

DOI: 10.7652/xjtuxb201712013

均化接触压力的螺栓连接结合面形状主动设计

侯亦非¹, 洪军¹, 周朝宾², 朱林波³, 杨国庆⁴

(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, 710049, 西安; 2. 兰州理工大学机电工程学院, 730050, 兰州; 3. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安;
4. 湖南科技大学机电工程学院, 411201, 湖南湘潭)

摘要: 为了改善螺栓连接结构的连接性能,以螺栓连接结合面作为研究对象,针对结合面接触压力分布以及有效接触面积,对结合面形状进行了主动设计研究。首先,利用有限元方法,将弹性体的接触界面离散化,从接触界面节点出发,建立了弹性接触问题数学模型,将界面节点处的接触间隙和接触压力的关系转化为数学规划问题。然后,利用该模型,提出一种以螺栓接触压力分布或有效接触面积等接触性能作为设计目标的螺栓连接结合面形状主动设计方法,通过改变结合面的表面形状即表面各节点处的接触间隙,实现改善螺栓连接接触性能的效果。最后,借助 ANSYS 参数化设计语言,将设计方法流程化,建立了单螺栓连接、法兰盘连接的分析案例,对主动设计以及增加连接件厚度的方法进行了对比分析。结果表明,该设计方法可降低接触压力的峰值和分布离散度,增加有效接触面积,与增加连接件厚度的方法相比,在同样的接触性能目标下还能保证连接结构的固有频率不下降,从而验证了所提主动设计方法的可行性和有效性。

关键词: 螺栓连接;结合面;弹性接触;主动设计

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)12-0084-07

Optimization Design for Bolted Joint Surface Shape by Contact Pressure Homogenization

HOU Yifei¹, HONG Jun¹, ZHOU Chaobin², ZHU Linbo³, YANG Guoqing⁴

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. College of Electromechanical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
3. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. College of Electromechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: To improve the performance of bolt connection, bolted joint surface is taken as the object, and optimization design for the joint surface shape is completed according to the distribution of contact pressure and the size of effective contact area. Finite element method is used to discretize the elastic contact interface, the elastic contact model is established from the contact interface node. The relationship between contact gap and contact pressure at nodes is transformed into a mathematical programming problem. Regarding the contact performance as the objective, an optimization design method for bolted connection is proposed to homogenize the contact pressure and expand the effective contact area by changing the shape of the joint surface. The design scheme is processed by ANSYS parametric design language and the analysis cases

include single bolt connection and flange connection. It indicates that the proposed scheme can reduce the peak and dispersion of the contact pressure and increase the effective contact area. Compared with the method by increasing the thickness of the connecting member, the proposed scheme also ensures that the natural frequency of the connecting structure does not lower. The feasibility and effectiveness of the proposed optimization design are verified by these cases.

Keywords: bolted connection; contact surface; elastic contact; optimization design

众所周知,各类精密机电产品均是由各种零部件装配组合而成的复杂结构,在装配中不可避免地产生零部件的相互接触,从而产生了各类机械结合面,其中大多数固定配合多使用螺栓进行连接。以机床为例,研究表明:机床固定结合面的刚度特性可影响总体静刚度的 30%~50%;机床上出现的振动问题有 60%以上源自结合面;结合面阻尼可占整体阻尼的 90%以上^[1-2]。由此可见,结合面接触特性对机电产品性能的影响是显著的。因此,要保证机电产品的性能,可从提升装配连接性能方面入手。

研究表明,在使用螺栓进行装配连接时,结合面上的接触压力随着径向距离的增大逐渐减小至 0,有相当大的区域处于较低的接触应力状态,甚至有部分区域并未发生实际接触^[3]。结合面局部的接触应力集中会导致局部产生塑性变形或磨损等,从而导致连接失效,因此改善结合面的接触状态是提升装配连接性能的一条重要途径。影响结合面实际接触状态的主要因素有连接预紧力、连接部件的尺寸、结合面之间介质等^[4]。在工程实际中,通常利用增加被连接部件的尺寸、在连接部件之间增加垫片等方法来改善接触状态。有研究^[5]表明,增加被连接件厚度能扩大接触压力区域,但实际上厚度增加到一定程度之后,被连接件厚度对接触压力区域的扩大作用明显减弱,并且增加连接件厚度将产生增加系统质量,降低固有频率等弊端。

