

# 基于 HyperWorks 的城市轨道车辆防撞结构的设计

刘彬 刘永强

中国南车株洲电力机车有限公司 湖南 株洲 412001

**摘要:** 将某城市轨道车辆的三维模型导入 Altair HyperWorks 软件中, 在 HyperMesh 模块下建立有限元碰撞模型, 导入到 CAE 求解器中对其进行大变形碰撞仿真。对优化前后结构的仿真结果进行对比分析, 确定了防撞结构的设计, 验证了车体设计的合理性。

**关键词:** 轨道车辆, HyperMesh, 有限元, 碰撞, 优化

## 1 前言

现代轨道车辆设计中, 轨道车辆的防撞性主要研究发生车辆碰撞等严重事故时如何保护驾驶员及乘客的生命安全。轨道车辆防撞性设计应尽最大可能吸收车辆碰撞能量, 同时优化车辆内部防撞性能, 有效地减小由二次碰撞引起的伤害。随着计算机技术的发展和非线性有限元仿真技术的逐渐成熟, 出现了各种用于碰撞分析的软件, 例如 Altair/RADIOSS, MSC/DYTRAN, PAMCRASH, LS-DYNA Manager。本文在 HyperMesh 中建立车辆的碰撞模型, 输出文件到 CAE 求解器中进行求解计算。

HyperMesh 是一款优秀的 CAE 前后处理软件, 具有良好的界面及交互功能, 能为各种求解器提供接口, 有限元模型可在不同模板之间进行转换, 大大缩短建模时间, 对于复杂模型的处理尤为突出。

## 2 有限元建模

根据 EN 15227 《铁路车辆车体的防撞性要求》, 本次仿真模型划分为 C-IV 类, 碰撞场景为一列车以 15km/h 的速度撞击另一列静止在轨道上的相同列车单元。

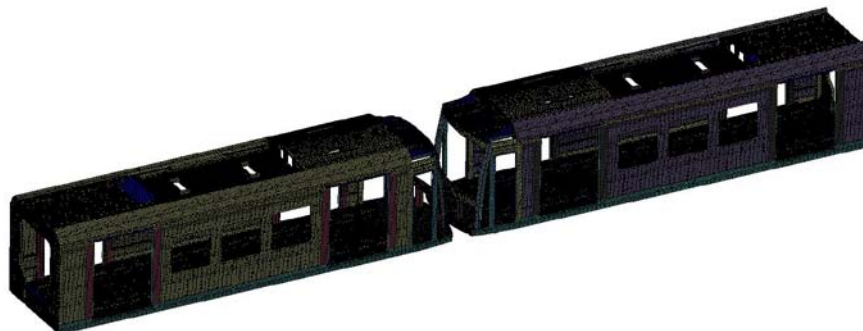


图 1 车辆碰撞有限元模型

本仿真模拟两节车对撞，使用 906758 个单元的有限元模型来说明整个车辆车体结构的整体情况。模型主要是由壳单元和实体单元构成，其中壳单元 838528 个，实体单元 2772 个，质量单元 65458 个。防爬器划分为实体单元。

## 2.1 模型建立及修改

在 HyperMesh 的 ANSYS 模板下导入实体模型，划分网格，加载边界等进行静强度分析。通过 HyperMesh 自带转换工具，将模型转换到 CAE 求解器模板下进行碰撞分析。

### （1）网格质量调整

动态碰撞分析与静态强度分析不同，网格质量直接影响计算精度和计算能否顺利完成，计算结果对网格质量要求较高。本碰撞模型在 HyperMesh ANSYS 模板下的静强度分析转换过来，网格质量需要提高。调整网格标准，采用网格重新划分、优化方式自动调整、在适当范围内拉动节点等方式对网格进行调整使其达到完全合格。

### （2）自由边及重复网格检查

处理完失效的网格后，将对有限元模型进行自由边检查。自由边界的检查是为了防止网格发生错开、网格连接重复等现象，检查到自由边界之后需要进行处理，一般的方式有网格合并、删除，或重新划分网格，保证整个模型连接关系的完整。处理完自由边后，需要对重复网格进行检查，删除重复网格。

