

基于 LS-DYNA 的新功能模拟压力管传感器信号

董琳，岳国辉，孙晴，杨领军，陈现岭

(长城汽车股份有限公司技术中心 河北省汽车工程技术研究中心, 保定, 071000, cyaqgc@gwm.cn)

摘要：压力管传感器的碰撞信号是主动式机罩是否点爆的主要判据，LS-DYNA 的新关键字 *DEFINE_PRESSURE_TUBE，旨在有效模拟薄壁充气管的内部压力变化。首先展示新关键字的理论及用法，并与传统压力管仿真方法进行对比，新关键字在计算时间及建模方便性上优于传统方法；随后基于实际试验数据进行相关性分析，完善压力管模型；最后应用新关键字压力管模型于主动式机罩系统开发中，先于实际试验预测并优化行人的冲击信号，提高系统开发效率与可靠性。

关键词：LS-DYNA，压力管，碰撞信号，主动式机罩

1 引言

近年，全球市场对汽车保护行人安全的性能关注度逐年提高，要求日益严格，2018 版中国新车评价规程（C-NCAP）也加入了行人保护评价项。现行的欧盟新车评价规程（E-NCAP）V8.5 中，行人头部得分占比高达 66.7%^[1]。然而在行人保护性能开发过程中，头部性能最易出现不同需求的冲突，解决该类冲突的一种方案是采用主动式机罩系统，该系统可以增加机罩与下部硬点间的变形空间，但是需要配置额外的探测系统，并保证其在实际使用中的可靠性。

压力管传感器是主动式机罩系统常用的探测器，其布置要求低，性能稳定，作用区域大，而压力管传感器需在开发前期就考虑其布置要求及性能优化，并在整个开发流程中不断地进行校核，才能保证实际系统的有效性。在试验阶段之前，借助虚拟仿真手段对压力管传感器的响应进行评估十分必要。

通过在虚拟仿真模型中使用 LS-DYNA 的新关键字 *DEFINE_PRESSURE_TUBE，可有效的预测压力管传感器的碰撞信号，有效区分行人、最难探测行人、不应点爆的误爆物品之间探测与区分，辅助主动式机罩系统开发。

本文展示了 LS-DYNA 中压力管新关键字的理论及建模，对比及调试，进一步工作包括应用于主动式机罩系统项目开发中，预测行人与非行人的碰撞信号，保证主动式机罩系统的可靠性。

2 LS-DYNA 模拟压力管传感器

2.1 压力管工作原理

如图 1 所示，压力管由充满空气的封闭塑料软管组成，两端贴传感器，位于车前部前保与前防撞之间，压力管前部布置有足够厚的泡沫，在车辆与行人发生碰撞时，行人冲击前保，挤压泡沫，泡沫变形并挤压压力管，压力管内气体体积变化，压强随之改变，传感器捕捉压强变化信号，作为碰撞信号输出给行车电脑，如图 1 所示。

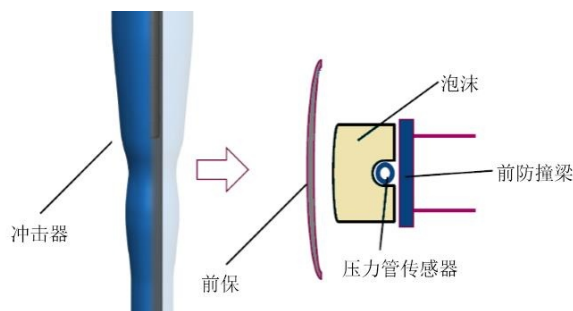


图 1 压力管传感器布置示意

2.2 *DEFINE_PRESSURE_TUBE 关键字

*DEFINE_PRESSURE_TUBE 定义了一个封闭的充气管，用于模拟由于管道截面面积变化而产生的内部压力波，压力管由梁单元定义，气体体积由梁单元截面面积和初始单元长度确定，面积的变化是由周围接触单元的侵入决定的。压力管的压力和面积的变化通过*DATABASE_PRTUBE 输出^[2]。

其关键字解析如图 2 所示：

| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|-----|-----|-----|---|---|---|---|---|
| Variable | PID | WS | PR | | | | | |
| Type | I | F | F | | | | | |
| Default | 0 | 0.0 | 0.0 | | | | | |

