

某发电列车车下燃油箱的流固耦合分析

Fluid-solid Coupling Analysis of the Fuel Tank under Certain Generator Train

林鹏

(南车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛, 266111)

摘要: 本文基于双向流固耦合方法, 联合软件 Star-CCM+和 Abaqus, 利用数值分析研究了充油量为 50%的某发电列车车下燃油箱在分别受到不同方向的冲击后, 箱内燃油的晃动情况以及箱体结构的瞬时应力分布情况, 找出了燃油箱中容易出现结构破坏的位置, 并给出了相应改进方案, 为保证燃油箱的强度安全提供了可靠的设计参考。

关键词: 发电列车、燃油箱、流固耦合、Star-CCM+、Abaqus

Abstract: Uniting the software Star-CCM+ and Abaqus, a fuel tank with 50% fuel oil charge under certain generator train, which respectively bore the special impacts of different directions, was studied by using the two-way fluid-solid coupling numerical simulation in this paper. To ensure the strength safety of the tank reliably, sloshing condition of the fuel oil and instantaneous stress distribution of the tank structure were analyzed, and then the corresponding improvement plan was proposed to remedy the vulnerable areas of the tank.

Key words: Generator Train, Fuel Tank, Fluid-solid Coupling, Star-CCM+, Abaqus

1 前言

在铁路飞速发展的今天, 高速动车组的普及率越来越高, 使人们出行更加方便、快速和环保。但受多方面因素的制约, 目前仍有很多地域还没有铺设电气化铁路, 这部分客运列车的空调等电器用电仍要靠发电列车供给。其中, 燃油箱是发电列车不可或缺的设备, 通常以吊挂方式安装在车下底架。列车运行时, 轮轨间将产生强烈的相互作用, 使燃油箱剧烈振动, 箱内燃油产生的惯性晃动冲击会严重影响箱体结构的安全性和可靠性, 因此在设计燃油箱结构强度时充分考虑燃油晃动这一不利因素具有十分重要的意义。

目前, 类似运动罐体液体晃动问题的研究已积累了一定成果, 并且随着计算机硬件水平的快速发展, 越来越多的研究是基于流固耦合数值模拟完成的。刘雪梅^[1]利用数值模拟研究了罐车在刹车过程中罐内液体的晃动问题, 同时研究了液体晃动压力对罐车结构的影响。向韬等^[2]使用有限元软件 Adina 进行了考虑流固耦合效应的油罐车瞬态应力分析, 研究了油罐车在正常行驶、制动和转弯这三个工况下罐车车体及罐内流体的瞬时力学状态。周国发等^[3]使用单向流固耦合方法对罐车在刹车过程

中罐内液体的晃动和罐车应力的分布情况进行模拟。刘小民等^[4]则进一步进行了运动罐体内液体晃动的双向流固耦合数值分析, 获得了采用单向耦合无法获得的罐体结构应力随时间的变化历程。不过, 上述文献研究的晃动加速度均为常数, 且数值较小 (通常小于 1 个重力加速度), 作用时间较长, 而本文所研究的是正弦变化的瞬时大冲击加速度, 并且通过双向流固耦合的动态数值模拟, 获得燃油箱在时间历程中的最大应力分布, 为保证油箱结构的强度安全提供可靠的设计参考。

2 数值模型的建立

流固耦合是仿真业界的热点和难点, 按耦合机理可大体分为两类: 第一类是耦合作用仅仅发生在固液两相交界面上, 如气动或水动弹性等; 第二类则是固体域和流体域部分或全部重叠在一起, 难以明显地分开, 如泥土渗流等^[5]。本文问题属于第一类, 目前常用解决方案是利用 FEM 和 CFD 专业软件各自进行固体域和流体域内单增量步的计算, 然后按指定策略在耦合交界面网格处交换和更新必要数据, 再各自进行新一轮单增量步计算, 如此循环, 直至满足收敛要求。如图 1 所示, V6 版本以上的 Star-CCM+ 已经可以实现与 Abaqus 直接双向流固耦合, 并且耦合交互面网格无需严格匹配, 大大简化了耦合设置过程。

