

基于 ABAQUS 的升船机卧倒门支铰座连接螺栓节点应力分析

景慧 俞歌 路卫兵
(中国长江三峡集团有限公司 湖北 宜昌 443133)

摘要: 钢结构节点构件间的衔接部位容易出现应力集中现象。为研究升船机卧倒门支铰座螺栓连接节点力学性能和受力状态,采用 ABAQUS 有限元软件对升船机下沉式平板门和卧倒门的组合结构进行建模,研究支铰座螺栓连接节点在设计工况、无水工况以及有水工况下的应力应变情况,研究其在整体结构中的承载能力,也为进一步研究卧倒门支铰座螺栓连接的应力特性及安全可靠性,提供有效的数据支持和理论支撑。

关键词: 升船机;卧倒门;螺栓节点;应力集中

0 引言

传统的结构计算方法主要是将各个构件单独计算,没有考虑各构件之间的影响,得到的计算结果跟实际工程的受力情况有一定的偏差。有限元法能够较好地处理各个构件之间的作用、相互影响。有限元分析常常作为试验的有力补充,并且计算结果能够保证相当的精度。因此,使用有限元法将相关构件作为一个计算整体,建立三维有限元模型,分析节点结构的应力和位移分布情况,能够为结构计算提供科学的理论依据,同时能够在结构的安全、稳定性等方面起到重要的数据支持。

1 工程概况

升船机是通航建筑物的一种主要形式,以承船厢作为载体,载运船舶过坝。某升船机卧倒式平板门支铰座的连接螺栓先后发生松动断裂问题,采取更换高强度螺栓、结构局部加强的处理措施后,已恢复正常工作状态。鉴于升船机卧倒门启闭频繁、运行条件复杂,需对影响升船机正常运行的安全隐患展开深入研究。项目以升船机下沉式平板门和卧倒门的组合结构为分析对象,用 ABAQUS 有限元软件建立三维有限元模型,并取螺栓连接节点进行分析,重点研究船厢与闸首对接工况下,现有卧倒门支铰座螺栓连接的受力情况。考虑到承船厢在出入水与对接过程中,箱内水体运动产生的作用对船厢安全运行有着重要的影响,因此具体为在设计工况、无水工况以及有水工况下,卧倒门启闭过程中不同位置下,卧倒门支铰座螺栓连接重点部位的应力应变情况。

2 节点分析

2.1 模型及其力学参数

节点模型如图 1 所示,有限元分析模型包括:下沉式平板门门叶结构、卧倒门

门叶结构、卧倒门支铰座、油缸铰头和活塞杆、油缸吊头支铰座、连接螺栓、剪力块等。卧倒门支铰座连接螺栓采用的是 10.9 级材质高强螺栓,拧紧力矩为 2.4kNm,卧倒门支铰座为铸锻件材料 ZG310-570,容许应力 135MPa,屈服强度 310MPa。钢材杨氏模量: $E=2.06E5N/mm^2$;泊

