

列车耐碰撞系统有限元和多体动力学联合仿真

王文斌^{1,2}, 康 康¹, 赵洪伦¹

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2. 柏林工业大学 海洋与陆地交通学院轨道车辆系, 柏林 10587)

摘要: 研究基于有限元和多体动力学技术进行列车耐碰撞系统设计的联合仿真策略. 通过非线性有限元分析获得车辆吸能部件在碰撞时的力—位移关系曲线, 以该曲线模拟车辆连挂之间的非线性弹簧特性, 运用多体动力学技术进行了两列车的碰撞动力学仿真. 通过仿真分析碰撞中列车各车辆间的作用力、变形、速度、加速度以及各个吸能部件的能量吸收等数值, 实现了对新设计列车碰撞被动安全系统总体性能的评估. 与高速碰撞相比, 在中低速碰撞工况下, 头车与第 2 节车体端部连接处吸收的动能占总动能的比例更高. 联合仿真能较真实地模拟列车碰撞的全过程, 验证了联合仿真策略的可行性.

关键词: 列车; 非线性有限元; 多体动力学; 联合仿真; 耐碰撞

中图分类号: U 270.2

文献标识码: A

Joint Simulation of Crashworthy Train Set Based on Finite Element and Multi-body Dynamic

WANG Wenbin^{1,2}, KANG Kang¹, ZHAO Honglun¹

(1. Railway & Urban Mass Transit Institute, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of Rail Vehicles, Institute of Sea and Land Transportation Systems, Technical University Berlin, Berlin D-10587, Germany)

Abstract: Based on non-linear finite element and multi-body dynamics, a simulation strategy is developed to solve the crashworthiness design problem for train sets. The relationship of non-linear springs which describe characters of forces-displacements for energy absorbers during crash event is obtained by analyzing non-linear FEA techniques. Then, a simulation was made for collision of two train sets with multi-body dynamics. The results of impact force, deformation, velocity, acceleration and absorbed energy are analyzed to assess the passive safety of whole train set. Compared to the high velocity impact, the medium and low velocity impact can

be absorbed a higher proportion energy by the interface between cab and the second vehicle. The results indicate that the joining simulation strategy is feasible and effective to simulate the whole process of train collision.

Key words: train set; non-linear finite element; multi-body dynamic; joint simulation; crashworthiness

目前我国城市化进程正在加速进行, 而城市轨道交通因其容量大、速度快和准点等优势, 被很多大中城市列为优先发展的公共交通运输方式, 并得到了快速发展. 与此同时, 车辆运行安全尤其对乘员生命安全造成严重威胁的碰撞事故安全也受到社会的高度关注. 近年来, 欧美国家的车辆被动安全设计技术逐渐成熟, 并进入工程化应用阶段, 根据被动安全设计思想和一些研究项目的经验积累, 制定了相应的碰撞法规. 与此同时, 开展了乘员的二次碰撞问题研究, 以进一步将碰撞事故对乘员造成的伤害最小化^[1-5]. 国内目前的研究主要集中在单节车辆结构吸能分析上, 对列车耐撞击安全较少从列车系统的角度进行研究^[6-10]. Karina M. Jacobsen^[11]的研究表明, 列车各车辆之间缓冲区的吸能设计对列车碰撞性能有很大的影响. 近年来的一些事故也表明, 虽然能量吸收主要由碰撞接触分界面来完成, 但是碰撞过程其实是由整个列车参与的. 因此有必要对整列车而不仅仅对单节车辆进行耐碰撞分析.

车辆耐碰撞分析一般都通过非线性有限元完成, 虽然可以获得碰撞部位的结构变形和应力以判别是否满足设计要求, 但是由于参与碰撞的元件在碰撞中呈现材料与几何的强非线性和接触计算搜索等因素, 与静强度分析相比, 网格要求更精细, 模型规模大, 而运算时间更多达几倍乃至几十倍(视模型大小而变), 即使考虑最简单的 3 节车辆编组的列车碰撞, 进行被动安全系统设计与耐碰撞性能评价都需要较长的时间周期, 因而难以

收稿日期: 2010-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(50905128)

第一作者: 王文斌(1975—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为轨道车辆结构强度与被动安全. E-mail: wangwenbin05@gmail.com

满足企业在车辆概念设计和方案设计快速有效的要求. 多体动力学在列车系统运动学和动力学分析上有较强的优势,但却无法精确地对弹性体碰撞接触部位的变形及其非线性刚度等参数进行计算.在这样的情况下,有必要对简便有效的列车碰撞性能分析技术进行深入研究.本文提出一种联合非线性有限元和刚体动力学技术对整列车的碰撞性能进行分析的方法,可以在方案设计的初始阶段进行车辆纵向刚度分配的优化设计,进而确定各个吸能部件及车体结构的力—位移关系,从而实现优化列车被动安全性能的目标,并通过快速而有效地进行列车被动安全系统的设计和评估,为车辆的结构方案设计提供指导.

