

螺栓位置优化设计方法研究^{*}

许彦伟^{1,2} 王宇宏^{1,2} 李文生^{1,2} 柳思成^{1,2†} 程全士^{1,2} 沈超^{1,2} 李祥³ 樊金桃^{1,2}

(1. 航天精工股份有限公司, 天津 300300) (2. 天津市紧固连接技术企业重点实验室, 天津 300300)

(3. 贵州航天精工制造有限公司, 遵义 563006)

摘要 螺栓连接是机械结构中的重要连接形式之一. 合理的螺栓位置分布可以有效降低螺栓载荷, 然而目前还缺乏相关的优化设计方法. 本文提出了一种适合于复杂结构螺栓位置优化的方法. 在该方法中, 首先将打孔区域进行离散化, 得到设计区域边界上的节点坐标, 然后用极坐标表示. 螺栓位置用极径和极角表示, 设计变量由各螺栓的极径和极角组成, 约束条件由设计区域边界的极径和极角确定, 设计目标由设计人员确定. 本文采用的设计目标是使螺栓载荷的方差最小. 之后, 在设计空间中进行参数化采样和批量仿真生成数据集, 构建代理模型, 采用蜘蛛猴优化算法进行螺栓打孔位置优化求解. 最后, 利用本文提出的优化方法, 编写了程序, 并给出了相应的算例. 结果表明, 所提出方法可以有效地对螺栓位置进行优化.

关键词 螺栓连接, 位置优化, 设计方法

中图分类号: TH133.3

文献标志码: A

引言

螺栓连接作为一种重要的紧固连接方式, 由于其构造简单、拆装方便的特点, 在航空、航天、机械等领域中得到了广泛的应用^[1,2]. 在传统的结构设计中, 螺栓通常是根据以往的经验确定打孔位置后, 再根据载荷工况, 选用合适规格的螺栓标准件, 以确保螺栓在结构工作过程中能够在安全载荷范围内. 然而, 螺栓的分布位置往往会对螺栓载荷产生重要影响. 合理的螺栓分布位置能够有效地降低螺栓载荷, 从而提高螺栓连接安全性、降低成本^[3]. 因此, 螺栓连接位置优化对于结构设计和分析具有重要意义.

目前, 不少学者开展的螺栓连接结构分析大多是针对结构的可靠性分析, 即主要面向如何保证结构的承载能力、安全性以及可靠性等^[4-8]. 例如, 王佩艳^[9]、Khashaba 等^[10]通过试验和统计学方法来分析结构可靠性. 而对于螺栓本身, 主要是研究螺栓预紧和结构的力学特征, 如文沛等^[11]研究了不

同外界因素对螺栓预紧力的影响, 周红磊^[12]研究了预紧螺栓连接的蠕变损伤与疲劳寿命的分析方法. 而对于如何确定螺栓连接设计中的螺栓位置分布, 大多依赖经验进行设计. 基于经验确定螺栓位置后, 位置优化方法也主要是采用传统的优化方法, 即针对具体结构, 首先确定优化变量与优化目标, 再编写相应的程序进行优化. 但是, 这种优化程序一般仅适用于同类型结构, 结构变化时, 往往需要对程序进行一系列调整, 以适用其他结构的优化. 而且, 对于螺栓位置优化问题, 优化变量随螺栓数量增加而增加, 使得变量的设计空间非常复杂, 难以计算优化变量的梯度信息, 基于梯度的方法难以适用于螺栓打孔位置的优化. 由此可见, 目前的螺栓位置优化方法仍然具有很大的局限性, 难以满足工程需求. 为此, 本文提出了一种基于自适应代理模型的优化设计方法. 该方法融合了参数化建模与仿真、代理模型和参数空间探索策略, 可以实现对螺栓位置优化问题的高效求解.

1 问题定义与优化设计方法框架

1.1 螺栓位置优化问题的定义

对于一个不规则三维结构,有 N 个不重叠的允许打孔区域,表示为 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_N\}$. 对于第 i 个区域,其外轮廓表示为 S_i ,在区域内布置直径为 d 的螺栓 b_i ,螺栓中心点位置 C_i 与外轮廓的距离 L_i 不超过 m_1 倍的螺栓直径. 各个区域螺栓之间的距离不超过 m_2 倍的螺栓直径. 该优化问题旨在求得一个最优的螺栓位置,使得各螺栓拉伸载荷 $F = \{F_1, F_2, \dots, F_N\}$ 之间的差异最小.

这一优化问题的数学表述为

$$\begin{aligned} \arg \min_c \frac{1}{2N} \|F - \bar{F}\|_2 \\ \text{s. t. } L_i < m_1 d, L_{ij} < m_2 d \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ 表示螺栓中心点的集合, $\bar{F}$ 表示螺栓载荷的平均值, L_i 表示第 i 个区域螺栓 b_i 到区域边界 S_i 的最小距离, L_{ij} 表示第 i 个区域螺栓 b_i 到第 j 个区域螺栓 b_j 的距离, m_1 表示边距系数, m_2 表示间距系数.

1.2 优化设计方法流程

为了求解式中的优化设计问题,本文提出了一种基于自适应代理模型的求解方法. 该方法融合了参数化建模与仿真、代理模型和参数空间探索策略,可以实现对螺栓位置优化问题的高效求解. 其基本流程如图 1 所示.

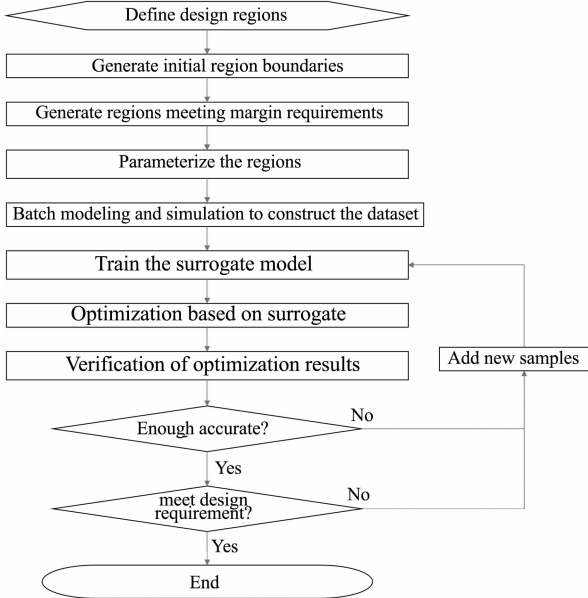


图 1 整体流程图

Fig. 1 The flowchart of the proposed method

(1) 生成螺栓设计区域并提取边界

首先在建模软件中设定若干待布置螺栓的区域,并对这些区域划分三角形网格,利用网格中边界结点与内部结点的差异,提取边界结点,将其连接为多段线,形成若干区域的轮廓 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$.