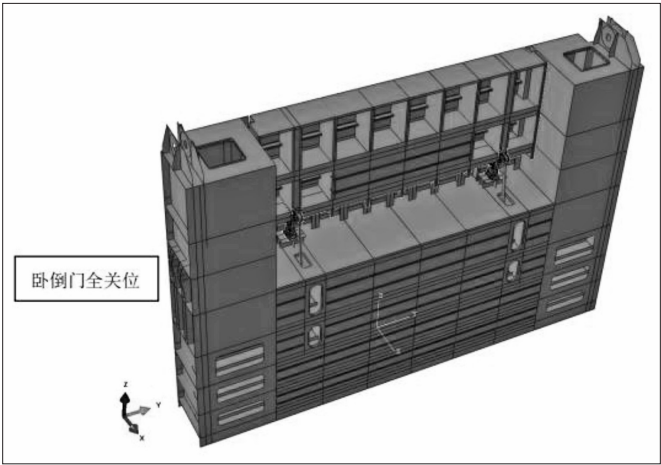


图 1 节点有限元模型

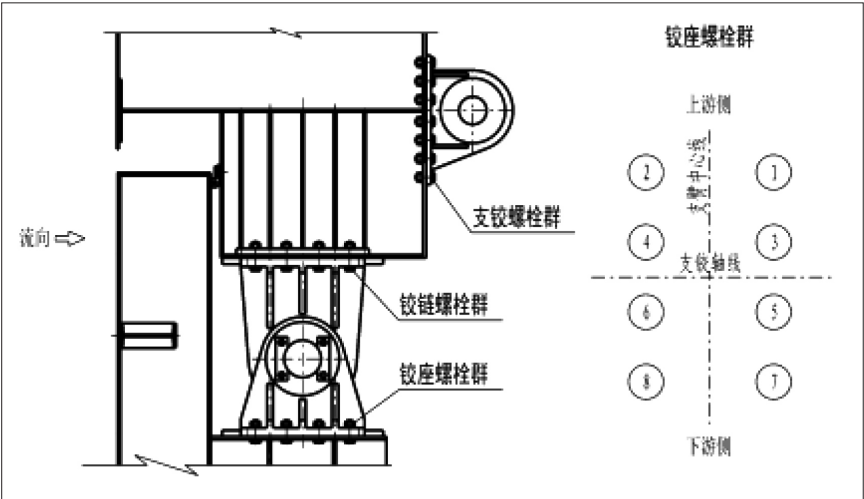


图 2 铰座螺栓群编号

松比： $\mu=0.3$ ；密度： $\rho=7850\text{kg/mm}^3$ 。本构关系和屈服准则：钢材采用双线性模型，在钢材达到屈服点后，材料刚度迅速退化为很小值，以便使程序在模型进入屈服状态后立刻结束计算。破坏准则采用 Von-Mises 屈服准则。分析中为突出节点构造对节点性能的影响，对节点核心区的单元划分进行局部加密。按完全相同排序给卧倒门全部铰座螺栓排序，得到 32 颗螺栓编号，其中①~⑧号螺栓编号如图 2 所示。

2.2 有限元建模计算

对整个节点进行有限元建模，门叶结构采用壳单元模拟，其余结构采用实体单元模拟，对螺栓连接体系采取接触加预紧力方法建模。模型单元总数约为 164604 个，结点总数约为 182875 个。模型各部件之间的相互作用关系分为绑定和接触。

其中，设置绑定关系的部位包括：①铰座、铰链与铰轴；②油缸吊头支铰座、油缸吊头与轴；③剪力块与门叶结构；④螺母与门叶、支铰凸台。

设置接触关系的部位包括：①铰座与下沉式平板门门叶支座；②铰链与卧倒门门叶支座；③油缸吊头支铰座与卧倒门门叶支座；④铰座、铰链、油缸吊头支铰座与剪力块。

模型坐标原点为下沉式平板门上游面板底线中点；X 为水流方向；Y 为垂直水流方向；Z 为竖直方向。

初步选取最不利荷载组合下的内力作为节点的荷载进行分析，其中计算工况采用表 1 中的 5 种情况类型。有水关门过程，在闸门出水后按照间隙水位雍高 0.5m 计算，即全关

表 1 工况类型

工况	荷载组合方式
1	无水工况（自重）
2	有水关门工况（自重 + 水压 0.5m 雍高水头）
3	有水开门工况（自重 + 间隙水位降 0.3m）
4	卧倒门关门终了（自重 + 1100kN 推力）
5	卧倒门开门初始（自重 + 660kN 拉力）

位、开启 18° 时，上游面板施加 0.5m 雍高水头；有水开门过程，在闸门开门的初始阶段，按照间隙水位降 0.3m 计算。计算过程中，在支铰座端部中心外侧建立施力节点。此施力节点与支铰座端面上的节点用刚性梁单元连接。对施力节点施加螺栓杆所受的轴向外拉

