

DOI: 10.3901/JME.2023.05.212

自适应参数驱动的装配界面形状主动设计方法^{*}

周意葱¹ 林起崑¹ 王 晨¹ 黄伟旋¹ 张国悦² 侯 乔² 洪 军¹

(1. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安 710049;

2. 西安航天发动机有限公司 西安 710100)

摘要: 应力分布均匀程度是衡量精密机电产品装配精度和性能稳定性的重要指标, 均匀的应力分布也是当前精密机电产品装配过程所追求的目标之一。形状设计是改善装配界面接触应力分布的重要途径, 针对当前基于应力分布的装配界面形状主动设计方法中初始参数取值难以确定, 且相关参数对优化过程计算效率、数值计算稳定性影响较大的问题, 提出了一种根据优化过程中接触应力分布均匀程度变化信息来调节优化参数的自适应参数计算方法。并以典型单螺栓连接结构为设计对象, 对比了采用自适应参数设计方法与采用固定参数设计方法分别进行装配界面形状主动设计后的结果。理论分析结果表明: 该方法可以很好地解决基于应力分布的装配界面形状主动设计方法中初始参数难以确定的问题, 同时提高了优化效果、计算效率和优化过程中的数值计算稳定性。

关键词: 形状主动设计; 自适应参数; 装配界面; 接触应力; 分布均匀性

中图分类号: TG156

Active Design of Assembly Interface Shape Using Self-adaptive Parameters

ZHOU Yicong¹ LIN Qiyin¹ WANG Chen¹ HUANG Weixuan¹
ZHANG Guoyue² HOU Qiao² HONG Jun¹

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotor-Bearing System,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

2. Xi'an Aerospace Engine Co., Ltd., Xi'an 710100)

Abstract: The uniformity of the stress distribution is an important indicator of the assembly accuracy and assembly performance stability of precision electromechanical products, and uniform stress distribution is one of the goals pursued in the current assembly process of precision electromechanical products. Shape design is an important way to improve the contact stress distribution at the assembly interface. In view of the problems that the initial parameters are difficult to determine in the current stress distribution-based active design method of the interface shape, and that the relevant parameters have a large impact on the calculation efficiency and numerical stability of the optimization process, an adaptive parameter calculation method is proposed to adjust the optimization parameters based on the information of the uniformity of contact stress distribution during the optimization process. Then, a typical single bolted joint structure is used as the design object to carry out the interface shape design, and the results of the adaptive parameter design method and the fixed parameter design method are compared and analyzed after the active design of the assembly interface shape respectively. Results show that the problem of determining the initial parameters in the stress distribution-based active design method of interface shape can be well solved, and the improvement of the optimization effect, the calculation efficiency and the numerical calculation stability of the optimization process can be achieved simultaneously.

Key words: active shape design; self-adaptive parameter; assembly interface; contact stress; distributing uniformity

^{*} 国家自然科学基金资助项目(52222508, 51975457)。20220330 收到初稿,
20221108 收到修改稿

0 前言

装配界面接触特性直接影响装配系统的刚度、振动、接触电阻等静电特性^[1-4]，高性能装配界面为保障复杂机电系统的高性能高可靠性服役具有重要意义。事实上，装配界面的存在打破了机械结构的连续性，接触应力在界面上表现出极强的非线性。所产生的不均匀接触应力分布，易引起界面磨损不均、零件疲劳失效、组件振动过大、装配体密封失效等问题^[5-6]。而接触应力分布均匀性又是衡量精密机电产品装配精度和性能稳定性的重要指标^[7]，因此，要保障精密机电系统的长寿命高可靠性服役，可从提升装配界面接触应力分布均匀性入手。

近年来，西安交通大学洪军团队^[8-14]从材料机械物理属性(刚度、硬度等)着手，提出了非均质机械物理属性装配界面设计理念，即通过改变和精细控制接触界面表层材料的机械物理属性(刚度、硬度等)，将接触界面设计制造为具有非均匀机械物理属性分布的表面，以此来提升系统的装配连接性能。目前非均匀材料刚度分布已成功应用于接触问题，并大幅改善了装配界面的接触应力分布均匀性^[8-10,12-13]。此外，接触应力分布也与装配体几何尺寸、装配体材料分布、装配界面形状等密切相关。相较于非均匀材料刚度分布的精准制造，装配界面形貌和装配体材料分布(亦即拓扑结构)的制造难度和成本均较低，因此现阶段以提升装配界面接触应力分布均匀性为目标的研究仍主要集中于装配界面形状设计和装配体拓扑结构设计。

国内外学者基于数学规划方法(Mathematical programming, MP)^[15]、渐进结构优化方法(Evolutionary Structural optimization, ESO)^[16]、固体各向同性材料惩罚方法(Solid isotropic material with penalization, SIMP)^[17]、移动渐近线法(Method of moving asymptotes, MMA)^[18]、水平集法(Level set method, LSM)^[19]、扩展有限元法(Extended finite element method, X-FEM)^[20]、神经网络^[21]等经典优化方法对接触边界、接触域或接触体进行了优化设计，有效提升了接触应力分布均匀性。此外，解析法^[22]、等效静态位移法^[23]、超单元法^[24]、基于密度分布的敏度优化方法^[25]等也被应用于接触应力优化问题中。

其中，在装配界面形状设计领域，考虑接触问题高度非线性带来的解析求解困难、敏度分析复杂等问题，发展出一类易实现、适用范围广的基于

应力分布的装配界面形状主动设计方法^[16, 26-28]。该类方法主要特征为：无需敏度分析并采用多次循环迭代的方式获得最终形貌，且迭代过程中的装配界面形状变化与接触应力分布相联系，直观表现为相邻两次迭代过程中接触界面形状变化量与当前接触应力分布直接关联、并通过当前迭代步的接触应力分布结果计算获得。该类方法已成功应用于铆钉接触界面设计^[16]、涡轮枫树形叶根型线设计^[27]、法兰螺栓连接接触界面设计^[28]等问题，有效提升了接触应力分布均匀性。类似的设计思想也被应用于以减小 von Mises 应力集中为目标的形貌设计^[29]与材料刚度设计^[11]中。