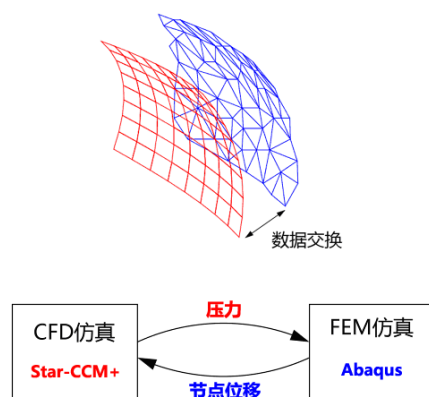


图 1 流固耦合仿真流程示意图

2.1 研究对象与材料参数

该发电列车主要在高寒地带行驶, 因此燃油箱总体采用“外箱+保温材料+内箱”的“三明治”结构, 如图 2 所示, 设计容积约 3200 L。内、外箱体通过加强筋框架连接, 内箱里还设有若干开孔挡板用来控制燃油晃动。箱体顶部大开孔为注油孔, 两侧还分别布有 6 个开孔。本文约定, 所有模型的 x 方向为纵向, y 方向为横向, z 方向为垂向, 且重力方向为负 z 方向。

燃油箱内、外箱体及加强筋框架均由耐候钢 Q355GNHE 制成, 其弹性模量约为 210 GPa, 泊松比为 0.28, 密度为 7800 kg/m³, 屈服强度约为 355 MPa。保温材料为硬

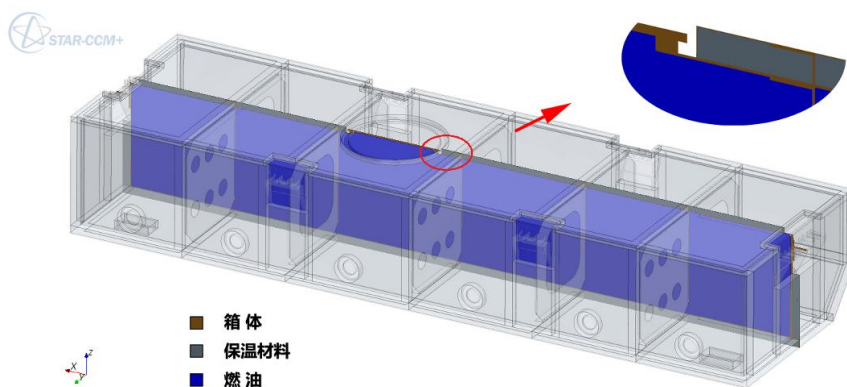


图 2 油箱结构示意图

质聚氨酯泡沫塑料, 其弹性模量比钢材要小三个量级以上, 因此本文将忽略保温材料结构。燃油选

用-20#轻柴油,可保证在-20℃低温时仍不会结蜡,其密度约为 780 kg/m^3 ,动力粘度接近水的3倍,约为 $2.4 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。另外,燃油晃动模拟还需考虑空气,其密度约为 1.18 kg/m^3 ,动力粘度约为 $1.86 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。上述流体工质的材料参数均来自 Star-CCM+。

2.2 网格划分

流体域网格划分。本文选用了 Star-CCM+主推的多面体网格,相对于传统网格类型(如四面体)具有很多优点:(1)拥有相对更多的毗邻单元,计算变量梯度以及预测当地的流动状况时更加准确;

(2)对几何变形敏感度较低,而且智能网格工具同样允许单元自动融合、分裂及增加新拓扑元素;

(3)计算性价比较高,在达到相同计算准确度要求的基础上,多面体网格模型可以提高约3至10倍的计算速度^[6]。最终得到的流体域网格如图3所示。

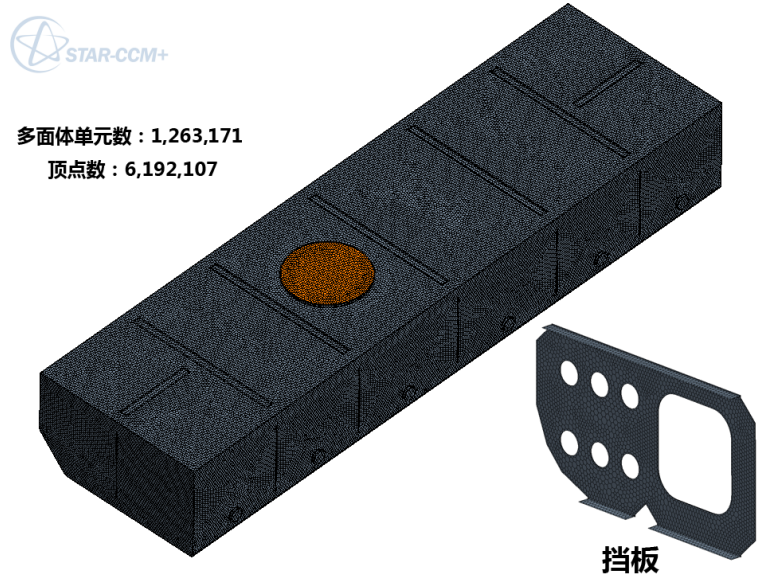


图3 流体域整体及箱内挡板网格图(非原始比例显示)

