

## 参数化建模的螺栓法兰连接刚度分析\*

蒋国庆,李家文,唐国金

(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**为分析几何参数对螺栓法兰连接刚度的影响,用 MSC. Patran 软件的二次开发工具 PCL (Patran Command Language) 建立了螺栓法兰连接参数化模型。研究了螺栓法兰连接刚度随连接结构几何参数的变化规律并进行了灵敏度分析。经分析可知,连接结构刚度对开孔位置比例参数最敏感,其次是上法兰厚度。当上部段长度大于某一数值时,连接结构刚度对上部段长度参数不敏感,这一结论能为连接结构动力学简化建模提供一定理论参考。

**关键词:**PCL;螺栓法兰连接;参数化;灵敏度

**中图分类号:**V435 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)06-180-05

## Stiffness analysis of bolted flange joint based on parameterized modeling

JIANG Guoqing, LI Jiawen, TANG Guojin

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to analyze the effects of geometric parameters on the stiffness of bolted flange joint, a parameterized model of bolted flange joint was constructed by using PCL (Patran Command Language) on the platform of software MSC. Patran. The law of the stiffness of bolted flange joint with the change of geometric parameters was studied, and the sensitivity of geometric parameters was analyzed based on the parameterized model. The results show that the ratio of the location of hole is the most sensitive factor to the stiffness of bolted flange joint, and the next one is thickness of upper flange. When the length of upper body is up to a const, the stiffness of bolted flange joint is insensitive to the length of upper body, and this conclusion can provide a reference to simplify the dynamic model of joint.

**Key words:** patran command language; bolted flange joint; parameterized; sensitivity

螺栓法兰结构具有构造简单、可靠性高、可操作性好、使用维护简便<sup>[1]</sup>等特点,在工业结构中应用十分广泛。但由于几何的突变性和结构的不连续性,螺栓法兰连接在外力的作用下会产生应力并且应变不均匀,同时会导致局部受力过大<sup>[2-4]</sup>。影响螺栓法兰结构这种非线性特性的因素有很多,其中结构的几何尺寸对其特性有重要影响。

PCL<sup>[5]</sup>语言是 MSC. Patran 软件的二次开发工具,它具有标准 C 语言的几乎所有功能。李磊<sup>[6]</sup>采用 PCL 语言建立了车轮形药柱的参数化有限元模型,实现了给定几何参数下药柱的自动建模和计算、药柱最大应变和装填分数的自动输出;隋允康<sup>[7]</sup>使用二级控制法和 PCL 对二维连续体进行了形状优化;申志彬<sup>[8]</sup>基于 PCL 语言实现了星形药柱建模和分析的参数化,并研究了星形

药柱几何参数对其最大 Von Mises 应变的影响规律;冯国庆<sup>[9]</sup>基于 PCL 语言实现了波浪压力的自动加载,不仅缩短了加载数据的时间,也避免了数据录入的发生。同时,PCL 语言也能与其他优化方法结合<sup>[10]</sup>,实现复杂结构的优化设计。目前暂时没有其他人基于参数化建模研究螺栓法兰连接刚度。本文选取某螺栓法兰结构为研究对象,采用 PCL 语言建立其参数化模型,研究了连接结构各几何参数对连接结构刚度的影响规律并进行了几何参数灵敏度分析,为下一步简化连接结构动力学模型提供了一定理论基础。

### 1 初始模型

选用的螺栓连接结构的初始几何模型(螺栓未画出)如图 1 所示,包括上部段、上法兰、螺栓(共 4 个)、下法兰和下部段,其中上下部段、上下

\* 收稿日期:2014-06-30

作者简介:蒋国庆(1987—),男,湖南新邵人,博士研究生,E-mail:jieye1987@126.com;

唐国金(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:tanggj@nudt.edu.cn

法兰为对称结构(在后续参数化建模时,保持下部段和下法兰为初始状态)。因而主要几何参数有法兰外径  $D1$ 、筒段外径  $D2$ 、开孔直径  $D3$ 、筒段厚度  $h1$ 、上法兰厚度  $h2$ 、上部段长度  $h3$ 、开孔位置比例  $i$ ,其中开孔位置比例  $i$  为孔中心至法兰外边缘的距离与法兰宽度( $(D1 - D2)/2$ )之比。在分析过程中,设置法兰外径  $D1$ 、筒段外径  $D2$  为固定值,分别为  $D1 = 200\text{mm}$ ,  $D2 = 120\text{mm}$ ,其余 5 个参数为可变值,其初始值见表 1。

