

Structural Simulation and Lightweight Design for a Cleaning Sweeper Truck

Zhongwang WU¹, Rongming HUANG², Xinghua LAI¹, Chang LIU¹, Yunlong BAI²

¹ Suzhou Automobile Research Institute (Xiangcheng), Tsinghua University, Suzhou, China

² Fujian Longma Environmental Sanitation Equipment Co., Ltd, Longyan, China

Email: wuzhongwang@tsinghua.edu.cn

Abstract: The equivalent stress and acceleration response at different locations of a cleaning sweeper truck under typical loading conditions was obtained during road load spectrum tests. The finite element model for the water tank of the truck was built. Simulation analysis was performed for the water tank of the truck with full load, empty load, flat road, and slop road, respectively. The structural response predicted agreed well with the test results, verifying the validity of the virtual model. The structure of the water tank was properly designed and optimized for weight lighting. The strength of the structure redesigned at the scenario of steering, braking and bumpy roads was analyzed and compared with the baseline, showing the feasibility of the structural optimization reaching the weight reduction of up to 16 percent.

Keywords: Cleaning Sweeper Truck; Lightweight; Finite Element Analysis; Strength

洗扫车结构轻量化设计与仿真分析研究

吴中旺¹, 黄荣明², 赖兴华¹, 刘畅¹, 白云龙²

¹清华大学苏州汽车研究院（相城），苏州，中国，215134

²福建龙马环卫装备股份有限公司，龙岩，中国，364000

Email: wuzhongwang@tsinghua.edu.cn

摘 要: 对某环卫洗扫车开展整车道路谱应力测试试验研究，获得整车上装不同测点在典型载荷工况下的等效应力和加速度响应。对该车前后水箱进行了有限元建模，分析满载、空载、平路和斜坡等不同工况下的整车模型响应，并与试验测试结果进行对比，验证了有限元模型的有效性。对洗扫车箱体结构进行轻量化设计，分析了转弯、制动和颠簸工况下优化后箱体结构的强度特性，最终实现洗扫车上装减重 16%。

关键词: 洗扫车；轻量化；有限元分析；强度

1 引言

随着城市化水平的不断提高，大型商业区、工业区、住宅区等场所不断增加，地面清扫保洁工作日趋繁重。同时，环保问题也逐渐引起了人们的重视。洗扫车作为环卫设备之一，是一种集路面清扫、垃圾回收和运输为一体的高效清洁设备，清洁效率高，节约能源，在清扫路面垃圾和保持地面清洁方面发挥着不可替代的作用。洗扫车工作原理是利用副发动机驱动离心风机，利用风机形成的负压，将路面的垃圾通过吸嘴送入垃圾箱内^[1]。洗扫车一般由副车架、独立水箱、前罩、副水箱和垃圾箱等结构组成，箱体包括独立水箱和副水箱，主要承受静水压力和液面晃动引起的动压力。对洗扫车进行轻量化设计有利于节能减排，降低成本。邹继翠等^[2]以结构可靠性、加工工艺性、生产经济性为出发点，综合分析了某洗扫车箱体底板结构的优缺点，并提出一种新型瓦楞底板结构；王鹏^[3]研究了传统双发动机洗扫车的结构和原理，分析各种形式的混合动力系统应用在洗扫车上的利弊。根据原型车的结构特点和功能要求，对新型混合动力洗扫车动力系统进行设计。目前行业关于洗扫车的轻量化优化研究较少，可参考的研究主要是罐车模拟方法及防波板结构优化，针对洗扫环卫车水箱结构模拟及优

化工作不多见^[4-9]。本文以福建龙马环卫集团的某型号洗扫车为研究对象，首先进行了洗扫车道路谱试验设计，包括测点的选取与典型工况下的试验，同时进行了试验与仿真对标，验证了水箱模型的合理性和可靠性。基于仿真模型对洗扫车箱体结构提出了优化策略。

2 整车试验与仿真对标

2.1 试验设计

为提高试验的有效性和仿真对标的准确性，需要合理选择测点分布。一般是通过实验前的有限元仿真，预先找到应力较大的位置，减弱试验干扰对试验结果的影响程度，便于仿真对标和疲劳分析。另外，需要避开焊缝位置处，焊缝位置粘贴应变片难度较大，影响测试准确度，同时焊缝位置的仿真准确性低于焊接位置周边母材。同时也要结合实际工程经验，选取相对危险的测点。使用 Edaq 数据采集系统、应变花以及三向加速度传感器等试验设备，采集测点位置在整车在典型工况下的应力和加速度。整车测点设置为 20 个应力测点和 2 个加速度测点，如图 1 所示。测试工况如表 1 所示。



