



融入先验知识的轮印载荷下三跨梁最危险工况求解方法

罗祥云 刘均 江璞玉 程远胜

Embedded domain knowledge method for worst-case analysis of three-span beam under multiple patch loads

LUO xiangyun, LIU jun, JIANG puyu, CHENG yuansheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03676>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

任意边界下多跨梁弯曲计算及其工程应用

Bending calculation of multi-span beam under arbitrary boundary conditions and engineering application thereof

中国舰船研究. 2019, 14(4): 61-66 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01207>

载重轮胎的轮印载荷分布特性试验研究

Experimental study on wheel load distribution characteristics of truck tires

中国舰船研究. 2021, 16(6): 140-150 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02121>

不同截面形状下弹性支撑多跨梁振动特性分析

Vibrational characteristics of a multi-span beam with elastic transverse supports of different shaped sections

中国舰船研究. 2020, 15(1): 162-169 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01569>

基于遗传算法的多模式推力分配策略模拟分析

Simulation analysis of multi-mode thrust allocation strategy based on genetic algorithm

中国舰船研究. 2020, 15(3): 161-168 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01644>

多工况下基于子模型的矿砂船舱口角隅形状尺寸耦合优化分析

Analysis on the shape-size coupling optimization of ore carrier's hatch corners based on sub-model under multiple load cases

中国舰船研究. 2019, 14(6): 130-138, 154 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01511>

基于遗传算法的余割平方波束天线优化设计

Optimization design of cosecant square beam antenna based on genetic algorithm

中国舰船研究. 2020, 15(5): 85-89 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01685>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03676>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 罗祥云, 刘均, 江璞玉, 等. 融入先验知识的轮印载荷下三跨梁最危险工况求解方法[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(6): 25-34.

LUO X Y, LIU J, JIANG P Y, et al. Embedded domain knowledge method for worst-case analysis of three-span beam under multiple patch loads[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(6): 25-34 (in Chinese).

融入先验知识的轮印载荷下三跨梁 最危险工况求解方法



扫码阅读全文

罗祥云, 刘均, 江璞玉, 程远胜*

华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要: [目的] 旨在研究解决多个轮印载荷作用下直接调用优化算法进行最危险工况求解, 可能陷入局部最优解的问题。[方法] 将先验知识与最危险工况分析通用黑箱求解算法融合, 一方面将每个轮印载荷位置定义为设计变量, 无需预设一组轮印载荷的相对位置, 更具普适性; 另一方面将载荷按照大小顺序紧密聚集会产生较大应力, 载荷作用在梁结构跨中和支座附近时会产生较大弯矩和剪力等, 将这一船舶结构力学知识融入优化求解过程, 提出基于遗传算法的危险初始种群生成策略和轮印载荷整体平动策略, 以减少陷入局部最优解的可能。推导单轮印载荷作用下三跨梁结构的理论弯矩及剪力分布, 通过枚举所有可能组合找出多轮印载荷理论最危险作用位置, 以此验证所提出的最危险工况分析求解算法的正确性。[结果] 相比于使用遗传算法直接进行搜索的经典方法, 使用所提方法得到的6个轮印载荷作用下的最危险弯曲正应力值提升5.98%, 剪应力提升8.59%, 且多次计算结果与理论解误差不超过0.5%。[结论] 算例结果表明所提方法能够准确、稳定且快速地搜索到最危险的载荷位置。

关键词: 知识工程; 船舶设计; 三跨连续梁; 轮印载荷; 最危险工况分析; 先验知识; 遗传算法

中图分类号: U661.43

文献标志码: A

DOI: [10.19693/j.issn.1673-3185.03676](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03676)

Embedded domain knowledge method for worst-case analysis of three-span beam under multiple patch loads

LUO xiangyun, LIU jun, JIANG puyu, CHENG yuansheng*

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, China

Abstract: [Objective] This paper seeks to solve the problem in which directly invoking an optimization algorithm for the worst-case analysis of a three-span beam structure under multiple wheel patch loads raises the possibility of falling into the local optimal solution rather than the global solution. [Method] An analysis method comprising embedded domain knowledge with the general black-box optimization algorithm is proposed for the worst-case analysis of the beam. On the one hand, the position of each wheel patch load is defined as a design variable, so there is no need to specify the relative position of the group of wheel patch loads in advance, which is more universal; on the other, by integrating knowledge of ship structural mechanics, such as "large stress resulting from the close aggregation of loads in order of magnitude, large bending moment and shear force usually generated by the load in the mid span of the beam and near the support", into the optimization algorithm, a strategy for generating dangerous initial populations based on the genetic algorithm (GA) and the overall translational strategy of the wheel patch load are proposed respectively, thereby reducing the possibility of falling into the local optimal solution. The theoretical bending moment and shear force distribution of a three-span beam under a single wheel patch load are derived respectively. The theoretical most dangerous positions of multiple wheel patch loads are then determined by enumerating all possible combinations to verify the correctness of the proposed algorithm. [Results] Compared with the classical method using GAs without domain knowledge and under the same computational resources, the most dangerous bending normal stress and shear stress increase by 5.98% and 8.59% respectively under six wheel patch loads, and the error between the calculation results and the theoretical solution is less than 0.5%. [Conclusion] The numerical results show that the proposed method can accurately, stably, and quickly obtain the most dangerous load positions.

