

## 竹皮材料桥梁的结构设计与分析

孙野, 许建政, 徐赫璇, 赵征宇, 王子健

沈阳航空航天大学 辽宁沈阳

**【摘要】**在给定的设计空间中使用竹皮材料设计出质量轻, 刚度最大, 承载能力强的桥梁。通过拓扑优化技术用 matlab 求解拓扑优化 SIMP 法对重要的桥梁构件进行优化设计。由 midas 以及 ansys 等有限元软件对桥梁构件以及桥梁进行力学分析。最终通过实际制作来验证该结构拓扑优化后在满足应有承载能力的前提下亦成功达到了减重的效果。

**【关键词】**SIMP 法; 拓扑优化; 有限元分析; 实际制作

### Structural design and analysis of bamboo skin bridge

Ye Sun, Jianzheng Xu, Hexuan Xu, Zhengyu Zhao, Zijian Wang

Institute of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning

**【Abstract】**In the given design space, bamboo skin material is used to design a bridge with light weight, maximum stiffness and strong bearing capacity. Through the topology optimization technology, MATLAB solves the topology optimization SIMP method to optimize the design of important bridge components. Finite element software such as Midas and ANSYS is used to analyze the mechanics of bridge components and Bridges. Finally, through the actual production to verify that the structure topology optimization in the premise of meeting the due bearing capacity also successfully achieved the effect of weight reduction.

**【Keywords】**SIMP method; Topology optimization; Finite element analysis; Practical production

#### 1 引言

在人类文明发展中, 桥梁可谓是人类文明的重要产物, 甚至有些桥梁沿用百年直至今日仍在为人类提供便利。在全国大学生工程训练综合能力竞赛中开设桥梁设计的赛道, 让参赛者体会桥梁的重要性, 以及对桥梁有更优化的设计。本文以此竞赛中的智能物流-桥梁设计的命题为背景, 以弹性模量为 10 GPa, 抗拉强度为 60 MPa, 泊松比为 0.28 的竹皮为材料追求桥梁最大承重比, 最高加载 30kg。依据拓扑优化可设计出桥梁构件的较为优化的内部结构。

#### 2 桥梁杆件内部结构的优化设计

##### 2.1 拓扑优化方法概述

基于参考文献<sup>[1,2]</sup>对拓扑优化 SIMP 法的含义进行概述。本文使用 SIMP 方法来进行拓扑优化。该方法引入在可设计空间内材料的相对密度在 0 至 1 之间的假想材料。引入了材料插值模型, 将密度和质量作为设计变量, 将离散问题转化成连续问题, 但是中间密度单元是不存在的, 因此采用惩罚因子来避免中

间密度单元的产生使中间密度想 0 或 1 靠拢, 从而来寻求结构设计的最优解。

##### 2.2 材料插值模型的建立

基于 SIMP 格式的材料插值模型为:

$$E_{(x_i)} = E_{\min} + (x_i)^p (E_0 - E_{\min}), x_i \in [0, 1]$$

其中:

$E_{(x_i)}$ ——插值以后的弹性模量

$E_0$ ——实体部分材料的弹性模量

$E_{\min}$ ——孔洞部分材料的弹性模量

$x_i$ ——单元相对密度, 取值为 1 时表示有材料, 为 0 时表示无材料即孔洞

$p$ ——惩罚因子

在本文中孔洞部分材料的弹性模量为 0, 因此讨论的 SIMP 的表达为:

$$E_{(x_{i,j})} = (x_{i,j})^p E_0$$

其中:  $x_{i,j}$  为第  $i$  个子域内第  $j$  个单元的相对密度。

##### 2.3 拓扑优化数学模型的建立

在设计空间中, 约束体积来获得最小柔度即最大

刚度。基于变密度理论的 SIMP 法的周期性拓扑优化问题的数学模型可以表达为:

$$\text{Find } X = (x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}, \dots, x_{i,j})^T \in R$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Min

$$C(X) = FU = U^T KU = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{i,j})^p (u_{i,j})^T k_0 u_{i,j}$$

$$S. \quad t \quad KU = F$$

$$V = fV_0 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} v_{i,j}$$

$$0 < x_{\min} \leq x_{i,j} \leq x_{\max} \leq 1$$

其中:

X——单元相对密度矢量

C——结构的柔度

F——载荷矢量

U——位移矢量

k——结构刚度矩阵

$u_{i,j}$ ——单元位移矢量

$k_{i,j}$ ——单元刚度矩阵

$k_0$ ——初始段元刚度矩阵

$v_{i,j}$ ——单元体积

V——优化后的体积

f——保留的体积分数

$v_0$ ——初始体积

$x_{\min}$ ——设计变量的取值下限

$x_{\max}$ ——设计变量的取值上限

n——子域内单元的个数

### 2.4 基于 matlab 求解数学模型

数学模型建立完成后在王路的 99 行 MATLAB 代码的基础上, 依据我们所需的设计空间, 施加载荷位置, 通过参考文献<sup>[3]</sup>对相应位置 Matlab 代码进行修改来求得我们所需杆件的最优结构。

桥梁中最危险即最重要的杆件为桥梁的主梁杆件, 因此对主梁杆件结构进行拓扑优化。其最危险的承载情况即形变最大位置为中部位置受集中力的状态。因此 Matlab 代码修改如下并输出图例:

$$F(2*(nelx/2)*(nely+1)+2,1) = -1;$$

$$\text{Fixeddofs}=[2*(nely+1), 2*(nely+1) \\ -1, 2*(nelx+1)*(nely+1)];$$

### 2.5 不同横截面杆件对比

根据参考文献<sup>[5]</sup>以及大量的实际制作与创新, 最具有竞争力的杆件截面为 2.4 中所设计的杆件及三角形界面杆件。由 ansys 有限元分析, 设置好两端固定的边界条件以及中部受集中载荷的受力情况, 对两种杆件进行静力学分析, 判断出 2.4 中所设计的截面是较为优化的设计方案, 并有后续实际制作加以验证。

## 3 桥梁整体结构设计

### 3.1 桥梁结构设计

基于参考文献<sup>[4]</sup>所给出的桥梁的可设计空间如图 4 所示。考虑桥梁的轻量化, 以及桥梁最危险的受载情况。为了使桥墩所受弯矩较小因此抛弃宽距桥墩, 选择窄距桥墩。通过分析可以将桥梁整体的梁截面等价于 2.4 中所设计的杆件内部支撑截面, 综合上述设计出最终的桥梁结构方案如图 5 所示。

### 3.2 模型的建立与受力分析

为了便于模型的建立与分析, 本文采用 midas 有限元分析软件进行 3 维绘图。按照施加载荷要求, 载重小车行驶速度比较缓慢, 因此不考虑桥梁所受动载荷的影响, 整体分析属于静力学范畴。

如图 6 在 4 个桥墩处, 按照理想中的受力状态, 施加了 z 方向的约束。并考虑到桥梁最危险的加载位置是在桥梁中跨部位, 所以依次在中跨部位施加了 30kg 25kg 20kg 的质量的力, 但由于最高加载 30kg 而本文事先施加了 30kg 的力并分析其变形图发现 30kg 的综合变形小于 3mm 远远小于规定的 5mm。基本可以认为对桥梁的挠度影响不大即桥梁在 30kg 受载下是安全的, 因此 25kg 的载荷情况只保留了变形图进行解释说明其余载荷均不考虑。其变形图见图 7-8。(注: 为了变形的可视化, 桥梁的变形有一定的放大比例, 所以会显示小变形却呈现出大位移的视觉效果)

### 3.3 桥梁结构对比

为了体现桥梁结构设计的可信度。选择相似的结构进行对比如图 9, 因其受载 25kg 形变已经接近 3mm 所以已受载 25kg 展示。通过本文设计的桥梁与相似桥梁结构变形图的对比有力的证明了设计的优化性能。

