可拆卸分段式桩腿强度计算分析

洪丹

（上海振华重工（集团）股份有限公司　上海　200125）

摘要：某自升式工程施工平台，四个桩腿承受各种巨大的载荷，桩腿的可靠性保证了平台的正常工作。为了分析桩腿的结构强度，采用有限元分析方法，对桩腿进行屈曲分析判定其稳定性，然后对分段式桩腿连接处的螺栓力进行分析和校核，该连接处螺栓的受力是桩腿安全可靠工作的重要保障。本文的计算分析方法可为可拆卸分段式桩腿的设计提供参考作用。

关键词：有限元；分段式桩腿；稳定性；高强度螺栓；载荷

0　引言

桩腿是自升式移动平台的关键结构之一，在海洋工况中，桩腿一方面需要承受平台主体及甲板货物重力以及受风、浪、流载荷的影响，这些因素会引起桩腿的疲劳破坏；另一方面桩腿自身尺寸及安装精度直接决定平台能否顺利升降。为满足工作水深及作业环境的要求，桩腿的设计尺寸通常较长，连续焊接。然而，在某些特殊工况作业下的平台，在远洋拖航或迁移中由于重心过高导致稳性性不足，或由于桩腿过长无法通过桥梁，或在靠近机场等有限高要求海域作业，较高的桩腿却成为了障碍 [1]。

为有效解决上述平台对可变桩腿长度的需求，一种新型的可拆卸分段式桩腿连接形式应运而生，即桩腿由两段或多段组合而成，中间通过法兰及螺栓组连接。平台在有作业限制区域可将过长的桩腿拆下来，在较深水域的时候再把桩腿接上去。此连接形式对桩腿的灵活性和经济性都有较大的提高，但对桩腿分段处的强度提出了更高的要求。本文通过对桩腿三维建模，采用有限元对桩腿及分段处局部结构连接螺栓进行受力分析和校核 [2]。

1　桩腿载荷分析

1.1　工程概况

以一艘新建自升式碎石铺设整平船为目标进行计算分析。船为钢质非自航自升式工程用平台，主要用于深中通道沉管的碎石垫层铺设整平工作。本船设有 4 根圆筒形桩腿，桩腿结构为外径 3200mm 的钢管，外焊接两条背对背安装的齿条，无桩靴。桩腿总长度 75m，可在最大水深 35m 处实现插桩作业。为满足作业海域附近机场水面以上 35m 限高的要求，每个桩腿顶部都设一节可拆卸段，顶部可拆卸段桩腿长度为 5m。可拆卸段采用 EQ70 高强钢自制法兰对接，法兰上分布 40 组 M64 高强螺栓，通过设定预紧力目标值将上下两段桩腿固定。

1.2　风压载荷

目标船桩腿总长 75m，顶部分段桩腿 5m，直径 3.2m。桩腿站立后，按入泥深度 15m 计算，作业水深 35m，水面气隙 4m，船体受风面积 1835m^2。在最大风速 50m/s 时，根据经验公式得到该风速对应的面压力约为 85.1MPa，代入公式（1）计算得到船体的风载荷约为 1561kN[3]。

$$Ff=p\times S \tag{1}$$

1.3　波浪载荷

作业海域最大流速 (表面流速) 为 4kn ；最大波高为 4.5m，根据经验折算为相应的载荷加载到船体的质心处。

1.4　船体载荷

船体总重量约 7000t，单个桩腿的重量约为 500t。船体的重量通过质心点加载，桩腿的重量通过重力加载。

1.5　其他载荷

桩腿插桩过程中，由于地质、水流等外部环境共同作用下，桩腿入泥后均会有一定的倾斜，所以顶部分段桩腿处也受到由倾斜带来的船体自重分力。倾斜角度通常在 0.5° 以内，此分力较小，对计算结果影响甚微，本文暂不考虑。

50-75 机械工业应用 第05期 2月中 总589期.indd 64　　2023/3/27 13:56:30

2　有限元模型

2.1　网格划分

在进行仿真计算时对分析的次要部件进行简化，采用有限元前处理软件对桩腿进行有限元网格划分，有限元模型如图 1 所示。对连接法兰处进行了细致的网格划分，均采用六面体网格，保证了计算精度。