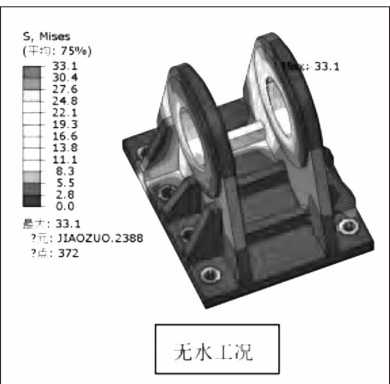


图 3 工况 1 节点应力（单位：MPa）

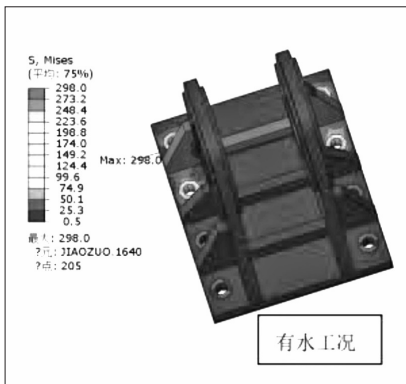


图 4 工况 4 节点应力（单位：MPa）

力。通过有限元分析考察螺栓连接节点在 5 种工况下的 Von-Mises 应力分布以及最大变形，以验算节点的承载能力。

3 结果数据分析与复核

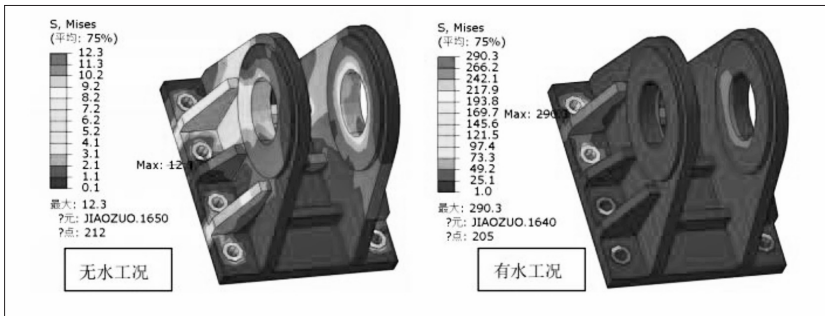


图 5 工况 2 节点应力（单位：MPa）

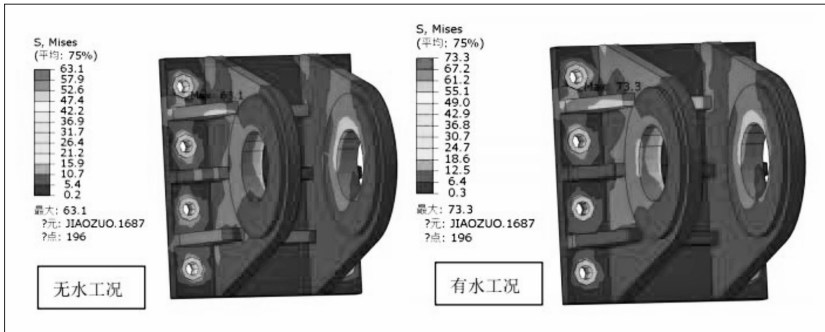


图 6 工况 3 节点应力（单位：MPa）

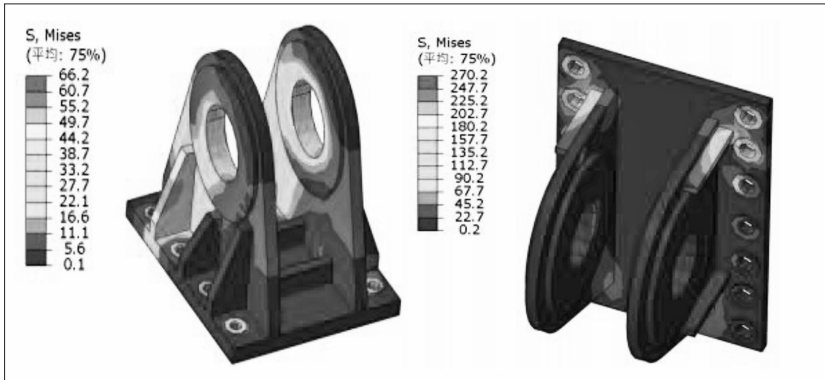


图 7 工况 5 节点应力（单位：MPa）

3.1 有限元结果分析

通过图 3 ~ 7 所示的节点螺栓连接等效应力云图，展示出螺栓连接的受力规律及应力分布情况。计算有水关门工况时，有水关门过程，在闸门关门的最终阶段，按照间隙水位雍高 0.5m 计算。有水开门过程，在闸门开门的初始阶段，按照间隙水位降 0.3m 计算。在五种不同类型工况下，螺栓连接节点域受剪均出现不同程度的屈服，远离螺栓连接节点域应力值较小，证实了螺栓连接是重点软弱区；最大等效应力出现在前排螺栓周边，成为板件最薄弱的环节；综合铰座、铰链、支铰处的应力云图分析发现，五种工况下最不利荷载工况为工况 2 和工况 4，即铰座在有水工况下卧倒门处于旋转 18° 和全关位置时，此时螺栓作用的局部位置应力超过了容许应力，且最大应力值出现在最边缘处螺栓孔壁。