固体域网格划分。首先,忽略外箱结构,因为外箱钢板的厚度为1 mm,而且均为平板,与2.5 mm厚的加强筋框架相比,其对燃油箱整体刚度的贡献不大。随后,需要抽取加强筋框架的中面,同时剖分余下的内箱、箱盖及吊挂支架等至可映射结构。最后,使用4节点四边形壳单元离散加强筋框架中面,使用8节点六面体实体单元离散箱盖,同时为保证流固耦合数据映射的正确性,使用8节点实体壳单元离散剩余箱体结构。最终得到的固体域网格如图4所示。

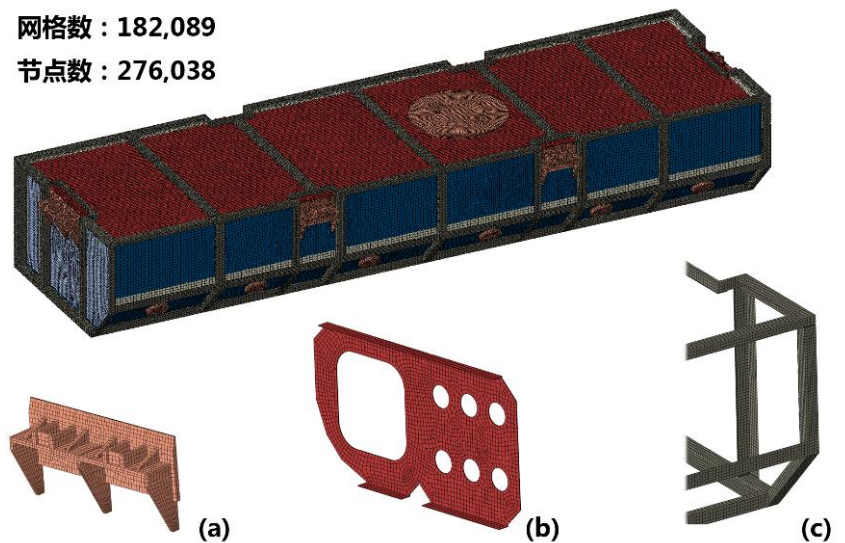


图4 固体域整体及局部结构网格图(非原始比例显示)

(a) 吊挂支架; (b) 箱内挡板; (c) 加强筋框架

2.3 边界条件施加

计算工况：基于标准 TB/T3058-2002《铁路应用 机车车辆设备冲击和振动试验》，本文主要分析在 50% 充油量的情况下，燃油箱箱体分别受纵向峰值 5g、横向峰值 3g 和垂向峰值 3g 时的冲击响应。这三个加速度在冲击后的前 30 ms 内均呈正弦变化，且作用方向均为坐标轴正向，其加载历程详见图 5 所示。模拟每种冲击情况的计算时间为 150 ms。

流体域边界条件：除注油孔面设置为压力出口外，其余面均设置为固定壁面，且全部参与流固耦合数据交换；使用 VOF 模型追踪燃油晃动界面，并通过 Field Function 设置初始液面高度；通过编写动量附加源项设置晃动加速度；打开重力模拟开关。

固体域边界条件：使用“shell to solid coupling”绑定连接加强筋框架与内箱，实现壳单元与实体单元之间的扭矩传递；固定约束各吊挂支架螺栓孔的节点自由度；选出进行流固耦合数据交换的单元面，其组成区域的位置和面积要与流体域固壁面保持一致，否则软件将报错；同样需要打开重力开关，设置重力加速度。