Key words: knowledge-based engineering; naval architecture; three-span continuous beam; wheel patch loads; worst-case analysis; domain knowledge; genetic algorithm

收稿日期: 2023-12-06 修回日期: 2024-01-31 网络首发时间: 2024-11-06 17:33

作者简介: 罗祥云, 男, 1999年生, 硕士生。研究方向: 船舶结构分析与优化设计。E-mail: m202172150@hust.edu.cn

程远胜, 男, 1962年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 结构分析与轻量化设计, 结构冲击动力学与防护设计, 优化设计理论与方法及应用。E-mail: yscheng@hust.edu.cn

*通信作者: 程远胜

0 引言

车辆、坦克、飞机等陆空载具多以轮印载荷的形式作用在其他结构上,如滚装船和大型水面舰船等,其车辆甲板承受大量的轮印载荷作用。研究人员针对轮印载荷对船体结构的响应开展了相关研究,赵超等^[1]利用有限元数值仿真和实验相结合的方法,在甲板不同位置多次施加轮印载荷,分析总结了在轮印载荷作用下甲板的塑性变形规律。贺远松等^[2]针对 4 种典型工况,开展甲板板架结构在轮印载荷作用下的数值仿真研究,针对 4 种工况中最危险的情形,运用弹塑性设计方法和许用变形准则得到了甲板厚度设计曲线。刘聪等^[3]通过对橡胶块加压模拟轮印载荷进行试验研究,并通过仿真开展轮印压力分布规律的数值和参数研究,结果表明试验和仿真结果较为吻合。

最危险工况分析可用于掌握结构或系统的最危险工况或临界状况,能够帮助设计人员得到符合要求且更为安全的设计方案,因此很多研究者提出了最危险工况分析方法。Tagawa 等^[4]针对目标函数存在噪声的多目标优化问题,提出了一种基于最坏情况预测的差分进化算法,该方法选取每次计算中每个目标函数的上界值来评估解的优劣。Jeon 等^[5]针对 3 种数学问题,利用遗传算法生成最坏情况的实例,使用这些实例数据来测试其他算法或软件程序的性能。Feng 等^[6]针对天线结构的设计,提出了寻找天线最差表面精度的方法,并将该最差表面精度作为天线结构优化的约束条件。Chong 等^[7]以机械臂结构为研究对象,提出了一种寻找最危险载荷的方法,并将最危险载荷作为拓扑优化的约束条件。Ohsaki 等^[8]提出了一种基于结构最危险工况设计的随机抽样方法,以一些离散的参数为设计变量,使用优化算法求解约束函数的上界值,再根据求得的约束函数上界值指导桁架结构的优化。上述最危险工况分析方法均是求解问题视为优化问题来处理,但是针对特定的问题或领域,难以运用到轮印载荷下梁系结构的最危险工况分析中。康杰豪等^[9]将轮印载荷视为集中力,结合遗传算法与有限元方法,对轮印载荷作用下的多跨梁结构进行了最危险工况分析与优化设计。该研究将轮印载荷距离多跨梁端部的距离作为设计变量,将两个轮印载荷之间的距离作为约束条件,并将多跨梁上的响应值作为目标函数,但该研究中两两轮印载荷之间的顺序是固定的,且在优化过程中轮印载荷的顺序无法调整,最终优化结果是给定轮印载荷顺序下的最危险作用位置,但当轮印载荷顺序发

生调整时可能会产生更加危险的载荷位置。该项研究工作还将多跨梁结构的最危险工况分析作为一个黑箱问题直接求解,效率较低。

本文拟在文献 [9] 基础上开展进一步研究,提出的优化数学模型中轮印载荷的位置不再以固定顺序排布,设计变量的排列组合更为复杂。同时本文将船舶结构力学先验知识融入到优化过程中,将完全的黑箱问题转化为人为指导下的灰箱问题,提高优化效率和准确性。本文还将推导单轮印载荷作用下三跨梁弯矩和剪力的理论解,并通过枚举得到多个轮印载荷作用下三跨梁结构理论的最危险载荷位置,以验证所提出方法的正确性。

1 轮印载荷下三跨梁结构最危险工况求解

1.1 三跨梁最危险工况分析的数学模型

本文最危险工况分析的含义是寻找满足约束条件下结构响应最大值的载荷作用位置,其本质上为一个优化问题,存在对应的设计变量、约束条件和目标函数。本文所述三跨梁是一般意义上的三跨梁结构,可以是等间距等刚度的,也可以是非等间距非等刚度的。

1.1.1 设计变量

该问题设计变量为轮印载荷的作用位置。由于分析对象是三跨梁这种一维结构,同时出于安全考虑,将轮印载荷简化为集中力进行处理,设计变量转化为每个轮印载荷与三跨梁端跨之间的距离,每个载荷的位置为独立的设计变量,故轮印载荷个数与设计变量个数相等。不同于文献 [9],本文的轮印载荷位置并不按照固定顺序排列,不同轮印载荷的位置可以进行调换。

1.1.2 约束条件

在实际工程中,轮印载荷的位置分布并不是随意的。轮印载荷之间不能相互重叠或者距离太近,因此两两轮印载荷之间应当满足最小安全间距 $\min T$ 的要求。此外,轮印载荷也不能作用在三跨梁结构之外,因此轮印载荷与三跨梁边界之间也应当满足包含关系。在处理约束条件时,将轮印载荷位置向左、右各拓展 $\min T/2$ 的距离,形成一条长度为 $\min T$ 的线段,如图 1 所示。

将轮印载荷拓展为线段后,最小安全间距的要求可以转换为每个轮印载荷位置所形成的线段(图 1 中红线部分)不能重叠。假设轮印载荷数量为 N ,任意选取 2 个轮印载荷判断其对应的线段是否重叠,其重叠长度为 L_i ,共有 C_N^2 种组合方式,轮印载荷的第 1 种位置约束函数可以表示为

$$G_1 = \sum_{i=1}^{C_k} L_i \quad (1)$$

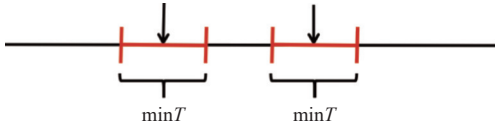


图 1 轮印载荷作用位置拓展为线段的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the extension of the wheel patch load position to a line segment

