

VLCC 液舱晃荡仿真模型

娜日萨¹, 高志龙¹, 金咸定²

(1. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011;

2. 上海交通大学, 上海 200030)

摘要: 分别采用 3D 模型和 2D 模型对 VLCC 液舱进行晃荡仿真, 通过对两个模型的流体流动情况和对应位置压力的比较, 得出短期搜索及长期分析中采用 2D 模型方案进行 VLCC 液舱晃荡仿真分析是可行的结论. 讨论两种模型的计算效率, 认为 2D 模型方案可以大大提高仿真效率, 具有工程实用性.

关键词: 晃荡; VLCC; 模型

中图分类号: U664.36; TP273.5

文献标志码: A

Model for Sloshing Simulation in VLCC Tanks

NA Risa¹, GAO Zhilong¹, JIN Xianding²

(1. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China;

2. Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: The 2D and 3D models for sloshing simulation in VLCC tanks are presented. And their feasibility are validated by comparison fluid flow and pressure values of 2D model and 3D model. The calculation efficiency of 2D and 3D is discussed. The conclusion is made that 2D model strategy is a practical method with higher efficiency.

Key words: sloshing; VLCC; model

0 引言

液舱内液体的晃荡是载液货船(如 VLCC, LPG, LNG)液舱结构设计的一个共性问题. 晃荡是非常复杂的流体运动现象, 它具有很强的非线性和随机性特征. 即使在很小的外部激励作用下也可能发生较激烈的液体晃荡, 而且对液舱周界结构产生很大的冲击载荷, 所以在进行这类液舱结构设计时, 要充分考虑液体晃荡带来的影响.

由于流体自由面非线性的动力学条件, 流体与结构之间的相互耦合作用使得理论分析很难给出问题的解析解; 试验方法不仅要付出昂贵的物力财力代价, 而且由于试验模型与实际液舱尺度上的差别

使得试验结果不能够完全应用于结构设计之中. 因而人们更多地寻求数值计算方法进行液体晃荡特性研究及晃荡冲击载荷计算. 但由于计算机硬件、软件及人力资源的局限, 直接进行整舱流固耦合的液舱晃荡分析和结构强度评估目前还难以实现.

鉴于以上背景, 作者在文献[1]中提出一个具有工程实用意义的液舱晃荡仿真及结构强度评估的解决方案. 该方法以短期搜索、长期分析和耦合分析为流程, 捕捉船体生命期内最严重的晃荡冲击载荷及结构响应, 以此进行的结构设计, 考虑是全面的, 结构是安全的.

本文将对该方法的短期搜索和长期分析的 2D 模型方案作进一步讨论.

收稿日期: 2005-12-19; 修回日期: 2006-01-20

作者简介: 娜日萨(1976-), 女, 黑龙江佳木斯人, 在读博士, 工程师, 研究方向为船舶与海洋结构物设计制造, (E-mail) Lisa.na@163.com

1 短期搜索和长期分析的2D模型方案

VLCC 液舱设计的特点即液舱的形状一般都是矩形舱. 在不同条件下, 液体在矩形舱的运动既可以是三维的, 也可以呈现出二维运动的特点. 这个条件就是液体固有振动周期与外在激励周期的关系. 当矩形舱内的流体纵摇运动周期与横摇运动周期错开 20% 时, 外在激励的周期若接近纵摇周期, 则流体呈现明显的纵摇运动, 横向运动相对纵摇运动很小; 当外在激励周期与液体横摇运动周期接近时, 流体则呈现明显的横摇运动. 但当矩形舱内的流体纵摇运动周期与横摇运动周期比较接近时, 舱内的运动就会是三维的.

这里以一个算例说明采用 2D 模型代替 3D 模型进行液舱晃荡仿真的可行性. 选取 VLCC 2 号中间舱, 分别采用二维模型和三维模型对一工况进行模拟, 比较二者的自由液面流动情况 and 对应位置的壓力值.

1.1 计算模型

该液舱几何尺寸为 $50.94\text{ m} \times 22.1\text{ m} \times 28\text{ m}$. 选择液舱 80% 装满率, 根据经验公式得舱内液体纵摇和横摇固有振动周期分别为 8.60 s 和 5.33 s, 两者相互错开程度大于 20%. 选择一迎浪海况, 船体在该海况中运动周期落在液体纵摇固有周期的 20% 内, 可能发生较大幅值的流体运动.

建立的三维模型如图 1, 模型形状为整个液舱的形状. 其运动边界条件为船体在该工况下的 6 个自由度的运动时间历程; 二维模型见图 2, 在流体的非主要运动方向仅设置一个单元, 这样流体仅在建模平面内运动. 其运动边界条件为船体的纵摇、升沉和纵荡 3 个自由度的运动时间历程.