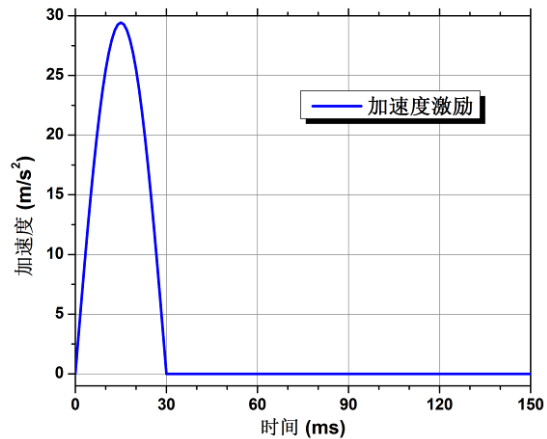


图 5 加速度激励时间历程（横向或垂向）

2.4 计算参数设置

流体域计算参数：视问题为非定常不可压缩流动；采用基于 RANS（雷诺平均法）的 k-ε 模型描述湍流；采用壁面函数法描述近壁面流体行为；不联立求解能量控制方程，将燃油晃动过程视为等温；采用二阶迎风格式离散对流项与扩散项，避免数值假扩散误差；固定迭代时间步长，单步时间增量为 1.5 ms，最大内迭代次数为 30，总迭代时间为 0.15 s；在 Tools 模块中建立 Co-simulation 选项，设置耦合策略为“Star-CCM+ Leads”的顺序耦合，数据交换步长为固定值 1.5 ms。

固体域计算参数：采用隐式直接积分法进行油箱动力响应分析；固定迭代时间步长，单步时间增量与总迭代时间均与流体域相同；添加关

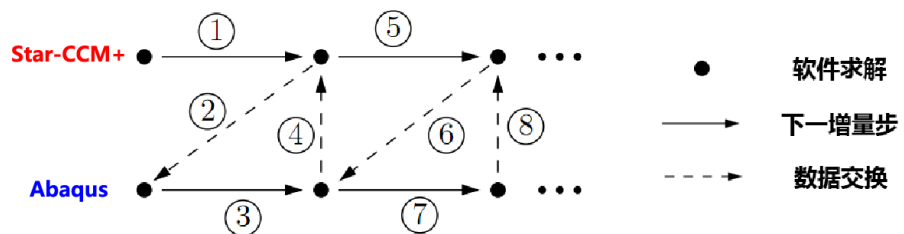


图 6 流固耦合数据流动示意图

关键词 *Co-simulation 及 *Co-simulation Control，将后者中的耦合策略设置成与流体域匹配的 Gauss-Seidel 耦合，数据交换步长同样为固定值 1.5 ms。本文流固耦合的数据流动情况示意图如图 6 所示。

3 计算结果分析

如非特殊说明，以下各应力云图中的应力单位均为 MPa，结构变形放大倍数均为 200。

3.1 静态情况

此时没有发生任何晃动，燃油箱仅受燃油重力作用，如图 7 所示，应力集中区位于挡板与内箱底板的连接区域，应力极值大小约为 15.3 MPa，箱体结构的整体变形很小。

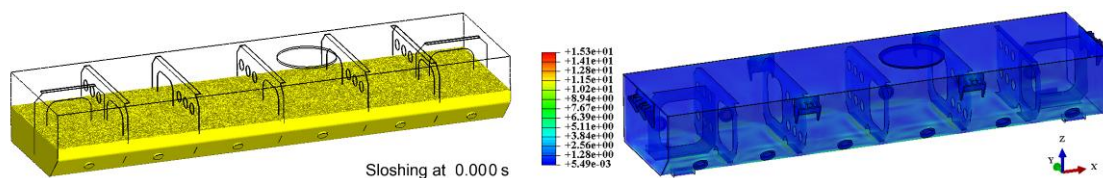


图 7 无晃动时，燃油液面状态（左）及结构应力分布云图

3.2 纵向 x 轴正向冲击

该工况中，燃油箱箱体受峰值为 5g 的 x 轴正向加速度，不同时刻下燃油液面的状态与结构应力的分布如图 8 所示。一方面，由于燃油的粘度较大，发生冲击后的头 30 ms 内，液面晃动并不明显，当冲击时间至 90 ms 之后时，液面开始出现大幅晃动。另一方面，固体域计算步长在毫秒量级，质量项带来的惯性影响不可忽略。图 8 中还可以看出，挡板受燃油冲击后将产生惯性振动，并且随晃动时间的增加不断衰减。其中位于中间的横向挡板变形最大，但其变形极值仅为数毫米，相对于数米长的油箱而言，结构边界变形对流场的影响甚微。最后，如图 9 所示，在 21 ms 左右油箱结构的整体应力极值达到最大，应力集中区位于各挡板与内箱底板的连接处附近，应力最大值为 180 MPa，但远小于箱体材料的屈服极限。