对于第 2 种轮印载荷位置不能超出结构范围的约束, 取第 j 个轮印载荷, 其所拓展得到的线段右端与三跨梁左端的距离为 x_j ($x_j \geq 0$), 三跨梁总长度为 L , 若轮印载荷的个数为 N , 则第 2 种位置约束函数可以表示为

$$G_2 = \sum_{j=1}^N \max\{x_j - L, 0\} \quad (2)$$

最终的约束条件可以表示为 $G_1 = 0$ 和 $G_2 = 0$, 考虑到 G_1 和 G_2 都为非负值, 因此, 约束条件可以转化为

$$G = G_1 + G_2 = 0 \quad (3)$$

1.1.3 目标函数

轮印载荷作用下三跨梁最危险工况分析的目标函数取为感兴趣的结构响应值 $F(x)$ (如弯曲正应力、剪应力、位移等), 采用有限元法来计算结构的响应值。考虑到应力值存在正负, 本文实际

目标函数为结构响应值的绝对值 $\text{abs}(F(x))$ 。

1.1.4 优化数学模型

将上述的设计变量、约束条件和目标函数相结合, 轮印载荷作用下三跨梁最危险工况分析问题可以描述为

$$\begin{aligned} & \max \text{abs}(F(x)) \\ & \text{s.t. } G(x) = G_1(x) + G_2(x) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: x 为决策向量, 其维数为设计变量个数; $G(x)$ 为需要满足的等式约束条件; $F(x)$ 为目标函数, 需要寻找响应绝对值最大的载荷位置。

1.2 使用遗传算法直接搜索的经典求解方法

最危险工况分析本质上为一个优化问题, 需采用合适的优化算法对其进行求解。本文目标函数值通过有限元计算得到, 但由于有限元网格具有离散性, 设计变量即轮印载荷位置同样具有离散性, 因此采用专为离散变量设计的遗传算法进行优化。遗传算法用于模拟自然界生物的进化过程, 为基于种群的算法, 不需要目标函数的额外信息, 但需要评估大量的目标函数值, 而对于三跨梁结构的有限元计算十分迅速, 因此遗传算法适用于求解该问题。

本文采用 ANSYS 参数化语言 APDL 进行建模并施加载荷, 先编写建模和载荷施加的 APDL 文件, 再通过 MATLAB 主控程序进行调用, 实现最危险工况分析的优化过程, 如图 2 所示。

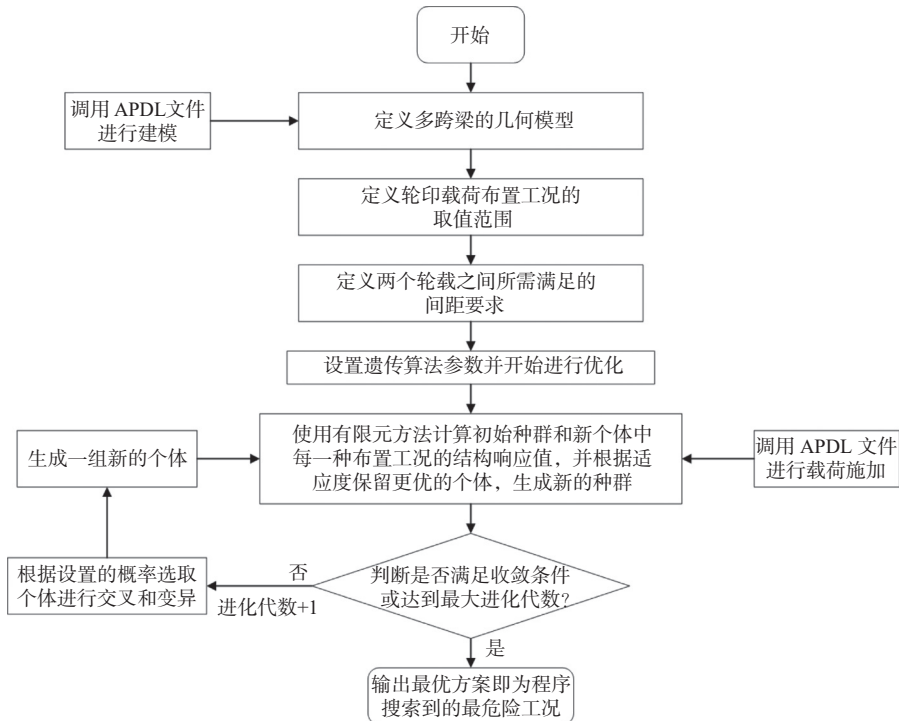


图 2 优化流程图

Fig. 2 Optimization flow chart

1.3 融入先验知识的求解方法

当轮印载荷数量较多时,在给定的计算资源下,使用遗传算法直接搜索的经典求解方法得到的最危险工况并不稳定,且优化得到的载荷作用位置与最危险工况理论解存在一定的差异。因此需引入其他策略来指导优化过程,保证每次优化都能够找到较准确的结果。

1.3.1 基于先验知识的初始种群生成策略

根据船舶结构力学知识,多个载荷作用于梁上时,当最大载荷位于梁的跨中区域、次大载荷分列两旁且紧靠时,会产生较大的弯曲正应力,即当多个载荷以较大的载荷为中心聚集在某一跨梁的跨中区域时,往往会产生较大的弯曲正应力。与之类似,当载荷靠近支座附近且按大小顺


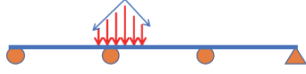


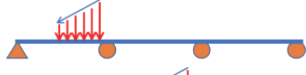
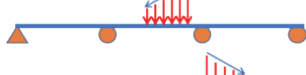


序依次排列时,往往会产生较大的剪应力。

结合上述知识,根据目标函数的不同,人为地在初始种群中生成一部分按照上述规律排布的个体,目标函数为弯曲正应力时让其大概率落在梁的跨中区域,目标函数为剪应力时让其大概率落在梁的支座附近。另外再生成一部分按照上述规律排布的个体,让其落在梁的随机位置,剩余的一部分个体的排列和位置则完全随机生成。以 6 个轮印载荷为例,运用该策略后,将会生成如表 1 所示的个体。

