

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2022.1129

梁-弹簧单元在内法兰螺栓简化中的应用

尤建^{1,2}, 蒋昊成^{1,2}, 史超铭^{1,2}, 朱珏^{1,2*}

(1. 宁波大学 压力容器与管道安全浙江省工程研究中心, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 内法兰数值模型内含的螺栓接触行为极易导致其计算不收敛, 耗费大量的计算时间. 为平衡计算成本和精度, 构建螺栓连接结构的简化分析模型是主要手段之一. 本文对多点约束-梁单元法进行了改进, 提出一种梁-弹簧单元组合的螺栓简化方法, 该方法使用梁单元替代螺栓, 使用动力耦合约束和弹簧连接等效螺栓接触, 用经过修正的虚拟热变形法施加螺栓预紧力. 结果表明: 该方法的分析时间和多点约束-梁单元法接近, 相对全模型缩时约 50%, 计算精度更高、误差更小. 采用该方法对通信单管塔内法兰连接节点进行分析, 与精细模型和缩尺实验比较结果证明, 该方法在内法兰结构中有较强的适用性.

关键词: 内法兰; 螺栓简化; 梁-弹簧单元; 虚拟热变形法; 缩尺实验

中图分类号: O343

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 04-0112-09

内法兰常用于机械结构中两个部件之间的连接并进行动力传递, 具有可靠性高、连接紧密等优点. 由于内法兰功能的重要性, 其使用安全受到高度重视. 数值模拟是内法兰进行安全评估的主要方法之一, 然而内法兰结构的网格数量往往达到百万计, 其中包含大量螺栓接触关系, 增加了其分析难度. 如果能将螺栓连接进行合理的简化, 则内法兰的分析效率会显著提高, 为此国内外学者进行了大量研究.

影响螺栓连接结构静态特性和动态特性的两个主要特征是螺栓预紧力和部件之间的接触^[1]. Tanlak 等^[2]使用可变形壳单元对螺栓-螺母构件进行建模, 通过修正弹性模量参数使圆柱壳的抗弯刚度与原螺栓杆相等, 虽然计算时间能明显下降, 但未考虑预紧力的作用. Kim 等^[3]提出了一种单螺栓结构的简化模型, 将螺栓用梁单元近似建模, 为梁单元施加初始应变提供预紧效应, 用节点自由度耦合方式等效螺栓与法兰之间的接触行为, 通过与实验对比, 该方法显示较高的有效性和实用

性. Zhang 等^[4]提出了一种基于梁-壳单元的多螺栓复合材料节点的高效建模方法, 采用 ABAQUS 软件建立组合梁简化的非线性数值模型, 可以有效分析结构载荷分布, 与实验结果误差在 10% 以内. Blachowski 等^[5]使用梁单元与法兰耦合简化连接节点, 分析了通信塔的最大位移以及螺栓预紧力对法兰撬动效应的影响, 计算效率显著提高. 田红亮等^[6]将螺栓连接结构的接触部分假设为一层虚拟的各向同性材料, 虚拟材料层与两侧的零件设置为固定连接, 应用赫兹接触理论和分形几何理论对虚拟材料层的材料参数进行了推导, 简化模型的前 6 阶模态, 结果与实验误差在 -8.1%~8.1% 之间. 廖静平等^[7]考虑了螺栓连接面实际压强的不均匀分布, 将虚拟材料层设置成具有梯度性, 应用有限元方法和胡克定律得到虚拟材料的弹性常量与螺栓径向距离关系, 通过仿真与实验对比, 验证了该方法的有效性. 崔方圆等^[8]以哑铃状结构为研究对象, 首先用模态实验获取结构的响应数据, 然后将响应结果与有限元仿真优化技术结合, 逆向识

收稿日期: 2022-11-30.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11972203, 11572162); 浙江省自然科学基金(LY13A020007); 宁波市自然科学基金(202003N4152).

第一作者: 尤建(1997-), 男, 天津人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 高耸钢结构分析与优化. E-mail: 1270302656@qq.com

*通信作者: 朱珏(1979-), 女, 浙江金华人, 博士/教授, 主要研究方向: 冷弯钢结构稳定性分析. E-mail: zhujue@nbu.edu.cn

别了虚拟材料层的材料参数, 避免了使用解析方法获取参数效率低的问题. 蒋国庆等^[9]采用若干个拉压刚度不同的弹簧阻尼单元对单个螺栓连接进行了简化, 并采用力状态映射法对弹簧阻尼单元的力学参数进行计算, 动力学实验证明简化模型的误差在 20% 以内. 虚拟材料法通过实验和计算推导确定结合面材料参数, 需要耗费大量时间, 前期工作量大^[10]. 弹簧阻尼单元法在进行多螺栓模型的简化分析时, 无法确定弹簧阻尼单元的数量、位置, 不能考虑螺栓的分布差异和切向特性^[11]. 多点约束-梁单元法不能考虑接触面之间的刚度与阻尼, 无法正确描述结合面力学特性, 导致简化模型刚度与实际产生偏差^[12].

本文对多点约束-梁单元法进行了改进, 采用动力耦合约束和弹簧连接等效螺栓接触, 考虑了螺栓与孔的接触刚度. 首先在单螺栓连接结构中介绍了梁-弹簧单元组合简化方法、接触关系的等效和螺栓预紧力的施加. 然后对结构进行载荷分析, 以有限元全模型结果作为参照, 与多点约束-梁单元简化模型结果进行对比, 证明了该简化方法具有更高的准确度. 最后将该方法应用于单管塔内法兰结构, 用缩尺实验对模型进行精度验证, 证明该方法在多螺栓连接结构中具有适用性.