在基于应力分布的装配界面形状主动设计方法中，初始优化参数的取值直接影响最终优化结果及优化过程中的计算效率、数值计算稳定性。但现有文献中对于该类方法中的初始优化参数多是在反复试验的基础上加以选择^[16, 26-28]，由此导致优化参数选择困难和优化参数选择不当引起的优化过程不稳定、优化效果不理想，在实际使用过程中选择合适的初始优化参数较为困难。

针对现有基于应力分布的装配界面形状主动设计方法中存在的以上问题，本文首先提出了一种自适应优化参数^[30]的计算方法，可根据优化过程中接触应力分布均匀性变化信息来动态调节优化参数，使优化过程能够稳步进行。然后，以典型单螺栓连接结构为设计对象，分别采用本文提出的自适应参数设计方法与文献中的固定参数设计方法进行装配界面形状主动设计，对比两种装配界面形状主动设计方法的优化效果、计算效率和计算稳定性，说明了基于自适应参数的装配界面形状主动设计方法可有效解决初始优化参数难以确定等问题。

1 基于自适应参数的装配界面形状主动设计方法

1.1 均匀化接触应力分布的装配界面形状优化模型

装配界面几何形貌是影响装配界面接触性能的一项重要因素，装配界面形状优化也是当前一项改善装配界面接触应力分布均匀性的常用技术手段。均匀化接触应力分布的装配界面形状优化的基本思想是通过将接触前零件待接触表面设计制造为具有特定形状的表面，以实现接触后所形成装配界面上接触应力的均匀分布。

由于接触问题的高度非线性，接触相关优化问题难于求得解析解，故而在求解此类问题时，会首

先借助数值分析手段建立装配界面形状的离散数值描述, 再对问题进行求解。其中有限元方法是最常用的离散方式。在使用有限元法离散的前提下, 一种典型的求解思路是将装配界面形状优化问题转化为接触界面上接触节点在计算过程中的坐标修改问题。通过改变接触节点坐标实现装配界面形状的变化, 进而实现对接触后接触应力分布的调控。

基于上述思路, 均匀化接触应力分布的装配界面形状优化模型可表述为

$$\begin{cases} \text{find } X = \{X_1 \ X_2 \ \cdots \ X_n\} \\ \min F(X) \\ \text{s.t. } X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中, X 是接触界面上的接触节点坐标集合, X_i 是接触界面上第 i 个接触节点对应的位置坐标, 也是形状优化过程中的设计变量, 通过接触节点三维空间坐标表示为 $X_i = (x_i, y_i, z_i)$; X_{\min} 、 X_{\max} 分别为接触节点坐标允许的变化上下限, n 是设计域内接触节点总数目; 目标函数 $F(X)$ 是反映接触界面接触应力分布均匀程度的指标, 可取为接触应力最大值、接触应力极差、接触应力方差等直观参量, 也可利用信息熵理论对接触应力分布均匀程度进行定量评价^[31], 目标函数最小化即为接触应力分布最均匀化。本文中定义接触界面接触应力方差 δ 为目标函数, 即接触应力方差越小, 接触应力分布越均匀。接触应力方差 δ 的具体计算方法为

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{\text{mean}})^2}{n}$$

$$\sigma_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, σ_i 是接触界面上第 i 个接触节点处的接触应力值, σ_{mean} 是接触界面上所有接触节点的接触应力平均值。

1.2 基于应力分布的装配界面形状主动设计方法分析

本节针对现有基于应力分布的这一类装配界面形状主动设计方法中存在的问题展开具体分析。

(1) 基于应力分布的形状主动设计算法描述。

基于应力分布的装配界面形状主动设计方法的一个重要特征为: 装配界面形状迭代优化过程中, 装配界面形状变化与接触应力分布相联系, 直观表现为相邻两次迭代过程中接触界面形状变化量与当前接触应力分布直接关联、并通过当前迭代步的接触应力分布结果计算获得。式(3)^[28]为一典型将相邻两次迭代过程中接触界面形状变化量与当前接触应

力分布直接关联的计算公式

$$\varepsilon_i = M \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} - \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \right) \cdot n_j \quad (3)$$

式中, ε_i 为第 i 个接触节点处的法向距离修改量, 即接触节点 i 处的坐标改变量; M 为修改系数(为常数); σ_{\max} 、 σ_{\min} 分别为接触界面上的接触应力最大值、最小值; n_j 为第 i 个接触节点处的接触界面的法向单位矢量。依据上式计算获得每次迭代时的装配界面上各接触节点处的法向距离修改量, 再通过直接改变接触节点坐标来实现法向距离的改变, 相邻两次迭代过程中接触节点坐标更新关系式为

$$(x_i^{k+1}, y_i^{k+1}, z_i^{k+1}) = (x_i^k, y_i^k, z_i^k) + (\varepsilon_{ix}, \varepsilon_{iy}, \varepsilon_{iz}) \quad (4)$$

式中, $(x_i^{k+1}, y_i^{k+1}, z_i^{k+1})$ 为接触节点 i 在第 $(k+1)$ 次迭代时的坐标, (x_i^k, y_i^k, z_i^k) 为接触节点 i 在第 k 次迭代时的坐标, $(\varepsilon_{ix}, \varepsilon_{iy}, \varepsilon_{iz})$ 为接触节点 i 处的法向距离修改量 ε_i 的坐标。

关于迭代终止条件, 本文中指定最大迭代次数 k_{\max} , 当迭代次数达到指定最大迭代次数时, 迭代终止。

(2) 算法中的优化参数取值问题。

从上述描述中可看到, 基于应力分布的装配界面形状主动设计方法的核心环节为根据应力求解结果对装配界面形状进行改动, 即式(3)所表示的法向距离修改量计算公式。在该式中, 修改系数 M 为常数, 其取值直接影响相邻两次迭代过程中接触节点处的坐标改变量, 进而会对最终优化结果及优化过程中的计算效率、数值计算稳定性等产生影响。

当采用过大的修改系数时, 计算得到的法向距离修改量大, 即相邻两次迭代过程中接触节点的坐标改变大, 过大的形状变化易在接触界面上某些位置产生不协调接触变形, 从而导致接触应力分布不连续, 引起数值计算不稳定和优化结果差异较大等问题。当采用过小的修改系数时, 可以获得较好的形貌优化效果, 但该优化效果是以牺牲计算效率获取的, 过小的修改系数意味着优化过程需要大量的迭代次数。

