法主要插值模型有“带惩罚指数的固体

各向同性微结构”(solid isotropic microstructures with penalization, SIMP)<sup>[6]</sup>和“材料属性的理性近似”(rational approximation of material properties, RAMP)模型<sup>[7]</sup>。

本文通过一种改进的 SIMP 模型<sup>[8-9]</sup>对相同载荷下不同材料的舟桥结构模型进行了拓扑优化来验证轻质化舟桥结构的可行性与稳定性。

## 1 一种改进的 SIMP 优化模型介绍

一般基于变密度法,带体积约束的结构应变能最小化拓扑优化模型可描述如下<sup>[8-9]</sup>:

$$\begin{aligned} \min C(x) &= 1/2 \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} \\ \text{s.t. } \mathbf{K}(x) \mathbf{u}(x) &= \mathbf{F} \\ \frac{V(x)}{V_0} &= \text{volfrac} \\ \mathbf{x} &= (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ 0 < x_{\min} &\leq x_i \leq 1 (i=1, 2, \dots, n) \end{aligned}$$

其中: $\mathbf{u}(x)$ 表示  $n$  个单元位移向量组成的总位移向量; $\mathbf{K}(x)$ 表示  $n$  个单元组成的总刚度矩阵; $\mathbf{F}$ 为结构所受的总外载荷向量; $V_0$ 表示结构优化前的体积; $V(x)$ 表示结

**基金项目:**国家重点研发计划(2016YFC0802702)

**第一作者简介:**彭华(1965—),男,四川通江人,教授级高工,研究方向为结构优化。

构优化后的体积; $volfrac$ 为给定的目标体积分数; $x_{min}$ 表示最小体积分数。

## 2 不同目标的桥梁桁架结构拓扑优化

为了实现舟桥结构轻质化的目标,一是在相同载荷下更换更轻盈的材料,二是通过拓扑优化降低材料的使用率。

### 2.1 不同材料对桁架结构的影响

铝合金较各类合金钢相比,其比重小、比强度高、易加工性和无磁性等优点用于舟桥装备的制造,可大幅降低装备的质量,提高装备的机动性和灵活性并减少各类能源的消耗。所以针对应急救援时、相同体积分数下,使用铝合金和结构钢分别进行了优化。图1为设计前的初始结构,主体为一个 $a \times b$ 的矩形区域,上表面受到宽度为 $c$ 的均布载荷,在底部距边缘 $d$ 处有两个对称支撑点,其中取均布载荷 $F = -200 \text{ kN}$ ,矩形厚度为 $1 \text{ m}$ , $a = 1 \text{ m}$ , $b = 6 \text{ m}$ , $c = 0.2 \text{ m}$ , $d = 0.1 \text{ m}$ 。

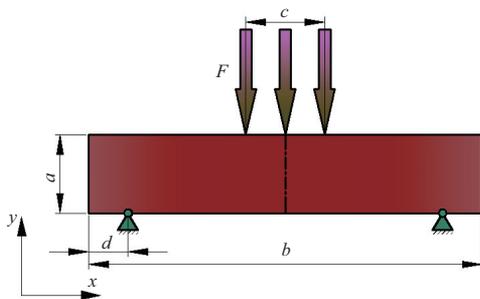


图1 初始结构及载荷分布

表1列出了普通结构钢和铝的主要材料属性。

表1 结构钢和铝材料的基本材料属性

材料属性	结构钢	铝
密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7 850	2 700
泊松比	0.30	0.33
杨氏模量/GPa	200	70

选择体积分数0.5进行优化,即保留一半的材料,优化结果见图2。



(a) 结构钢材料拓扑优化结果



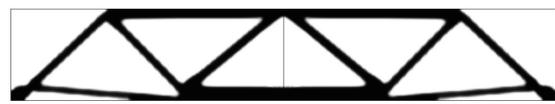
(b) 铝材料拓扑优化结果

图2 材料优化结果

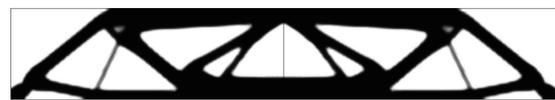
从图2(a)和图2(b)可以看出,材料的变化对拓扑结构的影响体现在中间支撑处。由于中间受到集中载荷,且材料的刚度有差异,所以铝结构的优化结果在主支撑处集中了更多的材料。通过这个算例说明,材料的变化且所使用体积相同的情况下,经过拓扑优化后是能够达到相同的目标。即在均布载荷 $200 \text{ kN}$ 的作用下,经过拓扑优化后,可以使用铝达到结构钢的效果,并且单桁架结构质量从结构钢材料的 $1 \times 6 \times 1 \times 7 \ 850 = 23.55 \text{ t}$ 变为铝材料的 $1 \times 6 \times 1 \times 2 \ 700 = 8.1 \text{ t}$ ,降低了 $65.6\%$ ,节约的质量在应急救援的速率和效率上得到了显著的提升<sup>[10]</sup>。

### 2.2 不同体积系数对桁架结构的影响

通过2.1节的优化结果发现在一些情况下通过更换材料是能够达到相同目标的,另外体积比是影响优化结果的重要参数。图3对比了体积系数为0.3和0.5的两种情况<sup>[11]</sup>。