假设 6 个载荷从大到小分别为 P1, P2, P3, P4, P5, P6, 则 6 个载荷以最小间距聚集的 8 种排列方式如表 2 所示。其中 5 个、4 个、3 个、2 个载荷聚集的情况类似,只是随机分布的载荷数量增加。

表 1 6 个轮印载荷作用下运用初始种群生成策略产生的个体

Table 1 Individuals produced after applying the initial population strategy under six wheel patch loads

目标	生成的个体	说明
弯曲正应力		6 个载荷以最小间距聚集(共 8 种排列方式), 且落在跨中区域
		6 个载荷以最小间距聚集(共 8 种排列方式), 落在随机位置
		5 个较大的载荷以最小间距聚集(共 4 种排列方式), 且落在跨中区域, 剩下一个载荷落在随机位置
		5 个较大的载荷以最小间距聚集(共 4 种排列方式), 落在随机位置, 剩下一个载荷落在随机位置
剪应力		6 个载荷以最小间距聚集且按大小排列, 落在支座附近
		6 个载荷以最小间距聚集且按大小排列, 落在随机位置
		5 个载荷以最小间距聚集且按大小排列, 落在支座附近, 剩余载荷落在随机位置
		5 个载荷以最小间距聚集且按大小排列, 落在随机位置, 剩余载荷落在随机位置
		同理, 将会产生 4 个、3 个、2 个较大载荷以最小间距聚集, 落在跨中区域和随机位置, 其余载荷随机分布的个体, 还会生成一些完全随机分布的个体, 以增加种群的多样性

1.3.2 个体的整体平动策略

仅运用初始种群策略时,可能会遇到程序优化得到的轮印载荷危险工况位置与理论解整体相差一段距离的情况,以 3 个轮印载荷为例,载荷最小间距为 200 mm,以一根单跨长为 2000 mm 的三跨梁为分析对象,设计变量范围为 [0, 6000] mm,约束条件是载荷之间的间距不能小于 200 mm,目标函数为最大的弯曲正应力,网格尺寸为 100 mm,则程序优化得到的载荷作用位置可能为 [900 1100 700] mm(工况 1),但在载荷作用位置为 [800 1000 600] mm(工况 2,理论解)时会产生更大的弯曲正

应力,可见优化得到的每个载荷位置均与理论解相差 100 mm。

在优化过程中,初始种群生成策略可能生成或通过程序自动搜索到载荷位置落在工况 1 位置的个体,但若载荷位置整体向左移动 100 mm 并发现更危险的工况 2,则需要 3 个设计变量(3 个载荷与三跨梁左端的距离, x_1, x_2, x_3)同时向左移动 100 mm,而每个载荷的位置都是独立的设计变量,在子代中生成这种 3 个设计变量同时向左移动个体的概率较小。从 [900 1100 700] mm 这组解中可以看到,此时载荷间距已为最小值(约束

表2 6个轮印载荷作用下所有载荷以最小间距聚集可能产生的排列方式

Table 2 Possible arrangement of all loads gathered at minimum spacing under six wheel patch loads

排列编号	载荷排列顺序
1	P5→P3→P1→P2→P4→P6
2	P4→P3→P1→P2→P5→P6
3	P4→P2→P1→P3→P5→P6
4	P5→P2→P1→P3→P4→P6
5	P6→P5→P3→P1→P2→P4
6	P6→P4→P3→P1→P2→P5
7	P6→P4→P2→P1→P3→P5
8	P6→P5→P2→P1→P3→P4

为载荷间距不能小于 200 mm), 设计变量的变化容易产生违反约束的子代个体, 因此在给定的计算资源下, 结果大概率会局部收敛到工况 1 位置, 而难以获得工况 2(理论解)的结果。当载荷数量上升时, 发生该问题的概率更高。为解决这一问题, 本文在生成子代的过程中采用了整体平动的策略。

该策略首先对父代个体的响应值进行排序, 找到响应值最危险的 N 个作用位置, 在生成子代的过程中, $2N$ 个子代个体由父代 N 个目前最危险的作用位置整体向左、向右各偏移 1 个网格间距得到, 其余子代按照遗传算法的交叉变异操作得到, 两部分子代合并到一起形成最终的子代。

1.4 算例及结果分析

本文的三跨梁最危险工况分析计算实例使用

毫米建模, 采用总长度为 6000 mm 的三跨等跨连续梁模型。三跨梁沿 X 轴正方向布置, 梁左端位于原点, 梁单元为 beam188, 梁截面采用工字钢截面, 由 $\perp 12 \times 260/14 \times 120$ mm 的 T 型截面和厚度为 20 mm, 宽度为 500 mm 的附连带板截面结合而成, 本文使用线弹性材料模型, 材料的弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 单元尺寸为 100 mm(网格收敛性检查表明 100 mm 的网格尺寸满足使用要求)。梁的左端部施加 3 个自由度的平动约束, 其余每一跨的分界处施加 Y, Z 两个自由度的平动约束。本文使用的三跨梁有限元模型如图 3 所示。

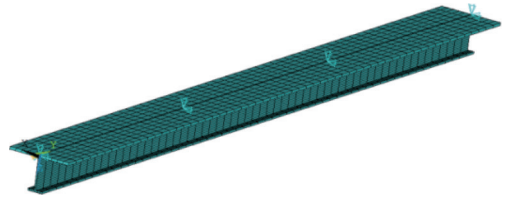


图3 三跨梁有限元模型

Fig. 3 Finite element model of three-span beam

本文算例考虑 3 个轮印载荷和 6 个轮印载荷 2 种情况, 轮印载荷之间的最小间距分别取为 200 和 500 mm, 种群个体数取为 200, 最大有限元计算次数(对非可行方案不进行有限元计算)和进化代数分别为 1500, 目标函数分别为弯曲正应力和剪应力, 优化目标为最大化目标函数, 本文算例均在线弹性范围内进行计算分析。采用经典求解方法以及融入先验知识的方法求解 5 次, 得到的轮印载荷最危险作用位置如表 3~表 6 所示, 这里以及表后小结中提到的经典解法均指 1.2 节给出