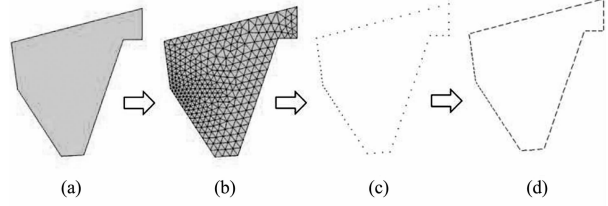


图 2 提取设计区域边界

(a) 选择设计区域, (b) 划分三角形网格, (c) 筛选边界点, (d) 连接点形成轮廓

Fig. 2 Extract the boundary of the design region

(a) select the design region, (b) mesh the design region with triangular grids, (c) filter out the nodes on the boundary, (d) one by one join the nodes to form the outline of the design region

(2) 生成满足边距要求的螺栓布孔区域

在得到区域边界的多段线表示后,可以依次对多段线中与一个顶点相连的两条线段进行平移操作,得到这两条线段新的交点. 原理如下:

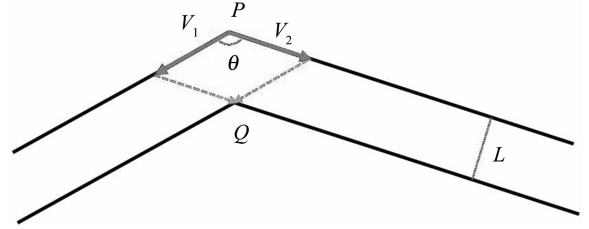


图 3 按边距内缩边界示意图

Fig. 3 Indent the boundary according to the margin constraint

如图 3 所示,当两条线段的交点为 P 时,将两条直线分别沿法线方向向内缩进距离 L ,得到新的交点 Q . 可以看作将 P 点沿矢量 V_1 移动,再沿矢量 V_2 移动,得到新的交点即为 Q . 可以表示为

$$Q = P + V_1 + V_2 \quad (2)$$

在这里,矢量 V_1 和 V_2 是等长的,长度

$$|V_1| = |V_2| = L / \sin \theta \quad (3)$$

其中, θ 为两条线段的夹角.

$$\sin \theta = \frac{V_1}{|V_1|} \times \frac{V_2}{|V_2|} \quad (4)$$

因此,交点 Q 可以重新表示为

$$Q = P + L / \sin \theta \times \left(\frac{V_1}{|V_1|} + \frac{V_2}{|V_2|} \right) \quad (5)$$

取此处的 $L = m_1 d$, 对于轮廓 S_i 上两两相连的线段分别执行以上操作, 即可求出满足边距要求的螺栓布孔区域.

(3) 参数化螺栓可行布置区域

将螺栓在若干打孔区域的位置使用一系列的优化参数表示. 首先, 计算区域所有边界点的平均值, 设为区域中心点. 将打孔区域坐标从笛卡儿坐标系转换到极坐标系, 打孔区域内任一设计点可表示为与区域中心点的距离 r 和弧度 θ . 对于 n 个打孔区域, 设计变量的数目为 $2n$. 对于不规则结构, 可行布置区域的轮廓并不是一个标准的圆形, 因此首先以区域中心点为圆心, 以最大距离为半径, 确定区域的一个外接圆, 在外接圆内使用拉丁超立方采样 (LHS) 方法采样, 并排除掉区域外的采样点.

为了保证代理模型的构建, 在可打孔区域应保证采集的样本在区域内均布. 如果直接对点与圆心距离 r 和弧度 θ 按照均匀分布采样, 得到的采样点将更多地分布于圆心附近. 因此, 将其转换为一个数学问题: 在半径为 R 的圆内随机抛一个点, 这个点落在圆内任意位置是等可能的, 那么, 此点到圆心的距离 r 的分布函数为

$$F(r) = P(X \leq r) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \left(\frac{r}{R}\right)^2 & 0 \leq x < R \\ 1 & x \geq R \end{cases} \quad (6)$$

通过在点与圆心距离 r 的分布函数 $F(r)$ 和弧度 θ 的均匀分布函数上进行拉丁超立方采样, 即可在半径 R 的圆内实现较为均匀采样.

接下来需要排除圆内不属于可打孔区域的样本. 具体流程为对于圆内任意一个采样点, 计算其相对于区域中心点的距离 r 和弧度 θ , 根据 θ 可以确定打孔区域轮廓对应的距离 r_b , 当 $r < r_b$ 时, 该点在打孔区域内, 反之则在边界外. 一个典型区域的识别结果如图 4 所示.

在采样得到足够数量的样本后, 将样本的设计参数重新转换为每个打孔区域内的笛卡儿坐标, 自动调用 ANSYS 进行自动打孔和有限元仿真, 计算每个样本对应螺栓打孔位置的载荷, 作为训练代理模型的数据集. 由于本研究的优化中仅考虑螺栓受到的轴力, 不考虑螺栓预紧力. 因此, 在 ANSYS 中分析时, 采用了等效的螺栓建模方式, 即在螺栓孔

处施加了约束条件, 将分析获得的支反力作为螺栓受力.