2.2　边界条件设置

边界条件设置如图 2 所示，对桩腿的入泥深度处的节点进行固定约束。对船体进行简化处理，采用方程约束进行模拟，将最危险工况下齿轮的连接位置处进行耦合，耦合到船体的质心点处，在质心点处进行载荷的加载，包括船体的重力、风载和浪载。

3　桩腿稳定性分析

通过有限元计算得到连接法兰处的等效应力结果如图 3 所示，从图 3 中可以看出局部区域会出现超出材料屈服，整体的应力水平满足强度要求。在加工焊接中需要对应力较大的位置焊缝的等级进行控制，保证焊接的质量 [4]。

根据边界条件设置，计算得到第一阶屈曲模态，如图 4 所示，其中一个桩腿发生整体弯曲，屈曲安全系数为 3.71。其余几个桩腿有类似的屈曲情况，根据经验判断，该安全系数满足桩腿的稳定性要求 [5]。

4　螺栓载荷分析

各螺栓的标号如图 5 所示，连接螺栓的规格为 M64，一周平均分布 40 个螺栓，按照图示顺时针从 1 到 40 进行编号，方

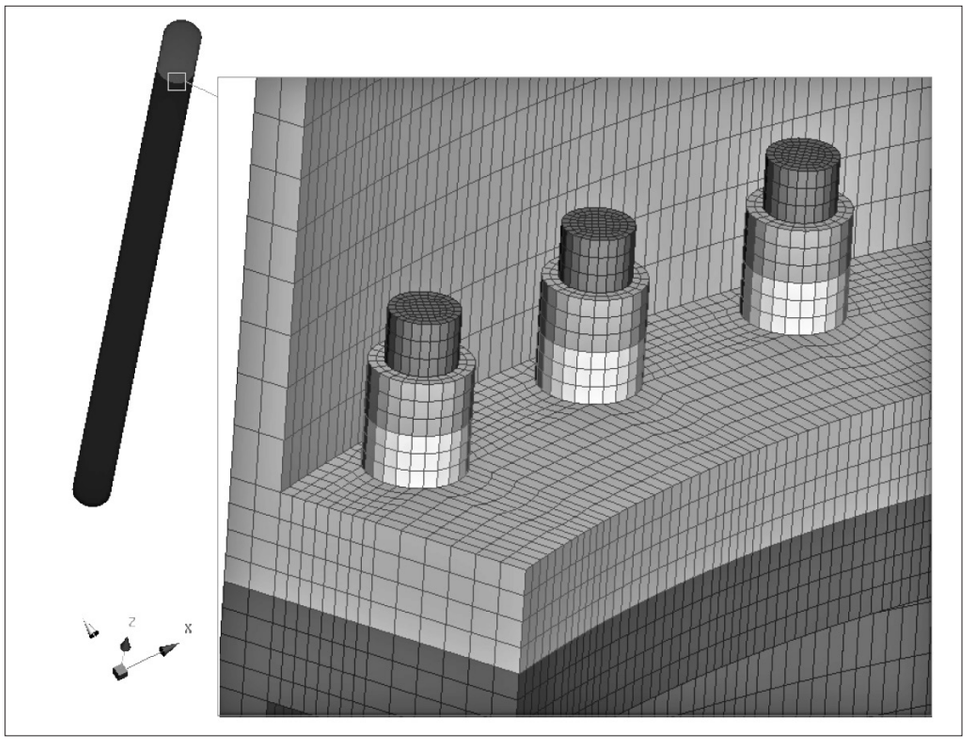


图 1　有限元模型

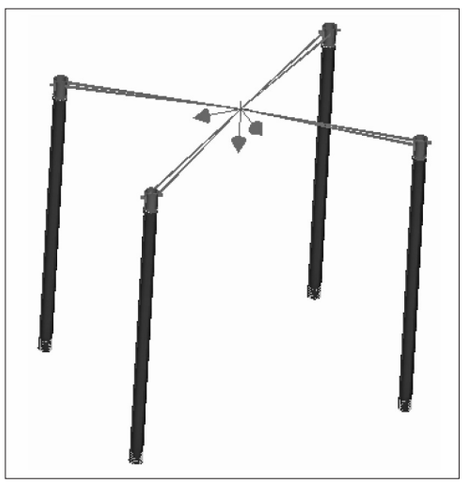