### （3）网格法向调整

检查单元法向目的是为了保证正确的接触。

### （4）零部件厚度及材料信息

对于壳单元，材料属性的厚度信息一般采用 SectShell，体单元选为 SectSolid。计算的积分方式 ELFORM 选择“2”，进行全积分计算。本仿真模型壳体单元的材料属性选用 24 号材料，控制卡片中 SIGY 是屈服极限项，LCSS 是强化阶段项。

### （5）网格穿透信息调整

穿透的原因一般是调整网格的过程中造成网格错动或者是抽取中面困难的时候采用了表面处理的办法，造成了实际位置的改变。穿透调整一般需要手动调试，对穿透网格局部进行调整，前提是在保证不大幅度破坏网格的情况下对网格进行处理。

### （6）控制卡片设置

本模型设置两个接触，两节车之间的接触和车体内部构件之间的接触。两节车体之间的接触为 AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE，构件内部的接触为 AUTOMATIC SINGLE SURFACE.

按照标准要求，对主动碰撞的车施加恒定速度 15km/h，另一节车施加位移约束，使其保持静止。建立两个载荷步后，设置控制卡片，包括接触控制，时间步长，沙漏控制，输出控制、输出控制，终止时间等。

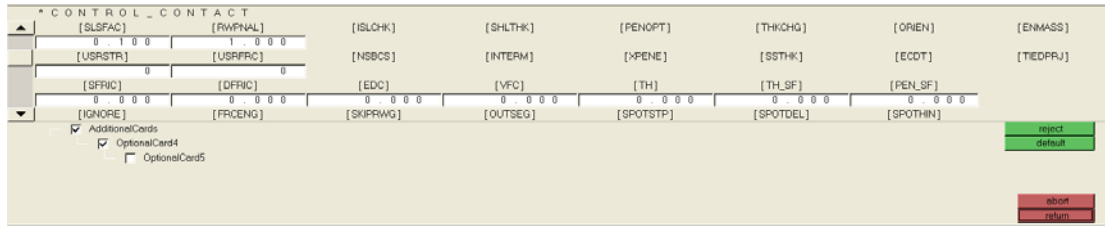


图 2 接触控制

输出信息包括反作用力、刚性墙碰撞力等。信息输出时间间隔通过下面数值设定，如图所示。

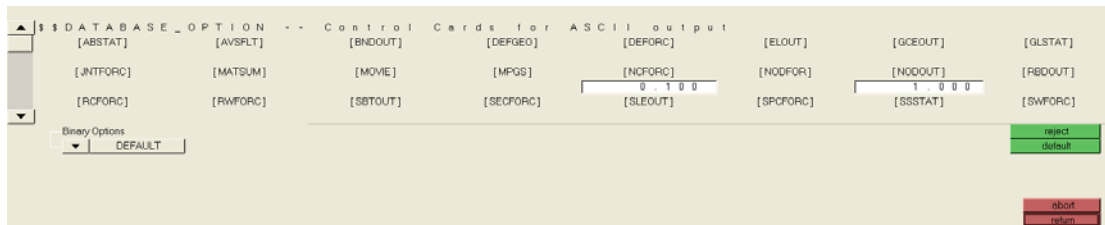


图 3 输出控制

对于步长的控制如下图所示。时间步长主要通过 TSSFAC 和 DT2MS 来控制。试算模型，如果质量缩放过大，则应减小 TSSFAC，增加 DT2MS，以保证  $TSSFAC * |DT2MS|$  值减小。本模型仿真用默认数值，质量缩放达到 200%，造成能量曲线失真，计算结果不可信。调整 TSSFAC 为 0.5，DT2MS 为 -0.04，质量缩放减小到 5% 以内，能量曲线与计算数值基本符合。