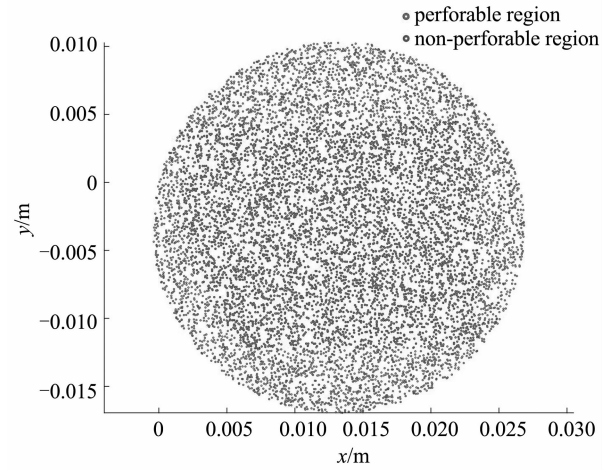


图 4 基于外接圆识别可打孔区域
Fig. 4 Recognize the perforable region based on circumscribed circle

(4) 螺栓批量建模与仿真构建数据集

本文中, 我们采用了一种自适应的基于代理模型的优化方法. 首先采样初始数目的样本, 构建代理模型, 并基于代理模型进行优化. 这时由于样本数量较少, 代理模型所表征的设计空间与真实设计空间差异较大, 优化得到的最优位置与真实情况的差异较大. 所以, 对于优化得到的最优位置重新调用有限元仿真计算其真实载荷, 与代理模型预测的载荷进行比较, 如果差异较大, 则将该位置的设计参数和计算载荷加入数据集中, 并在设计空间中随机采样若干样本, 添加到数据集中, 重新训练代理模型并进行优化. 重复这一过程, 直到优化得到的最优位置预测的载荷与真实载荷的差异满足要求, 或者达到最大采样数目, 停止优化. 最后, 对比优化结果与样本中的最好结果, 选择二者中最好的输出.

(5) 构建代理模型

使用上一步构建的数据集, 构建代理模型, 用于拟合设计参数与螺栓载荷之间的关系. 由于神经网络的拟合能力, 本文选用神经网络构建代理模型.

人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 也简称为神经网络 (NNs), 如图 5 所示, 它是一种模仿动物神经网络行为特征, 进行分布式并行信息处理的算法数学模型. 这种网络依靠系统的复杂程度, 通过调整内部大量节点之间相互连接的关系,

从而达到处理信息的目的。

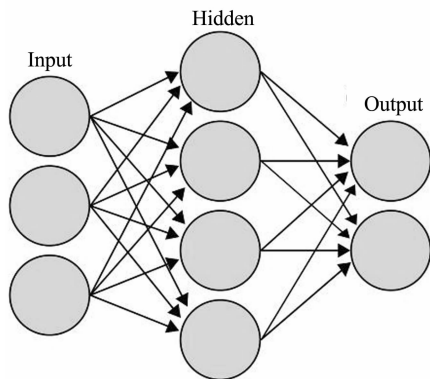


图5 神经网络示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the neural network model

该神经网络拟合的函数可以表示为

$$\mathbf{F} = M(\mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}) \quad (7)$$

其中, $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, \dots, F_N\}$ 表示螺栓载荷集合, $\mathbf{r} = \{r_1, r_2, \dots, r_N\}$ 表示每个螺栓位置相对于对应圆心距离的集合, $\boldsymbol{\theta} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$ 表示每个螺栓位置相对于对应圆心弧度的集合。

在本文中,使用 MATLAB 软件的神经网络工具箱训练神经网络模型。网络结构为单隐层神经网络,隐层神经元数目取为 15,训练方法选用 Levenberg - Marquardt 算法。训练得到的神经网络模型可以根据输入的螺栓位置优化参数快速预测螺栓载荷,是对高精度有限元仿真的代理模型,其精度很大程度上取决于样本数目。

(6) 基于代理模型的优化

螺栓位置优化问题存在优化变量多,变量的设计空间复杂,且难以计算优化变量的梯度信息的特点,因此难以应用传统的基于梯度的优化方法,如梯度下降法,进行求解。而群体/进化算法对目标和约束的数学性质,如凸性,连续性或显式定义等要求不高,是解决一些复杂优化问题的较好选择。在本文中,我们选择蜘蛛猴优化算法作为螺栓打孔位置优化问题的求解算法。蜘蛛猴优化 (Spider Monkey Optimizatn, SMO) 是一个全局的优化算法,由 Bansal 等^[1]于 2014 年提出。该算法的灵感来自现实生活中蜘蛛猴种群的裂变 - 融合 (FFSS) 机制。该算法具有原理简单、高效、控制参数少的优点,近年来得到了广泛的应用。

SMO 算法流程如下:

(1) 初始化种群数量: N , 本地领导者限制次数: LocalLeaderLimit, 全局领导者限制次数: Glo-

balLeaderLimit, 扰动率: pr 。

(2) 计算每个蜘蛛猴个体的适应度值。

(3) 通过贪婪选择选取全局领导者以及本地领导者。

(4) 当不满足终止条件时,执行以下步骤:

① 为找到最优解,利用式(2)产生新的位置。

② 在旧位置和新位置之间应用贪婪选择,根据适应度值选择较好的位置。

③ 根据式(4),计算所有小组成员的被选择概率。

④ 利用式(3),为 $prob_i$ 选中的所有小组成员更新位置。

⑤ 对所有小组进行贪婪选择,更新本地领导者和全局领导者的位置。

⑥ 如果任何本地领导者没有在指定次数 (Local Leader Limit) 后更新它的位置,则通过本地领导者决策阶段重新引导该组所有成员进行觅食。

⑦ 如果全局领导者没有在指定次数 (Global Leader Limit) 后更新其位置,若此时未达到最大组数 MG ,则全局领导者将种群分成更小的组;否则,全局领导者将所有的组融合成一个组。

在本文中,个体的适应度值使用代理模型计算。但是,如果代理模型要达到一个较好的预测精度,可能需要较多的训练样本。而调用高保真有限元仿真是比较耗时的。因此,这里采用一种自适应的代理模型构建与使用策略。

在当前步骤中通过蜘蛛猴优化算法得到优化结果后,将优化后得到的最优变量输入参数化建模仿真程序中,利用高保真有限元仿真对该结果进行校核,并将其与代理模型预测结果对比,如果二者差异较大,说明代理模型的精度较差,得到的优化结果并不可靠,需要进一步采用自适应采样的方式增加样本;如果二者差异较小,说明代理模型准确,优化结果可信,退出优化。

每次增加的样本分为三种类型:

第一类:上一步优化结果重新仿真计算后的样本。

第二类:邻域开发。寻找现有样本集合中最优样本附近的参数组合,可以称之为开发。对现有最优样本施加局部扰动,得到若干新的样本,添加到样本集合中。

第三类:空间探索。在可行的参数空间内随机

采样生成若干样本,添加到样本集合中.