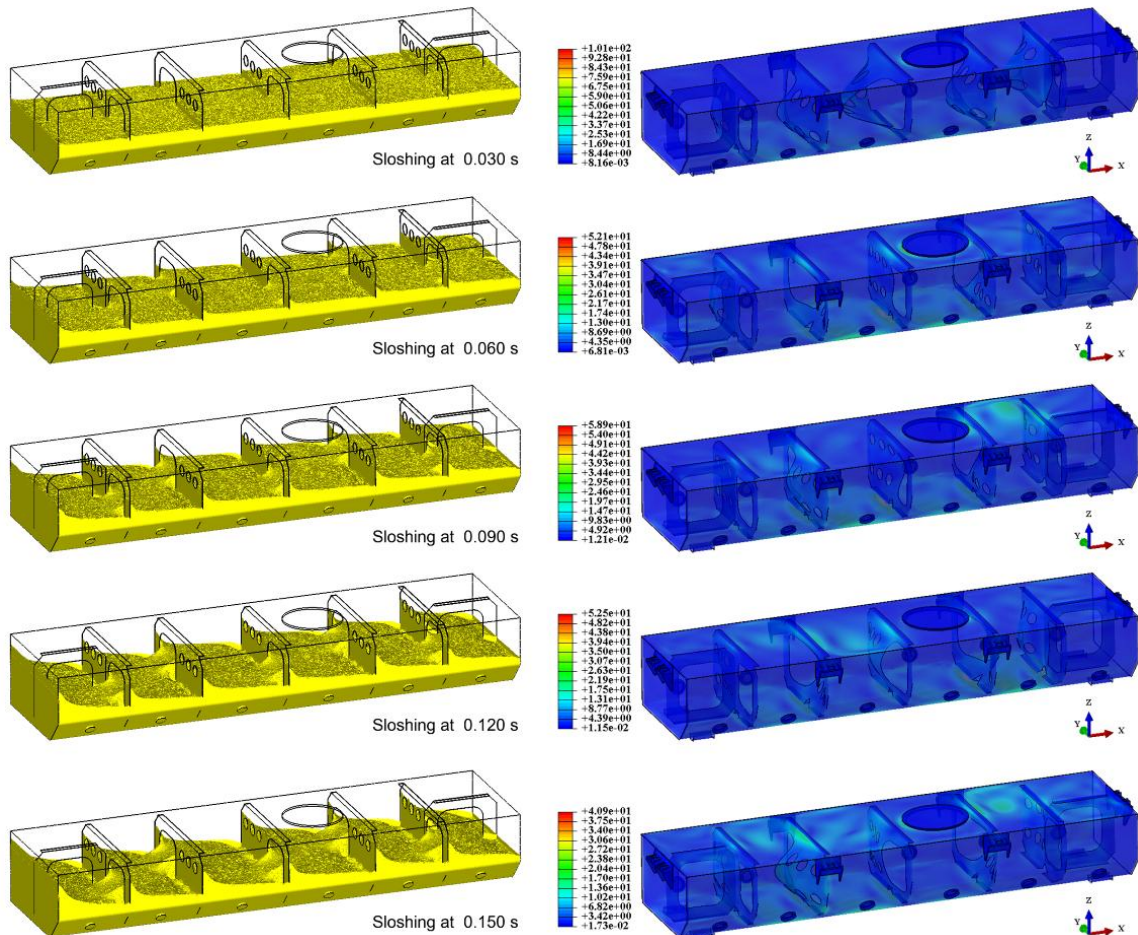


图 8 不同时刻燃油液面状态（左）与结构应力分布云图

3.3 横向 y 轴正向冲击

该工况中，燃油箱箱体受峰值为 3g 的 y 轴正向加速度，不同时刻下燃油液面的状态与结构应力

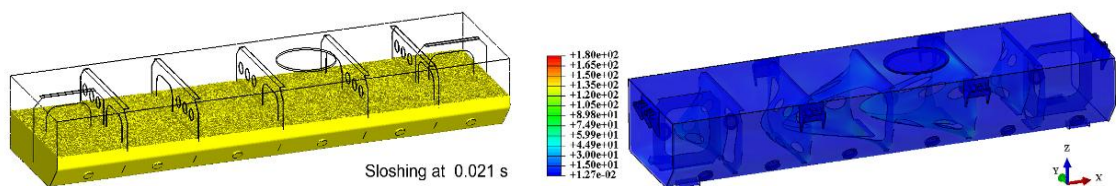


图 9 应力极值最大时刻的燃油液面状态（左）及应力分布云图

的分布如图 10 所示。与纵向冲击类似，受燃油粘度较大的影响，液面出现明显晃动的时间较冲击时间仍有一定滞后。不过此时燃油主要冲击油箱侧面，对箱内各横向挡板的冲击有所减弱，再加上冲击加速度峰值大幅降低，使液面晃动的程度和各挡板的结构变形均明显减小。如图 11 所示，结构整体应力极值在 10.5 ms 左右达到最大，应力集中区同样位于挡板与内箱底板连接处附近，应力最大值为 79.6 MPa，仍远小于材料屈服极限。