表 1 螺栓连接结构可变参数初始值  
Tab.1 Changeable parameters' initial values

参数	初始值
开孔直径 $D3$ (mm)	10
筒段厚度 $h1$ (mm)	5
上法兰厚度 $h2$ (mm)	5
上部段长度 $h3$ (mm)	30
开孔位置比例 $i$	0.5

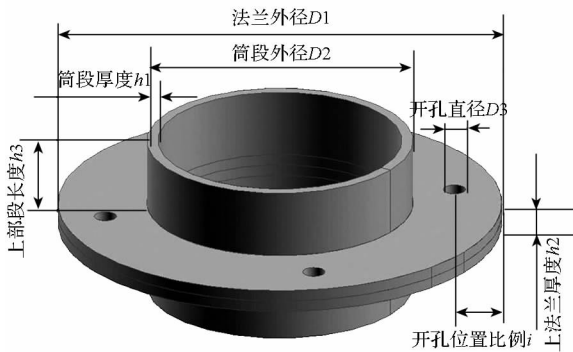


图 1 螺栓法兰连接初始几何模型(螺栓未画出)  
Fig.1 Bolted flange joint's initial geometrical model (no bolt)

### 1.1 网格划分

根据螺栓连接结构的初始几何模型,采用六面体单元 Hex8 建立了螺栓连接结构的有限元模型,如图 2 所示。在建模过程中,为便于进行参数化建模,对模型做了如下处理:1)用方孔代替圆孔,其中方孔的边长与圆孔的直径相等;2)采用方形截面梁单元模拟螺栓,其中方形截面的边长与方孔的边长相等;3)采用多点约束单元 RBE2 单元连接法兰体单元和螺栓梁单元,约束其所有自由度。

### 1.2 材料定义

选用的材料为 Q235 结构钢,材料相关力学性能参数见表 2。

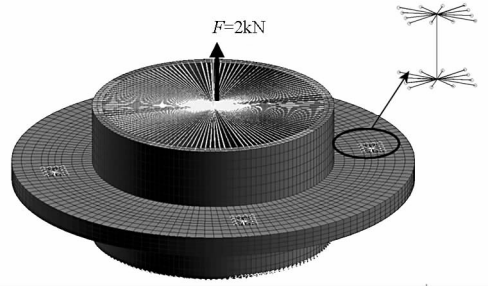


图 2 螺栓连接结构的初始有限元模型  
Fig.2 Bolted flange joint's initial finite element model

表 2 不锈钢力学性能参数

Tab.2 Mechanical parameters of stainless steel

材料名称	弹性模量 (MPa)	泊松比	密度 ( $\text{T/mm}^3$ )
Q235	$2.1 \times 10^5$	0.3	$7.93 \times 10^{-9}$

### 1.3 载荷加载和边界设置

只进行静强度分析,考虑了上下法兰面之间的接触,但不考虑上下法兰之间的摩擦和其他面之间的接触,也不考虑螺栓预紧力的作用,螺栓法兰连接受到轴向的拉力作用,拉力大小为 2kN。在连接结构上部段的上表面建立多点约束 RBE3 单元,用于加载拉力。下部段的下表面设为固支。载荷加载完毕、边界设置结束后,连接结构的有限元模型如图 2 所示。

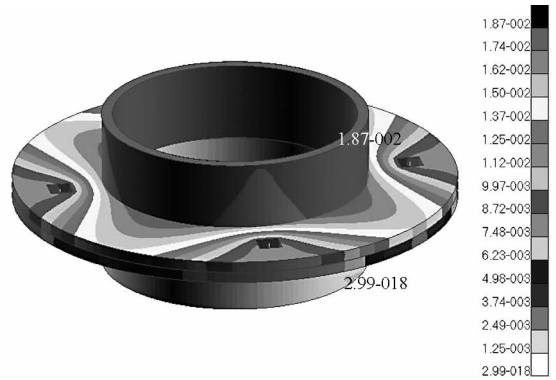


图 3 2kN 拉力作用下连接结构位移分布云图  
Fig.3 Displacement fringe of the joint under 2kN tensile force