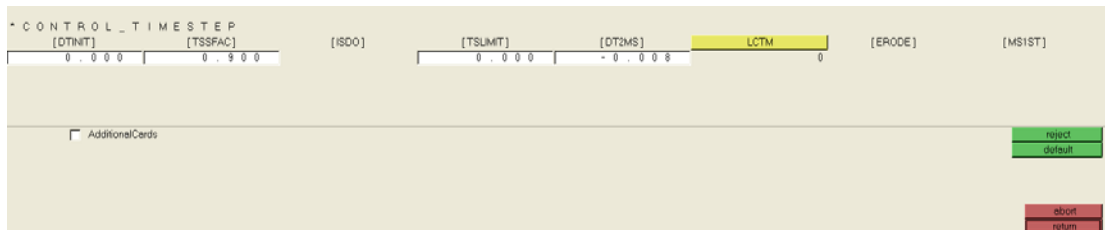


图 4 时间步长控制

### 3 结果分析

车辆防撞设计包括两方面的内容：一方面是在设计车体时如何合理地分配防爬器、司机室骨架及底架等与吸能结构的刚度，以保证碰撞发生过程能够有序地吸收撞击能量；另一方面是合理布置司机室和乘客区的设备，尽量避免二次碰撞给司机和乘客带来伤害。为保证“生存区域”只传递纵向作用力而不产生塑性变形，“生存区域”的刚度应大于前端“易变形区域”。

撞击发生过程中，“易变形区域”应产生有序的塑性变形，吸收撞击能量。

为防止碰撞的车辆发生攀爬，提高车体的耐撞性能，应合理设计车体的防撞结构。本项目初始的前端防撞结构方案设计如图 5。由于防撞结构的吸能特性不仅取决于其材料性质，也与其几何形状与尺寸有关。车体前端底架压溃梁采用 6008-T4 型材，屈服极限为 90MPa，远小于车体其他部件材料的平均屈服极限为 215MPa，有利于碰撞时率先变形吸能，同时在梁两侧开有引导变形的凹形孔。

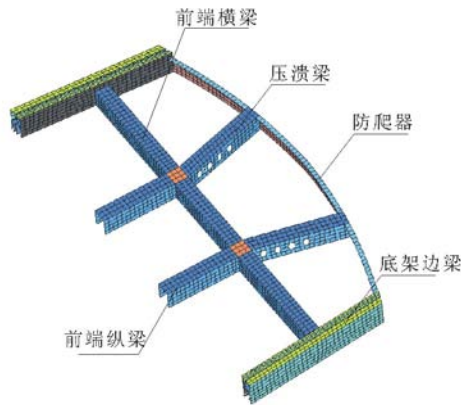


图 5 车体前端防撞结构图

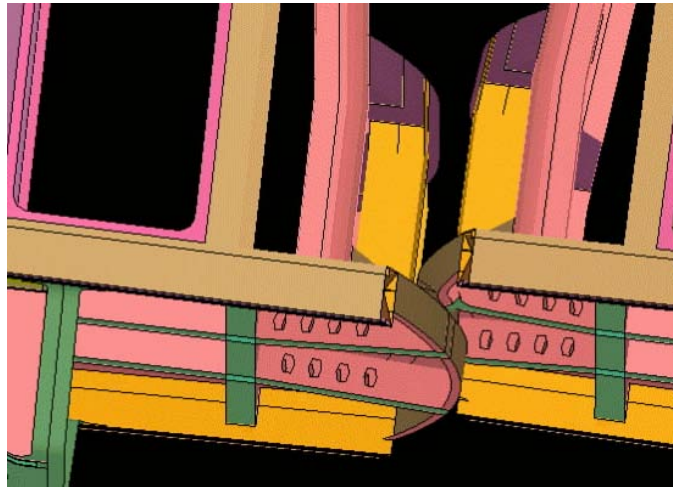


图 6 碰撞仿真发生爬车现象

初始结构方案的碰撞仿真结果显示，两车碰撞出现爬车现象。分析原因可能有：1、前端防爬器刚度太小，碰撞后发生塑性变形，导致在压溃梁出现有序的变形吸能之前就出现爬车；2、防爬器与底架边梁连接刚度不够，导致防爬器出现点头，引导爬车发生。针对两点原因，提出了改进方案：加强防爬器刚度及与底架边梁的连接刚度。为防止防爬器过刚，压溃梁变形过大，或破坏司机室地板面，在两压溃梁中间增加一根压溃梁。

