

●研究简报●

一种基于精细有限元模型的螺纹连接结构数值方法研究*

A METHOD OF METICULOUS FEM MODELING FOR THREADED BOLT

郭历伦** 陈忠富 罗景润 陈刚

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 绵阳 621999)

GUO LiLun CHEN ZhongFu LUO JingRun CHEN Gang

(Institute of systems engineering, CAEP, Miangyang 621999, China)

摘要 针对螺纹连接结构力学响应和螺纹上应力分布问题,提出了一种基于 Patran 软件的螺纹连接结构的精细有限元建模方法。利用 Patran 软件的前处理功能,将结构的含螺纹区域离散为螺纹层、过渡层和常规层。常规层采用常规方法单独建模,螺纹层、过渡层则采用双导线法建模。首先建立两条螺旋线,以及螺纹层和过渡层截面的平面单元,通过一定的方法将平面单元绕两条螺旋线旋转生成三维实体单元,最后合并过渡层与常规层的对应节点形成含螺纹区域的整体有限元模型。采用该方法对口型含螺纹连接结构在不同预紧力状态的响应进行了建模分析,获得了螺纹上的应力分布、结构的最大应力,以及螺杆中部的应力响应。结果表明,螺纹的应力分布特征和结构最大应力位置与已有的研究结果比较吻合。在预紧力 10 N·M 到 70 N·M 的七种工况下,计算所获得的螺杆上应力与实验结果相比,最小相对误差为 0.5%,最大相对误差为 4.8%,两者吻合较好。

关键词 螺纹连接 精细有限元 数值方法 预紧力

中图分类号 0342

Abstract A method of meticulous modeling for threaded bolt in finite element software patran was presented in this article. In this method, the analyzed structure was divided into three regions, thread region, conventional region and transition region. The conventional region was modeled with the conventional method, however, the thread region and the transition region were modeled using the Glide-Guide method. Firstly, two helical lines and the plane elements were created. Secondly, the plane elements were rotated along the lines, then the three dimensional elements for the helical model were obtained. Finally, the nodes of the transition region elements and the conventional region elements were edited so that the whole model was attained. Comparing to the existing method, this method is simpler, and the elements are all standard elements. A structure with threaded bolt under pre-tension force was analyzed. The distribution of stress in the thread, the stress in the thread bar and the maximum equivalent stress were calculated. The stress in the thread bar is identical to the experiment results perfectly, and the maximal relative error is less than five percent.

Key words Threaded bolt; Meticulous FEM; Numerical method; Pre-tension force

Corresponding author: GUO LiLun, E-mail: gllcr@163.com

The project supported by the Supported by Sci. & Tech. Funds of CAEP(No. 11302211).

Manuscript received 20140108, in revised form 20140212

引言

螺栓连接结构是一种常用的连接和传递载荷结构,由于其具有易于装配/拆卸、可重复使用等优点,已被广泛地应用于各种机械、建筑设施和武器结构中。传统上,一般是采用近似方法对螺栓连接的力学问题进行简化分析,并将分析结果和充分的实验结果结合进行相应的结构设计^[1-2]。在工程计算中,也通常采用简化处理,忽略螺纹连接,在不关注螺纹力学响应特征的问题中,这些方法被证明是可行的。但是,在工程实践中,对于一些重要部位的螺栓连接,比如结构的主螺

栓连接,往往需关注螺纹连接的松弛、断裂等问题,此时,螺纹连接的力学响应细节是螺栓预紧力设计和强度设计的关键因素。

不少学者针螺纹连接力学响应问题开展了实验和数值模拟方法研究。在数值方面,早期主要采用二维轴对称模型,在三维情况下,螺纹部分用对称的几何模型代替。这类方法虽然在能在一定程度上模拟螺纹部分的力学响应,但由于不能反应螺纹的旋转特性,不能真实地模拟螺纹的滑移和松弛。近年来,部分学者开始研究螺纹旋转模型的数值方法,这方面的工作主要有三类^{[3]524-531[4]947-952[5]274-281[6]011204-1-011204-6}:(1)建立二维

* 20140108 收到初稿, 20140212 收到修改稿。中国工程物理研究院科学技术基金项目(11302211)

**郭历伦,男,1979年月生,博士研究生,副研究员,中物院总体工程研究所,主要从事计算力学和冲击动力学研究。

截面模型,绕轴旋转同时拉伸生成螺纹部分的整体几何模型,这类方法为了避免网格的奇异性,通常在截面中心位置人为设置一小孔^{[3]524-531[4]947-952}; (2)与方法 1 类似,通过旋转与拉伸单独生成螺纹几何模型,再将螺纹附着于实体圆杆上,这种方法无需设置小孔,但需处理螺纹和圆杆界面处的网格匹配问题^{[5]274-281}; (3)先建立螺纹段与螺旋轴相垂直横截面的数学模型,再将横截面绕轴旋转和平移生成螺纹段的几何模型^{[6]011204-1-011204-6}。该方法能获得比较理想的网格模型,但由于横截面几何形状比较复杂,需要进行复杂的区域划分和数学计算,在商用软件中不易实施。