1 螺栓简化模型

1.1 分析对象

首先以铰制孔单螺栓连接结构为研究对象, 其几何模型如图 1 所示.

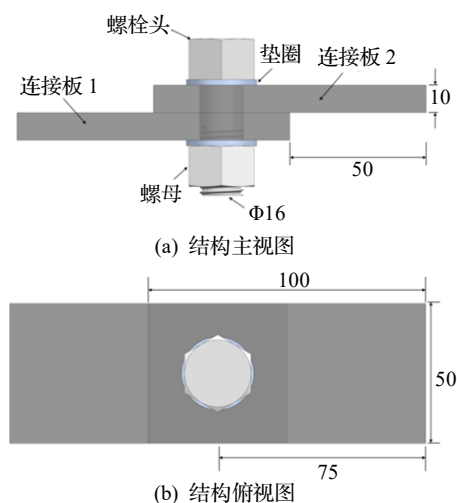


图 1 铰制孔单螺栓连接结构(单位: mm)

图 1 中螺栓型号为 M16, 螺栓无螺纹部分与孔壁基本尺寸相同, 不存在孔隙. 零件之间的摩擦系数为 0.1, 当连接板间有相对滑动时, 螺栓本身可以提供较强的抗剪切作用, 因此螺栓预紧力设置值较小, 为 1 000 N. 连接板几何参数为 100 mm×50 mm×10 mm, 螺栓与连接板之间有钢垫圈. 连接板材料为 Q345 结构钢, 螺栓为 8.8 级高强度螺栓, 相关材料参数见表 1.

表 1 材料参数

部件	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
连接板	206 000	0.30	345	490
螺栓	210 000	0.33	640	800

1.2 接触关系等效

采用 ABAQUS 软件建立上述连接结构的精细全模型和简化模型. 有限元全模型如图 2(a)所示, 对装配体中不重要或对整体计算影响极小的区域进行简化处理. 本研究主要关注结构中螺栓与板之间的接触问题, 如果对螺栓的螺纹进行详细建模, 会使螺纹部分的接触关系变得很复杂, 且螺纹部分要获得较高的网格划分质量, 需要设置较精细的网格尺寸, 这会极大增加分析时间. 如果不考虑螺母与螺纹之间存在滑移, 那么螺纹部分可以作省略处理. 螺栓与连接板之间有钢垫圈, 在结构承受外载荷发生变形时, 螺栓头与垫圈、螺母与垫圈一直处于紧密贴合状态, 为降低结构中接触对的总个数, 将螺栓与垫圈建模成一个整体. 由于垫圈的存在, 螺栓与连接板之间通过环形垫圈接触, 因此本文将六边形的螺栓头和螺母用圆柱形简化建模, 如此简化对关注问题影响不明显. 全模型考虑的接触关系有螺栓头与上平板、螺母与下平板、螺杆与两个连接板的孔壁、两板之间的接触.

图 2(b)和图 2(c)为目前已经提出的多点约束-梁单元简化模型^[13], 该方法用 B31 单元等效螺栓部件. 梁单元具有拉压、扭转、弯曲等变形能力, 被赋予与螺栓半径相同的圆形截面. 在简化模型 1 (图 2(b))中, 梁单元上下 2 个节点(Node1 和 Node2)与连接板的圆环区域节点耦合, 约束 6 个方向自由度. 耦合单元是一种具有非线性广义力-挠度能力的单向元件, 在 1D、2D 或 3D 应用中具有纵向或扭转的能力. 简化模型 2(图 2(c))在简化模型 1 基础

上将梁上 1/4(Node3)和 3/4(Node4)位置处的节点与两板的螺栓孔壁节点耦合,约束 X 和 Y 两个方向的自由度. 简化模型 3(图 2(d))为本文提出的改进方法. 简化模型 3 在 2 个螺栓孔中心各设置一个参考点(Ref1 和 Ref2), 参考点与 Node3 和 Node4 位置重合, 但相互独立. 将螺栓孔壁节点的 X 、 Y 两个自由度与参考点耦合, 再使用弹簧单元(Spring1 和 Spring2)将 Node3 和 Node4 分别与重合的参考点连接. 弹簧提供的拉力方向为节点和参考点的连线方向, 拉力大小为弹簧刚度(k_0)与两点距离的乘积, 初始大小为 0.3 个简化模型, 只需考虑两连接板之间的接触, 其余接触关系皆被等效处理.