表3 3个轮印载荷作用下结构的最危险工况分析结果(正应力)

Table 3 Results of the worst-case of the structure under three wheel patch loads (normal stress)

求解方法	计算次数编号	载荷作用位置/mm			弯曲正应力/MPa
		x_1	x_2	x_3	
经典解法(最小间距200 mm)	第1次	900	700	500	99.77
	第2次	800	1 000	600	102.34
	第3次	900	1 100	700	101.99
	第4次	5 200	5 400	5 000	101.09
	第5次	5 000	5 200	4 800	101.83
融入先验知识(最小间距200 mm)	第1, 2次	900	700	1 100	102.82
	第3~5次	5 100	5 300	4 900	102.82
经典解法(最小间距500 mm)	第1次	5 100	4 600	5 600	85.14
	第2次	900	1 400	400	85.14
	第3次	800	1 300	300	85.46
	第4次	900	400	1 500	83.68
	第5次	800	1 300	300	85.46
融入先验知识(最小间距500 mm)	第2, 3, 5次	800	1 300	300	85.46
	第1, 4次	5 200	4 700	5 700	85.46

注: $x_1 \sim x_3$ 所代表的轮印载荷分别为 10^5 , 5×10^4 , 3×10^4 N。

的使用遗传算法直接搜索的经典求解方法。所有表格中最小间距为轮印载荷之间的最小距离,所采用的三跨梁结构左右对称, [900 1 100 700] mm 与 [5 100 5 300 4 900] mm 的结果是等价的。

表 4 3 个轮印载荷作用下结构的最危险工况分析结果(剪应力)

Table 4 Results of the worst-case of the structure under three wheel patch loads (shear stress)

求解方法	计算次数编号	载荷作用位置/mm			剪应力/MPa
		x_1	x_2	x_3	
经典解法(最小间距200 mm)	第1次	4 300	4 100	4 500	58.63
	第2次	4 100	4 500	4 300	59.25
	第3次	4 100	4 300	4 800	58.34
	第4次	4 100	4 300	4 600	59.35
	第5次	1 900	1 700	1 400	59.35
融入先验知识(最小间距200 mm)	第1, 2, 4, 5次	4 100	4 300	4 500	59.81
	第3次	1 900	1 700	1 500	59.81
经典解法(最小间距500 mm)	第1次	1 900	900	1 400	52.72
	第2次	4 100	4 600	5 100	54.50
	第3次	1 900	1 400	700	53.30
	第4次	4 100	4 600	5 100	54.50
	第5次	4 100	4 600	5 200	53.91
融入先验知识(最小间距500 mm)	第1次	1 900	1 400	900	54.50
	第2~5次	4 100	4 600	5 100	54.50

注: $x_1 \sim x_3$ 所代表的轮印载荷分别为 10^5 , 5×10^4 , 3×10^4 N。

表 5 6 个轮印载荷作用下结构的最危险工况分析结果(正应力)

Table 5 Results of the worst-case of the structure under six wheel patch loads (normal stress)

求解方法	计算次数编号	载荷作用位置/mm						弯曲正应力/MPa
		x_1 /mm	x_2 /mm	x_3 /mm	x_4 /mm	x_5 /mm	x_6 /mm	
经典解法(最小间距200 mm)	第1次	5 000	4 600	4 800	5 200	5 500	2 000	137.85
	第2次	800	1 000	300	1 300	500	5 500	137.08
	第3次	800	1 000	1 200	1 600	600	300	144.66
	第4次	5 100	5 300	4 600	4 900	4 400	4 200	140.81
	第5次	5 200	4 800	5 400	5 000	5 600	1 100	144.59
融入先验知识(最小间距200 mm)	第1, 3次	800	1 000	600	1 200	400	1 400	153.31
	第2, 4次	5 200	5 000	5 400	4 800	5 600	4 600	153.31
	第5次	5 100	5 300	4 900	5 500	4 700	4 500	152.85
经典解法(最小间距500 mm)	第1次	5 300	4 800	1 000	5 800	4 300	1 500	97.83
	第2次	1 300	800	300	1 800	4 900	4 400	95.93
	第3次	4 900	5 400	4 400	5 900	1 100	500	98.44
	第4次	900	1 400	400	6 000	5 500	4 300	98.97
	第5次	1 000	500	1 500	4 800	5 300	4 300	100.28
融入先验知识(最小间距500 mm)	第1次	800	1 300	300	1 800	5 000	4 500	102.62
	第2, 3次	800	1 300	300	1 800	4 700	5 200	102.42
	第4次	5 200	4 700	5 700	4 200	1 100	1 600	102.59
	第5次	5 200	4 700	5 700	4 200	1 400	900	102.62

注: $x_1 \sim x_6$ 所代表的轮印载荷分别为 10^5 , 7.5×10^4 , 5×10^4 , 4×10^4 , 2.5×10^4 , 1.5×10^4 N。

表 6 6 个轮印载荷作用下结构的最危险工况分析结果(剪应力)

Table 6 Results of the worst-case of the structure under six wheel patch loads (shear stress)

求解方法	计算次数编号	载荷作用位置/mm						剪应力/MPa
		x_1 /mm	x_2 /mm	x_3 /mm	x_4 /mm	x_5 /mm	x_6	
经典解法(最小间距200 mm)	第1次	4 200	4 600	4 900	4 400	300	5 100	81.34
	第2次	1 400	1 800	1 600	1 200	1 000	2 200	84.12
	第3次	4 900	4 600	4 200	4 400	5 400	5 200	79.00
	第4次	1 700	1 900	1 200	1 400	600	2 500	85.63
	第5次	4 100	4 500	4 300	5 200	3 800	5 000	83.47
融入先验知识(最小间距200 mm)	第1~4次	4 100	4 300	4 500	4 700	4 900	5 100	92.99
	第5次	1 900	1 700	1 500	1 300	1 100	900	92.99
经典解法(最小间距500 mm)	第1次	1 900	900	1 400	300	3 400	2 800	66.60
	第2次	4 600	4 100	5 100	3 200	5 800	2 400	66.04
	第3次	4 100	5 100	4 600	3 300	5 700	2 800	66.18
	第4次	1 400	1 900	900	400	2 700	3 600	68.03
	第5次	2 100	2 600	1 400	3 100	3 600	800	63.97
融入先验知识(最小间距500 mm)	第1次	1 900	1 400	900	400	2 500	3 000	69.84
	第2次	4 100	4 600	5 100	5 600	3 400	2 900	69.87
	第3次	1 900	1 400	900	400	2 600	3 100	69.87
	第4次	1 900	1 400	900	400	3 000	2 500	69.86
	第5次	1 900	1 400	900	400	2 900	2 400	69.84