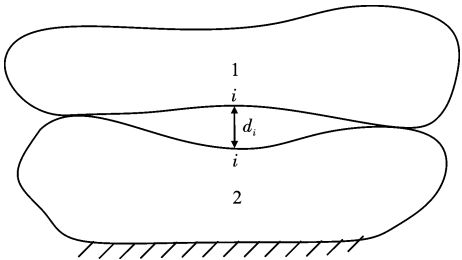
随着有限元技术的发展,利用数值方法对接触问题进行分析变得简单易行。近年来,有学者开始尝试利用有限元方法对接触问题中的结合面形状进行优化,通过改变结合面形状来控制接触压力。文献[6]尝试在弹性体的外形设计中建立接触压力优化的数学模型,并用线性规划的方法解决。文献[7-8]针对光滑表面的接触问题提出了一个优化方法,在低接触压力下对不同情况的接触结合面进行了优化设计,优化后的接触面获得了较好的压力分布结果。文献[9]提出,在接触问题中直接根据 von Mises 应力和接触压力的值改变相关节点坐标,从而对结合面形状进行优化的方法,解决了某些接触区

域接触压力过高及内应力集中的问题。文献[10-11]针对二维及三维情况下弹性体与刚体的接触问题,在服从库伦摩擦定律的情况下,对结合面形状进行了设计。

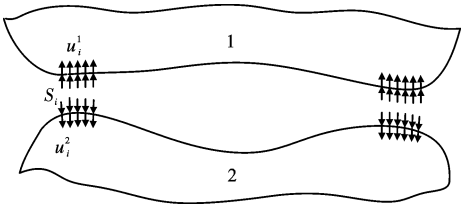
本文提出一种结合面主动设计方法,相比于传统连接的工艺优化,能够在保证动态特性的同时更有效地优化连接性能。本文针对光滑表面的弹性接触问题,建立了接触问题的数学模型,提出一种结合面主动设计的方法,并将该方法应用于螺栓连接,在单螺栓连接和法兰上的多螺栓连接的光滑表面模型中,针对不同的接触性能要求对连接件结合面进行了主动设计。

1 接触问题主动设计模型建立

如图 1 所示,两弹性体在外加载荷下发生接触,在有限元模型确定的情况下,施加已知载荷时发生接触的节点是完全确定的。假设有 n 对潜在的接触节点,在未发生变形时,两个弹性体上对应的节点之间的初始间隙用 d_i 表示。若两弹性体仅发生接触法向的变形时,弹性体所受载荷就可以分解为在接触时对应的接触点上沿着接触法向大小相同、方向



(a)弹性体接触间隙



(b)弹性体等效力及变形

图 1 弹性体接触受力变形示意图

相反的等效作用力 s_i , 用 u_i^1 和 u_i^2 表示弹性体 1 和 2 上各节点的变形量。弹性体发生变形后的间隙如下

$$\epsilon_i = u_i^1 + u_i^2 + d_i \quad (1)$$

弹性体接触时不会发生互相侵入, 因此有 $\epsilon_i \geq 0$ 。式(1)用向量形式表达为

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{u}^1 + \mathbf{u}^2 + \mathbf{d} \geq 0 \quad (2)$$

如图 1 所示, 在不考虑刚体位移的情况下, 弹性体 1 的节点变形量如下

$$\mathbf{u}^1 = \mathbf{F}^1 \mathbf{s} + \mathbf{v}_e^1 \quad (3)$$

式中: $\mathbf{F}^1$ 是接触表面的柔度矩阵, 根据接触点的等效力 $\mathbf{s}$ 即可得出弹性变形; $\mathbf{v}_e^1$ 是节点未发生接触时受力产生的趋向接触的变形量。

