

螺栓组连接高精度变形状况及可靠性分析

郑智群¹, 黄贤振^{1,2}, 王钰平¹, 路致远¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819; 2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 沈阳 110819)

摘要:建立了螺栓组有限元模型,通过螺栓组固紧实验验证了有限元模型的准确性。以有限元方法分析了布置形式、预紧力、拧紧顺序对被连接件中心变形的影响。考虑螺栓组连接参数由于误差所具有的不确定性,利用蒙特卡洛模拟(Monte Carlo simulation, MCS)方法计算了被连接件变形可靠性。为了提高计算效率,基于本文有限元模型构建了代理模型,给出了变形可靠度计算的具体应用。结果表明:被连接件厚度增大,孔隙间距减小,固紧后其变形减小;固紧顺序影响变形过程;本文构建的代理模型具有准确性,当不确定性参数服从正态分布时,被连接件变形也近似服从正态分布。

关键词:螺栓连接;固紧变形;代理模型;可靠性分析

中图分类号:TH131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)03-0653-09

DOI:10.13229/j.cnki.jdxgxb.20240747

High precision deformation condition and reliability analysis of bolt group connection

ZHENG Zhi-qun¹, HUANG Xian-zhen^{1,2}, WANG Yu-ping¹, LU Zhi-yuan¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion Systems Ministry of Education of China, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: A finite element model of the bolt group was established, and its accuracy was verified through bolt group tightening experiments. The effects of arrangement pattern, preload, and tightening sequence on the deformation at the center of the connected parts were analyzed using the finite element method. Considering the uncertainty of bolt group connection parameters due to errors, the deformation reliability of the connected parts was calculated using the Monte Carlo simulation (MCS) method. To improve computational efficiency, a surrogate model was constructed based on the finite element model presented in this study, and specific applications for calculating deformation reliability were provided. The results indicate that the deformation of the connected parts after tightening is reduced when the thickness of the connected parts is increased and the hole spacing is decreased; the tightening sequence affects the deformation process; the surrogate model constructed in this study demonstrates accuracy; and when the

收稿日期: 2024-06-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22B2087, U23B2098); 辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101300160).

作者简介: 郑智群(1996-), 男, 博士研究生. 研究方向: 螺栓连接性能及可靠性分析. E-mail: 807874475@qq.com

通信作者: 黄贤振(1982-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 机械系统可靠性. E-mail: xzhhuang@mail.neu.edu.cn

uncertain parameters follow a normal distribution, the deformation of the connected parts also approximately follows a normal distribution.

Key words: bolt connection; tightening deformation; surrogate model; reliability analysis

0 引言

螺栓连接因其拆卸方便、简单可靠等优点,成为用于固定机床的主要连接方式^[1]。螺栓组的布置形式、预紧力的大小、固紧顺序的顺序等因素都将影响被固定机床的变形。对于精密机床而言,螺栓组固紧过程所产生的变形将影响机床加工的精度^[2]。Liu等^[3]建立了机床床身变形模型,研究了地脚螺栓的固紧顺序对机床床身变形的影响。Chang等^[4,5]提出了一种描述精密机床螺栓连接接触行为的界面细观力学模型,用于描述的机床螺栓连接部位的接触特性。Jiang等^[6]通过有限元分析,研究了不同摩擦系数下螺栓连接刚度的变化情况。Chen等^[7]建立了螺栓连接的动力学模型,计算了连接面的整体刚度,并提出了一种时变权值与收缩因子相结合的改进粒子群优化算法,用于优化整体刚度。罗忠等^[8]考虑了拧紧速度,通过实验研究了固紧顺序对转子螺栓结构预紧力衰减规律的影响。盛晓茜等^[9]通过有限元计算结果拟合了单螺栓结合面的压力分布,通过拟合结果优化了机床支撑螺栓连接的布局。

实际上,在机床螺栓固紧的过程中,预紧力的施加的不准确、受加工精度影响和测量过程产生的误差是难以避免的,这意味着螺栓连接的相关参数具有不确定性^[10]。Zheng等^[11]考虑了预紧力、摩擦系数和材料特性不确定性,分析了螺栓连接固紧后的自松动可靠性。Lin等^[12]分析了螺栓连接各工艺参数和结构参数的不确定度来源并筛选出敏感参数,通过对概率密度的积分,得到了螺栓松动的临界横向载荷可靠度。Shan等^[13]使用估计区间来描述参数,估计螺栓连接疲劳性能的上下限。黄贤振等^[14]以螺纹应力为评价指标,考虑螺栓参数随机性,分析了单螺栓连接的应力变化可靠性。

现有的研究少对螺栓固紧后被连接件变形情况的讨论,此外,大多数的分析基于确定性参数的基础,并未考虑由误差产生的随机性因素。为此,本文通过有限元方法,讨论了四螺栓布置形式、预紧力、固紧顺序对被连接件中心变形的影

响。考虑螺栓连接相关参数的不确定性,通过蒙特卡洛模拟(MCS)计算被连接件不超过变形极限的概率。蒙特卡洛模拟需要大量的有限元计算样本,对于有限元方法很难实现。因此,通过少量有限元计算结果训练Kriging代理模型从而替代有限元过程,训练后Kriging模型在被验证准确性后,用于计算被连接件变形可靠性。