Figure 1. Test project
图 1 试验方案

目标		应变测点	测试工况				
静态工况	试验与仿真对标	P1~P4	车厢空载，车辆停在水平路面，完成举升				
			车厢满载，车辆停在水平路面，完成举升				
			车厢满载，车辆停在缓坡路面，完成举升				
		P13~P20	车厢满载，车辆停在水平路面，完成放水				
动态工况	疲劳和样车轻量化验证分析	P5~P20		平路 (1)	转弯 (2)	制动 (3)	颠簸 (4)
			满水箱转场(A)	A1	A2	A3	A4
			满水箱作业(B)	B1	B2	B3	B4
			半水箱转场(C)	C1	C2	C3	C4
			半水箱作业(D)	D1	D2	D3	D4

Table 1. Loadcase of test
表 1 测试工况

2.2 测试结果分析

根据实验目标，主要考察其等效应力和加速度。分别统计了 20 个测点和 2 个加速度测点在不同工况下的试验数据，部分数据如图 2 所示。试验结果表明，水箱满载比空载对结构影响更大，颠簸工况和制动工况相比转弯和平路工况结构应力更大。满载坡道举升工况试验发现，洗扫车副车架的油缸支座应力水平最大，在实际车型设计和应力校核中需要重点关注。此外，试验还发现洗扫车上装水箱底部应力相对侧壁和顶部较大，在后续箱体结构优化中需要注意。

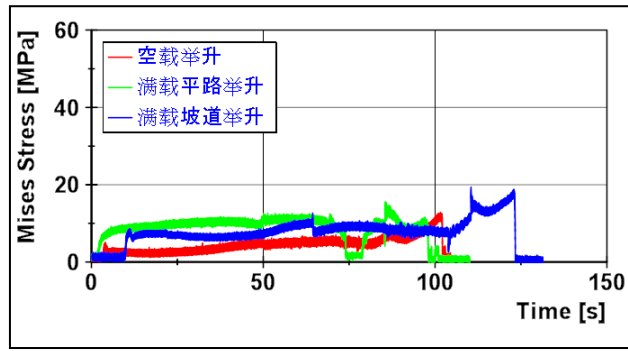


Figure 2. Stress data for point 1 of different loadcases

图 2 测点 1 不同工况下的应力数据

2.3 模型建立与对标分析

整车结构采用壳单元模拟，焊接和螺栓连接采用刚性单元模拟；单元数：1248395；节点数：1239010；箱体材料牌号为 SUS304，抗拉强度为 520MPa，屈服强度为 205MPa；对静态工况下的四种工况分别对标分析，以验证有限元仿真模型的准确性，如图 3 所示。

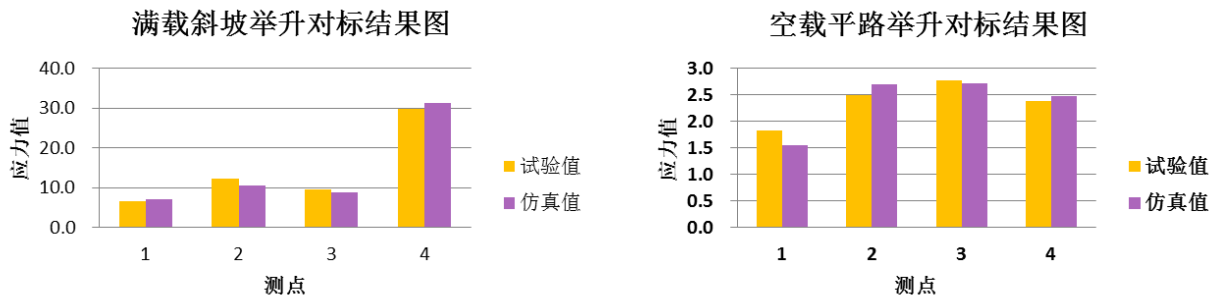


Figure 3. Benchmark for the test points

图 3 测点对标分析

结果表明：洗扫车上装各测点各工况下应力仿真结果与试验结果趋势一致、吻合较好，说明建模方法合理，模型有效。当然，仿真模型和试验也存在较小的误差，主要原因可能是仿真模型焊缝采用简化的刚性单元模拟，和实际焊缝有差异。另外，仿真分析无法准确模拟试验测试中发生的水箱中水的波动对测点的应力影响。

3 轻量化优化分析

实际应用发现洗扫环卫车在颠簸工况时箱体和防浪板受力最大，相比制动转弯等工况更为恶劣，并且颠簸工况只承受竖直向下的载荷，理论上不存在箱体内部液体对箱体侧壁的附加波浪压力，为提高工程效率，原结构强度分析和优化分析只考虑颠簸工况；同时为验证轻量化方案的可行性，同时统计转弯工况和制动工况受力情况。