对于弹性体 2, 结合面节点变形为

$$\mathbf{u}^2 = \mathbf{F}^2 \mathbf{s} + \mathbf{v}_e^2 \quad (4)$$

式中: $\mathbf{F}^2$ 是弹性体 2 的柔度矩阵。因此, 可将式(2)写为

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{F}^1 \mathbf{s} + \mathbf{F}^2 \mathbf{s} + \mathbf{v}_e^1 + \mathbf{v}_e^2 + \mathbf{d} \geq 0 \quad (5)$$

此时定义

$$\mathbf{B} = \mathbf{F}^1 + \mathbf{F}^2 \quad (6)$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{v}_e^1 + \mathbf{v}_e^2 + \mathbf{d} \quad (7)$$

则接触间隙可写为

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{B}\mathbf{s} + \mathbf{a} \geq 0 \quad (8)$$

外加载荷所做的总功为

$$J = \mathbf{a}^T \mathbf{s} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{B}\mathbf{s} \quad (9)$$

在载荷确定时, 外加载荷所做的总功是确定的, 若要使结合面的接触压力均匀, 应减小部分节点上较大的等效力 $\mathbf{s}$ 。由式(9)可以看出, 通过改变节点间初始间隙 $\mathbf{d}$ 即可以改变等效力 $\mathbf{s}$, 从而使

$$J_2 = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{B}\mathbf{s} \quad (10)$$

达到最小。很显然, 当 $\epsilon_i > 0$, 在第 i 点没有发生接触, 则有 $s_i = 0$; 同样若 $s_i > 0$, 则必有 $\epsilon_i = 0$ 。这一条件可写为

$$s_i \epsilon_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$s_i \geq 0; \epsilon_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

至此, 接触问题主动设计可以转化为以式(8)、式(9)、式(11)、式(12)为约束条件, 求式(10)最小值的数学规划问题。

2 结合面形状主动设计方法

2.1 算法描述

在结合面的主动设计时, 借鉴渐进结构优化的方法, 即“减材”加“迭代”的方法对结合面形状进行

主动设计。首先, 建立有待设计的连接结构有限元模型, 施加载荷和边界条件后进行分析, 获得初始模型的接触压力等数据。然后, 确定主动设计的目标函数及设计变量等设计参数。对于接触问题, 目标函数可根据工程需求设定, 若需要改善接触压力的均匀性, 可将接触压力最大值、接触压力的极差等能够反映接触压力均匀性的指标作为目标函数; 若需要扩大结合面上的有效接触面积, 可将设计域内的有效接触面积作为目标函数。在弹性体接触时, 接触压力取决于形状, 因此设计变量即为结合面的形状 Γ 。在有限元模型中, 结合面已经被分为许多单元和节点, 结合面形状可用其上的节点位置来代替, 从而设计变量也变为设计域内的所有节点相对于结合面的法向距离。

在结合面主动设计中, 根据分析结果对结合面形状进行改动的过程是主动设计的核心环节。对数值模型进行分析计算后, 根据设计域内接触压力的数据进行主动设计。由上一节内容可知, 若要降低某点的接触压力, 则须增加该点处的接触间隙, 即结合面的相对法向距离。因此, 容易写出如下的节点修改公式

$$\delta_j = f(\sigma_j) \mathbf{n}_j \quad (13)$$

式中: δ_j 为第 j 点处的法向距离修改量; σ_j 为第 j 点处的接触压力; $\mathbf{n}_j$ 为第 j 点处结合面的法向单位矢量; f 是与 σ_j 正相关的函数关系。由于不同工程案例的接触压力差别很大, 函数关系 f 较难统一, 因此可利用一个接触压力参考值将函数关系进行归一化处理。将本文各案例的设计域中的接触压力最大值作为参考值, 因此修改公式变为

$$\delta_j = f\left(\frac{\sigma_j}{\sigma_{\max}}\right) \mathbf{n}_j \quad (14)$$