图 2 *DEFINE_PRESSURE_TUBE 卡片 1

PID: 压力管的零部件 ID，在该 PART 中只能附管状的 beam 单元，即在*SECTION BEAM 中 ELFORM=1, 4, 5, 11, 且 CST=1, 初始的管截面积优先采用 beam 内直径 TT1/TT2 计算。

WS: 气体中的声速 C_0

PR: 压力管中的初始气体压力 p_0

| Card 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|------|-----|------|---|---|---|---|---|
| Variable | VISC | CFL | DAMP | | | | | |
| Type | F | F | F | | | | | |
| Default | 1.0 | 0.9 | 0.0 | | | | | |

图 3 *DEFINE_PRESSURE_TUBE 卡片 1

VISC: 人工粘度系数。

CFL: 压力管时间步长系数。

DAMP: 线性阻尼系数。

2.3 压力管模拟

将三种压力管模拟方法进行对比，粒子法（CPM 法）、均匀压力法与 LS-DYNA 的压力管关键字法（BEAM 法）。

1. CPM 法：物理精度最高的方法，CPM 法模拟了“气体颗粒”与结构之间的相互作用，但 CPM 法通常

会给出有噪声的响应结果，且计算成本极高。压力管胶皮采用体单元建模，内部空气的外皮采用壳单元建模^[2]。

2. 均匀压力法：压力管胶皮采用体单元建模，基于胶皮内部的包壳定义均匀压力气囊，来模拟压力管内部空气，该方法计算成本低，但对压力管边缘区域的响应模拟较差。

3. BEAM 法：压力管胶皮采用体单元建模，内部嵌入 *DEFINE_PRESSURE_TUBE 的 BEAM 单元，模拟压力管内空气。空气的密度、刚度均较低，故压力管内的气压变化受胶皮影响较大。

以三种不同方法建立压力管示例模型，示例模型中除压力管腔内气体仿真方式不同外，其余建模方法相同，泡沫与压力管外皮采用体网格建立，以结点耦合的方式模拟压力管嵌入泡沫的状态，三种方法建模时间一致，模型大小基本一致，各个示例的运算时间如下：

1. CPM 法：16 小时 10 分钟的总 CPU 时间
2. 均匀压力法：19 分钟的总 CPU 时间
3. BEAM 法：2 小时 51 分钟的总 CPU 时间

BEAM 法较 CPM 计算成本明显减少，较均匀压力法差距明显。

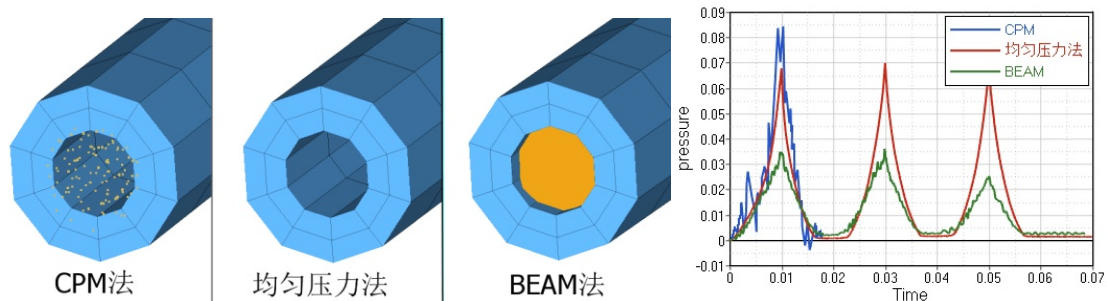


图 4 三种建模方法的模型对比（左）与响应对比（右）

3 压力管模型调试

为标定虚拟模型中压力管响应，确保其与实际响应一致，设计了实际压力管的标定试验提取响应特性，压力管两端贴传感器，连接行车电脑，压力管呈 U 形固定在方形工装上，在试验台上进行准静态压缩试验^[3]及动态跌落冲击试验，如图 5 所示。



图 5 压力管试验示意（左：准静态压缩试验 右：动态跌落试验）

基于试验数据，采用新压力管关键字建立对应的仿真模型，并进行相关性调试，仿真与试验响应曲线的初始差距较大，原因为模型中压力管胶皮材质与实际材质差别导致，经过对材料参数的调试后，压力管虚拟模型的曲线响应与试验一致，压力管虚拟模型可以用于主动机罩系统开发中。优化后的仿真与试验响应曲线对比如图 6 右所示。