1 耐撞击列车碰撞设计准则和联合仿真方法

1.1 耐撞击列车设计准则

列车吸能结构设计的基本原则是:在发生碰撞事故时,吸能结构以有序、可控的结构变形来最大程度地耗散碰撞动能并确保乘客生存区的空间最后被压缩.车体结构按车端和客室区来设计不同的纵向刚度,车端弱刚度部分结构在碰撞时能够以可控的方式产生变形,吸收能量.在结构的破坏过程中,保持塑性压缩载荷值的稳定,以减小碰撞过程对乘客的加速度脉冲和对车体中部客室的破坏.同时,耐碰撞车体吸能结构的设计应满足在正常运行载荷(纵向冲击力和静载荷)条件下,结构具有足够的强度和刚度,并具有良好的纵向力传递性能^[9].

理想的耐撞击轨道车辆撞击载荷和变形关系的示意图如图 1 所示.

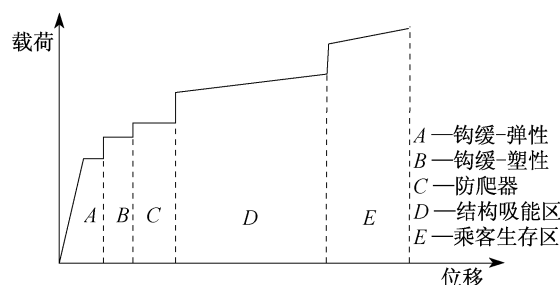


图 1 耐撞击车辆理想的载荷—位移关系示意

Fig.1 Force-displacement character of crashworthy vehicle

1.2 联合仿真设计的方法及流程

由于多体动力学和非线性有限元均无法满足耐碰撞列车设计的要求,本文提出了联合这 2 种技术

的联合仿真方法. 首先通过车辆端部局部结构的非线性有限元碰撞仿真,得到车辆端部吸能结构的力—变形特性.然后运用多体动力学技术,以列车端部吸能结构的力—变形特性作为非线性弹簧的刚度曲线,完成列车各车辆之间的连接,仿真列车在碰撞工况下的整体运动特性.最后,在得到列车碰撞加速度的基础上,对客室内的乘员进行二次碰撞仿真分析,从而最终判断列车乘员的安全性.在这个过程中,可以不断地修正列车或车辆的一些结构参数,以优化列车的耐碰撞安全性.列车耐碰撞结构的设计流程如图 2 所示.

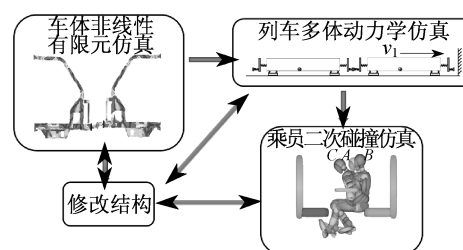


图 2 耐碰撞仿真设计流程

Fig.2 Train crashworthiness design flowchart

2 车辆吸能部件力—位移曲线的确定

本文以某一地铁列车为例,为了得到车辆各个吸能部件的力—位移曲线,在非线性有限元软件 MSC. Dytran 中用单一车辆与另一静止的相同质量的车辆正面碰撞,得到撞击力和车辆结构变形量之间的关系,即车辆端部吸能结构的刚度曲线.为保证乘员的安全,车辆端部的强度低于车体中部客室区的强度,即碰撞时车体端部先于车体中部开始变形^[7].所以,在仿真中需要得到列车头车司机室以及列车其他车辆之间的端部连接的刚度曲线.

2.1 司机室头车的碰撞刚度曲线

车体碰撞采用整备状态下车体以给定速度正面撞向另一静止的相同结构车体的方式予以模拟,假设两车在垂直和水平方向上都没有偏置,在理想状态下对中碰撞,如图 3 所示.



图 3 头车车体碰撞有限元模型

Fig.3 Crashworthy FEA model of cab car

为考察碰撞速度对刚度曲线的影响,分别用 25, 50 和 60 km·h⁻¹ 不同的速度碰撞,通过仿真分析,可得到如图 4 到图 6 所示的不同速度下端部结构的

撞击力和车体端部的变形曲线、防爬器吸能曲线和车体吸能曲线比较.由这 3 幅图可以看出,在不同的碰撞速度下头车司机室的碰撞性能曲线趋势基本上是一致的.