### 1.4 静力分析结果

初始有限元模型建立完毕后,调用 MSC. Nastran 进行静力分析,得到此时连接结构的位移分布云图,如图 3 所示。由图 3 可知,连接结构的最大位移出现在上部段上端面,为 0.0187mm,从而可得该螺栓连接结构的刚度  $k = 2000/0.0187 \text{ N/mm} = 1.07 \times 10^8 \text{ N/m}$ 。同时可以得到此时连接结构上下法兰面的接触情况,其中上法兰接触情

况如图 4 所示。由图 4 可知,上法兰接触面位于法兰盘边缘靠近螺栓孔处。

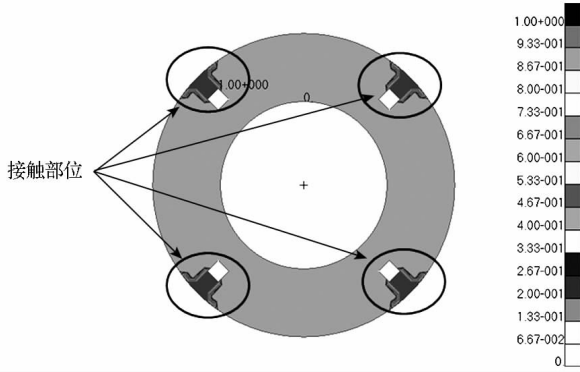


图 4 上法兰接触情况

Fig. 4 Contact status of the upper flange

### 2 参数化模型

在建立螺栓法兰连接的初始有限元模型的过程中,可以得到一系列关于网格划分、材料设置、载荷加载、边界设置以及分析参数设置的命令流(在 patran. ses. ?? 文件中)。根据需要修改这些命令流,便可以得到想要的参数化模型。如初始有限元模型中设置筒段厚度时的语句为

```
asm_const_grid_xyz( "3", "[ 55 0 0]", " Coord 0", asm_create_grid_xyz_created_ids )
```

```
asm_const_grid_xyz( "4", "[ 0 55 0]", " Coord 0", asm_create_grid_xyz_created_ids ),
```

其中“55”便是用于设置筒段厚度所用到的值。上文中把筒段厚度设置为可变参量,通过命令从外部文件中把筒段厚度赋给变量 a1 后,使用如下命令便可实现筒段厚度的参数化。

```
GLOBAL REAL a5
```

```
a5 = 60 - a1
```

```
asm_const_grid_xyz( "3", "[ `a5` 0 0]", " Coord 0", asm_create_grid_xyz_created_ids )
```

```
asm_const_grid_xyz( "4", "[ 0 `a5` 0]", " Coord 0", asm_create_grid_xyz_created_ids )
```

如上文所述,为方便参数化建模,螺栓连接结构的圆孔被处理为方形孔。在 MSC. Patran 中建立连接结构的几何模型时,需要充分认识到方孔位置的变化所引起的网格数目的变化。为避免网格数目发生变化,需要对几何模型做一些处理,如图 5 所示。图 5 为整个连接结构的几何基础,螺栓连接结构的整体几何模型和整体有限元模型都可以通过对它进行相关变化得到,是本次参数化建模的重点和难点。对螺栓连接结构进行参数化建模后,把 5 个参数的初始值代入到输入文件中,

随后启动程序,便可以得到图 2 所示的连接结构有限元模型。当然,代入不同的参数值,可以自动得到不同的螺栓法兰连接,即实现了螺栓连接结构的参数化建模。

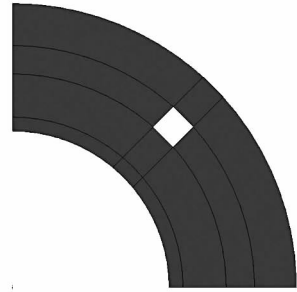


图 5 上下法兰接触面的四分之一几何模型

Fig. 5 1/4 fundamental geometrical model

### 3 计算结果分析

根据上文得到的螺栓连接结构参数化模型,编制 MATLAB 程序,可以得到不同参数对连接结构刚度的影响规律。

#### 3.1 开孔半径对连接结构刚度的影响

图 6 给出了开孔半径对螺栓法兰连接刚度的影响规律。由图 6 可以看出,连接结构的刚度随开孔半径的增大而增大。因此,在设计螺栓法兰连接时,应该尽可能选择大的螺栓。