为方便计算, 将 δ_j 与 $\frac{\sigma_j}{\sigma_{\max}}$ 设置为一个线性的函数关系, 即

$$\delta_j = M\left(\frac{\sigma_j}{\sigma_{\max}}\right) \mathbf{n}_j \quad (15)$$

式中: M 为修改系数(为常数)。由式(15)可见, 在设计过程中, 设计域内每一节点都有不小于 0 的修改量, 在迭代过程中可能导致接触间隙无限制增加。为避免这一缺陷, 式(15)修改为

$$\delta_j = M\left(\frac{\sigma_j}{\sigma_{\max}} - \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}\right) \mathbf{n}_j \quad (16)$$

即接触压力最低的节点处间隙不会增加。根据得到的修改量对节点坐标进行修改

$$(x_j^k, y_j^k, z_j^k) = (x_j^{k-1}, y_j^{k-1}, z_j^{k-1}) + (\delta_{jx}, \delta_{jy}, \delta_{jz}) \quad (17)$$

式中: (x_j^k, y_j^k, z_j^k) 是第 k 步迭代时第 j 点坐标; $(\delta_{jx}, \delta_{jy}, \delta_{jz})$ 是修改量 δ_j 的坐标表示。

2.2 设计流程

首先建立需要主动设计结合面的有限元模型, 施加载荷求解, 并确定设计域 Γ 。

将设计变量定义为设计域内各节点相对结合面的法向距离, 可用 n 维列向量 δ 表示, $\delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n]^T$, n 为设计域内的节点数量。

对于结合面主动设计问题, 设计目标为改善接触压力的均匀性, 可将接触压力最大值、接触压力的极差等能够反映接触压力均匀性的指标作为目标函数, 即

$$f(\Gamma) = f(\sigma(\Gamma)) = \begin{cases} \max\{\sigma(\Gamma)\} \\ \max\{\sigma(\Gamma)\} - \min\{\sigma(\Gamma)\} \\ \vdots \end{cases} \quad (18)$$

也可将设计域内的有效接触面积 A 设为目标函数, 表示为

$$g(\Gamma) = A \quad (19)$$

在不同的设计案例中, 目标函数的值差别较大, 为了对比不同的设计案例, 可将目标函数进行归一化处理, 将其转化为无量纲值。在用接触压力作为目标函数时, 可用接触压力的极差除以接触压力的最小值, 表示为

$$f(\Gamma) = \frac{\max\sigma(\Gamma) - \min\sigma(\Gamma)}{\min\sigma(\Gamma)} \quad (20)$$

$f(\Gamma)$ 称为设计域的接触压力离散度, 这一相对值可反映接触压力的离散程度。当 $f(\Gamma) = 0$ 时, 表明设计域内的接触压力完全均匀。

对于有效接触面积, 也可转化为

$$g(\Gamma) = \frac{A}{A_t} \quad (21)$$

式中: A_t 为设计域的总面积。这一相对值反映了有效接触面积在设计域内的占比。当 $g(\Gamma) = 1$ 时, 表明有效接触面积占满整个设计域。由于目标函数在越接近边界时, 迭代优化的下降速度越慢, 考虑到主动设计的计算效率以及工程上实施的可行性和经济性, 将这些目标函数设为边界值是不实际的, 可以考虑工程需求取一个判定标准 $\tau \in (0, 1)$ 作为设计结束的评判标准, 当 $f(\Gamma) \leq \tau_1$ 或 $g(\Gamma) \geq \tau_2$ 时, 即设计结束。