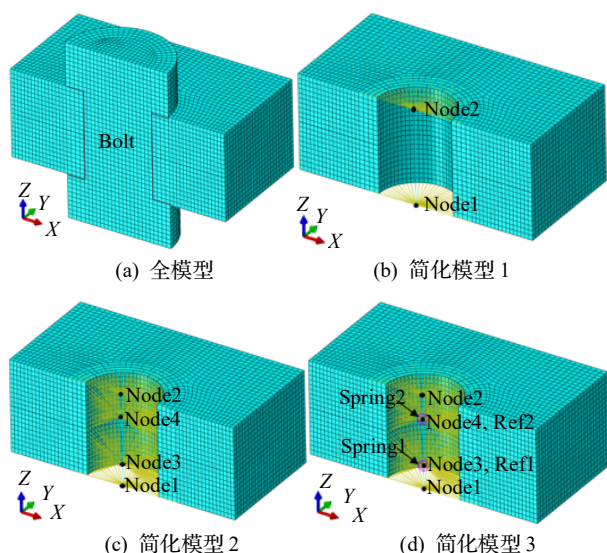
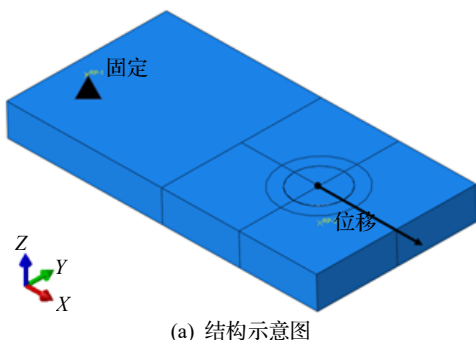
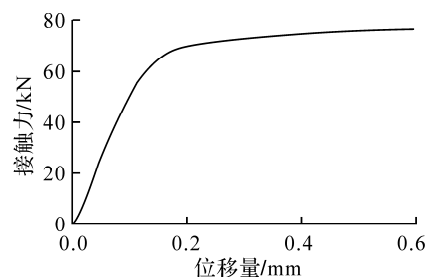


图2 全模型与简化模型示意图(局部)

k_0 与螺栓和连接板孔壁接触面积以及两者材料的硬度有关, 可通过有限元方法求解. 取连接结构一侧分析, 构建如图 3(a)所示模型. 为螺栓设置 X 轴方向的位移边界条件, 板左侧固定, 记录固定端支反力和螺栓位移量关系, 即螺栓接触力和位移量关系, 如图 3(b)所示.



(a) 结构示意图



(b) 位移量—接触力曲线

图3 简化模型 3 中弹簧单元刚度计算

当连接结构受拉力小于 60 kN 时, 螺栓和连接板的材料处于线弹性阶段, k_0 为曲线第一阶段斜率, 值为 $399.8 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$.

1.3 螺栓预紧力

有限元模型中为螺栓设置施加预紧力条件, 这常使得螺栓内部具有沿杆方向拉应力, 形成一种被锁紧状态. ABAQUS 软件提供了 Bolt Load 的加载形式, 直接在螺栓截面施加一对大小相等、方向相反的作用力, 使螺栓与连接板锁紧, 但这只适用静力学分析^[14]. 叶陈振^[15]采用“压力法”, 在螺栓两端施加相向压力使柱头和螺母与连接板压紧, 可以在动力学分析中应用, 但是不能推广到梁单元. Citipitioglu 等^[16]分两步施加预紧力: (1)将螺栓的长度指定为短于连接板的总厚度, 在螺栓上施加规定的位移使其与总厚度相等; (2)激活变形后螺栓头与连接板之间的接触, 释放施加的位移, 步骤较为繁琐. 金晶等^[17]为螺栓材料设置了热膨胀系数, 采用虚拟热变形法对螺栓施加预紧力, 温差用式(1)定义. 该方法步骤简单、适用性强, 目前应用普遍.

$$\Delta T = 4P_0 / (\pi d^2 \alpha E), \quad (1)$$

式中: ΔT 为温差; P_0 为螺栓预紧力; d 为螺栓公称直径; α 为热膨胀系数; E 为螺栓弹性模量.

梁单元或螺栓模拟降温后, 其内部的预紧力远未达到目标值. 原因为式(1)成立条件是梁单元或螺栓两侧完全固定, 而实际其两侧连接的是具有弹性的连接板. 螺栓收缩时, 连接区域被带动变形, 导致螺栓中内应力释放. 因而需要推导考虑连接区域变形情况时 ΔT 的修正公式.

图 4 列举了 3 种梁单元的连接状态: 两端自由、两端固定和两端连接具有一定刚度的弹性体. 梁原长为 $2L_0$, 根据结构和载荷的对称性, 取其 1/2 分析, 一端设置为固定约束, 如图 5 所示. 温度降

低 ΔT 后, 3 种连接状态梁产生的变形量分别为 ΔL_1 、0、 ΔL_2 。

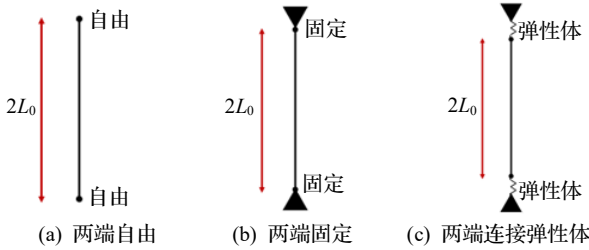


图4 梁单元3种连接状态

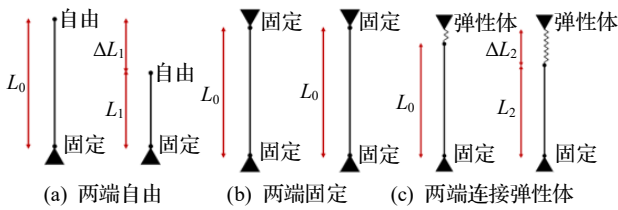


图5 对应图4的对称半模型简化图

两端自由的梁变形量由式(2)得到, 自由收缩, 不产生内应力. 降温对梁的作用等效于等轴压缩, 可认为存在一个轴向压力(F_p)作用在梁顶端, 但该压力对梁的内应力不作贡献, 轴向压力(F_p)的大小可用式(3)计算得到.