1 螺栓组布置结构有限元模型

为了研究螺栓布置对被连接件变形的影响,建立了四螺栓布置结构有限元模型,并通过固紧实验对有限元模型的准确性进行了验证。

1.1 几何模型

机床中的螺栓排列方式分为多种类型,包括线性排列、环形排列、矩形排列等。其中,四螺栓连接为典型的矩形排列,多用于机械臂底座的固定、机床部件的连接。以四螺栓布置结构为研究对象,对实际的机床连接结构进行了简化,其示意图如图1所示。如图所示,被连接件正方形板厚度为 l ,长度为 c 。螺栓孔的横向间距为 a ,纵向间距为 b ,螺栓孔的孔径为 r 。采用M10×1.5规格的螺栓。其中, $a=50\text{ mm}$, $b=50\text{ mm}$, $c=100\text{ mm}$, $l=25\text{ mm}$, $r=12\text{ mm}$ 。

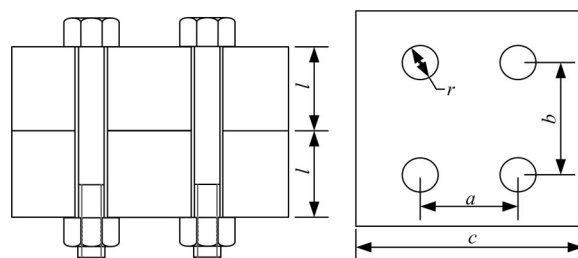


图1 螺栓布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bolt connection

1.2 网格划分

根据几何体模型建立四螺栓布置结构的有限元模型。由于主要考虑被连接件在螺栓连接的作用下产生的变形,因此螺栓螺母结构被适当简化,不考虑螺纹的影响。

根据VDI 2230标准^[15],选择Ⅲ级螺栓模型进行建模。有限元模拟通过Abaqus实现,网格类型为C3D8R,为了提高准确性,通过过度网格对螺

栓与被连接件接触部分的网格进行细化处理。用于计算的有限元网格模型如图 2 所示。

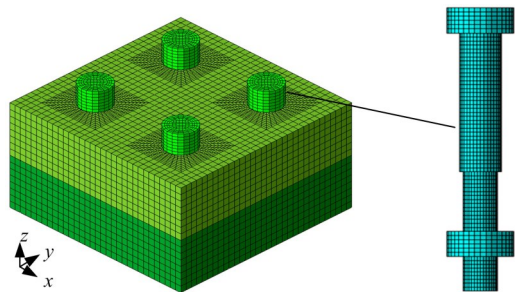


图 2 螺栓连接网格
Fig. 2 Mesh of bolt connection

1.3 材料参数及分析设置

在有限元模型中,螺栓和螺母的材料为 35CrMo,被连接件的材料为 304 不锈钢。具体的材料参数如表 1 所示。模型的接触类相包括螺栓头部与被连接件的接触、螺母与被连接件的接触、被连接件之间的接触、螺母与螺栓的接触,螺母与螺栓的接触为绑定约束,螺栓头部与被连接件的接触,被连接件与被连接件之间的接触设置为有限滑移,接触面之间的的初始摩擦因数设置为 0.15,使用罚函数模拟螺栓连接的接触。分析过程采用静力学分析方法,忽略固紧过程中质量和惯性的影响。

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

参数	数值	
	35CrMo	304 不锈钢
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 900	7 930
弹性模量/MPa	206 075	204 000
泊松比	0.286	0.285
许用应力/MPa	228	137

考虑固紧过程对被连接件变形的影响,固紧过程分为 4 种类型,如图 3(a)~(d)所示。罗马数字 I、II、III、IV 分别表示螺栓孔的位置。当 $a=b$ 时,螺栓布置呈中心对称性,因此,固紧过程 a 和固紧过程 b、固紧过程 c 与固紧过程 d 所对应的固紧过程一致。当 $a\neq b$ 时,由于螺栓布置距离不同,螺栓布置不再中心对称,此时 4 种固紧过程不再相同。

加载过程固定被连接件的下底板,通过图 3 所示的固紧过程分别对 4 个螺栓施加预紧力。Abaqus 提供了 Bolt load 方法用于模拟结构中的紧固载荷。本文通过 Bolted load 方式对螺栓施加预紧力。该预紧力是通过在螺栓内添加一个切割