注: $x_1 \sim x_6$ 所代表的轮印载荷分别为 10^5 , 7.5×10^4 , 5×10^4 , 4×10^4 , 2.5×10^4 , 1.5×10^4 N。

由表3~表6可见,由于设计变量之间相互独立且可自由调换顺序,当轮印载荷数量较少时,使用遗传算法直接搜索的经典求解方法得到的结果较为稳定且准确,最小间距为200和500 mm的情况下,3个轮印载荷作用下5次计算结果的最大差值为3.4%(由表4中54.5和52.72两组数据计算得到),但当轮印载荷数量上升为6个时,计算结果最大差值达8.4%(由表6中79.00和85.63两组数据计算得到),经典求解方法的多次计算结果有几次准确,与融入先验知识的方法找到的结果相近,但有几次又会产生较大偏差,并无明显规律。因此在本文给定的计算资源下,仅仅依靠遗传算法将该优化问题视为黑箱问题(经典求解方法)进行求解时,难以获得变化较小的结果。

相比于经典求解方法的结果,运用初始种群生成策略和整体平动策略后,三跨梁上的最大弯曲正应力和剪应力值都有一定的提升。在6个载荷作用下,最大弯曲正应力增加了5.98%(由表5中144.66和153.31 MPa计算得到),最大剪应力增加了8.59%(由表6中85.63和92.99 MPa计算得到),说明运用该策略能够搜寻到更加危险的载荷作用位置,且对于以剪应力为目标函数的优

化过程更为有效。由表5和表6可见,不同工况下采用该策略得到的优化结果基本一致,说明该策略同样也能保证结果的稳定。如图4所示,融入先验知识策略后,种群进化10代左右可使结果基本收敛,与直接使用经典解法相比,加快了收敛速度。

2 求解策略有效性的理论验证

连续梁结构可通过力法或位移法求出其弯矩和剪力分布,但载荷数量或载荷位置发生改变后,其弯矩和剪力分布也会发生改变,且使用解析式寻优难以考虑载荷之间的位置约束,故直接使用解析公式进行最危险工况分析较为困难。假定本文结构处于线弹性范围内,满足叠加原理的应用条件,可用来对所提出方法进行理论验证。

以6个轮印载荷作用的等跨距三跨梁结构为例,本文通过力法方程并结合简支梁弯曲要素表^[10]推导单个载荷作用在等跨距三跨梁结构上的弯矩和剪力分布,根据集中力作用位置的不同,可以分别得到几组公式。

当集中力作用在第1跨梁上距该跨左端 x 位置时:

第 1 跨上的弯矩分布为

$$\begin{cases} M(y) = -\frac{P(l-x)y}{l} + \frac{4P(l-x)(l+x)y}{15l^3}, & y \in (0, x) \\ M(y) = -\frac{Py(l-x)}{l} + \frac{4P(l-x)(l+x)y}{15l^3}, & y \in [x, l) \end{cases} \quad (5)$$

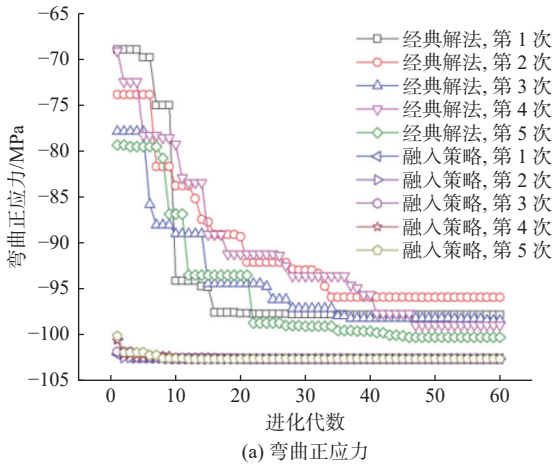
第 2 跨上的弯矩分布为

$$M(y) = \frac{4P(l-x)(l+x)(l-y)}{15l^3} - \frac{Px(l-x)(l+x)y}{15l^3}, \quad y \in (0, l) \quad (6)$$

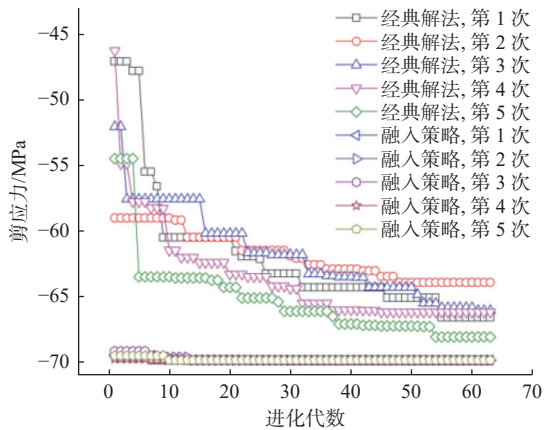
第 3 跨上的弯矩分布为

$$M(y) = -\frac{Px(l-x)(l+x)(l-y)}{15l^3}, \quad y \in (0, l) \quad (7)$$

式中: M 为弯矩沿某一跨梁的分布; $M(y)$ 为 y 位置处的弯矩; x 为集中力作用的位置, 确定集中力作用在哪一跨上后, x 的取值范围为 $(0, l)$; P 为集中力, N ; l 为每一跨梁的长度, m 。