(a) 铝材料体积系数0.3拓扑优化结果



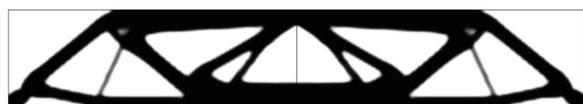
(b) 铝材料体积系数0.5拓扑优化结果

图3 铝材料体积系数拓扑优化结果

从图3(a)和图3(b)中可以看出,体积系数的改变,直接影响了材料的结构,但考虑到加工、安装和使用等实际问题,实际情况会受到很多相关参数的影响,比如材料属性会受到材料体积、形状或加工质量的影响;关节处的稳定会受到焊接性能的影响;使用寿命会受到材料自身的影响等。

### 2.3 不同插值函数系数对桁架结构的影响

由于插值函数选择不同的系数 $p$ 值时,对计算和结果会有较大的影响,所以分别计算了铝材料插值系数 $p = 3$ 和 $p = 10$ 的结果,如图4所示。



(a) 插值系数 $p=3$



(b) 插值系数 $p=10$

图4 不同插值系数对桁架结构的影响

从图4(a)和图4(b)的对比中可以发现,系数的改变,造成了优化结果完全不同,并且从效果来看, $p = 10$ 的优化结果显示出了更贴近实际的结构,大大减少了制造的

(下转第108页)

## 4 结语

本文基于晶体塑性理论建立了相应的 IC10 合金本构模型,采用率相关的硬化方程,编制了本构模型的 UMAT 用户材料子程序,利用 ABAQUS 软件开展了 IC10 合金在 600℃、不同载荷下的循环应力-应变响应曲线的数值模拟研究。结果表明:采用晶体塑性理论能较好地描述 IC10 合金在特定温度下的复杂力学行为;同时也进一步验证了模型算法的完整性与计算程序的正确性。

### 参考文献:

- [1] 岳珠峰,杨治国,尹泽勇,等. 单晶涡轮叶片材料本构模型及应用研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2003,16(1):50-56.

- [2] 蔚夺魁,杨晓光,张克实. 多晶镍基合金循环塑性细观本构关系[J]. 航空动力学报,2013(10):2167-2173.  
 [3] 张宏建,温卫东,崔海涛,等. 不同温度下 IC10 合金的本构关系[J]. 航空学报,2008(2):499-504.  
 [4] 罗娟. 基于晶体塑性理论的多晶循环本构模型及其有限元实现[D]. 成都:西南交通大学,2014.  
 [5] 温志勋. 晶体塑性理论及其在镍基单晶和双晶合金中的应用[D]. 西安:西北工业大学,2007.  
 [6] 周杰. 镍基金属间化合物 IC10 合金的变形机理及本构模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.  
 [7] 卢孔汉. 镍基金属间化合物材料的疲劳行为及循环塑性本构模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.

收稿日期:2019-02-27

(上接第 96 页)

难度,但是从优化效率来看, $p$  值的增大导致计算时间大大增加。因为优化过程中密度的变化更加得缓慢,所以选择合适的  $p$  值不论是对实际结果还是对计算效率来说都是很有必要的。

## 3 结语

本文通过利用一种改进的 SIMP 优化模型对舟桥装备轻量化目标进行拓扑优化。结果表明,将材料由结构钢变为铝并保证体积相同的情况下,在桁架结构承受相同载荷且总形变相同的前提下使桁架质量降低了 65.6%,对舟桥装备的应急救援具有重要意义。体积系数改变后的优化结果表明,减少材料也能够使桁架结构满足使用要求。这对舟桥装备的轻量化也是有决定性影响的。但考虑到加工、安装和使用等实际问题,实际情况会受到很多相关参数的影响,比如材料属性会受到材料体积、形状或加工质量的影响;关节处的稳定会受到焊接性能的影响;使用寿命会受到材料自身的影响等。另外对密度插值函数系数的变化进行了对比,发现  $p=10$  的优化结果显示出了更贴近实际的结构,大大减少了制造的难度,但是从优化效率来看, $p$  值的增大导致计算时间增加,所以选择合适的  $p$  值无论是对实际结果还是对计算效率来说都是很有必要的。

### 参考文献:

- [1] 陈启飞,黄亚新,王建平,等. 玻璃钢/钢材复合结构带式舟桥方舟的研制[J]. 纤维复合材料,2002(1):27-29.  
 [2] 孙建群,林铸明,孙文俊. 可供舟桥结构采用的铝合金材料

分析[J]. 工兵装备研究,2003(6):45-49.

- [3] DIAZ A R, BENDSOE M P. Shape optimization of structures for multiple loading conditions using a homogenization method [J]. Structural Optimization, 1992 (4): 17-22.  
 [4] BENDSOE M P. Optimal shape design as a material distribution problem [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 1989,4(1):193-202.  
 [5] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature dependent speed: algorithms based on hamilton-jacobi formulations [J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79: 12-49.  
 [6] ROZVANY G I N, KIRSCH U, BENDSOE M P. Layout optimization of structures [J]. Applied Mechanics Reviews, 1995, 48(2):411-419.  
 [7] STOLPE M, SVANBERG K. An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization [J]. Structural Multidiscipline Optimization, 2001, 22(2):116-124.  
 [8] B.S. Lazarov, O. Sigmund. Filters in topology optimization based on helmholtz type differential equations[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2011, 86: 765-781.  
 [9] WANG F, B.S. Lazarov, O. Sigmund. On projection methods, convergence and robust formulations in topology optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2011, 43: 767-784.  
 [10] 沈伟,廖敏,王强. 基于拓扑优化的变速箱壳体轻量化设计[J]. 农机化研究,2018,40(4):240-247.  
 [11] 陈远帆,李舜酩,苏玉青. 拓扑优化与尺寸优化相结合的割草车车架轻量化设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2017(1):34-41.

收稿日期:2019-04-24