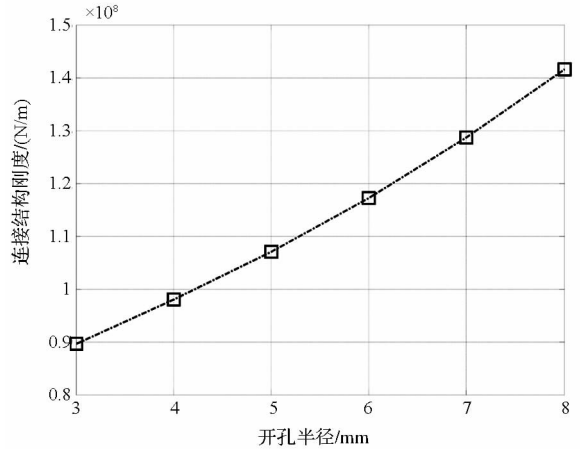


图 6 连接结构刚度随开孔半径变化曲线

Fig. 6 Stiffness variation with D3

#### 3.2 筒段厚度对连接结构刚度的影响

由图 7 可知,连接结构刚度随筒段厚度的增加而增大,但相同厚度的增加所带来的连接结构刚度增大的幅度越来越小。因此,在设计过程中,在综合考虑刚度和质量的基础上应尽可能选择大的筒段厚度。