当前对于修改系数 M 的取值, 大多都是根据经验取值或在反复试验的基础上加以选择, 不合适的取值会引起无法有效兼顾优化效果、计算效率和计算稳定性的问题, 在实际使用过程中合适的修改系数的选择较为困难。

1.3 自适应参数的计算方法

针对修改系数 M 取值难以确定这一问题, 本文引入自适应控制思想^[32], 提出了一种自适应的修改

系数计算方法,使修改系数能够随优化过程中的接触应力分布均匀程度变化信息进行调整,从而有效改善优化过程。基于自适应的修改系数可以表示为

$$M^{k+1} = f(\lambda^{k+1})M^k \quad (5)$$

$$\begin{cases} f(\lambda^{k+1}) > 1 \\ F(X)^k \leq F(X)^{k-1} \quad F(X)^{k-1} \leq F(X)^{k-2} \\ f(\lambda^{k+1}) < 1 \\ F(X)^k > F(X)^{k-1} \end{cases}$$

式中, M^{k+1} 和 M^k 分别为第 $k+1$ 、 k 次迭代时的修改系数; λ^{k+1} 为自适应因子,与优化过程中的接触应力分布均匀程度变化信息相关; f 是与 λ^{k+1} 相关的函数关系; $F(X)^k$ 为第 k 次迭代时的目标函数值。当目标函数连续两次减小时,认为此时优化过程数值计算稳定,可适当增大修改系数以提高计算效率,因此此时 $f(\lambda^{k+1}) > 1$ 。与之相反,一旦相邻两次迭代过程中目标函数出现增大,即接触应力分布均匀性变差时,认为此时接触节点坐标改变量偏大,易造成数值计算不稳定,可适当减小修改系数以保证数值计算稳定性,因此此时 $f(\lambda^{k+1}) < 1$ 。

为方便计算,将函数关系 f 设置为分段常值函数,即

$$f(\lambda^{k+1}) = \begin{cases} \lambda_1, \lambda_1 > 1 \\ F(X)^k \leq F(X)^{k-1} \quad F(X)^{k-1} \leq F(X)^{k-2} \\ \lambda_2, \lambda_2 < 1 \\ F(X)^k > F(X)^{k-1} \end{cases} \quad (6)$$

式中, λ_1 和 λ_2 分别称作扩张因子和收缩因子,均为常数,且 $\lambda_1 > 1$ 、 $\lambda_2 < 1$ 。当扩张因子 λ_1 与收缩因子 λ_2 取合适值时,可使形貌优化过程快速而稳定的趋于最优解。在扩张系数与收缩系数取值时,为兼顾优化效果与计算效率,采用“慢扩快缩”的策略^[27],即扩张时缓慢增加修改系数 M ,收缩时大幅减小修改系数 M 。不同的扩张系数与收缩系数会产生不同的优化效果与计算效率,基于笔者前期试验,推荐的取值为 $\lambda_1 \in (1.0 \sim 1.15)$ 、 $\lambda_2 \in [0.4 \sim 0.6]$ 。

至此,结合本文定义接触界面接触应力方差 δ 为目标函数,基于自适应的修改系数可以表示为

$$M^{k+1} = \begin{cases} \lambda_1 \cdot M^k & \delta^k < \delta^{k-1} \quad \delta^{k-1} < \delta^{k-2} \\ \lambda_2 \cdot M^k & \delta^k > \delta^{k-1} \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(3)即可获得基于自适应参数的法向距离修改量的计算公式。

1.4 基于自适应参数的装配界面形状主动设计流程

采用有限元方法,基于自适应参数的装配界面形状主动设计的主要步骤如下所述。

(1) 初始模型分析:根据装配连接结构和材料属性,建立相应的有限元数值模型,施加载荷和相应的边界条件,并进行优化前的分析,获取初始接触应力分布结果。

(2) 设计参数确定:根据实际需求确定设计域,并初始化修改系数 M 、扩张系数 C_1 、收缩系数 C_2 与最大迭代次数 k_{\max} 取值。

(3) 迭代-分析与再设计:开始迭代过程,每一次迭代先进行有限元分析,再计算目标函数并进行迭代终止条件判断;未达到最大迭代次数时依据式(3)、式(7)计算获得各接触节点坐标修改量,进一步依据式(4)得到新的接触节点坐标,并用修改后的节点信息更新模型再进行分析;重复此步骤,直到迭代次数达到指定的最大迭代次数,迭代终止,进入下一步。

(4) 优化结果输出:迭代终止后,将当前的接触节点坐标输出即可得到优化后的形状结果。

2 主动设计方法应用

基于以上描述,利用有限元分析软件 ANSYS 作为求解器,编制了相应的基于自适应参数的装配界面形状主动设计程序。为清晰地显示采用自适应参数的优势,本节以单螺栓连接结构为设计对象,对比了采用自适应参数的装配界面形状主动设计方法与采用固定参数的装配界面形状主动设计方法的优化结果。本文有限元数值计算结果的正确性已在前期发表的工作中得到验证^[32]。

2.1 单螺栓连接结构

图为单螺栓连接结构模型,由螺栓、螺母、上下连接件组成,上下连接件均是厚度为 10 mm、内径为 6.5 mm、外径为 50 mm 的圆盘形平板。螺栓为 M6 螺栓,施加的螺栓预紧力为 10 kN。采用线弹性模型,螺栓及被连接件的弹性模量均为 200 GPa,泊松比均为 0.3。接触界面摩擦因数均为 0.1,服从库仑摩擦。

为保证计算结果的准确性,对有限元网格质量进行了检验。同时为提高计算结果精确度,在上下连接件距离接触界面各 0.5 mm 的区域内,将网格加密为非接触区域的 3 倍,其余接触区域网格也进

行了相同加密处理。最终得到的有限元模型共包含 17 316 个单元、17 209 个节点,接触界面上共有 262 个接触对。

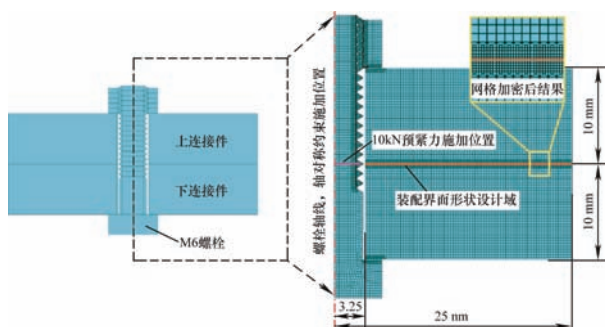


图1 单螺栓连接结构模型

定义上下连接件间的整个接触界面,即几何半径为 25 mm 的区域为设计域,在初始设计时上下连接件间是理想的平面接触。分别采用自适应参数与固定参数的主动设计方法对其进行装配界面形状主动设计。