本文基于前处理软件 Patran 2010,通过建立螺旋线和平面单元,采用双导线方法建立螺纹连接的有限元模型。该方法与方法 2 建模思路相似,但通过在螺纹和圆杆之间设置过渡层,解决了螺纹和圆杆界面处的网格匹配问题。与文献中已有的建模方法相比,该方法更为简单易实施,所形成模型均为标准的理想单元,无需对模型人为设置小孔或建立复杂的截面数学模型。

1 螺纹连接的有限元建模方法

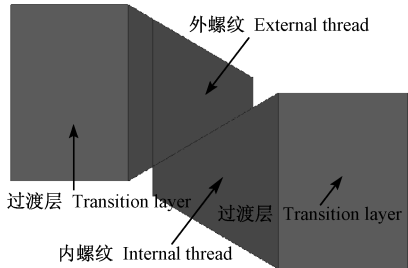
MSC/Patran 最早由美国宇航局(NASA)倡导开发的,是工业领域最著名的并行框架式有限元前后处理及分析系统,其开放式、多功能的体系结构可将工程设计、工程分析、结果评估、用户化身和交互图形界面集于一身,构成一个完整 CAE 集成环境。

本文主要利用 Patran 2010 灵活方便的有限元建模功能,建立螺纹连接的几何模型。首先建立螺纹连接截面的平面单元,如图 1a 所示,包括外螺纹、外螺纹过渡层、内螺纹和内螺纹过渡层,将以上平面单元绕螺旋线旋转生成规则的三维六面体单元;然后建立螺杆和螺母常规区域的网格,最后通过节点编辑和合并方法,将螺纹过渡层节点和整个结构连接起来形成结构的整体模型。具体步骤如下:

(1)沿螺栓轴线作长度为一个螺距的线段,并将该线段四等分;在垂直于轴线的平面内,以轴线与平面的交点为圆心,以螺牙大径和小径的一半分别为半径,分别作两个圆,每个圆均各分别作成四个四分之一圆弧;采用 Curve 的 Transform 动作的 VSum 方法,生成一个螺距内的两条螺旋线。

(2)建立外螺纹、外螺纹过渡层、内螺纹和内螺纹过渡层的四边形平面单元,如图 1 所示。采用双导线法,即 Element 的 Sweep 动作的 Glide-Guide 方法,将平面单元绕两条螺旋线旋转生成一个螺距内螺纹连接的三维网格,并将外螺纹、外螺纹过渡层、内螺纹、内螺纹过渡层分别存于不同的单元组。

(3)生成螺纹连接一个螺距内常规层的网格模型,通过节点编辑和节点等价的方法,将螺纹过渡层节点和常规层连接起来。采用 Element 的 Transform 动作的 Translate 方法,移动复制网格生成任意多螺距长度的螺纹连接。图 2a 为所生成的内外螺纹及过渡层三维模型,图 2b 为外螺纹及杆的三维模型,均为规则的六面体单元。



(a) 内外螺纹及过渡层平面单元
(a) Plane element of external thread and ransition layer



(b) 外螺纹一个螺距内的三维网格
(b) 3D element of external thread in one pitch

图 1 螺纹截面的平面单元
Fig. 1 Plane element of screw thread section

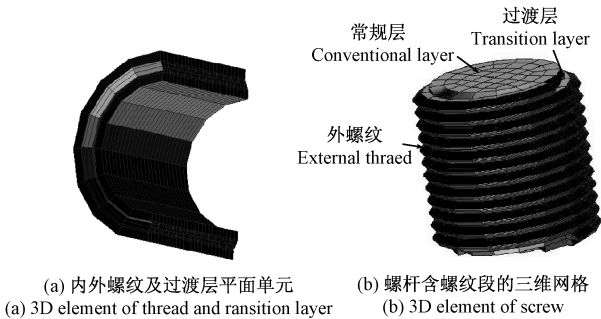


图 2 螺纹连接的三维网格模型
Fig. 2 3D element model of threaded bolt

(4)定义螺纹接触面。为了定义接触面,在整个结构有限元模型完成后,需对每个外螺纹和内螺纹单元组的节点和单元重新单独编号(Renumber),使组成螺纹接触面的所有单元的面号可以连续地引用。比如:外螺纹一个接触面为8 100:9 244:6. 2,即该接触面为单元号为8 100 到 9 244,间隔为 6 的所有单元的 2 号面所拼接而成。