将这三类样本添加到样本集合中,得到新的样本集合,重新调用蜘蛛猴优化算法进行优化.

2 典型结构的优化算例

2.1 含 6 个区域的六边形加筋结构

第一个算例为一个六边形加筋结构,如图 6 与图 7 所示.螺栓设计区域为筋条划分出的六个区域.材料为硬铝合金,弹性模量为 70GPa,泊松比 0.3.需要注意的是,这里结构中的筋条并不是对称分布的,因此六个区域并不相同,且每个区域靠近结构中心的边是一条圆弧,这使得这些区域具有足够的复杂度.其中,最大样本数目设定为 1000 个,初始样本数目为最大样本数目的 10%.每次新增的邻域开发样本数目为 3,参数空间探索样本的数目为 3.

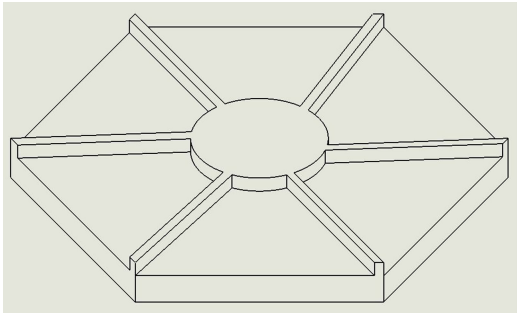


图 6 六边形结构等轴测图
Fig.6 Isometric drawing of the hexagonal structure

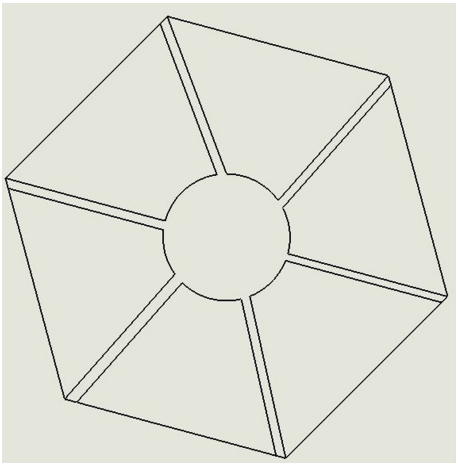


图 7 六边形结构俯视图
Fig.7 Top drawing of the hexagonal structure

算例相关参数如表 1 所示.

对该结构划分的网格和节点数据进行处理,得到其中一个区域的结点信息如图 8 所示,其中,绿色表示边界结点,红色表示内部结点.

对该区域的边缘轮廓线向内收缩 2 倍的螺栓

直径,得到收缩后的可布孔区域如图 9 所示.

表 1 六边形加筋结构算例参数

Table 1 Parameters of the hexagonal stiffened structure

Parameter	Value
Material	Al
Modulus of elasticity	70GPa
Poisson ratio	0.3
Load	10N, Normal direction
Number of design regions	6
Margin coefficient	2.0
Spacing coefficient	2.0
Number of maximum samples	1000
Number of initial samples	100
Number of increased samples for exploitation	3
Number of increased samples for exploration	3

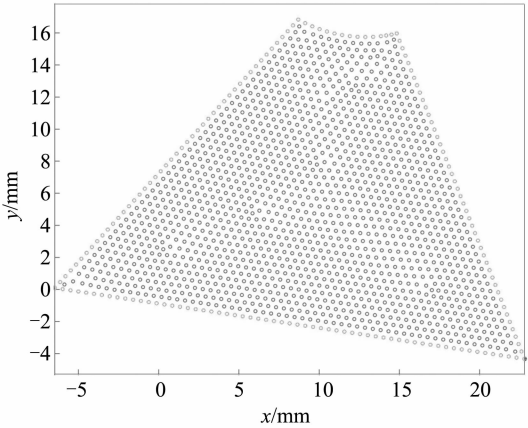


图 8 六边形结构内某一区域的离散结点信息
Fig.8 The discrete nodes in a region of the hexagonal structure

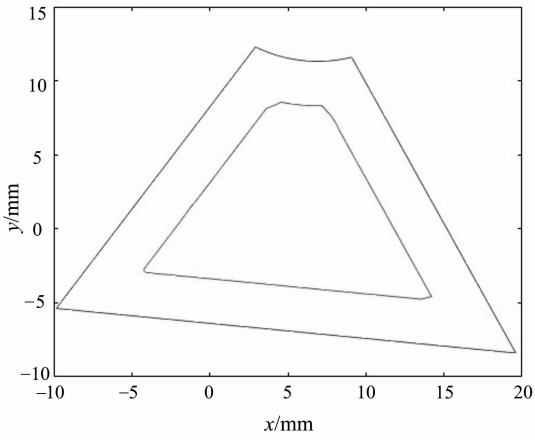


图 9 由设计区域边界向内收缩得到可布孔区域边界
Fig.9 Obtain the boundary of the perforable region by shrinking the boundary of the design region

计算可布孔区域的最大半径,使用距外接圆圆

心距离和弧度作为参数,使用拉丁超立方采样法结合接受拒绝法采样,可以生成若干可行样本,图 10 展示了一个区域采集的 10000 个样本. 实际运行过程中,首次采集为 100 个样本.

对 6 个区域进行初始采样,得到的六个区域采样结果如图 11 所示.

将采样参数转换为螺栓的布孔坐标,调用 ANSYS APDL 参数化建模仿真程序,计算每个样本对应的螺栓载荷,形成数据集. 初始数据集的样本数目为 100 个.

基于神经网络方法训练代理模型,其中,神经网络的输入为 6 个区域的半径和弧长,共 12 个参数,输出为 6 个螺栓的载荷.

利用蜘蛛猴优化算法开展基于代理模型的自适应优化. 优化前后标准差结果如表 2 所示.