### 3.4 实际制作

以全国大学生工程训练大赛智能物流-桥梁设计赛项为依据, 进行了 1:1 比例还原赛场及加载工

具。实际做出了多种结构的桥梁进行实验测试保证在加载时使桥梁的挠度最小。所设计的桥梁经过实

际验证, 证明了结构设计的可靠性, 是较优的结构设计方案。



图 1 主梁杆件内部支撑结构设计图

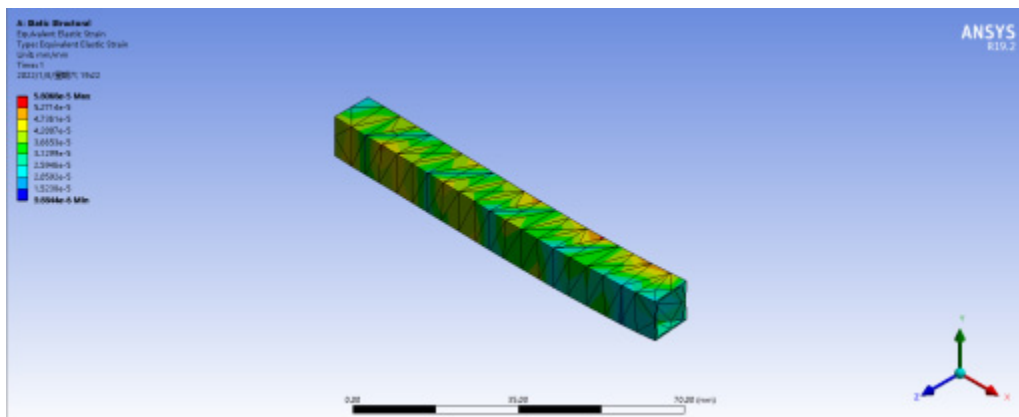


图 2 中设计的杆件应变图

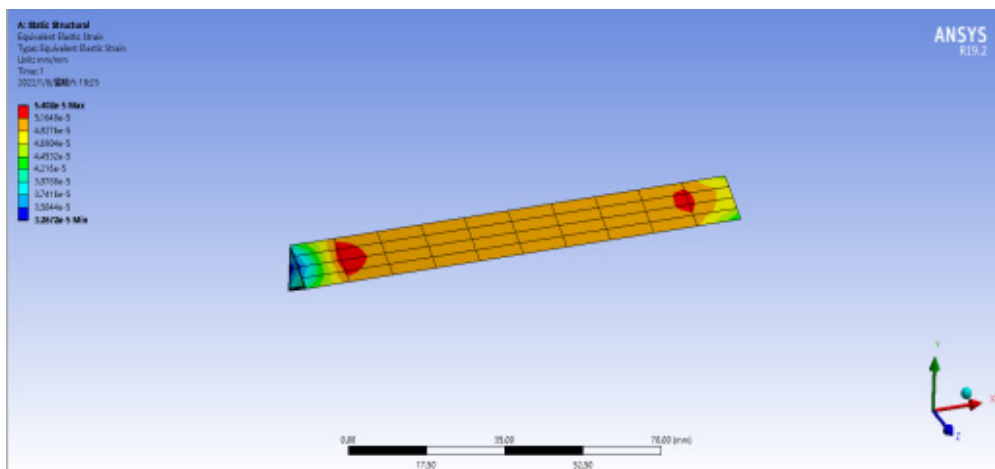


图 3 三角形截面杆应变图



图 4 设计空间

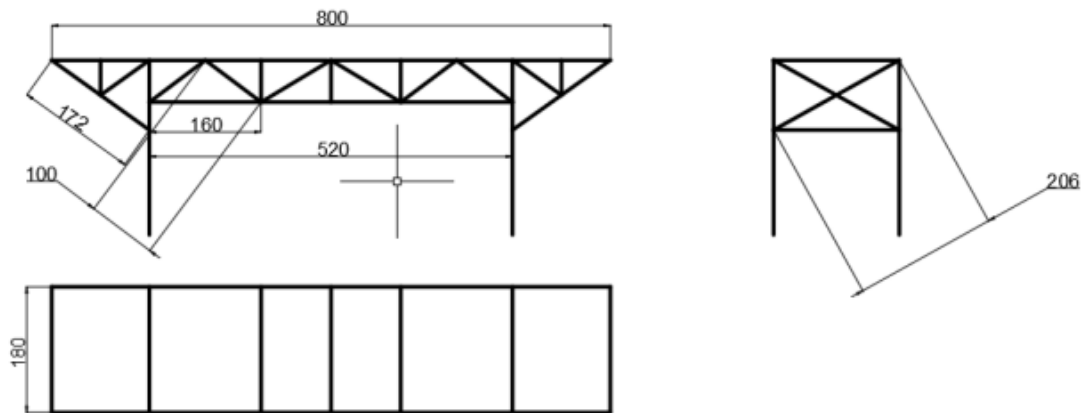


图 5 桥梁三视图

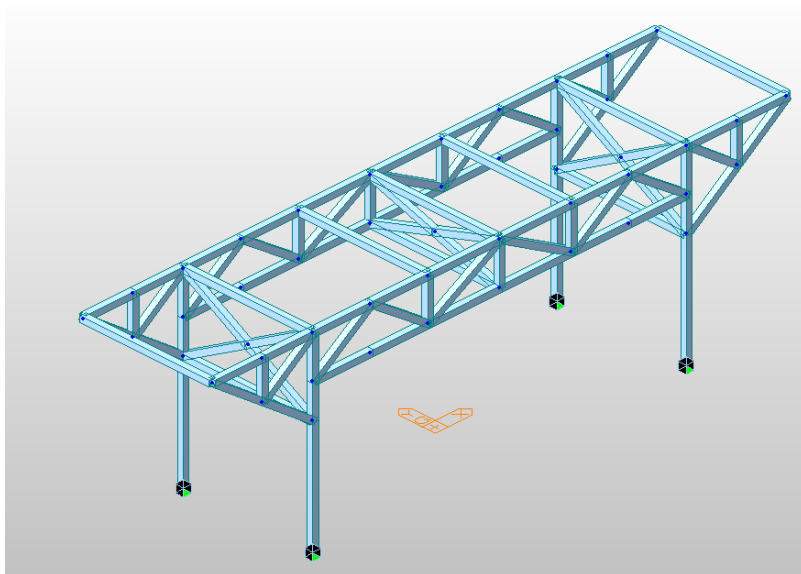


图 6 桥梁 3D 图

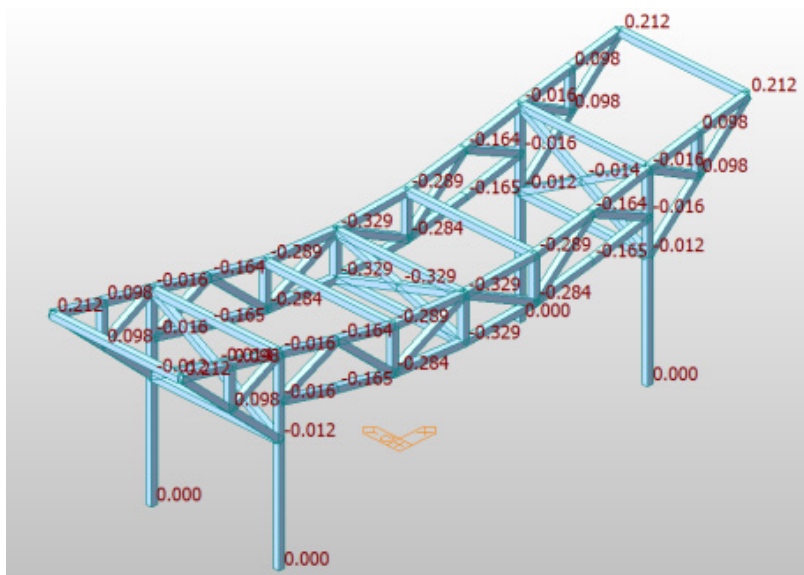


图 7 30kg 受载下变形图

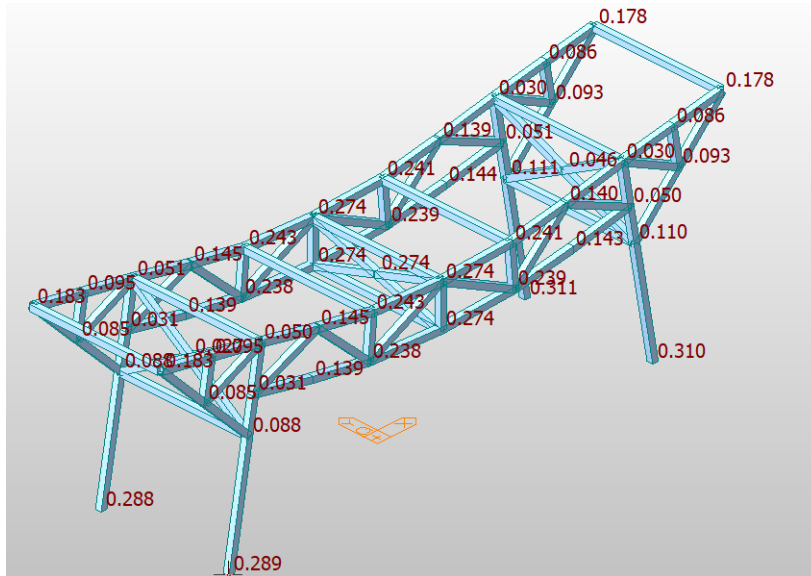


图 8 25kg 受载下的变形图