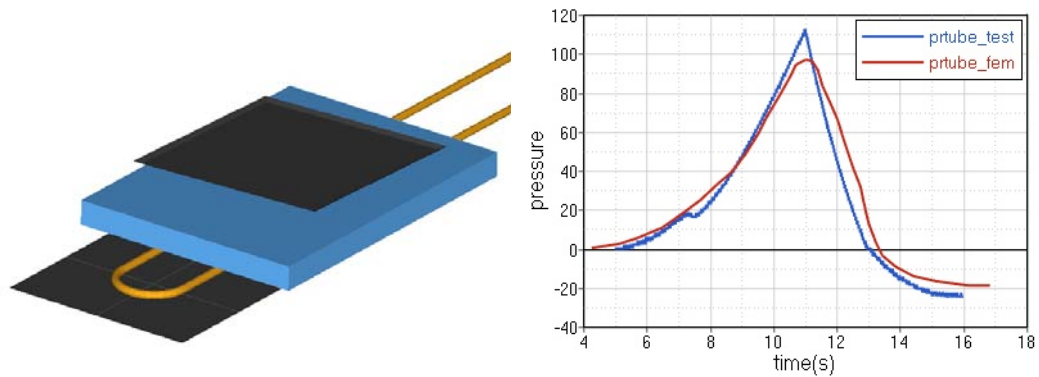


图 6 beam 法的校核模型示意（左）及优化后的仿真与试验相关性（右）

4 在实车主动式机罩系统开发中的应用

某配置主动式机罩的车型，该车型选用压力管传感器，预测其在最难探测行人与各误爆物品冲击下的碰撞信号。用于描述最难探测行人的冲击模块为行人检测辨识器（PDI-2），PDI-2 与误爆物品的模型为自主开发获得，主动式机罩系统应在 PDI-2 冲击时有效展开，在误爆物品冲击时不展开，即 PDI-2 与误爆物品的碰撞信号区分越明显，越有利于主动式机罩系统的可靠性。

压力管位于前防撞梁泡沫的最后端上部，长度覆盖整个防撞梁。将各个冲击模块对准车辆前中心线发射，PDI-2 底部位于地面，误爆物品几何中心与压力管高度平齐。图 7 左侧展示 PDI-2 冲击泡沫及压力管前后的变形，右侧为各个模块冲击下压力管传感器的响应结果，其中，PDI2 信号峰值最高，小动物的信号曲线与 PDI-2 最为接近，其他误爆物品的冲击信号与 PDI-2 区分明显。基于 PDI-2 与小动物的特性，减少压力管上下部前保缓冲会有利于提高 PDI-2 的信号强度，但可能会与行人保护等需求产生冲突，具体改进措施需依据基础响应及不同需求进行妥协。

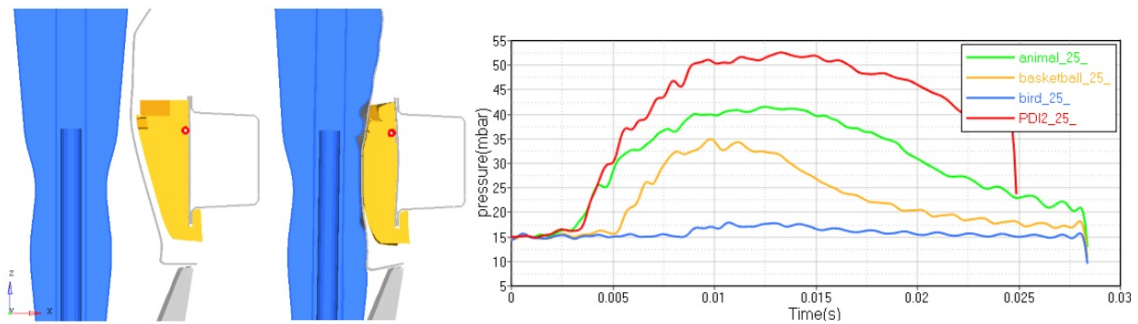


图 7 PDI-2 冲击变形示意（左）及主动式机罩标定模块冲击响应对比（右）

随后在实车上安装前防撞梁发泡与压力管传感器，采用 PDI-2 试验模块开展主动式机罩系统标定试验，并将试验结果与仿真结果进行对比，如图 8 所示，结果显示，仿真与试验曲线均为单次响应波，响应波曲线趋势一致，幅值与幅宽存在差距，分析为仿真模型中压力管周边结构刚度（泡沫与前保）的差异导致，设计人员在评估碰撞信号虚拟结果时，应充分考虑设计余量。