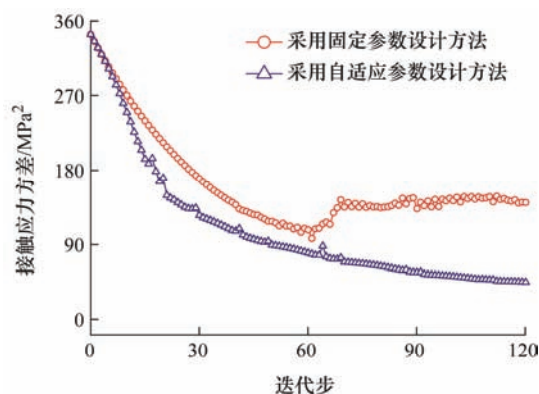
2.2 自适应参数与固定参数的装配界面形状主动设计效果对比

本节分别对修改系数 M 取 1×10^{-4} 和 4×10^{-5} 时,采用自适应参数主动设计方法与固定参数主动设计方法的优化效果进行对比。修改系数两个取值下,自适应参数主动设计方法中的扩张因子 λ_1 、收缩因子 λ_2 均分别取值为 1.1 和 0.4。

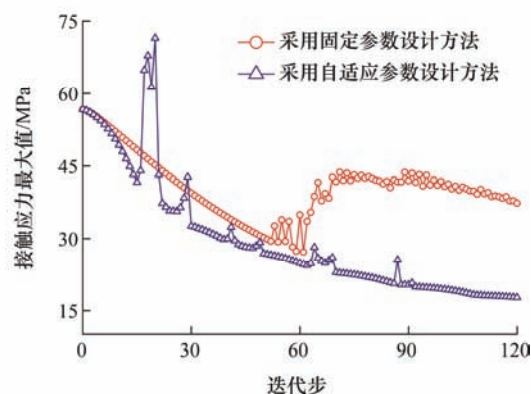
将修改系数 $M=1 \times 10^{-4}$ 时两种方法的对比称为大修改系数取值下的对比,将修改系数 $M=4 \times 10^{-5}$ 时两种方法的对比称为小修改系数取值下的对比。

(1) 大修改系数取值下的主动设计结果对比。

定义修改系数 $M=1 \times 10^{-4}$, 最大迭代次数 $k_{\max}=120$, 得到两种装配界面形状主动设计方法对应设计过程中的接触应力方差(即目标函数)与接触应力最大值的变化曲线,如图 2 所示。从变化曲线可以看到,采用固定参数方法进行主动设计后,接触应力方差与最大值均得到有效降低,表明接触应力分布均匀性得到有效提升,同时可发现二者变化曲线均呈现先平稳降低再波动上升最终趋于平稳的变化趋势。而采用自适应参数方法进行主动设计时,接触应力方差基本一直为稳健降低变化,变化曲线未发生明显波动振荡;接触应力最大值变化曲线中可看到多段明显的数值波动,但该数值波动会因自适应参数的存在而被自适应调节,最终实现平稳变化。



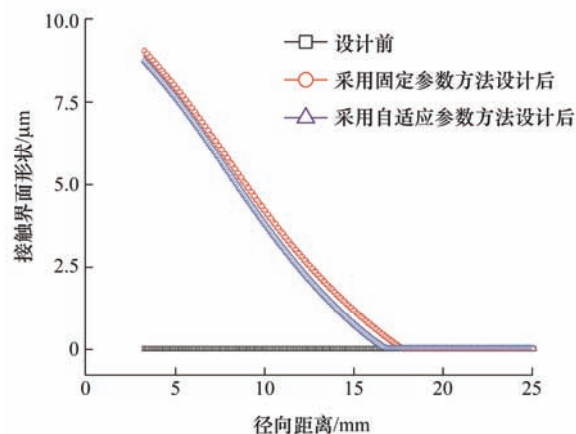
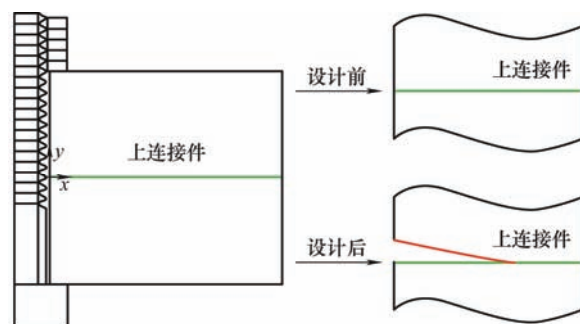
(a) 接触应力方差变化曲线