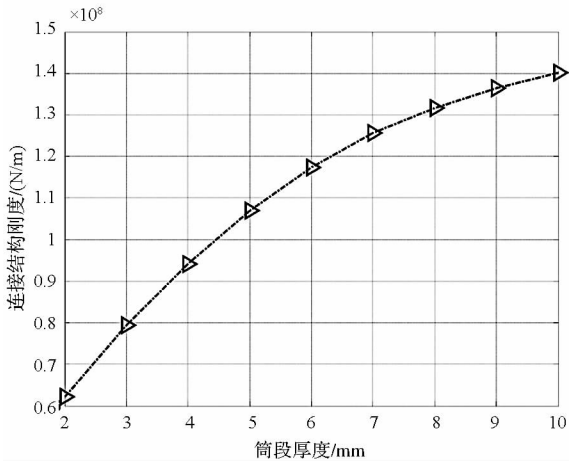


图7 连接结构刚度随筒段厚度变化曲线

Fig. 7 Stiffness variation with  $h_1$

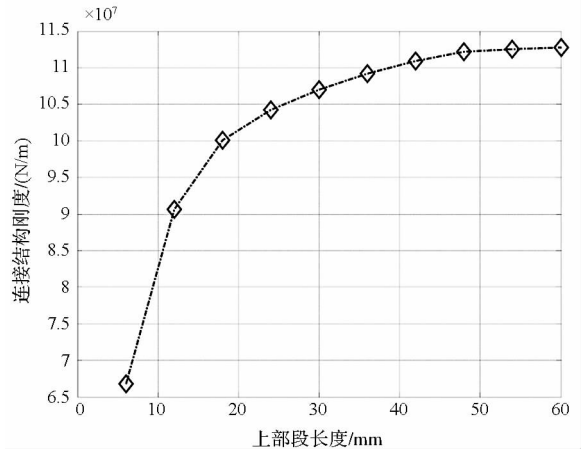


图9 连接结构刚度随上部段长度变化曲线

Fig. 9 Stiffness variation with  $h_3$

### 3.3 上法兰厚度对连接结构刚度的影响

图8给出了连接结构刚度随上法兰厚度的变化曲线,与筒段厚度对连接结构刚度的影响规律类似,随着上法兰厚度的增加,连接结构刚度也增大,但增加的幅度越来越小。

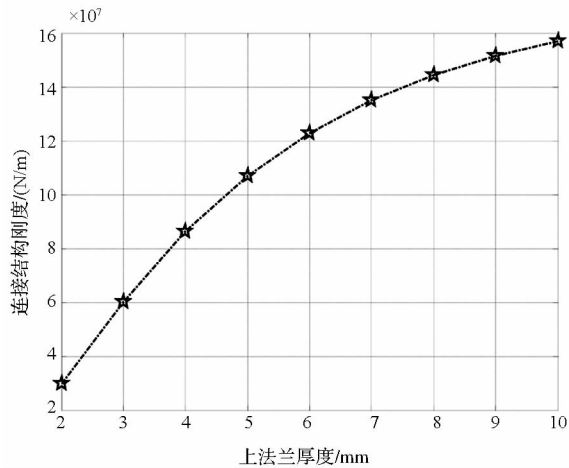


图8 连接结构刚度随上法兰厚度变化曲线

Fig. 8 Stiffness variation with  $h_2$

### 3.4 上部段长度对连接结构刚度的影响

由图9可以看出,连接结构刚度随上部段长度的增加而不断增大;当上部段长度增加到大于40mm后,连接结构刚度几乎保持不变。根据这一特点,可以合理选择上下部段长度,与螺栓法兰组成新连接结构,并进一步对其进行简化,得到连接结构的简化动力学模型。

### 3.5 开孔位置比例对连接结构刚度的影响

如图10所示,连接结构刚度随开孔位置比例的增加而增大,即开孔位置越靠近轴心,连接结构刚度也就越大。因此,在设计过程中,需要注意到并用好这一特性。

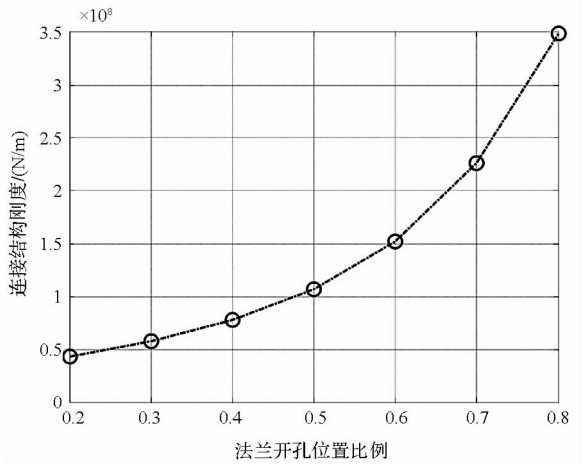


图10 连接结构刚度随开孔位置比例变化曲线

Fig. 10 Stiffness variation with  $i$

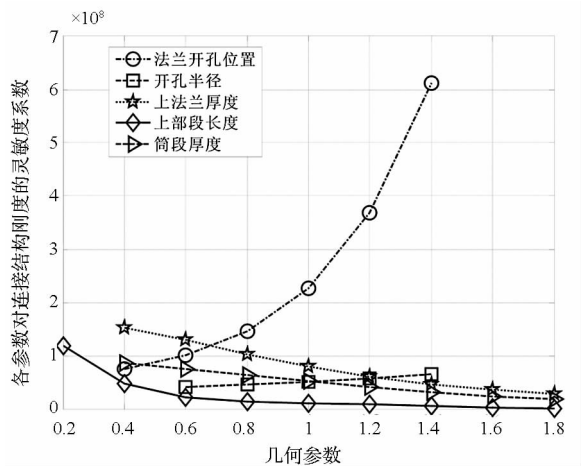


图11 不同参数对连接结构刚度灵敏度系数变化曲线

Fig. 11 Sensitivity of stiffness with different parameters

### 3.6 灵敏度分析

不同参数对连接结构刚度的影响程度不同,在设计连接结构时,需要了解连接结构刚度对不同参数的敏感性,从而明确设计重点,控制好连接结构的刚度。

几何参数灵敏度是指结构应对各几何参数的变化率,即偏导数。采用全局差分法计算各几何参数对连接结构刚度的灵敏度系数。在计算过程之前,考虑到不同参数的单位不同,变化范围也不一致,为便于比较,对不同几何参数进行了无量纲化处理(即各参数的变化值除以初始值)。图 11 为不同参数对连接结构灵敏度系数的变化曲线。