具体设计的流程如图 2 所示。

3 主动设计方法应用验证

3.1 单螺栓连接结合面的主动设计

如图 3 所示, 本文以单螺栓连接的二维轴对称

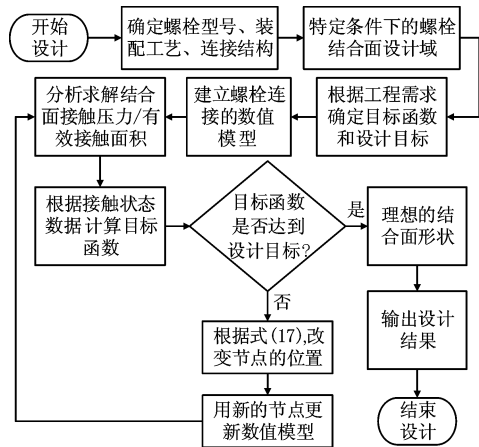


图 2 结合面形状主动设计的流程图

数值模型为算例, 对其被连接件结合面进行主动设计。本例中螺栓及被连接件材料均为 45 钢, 上下被连接件均是厚度为 10 mm、直径为 50 mm 的圆盘形平板, 并选取 8.8 级 M6 的螺栓紧固件, 对其施加 10 kN 的预紧力, 在初始设计下两被连接件是理想的平面接触。由于单螺栓连接是典型的二维轴对称结构, 因此可以以该结构的径向截面代替整体进行建模和分析设计。借助 ANSYS 中的 APDL 参数化设计语言, 建立如图 3 所示的二维有限元分析模型, 分析所得结合面的接触压力分布如图 4 所示。从图 3 可以看出, 该连接情况下有效接触面积比较小, 在结合面外围有较大区域的接触压力为 0, 且接触压力分布较不均匀。

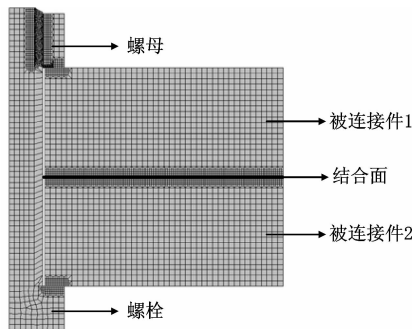


图 3 单螺栓连接数值模型

对初始设计进行分析后, 以有效接触面积和接触压力均匀度作为设计目标, 进行结合面的主动设计, 设计流程见图 2。设计域为规定的有效接触半径为 15 mm 的区域, 将设计域内接触压力均匀度作为目标函数, 结束设计的评判准则定为设计域内的接触压力离散度不低于 50%。图 4 为主动设计前、后结合面的接触压力分布曲线, 图 5 为主动设计前、后的结合面形状对比情况。结合面的形状是以螺栓

中心线为轴线,以图 5 曲线为母线的回转锥体。从设计结果可以看出,经过主动设计后有效接触区域增大至半径 15 mm,接触压力分布得到明显改善,最大接触压力由 56.52 MPa 下降到 18.69 MPa。

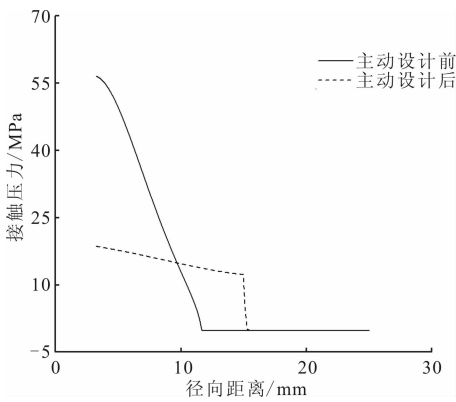


图 4 主动设计前、后接触压力分布对比

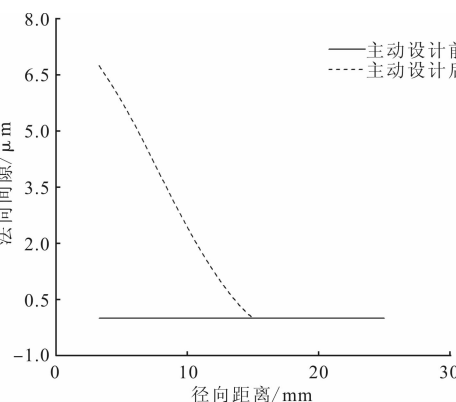


图 5 主动设计前、后接触间隙对比

3.2 法兰盘螺栓连接的主动设计

以某管道法兰盘的螺栓连接作为案例进行主动设计,如图 6 所示。本例选取 8.8 级 M10 螺栓紧固件,施加 10 kN 的预紧力。被连接件为材料 45 钢、外径为 200 mm、厚度为 12 mm 的法兰盘。初始设计的法兰盘为理想光滑平面,对初始设计进行分析计算,可以得到其接触状态和接触压力,如图 7 所示。在结合面上,接触压力较低甚至未发生有效接