图 2　边界条件

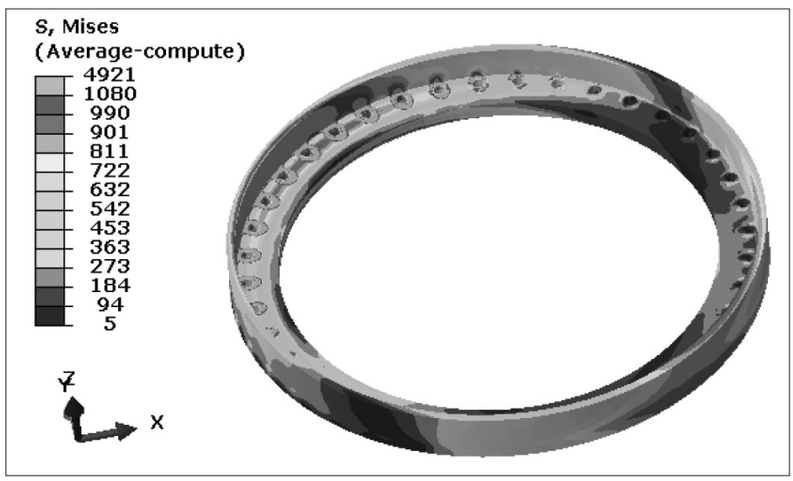


图 3　法兰连接处应力结果

50-75 机械工业应用 第05期 2月中 总589期.indd 65　　2023/3/27 13:56:30

便后续螺栓应力的评价。

经过对 X 及 Y 方向的计算得到切向力合力的载荷如图 6 所示，从图 6 中可以看出，在 345° 附近的螺栓对应的切向力合力最大，与相应的 X 方向和 Y 方向出现较大载荷的区域一致。

计算总的切向力为 2151kN，单个螺栓的预紧力为 1120kN，接触面的摩擦系数取 0.15，计算出总的螺栓所产生的静摩擦力为 13440kN，可见上下桩腿法兰连接面处不会出现滑移。

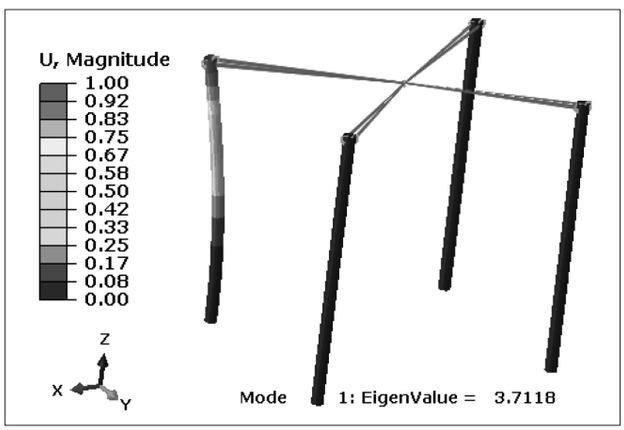


图 4　一阶屈曲分析结果

经过计算得到 Z 方向的载荷如图 7 所示，从图 7 中可以看出，在 150° ~ 300° 区域的螺栓出现较大的载荷，整体出现一边偏的区域。这主要与整体受到的弯矩有关，一边螺栓会出现较大的拉应力。最大 Z 方向的载荷为 2680kN。