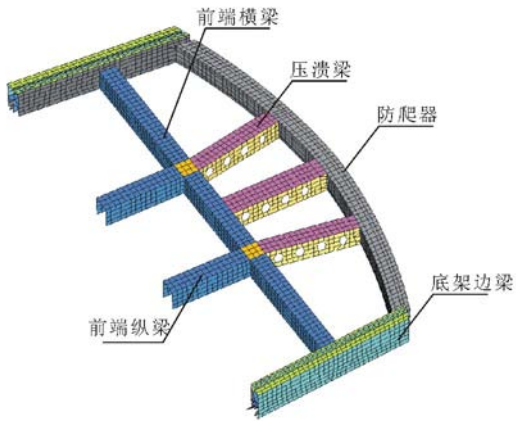


图 7 修改后的防撞结构

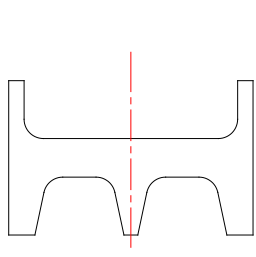


图 8 防爬器型材断面图

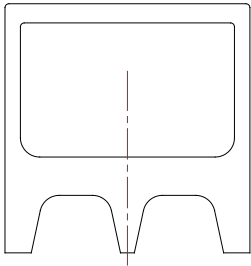


图 9 修改后的防爬器型材结构

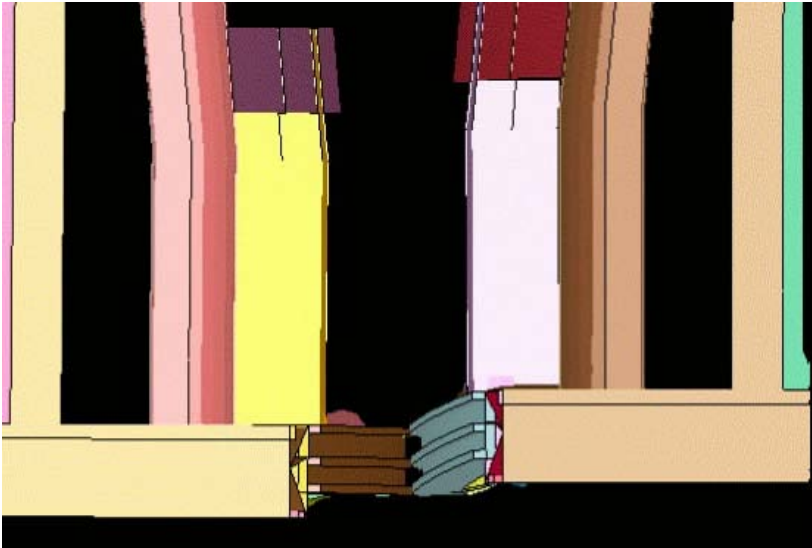


图 10 修改后未发生爬行现象

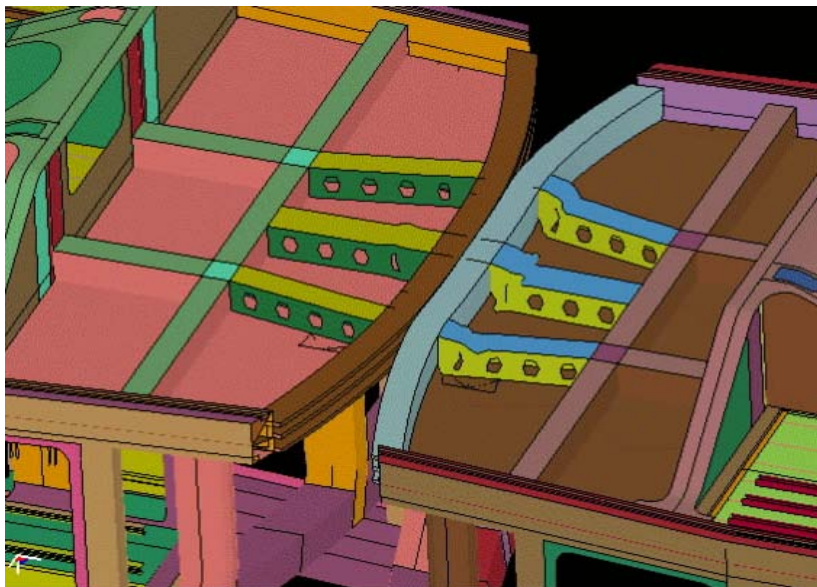