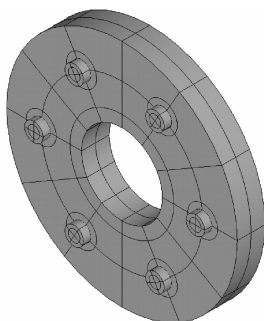


图 6 6 螺栓法兰盘的几何模型

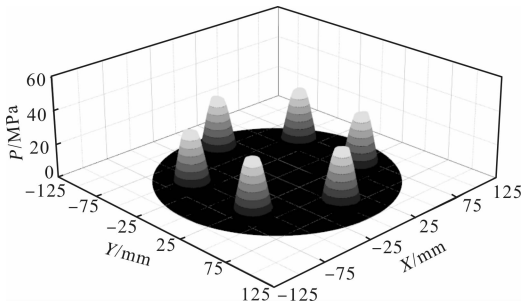


图 7 主动设计前的法兰盘接触压力分布

触的面积较大,经过计算得出,在这一连接结构中,法兰盘上的有效接触面积相对法兰盘总面积占比仅为 13.6%。在法兰连接中,接触状态是十分重要的,较大的有效接触面积可以增加连接密封性,避免法兰盘翘曲,提升连接性能的保持性。因此,本例将对法兰盘表面进行主动设计,以改善结合面的接触状态。

借助 APDL 参数化设计语言进行设计计算,对初始设计进行分析后,以有效接触面积作为设计目标,进行法兰结合面的主动设计,设计流程见图 2。将整块法兰盘结合面作为设计域,设计域内的有效接触面积占比作为目标函数,结束设计的评判准则定为设计域内有效接触面积占比不低于 40%。图 8 表示主动设计后的结合面形状,用结合面间的接触间隙表示,图 9 表示主动设计后结合面上的接触压力分布。通过主动设计,总面积为 27 034.2 mm² 的法兰结合面的有效接触面积从 3 676.7 mm² (13.6%)提

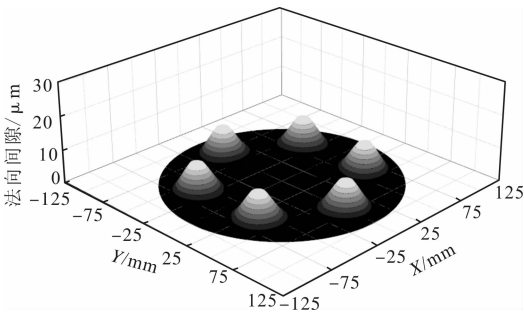


图 8 主动设计后的法兰盘结合面接触间隙

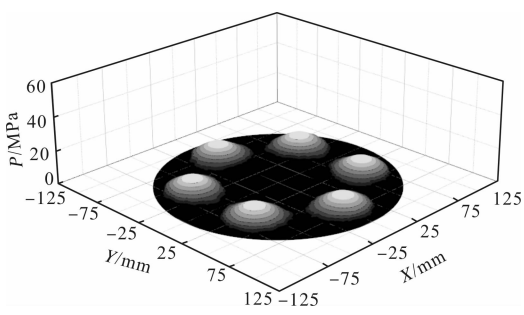


图 9 主动设计后的法兰盘接触压力分布

升到 $10\,975.9\text{ mm}^2$ (40.6%),接触压力分布明显更为均匀。

3.3 主动设计与其他方法的效果对比

在工程应用中,改变结合面接触压力分布的方法主要是改变被连接件厚度。增加被连接件厚度对接触压力分布有均化作用,但均化作用的效果随厚度增加而逐渐减弱,且被连接件厚度的增加也增加了结合部的质量,将使结合部的固有频率下降。