(b) 接触应力最大值变化曲线

图2 装配界面形状主动设计过程中接触应力方差和接触应力最大值的变化曲线

图 3a 为装配界面形状主动设计前后设计域形状对比情况,图 3b 与为图 3c 分别为装配界面形状



(a) 主动设计前后形状对比

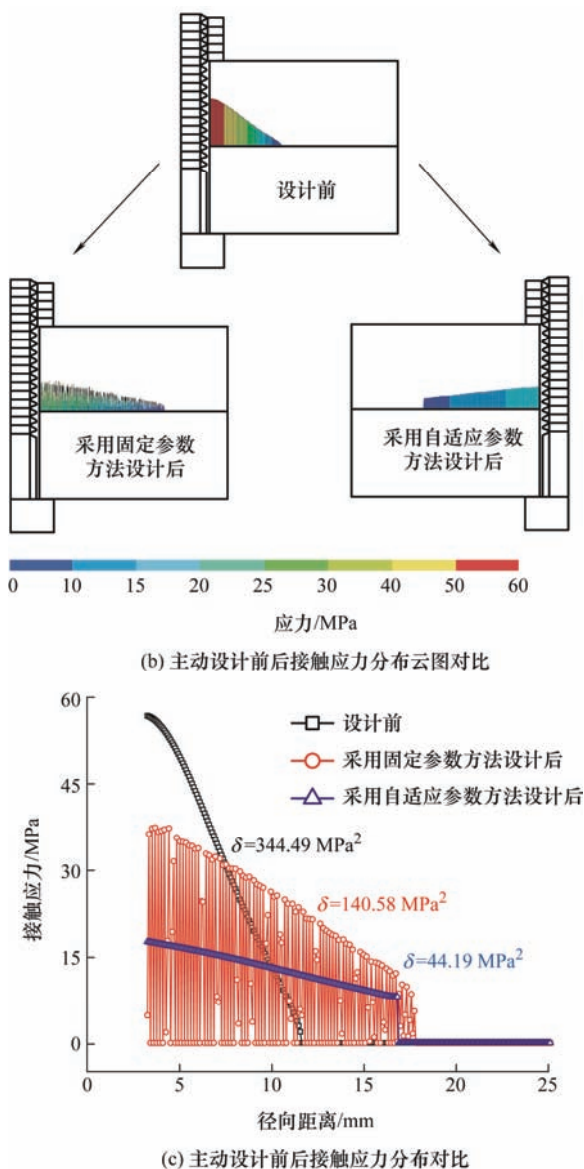


图3 装配界面形状主动设计前、后设计域的形状与接触应力分布对比

主动设计前后设计域接触应力分布云图与分布曲线。从图 3a 中可以看出, 采用固定参数方法与自适应参数方法得到主动设计后的装配界面形状基本一致, 均是以螺栓中心线为轴线, 以图 3a 中曲线为母线的回转锥体。但结合图 3b 可看到, 在装配界面形状基本一致的情况下, 采用固定参数方法与自适应参数方法得到的最终接触应力分布却大不相同。从图 3c 中可以看到, 采用固定参数方法得到的最终接触应力方差虽然从 344.49 MPa^2 下降到 140.58 MPa^2 , 降低了 59.19%, 但其接触应力分布极不平稳, 数值波动严重, 与追求的接触应力分布形式相差甚远。反观采用自适应参数方法得到的最终接触应力分布, 不仅接触应力方差下降到了 44.19 MPa^2 , 降低程度达到了 87.17%, 优于固定参数方法结果, 而且接触应力平稳过渡分布, 未出现接触应力数值波

动情况。

关于图 3c 中采用固定参数方法得到的极不平稳、数值波动严重的接触应力分布, 该分布产生的直接原因是其对应的接触界面形状也是具有波动的。图 4 为采用两种方法主动设计后, 接触界面形状与接触应力分布对应图。从图 4a 中局部放大图可看出, 采用固定参数方法主动设计后, 以最靠近螺栓轴线位置(即径向距离为 3.25 mm 的位置)为起点, 接触界面形状沿连接件径向呈梯度式变化(图 4a), 即接触界面法向接触间隙呈现“减小-保持不变”或“减小-减小-保持不变”的变化趋势。进一步考虑螺栓预紧载荷也是由螺栓轴线位置沿连接件径向向外传递的, 二者综合作用下, 导致在接触间隙保持不变的若干个相邻的接触节点中, 只有部分接触节点能实现有效接触, 在另一部分接触节点上没有接触应力或只能产生极小的接触应力。从而使得接触界面上接触应力分布呈现“有接触应力-无接触应力”或“有接触应力-有接触应力-无接触应力”的极不平稳分布, 即图 4a 局部放大图中所示现象。

从采用自适应参数方法主动设计后接触界面形状与接触应力分布对应图(即图 4b)中也可以看出, 当接触界面形状沿连接件径向的梯度式变化消除时, 相应的接触应力分布连续平稳过渡, 接触应力数值波动等情况也得到消除。说明采用自适应参数方法主动设计后的接触界面形状连续平稳变化, 较采用固定参数方法设计后得到的梯度式变化结果切削加工性更好。

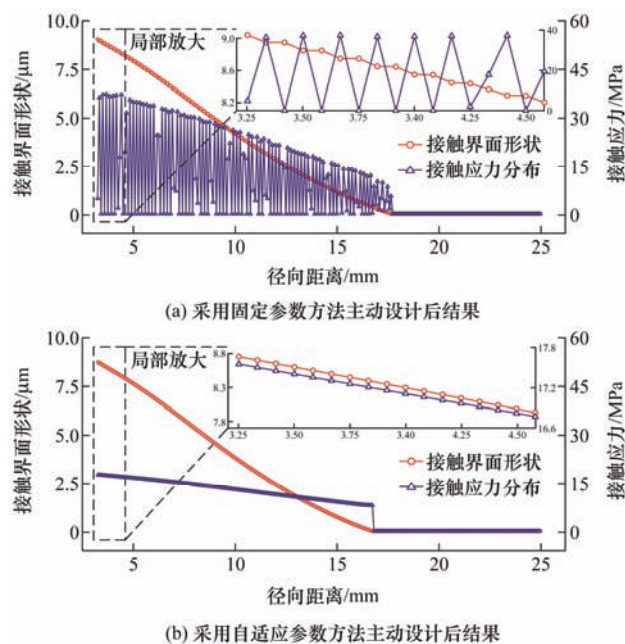
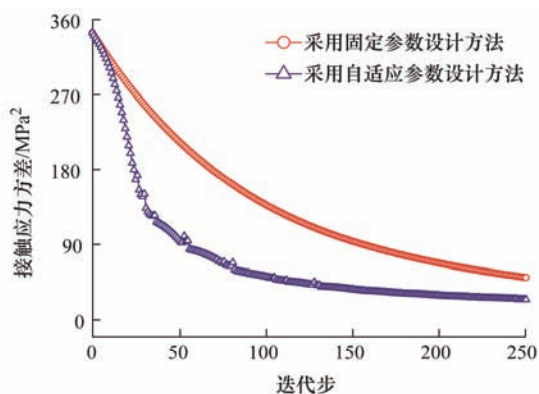