(a) 弯曲正应力



(b) 剪应力

图 4 500 mm 最小间距时 6 个轮印载荷作用下经典方法和本文方法弯曲正应力和剪应力收敛曲线对比

Fig. 4 Comparison of the convergence curves of bending normal stress and shear stress between the classical method and proposed method under six wheel patch loads at a minimum spacing of 500 mm

当集中力作用在第 2 跨梁上距该跨左端 x 位置时:

第 1 跨上的弯矩分布为

$$M(y) = \frac{Px(l-x)(7l-5x)y}{15l^3}, \quad y \in (0, l) \quad (8)$$

第 2 跨上的弯矩分布为

$$\begin{cases} M(y) = \frac{P(l-x)(7l-5x)(l-y)}{15l^3} + \frac{Px(l-x)(2l+5x)y}{15l^3} - \frac{P(l-x)y}{l}, & y \in (0, x) \\ M(y) = \frac{P(l-x)(7l-5x)(l-y)}{15l^3} + \frac{Px(l-x)(2l+5x)y}{15l^3} - \frac{Px(l-y)}{l}, & y \in [x, l) \end{cases} \quad (9)$$

第 3 跨上的弯矩分布为

$$M(y) = \frac{Px(l-x)(2l+5x)(l-y)}{15l^3}, \quad y \in (0, l) \quad (10)$$

当集中力作用在第 3 跨梁上距该跨左端 x 位置时, 可参照将集中力作用在第 1 跨上时得到的式(5)~式(7), 将式(5)~式(7)中的 y 替换为 $(l-y)$, $(l-x)(l+x)$ 替换为 $(l-x)(2l-x)$, 并将第 1 跨上和第 3 跨上的弯矩分布互换即可。

得到该组公式后, 通过 MATLAB 计算可得单个集中力作用下三跨梁结构弯矩和剪力的理论解, 为跟程序优化结果进行对比, 理论解的计算位置应与有限元网格划分位置一致。三跨梁总长度 6 000 mm, 网格大小为 100 mm, 故划分为 60 个网格, x 存在 60 个可能的位置, 载荷作用在一个位置会产生一组弯矩分布, 因此对于每一个载荷可以得到 60 组弯矩分布。以 6 个轮印载荷为例, 根据叠加原理, 将 6 个载荷的 60 组理论弯矩分布相互组合叠加, 共 A_{60}^6 种组合方式, 并排除不满足最小间距约束的一些组合, 便可通过枚举得到 6 个轮印载荷作用下等间距三跨梁结构的弯曲正应力理论最危险载荷位置。剪应力分布可由弯矩分布对变量 y 求导得到, 仿照上述流程同样可以取得 6 个轮印载荷作用下三跨梁结构的剪应力理论最危险载荷位置, 计算结果如表 7 和表 8 所示, 表中“理论解”指使用枚举方法得到的最危险载荷作用位置。

从表 7 和表 8 可见, 轮印载荷最小间距 200 mm 时, 对于弯曲正应力, 4 次搜寻到理论最危险轮印载荷作用位置, 剩余 1 次未搜寻到最危险工况, 但弯曲正应力值误差仅 0.32%; 对于剪应力, 5 次均搜寻到理论最危险轮印载荷位置。最小间距为 500 mm 时, 对于弯曲正应力, 2 次搜寻到理论最危险位置, 其余 3 次弯曲正应力值最大误差仅为 0.04%, 与理论解几乎相等; 对于剪应力, 2 次搜寻到理论最危险位置, 其余 3 次剪应力最大误差仅

为 0.03%, 与理论解几乎相等。这说明运用本文所提出的优化策略后算法能够准确找到最危险的轮印载荷作用位置。尽管由于该问题的多峰性, 算法无法每次都准确找到最危险的理论解, 但使用本文策略后, 5 次计算结果的误差不超过 0.5%,

满足了实际使用需求。值得说明的是, 直接采用理论分布枚举法极为耗时, 6 个轮印载荷作用下, 枚举所有组合需要计算约 20 h, 随着轮印载荷数量的上升, 该方法的计算时长也将大幅增加, 而本文方法 1 次计算仅需 10 min, 更具实用价值。

表 7 6 个轮印载荷作用下理论最危险载荷位置与融入先验知识求解方法结果的对比(弯曲正应力)

Table 7 Comparison of the theoretical most dangerous load position and the results obtained by embedded domain knowledge solution methods under six wheel patch loads (bending normal stress)

轮印载荷最小间距/mm	计算次数编号	载荷作用位置/mm						弯曲正应力/MPa
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	
200	第1, 3次	800	1 000	600	1 200	400	1 400	153.31
	第2, 4次	5 200	5 000	5 400	4 800	5 600	4 600	153.31
	第5次	5 100	5 300	4 900	5 500	4 700	4 500	152.85
	理论解	800	1 000	600	1 200	400	1 400	153.31
500	第1次	800	1 300	300	1 800	5 000	4 500	102.62
	第2次	800	1 300	300	1 800	4 700	5 200	102.42
	第3次	5 200	4 700	5 700	4 200	1 400	900	102.42
	第4次	5 200	4 700	5 700	4 200	1 100	1 600	102.59
	第5次	800	1 300	300	1 800	4 700	5 200	102.62
	理论解	800	1 300	300	1 800	4 700	5 200	102.62

注: $x_1 \sim x_6$ 所代表的轮印载荷分别为 $10^5, 7.5 \times 10^4, 5 \times 10^4, 4 \times 10^4, 2.5 \times 10^4, 1.5 \times 10^4$ N。

表 8 6 个轮印载荷下理论最危险载荷位置与融入先验知识求解方法结果的对比(剪应力)

Table 8 Comparison of the theoretical most dangerous load position and the results obtained by embedded domain knowledge solution methods under six wheel patch loads (shear stress)

