

船体结构强度直接计算中惯性释放的应用

张少雄 杨永谦

(武汉理工大学交通学院, 湖北武汉 430063)

摘 要: 介绍惯性释放的功能和原理, 并以某观光潜艇和江海直达推船的全船结构强度直接计算为例, 说明惯性释放功能的应用。

关键词: 惯性释放; 船舶结构强度; 直接计算

中图分类号: U 661. 43

文献标识码: A

文章编号: 1673- 3185(2006) 01- 0058- 04

Application of Inertia Relief in Direct Calculation of Structural Strength for Ships

Zhang Shao-xiong Yang Yong-qian

Abstract Making examples of FE finite element analysis on ship structures of a tourist submarine and a river-to-sea tug this paper discussed about the function and principle of inertia relief as well as the application of it in direct calculation of ship structural strength

Key words inertia relief ship structural strength direct calculation

航行的船舶结构处于“全自由”状态, 但是对它进行有限元静力分析计算时, 不能处理为全自由结构。一般情况下, 有限元静力分析时, 假设结构计算模型中没有机构, 而且不允许有刚体运动(自由应变)模态。如果上述两条中任意一个不成立, 则用常规的有限元方法分析时, 刚度矩阵奇异, 导致求解失败或者得到不正确的结果。

在船舶结构直接计算中, 外载荷(包括波浪压力、砰击载荷、货物压力、晃荡载荷、波浪弯矩、剪力和扭矩等)的计算都依赖于经验公式, 不管是采用全船的计算模型还是采用舱段的计算模型^[1], 目前情况下很难得到一个完全平衡的外载荷力系; 由于船舶结构是一个复杂的空间结构, 直接计算时, 有限元模型中节点数、单元数十分庞大, 载荷计算的累计误差使得寻求一个完全平衡的外载荷力系的工作更加困难。在这种情况下, 施加合理、合适的边界条件变得十分重要, 因为约束点产生的很大的反力严重地影响(改变)了结构的实际受力状态。边界条件对于计算的结果有重大的影响, 而边界条件的确定取决于对结构受力和变形状态的判断以及分析者的经验, 其中人为的因素较多。也许可以认为根据 St Venant 原理, 由于约束点距离我们最关心的部位较远, 对应力分布的计算结果的影响有限, 但是这样得到的

结果毕竟是不甚合理的。

船体结构的变形状态十分复杂。一般而言, 如果结构是以弯曲为主, 在两端中和轴附近的节点施加类似简支的约束比较合理; 而如果结构以扭转变形为主(如斜浪状态下的集装箱船和大开口船舶), 则应该在端面的剪心附近进行约束。众所周知, 中和轴和剪切中心的位置并不重合, 对于大开口船舶两者相去甚远, 所以对于既弯又扭的情况, 是无法进行合理约束的。

1 惯性释放

惯性释放(Inertia Relief)是 MSC NASTRAN 或 ANSYS 中的一个高级应用, 允许对完全无约束的结构进行静力分析。它对于船舶结构强度的有限元直接计算具有很强的实际意义。

如果结构上作用有一个自平衡力系或者作用(如温度载荷或电磁载荷等), 即使完全不受约束的全自由结构, 也会产生应力; 但此时在结构上任意一点进行约束, 得到的反力应该等于 Q 。

对于船舶、飞机以及宇宙飞船等复杂结构, 由于受设计载荷计算方法的限制, 还有数值计算的累计误差等原因, 要得到一个绝对自平衡的力系是极其困难的。但可以通过静、动力平衡的方法构造一个自平衡的力系。设 $\{F\}$ 为所有节点 $(f_x,$

收稿日期: 2005- 10- 11

作者简介: 张少雄(1965-), 男, 博士, 副教授; 研究方向: 船舶结构、计算力学

f_y, f_z, m_x, m_y, m_z) 分量组成的节点外载荷向量; $\{\delta\}$ 为所有节点加速度分量 $(\ddot{u}, \ddot{v}, \ddot{w}, \ddot{\theta}_x, \ddot{\theta}_y, \ddot{\theta}_z)$ 组成的节点加速度向量, 用有限元方法构造的静动力平衡方程为:

$$[F] + [M] \{\delta\} = 0$$

式中 $[M] = \int_{\Omega} \rho [N]^T [N] d\Omega$ 为质量矩阵。

求解上式可得到各节点上为了维持平衡所需的节点加速度, 进而得到各节点的惯性力, 把节点的惯性力作为外力再加到有限元单元的节点上, 则可以构造一个自平衡力系, 计算中不必太强调边界条件的施加。这种方法叫做“惯性释放”。