初始案例分析结果如 3.1 节所述,保持其他参数不变,将其中一个被连接件厚度由 10 mm 增加到 30 mm,有效接触半径为 15.6 mm,接触压力最大值为 38.02 MPa,接触压力的标准差为 12.71 MPa。

将以上分析结果作为初始案例主动设计的设计目标,进行主动设计,以半径 15.6 mm 的区域作为设计域,经过主动设计后结合面的最大接触压力为 27.40 MPa,标准差为 9.59 MPa。图 10 为主动设计后的结合面形状,图 11 为主动设计后以及被连接件厚度为 30 mm 时的压力情况对比。增加厚度的螺栓连接件第 1 阶固有频率为 1 660.8 Hz,而原有厚度的螺栓连接件在主动设计前后第 1 阶固有频率几乎不变,为 2 336.7 Hz,且第 2、3 阶固有频率也分别高出 20% 以上。可以发现,厚度增加使得结合部

质量增加,固有频率则有一定下降,对于同样提高结合面的接触性能,主动设计比增加被连接件厚度更能保证结合部的动态特性。

4 结束语

本文提出了一种螺栓连接结合面形状的主动设计方法。利用有限元数值分析模型,建立了弹性接触主动设计的数学规划模型,并以此为依据,针对螺栓连接结合面上接触压力分布问题,提出了优化连接性能的螺栓连接结合面形状主动设计方法,据此可通过被连接件结合面形状的设计,改善其压力分布状态。

采用以上方法,利用 3 个案例进行说明,其中以针对单螺栓连接和多螺栓法兰盘连接的主动设计为例,进行了被连接件结合面的主动设计,相对于原始形状,接触压力分布和有效接触面积都有所提升。与增加被连接件厚度的方法进行了对比,发现通过对结合面形状的主动设计能更有效地提高系统的动态性能,同时减小结构件刚度冗余量。

此外,结合面实际并非理想光滑表面,不同结合面粗糙度对其接触压力分布以及有效接触面积有显著影响。本文仅对理想的光滑表面进行分析和设计,因此具有一定的局限性,后续研究工作将集中于考虑真实表面形貌的装配结合面形状优化设计方法。

参考文献:

[1] COWLEY A, BACK N, BURDEKIN M. Analysis of the local deformations in machine joints [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1979, 21(1): 25-32.

[2] 赵宏林,丁庆新,曾鸣,等. 机床结合部特性的理论解析及应用 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 208-214.

ZHAO Honglin, DING Qingxin, ZENG Ming, et al. Theoretic analysis on and application of behaviors of machine tool joints [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 208-214.

[3] MANTELLI M, MILANEZ F H, PEREIRA E, et al. Statistical model for pressure distribution of bolted joints [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2010, 24(2): 432-437.

[4] 黄玉美,付卫平,董立新,等. 结合面法向动态特性参数研究 [J]. 机械工程学报, 1993, 29(3): 74-78.

HUANG Yumei, FU Weiping, DONG Lixin, et al. Research on the dynamic normal characteristic parameters of joint surface [J]. Chinese Journal of Mechanical