为便于比较,将 5 个参数对连接结构刚度的灵敏度系数进行均化处理,见表 3。

表 3 不同参数对连接结构刚度的平均灵敏度系数

Tab.3 Average sensitivity of stiffness of different parameters

参数	灵敏度系数
开孔半径	$5.192 \times 10^7$
筒段厚度	$4.867 \times 10^7$
上法兰厚度	$7.934 \times 10^7$
上部段长度	$2.552 \times 10^7$
开孔位置比例	$2.546 \times 10^8$

由表 3 可知,上述 5 个几何参数对螺栓法兰连接刚度的影响程度依次为:开孔位置比例、上法兰厚度、开孔半径、筒段厚度、上部段长度。其中,连接结构刚度对开孔位置比例参数最为敏感,上法兰厚度次之。因此,在设计螺栓法兰连接时,需要特别注意开孔位置比例的设计。

### 4 总结

1) 基于 MSC. Patran 软件的二次开发语言 PCL,建立了螺栓法兰连接参数化模型,能够实现不同参数下连接结构的自动有限元建模。

2) 在轴向拉力作用下,螺栓法兰连接的刚度均随开孔半径、筒段厚度、上法兰厚度、上部段长度以及开孔位置比例的增加而增大,但增大的相对幅度有所不同,其中连接结构刚度对开孔位置比例参数最为敏感,上法兰厚度次之,在设计过程中需要特别注意。

3) 当上部段长度大于 40mm 时,螺栓法兰连接的刚度随上部段长度的增加而变化很小,即此

时敏感性降低,根据这一特性,可以为简化连接结构的动力学模型提供一定参考。

### 参考文献 (References)

- [1] Bickford J H. An introduction to the design and behavior of bolted joints [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1990.
- [2] Pereira E N, Mantelli M B H, Milanez F H. Statistical model for pressure distribution of a bolted joint [C]. 40th Thermo physics Conference, 2008.
- [3] de Lima L R O, Freire J L de F, Vellasco P C G da S, et al. Structural assessment of minor axis steel joints using photoelasticity and finite elements [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(2):466-478.
- [4] Lehnhoff T F, Ko K I, Mckay M L. Member stiffness and contact pressure distribution of bolted joints [J]. Journal of Mechanical Design, 1994, 116(2): 550-557.
- [5] MSC Software. PCL and customization [M]. Los Angeles: The Macnea-Schwendler Corporation, 2005.
- [6] 李磊,唐国金,段静波,等.基于参数化建模的车轮形药柱形状优化[J].国防科技大学学报,2011,33(1):11-16. LI Lei, TANG Guojin, DUAN Jingbo, et al. Shape optimization of wheel shape grain based on parameterized modeling [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(1): 11-16. (in Chinese)
- [7] 隋允康,李栋,杜家政,等.用二级控制法对二维连续体进行形状优化[J].计算力学学报,2007,24(2):135-141. SUI Yunkang, LI Dong, DU Jiazheng, et al. Shape optimization for two-dimensional continuum based on two-phase control strategy [J]. Journal of Computational Mechanics, 2007,24(2):135-141. (in Chinese)
- [8] 申志彬,李磊,雷勇军,等.基于 Patran 二次开发的星形药柱几何参数灵敏度分析[J].国防科技大学学报,2010,32(4):25-29. SHEN Zhibin, LI Lei, LEI Yongjun, et al. Geometric parameters sensitivity analysis for star grain based on secondary development of patran [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(4): 25-29. (in Chinese)
- [9] 冯国庆,刘相春,任慧龙.基于 PCL 语言的波浪压力自动加载方法[J].船舶力学,2006,10(5):107-112. FENG Guoqing, LIU Xiangchun, REN Huilong. A PCL based automatic loading approach for wave pressures [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(5):107-112. (in Chinese)
- [10] 张国栋,顾克秋.基于遗传算法和参数化建模的非线性结构优化[J].计算力学学报,2003,20(6):764-768. ZHANG Guodong, GU Keqiu. Optimization of nonlinear structure based on genetic algorithm and parametrized model [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2003, 20(6):764-768. (in Chinese)