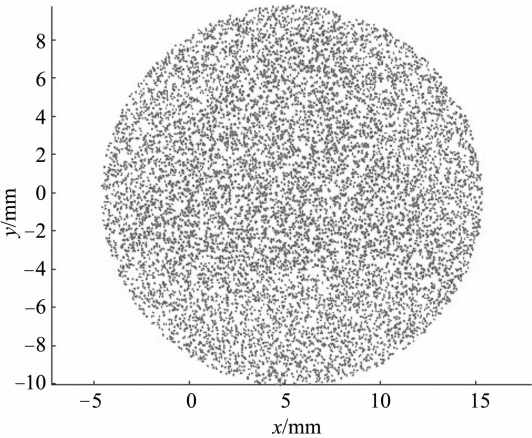


图 10 基于可布孔区域参数生成的样本
Fig. 10 Generated samples based on the parameters in the perforable region

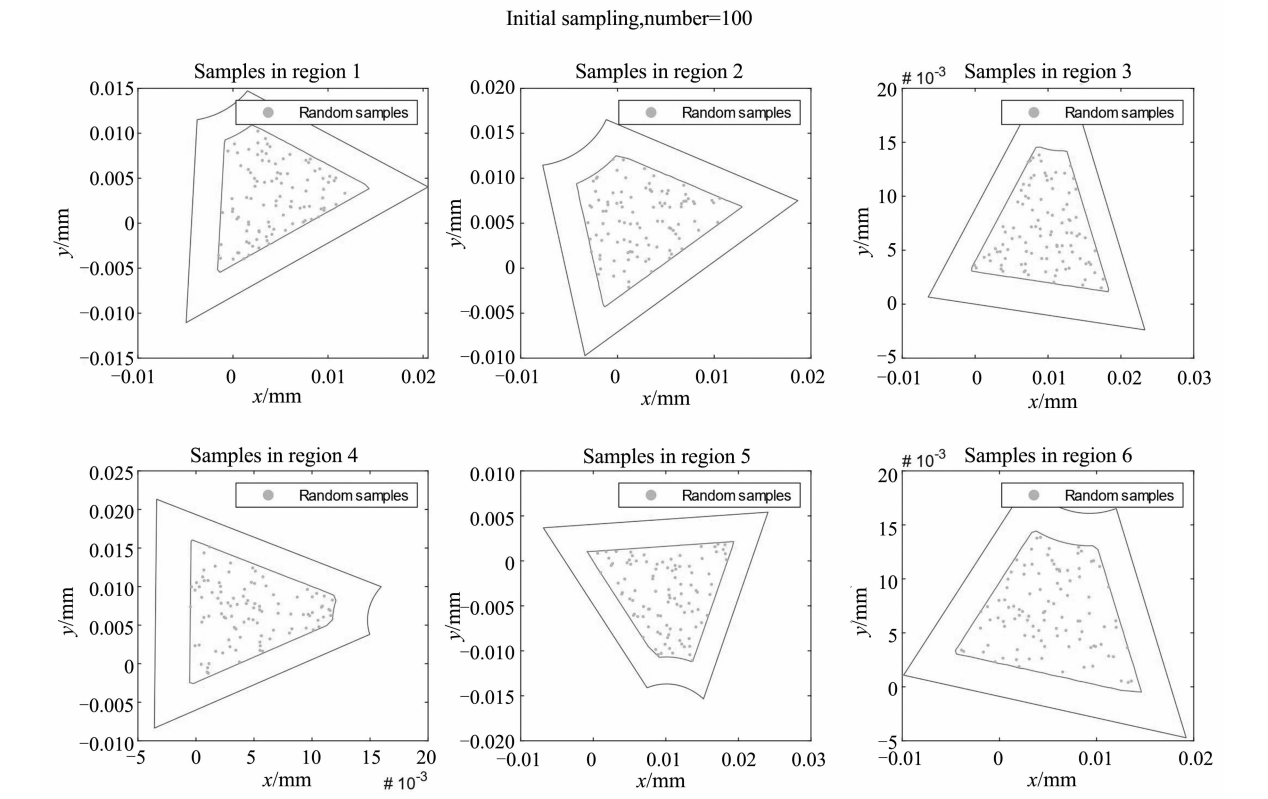


图 11 六边形加筋结构六个设计区域的初始样本点图像
Fig. 11 Initial sample points in the six design regions of the hexagonal stiffened structure

表 2 六边形加筋结构优化前后各螺栓载荷标准差对比

Table 2	Comparison of standard deviations of bolt loads before and after optimization of the hexagonal stiffened structure						
No. bolt	1	2	3	4	5	6	std
After optimization	0.77	0.21	0.23	0.86	1.49	1.44	0.5579
Before optimization	0.87	0.65	0.44	1.01	1.05	0.98	0.2406

从表 2 可以看出,优化后,螺栓载荷的标准差从 0.5579 降到了 0.2406,下降了 43.12%,说明优化具有较好的效果.图 12 展示了优化前后螺栓位

置的对比.可以看到最终的优化位置附近采集的样本比较密集,说明邻域开发策略起到了一定的作用.