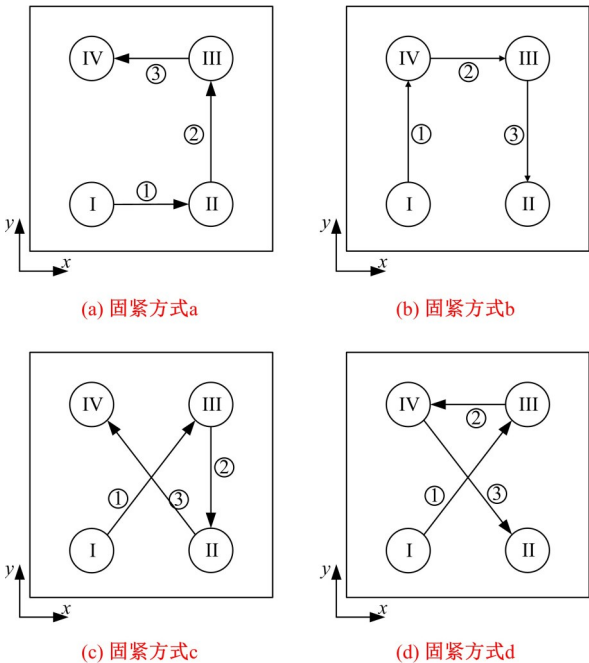


图 3 固紧过程
Fig. 3 Tightening process

面或预紧截面,并使其承受一个拉伸载荷来实现的。通过修改预紧截面的一侧单元,Abaqus 可以自动调整预紧截面上螺栓的长度,以获得指定的预紧力值。预紧力施加完毕后,计算被连接件中心的变形量,从而获得螺栓布置对被连接件变形状况的影响。

1.4 网格无关化验证

为了排除网格对限元计算结果的影响,分别计算了螺栓在网格尺寸分别为 1.75、2、2.25、2.5 mm 的情况下,所有螺栓同时以 10 kN 加载后上部被连接件顶面中心的变形。不同网格尺寸下随着加载过程进行螺栓的变形如图 4 所示。

如图 4 所示,被连接件的变形随着网格尺寸的减小而减小,当网格尺寸达到 2 mm 时,被连接

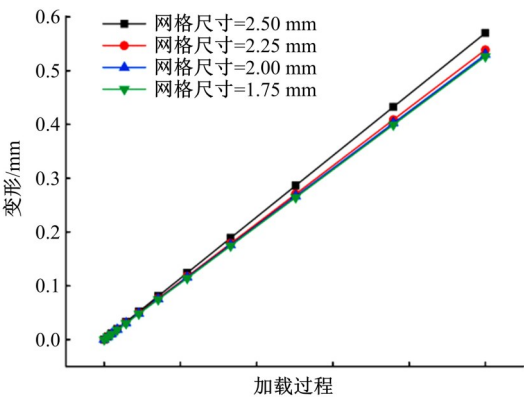


图 4 网格无关化验证
Fig. 4 Mesh independent verification

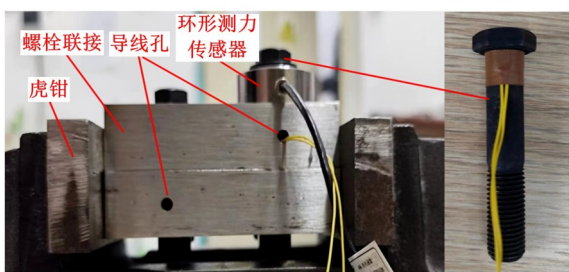
件的变形量基本不发生变化,这表明增加网格密度对计算结果几乎不产生影响。为了兼顾计算精度和成本,有限元分析中采用了 2 mm 网格尺寸。

1.5 验证实验

为了验证有限元模型计算结果的准确性,进行了螺栓组固紧实验。螺栓组连接的被连接件通过虎钳固定。环形测力传感器被固定于贴有应变片的螺栓下,用于测量螺栓固紧过程的预紧力,测得的螺栓预紧力通过轴向力显数仪表显示并记录于数据采集系统。应变片通过绝缘胶带固定于螺栓杆部,如图 5(a)所示。在被连接件的一侧开小孔,便于固定于螺栓的应变片导线穿出,具体结构如图 5(b)所示。通过应变片测得螺栓在固紧后产生的应变,应变数据通过应变仪处理后导入数据采集系统。为了防止温度对应变的影响,应变仪外接一个接有应变片的额外螺栓。



(a) 实验装置



(b) 螺栓连接布置

图 5 固紧实验装置

Fig. 5 Fastening experimental device

在实验过程中,通过显数力矩扳手分别对所有螺栓施加预紧力,记录到达规定预紧力时显数力矩扳手测得的扭矩。以逆时针的形式,通过力矩扳手保持预紧扭矩不变,分别固紧其余螺栓。以贴有应变片的螺栓作为起始螺栓,测得所有螺栓固紧后,贴有应变片螺栓所产生的应变大小。将所测试的应变结果与有限元计算的结果进行对

比以验证有限元模型的准确性。为了保证数据的准确性,分别测试了预紧力为 2.5、4、5 以及 10 kN 时的螺栓应变大小,同时,为了减小误差,通过多次测量获得的平均值作为最终的实验数据。实验数据与有限元结果的对比如表 2 所示。

表 2 实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results

预紧力/kN	有限元应变值/ μm	实验测试应变值/ μm					相对偏差/%
		1	2	3	4	均值	
2.5	155	184	135	174	144	159	2.5
4	247	263	252	226	238	244	1.2
5	316	343	315	324	309	322	1.8
10	744	775	738	759	764	759	2