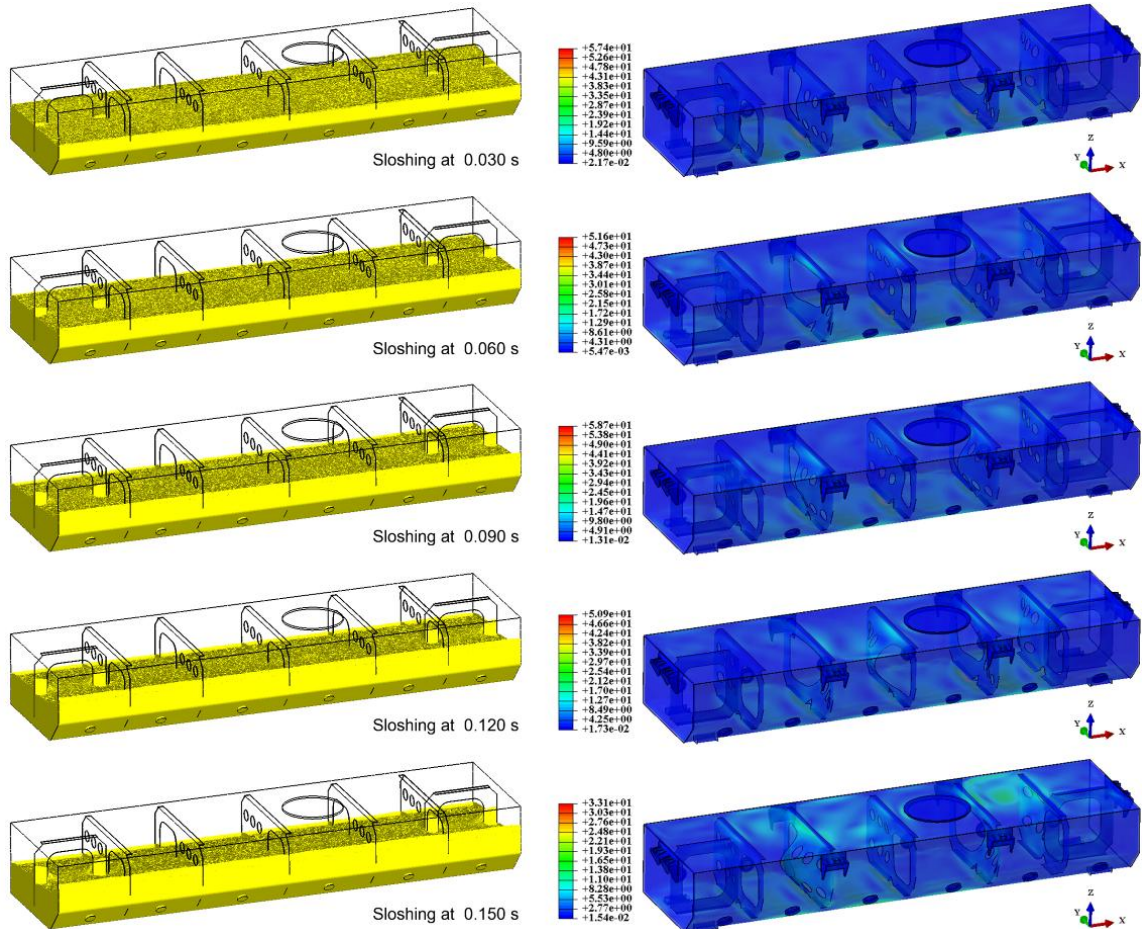


图 10 不同时刻燃油液面状态（左）与结构应力分布云图

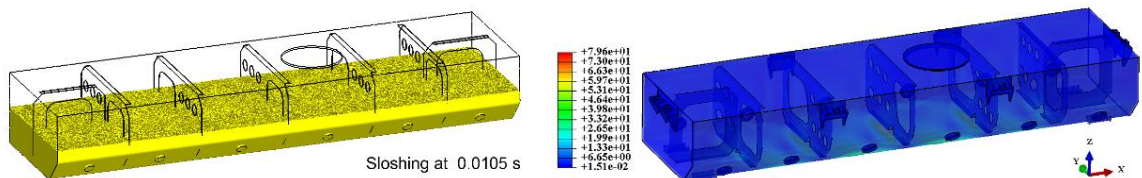


图 11 应力极值最大时刻的燃油液面状态（左）及应力分布云图

3.4 垂向 z 轴正向冲击

该工况中，此时燃油箱箱体受峰值为 $3g$ 的 z 轴正向加速度，不同时刻下燃油液面的状态与结构应力的分布如图 12 所示。可以看出，此时冲击加速度与重力方向重合，燃油箱体将产生超重效应，对应冲击时刻的结构应力最大值要大于横向冲击。不过在整个计算时间内，液面几乎没有发生晃动，结构变形也以油箱底板垂向变形为主，其位移极值同样仅为数毫米。如图 13 所示，结构整体应力极值在 16.5 ms 左右达到最大，应力集中区仍位于挡板与内箱底板连接处附近，数值增至 215 MPa ，略大于纵向冲击工况对应数值，但仍远小于材料屈服极限。