惯性释放, 简单地就是用结构的惯性(质量)力来平衡外力, 也就是说, 尽管结构没有约束, 分析时仍假设其处于一种“静态”的平衡状态。采用惯性释放功能进行静力分析时, 只需要对一个节点进行 6 个自由度的约束(虚支座), 针对该支座, 程序首先计算在外力作用下每个节点在每个方向上的加速度, 然后将加速度转化为惯性力, 再反向施加到每个节点上, 由此构造一个平衡的力系(支座反力等于 0)。求解得到的位移描述所有节点相对于该支座的相对运动。

如果在船体结构直接计算中引入惯性释放的方法, 去掉支座, 消除约束点的反力对变形和应力状态的影响, 并且使得端面剪力可以施加到计算模型中去, 将有助于我们得到更加合理和符合实际情况的计算结果, 以便对船舶结构的强度进行更加合理的分析与评估。

本文以某观光潜艇和 8 000 t 级一顶一江海直达船队中 30 m 推船的结构强度直接计算为例, 说明惯性释放在船体结构强度直接计算中的应用。

2 观光潜艇惯性释放计算实例

为了说明惯性释放的应用, 比较了某观光潜艇耐压壳结构直接计算中施加边界条件和采用惯性释放的应力计算结果。

如图 1, 某观光潜艇耐压壳体及其观察窗受到均匀外压力作用, 在忽略重力以及水深引起的水压力变化的情况下, 均匀外压力构成一个平衡的力系。

计算中采用了以下两种方法:

- 1) 在首尾两端的肋骨处, 以圆柱壳上的节点建立 MPC(多点约束单元), 在相应的独立点上, 施加自由支持的边界条件;
- 2) 惯性释放, 不施加任何边界条件, 虚支座