如表 2 所示,将实验测的螺栓轴向应力与有限元计算的结果进行对比,有限元计算结果与实验结果的最大相对偏差为 2.5%,表明有限元结果满足精度要求。

2 被连接件变形情况

通过被验证的准确有限元模型,以螺栓上部被连接件中心点的变形为研究目标,分析了螺栓连接相关参数(包括螺栓孔间隔、被连接件厚度、固紧顺序、预紧力)对被连接件中心位置变形的影响。分析结果将作为可靠性分析的依据。

2.1 螺栓孔间距对被连接件变形的影响

螺栓连接采用 M10 $\times$ 1.5 规格的螺栓。其中, $b=50$ mm, $c=100$ mm, $l=25$ mm, $r=12$ mm。螺栓 x 方向间距 a 分别为 40、45、50、55、60 mm,固紧方式为图 3 所示的过程 3 对角固紧。4 个螺栓的所施加的预紧力均为 10 kN。被连接件变形随螺栓间距变化的结果如图 6 所示。

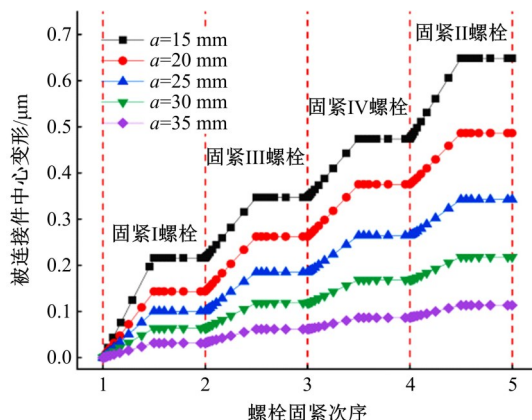


图 6 螺栓孔间距对变形影响

Fig. 6 Influence of bolt hole space on deformation

被连接件的变形随着每次固紧螺栓而增加,螺栓孔的间距越近,导致被连接件的变形锥^[16]叠加,被连接件中心的变形越大。当所有螺栓被固紧后,螺栓孔间距 $a=15\text{ mm}$ 对应的变形为 $0.64\text{ }\mu\text{m}$,螺栓孔间距 $a=35\text{ mm}$ 对应的变形为 $0.11\text{ }\mu\text{m}$ 。被连接件的变形随螺栓孔间距的增大而呈近似线性减小。

2.2 被连接件厚度对被连接件变形的影响

考虑厚度对变形的影响,保持其他相关参数不变 $a=50\text{ mm}$, $b=50\text{ mm}$, $c=100\text{ mm}$, $l=25\text{ mm}$, $r=12\text{ mm}$ 。厚度分别为 20 、 22.5 、 27.5 、 30 mm 。固紧方式为对角固紧,4个螺栓的所施加的预紧力均为 10 kN 。被连接件变形随螺栓间距变化的结果如图7所示。固紧过程中,被连接件的厚度越大,中心部分变形越大。螺栓固紧结束后,厚度越大,变形锥向上下被连接件的交接处延伸的距离越远,此时中心部分的变形增加。厚度由 20 mm 增加至 30 mm 的过程,中心变形呈线性增长。

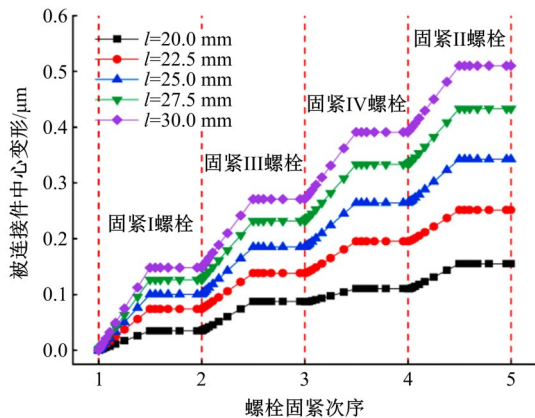


图7 被连接件厚度对变形影响

Fig. 7 Influence of connected part thickness on deformation

2.3 预紧力对被连接件变形的影响

考虑厚度对变形的影响,保持其他相关参数不变 $a=50\text{ mm}$, $b=50\text{ mm}$, $c=100\text{ mm}$, $l=25\text{ mm}$, $r=12\text{ mm}$, $l=25\text{ mm}$ 。固紧方式为对角固紧,4个螺栓所施加的预紧力分别为 5 、 10 、 15 、 20 、 25 kN 。被连接件变形随螺栓间距变化的结果如图8所示。由图8可知,被连接件的变形随预紧力的增大而增大。