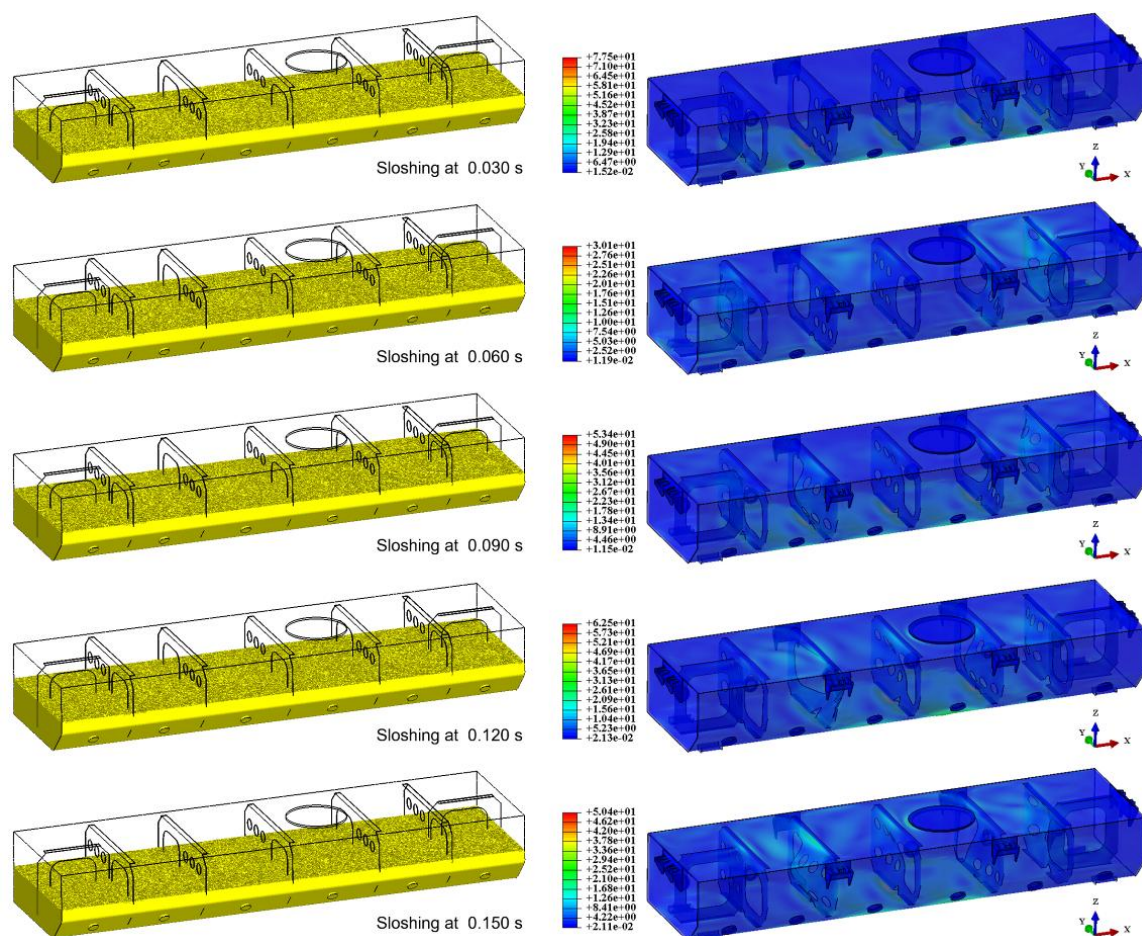


图 12 不同时刻燃油液面状态（左）与结构应力分布云图

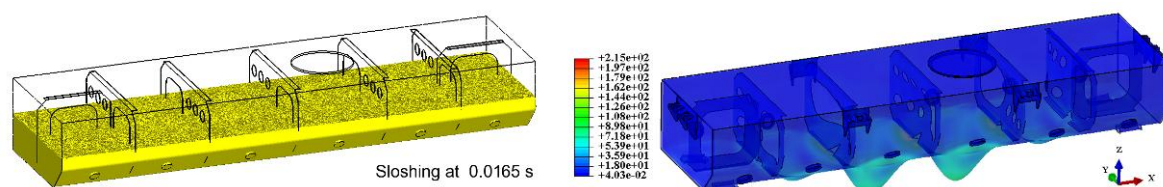


图 13 应力极值最大时刻的燃油液面状态（左）及应力分布云图

4 结论

本文联合软件 Star-CCM+ 和 Abaqus, 利用双向流固耦合数值仿真, 研究了充油量为 50% 的某发电列车车下燃油箱在分别受到指定加速度冲击后, 箱内燃油的晃动及箱体结构的瞬时应力分布情况。具体结论如下:

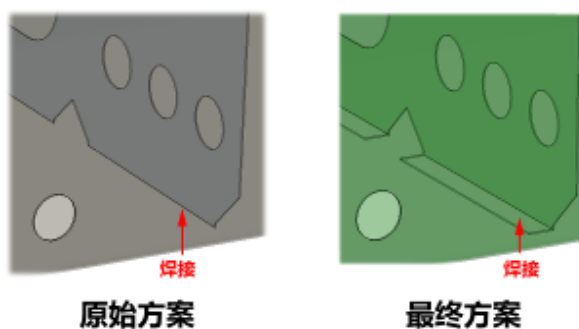


图 14 挡板与内箱焊缝位置的改进图

(1) 充油量为 50% 时, 燃油箱分别受三个方向冲击后的结构应力值均小于箱体材料的屈服极限, 所有冲击工况中的应力最大值和应力集中部位均出现在挡板与内箱连接处附近。在燃油箱原方案中, 挡板与内箱的连接如图 14 所示, 由于焊缝处存在残余应力和焊接缺陷, 往往是力学性能较为薄弱的部位, 所以需要将焊缝避开该应力集中区域, 避免由焊缝直接承受来自燃油的晃动冲击。采用图 14 所示的最终方案后, 焊缝位置发生转移, 晃动冲击载荷改由挡板母材来承受, 因此大大提高了结构的疲劳寿命和使用安全性。