取在中间肋骨的最低点。

两种方法得到的耐压壳体板单元形心处中面 V on M ises 应力的分布如图 1 图 2 所示。

比较两者的结果, 耐压壳体上最大应力、应力分布完全相同, 但位移结果不同(因为一个有约束, 另一个没有任何约束)。

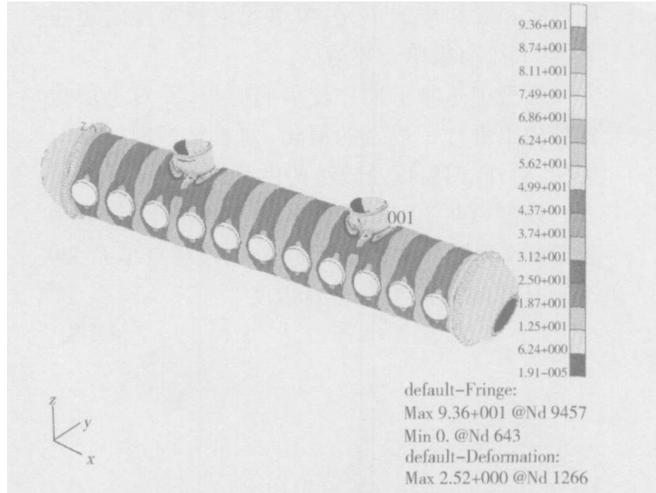


图 1 潜艇有约束条件时耐压壳板单元相当应力结果

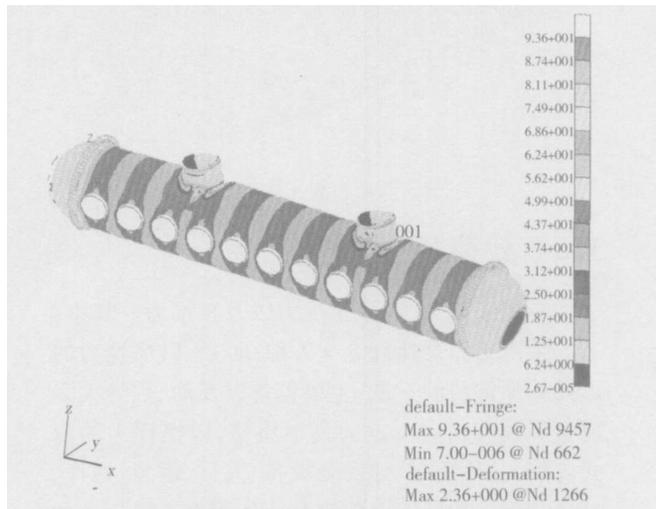


图 2 潜艇惯性释放时耐压壳板单元相当应力结果

3 推船全船结构强度直接计算

3.1 计算模型

取全船范围内的船体结构主要构件建立三维有限元模型进行计算, 计算模型如图 3。

模型中采用了以下几类单元:

- 1) 板壳 (shell) 单元: 模拟船体中外壳板、甲板与各层平台、纵横舱壁、纵桁和实肋板的腹板、上层建筑围壁及内隔壁、套筒等板壳结构(构件), 以及高度大于 250 mm 的扶强材腹板等。板壳单元大多采用四边形单元, 在连接或变化较大处采用少量三角形单元过渡。
- 2) 梁 (beam) 单元: 模拟腹板高度小于 250

mm的骨材,较大扶强材的面板,以及开孔边缘的面板等。梁单元考虑各构件的实际截面和偏心。

3) 质量点 (point) 单元: 模拟各大宗质量。

板单元大小以肋距和纵骨间距为基准,边长比控制在 1:2 以内;板结构上的开孔若小于单元尺寸,予以忽略,若开孔大于单元尺寸则安装其实际形状扣除相应的单元;梁单元依板单元的边建立,其大小与板单元相适应。

模型中忽略了尺寸较小的肘板,并对上层建筑结构也进行了适当的简化,如忽略烟囱、锅炉、舷梯、栏杆、门窗以及较小的内壁板。

模型中共 7 924 个节点、15 738 个单元 (其中板单元 9 318 个,梁单元 5 881 个,质量点单元 539 个),计算时共 45 057 个自由度。

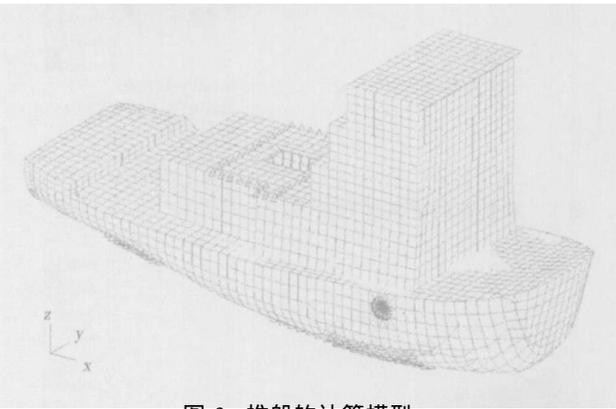


图 3 推船的计算模型

3.2 载荷及边界条件

考虑了重力、舷外水压力以及顶推力。其中:

采用重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$,以惯性力的形式施加钢料的重量;主要设备以及油、水等大宗质量等效为相应节点的集中质量,以惯性力的形式施加;其他质量,如次要设备、人员、舾装、栏杆、舷梯、管线、焊缝等全部简化为作用在主甲板上的均布载荷。

对波浪中拱、中垂状态的吃水曲线进行直接计算,按照波面的形状,用类似于静水压力的形式施加舷外水压力。计算时假定船舶斜置于波浪(坦谷波)上,波长等于船长,波高 4.0 m;按达维道夫曲线进行斜置修正,并对波浪的浮力分布考虑 S_{mih} 修正。