3.1 原结构强度分析

洗扫车满载时（垃圾 5640kg，独立水箱和副水箱最大装水）对箱体结构进行静强度分析，施加静水压力和垃圾的作用力，颠簸加速度为 2G。在副水箱支架和底盘连接位置全约束。通过仿真分析，得到颠簸工况下的应

力云图分别如下图 13 所示：

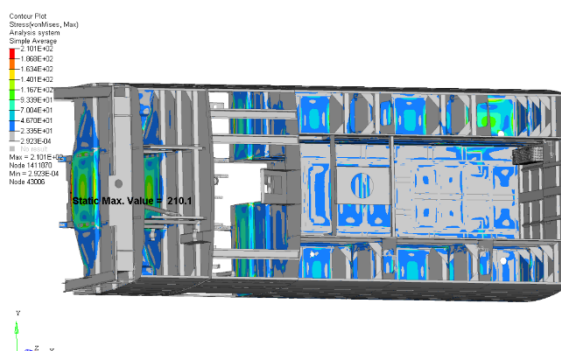


Figure 13. Stress fringe under the bumping loadcase

图 13 颠簸工况下的应力云图

仿真结果表明：颠簸工况下的最大等效应力出现在独立水箱前侧外板底部，独立水箱前侧外板底部为结构强度薄弱位置，需进行局部加强。另外，防浪板结构受力相对较小，安全系数富裕，可以做减重优化。

3.2 优化结构强度分析

根据原模型分析结果，对箱体结构进行轻量化设计，将独立水箱和副水箱内的防浪板改成直板，并去掉中间的隔板结构，改动如图 14、图 15 所示。为了进一步改善箱体结构上的应力分布，减小最大等效应力，在独立水箱前后侧外板底部各增加一个加强筋，结构改动详见图 16、图 17。同时将箱体所有外侧壁板的厚度由 4mm 改为 3mm，以上实现减重 16%。对优化后箱体分别进行转弯（转弯加速度 0.5G）、制动（制动加速度 0.7G）和颠簸（颠簸加速度 2G）工况强度分析，应力云图分别如下图 18~21 所示：

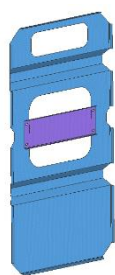


Figure 14. Original wave-proof plate structure

图 14 水箱原防浪板结构



Figure 15. Optimized wave-proof plate structure

图 15 水箱优化防浪板结构



Figure 16. Original bulkhead structure

图 16 独立水箱原舱壁结构

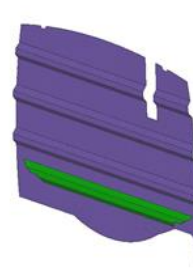


Figure 17. Optimized bulkhead structure

图 17 独立水箱原舱壁结构

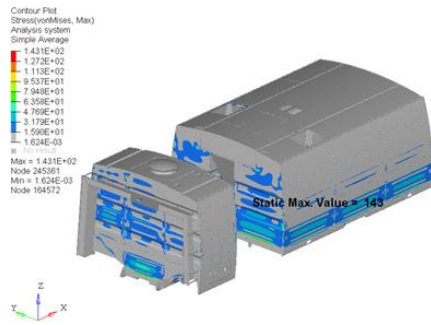


Figure 18. Stress contour under turning condition

图 18 转弯工况水箱应力云图

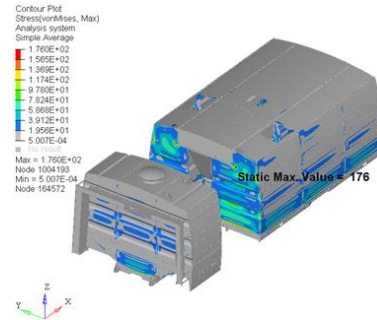


Figure 19. Stress contour under braking condition

图 19 制动工况水箱应力云图

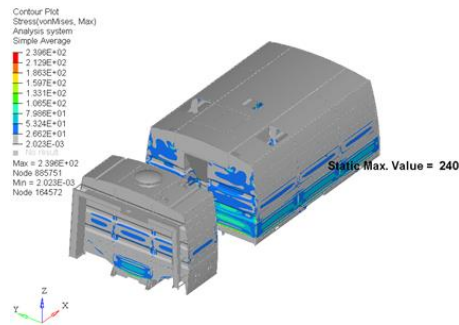


Figure 20. Stress contour under bumping condition

图 20 颠簸工况水箱应力云图

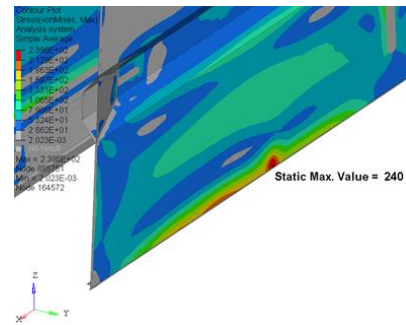


Figure 21. Local stress contour under bumping condition

图 21 颠簸工况下水箱局部应力放大图

表 4 为上述两种箱体结构的仿真结果对比。结果表明：颠簸工况相对转弯和制动工况应力明显更大，颠簸工况最大等效应力是制动工况最大等效应力的 1.4 倍，转弯的 1.7 倍。颠簸工况为危险工况，在洗扫车设计中应重点关注。颠簸工况下，优化后结构最大等效应力出现在副水箱内侧板和底板焊接位置附近，最大应力为 240MPa。相比于原结构减重 16%，应力有所增加（14.3%），不过增加幅度不大且远低于不锈钢材料的抗拉强度（520MPa）。