$$\Delta L_1 = \alpha L_0 \Delta T, \quad (2)$$

$$F_p = \Delta L_1 E \pi d^2 / (4 L_0) = \alpha E \pi d^2 \Delta T / 4. \quad (3)$$

梁单元两侧固定时(图 5(b)), 梁单元两侧受外部固定端拉力等于轴向压力, 在受力平衡状态下梁不产生变形. 梁中内应力被认为是完全由外部拉力提供, 可以推得式(1). 当梁一侧连接弹性体时(图 5(c)), 降温后梁产生收缩(ΔL_2). 根据线性叠加原理, ΔL_2 可用式(4)计算得到.

$$\Delta L_2 = \frac{4(F_p - F_s)L_0}{E \pi d^2}, \quad (4)$$

式中: F_s 为弹性体提供的轴向拉力.

当弹性体的刚度为 k 时:

$$\Delta L_2 = \frac{(\alpha E \pi d^2 \Delta T - 4k \Delta L_2)L_0}{E \pi d^2}, \quad (5)$$

$$\Delta L_2 = \frac{\alpha \Delta T E \pi d^2}{E \pi d^2 / L_0 + 4k}. \quad (6)$$

式(6)考虑了梁两侧的连接刚度: $k = 0$ 时, 两端自由, $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$; $k = +\infty$ 时, 两端固定, $\Delta L = 0$. 在简化模型中, 梁单元绑定的弹性体是板上的圆环区域, 与 1.2 节所用方法相同, 连接刚度可以通

过有限元法求解. 建立单侧板模型(图 6(a)), 下侧固定, 对环形区域施加压力, 获取压缩位移与载荷的关系曲线(图 6(b)).

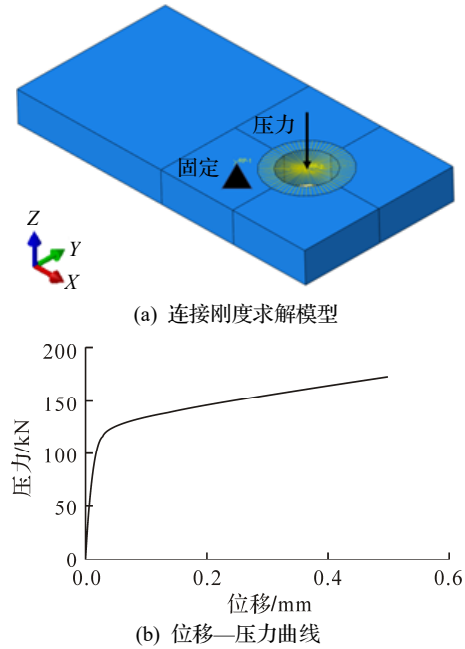


图6 梁单元两端弹性体连接刚度计算

当压力小于 100 kN 时, 压缩位移—压力为线性关系, 连接板和螺栓的材料处于弹性阶段, 连接刚度(k)为第一阶段直线的斜率($k = 8965 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$). 通常, 螺栓预紧力在材料弹性工作区间内施加, 则仅需考虑曲线第一阶段. 由于梁的内力完全由连接板的拉力提供, 则式(7)成立. 结合式(6)可得修正式(8). 再据梁单元热膨胀系数为 $10.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 长度 $2L_0$ 为 20 mm, 可最终确定 ΔT 为 $3.32 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$k \Delta L_2 = P_0, \quad (7)$$

$$\Delta T = \frac{P_0(E \pi d^2 + 4L_0 k)}{\alpha E \pi d^2 L_0 k}, \quad k \neq 0, k \neq +\infty. \quad (8)$$

2 简化方案评估

2.1 准确度验证

为验证本文提出的方法相对多点约束—梁单元法的准确度, 对单螺栓连接结构的全模型和 3 种简化模型进行了载荷分析, 对比其计算结果. 刘璐璐等^[18]已通过实验证明, 全模型可以准确地描述单螺栓结构在外载荷作用下的响应. 因此, 以全模型分析结果作为衡量简化模型准确度的标准, 不再用实验验证. 将连接结构下板左侧完全固定(图 7),

在上板右侧分别施加 X 轴方向的拉力和 Y 轴方向的弯矩载荷. 过程共涉及 2 个分析步骤: (1)施加螺栓预紧力; (2)施加拉力或弯矩.