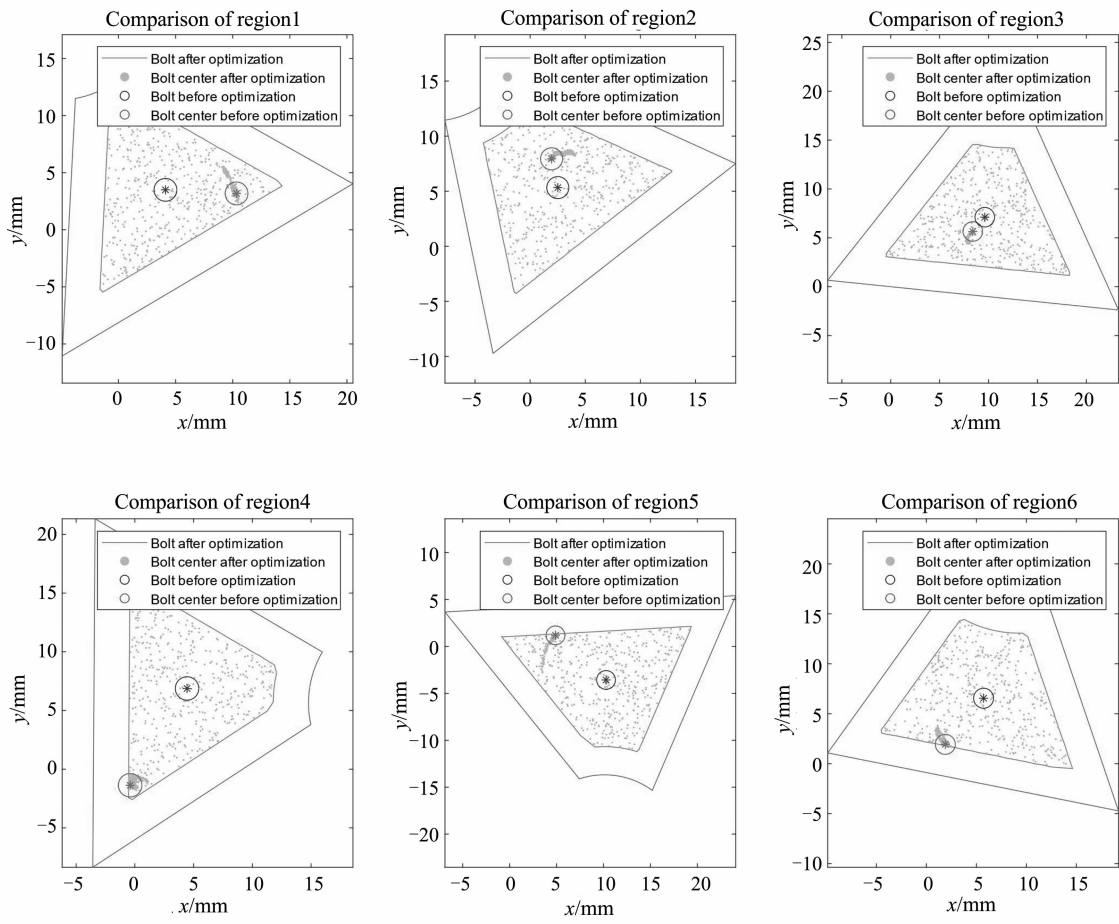


图 12 六边形加筋结构优化前后的螺栓位置对比
Fig. 12 Comparison of bolt positions before and after optimization of the hexagonal stiffened structure

图 13 展示了六边形加筋结构优化过程中目标函数值与样本数目的关系.可以看到,随着优化过程的不断进行,样本数目不断增加,目标函数值在不断下降.这说明从优化螺栓布局这一目标来看,优化取得了较好的效果.

图 14 展示了六边形加筋结构优化过程中优化结果和校核结果之间的差异与样本数目的关系.纵坐标为使用 ANSYS 软件校核后载荷计算的目标函数值与代理模型预测载荷计算的目标函数值之差的绝对值.可以发现,代理模型的精度随着样本数目的增加并没有显著提高,这说明当设计区域较多时,现有样本数目所构建的代理模型与高保真模型的偏差较大,需要更多的样本数才能取得较好的代理模型预测精度.但是,从实际工程应用出发,使用过多的样本数将使得优化时间大幅增加,因此,在

使用过程中需要对此进行权衡.

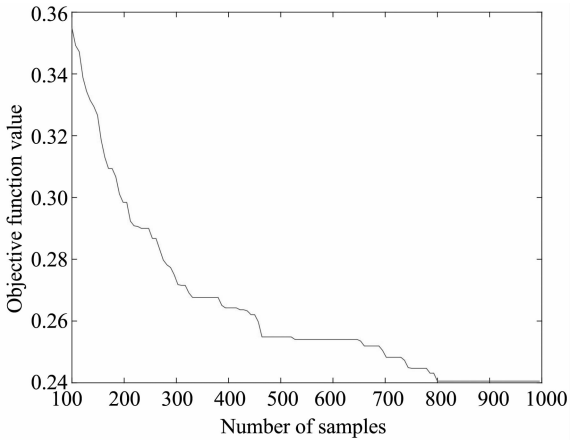


图 13 六边形加筋结构优化过程中目标函数值与样本数目的关系
Fig. 13 The relationship between objective function value and number of samples in the process of optimization of the hexagonal stiffened structure

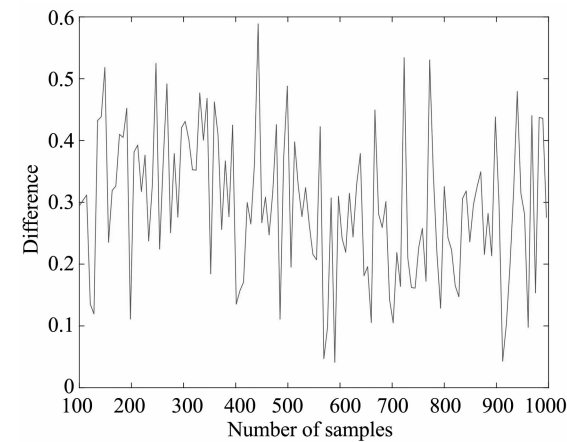


图 14 六边形加筋结构优化过程中优化结果和校核结果之间的差异与样本数目的关系
Fig. 14 Difference between surrogate-based optimization result and validation result and number of samples in the process of optimization of the hexagonal stiffened structure

2.2 含 4 个区域的五边形加筋结构

该结构整体为一个不规则五边形加筋结构,如图 15 所示,布孔设计区域为筋条划分出的四个不规则区域. 结构承受打孔面法向 1N 的集中载荷. 材料为硬铝合金,弹性模量为 70GPa,泊松比 0.3. 需要注意的是,与第一个算例一样,此处四个区域并不相同,符合异形结构的定义. 其中,最大样本数目设定为 1000 个,初始样本数目为最大样本数目的 10%,为 100 个. 每次新增的邻域开发样本数目为 20,参数空间探索样本的数目为 20. 算例相关参数如表 3 所示. 1000 次后优化终止,结果如表 4 所示. 可以看到,优化结束后,使用 ANSYS 校核后的四个螺栓的载荷基本趋于一致,说明优化取得了较好的效果. 图 16 展示了五边形加筋结构优化前后的螺栓位置对比.

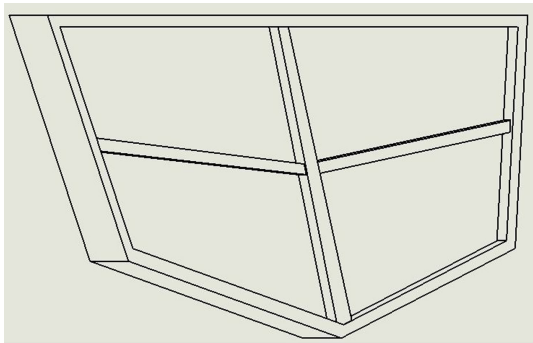


图 15 五边形加筋结构
Fig. 15 Pentagonal stiffened structure

图 17 展示了五边形加筋结构优化过程中目标函数值与样本数目的关系. 可以看出,随着样本数目增加,目标函数值在持续下降. 与此同时,图 18 展示

了五边形加筋结构优化过程中优化结果和校核结果之间的差异与样本数目的关系. 可以看到整体呈下降趋势,说明代理模型的精度在逐步提高. 这说明当设计区域较少时,本文所提出的自适应采样策略可以逐步提高代理模型精度,加速优化过程.