根据 GB/T 16823.1-1997《螺纹紧固件应力截面积和承载面积》，查询螺栓的应力截面计算方法如式（2）所示：

$$A_S = \frac{\pi}{4}\left(\frac{d_2+d_3}{2}\right)^2 \tag{2}$$

可以在标准中直接进行查询 M64 螺栓螺纹的有效应力截面积，为 2680mm^2。针对计算得到的螺栓最大外部拉力的校核，需要对螺栓进行弹性极限的校核，通过公式（3）进行计算。

$$\frac{F}{A_S} = \frac{\sigma_{by}-\sigma_{bp}}{kk'\gamma_b} \tag{3}$$

式中：σ_{by} －螺栓的屈服强度；

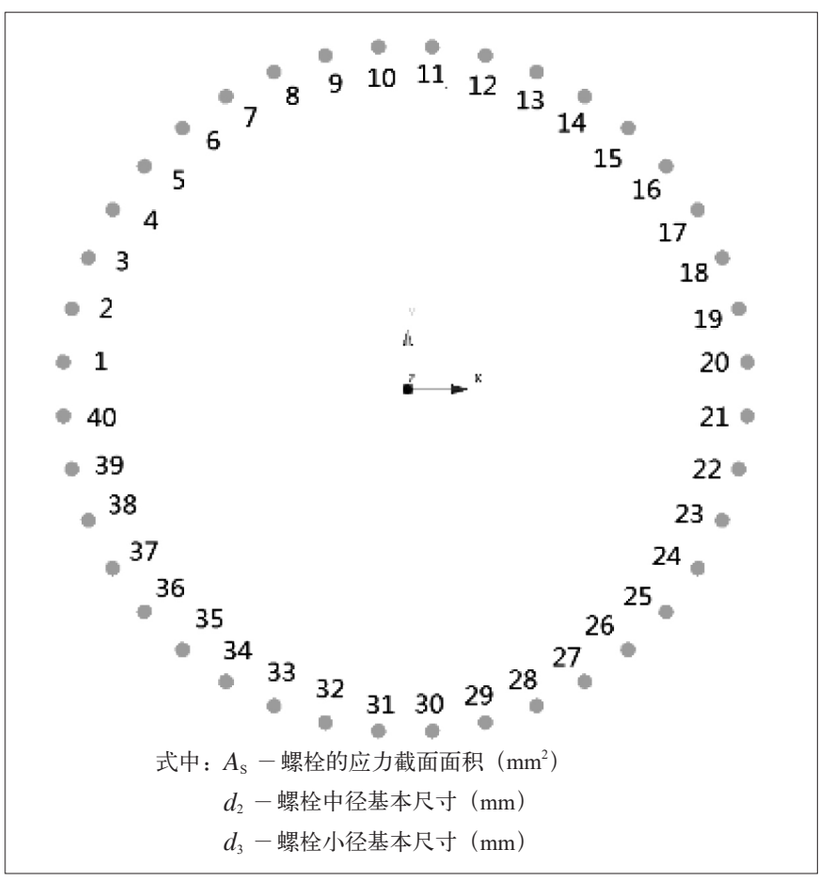
σ_{bp} －为螺栓的拉应力；

k －连接法兰面的表面情况；

k' －与弹性极限的安全度相对应；

r_b －载荷分配系数。

通过计算分析可以判断法兰的连接面不会发生分离 [6]。



式中：A_S －螺栓的应力截面面积（mm^2）

d_2 －螺栓中径基本尺寸（mm）

d_3 －螺栓小径基本尺寸（mm）

图 5　螺栓的标号

5　结语

通过采用有限元方法对桩腿进行稳定性屈曲分析和各种载荷下的螺栓载荷分析，并进行校核，得到以下结论：

（1）桩腿的屈曲安全系数为 3.7，桩腿结构在工作中不会发生失稳；

（2）有限元计算得到各自螺栓的水平方向载荷，通过数据处理可以判断危险处的螺栓受力情况，并评判连接法兰面不会发生剪切滑移；

（3）通过对连接螺栓进行弹性极限校核，判断连接螺栓竖直方向的拉力不会导致连接法兰面分离；