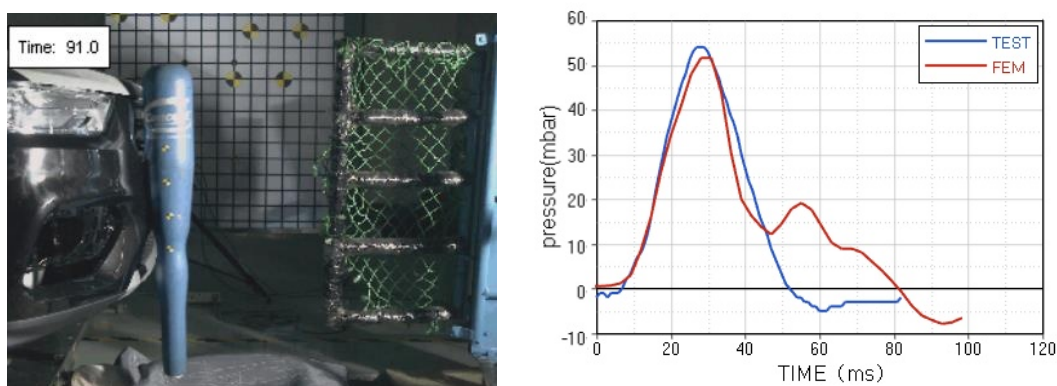


图 8 主动式机罩标定试验（左）及与仿真响应对比（右）

5 结论

压力管传感器的碰撞信号是主动式机罩有效性标定的主要判据，LS-DYNA 的新关键字 *DEFINE_PRESSURE_TUBE，采用 1D 的 BEAM 单元模拟压力管内部气体，在虚拟仿真中有效的模拟了压力变化响应。

对比了三种模拟压力管传感器的方法，表明该 BEAM 单元表现良好，且在计算成本上优于 CPM 法。同时三种方法均需调优，以更好地相关试验数据，表征压力管特性。

将压力管传感器模型应用于实车研发上，预测并优化最难探测假人等试验模块的响应，应用于主动式机罩开发时，压力管虚拟响应结果仍需考虑设计余量，以保证实际主动式机罩系统的可靠性。

实际标定试验是仿真所不可替代的，但是采用虚拟工具去预测传感器信号会为开发人员提供有价值的信息，用以保证主动式机罩系统的可靠性与车辆前部的性能，有效提高主动式机罩系统的可靠性与研发效率。

参考文献

- [1] Euro NCAP.EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME (E-NCAP) Pedestrian testing protocol version8.5[S/OL]. (2018-10). <http://www.euroncap.com>
- [2] Jesper Karlsson. Simulating Pressure Tube Sensors in Pedestrian Crash. 11thEuropean LS-DYNA Conference 2017. Salzburg. Austria
- [3] Chinmoy Pal and Tomosaburo Okabe.Vehicle's Front End Profile Influence on Pedestrian Sensing System Using In-House Developed PDI-2 and Child FE Models. SAE International (2016-05.04)

Simulating signal collision in pressure tube sensors based on new function of LS-DYNA

DONG Lin, YUE Guohui, SUN Qing, YANG Lingjun, Chen Xianling

(Technology Center, Great Wall Motor Co. Ltd, Hebei Automobile Technology Research Center, Baoding 071000, China, cyaqgc@gwm.cn)

Abstract: The collision signal of pressure tube sensor is the main criterion of whether the active hood deployment, LS-DYNA keyword *DEFINE_PRESSURE_TUBE, aimed at effectively simulate pressure waves in a thin air-filled tube, First shows the new theory and usage of the keyword, and compared with the traditional simulation method. In computation time and convenience of modeling, new keyword is superior to the traditional method. Then the correlation analysis based on actual test data was carried out to improve the model. Finally, the new keyword pressure tube model will be used for the development of the active hood system, to predict and optimize the pedestrian impact signal before the actual test, and to improve the system development efficiency and reliability.

Keywords: LS-DYNA; Pressure tube; collision signal; Active hood