Table 4. Strength analysis and comparison at different loading conditions

表 4 不同典型工况下强度分析结果对比

工况	最大等效应力值（MPa）		应力变化
	原结构	优化结构	
转弯	-	143	-
颠簸	210	240	增大 14.3%
制动	-	176	-

4 结论

对某款环卫洗扫车进行实际道路谱应力和加速度测试，建立了洗扫车水箱有限元模型，模拟了典型工况并和试验结果对标，验证了水箱模型的准确性，最后提出了水箱结构的轻量化设计方案，主要结论如下：

（1）通过道路载荷谱试验获得洗扫车上装水箱在典型工况下的应力和加速度，试验结果表明，水箱满载比空载对结构影响更大，颠簸工况和制动工况相比转弯和平路工况结构应力更大。试验还发现副车架油缸支座及上装水箱底部应力水平较大，在洗扫车上装结构轻量化优化设计中需要着重注意。

(2) 建立了洗扫车上装有限元模型, 模拟预测了上装结构在满载、空载、平路、斜坡等典型工况下的各测点应力, 并和试验数据进行对标, 结果表明上装各测点仿真应力总体和试验相吻合, 验证了模型的有效性, 为结构轻量化优化设计提供重要仿真工具。

(3) 提出了洗扫车上装水箱结构的轻量化优化方案, 实现整体减重 16%。针对优化后结构进行了典型道路工况仿真和性能验证。结果表明颠簸工况是最危险的工况, 颠簸工况下结构最大等效应力是制动工况的 1.4 倍, 是转弯工况的 1.7 倍。颠簸工况下优化后的水箱结构应力增加约 14%, 最大应力远低于不锈钢材料抗拉强度, 不影响水箱功能安全。

参考文献 (References)

- [1] Liu Yang, Zhang Ke. Introduction and Development Trend Analysis of Road Sweeper[J].Automobile applied technology,2018,(15):269-271.
刘洋, 张珂. 道路清扫车介绍及发展趋势分析[J]. 汽车实用技术, 2018, (15):269-271.
- [2] Zou Jicui, Liu Jianpei, Kong Qingzheng, et al. Optimizing design of the chassis of the sweeper truck[J]. Auto Time, 2016(12):60-61.
邹继翠, 刘建培, 孔庆珍, 等. 洗扫车箱体底板的优化设计[J]. 时代汽车, 2016(12):60-61.
- [3] Wang Peng. Study on power system of new hybrid Sweeper vehicle[D].ChangSha: Hunan University, 2016.
王鹏. 新型混合动力洗扫车动力系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [4] Xu Huichao.Design and Simulation of a New Cleaning Sweeper[D]. Shandong Agricultural University,2015.
徐慧超. 新型洗扫车设计与仿真[D]. 山东农业大学, 2015.
- [5] Zhao Linghe. Analysis and Research of fluid-solid coupling of Tank Truck and Lateral Stability of vehicle[D]. Chongqing Jiaotong Univesity,2015.
赵灵鹤. 汽车罐车流固耦合分析及整车侧向稳定性研究[D]. 重庆交通大学, 2015.
- [6] He Hua,Tian Hongqi, Jiang Fan.Numerical Analysis of Dynamic Side Pressure in Liquid Transportation by Tank Car[J].Journal of The China Rail Way Society, 2008,(3):110-113.
何华, 田红旗, 江帆. 铁路罐车液体运输动侧压力数值分析[J]. 铁道学报, 2008, (3):110-113.
- [7] 卜凯. 槽罐车流固耦合数值分析和行驶稳定性研究[D]. 南京理工大学, 2012.
- [8] 陈哲. 基于有限元法下的 CNG 运输罐车及垃圾压缩车的仿真分析与实验研究[D]. 扬州大学, 2015.
- [9] Liu Zhenbin.Numerical Simulation of Liquid Tank Sloshing and Pressure Calculation based on Volume of Fluid Method[J].Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science) , 2011,(3):24-29,61.
刘桢兵. 基于 VOF 法的液舱晃荡数值模拟及载荷计算[J]. 重庆理工大学学报 (自然科学版), 2011, (3):24-29, 61.