根据模型试验结果回归得到的顶推力载荷系数,可得到三个方向上顶推力的峰值。

模型中,在两侧舷侧外板开孔(套筒)中心处建立独立节点,开孔周边节点与此独立点刚性相关。将顶推力(峰值)以集中力的形式平均作用在两侧的独立点上。

计算模型中不施加任何边界条件(全自由),

仅在船中外底板与中纵桁交点设置虚支座。

3.3 计算工况

考虑推船在静水、中拱波浪和中垂波浪三种舷外水条件,以及自航(无顶推力)和顶推状态(4种组合),计算了表 1 所列的 15 种工况。

表 1 计算工况说明

| | | 静水 | | |
|----|-----|----|-----|------|
| 工况 | 名称 | 重量 | 舷外水 | 顶推力 |
| 1 | s0 | ✓ | 静水 | - |
| 2 | s1 | ✓ | 静水 | 组合 1 |
| 3 | s2 | ✓ | 静水 | 组合 2 |
| 4 | s3 | ✓ | 静水 | 组合 3 |
| 5 | s4 | ✓ | 静水 | 组合 4 |
| 6 | wh0 | ✓ | 中拱 | - |
| 7 | wh1 | ✓ | 中拱 | 组合 1 |
| 8 | wh2 | ✓ | 中拱 | 组合 2 |
| 9 | wh3 | ✓ | 中拱 | 组合 3 |
| 10 | wh4 | ✓ | 中拱 | 组合 4 |
| 11 | ws0 | ✓ | 中垂 | - |
| 12 | ws1 | ✓ | 中垂 | 组合 1 |
| 13 | ws2 | ✓ | 中垂 | 组合 2 |
| 14 | ws3 | ✓ | 中垂 | 组合 3 |
| 15 | ws4 | ✓ | 中垂 | 组合 4 |

3.4 主要计算结果和分析

计算中除了计算时间稍长(因为需要先做一次动力计算)外,求解没有任何困难。所得到的应力结果没有出现类似支座附近应力集中等异常情况,比较合理地反映了推船在全自由状态的应力分布。

图 4 给出了推船在波浪中垂的顶推状态结构相当应力 (V on M ises) 的云图。

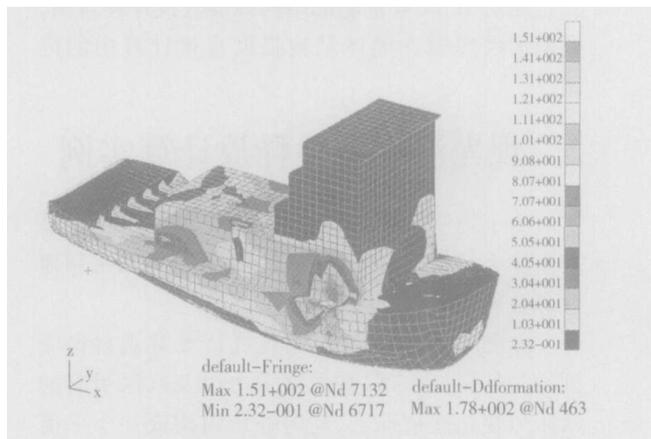


图 4 推船在波浪中垂的顶推状态结构相当应力计算结果(工况 12)

各种构件(组)在所有工况下的最大及最小应力计算结果汇总于表 2 中。

值得一提的是,由于惯性释放求解得到的位移表示的全自由状态下是各节点相对于“虚支座”

表 2 各组所有工况下板单元形心处最大(小)中面应力计算结果汇总 (M Pa)