3.2 复核计算分析

选取螺栓杆上的横截面作为轴向荷载提取面，可得到有限元计算所得的各工况下，铰座各连接螺栓的轴向荷载，通过计算，进一步得出设计工况下，铰座连接螺栓可能出现的最大工作载荷（如表 2 所示）。

表 2 连接螺栓最大工作载荷

部位及螺栓编号	最大工作载荷 (kN)	出现工况
铰座 1 号螺栓	196.3	有水工况卧倒门全开位

根据《机械设计手册》，既承受预紧载荷又承受轴向载荷的紧螺栓连接，按紧螺栓所承受最大拉应力计算螺栓静强度，当轴向载荷为变载荷时还需计算螺栓的应力幅。工作载荷不稳定时，残余预紧力系数取 $K=0.6 \sim 1.0$ （取 0.6），螺栓连接相对刚度取 $\lambda=0.2$ ，一般加工表面无润滑时拧紧力矩系数 $K=0.18 \sim 0.21$ （取 0.2）。螺栓工作载荷 F 取表 2 中最大工作荷载，螺栓残余预紧力为 $0.6F$ ，螺栓总荷载为 $1.6F$ 。各部位连接螺栓的总荷载如表 3 所示。

现用 M36-10.9 级连接螺栓的强度，应力计算采用螺栓小径为 31.7mm，将计算结果列于表 4。螺栓最大拉应力均低于屈服强度，静强度满足要求，但静强度安全系数未达到《机械设计手册》要求。铰座和支铰连接螺栓的应力幅依旧超过其许用应力幅（疲劳安全系数小于 1.0），其疲劳强度不满足要求。

4 结语

表 3 连接螺栓最大工作载荷

部位及项目	工作载荷 (kN)	残余预紧力 (kN)	螺栓总载荷 (kN)
铰座	196.3	117.8	314.1

表 4 设计工况下连接螺栓强度计算（单位：MPa）

部位及项目	抗拉强度	屈服比	拉应力	应力幅	疲劳安全系数	静强度安全系数
铰座 M36-10.9	1000	0.9	518	31.1	0.89	1.74

该方案铰座连接螺栓的荷载有限元分析，最不利荷载工况为有水工况下卧倒门全关位置。复核数据表明，铰座螺栓连接的局部位置应力过大现象。各部位 M36-10.9 螺栓最大拉应力均低于屈服强度，静强度满足要求，但静强度安全系数较低，且铰座连接螺栓的应力幅较大（疲劳安全系数小于 1.0），疲劳强度很难满足要求。

该方案仅考虑了设计工况下的不利情况，假定钢材分布均匀，各处的应力应变曲线相同，不考虑钢材轧制对钢材性能的影响，钢材各向同性，并假定焊缝无初始缺陷等。而实际情况可能达不到理论设计水平，疲劳可靠指标较低，失效概率较高，该处结构经过长期运行磨损等，可能会出现螺栓松动甚至断裂失效，还会进一步使其他构件材料出现不可避免的损耗，因此需进一步对节点构件运行时的损伤情况进行分析检测，寻找该处节点实际受力规律，适时进行技术改进，提高安全保障。

参考文献：

[1] 赖东亮,李中华.升船机卧倒门启闭船舶停泊条件三维数值模拟[J].水运工程,2017(10):32-37.

[2] 高福聚,元红.高强螺栓连接抗剪机理探讨与有限元分析[J].工业建筑,2014(增刊).

[3] 钟蕾,罗勇,王庆丰,徐骁.自升式风电安装平台主要构件仿真与分析[J].江苏船舶,2020,37(06):9-12.

[4] 黄映,罗伟.水电站升船机重力式闸门梁柱弯扭应力分析[J].舰船科学技术,2020,42(06):214-216.

[5] 孟斌.轻型钢结构建筑结构构件节点分析与综合评价体系框架初探[D].东南大学,2018.

[6] 杨亚,唐兴荣,唐路尧.钢结构连接板接触面性能的有限元分析[J].常州工学院学报,2020,33(06):32-36.

作者简介：景慧（1981.12-），女，汉族，河南驻马店人，博士，高级工程师，研究方向：材料工程。