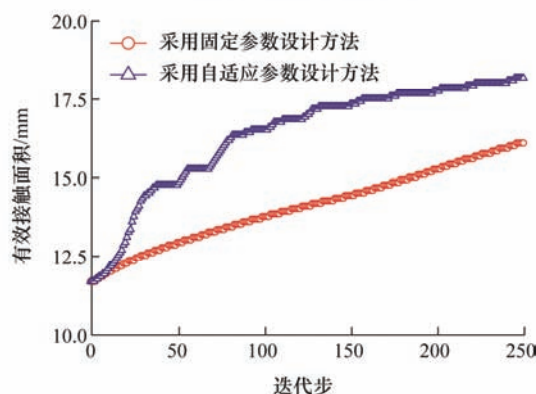
图4 主动设计后接触界面形状与接触应力分布对应图

(2) 小修改系数取值下的主动设计结果对比。

定义修改系数 $M=4 \times 10^{-5}$, 最大迭代次数 $k_{\max}=250$, 得到两种装配界面形状主动设计方法对应设计过程中的接触应力方差(即目标函数)与有效接触面积的变化曲线, 如图5所示。从变化曲线可以看到, 与图2中曲线相比, 当修改系数取较小值(即修改系数 $M=4 \times 10^{-5}$)时, 采用固定参数方法与自适应参数方法得到的接触应力方差变化曲线均稳健下降、有效接触面积曲线均稳健上升, 未发生明显波动震荡, 表明减小修改系数取值有利于提升优化过程数值计算稳定性。同时, 对比两种装配界面形状主动设计方法对应的变化曲线, 可发现相同迭代次数下, 采用自适应参数设计方法得到的接触应力方差更小、有效接触面积更大, 尤其在迭代初期(100次迭代前)更为明显, 表明自适应参数设计方法的优化效果优于固定参数设计方法。



(a) 接触应力方差变化曲线

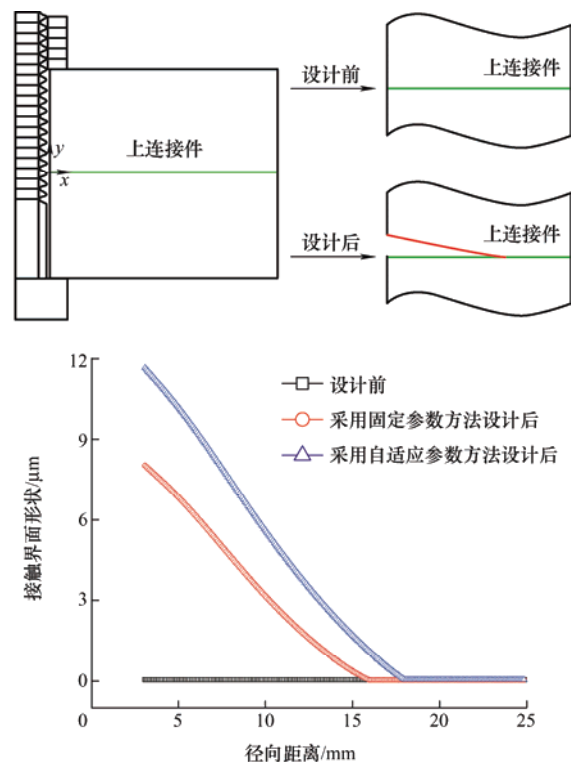


(b) 有效接触面积变化曲线

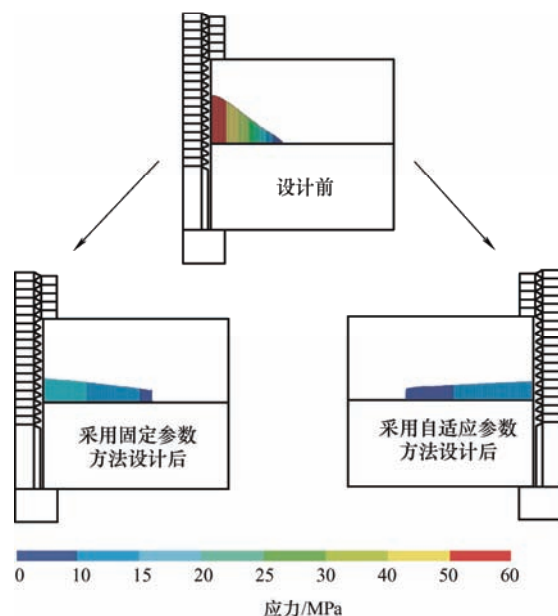
图5 装配界面形状主动设计过程中接触应力方差和有效接触面积的变化曲线

图6a为装配界面形状主动前、后设计域的形状与接触应力分布对比情况。从图6a中可以看出, 采用固定参数方法与自适应参数方法得到主动设计后的装配界面均仍呈锥形分布, 但区别于图3a中基本一致的形状, 采用自适应参数方法主动设计后的

装配界面, 各接触节点的法向接触间隙均明显大于采用固定参数方法主动设计后的结果, 这也是造成图6b中接触应力分布有所差异的主要原因。从图6b中也可以看到, 两种装配界面形状主动设计方法得到的最终接触应力均平稳过渡分布, 未出现图3b中采用固定参数方法得到的极不平稳、数值波动严重的接触应力分布情况, 说明当修改系数取较小值时, 主动设计后得到的接触界面形状均连续平稳变化(类似图4b中分布), 表明小的修改系数取值有利于提升计算结果的稳定性。



(a) 主动设计前后形状对比



(b) 主动设计前后接触应力分布云图对比

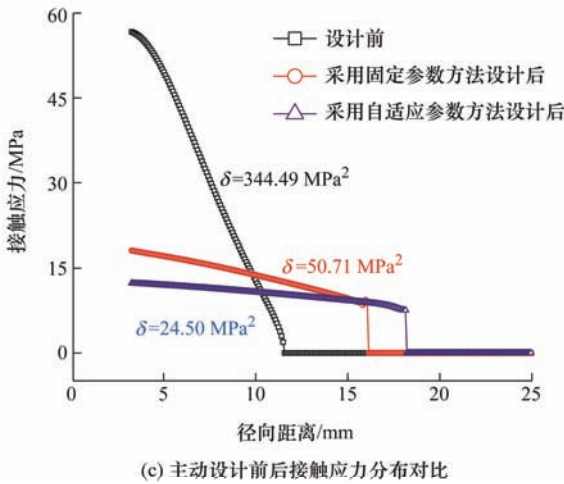


图 6 装配界面形状主动设计前、后设计域的形状与接触应力分布对比

同时，图 6c 中主动设计前后接触应力分布曲线显示，采用固定参数方法与自适应参数方法进行装配界面形状主动设计后，接触应力方差分别从 344.49 MPa^2 下降到 50.71 MPa^2 与 24.50 MPa^2 ，分别降低了 85.28% 与 92.89%。两种方法主动设计后的方差降低程度均优于大修改系数取值下(即修改系数 $M=1 \times 10^{-4}$)的结果，但该更好的优化效果是通过增加迭代次数、牺牲计算效率来获得的。