图 11 修改后的吸能结构

理论分析表明, 当一个梁沿纵向承受大变形碰撞后, 沿纵向压塌比发生弯曲吸能效果要明显。从图可以看出, 修改后的前端防撞结构, 防止了爬车现象, 压溃梁发生纵向压塌, 吸能效果比较明显。

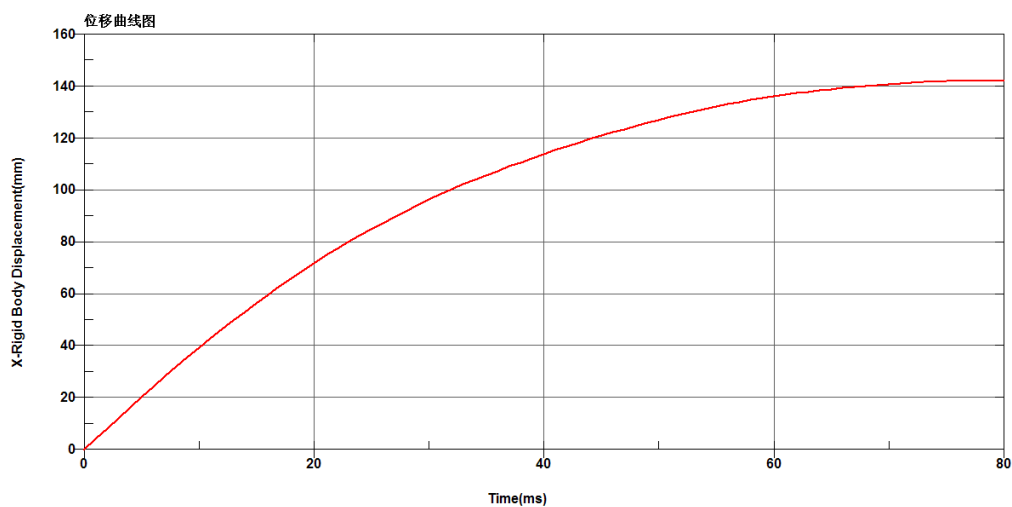


图 12 位移与时间关系曲线 (15km/h)

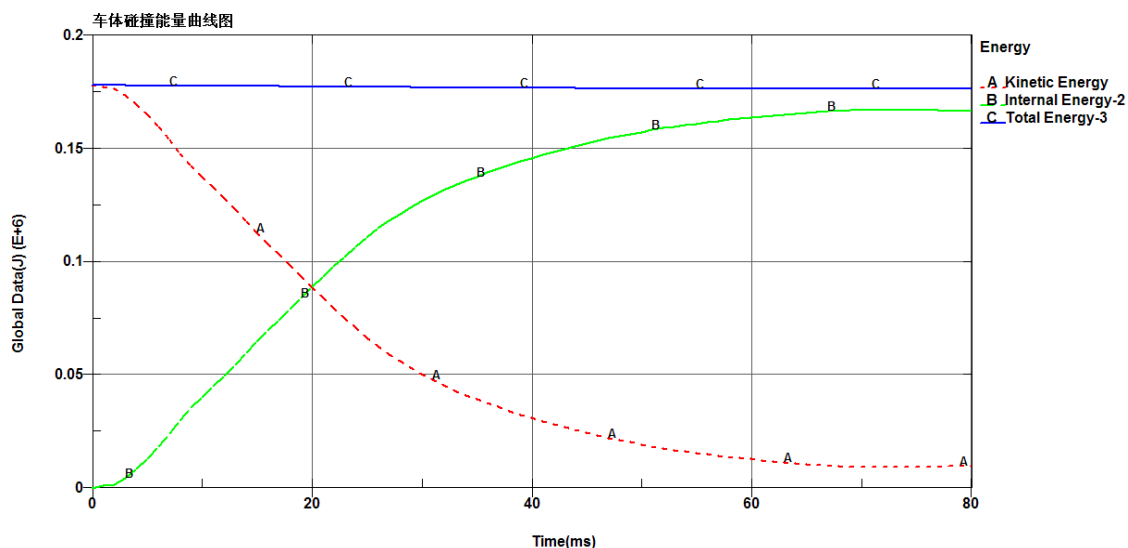


图 13 能量与时间关系曲线 (15km/h)