2.4 固紧顺序对被连接件变形的影响

分别分析了图3所示的4种固紧方式对应被连接件变形情况。需要注意的是,如果螺栓 x 方向与 y 方向的孔间距相等($a=b$),则螺栓布置呈

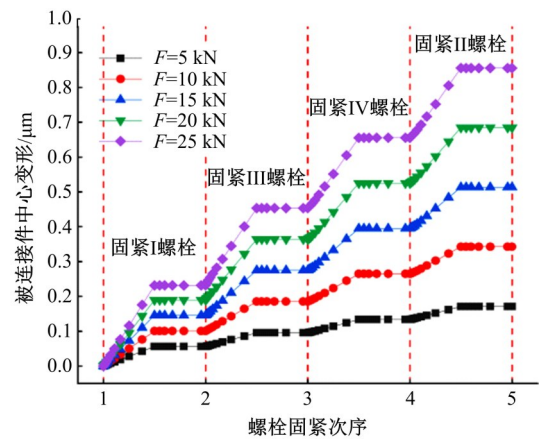


图8 预紧力对变形影响

Fig. 8 Influence of preload on deformation

中心对称性,固紧顺序只有对角固紧和顺逆时针固紧两种。因此,为了考虑图3所示的4种固紧方式对被连接件变形的影响,将 x 方向的螺栓孔间距 a 调整为 60 mm ,从而使螺栓布置形式不具有中心对称性。

其余参数 $b=50\text{ mm}$, $c=100\text{ mm}$, $l=25\text{ mm}$, $r=12\text{ mm}$, $l=25\text{ mm}$,预紧力为 10 kN 。螺栓固紧过程的被连接件中心变形情况如图9所示。

由于固紧方式b固紧的第二颗螺栓距离固紧的第一颗螺栓间距最近,因此,固紧方式b固紧第二颗螺栓后的变形量最大。固紧方式a固紧第二颗螺栓后的变形小于固紧方式c和d,原因在于I号螺栓孔和II号螺栓孔变形锥对中心位置变形的作用效果不如I号螺栓孔与III号螺栓孔。固紧第三颗螺栓时,固紧方式c所固紧的II号螺栓距离变形中心距离更近,因此对变形量的影响更为显著。所有螺栓固紧后,不同固紧顺序对被连接件中心的最终变形情况影响不明显。

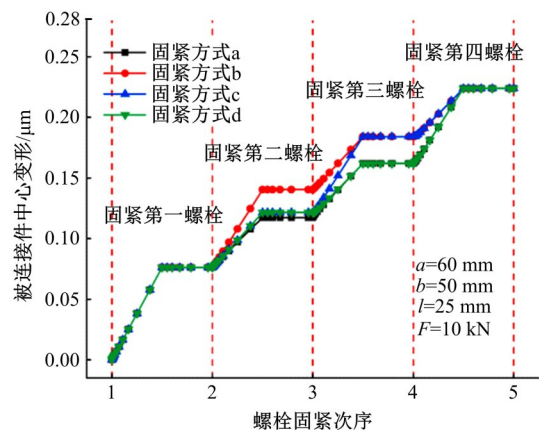


图9 螺栓孔间距对变形影响

Fig. 9 Influence of bolt hole space on deformation

3 被连接件变形可靠性分析方法

在实际螺栓螺栓组连接在固紧的过程中,受加工工艺和实际测量精度的影响,螺栓的结构参数和材料参数具有一定的随机性和不确定性。例如,固紧过程所施加预紧力大小 F 、螺栓孔之间的距离 a 和 b 、被连接件的厚度 l 。上述具有不确定性的特征参数向量 $\mathbf{X}$ 可以表示为:

$$\mathbf{X}=[x_1, x_2, x_3, x_4]=[a, b, l, F] \quad (1)$$

参数的不确定性的累积,将导致被连接件的变形超过所规定的限度,进而影响机床加工的精度,因此有必要对被连接件变形的可靠性进行分析。

对于可靠性分析,极限状态函数 $G(\mathbf{X})$ 为用来描述机构系统状态的函数。极限状态函数一般定义为性能响应量与其误差极限值的差,被连接件变形的极限状态函数 $G(\mathbf{X})$ 定义为:

$$G(\mathbf{X})=E_{\text{rim}}-R(\mathbf{X}) \quad (2)$$

式中: E_{rim} 表示被连接件变形的误差极限, $R(\mathbf{X})$ 表示通过有限元计算得到的与参数 $\mathbf{X}=[a, b, l, F]$ 有关的被连接件变形量。 $G(\mathbf{X}) \leq 0$, 被连接件的变形超出误差极限。在输入变量均为随机变量的条件下, $G(\mathbf{X}) \leq 0$ 的概率为可靠性概率 P_f 。

设 $G(\mathbf{X})$ 的概率密度函数为 $f_X(x_1, x_2, x_3, x_4)$, 通过对随机变量的概率密度函数进行积分可以算出失效概率值 P_f 为:

$$P_f = \iiint\limits_{G(\mathbf{X}) \leq 0} f_X(x_1, x_2, x_3, x_4) dx_1 dx_2 dx_3 dx_4 \quad (3)$$

$G(\mathbf{X}) > 0$ 的概率为可靠性概率 P_s , 机构的失效与可靠为对立事件,二者存在以下关系:

$$P_f + P_s = 1 \quad (4)$$

蒙特卡洛模拟(MCS)是一种简单随机抽样法^[17],可以根据样本来推断母体的统计规律。当样本量较大时,母体的统计规律可以由样本代替。根据蒙特卡洛理论,式(3)可以改写为失效域指示函数 $I_F(x)$ 的数学期望形式:

$$P_f = \int_F f_X(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} I_F(x) f_X(x) dx = E\{I_F(x)\} \quad (5)$$