表 3 五边形加筋结构算例参数

Table 3 Parameters of the pentagonal stiffened structure

Parameter	Value
Material	Al
Modulus of elasticity	70GPa
Poisson ratio	0.3
Load	1N, Normal direction
Number of design regions	6
Margin coefficient	2.0
Spacing coefficient	2.0
Number of maximum samples	1000
Number of initial samples	100
Number of increased samples for exploitation	20
Number of increased samples for exploration	20

表 4 五边形加筋结构优化前后各螺栓载荷标准差对比

Table 4 Comparison of standard deviations of bolt loads before and after optimization of the pentagonal stiffened structure

No. bolt	1	2	3	4	std
After optimization	0.23	0.26	0.38	0.14	0.0991
Before optimization	0.25	0.26	0.25	0.25	0.0050

3 结论

通过本文的研究,得出以下结论:

(1) 将参数化建模与仿真、代理模型和参数空间探索策略融合,建立了一种基于自适应代理模型的优化设计方法,该方法可以实现对螺栓位置优化问题的高效求解.

(2) 采用本文提出的优化设计方法对螺栓位置进行优化,优化结果表明,含 6 个打孔区域六边形结构的螺栓载荷标准差从 0.5579 降到了 0.2406,下降了 56.87%,含 4 个打孔区域五边形结构的螺栓载荷标准差从 0.0991 降到了 0.0050,下降了 94.95%. 可见,所提出的方法能够有效地对多种结构进行螺栓位置优化.

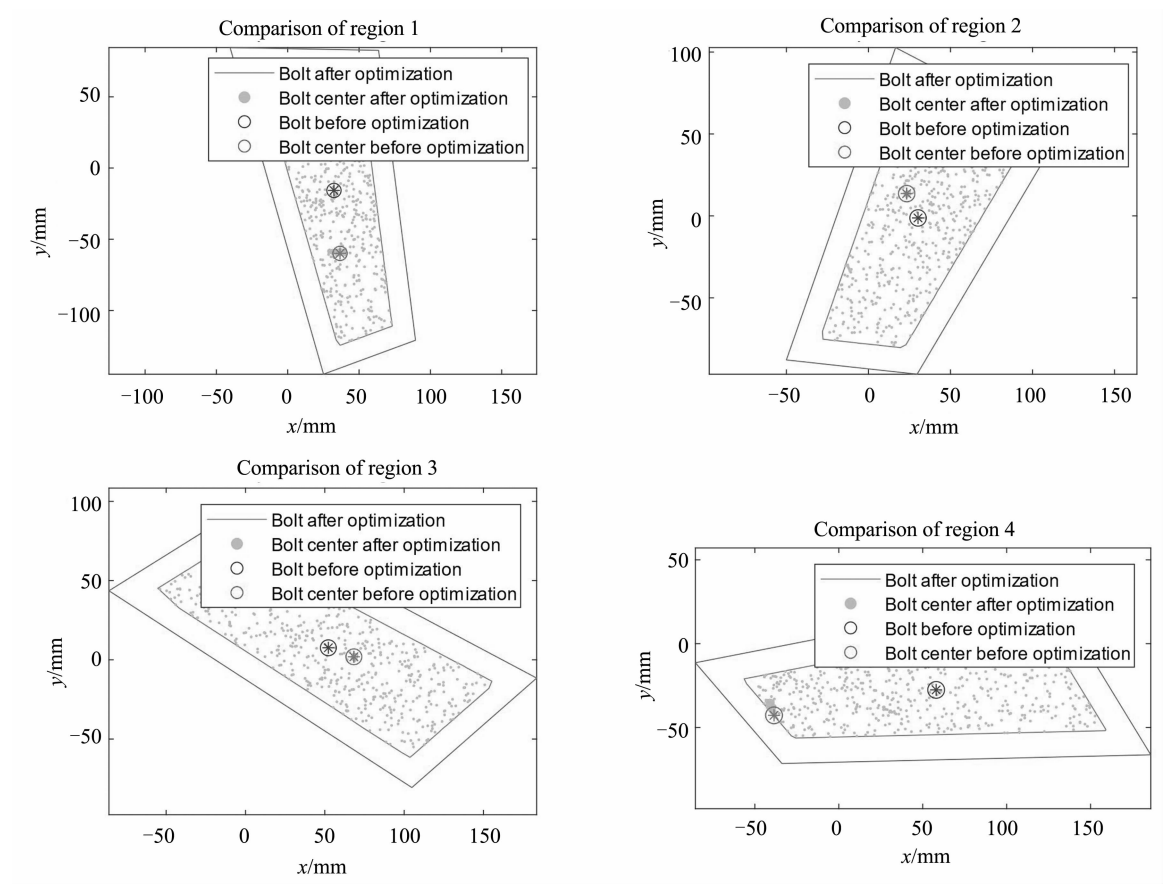


图 16 五边形加筋结构优化前后的螺栓位置对比
Fig. 16 Comparison of bolt positions before and after optimization of the pentagonal stiffened structure

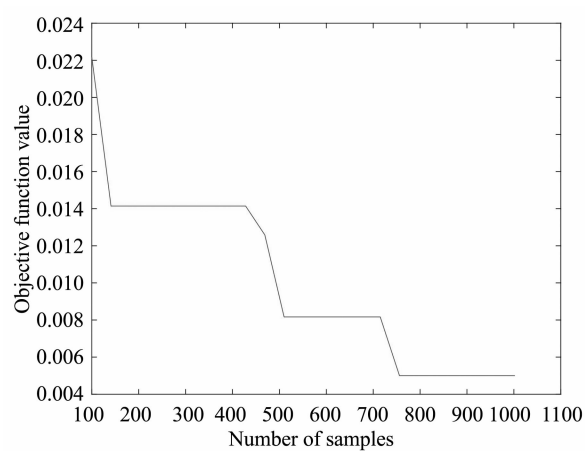


图 17 五边形加筋结构优化过程中
目标函数值与样本数目的关系
Fig. 17 The relationship between objec function value
and number of samples in the process of optimization
of the pentagonal stiffened structure