液舱周壁为刚性; 舱内液体可压缩, 采用减缩体积模量 $K=2.1\text{E}+6\text{ Pa}$; 流体域采用欧拉六面体单元划分, 液舱结构采用拉格朗日四边形单元划分. 流体与结构采用 ALE 耦合. 两者网格密度一致, 单元特征长度约为 1 m. 图 1 和图 2 为建立的 3D 模型和 2D 模型.

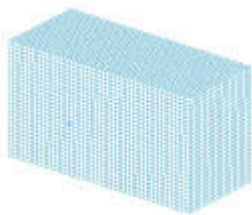


图 1 3D 模型 (纵摇, 80% 装满率)

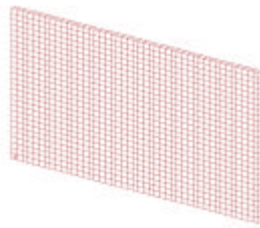


图 2 2D 模型 (纵摇, 80% 装满率)

本文采用 MSC Dytran 作为计算软件.

1.2 结果分析

1.2.1 流动情况比较

仿真结果发现三维模型内流体的运动呈二维运动特点, 运动主要为纵向平面内的运动. 图 3 和图 4 给出两个模型在某次冲顶发生前后时刻的流体运动情况和自由液面的形状及位置, 两者非常相似. 在 184 s 时开始发生冲顶, 184.5 s 达到最大, 然后冲顶完成, 流体回落, 向另一方向运动. 这个现象说明, 当液舱内流体纵向运动和横向运动的固有振动周期相互错开 20% 时, 舱内流体运动呈现二维运动特点, 可以采用相应的二维模型进行晃荡分析.

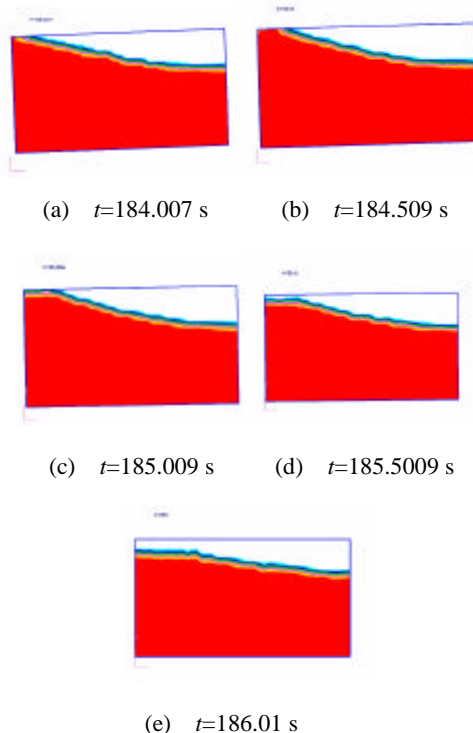
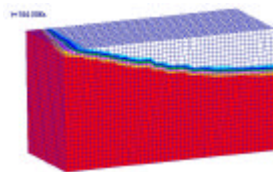


图 3 自由液面流动情况 (2D 模型)



(a) $t=184.006\text{ s}$

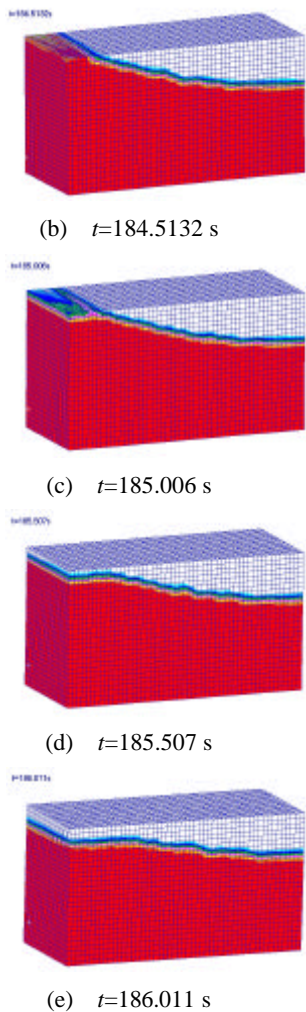


图 4 自由液面流动情况(3D 模型)

1.2.2 两个模型对应位置压力的比较

对两个模型进行 3 个小时的长期分析, 得到各点的压力时历, 经过对压力数据的统计分析, 得到各点最大压力值. 所选的压力点的位置如图 5 和图 6 所示, 在二维模型上选择了 3 个压力点, 即单元 1 260, 1 217 和 1 221. 然后对应二维模型每个压力点, 在三维模型上相同纵向坐标的位置, 选择 3 个压力点, 分别位于三维模型宽度方向上的两侧和中间. 表 1 列出这两个模型压力数据的比较. 其中相对误差项为 $\frac{|P_{3D}-P_{2D}|}{P_{2D}} \times 100\%$. 从表 1 的数据可以看出, 三

维模型角点处的冲击压力比中间部位的压力大一些, 这是由于流体运动到角点处相互挤压造成的; 而二维模型得到的冲击压力最大值与三维模型中间部位的的压力更接近, 两者之间的相对误差不超过 10%, 与角点处冲击压力相差不超过 15%; 二维模型中发生最大冲击压力的单元为 1 221, 与之对应, 在三维模型的相同纵向位置处的 1 383 点也为最大冲击压力发生的位置.