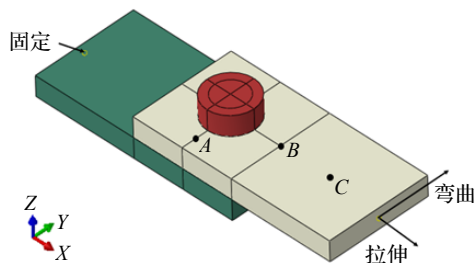
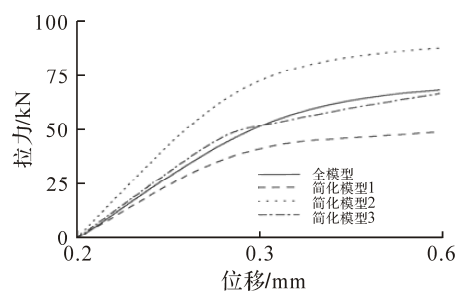
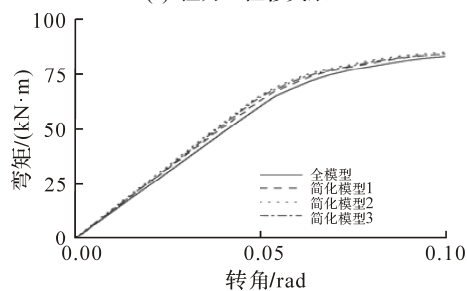


图7 结构载荷边界

通过有限元模拟得到结构在外载荷下的静态响应. 为对结构的抗拉刚度和抗弯刚度进行描述, 输出拉力—位移和弯矩—转角关系曲线. 不合理的耦合约束会导致简化模型的连接刚度与全模型产生较大偏差. 在连接板受到横向拉伸时, 简化模型1由于没有考虑梁与连接板孔壁的接触, 出现较小的抗拉刚度; 简化模型2虽然考虑了梁与孔壁的接触, 但是应用的绑定约束等同于刚性连接, 导致抗拉刚度过大; 简化模型3通过弹簧单元将梁与孔壁设置为弹性连接, 设置合适刚度的弹簧可使简化模型的抗拉刚度与全模型一致(图 8(a)). 在连接板受到弯矩作用时, 梁单元主要受轴向拉力, 与螺栓孔壁之间的接触作用不明显, 因此梁与孔壁的连接形式对整体的抗弯刚度影响不大(图 8(b)).



(a) 拉力—位移关系



(b) 弯矩—转角关系

图8 结构连接刚度曲线

由于梁单元与连接板上环形区域设置为绑定约束, 3个简化模型皆出现抗弯刚度偏大. 输出图7中节点A、节点B和节点C的应力值(表2和表3), 表中括号里数值为相对全模型结果的误差. 在拉力作用下, 简化模型1和简化模型2在节点A、节点B和节点C位置皆出现较大偏差. 简化模型3整体误差较小, 表明其对螺栓横向接触关系等效更加合理. 在弯矩作用下, 3种简化模型在节点B和节点C的模拟结果与全模型几乎无偏差, 简化模型3在节点A偏差相对较小. 在2种载荷分析结果中, 距离螺栓最近的节点A比节点B和节点C位置误差大, 说明螺栓简化后对其周围位置影响明显, 这与Kim等^[3]得到的结论一致.

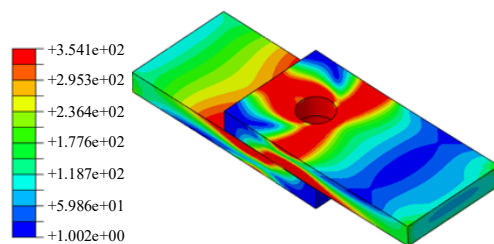
表2 拉伸载荷下应力值 MPa

模型	节点A	节点B	节点C
全模型	201.95	110.41	10.38
简化模型1	131.09(35%)	95.05(14%)	8.90(14%)
简化模型2	236.39(17%)	120.34(9%)	11.97(15%)
简化模型3	178.12(11%)	114.94(4%)	9.66(7%)

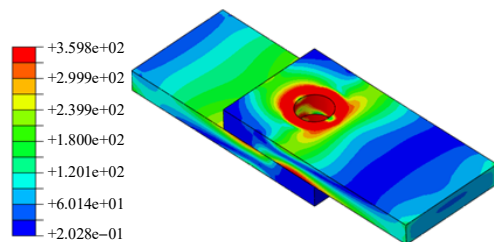
表3 弯曲载荷下应力值 MPa

模型	节点A	节点B	节点C
全模型	109.74	345.91	345.88
简化模型1	90.98(17%)	346.08(0%)	346.02(0%)
简化模型2	89.36(19%)	346.19(0%)	346.14(0%)
简化模型3	98.00(10%)	346.22(0%)	346.17(0%)

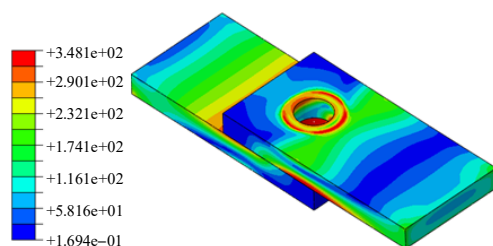
图9为拉力作用下结构Mises应力云图, 虽然应力总体分布相似, 但靠近螺栓连接区域可观察



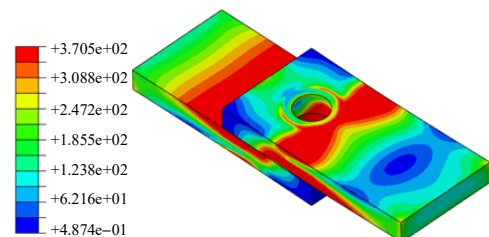
(a) 全模型



(b) 简化模型1



(c) 简化模型 2

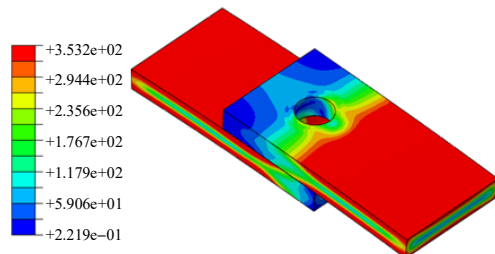


(d) 简化模型 3

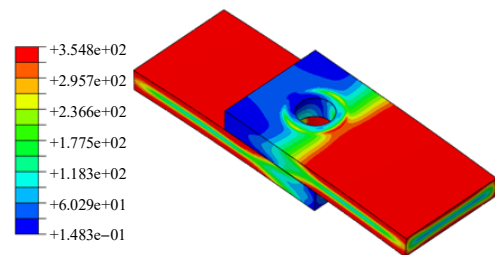
图 9 拉伸载荷下结构应力分布(单位: MPa)