以上为螺纹连接建模的主要步骤,通过上述简单步骤,可以获得几何构型完整无小孔、螺纹层与常规层界面网格匹配的规则理想网格模型。

2 算例及结果分析

2.1 含螺栓结构预紧力状态实验模型

实验模型为一口型长方体和连接螺栓所组成的结构,如图 3。口型长方体的上、下底面之间的距离为 200 mm,上、下底分别是边长为 160 mm,厚为 30 mm 的方板,并在 4 个角点处分别由长度为 140 mm,横截面边长为 35 mm 的 4 根立柱支撑,上、底板开有一直径为 22 mm 的孔,下底板开有一直径为 50 mm 到 22 mm 的阶梯孔,阶梯深度为 12 mm,在阶梯界面处均布 4 个 M6 的螺孔。口型长方体是由整块钢件机械加工而成。螺杆的长度为 225 mm,直径为 20 mm;螺距为 1.5 mm,螺纹长度为 65 mm。螺杆的一端带有一厚度为 12 mm,直径为 50 mm 且均布 4 个直径为 11 mm 到 7 mm 的阶梯螺孔的圆板,阶梯深度为 7 mm。螺母的高度为 22 mm,外径为 32 mm,内孔为 M20 $\times$ 1.5 的螺孔。装配时,把螺杆插入口型长方体的上、下板中,用 4 个 M6 的螺栓把螺杆上的圆板与下底板平直地连接在一起,装上螺母按实验技术要求拧紧。在螺杆中部沿周向均匀对称地贴四片轴向应变片,以测试实验时的轴向应变。

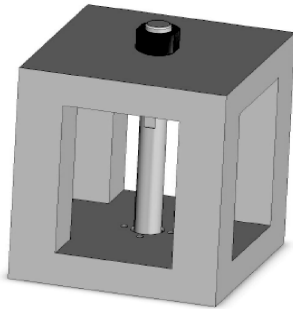


图 3 含螺纹连接结构的实验模型

Fig. 3 Exprement structure of threaded bolt

开展了上述结构预紧力状态力学响应的实验研究:把结构轻夹在台钳上,使其不晃动,采用测力扳手,依次对螺栓进行加载,预紧力从 10 N·m 加到 70 N·m,级差为 10 N·m,测试杆中的应变响应。

2.2 实验结构的有限元建模

采用前述方法建立了该结构的螺纹连接和整个结构的有限元模型,如图 4 所示,共 12 304 个六面体单元,计算中采用材料弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3。其中,为模拟测力扳手的真实加载情形,在六角螺栓的一组对立面加均布力,而非采用商用软件通常的预紧力模拟方式。将螺杆螺纹段与不含螺纹段的光

杆直接相连,以模拟真实螺纹车削后所留下的退刀槽。

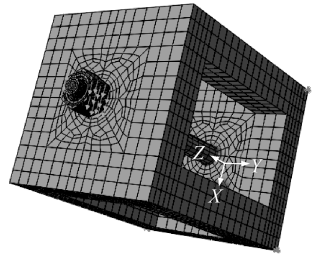


图 4 含螺栓结构的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of threaded bolt

2.3 计算结果及分析

采用有限元软件 Abaqus 对上述模型,预紧力从 10 N·m 到 70 N·m 的七种工况分别进行了计算分析。

图 5 为预紧力为 10 N·m 时,外螺纹和内螺纹的 von Mises 应力云图,沿纸面向外为螺纹根部,可以清楚地看到,螺纹上的应力主要集中在前几圈上,这与文献[3]⁵²⁴⁻⁵³¹结果是一致的。

整个模型的最大应力出现在螺杆的螺纹退刀槽处,即螺纹段与螺纹段的连接处,如图 6 所示。这说明如果预紧力载荷足够大时,螺杆上螺纹段与非螺纹段界面处将先于其它部分发生断裂。

对计算所得的螺杆中部轴向正应力与实验结果进行了比较,表 1 为实验中不同预紧力下螺杆中部四个轴向应变片所测得的应变,以及所获得的平均应变和平均应力。图 7 为计算所得的杆中部轴向应力与实验结果的比较,可以看出计算结果与实验值很接近。