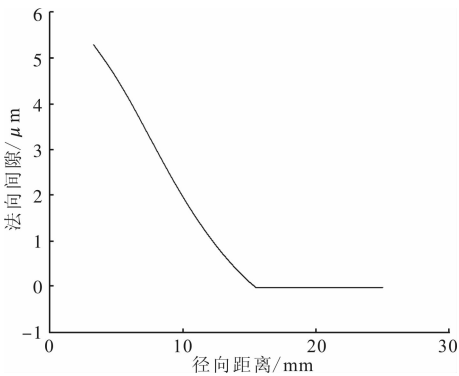


图 10 主动设计后接触间隙情况

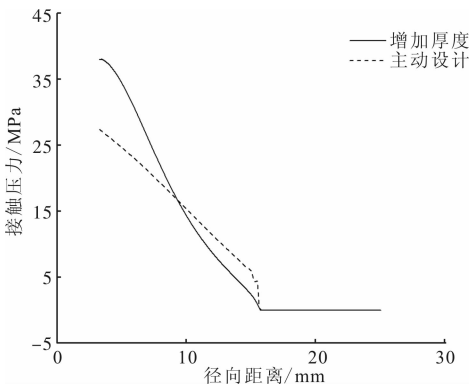


图 11 增加厚度和主动设计的接触压力分布对比

- Engineering, 1993, 29(3): 74-78.
- [5] 王宁, 李宝童, 洪军, 等. 螺栓支承面有效半径的影响因素 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(4): 132-136.
- WANG Ning, LI Baotong, HONG Jun, et al. Factors affecting bolt bearing surface effective radius [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(4): 132-136.
- [6] HAUG E J, KWAK B M. Contact stress minimization by contour design [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1978, 12(6): 917-930.
- [7] 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.
- [8] 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): 3394-3415.
- [9] 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.
- [10] BEREMLIJSKI P, HASLINGER J, OUTRATA J V, et al. Shape optimization in contact problems with coulomb friction and a solution-dependent friction coefficient [J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2014, 52(5): 3371-3400.
- [11] BEREMLIJSKI P, HASLINGER J, KOCVARA M, et al. Shape optimization in three-dimensional contact problems with Coulomb friction [J]. SIAM Journal on Optimization, 2009, 20(1): 416-444.
- (编辑 杜秀杰)

(上接第 55 页)

- CAI Yingkun, XIE Kunqing, MA Xiujun. An improved DBSCAN algorithm which is insensitive to input parameters [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 40(3): 480-486.
- [4] 和亚丽. 基于高维空间的聚类技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2005: 8-13.
- [5] ESTER M, KRIEDEL H P, SANDER J, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise [C]//Proc 2nd Int Conf on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). Portland, USA: ACM Press, 1996: 226-231.
- [6] 于亚飞, 周爱武. 一种改进的 DBSCAN 密度算法 [J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(2): 30-33.
- YU Yafei, ZHOU Aiwu. An improved algorithm of DBSCAN [J]. Computer Technology and Development, 2011, 21(2): 30-33.
- [7] 贺玲, 吴玲达. 高维空间中数据的相似性度量 [J]. 数学的实践与认识, 2006, 36(9): 189-193.
- HE Ling, WU Lingda. Similarity measurement of data in high-dimensional spaces [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2006, 36(9): 189-193.
- [8] FRIEDMAN J H. Flexible metric nearest neighbor classification [EB/OL]. [2017-04-15]. <http://docs.salford-systems.com/flexmet.pdf>.
- [9] 王瀛, 郭雷, 梁楠. 基于优选样本的 KPCA 高光谱图像降维方法 [J]. 光子学报, 2011, 40(6): 847-851.
- WANG Ying, GUO Lei, LIANG Nan. A dimensionality reduction method based on KPCA with optimized sample set for hyperspectral image [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(6): 847-851.
- [10] 杨喆凌. 基于经验模态分解的城市供水水质异常事件检测方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 39-40.
- [11] 高智勇, 梁银林. 基于集成熵 KPCA 的复杂机电系统状态监测方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(5): 1327-1333.
- GAO Zhiyong, LIANG Yinlin. State monitoring of complex electromechanical system based on integrated entropy of KPCA [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(5): 1327-1333.
- [12] 杨风召, 朱扬勇. 一种有效的量化交易数据相似性搜索方法 [J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(2): 361-368.
- YANG Fengzhao, ZHU Yangyong. An efficient method for similarity search on quantitative transaction data [J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(2): 361-368.
- [13] 杨燕, 靳蕃. 聚类有效性评价综述 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(6): 1630-1632.
- YANG Yan, JIN Fan. Survey of clustering validity evaluation [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(6): 1630-1632.
- (编辑 杜秀杰)