图 7 为相同迭代次数下(120 次)，两种装配界面形状主动设计方法分别在大修改系数取值(即修改系数 $M=1 \times 10^{-4}$)与小修改系数取值(即修改系数 $M=4 \times 10^{-5}$)下的接触应力方差变化曲线对比情况。可以看到，在相同装配界面形状主动设计方法下，经过 120 次迭代后，不同修改系数取值对应的接触应力方差数值一致或相差不大，说明更均匀的接触应力分布，即更优的优化效果，需要更多的迭代次数。同时也可清晰地看到，同一修改系数下，经过 120 次迭代后，采用自适应参数设计方法优化结果均优于采用固定参数设计方法结果，进一步说明了自适应参数主动设计方法计算效率高的优势。

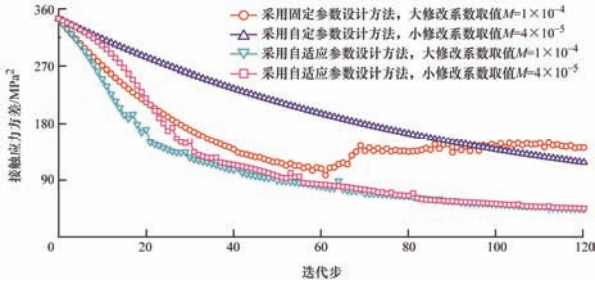


图 7 大修系数取值与小修系数取值的接触应力方差变化曲线对比

2.3 结果讨论

表 1 为不同修改系数取值下，采用固定参数方法与自适应参数方法主动设计后的结果汇总，从表中可以看到，不论是在大修改系数取值还是在小修改系数取值下，采用自适应参数方法均可获得更佳优化效果，得到更均匀的接触应力分布。进一步综合上述分析可以总结得到：在大修改系数取值下(即修改系数 $M=1 \times 10^{-4}$)，对比固定参数方法与自适应参数方法变化曲线结果(图 2)可看到，采用自适应参数方法得到的接触应力方差变化曲线更为平稳，且同时可自适应调节最大值变化曲线中出现的数值波动，表明其数值计算稳定性更好；对比接触界面形状与接触应力分布结果(图 3、图 4)可看到，采用自适应参数方法的接触应力方差降低程度优于采用固定参数方法结果，且接触应力分布平稳、无数值波动情况，同时采用自适应参数方法进行主动设计后得到的装配界面形状连续平稳变化，较采用固定参数方法设计后得到的梯度式变化结果切削加工性更好。在小修改系数取值下(即修改系数 $M=4 \times 10^{-5}$)，对比两种装配界面形状主动设计方法对应的变化曲线与接触应力分布结果(图 5、图 6、图 7)可看到，相同迭代次数下，采用自适应参数方法得到的接触应力方差更小、有效接触面积更大，表明自适应参数设计方法较固定参数设计方法计算效率更高。

表 1 不同修改系数取值下采用固定参数方法与自适应参数方法主动设计后的结果对比

参数	装配界面形状主动设计前	装配界面形状主动设计后			
		大修改系数取值 $M=1 \times 10^{-4}$		小修改系数取值 $M=4 \times 10^{-5}$	
		采用固定参数设计方法	采用自适应参数设计方法	采用固定参数设计方法	采用自适应参数设计方法
接触应力方差/ MPa^2	344.49	140.58	44.19	50.71	24.50
接触应力方差降低程度(%)	—	59.19	87.17	85.28	92.89
迭代次数/次	—	120	120	250	250

本文自适应参数设计所得优化结果在工程实现

时，无需调整装配现场，需要在零件制造阶段，按

照本文优化所得的装配界面形状分布,将零件对应装配界面加工为具有该形状分布的表面,再用相同的装配工艺将该零件进行装配,即可实现装配完成后装配界面上的应力分布均匀程度的提升。本文所分析单螺栓连接结构在具体实现时,在上连接件制造过程中,需要在上连接件装配界面加工一个以螺栓中心线为轴线、以图 4b 中接触界面曲线或图 6a 中装配界面形状分布曲线为母线的回转锥体,将该回转锥体所包含的材料去除掉(一种较为经济的加工方式为车削+磨削),然后再用相同的螺栓连接工艺对该螺栓结构进行装配,装配完成后,就可在上下连接件装配界面上获得对应优化后的接触应力分布。

3 结论

(1) 提出了一种自适应修改系数的计算方法,用以解决当前基于应力分布的装配界面形状主动设计方法中,初始参数难以确定和主动设计过程中采用恒值修改系数难以有效兼顾优化效果、计算效率和计算稳定性的问题。

(2) 以典型单螺栓连接结构为设计对象,对比了不同修改系数取值下,采用固定参数的装配界面形状主动设计方法与采用本文提出的基于自适应参数的装配界面形状主动设计方法的设计结果,结果表明采用本文提出的基于自适应参数的设计方法,可得到更均匀的接触应力分布、可自适应调节优化过程中的数值波动、可提高计算效率,同时设计后的装配界面形状切削加工性更好。

(3) 对比分析同时表明采用基于自适应参数的装配界面形状主动设计方法,很好地解决了优化过程中由于参数选择不当而导致的数值波动问题,且同时兼顾了优化效果、计算效率和计算稳定性。

参 考 文 献

[1] BARZEGARI M M, GHADIMI M, MOMENIFAR M. Investigation of contact pressure distribution on gas diffusion layer of fuel cell with pneumatic endplate[J]. *Applied Energy*, 2020, 263: 114663.

[2] GONG H, LIU J H, DING X Y. Study on the mechanism of preload decrease of bolted joints subjected to transversal vibration loading[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of*

Engineering Manufacture, 2019, 233(12): 2320-2329.