（4）有限元计算方法能准确得到桩腿连接法兰面的各螺栓具体受力及

50-75 机械工业应用 第05期 2月中 总589期.indd 66　　2023/3/27 13:56:30

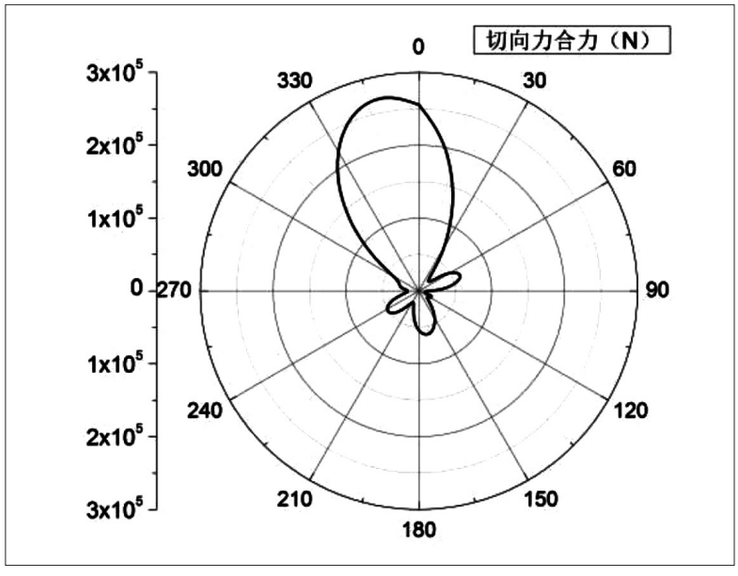


图 6　螺栓切向力载荷

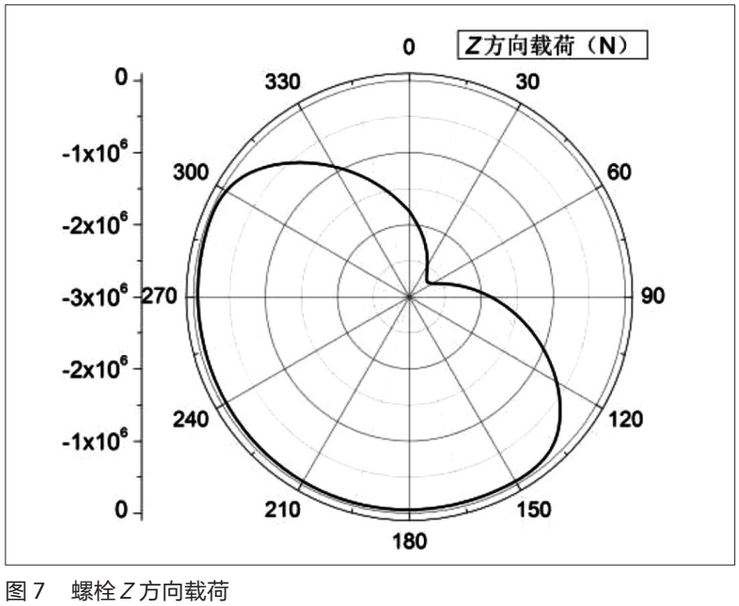


图 7　螺栓 Z 方向载荷

应力情况，为连接螺栓的优化设计提供较好的参考作用。

参考文献：

[1] 张蔚．自升式移动平台圆柱型桩腿建造检验要点 [J]. 江苏船舶 , 2018, 35(06) : 38-41.

[2] 吴凯强，李英，杨树耕，等．自升式平台圆柱式桩腿拖曳力系数数值模拟 [J]. 中国海洋平台 , 2018, 33(06) : 45-51.

[3] 李英，吴子昂，程阳，等．自升式平台圆柱式桩腿水动力载荷试验 [J]. 中国海洋平台 , 2018, 33(04) : 45-50+65.

[4] 石理国，王承先．自升式钻井船圆柱桩腿强度研究 [J]. 中国造船 , 1984(03) : 35-45.

[5] 张泽，李卫华，陈裴，等．自升式平台圆柱桩腿与桩靴相交处的简化疲劳分析 [J]. 船舶设计通讯 , 2017(01) : 62-67.

[6] 姜树卫，任俊星，金志祥．拼接式圆柱桩腿法兰连接螺栓的校核 [J]. 船舶标准化与质量 , 2017(02) : 42-44+38.

50-75 机械工业应用 第05期 2月中 总589期.indd 67　2023/3/27 13:56:30