式中:当 $G(x) < 0$ 时, $I(x) = 1$ 。当 $G(x) \geq 0$ 时, $I(x) = 0$ 。 $I_F[x]$ 将积分区域从非规则的失效域 $F = \{x: G(x) \leq 0\}$ 扩充至无穷大。

根据式(5),设 $\mathbf{X}$ 的第 j 个样本值为 x_j , 结构失效概率的估计值 $\hat{P}_f$ 可以表示为:

$$\hat{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[G(x_j)] \quad (6)$$

根据随机变量概率密度函数 $f_X(x)$ 对 x 进行随机抽样,若出现 $G(x) < 0$, 则模拟中系统的响应量超出误差极限一次。若总共进行了 N 次模拟, $G(x) < 0$ 出现了 N_f 次,则结构失效概率的估计值 $\hat{P}_f$ 为:

$$\hat{P}_f = \frac{N_f}{N} \quad (7)$$

蒙特卡洛模拟需要计算大量样本,这对于计算耗时的有限元模型是难以实现的。因此,本文利用少量的螺栓连接参数-变形量样本构建 Kriging 代理模型。随后,通过建立的 Kriging 代理模型代替有限元过程,从而实现对被连接件变形的快速求解。Kriging 模型^[18]作为一种估计方差最小的无偏估计模型,对具有高度非线性和局部响应突变的大型复杂隐函数具有良好的拟合效果。Kriging 模型可以近似地表示为:

$$g_K(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^p f_i(\mathbf{X}) \beta_i + z(\mathbf{X}) \quad (8)$$

式中: $g_K(\mathbf{X})$ 为未知的 Kriging 模型; p 为基函数的个数; $f(\mathbf{X}) = \{f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), \dots, f_p(\mathbf{X})\}$ 为随机变量 $\mathbf{X}$ 的基函数; 回归函数待定系数 $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p\}$ 通过已知的相应估计值得到。 $z(\mathbf{X})$ 为在全局模拟的基础上创建的期望为 0、方差为 σ^2 的局部偏差,其协方差为:

$$\text{Cov}[z(\mathbf{x}^{(i)}), z(\mathbf{x}^{(j)})] = \sigma^2 [R(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)})] \quad (9)$$

式中: $R(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)})$ 表示任意两个样本点的相关函数,其为相关矩阵 R 的分量, $i, j = 1, 2, \dots, m$, 其中 m 为训练样本集中的数据个数。本文选用计算效果最好的高斯函数作为相关函数。

根据 Kriging 理论,未知点 x 处的响应估计值为:

$$g_K(x) = f^T(x) \hat{\beta} + r^T(x) R^{-1}(g - F \hat{\beta}) \quad (10)$$

式中: $\hat{\beta}$ 为 β 的估计值; g 为训练样本数据的响应值构成的列向量; F 为由 m 个样本点处的回归模型组成的 $m \times p$ 阶矩阵; $r(x)$ 为训练样本点和预测点之间的相关函数向量。

$$\boldsymbol{r}^T(\boldsymbol{x})=\{R(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}^{(1)}),R(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}^{(2)}),\cdots,R(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}^{(m)})\}$$
 (11)

$\hat{\beta}$ 以及其方差和估计值 $\hat{\sigma}^2$ 分别为:

$$\hat{\beta}=(F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} \boldsymbol{g}$$
 (12)

$$\hat{\sigma}^2=(\boldsymbol{g}-F\hat{\beta})^T R^{-1}(\boldsymbol{g}-F\hat{\beta})/m$$
 (13)

相关参数 $\theta=\{\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_m\}$ 构成的 Kriging 模型为拟合精度最优的代理模型,该模型由求解极大似然估计的最大值得到:

$$\max F(\theta)=-\frac{m\ln(\hat{\sigma}^2+\ln|R|)}{2}$$
 (14)

$$\theta_k\geq 0(k=1,2,\cdots,m)$$

通过求解式 (14) 得到的 θ 值构成的 Kriging 模型为拟合精度最优的代理模型。上述蒙特卡洛分析以及 Kriging 模型的建立过程均通过 Matlab 平台实现。

4 被连接件变形可靠性分析

基于所提可靠性计算方法给出了具体算例,用于计算螺栓连接参数具有参数不确定性的条件下,被连接件变形超过规定范围的概率。

4.1 Kriging 模型准确性验证

抽取部分有限元计算结果训练 Kriging 模型。为了保证样本的均匀性,通过拉丁超立方抽样^[19]抽取 40 个有限元样本用于训练,抽取范围如表 3 所示。

通过有限元计算了所有训练样本的相关参数对应的被连接件变形,以相关参数作为输入,以有限元计算得到的变形结果作为输出训练 Kriging 模型。在参数范围内随机抽取 10 个验证样本,通过有限元计算验证样本对应的被连接件变形。同时,以训练后的 Kriging 模型对 10 个验证样本进行代理计算得到 Kriging 模型的代理结果。有限元计算结果与代理模型对比结果如图 10 所示。