- [3] 刘检华, 孙清超, 程晖, 等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(11): 1-28.
- LIU Jianhua, SUN Qingchao, CHENG Hui, et al. The state-of-the-art, connotation and developing trends of the products assembly technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(11): 1-28.
- [4] ZHOU P, LIN P, WU C W, et al. Effect of nonuniformity of the contact pressure distribution on the electrical contact resistance in proton exchange membrane fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(10): 6039-6044.
- [5] IYER K, RUBIN C A, HAHN G T. Influence of interference and clamping on fretting fatigue in single rivet-row lap joints[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2001, 123(4): 686-698.
- [6] CHEN X, JIN X, SHANG K, et al. Entropy-based method to evaluate contact-pressure distribution for assembly-accuracy stability prediction[J]. *Entropy*, 2019, 21(3): 322.
- [7] 巩浩, 刘检华, 孙清超, 等. 精密机电产品均匀性装配的定义与关键技术[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(3): 174-184.
- GONG Hao, LIU Jianhua, SUN Qingchao, et al. Definition and key technologies of uniform assembly for precision electromechanical products[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(3): 174-184.
- [8] LIN Q Y, YANG N, HONG J, et al. An Optimization design of contact interface material stiffness for improving the uniformity of the contact pressure[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2020, 142(6): 1-18.
- [9] ZHOU Y C, LIN Q Y, HONG J, et al. Combined interface shape and material stiffness optimization for uniform distribution of contact stress[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2020: 1-15.
- [10] ZHOU Y C, LIN Q Y, HONG J, et al. Bidirectional evolutionary optimization design of material stiffness for the uniformity of the contact stress[J]. *European Journal of Mechanics A-Solids*, 2021, 89: 104288.
- [11] ZHOU Y C, LIN Q Y, HONG J, et al. Optimal design of functionally graded material for stress concentration reduction[J]. *Structures*, 2021, 29: 561-569.
- [12] ZHOU Y C, LIN Q Y, HONG J, et al. Bi-objective optimization design of material stiffness for improving contact interface performances[J]. *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(19): 4327-4336.
- [13] ZHOU Y C, LIN Q Y, YANG X H, et al. Material stiffness optimization for contact stress distribution in frictional elastic contact problems with multiple load cases[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2021, 17(3): 503-519.
- [14] WANG C, LIN Q Y, SUN Y N, et al. Hardness prediction considering the influence of alloying elements in laser hardening based on a 3D thermal model[J]. Applied Optics, 2021, 60(26): 7973-7982.
- [15] CONRY T F, SEIREG A. A mathematical programming method for design of elastic bodies in contact[J]. Journal of Applied Mechanics, 1971, 38: 387-392.
- [16] LI W, LI Q, STEVEN G P, ET AL. An evolutionary shape optimization procedure for contact problems in mechanical designs[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 2003, 217(4): 435-446.
- [17] NIU C, ZHANG W H, GAO T. Topology optimization of continuum structures for the uniformity of contact pressures[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 60(1): 185-210.
- [18] 倪长辉, 周显丁. 基于接触应力的高参数汽轮机叶片枫树形叶根型线优化[J]. 计算机辅助工程, 2019, 28(2): 47-51.
NI Changhui, ZHOU Xianding. Optimization on fir-tree profile of blade root of high parameter steam turbine based on contact stress[J]. Computer Aided Engineering, 2019, 28(2): 47-51.
- [19] MYSLINSKI A. Piecewise constant level set method for topology optimization of unilateral contact problems[J]. Advances in Engineering Software, 2015, 80: 25-32.
- [20] Van MIEGROET L, DUYSINX P. Stress concentration minimization of 2D filets using X-FEM and level set description[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2007, 33(4-5): 425-438.
- [21] PATHAK K K, SEHGAL D K. Gradientless shape optimization using artificial neural networks[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009, 41(5): 699-709.
- [22] MIRSALIMOV V M, AKHUNDOVA P E. The Optimal design of a friction unit with uniform contact pressure[J]. Journal of Friction and Wear, 2020, 40(6): 562-568.
- [23] MA Y H, CHEN X Q, ZUO W J. Equivalent static displacements method for contact force optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 62(1): 323-336.
- [24] PEDERSEN N L. On optimization of interference fit assembly[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 54(2): 349-359.
- [25] KRISTIANSEN H, POULIOS K, AAGE N. Topology optimization for compliance and contact pressure distribution in structural problems with friction[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 364: 112915.
- [26] LI W, LI Q, STEVEN G P, et al. An evolutionary shape optimization for elastic contact problems subject to multiple load cases[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194(30-33): 3394-3415.
- [27] OU H, LU B, CUI Z S, et al. A direct shape optimization approach for contact problems with boundary stress concentration[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(9): 2751-2759.
- [28] 侯亦非, 洪军, 周朝宾, 等. 均化接触压力的螺栓连接结合面形状主动设计[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(12): 84-90.
HOU Yifei, HONG Jun, ZHOU Chaobin, et al. Optimization design for bolted joint surface shape by contact pressure homogenization[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(12): 84-90.
- [29] WU Z X. A relative-stress based method for structural shape optimization[J]. Advanced Research on Materials, Applied Mechanics and Design Science, 2013, 327: 271-275.
- [30] 杜春江, 钱林方, 牟淑志. 基于自适应参数的渐进结构优化方法[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(1): 117-120, 123.
DU Chunjiang, QIAN Linfang, MOU Shuzhi. Evolutionary structural optimization using self-adaptive parameters[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(1): 117-120, 123.
- [31] WANG Z, ZHANG Z, CHEN X, et al. An Optimization method of precision assembly process based on the relative entropy evaluation of the stress distribution[J]. Entropy, 2020, 22(2): 137.
- [32] 周意葱, 林起崑, 张宁静, 等. 均化接触应力的双线性材料刚度优化设计[J]. 机械工程学报, 2022, 58(1): 212-220.
ZHOU Yicong, LIN Qiyin, ZHANG Ningjing, et al. Optimization design of bilinear material stiffness for

contact stress homogenization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(1): 212-220.

- [33] 刘作军, 胡冬, 庞爽, 等. 基于自适应运动学模型的镜像型迭代学习控制[J]. 制造业自动化, 2021, 43(7): 29-33.

LIU Zuojun, HU Dong, PANG Shuang, et al. Research on adaptive mirrored iterative learning control method[J].

Manufacturing Automation, 2021, 43(7): 29-33.

作者简介: 周意葱, 男, 1998 年出生, 博士研究生。主要研究方向为接触行为数值分析、静接触装配界面设计、装配体结构拓扑优化。

E-mail: zhouyicongxfjy@stu.xjtu.edu.cn

林起崑(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为静/动装配界面主动设计理论与方法。

E-mail: linqiyin@xjtu.edu.cn