轮印载荷最小间距/mm	计算次数编号	载荷作用位置/mm						剪应力/MPa
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	
200	第1~4次	4 100	4 300	4 500	4 700	4 900	5 100	92.99
	第5次	1 900	1 700	1 500	1 300	1 100	900	92.99
	理论解	1 900	1 700	1 500	1 300	1 100	900	92.99
500	第1次	1 900	1 400	900	400	2 500	3 000	69.84
	第2次	4 100	4 600	5 100	5 600	3 400	2 900	69.87
	第3次	1 900	1 400	900	400	2 600	3 100	69.87
	第4次	1 900	1 400	900	400	3 000	2 500	69.86
	第5次	1 900	1 400	900	400	2 900	2 400	69.84
	理论解	1 900	1 400	900	400	2 600	3 100	69.87

注: $x_1 \sim x_6$ 所代表的轮印载荷分别为 $10^5, 7.5 \times 10^4, 5 \times 10^4, 4 \times 10^4, 2.5 \times 10^4, 1.5 \times 10^4$ N。

此外, 由表可见, 当所有轮印载荷在满足最小间距要求的条件下落在同一跨梁上时, 理论最大应力对应的载荷分布位置就是先验工况的一种; 但当载荷间距变大, 无法使所有载荷落在同一跨梁上时, 先验工况与理论最大应力对应的位置存在一定的差异, 此时优化程序能够在先验工况的基础上进一步搜索到最大应力的位置, 因此将先验工况与优化算法相结合能够更准确地搜索到最大应力对应的轮印载荷作用位置。

3 结 论

本文提出了一种融入先验知识的轮印载荷作用下三跨连续梁结构最危险工况分析求解方法, 基于该方法得到了 3 个和 6 个轮印载荷作用下三跨梁结构的危险轮印载荷位置, 并与无先验知识的基于遗传算法直接搜索的经典求解方法计算结果进行了对比, 主要结论如下:

- 1) 与现有研究相比, 本文所提出的最危险工

况分析优化数学模型更具普适性,无需人为指定轮印载荷排列顺序,能够自由搜索可能的危险轮印载荷作用位置。

2) 本文方法能够准确、稳定且快速搜索到最危险的轮印载荷作用位置。同等计算资源下,6个轮印载荷作用下,相较于使用遗传算法直接搜索的经典求解方法,本文算法获得的弯曲正应力最大响应值提升了5.98%,剪应力最大响应值提升了8.59%,且与理论解误差不超过0.5%。

3) 当轮印载荷间距变大,无法使所有载荷落在同一跨梁上时,只分析先验工况不一定能获得轮印载荷最危险位置,将先验工况与优化算法相结合能够更加准确地搜索到最大应力对应的轮印载荷作用位置,本文方法更具实用价值。

参考文献:

- [1] 赵超,蔡伟,朱凌,等.不同位置处多次轮印载荷作用下甲板板格塑性变形评估方法[J].船舶力学,2022,26(7): 1029–1038.
ZHAO C, CAI W, ZHU L, et al. Plastic deformation assessment method of deck plates under wheel patch loads with multiple times at different locations[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(7): 1029–1038 (in Chinese).
- [2] 贺远松,伍友军,朱凌,等.典型位置处轮印载荷作用下甲板结构弹性响应研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(3): 487–491.
HE Y S, WU Y J, ZHU L, et al. Study on the elastoplastic response of deck structure under wheel print load at typical location[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2021, 45(3): 487–491 (in Chinese).
- [3] 刘聪,程远胜,张攀,等.加筋板轮印载荷分布特性的试验与数值分析[J].海洋工程,2017,35(4): 84–93.
LIU C, CHENG Y S, ZHANG P, et al. Experiment and numerical analyses on wheel load distribution on stiffened plate[J]. *The Ocean Engineering*, 2017, 35(4): 84–93 (in Chinese).
- [4] TAGAWA K, HARADA S. Worst case prediction-based differential evolution for multi-noisy-hard-objective optimization problems[J]. *Electronics and Communications in Japan*, 2017, 100(5): 3–16.
- [5] JEON S Y, KIM Y H. A genetic approach to analyze algorithm performance based on the worst-case instances[J]. *Journal of Software Engineering and Applications*, 2010, 3(8): 767–775.
- [6] FENG S F, DUAN B Y, WANG C S, et al. Novel worst-case surface accuracy evaluation method and its application in reflector antenna structure design[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 140328–140335.
- [7] CHONG Z H, XIE F G, LIU X J, et al. Worst case identification based topology optimization of a 2-DoF hybrid robotic arm[J]. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2020, 4(2): 136–148.
- [8] OHSAKI M, KATSURA M. A random sampling approach to worst-case design of structures[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2012, 46(1): 27–39.
- [9] 康杰豪,贺远松,谭开忍,等.轮印载荷下多跨梁最危险工况分析与优化[J].中国舰船研究,2016,11(6): 56–64.
KANG J H, HE Y S, TAN K R, et al. Worst-case analysis and optimization of multi-span beams under multiple patch loading[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, 11(6): 56–64 (in Chinese).
- [10] 陈铁云,陈伯真.船舶结构力学[M].上海:上海交通大学出版社,1991: 279–280.
CHEN T Y, CHEN B Z. *Ship structural mechanics*[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1991: 279–280 (in Chinese).

相关论文

- [1] 罗祥云,刘均,江璞玉,等.融合先验知识与简化模型的轮印载荷下甲板桁材最危险工况求解方法[J].中国舰船研究. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03828>
- [2] 武卓威,刘俊,王浩,等.车辆甲板次要构件多轮印载荷等效与简化方法[J].中国舰船研究,2024, 19(5): 166–171. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03499>
- [3] 何市伟,刘晖,张梗林,等.载重轮胎的轮印载荷分布特性试验研究[J].中国舰船研究,2021, 16(6): 140–150. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02121>
- [4] 熊剑锋,闫肖杰,江璞玉,等.任意边界下多跨梁弯曲计算及其工程应用[J].中国舰船研究,2019, 14(4): 61–66. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01207>