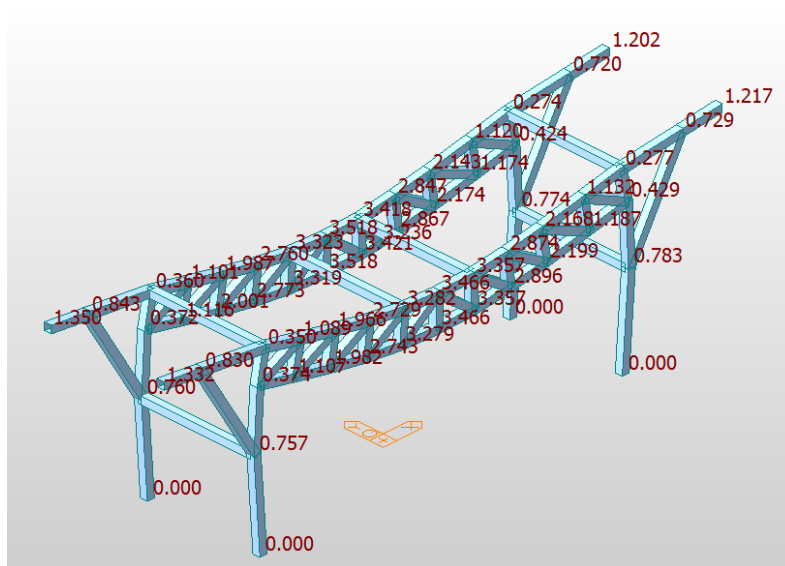


图 9 相似桥梁 25kg 受载下变形图



图 10 实际制作桥梁之一

#### 4 结语

本文以智能物流-桥梁设计赛题为背景, 在特定的设计空间中, 根据拓扑优化设计出桥梁杆件内部结构及桥梁整体结构, 并对其进行有限元分析加以验证合理性。在杆件拓扑优化分析中, 满足最小质量且最大刚度的条件下, 得到了杆件内部支撑结构的合理设计分布。为竹皮制桥梁的概念设计提供了理论依据。并为制作竹皮桥梁上应用拓扑优化技术实现了创新性。最后通过实际制作多个桥梁进行加载比对证明了本文设计的结构是较优的结构设计方案, 且便于制造。

#### 参考文献

- [1] 尹芳放,王王伟,叶红玲,隋允康. 连续体结构拓扑优化的SIMP方法和ICM方法[C]//北京力学学会第二十二届学术年会会议论文集.[出版者不详],2016:567-569.
- [2] 闫建国,张琼燕.LQG/LTR 控制在无人机飞行控制中的实现及仿真[J].计算机仿真,2009,26(05):44-47.
- [3] O. Sigmund. A 99 line topology optimization code written in Matlab[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2001,21(2):
- [4] 马洪辉,冯益聪,董宇杰,吴小涛,顾勇.用于智能物流搬运的桥梁结构设计[J].机械制造,2021,59(10):35-36+43.
- [5] 邹翼,王庆,程玉珍,邹鹏宇,曹文,孙新忠,黄思凝,杨文东.竹皮结构设计与制作分析[J].高等建筑教育,2018,27(04):73-81.

**收稿日期:** 2022 年 7 月 1 日

**出刊日期:** 2022 年 8 月 3 日

**引用本文:** 孙野, 许建政, 徐赫璇, 赵征宇, 王子健, 竹皮材料桥梁的结构设计与分析[J]. 建筑工程进展, 2022, 2(2): 103-108.

DOI: 10.12208/j.ace.20220056

**检索信息:** 中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

**版权声明:** ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**