到较大的差异. 因此, 考虑到螺栓预紧力和接触处理, 简化模型 3 更能准确预测应力分布.

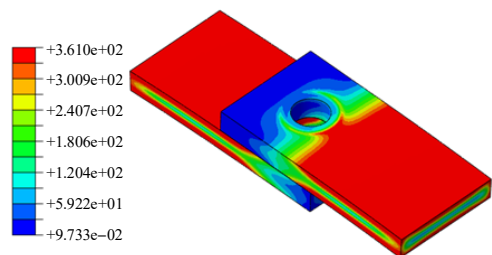
图 10 为弯矩作用下 Mises 应力云图, 简化模型应力分布与全模型皆具有较高的相似性.



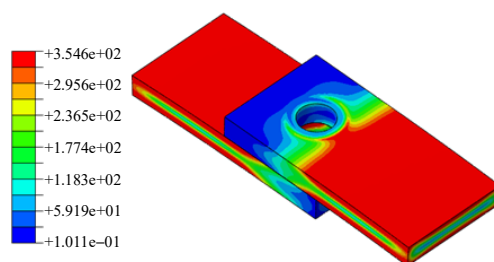
(a) 全模型



(b) 简化模型 1



(c) 简化模型 2



(d) 简化模型 3

图 10 弯曲载荷下结构应力分布(单位: MPa)

2.2 计算复杂度

表 4 为全模型和简化模型所需要的分析时间. 从表 4 可见, 简化模型相对于全模型可省时约 50%. 由于使用梁单元代替螺栓, 简化模型整体网格数小于全模型, 有助于降低计算复杂度. 同时, 全模型使用 Bolt Load 加载形式施加螺栓预紧力, 需要严格控制迭代的时间步长, 步长过大容易造成计算不收敛. 用多个增量步完成全部预紧力的施加, 并且每个增量步中皆包含接触分析, 耗时较多. 简化模型使用虚拟热变形法施加预紧力, 可仅用一个增量步施加全部预紧力, 不用考虑计算不收敛问题. 在施加外载荷时, 全模型中包含 4 对接触关系, 简化模型中仅含 1 对接触关系, 由此极大地降低了计算复杂度. 简化模型 3 与多点约束-梁单元法计算复杂度相差不大, 但前者在结构应力预测上准确度更高.

表 4 全模型和简化模型分析时间 s

模型	拉伸载荷	弯矩载荷
全模型	2 336	1 981
简化模型 1	1 255	994
简化模型 2	1 286	1 031
简化模型 3	1 248	1 011

3 简化方案在内法兰中的应用

为探究简化方案在内法兰结构中的适用性, 以通信单管塔内法兰连接节点为研究对象, 对其内部的螺栓进行简化. 内法兰节点构造特殊, 需要取加劲肋之间的区域作为节点段的范围^[19], 内法兰节点段模型如图 11 所示.

采用 ABAQUS 软件分别对精细模型(图 12(a))和简化模型(图 12(b))进行 4 点弯曲模拟, 比较 2 种模型的抗弯性能, 图 12(c)为模型侧视图. 同时, 设

计了内法兰的等比缩尺模型,在万能实验机上进行相同的4点弯曲实验(图12(d)~(e)),作为仿真结果的对照.在缩尺实验中,缩尺模型与实际尺寸模型保持相似,根据模型的缩尺实验结果推算出原型的相应结果^[20].根据相似理论,当取缩尺模型与实际模型几何参数比为 λ ,即 $C_L = L'/L = \lambda$ 时,可以推导出其他相关物理量的比例参数,此处取 $\lambda=5$.材料属性中,密度参数比 $C_\rho=1$,泊松比参数比 $C_\mu=1$,弹性模量参数比 $C_E=1$,塑性模量参数比 $C_{ET}=1$.由于材料参数比皆为1,则缩尺模型和有限元模型选用同种材料.力学变量中,应力参数比 $C_\sigma=1$,应变参数比 $C_\epsilon=1$,合力参数比 $C_F=\lambda^2$,位移变形参数比 $C_u=\lambda$.