(2) 就液面晃动程度来说, 纵向和横向冲击最明显, 垂向冲击无明显晃动现象, 并且受燃油粘度较大的影响, 液面出现明显晃动的时间较冲击时间而言有一定滞后。就结构应力极值大小来说, 垂向和纵向冲击较大, 横向冲击则小很多。

(3) 挡板为薄平板结构, 其刚度较整个燃油箱体而言小很多, 当燃油箱受到冲击后, 挡板的变形通常最明显。不过, 结构整体的最大变形位移仅为数毫米, 相对于数米长的油箱而言, 结构边界变形对流场的影响可以忽略不计。

5 参考文献

- [1] 刘雪梅编 《液体晃动的数值模拟及不同惯性力加载方式对罐式集装箱强度的影响研究》北京化工大学 2009 年 6 月
- [2] 向韬 陈国定 于向阳编 《考虑流固耦合效应的油罐车瞬态应力分析》机械科学与技术 2010 年 8 月
- [3] 周国发 孙丽娜编 《基于流固耦合作用的罐式集装箱强度分析》南昌大学学报 (工科版) 2012 年 6 月
- [4] 刘小民 王星 许运宾编 《运动罐体内液体晃动的双向流固耦合数值分析》西安交通大学学报 2012 年 5 月
- [5] 徐国徽 顾学康编 《液舱晃荡载荷数值模拟中的流固耦合影响研究》船舶力学 2012 年 5 月
- [6] 邱静 王国志 李玉辉编 《基于 STAR-CCM+ 的简单流体模型 CFD 研究》液压气动与密封 2010 年 10 月