由对比数据可知,代理模型与有限元模型的

表 3 抽样样本参数

Table 3 Sampling parameter

参 数	抽样上限	抽样下限
被连接件厚度 l/mm	30	20
x 方向孔间距 a/mm	75	25
y 方向孔间距 b/mm	75	25
螺栓 I 预紧力 F_1/kN	12k	8k
螺栓 II 预紧力 F_2/kN	12k	8k
螺栓 III 预紧力 F_3/kN	12k	8k
螺栓 IV 预紧力 F_4/kN	12k	8k

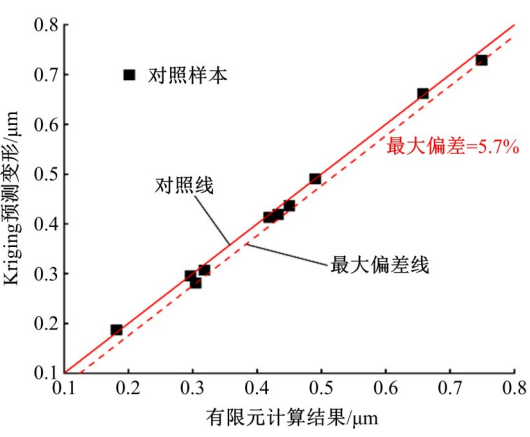


图 10 代理模型结果对比

Fig. 10 Comparison of surrogate model results

相对误差 E_r 范围为 $-5.7\%\sim+2.8\%$, 相对误差的平均值值为 2.5% , 最大误差为 5.7% 。说明训练后的 Kriging 模型可以准确代理计算不同螺栓连接相关参数所对应的被连接件变形量。

4.2 变形可靠性分析

受预紧力的施加的不准确以及加工精度影响和测量过程产生的误差的影响,螺栓连接的相关参数服从具有不确定性。基于所提出的可靠性分析方法,本文给出了具体的计算实例。

在可靠性分析中,假设螺栓连接的不确定参数服从随机分布^[20](见表 4)。根据蒙特卡洛方法,基于表 4 所示随机参数分布类型,通过简单随机抽样的方式抽取 10^6 个随机样本。通过训练后的 Kriging 模型快速代理计算 10^6 个随机样本所对应的被连接件变形量。通过对随机样本结果的统计分析得到被连接变形的可靠性结果。

表 4 不确定性参数分布

Table 4 Uncertainty parameter distribution

变量	分布	均值	标准差	变异系数
l/mm	正态	25	1.875	0.075
a/mm	正态	50	3.75	0.075
b/mm	正态	50	3.75	0.075
F_1/kN	正态	10k	750	0.075
F_2/kN	正态	10k	750	0.075
F_3/kN	正态	10k	750	0.075
F_4/kN	正态	10k	750	0.075

在本次可靠性计算中,以变形量超过 $0.55\mu\text{m}$ 作为变形失效的极限值 E_{rim} 。通过 Kriging-蒙特卡洛模拟得到的被连接件变形的概率密度分布及累计概率分布分别如图 11(a) 和图 11(b) 所示。其中,变形超过 $0.55\mu\text{m}$ 的区域为失效域,当螺栓连接的相关参数服从正态分布的条件下,被连接

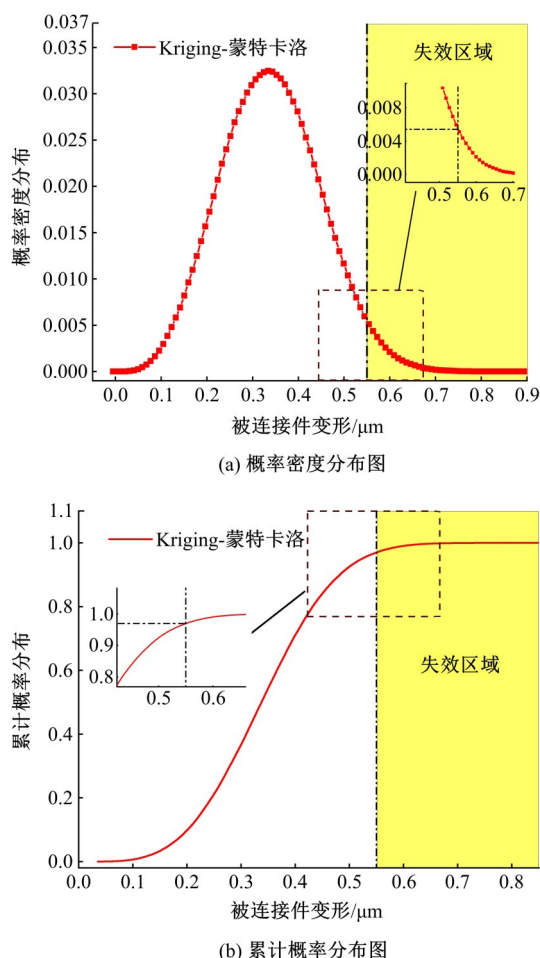


图11 变形失效概率与累积概率分布

Fig. 11 Probability and cumulative probability distribution of deformation failure