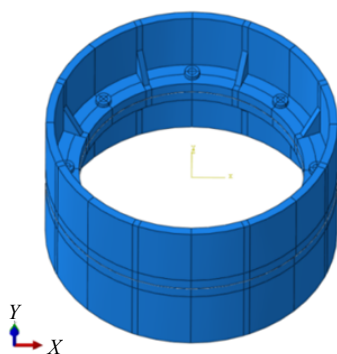
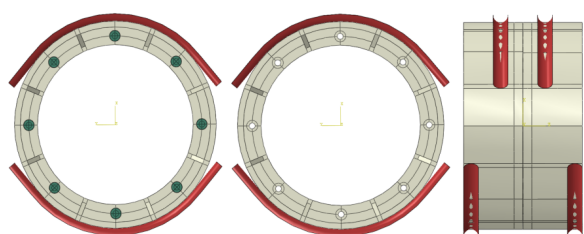


图 11 内法兰节点段模型



(a) 精细模型正视图 (b) 简化模型正视图 (c) 模型侧视图



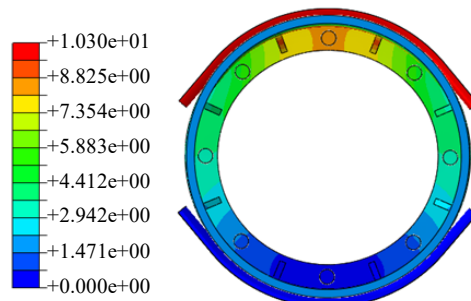
(d) 缩尺模型正视图

(e) 缩尺模型侧视图

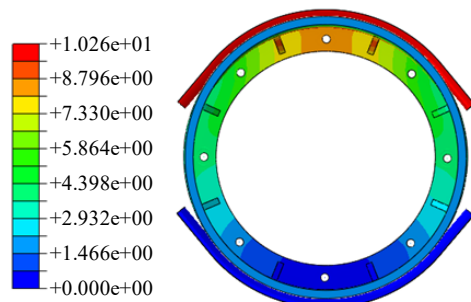
图 12 法兰4点弯曲模拟与实验

精细模型和简化模型上侧2个压点竖直向下位移10 mm,遵循相似准则,缩尺实验上侧压点向下位移2 mm.图13(a)~(d)为有限元模型在4点弯

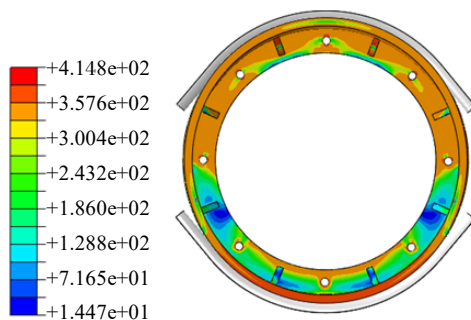
曲模拟中的位移云图和Mises应力云图(未显示螺栓).



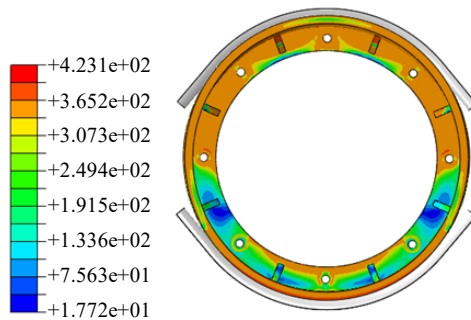
(a) 精细模型位移云图(单位: mm)



(b) 简化模型位移云图(单位: mm)



(c) 精细模型 Mises 应力云图(单位: MPa)



(d) 简化模型 Mises 应力云图(单位: MPa)

图 13 法兰4点弯曲结果云图

图14为通过散斑实验得到的缩尺模型在4点弯曲下的位移云图(图中位移数值已乘以比例系数).同时输出了有限元模型和缩尺模型压点的位移—压力关系曲线(缩尺实验结果变量已乘以比例

系数)(图 15). 通过对比显示简化模型和精细模型、缩尺实验结果具有较好的一致性. 缩尺实验刚度偏小的原因可能是模型中加劲肋处有焊缝, 而有限元模型未加考虑.

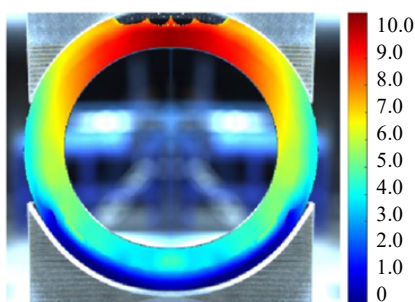


图 14 缩尺模型位移云图(单位: mm)

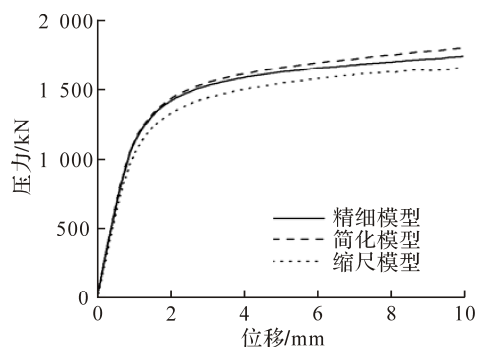


图 15 法兰 4 点弯曲压力—位移曲线

综上所述, 内法兰节点的简化模型分析结果与精细模型和缩尺模型具有较高的吻合度, 证明了简化模型的准确性, 说明本文提出的螺栓简化方案适用于环形分布的内法兰连接结构.

4 结论

本文使用梁单元和弹簧单元构建了单螺栓结构的简化模型, 对虚拟热变形法施加预紧力计算公式进行了修正, 并与全模型和多点约束-梁单元法进行了对比分析. 然后将简化方案应用于单管塔内法兰连接节点, 应用缩尺实验验证简化模型的准确度和适用性. 主要结论有:

(1)推导的虚拟热变形法修正公式考虑了梁单元两侧连接弹性体的刚度, 可以准确地求出使螺栓达到目标预紧力时需要模拟降低的温度值.