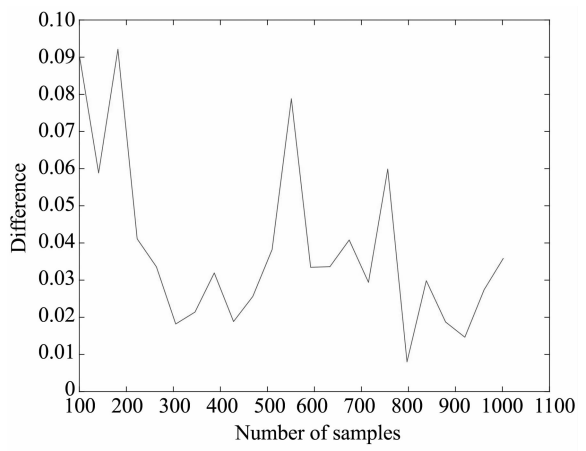


图 18 五边形加筋结构优化过程中优化结果
和校核结果之间的差异与样本数目的关系
Fig. 18 Difference between surrogate-based optimization result
and validation result and number of samples in the process
of optimization of the pentagonal stiffened structure

参 考 文 献

1 乔乔,李晓秀,周江伟,等. 螺栓连接预紧力对结构疲劳性能的影响. 失效分析与预防,2021,16 : 166 ~ 72 (Qiao Q ,Li X X ,Zhou J W ,et al. Influence of pre-tightening force of bolt connection on fatigue life oerformance

of structure. *Failure Analysis and Prevention*,2021,16 : 166 ~ 72(in Chinese))
2 Bickford,John H. An Introduction to the design and behavior of bolted joints. *M Dekker*,1991
3 邵文彬. 悬置系统中的螺栓连接设计. 汽车实用技术,2021,46 : 67 ~ 70 (Shao W B. The design of bolted joints in powertrain mounting system. *Automobile Applied*

- Technology*,2021,46 : 67 ~ 70 (in Chinese))
- 4 Mccarthy M A, Padhi G S, Stanley W F, et al. Bolted joints in composite aircraft structures. Irish Society for Scientific and Engineering Computation Annual Symposium,2000
 - 5 Mangalgi P D. Design allowable considerations for use of laminated composites in aircraft structures. *Journal of the Indian Institute of Science*,2013,93:571 ~ 92
 - 6 Beaumont P,Soutis C, Hodzic A. Damage and failure analysis of bolted joints in composite laminates. *Structural Integrity of Carbon Fiber Composites*,2017:591 ~ 644
 - 7 Ibrahim R A,Pettit C L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners. *Journal of Sound and Vibration*,2005,279 : 857 ~ 936
 - 8 赵丽滨,刘丰睿,黄伟,等. 复合材料螺栓连接失效分析研究进展. 强度与环境, 2017,44: 11 (Zhao L B, Liu F R, Huang W, et al. Advances in failure analysis methods of bolted composite joints. *Structure & Environment Engineering*,2017,44:11 (in Chinese))
 - 9 王佩艳,朱振涛,王富生,等. 复合材料螺栓连接性能的分散性和可靠性分析. 力学季刊,2008,29 (4) : 573 ~ 577 (Wang P Y, Zhu Z T, Wang F S, et al. Dispersibility and reliability analysis of composite laminates bolted joint. *Chinese Quarterly of Mechanics*,2008,29 (4) : 573 ~ 577 (in Chinese))
 - 10 Khashaba U,Sebaey T,Mahmoud F,et al. Failure and reliability analysis of pinned – joints composite laminates: Effects of stacking sequences. *Journal of Composite Materials*,2013,47:3353 ~ 3366
 - 11 文沛,藕长洪,蒋本俊,等. 用于测定高强度螺栓连接副扭矩系数的试验台及系统:CN210774470U. 202-06-16(Wen P,Ou C H,Jiang B J,et al. Test bench and system for determining torque coefficient of high strength bolted joint pairs: CN210774470U. 2020-06-16 (in Chinese))
 - 12 周红磊. 航空发动机典型螺纹连接副高温蠕变和疲劳寿命研究[硕士学位论文]. 西安 : 西北工业大学, 2016 (Zhou H L. Study on high temperature creep and fatigue life for typically threaded connections of aero-engine[Master Thesis]. Xian : Northwestern Polytechnical University,2016 (in Chinese))

AN OPTIMIZATION DESIGN METHOD OF THE BOLT POSITION *

Xu Yanwei^{1,2} Wang Yuhong^{1,2} Li Wensheng^{1,2†} Liu Sicheng^{1,2†} Cheng Quanshi^{1,2}

Shen Chao^{1,2} Li Xiang³ Fan Jintao^{1,2}

(1. Aerospace Precision Production Co. Ltd, Tianjin 300300, China)

(2. Tianjin Key Laboratory of Fastening Technology, Tianjin 300300, China)

(3. Guizhou Aerospace Precision Products Co Ltd. Zunyi Guizhou 563000, China)

Abstract Bolt joint is one of the most important connection forms in mechanical structures. Reasonable bolt position distribution can effectively reduce bolt load, but there is still a lack of relevant optimization design methods. This paper presents a method suitable for bolt position optimization of complex structures. In the method, firstly, the perforated region is discretized to obtain coordinates of the nodes on the boundary of design region then expressed in polar coordinates. Bolts' positions are also expressed by pole diameter and pole angle. The design variable consists of pole diameter and pole angle. The constraint condition is determined by the polar diameter and polar angle of the design area boundary. Design objectives are determined by the designer. The design objective adopted in this paper is to minimize the variance of bolt load. Then, parametric samples and batch simulations are carried out in the design space to generate data sets, and a proxy model was constructed. The spider monkey optimization algorithm is used to optimize the location of bolt. Finally, using the optimization method of this paper, a program is written, and the corresponding calculation example is given. The results show that the proposed method can effectively optimize bolt position.

Key words Bolted connection, location optimization, design method

Received 25 November 2021, revised 18 December 2021.

* The project supported by Basic Research Project of Science and Technology Bureau (JSZL2019204B007)

† Corresponding author E-mail: yang_haut@163.com