件的变形量也近似服从正态分布。在 10^6 个随机样本中,变形的均值为 $0.34\ \mu\text{m}$,标准差为 $0.11\ \mu\text{m}$,变形超过变形极限值的样本数量为29 582,因此,变形超过极限,即变形出现失效的概率为: $29\ 582/10^6=2.958\ 2\%$,可靠性概率为 $100\%-2.958\ 2\%=97.041\ 8\%$ 。基于有限元计算结果构建的代理模型可以快速计算不同随机分布以及不同变形失效的极限值所对应的失效概率。

5 结 论

(1)建立了螺栓组连接的有限元模型,并通过固紧实验验证了所建立模型的准确性。

(2)螺栓孔间距越小、被连接件厚度越大、预紧力越大,被连接件中心变形量越大。

(3)固紧顺序不同将影响被连接件固紧过程的变形,变形取决于固紧过程中固紧位置的变形锥对被连接中心的共同作用。螺栓固紧后,固紧顺序对最终变形的影响不明显。

(4)以训练样本训练Kriging模型,通过Kriging模型代理代替有限元过程计算过程。所训练的模型平均相对误差为 2.5% ,具有准确性。

(5)考虑参数的不确定性,结合代理模型与蒙特卡洛模拟,计算了被连接件变形超出变形极限的概率分布。当螺栓连接的相关参数服从正态分布时,被连接件的变形量也近似服从正态分布。

参考文献:

- [1] Gong H, Ding X, Liu J, et al. Review of research on loosening of threaded fasteners[J]. Friction, 2022, 10(3): 335-359.
- [2] Liu W, Zhang S, Lin J, et al. Advancements in accuracy decline mechanisms and accuracy retention approaches of CNC machine tools: a review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(11/12): 7087-7115.
- [3] Liu H, Wu J, Liu K, et al. Pretightening sequence planning of anchor bolts based on structure uniform deformation for large CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 136: 1-18.
- [4] Chang Y, Ding J, Fan H, et al. Interfacial micromechanics modeling for bolted joints in ultra-precision machine tools[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(8): 4179-4191.
- [5] Chang Y, Ding J, Fan H, et al. A hybrid method for bolted joint modeling considering multi-scale contact mechanics[J]. Precision Engineering, 2022, 78: 171-188.
- [6] Jiang K, Liu Z, Yang C, et al. Effects of the joint surface considering asperity interaction on the bolted joint performance in the bolt tightening process[J]. Tribology International, 2022, 167: No. 107408.
- [7] Chen K, Yang C, Zhao Y, et al. Optimization of square-shaped bolted joints based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, 2023, 25(3): No. 168487.
- [8] 罗忠, 石宝龙, 张小霞, 等. 拧紧工艺的螺栓连接结构预紧力变化规律[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2023, 44(2): 215-222.
Luo Zhong, Shi Bao-long, Zhang Xiao-xia, et al. Variation law of preload of bolted joint in tightening process[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2023, 44(2): 215-222.
- [9] 盛晓茜, 朱林波, 洪军, 等. 机床支承件螺栓连接

- 布局设计方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(4): 6-15.
- Sheng Xiao-qian, Zhu Lin-bo, Hong Jun, et al. Bolted connections layout design for machine tool support part[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(5): 6-15.
- [10] Nana N, Yongsheng Z, Congbin Y, et al. Contact stiffness attenuation model of bolted joint based on time-varying uncertainty[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021.
- [11] Zheng Z, Miao X, Huang X, et al. Fastening reliability analysis of bolted joint anti-self-loosening[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 202: No. 107776.
- [12] Lin Q, Zhao Y, Sun Q, et al. Reliability evaluation method of anti-loosening performance of bolted joints[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 162: No. 108067.
- [13] Shan M, Liu F, Yang W, et al. Uncertainty evaluation for bearing fatigue property of CFRP double-lap, single-bolt joints[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(3): 250-258.
- [14] 黄贤振, 孙楷铂, 栾晓刚, 等. 螺栓预紧连接可靠性灵敏度分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(8): 2219-2226.
- Huang Xian-zhen, Sun Kai-bo, Luan Xiao-gang, et al. Reliability sensitivity analysis of bolt pre-tightening connection[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(8): 2219-2226.
- [15] VDI2230-1-2015. Systematic calculation of highly stressed bolted Joints-Joints with one cylindrical bolt[S].
- [16] 酒井智次. 螺纹紧固件连接工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [17] Binder K, Heermann D, Roelofs L, et al. Monte Carlo simulation in statistical physics[J]. Computers in Physics, 1993, 7(2): 156-157.
- [18] Sun Z, Wang J, Li R, et al. LIF: a new Kriging based learning function and its application to structural reliability analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 157: 152-165.
- [19] Helton J C, Davis F J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 81(1): 23-69.
- [20] Zheng Z, Huang X, Miao X, et al. Probabilistic analysis of bolted joint anti-loosening under cyclic transverse load[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2024, 52(10): 7985-8011.