(2)多点约束-梁单元法对接触关系不合理的等效导致结构连接刚度和螺栓孔周围应力分布预测与全模型存在较大偏差. 通过静力分析比较, 证明了使用耦合单元和弹簧单元联合等效接触的方法

法准确度更高, 分析时间和全模型相比节省了约 50%.

(3)将简化模型推广到内法兰结构中仍具有较强的适用性, 简化模型分析结果与精细模型和缩尺实验结果吻合度较好.

参考文献:

- [1] Montgomery J. Methods for modeling bolts in the bolted joint[EB/OL]. [2022-10-12]. <http://wanderlodgegurus.com/database/Theory/FEA%20Bolt%20and%20Bolted%20Joint%20Modeling.pdf>.
- [2] Tanlak N, Sonmez F O, Talay E. Detailed and simplified models of bolted joints under impact loading[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2011, 46(3):213-225.
- [3] Kim J, Yoon J C, Kang B S. Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints[J]. Applied Mathematical Modelling, 2007, 31(5):895-911.
- [4] Zhang F, Zhang W, Hu Z D, et al. Experimental and numerical analysis of the mechanical behaviors of large scale composite C-Beams fastened with multi-bolt joints under four-point bending load[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 164:168-178.
- [5] Blachowski B, Gutkowski W. Effect of damaged circular flange-bolted connections on behaviour of tall towers, modelled by multilevel substructuring[J]. Engineering Structures, 2016, 111:93-103.
- [6] 田红亮, 刘芙蓉, 方子帆, 等. 引入各向同性虚拟材料的固定结合部模型[J]. 振动工程学报, 2013, 26(4): 561-573.
- [7] 廖静平, 张建富, 郁鼎文, 等. 基于虚拟梯度材料的螺栓结合面建模方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(4):1149-1155.
- [8] 崔方圆, 华灯鑫, 李言, 等. 结合部虚拟材料参数的逆向优化识别方法[J]. 振动工程学报, 2019, 32(2):215-223.
- [9] 蒋国庆, 洪荣, 陈万华. 螺栓法兰连接结构简化动力学建模及模型参数辨识[J]. 振动与冲击, 2020, 39(15): 170-175.
- [10] Tian H L, Li B, Liu H Q, et al. A new method of virtual material hypothesis-based dynamic modeling on fixed joint interface in machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(3):239-249.
- [11] Luan Y, Guan Z Q, Cheng G D, et al. A simplified nonlinear dynamic model for the analysis of pipe

- structures with bolted flange joints[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(2):325-344.
- [12] 齐宗美. 面向显式动力分析的螺栓简化建模方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [13] Lampeas G, Perogamvros N. Analysis of composite bolted joints by a macro-modelling approach[J]. *International Journal of Structural Integrity*, 2016, 7(3): 412-428.
- [14] Liu W G, Lin W Y. Stress around the hole of single lapped and single bolted joint plates with fitting clearance[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(4):1623-1632.
- [15] 叶陈振. 冲击荷载作用下装配式钢梁柱节点破坏机理和动力响应研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2021.
- [16] Citipitioglu A M, Haj-Ali R M, White D W. Refined 3D finite element modeling of partially-restrained connections including slip[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, 58(5/6/7/8):995-1013.
- [17] 金晶, 吴新跃, 郑建华. 螺栓联结预应力施加方法改进研究[J]. *海军工程大学学报*, 2010, 22(2):20-24.
- [18] 刘璐璐, 李志鹏, 韩佳奇, 等. 冲击载荷下单螺栓连接结构力学行为试验与仿真研究[J]. *推进技术*, 2022, 43(2):55-66.
- [19] 施文. 单管塔节点刚度对整塔刚度的影响[J]. *四川建材*, 2013, 39(1):58-59; 62.
- [20] Chen F B, Yan B W, Weng L X, et al. Wind tunnel investigations of aeroelastic electricity transmission tower under synoptic and typhoon winds[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 34(1):04020102.

Application of beam-spring element in inner flange bolt simplification

YOU Jian^{1,2}, JIANG Haocheng^{1,2}, SHI Chaoming^{1,2}, ZHU Jue^{1,2*}

(1.Zhejiang Provincial Engineering Research Center for the Safety of Pressure Vessel and Pipeline,
Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Key Laboratory of Impact and Safety Engineering of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The bolt contact behavior in the numerical model of the inner flange may easily lead to the non-convergence of its calculation, which consumes a lot of calculation time. In order to balance the consumption and accuracy of calculation, one of the main means is to build a simplified analysis model of the bolted structures. In this paper, the multi-point constraint beam element method is improved, and a simplified bolt method of beam spring element combination is proposed. The method uses beam element instead of bolt, uses dynamic coupling constraint and spring connection to equivalent bolt contact, and applies bolt preload by modified virtual thermal deformation method. The analysis time of this scheme is close to that of the multi-point constraint beam element method, which is about 50% shorter than that of the full model. Finally, the simplified method of beam spring element combination proposed in this paper is used to analyze the flange connection node in the communication single pipe tower. Compared with the full model and scale reduction test, this method is proved to have strong applicability in the inner flange structure.

Key words: inner flange; bolt simplification; beam-spring element; virtual thermal deformation method; scale reduction test

(责任编辑 史小丽)