表 1 二维模型与三维模型压力数据的比较
(单元位置参照图 5 和图 6)

单元号/ 3D_model	压力值/ E+05Pa	单元号/ 2D_model	压力值/ E+05Pa	相对 误差/%
1 428	3.05			6.64
15 708	2.9	1260	2.86	1.40
31 416	2.92			2.10
1 379	3.9			12.40
15 659	3.5	1217	3.47	0.86
31 367	3.88			11.80
1 383	4.5			8
15 663	3.9	1221	4.14	5.80
31 371	3.9			5.80

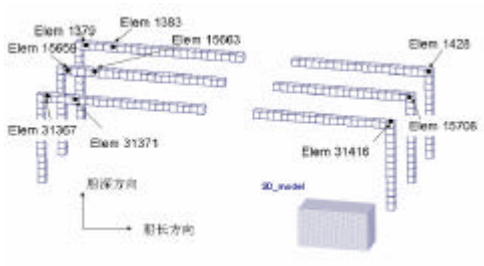


图 5 三维模型中的压力数据点

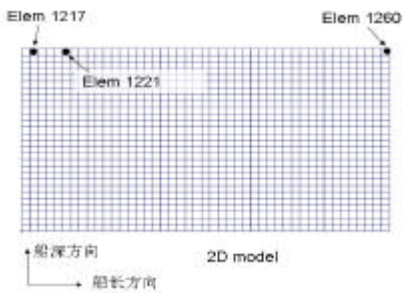


图 6 二维模型中的压力数据点

从二维模型与三维模型的流体流动情况和最大冲击压力数值的比较可以得出, 当舱内流体的纵向运动固有周期与横向运动固有周期相互错开大于 20% 时, 采用二维模型模拟液舱的流体晃荡是可行的.

2 2D 模型方案效率分析

MSC Dytran 中, 晃荡模型仿真的时间消耗主要用于欧拉单元的计算及耦合边界的计算上. 对于单元特征尺寸相同的 3D 模型方案和 2D 模型方案, 其计算时间步长基本一致, 所以对仿真时间为 1 小时的短期搜索模型和 3 小时的长期分析模型, 欧拉单元的数量是影响计算耗时的主要因素.

这里我们以 Pentium 4—3.6 GHz 2 GB 内存的工作站, MSC Dytran 2005 版为计算硬件和软件资

源来讨论方案的资源消耗情况。

2.1 3D 模型的计算效率

采用 3D 模型进行 1 h 的短期分析, 欧拉单元总数约为 30 000 个, 120 个压力时历数据输出点, 耗时约为 18 h;

长期分析的仿真时间为 3 h, 模型与短期分析一致, 同样的压力数据输出, 耗时约为 56 h.

2.2 2D 模型的计算效率

2D 模型中的欧拉单元总数约为 1 400 个, 压力数据输出点为 40 个. 1 h 短期分析耗时约为 1.5 h; 3 h 长期分析耗时约为 4.5 h.

从上面两种方案的耗时分析可知, 进行一个液舱的晃荡分析, 若短期搜索和长期分析模型采用 2D 模型则计算效率要比 3D 模型提高 12 倍. 一般来讲, 一个液舱晃荡分析工况约有 200 个, 如此可见, 采用 2D 模型方案很有工程实用意义.

3 结 论

分别采用 3D 模型和 2D 模型对 VLCC 某一液舱在某一工况下的液舱晃荡进行模拟, 通过对自由液面流动情况及两个模型对于位置压力数据的比较, 得出采用 2D 模型进行液舱晃荡仿真是可行的.

通过 3D 模型和 2D 模型计算效率的比较可以看出, 采用 2D 模型可以大大提高液舱晃荡仿真的效率, 节约仿真分析的耗时具有工程实用意义.

参考文献:

- [1] 娜日萨, 高志龙, 金咸定. VLCC 液舱晃荡仿真及结构强度评估[C]// MSC 中国用户大会 (优秀论文). 2005.11.
- [2] LEE S H, KIM J Y, LEE K J, *et al.* Simulation of 3-D sloshing and structural response in ship's tanks taking account of fluid-structure interaction[J]. SNAME, 1995.
- [3] VALSGARD S, TVEITNES T, PASTOOR W. Gas carriers developments and sloshing load determination for new operations and trades[R]. DNV as Paper Series No. 2003-P014.
- [4] 朱仁庆, 吴有生. 液舱内流体晃荡特性数值研究[J]. 中国造船, 2002, 43 (2).

(编辑 廖粤新)

田 万方数据
WANFANG DATA