| 构 件 | Von Mises | | Sx | | Sy | | Txy | |
|---------------------------------------|-----------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 |
| 强框架 | 0.11 | 165.19 | -44.68 | 42.21 | -44.68 | 42.22 | -92.77 | 81.76 |
| 主甲板 | 0.15 | 159.74 | -80.74 | 70.48 | -80.69 | 70.53 | -39.97 | 91.40 |
| 主甲板与上甲板之间的前后壁及侧壁 | 0.10 | 91.81 | -29.62 | 22.20 | -60.81 | 41.56 | -49.78 | 40.13 |
| 顶推装置套筒 | 0.25 | 89.56 | -50.66 | 44.84 | -50.66 | 44.82 | -40.16 | 47.10 |
| 纵中剖面构件 | 0.15 | 85.01 | -71.21 | 17.06 | -75.66 | 34.87 | -40.65 | 38.94 |
| 船底及舷侧板 | 0.05 | 83.00 | -73.15 | 57.48 | -73.23 | 63.52 | -41.61 | 46.67 |
| 上甲板 | 0.11 | 59.84 | -52.79 | 20.90 | -51.03 | 22.35 | -16.73 | 28.39 |
| 主甲板与上甲板之间的内壁 | 0.10 | 51.74 | -49.86 | 29.52 | -50.27 | 29.26 | -21.84 | 24.31 |
| 2 250高平台 Fr34~ Fr49 | 0.24 | 50.59 | -39.37 | 28.77 | -39.41 | 28.78 | -18.92 | 28.06 |
| 距中 3 600纵剖面 | 0.18 | 50.47 | -48.54 | 25.61 | -48.77 | 25.64 | -25.59 | 18.11 |
| 距中 1 800纵剖面 | 0.19 | 48.92 | -29.43 | 33.53 | -29.49 | 33.55 | -26.90 | 22.94 |
| 艏封板 | 0.07 | 48.55 | -37.07 | 22.91 | -37.07 | 22.92 | -27.64 | 24.80 |
| 联结顶推装置的纵舱壁 | 0.12 | 42.20 | -40.36 | 38.23 | -40.29 | 38.21 | -21.15 | 19.39 |
| 横舱壁 (Fr6, 10, 14, 35, 39, 44, 47, 49) | 0.06 | 37.53 | -20.47 | 19.91 | -20.64 | 20.31 | -20.13 | 20.03 |
| 中部轻柴油舱舱顶 | 0.55 | 29.86 | -18.55 | 5.45 | -18.47 | 5.55 | -17.24 | 15.76 |
| 上甲板与起居甲板之间的前后壁及侧壁 | 0.02 | 26.54 | -17.17 | 12.09 | -17.09 | 12.21 | -12.15 | 14.47 |
| 实肋板 | 0.05 | 18.73 | -12.04 | 11.87 | -12.04 | 11.14 | -9.14 | 9.44 |
| 上甲板与起居甲板之间的内壁 | 0.49 | 17.93 | -5.50 | 9.60 | -5.49 | 9.66 | -10.17 | 5.16 |
| 起居甲板与驾驶甲板之间的前后壁及侧壁 | 0.18 | 13.01 | -9.44 | 7.09 | -9.40 | 6.92 | -2.99 | 7.01 |
| 舷侧纵桁 Fr14~ Fr38 | 0.14 | 12.33 | -11.62 | 3.79 | -12.02 | 3.27 | -5.19 | 5.33 |
| 3 000高平台 Fr47~ 首 | 0.12 | 11.75 | -5.17 | 9.94 | -3.94 | 9.93 | -4.87 | 6.57 |
| 驾驶甲板与顶棚甲板之间的围壁 | 0.07 | 9.95 | -6.28 | 8.85 | -6.28 | 8.84 | -4.22 | 4.47 |
| 顶棚甲板 | 0.16 | 9.27 | -7.64 | 3.64 | -7.64 | 3.64 | -4.81 | 4.79 |
| 起居甲板与驾驶甲板之间的内壁 | 0.09 | 8.68 | -2.98 | 2.85 | -2.98 | 2.86 | -5.00 | 2.41 |
| 驾驶甲板 | 0.07 | 7.74 | -2.64 | 2.95 | -2.68 | 2.96 | -1.51 | 4.45 |
| 起居甲板 | 0.04 | 7.55 | -4.47 | 4.36 | -4.57 | 4.35 | -2.53 | 4.27 |

的位移, 因此相对于有约束的情况, 位移的结果偏大, 而且该虚支座选取的位置不同, 所得到的位移结果也不同, 但并不影响应力的计算结果。进行船体结构强度直接计算时我们最关心的是应力的状态, 位移的结果只有参考意义, 况且因为航行中一直随着波浪一起运动, 因此位移的结果是一个没有太大实际意义的量。

4 结 论

在船舶结构强度直接计算分析时, 应用惯性释放功能是可行的, 也是为了更合理地评估结构强度所必需的。

惯性释放可以消除边界条件对应力计算结果的影响, 对于全船有限元分析可以自动地进行调整平衡, 对于弯扭组合作用状态可以避免寻求一个合理的约束条件的工作, 因此有利于得到船舶结构的合理的、符合实际的应力状态, 在船舶结构强度直接计算分析方面有广泛应用前景。

参考文献

- [1] CCS 散货船结构直接计算分析指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003
- [2] 王杰德, 杨永谦. 船体强度与结构设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995
- [3] 张永昌. MSC. Nastran 有限元分析理论基础与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004