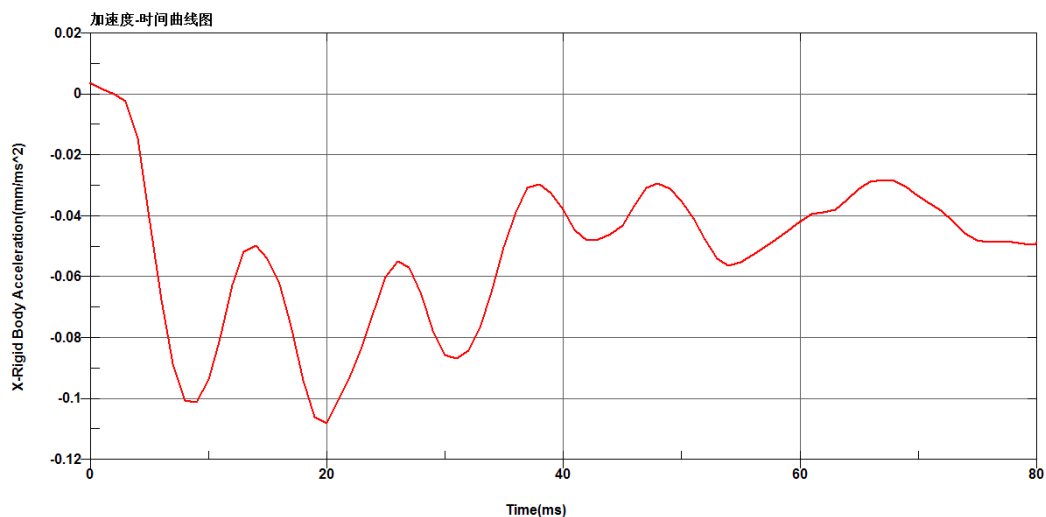


图 14 加速度与时间关系曲线 (15km/h)

车体在  $t=1\text{ms}$  时刻开始发生碰撞,车体结构开始吸收能量,车体最终纵向位移  $141\text{mm}$ ,如图 12 位移与时间关系曲线所示。碰撞能量吸收平稳,从  $1\text{ms}$  开始增加,接近于线性增长,图 13 中能量与时间关系曲线中显示两车碰撞共吸收能量  $167.05\text{kJ}$ 。80ms 时,碰撞车辆速度很小,大部分动能被吸收,只有防爬器与司机室前檐地板发生塑性变形,这两个部件可以进行局部更换。车体客室生存区域结构未发生破坏或塑性变形,有效得提高了车体的防撞性。

## 4 参考文献

- [1] 常树民, 城市轨道车辆防撞性[J], 装备机械, 2009(1):57~64.
- [2] GB/T 7928-2003,地铁车辆通用技术条件[S].
- [3] BS EN 15227-2008,铁路车辆车体的防撞性要求[S].

## Application of HyperWorks in design of city railway vehicle crashworthy structure

**Abstract:** A entity model of a city railway vehicle was imported to HyperWorks software of Altair, in HyperMesh module, the finite element crash model of a city railway vehicle was set up, and the crash simulation was carried out in CAE software. By contrast analysis of the simulation results of the optimized structure, the new structural design was acquired and a reasonable vehicle design was validated.

**Key words:** Railway Vehicle, HyperMesh, Finite Element, Crash, Optimization

作者：刘彬，工程师，从事城市轨道交通车辆设计。联系方式：0731-28465098 湖南株洲电力机车有限公司技术中心，城轨开发部，412001