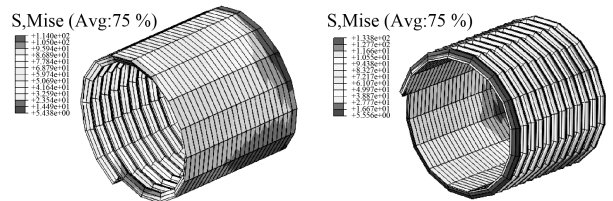


图 5 预紧力状态下内外螺纹的 von Mises 应力云图

Fig. 5 Distribution of equivalent stress in the joint subjected to pretension

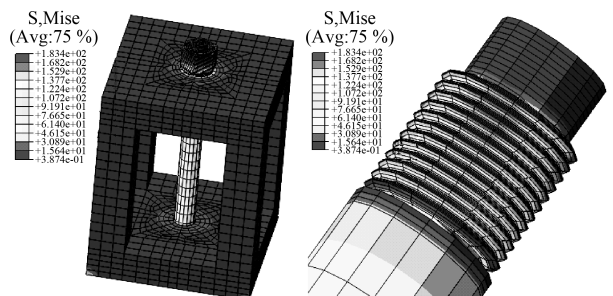


图 6 结构整体及螺栓应力云图

Fig. 6 Distribution of equivalent stress in the bar and the whole model

表 1 计算值与实验值的比较

Tab.1 Comparison of calculation results and experiment

预紧力 Pretention/ (N·m)	应变片 1 Strain gauge one/ $\mu\epsilon$	应变片 2 Strain gauge two/ $\mu\epsilon$	应变片 3 Strain gauge three/ $\mu\epsilon$	应变片 4 Strain gauge four/ $\mu\epsilon$	平均值 Average value/ $\mu\epsilon$	平均应力 Average stress/MPa	计算值 Caculated stress/MPa	相对误差 Relative error/%
10	46	39	35	40	40.0	8.4	8.14	3.1
20	57	63	84	77	70.3	14.8	14.45	2.4
30	80	90	115	101	96.5	20.3	20.41	0.5
40	103	120	155	132	127.5	26.8	27.31	1.9
50	145	160	191	168	166.0	34.9	33.23	4.8
60	180	205	242	211	209.5	44.0	43.61	0.9
70	210	240	284	246	245.0	51.7	51.3	0.8

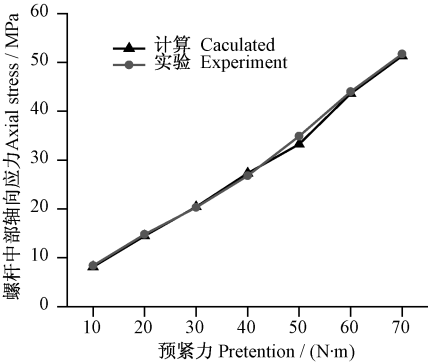


图 7 计算值与实验值的比较

Fig.7 Comparison of calculation results and experiment

3 结论

本文提出了一种基于 Patran 软件的螺纹连接双导线建模方法,该方法能建立螺纹连接的精细有限元模型,可用于工程结构中重要位置螺纹结构的建模。与文献中已有的建模方法相比,该方法更简单易实施,所形成的模型均为标准的理想单元。采用该方法对含螺纹连接结构在预紧力状态下的静力学响应进行了计算分析,结果表明:

1)螺纹上的应力主要分布在前几圈螺纹上,整个结构的最大应力出现在螺杆螺纹段与非螺纹段的界面连接处,与文献中的结果一致;

2)在预紧力 10 N·M 到 70 N·M 的七种工况下,计算所获得螺杆上的应力与实验结果相比,最小相对误差为 0.5%,最大相对误差为 4.8%,两者吻合较好,验

证了该螺纹连接建模方法的有效性。

参考文献 (References)

[1] 徐 灏. 机械设计手册(第 3 卷) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 21-45 - 21-53.
XU Hao. Handbook of mechanical engineering (the third volume) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995: 21-45-21-53 (In Chinese).

[2] 彭文生, 黄华梁, 王均荣, 等. 机械设计[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996: 82-95.
PENG WenSheng, HUANG HuaLiang, WANG JunRong, et al. Mechanical design [M]. Wuhan: Press of the Science and Technology University of Central China, 1996: 82-95 (In Chinese).

[3] 尹益辉, 余绍蓉. 螺纹啮合螺纹段的轴力、等效应力分布及摩擦的影响分析[J]. 机械强度, 2006, 28(4): 524-531.
YIN YiHui, YU ShaoRong. Analysis of distributions of and frictional effect on axial force and equivalent stress in a threaded bolt [J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28 (4): 524-531 (In Chinese).

[4] 尹益辉, 余绍蓉. 基于 3D 有限元模型的螺栓接头变形—内力关系及在设计中的应用[J]. 机械强度, 2008, 30(6): 947-952.
YIN YiHui, YU ShaoRong. Relations between internal forces and deformation of a bolt joint with their application to design based on 3D FEM simulation[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30 (6): 947-952 (In Chinese).

[5] Zadoks, R. I. Kokatam, D. P. R. . Threaa-Dimensional Finite Element Model of a Threaded Connection [J]. Comput. Model. Simul. Eng. , 1999, 4(4): 274-281.

[6] Toshimichi Fukuoka, Masataka Nomura. Proposition of Helical Thread Modeling With Accurate Geometry and Finite Element Analysis[J]. ASME J. Pressure Vessel Technol. 2008, 130(1): 011204-1 - 011204-6