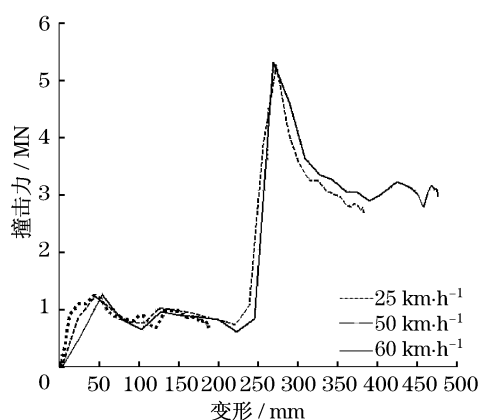


图 4 头车撞击力—变形曲线

Fig.4 Impact force-crush characteristics of cab car

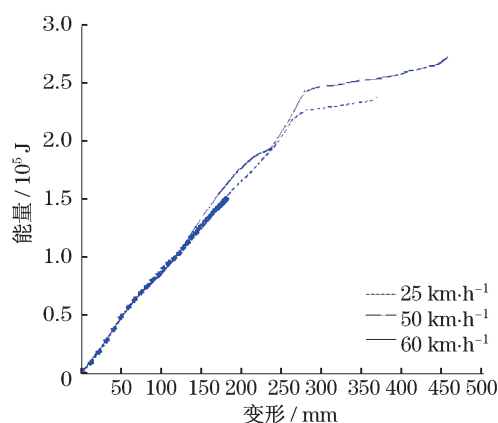


图 5 防爬器吸能—变形曲线

Fig.5 The absorbed energy of anti-climber and deformation

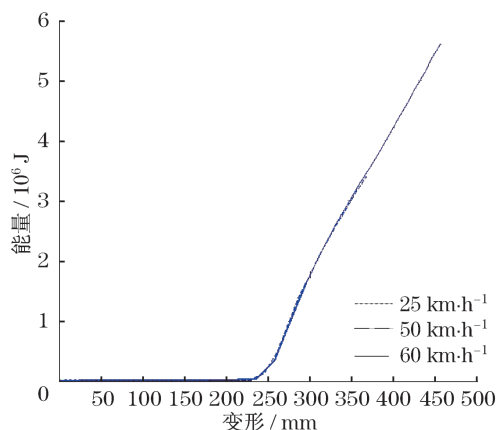


图 6 司机室吸能—变形曲线

Fig.6 The absorbed energy of cab and deformation

2.2 中间车车体端部刚度曲线

中间车体端部的碰撞采用整备状态下的一节中间车撞击另外一辆静止的相同结构的中间车车体的方式予以模拟.中间车端部采用非线性有限单元模拟,其他部分的车体结构用一集中质量点单元来代替,这样简化后的碰撞模型如图 7 所示.假设两车在垂直和水平方向上都没有偏置,在理想状态下对中碰撞.

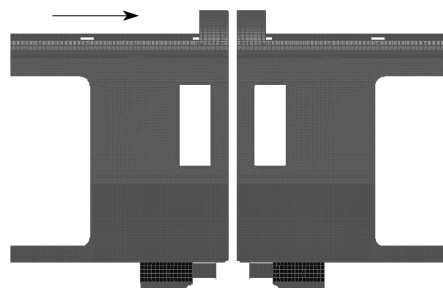


图 7 中间车端部碰撞示意图

Fig.7 End of middle car structure crash model

同头车一样,对中间车 25,50 和 60 km·h⁻¹不同速度下的碰撞进行了分析.结果表明,在不同的撞击速度下,中间车的碰撞性能曲线基本趋于一致.

因此,对于确定结构的车辆,可以根据碰撞速度的情况,在整列车的多体动力学碰撞模拟中采用 1 条合适的碰撞性能刚度曲线来代表车体端部吸能结构的力学性能.

3 基于有限元碰撞分析的列车多体动力学仿真

在得到车体端部吸能结构的力学特性曲线之后,利用多体动力学技术建立了两列车的纵向碰撞模型.列车中部用刚体来模拟,列车端部及连接则用非线性弹簧来分别替代,弹簧刚度分别来自根据车钩供应商提供的车钩缓冲装置力学性能曲线和非线性有限元仿真得到的防爬器及车体端部的碰撞力—变形曲线.根据欧洲标准 EN 15227 中的工况,一列地铁列车以 25 km·h⁻¹ (7 m·s⁻¹) 速度与另一相同编组静止列车正面碰撞,如图 8 所示.碰撞仿真中,假设列车端部和各车辆之间均安装有防爬吸能装置,每节车体质量为 40 t,车辆碰撞后仍在轨道上并保持直线状态,车钩最大行程为 150 mm,在车钩失效并空走 60 mm 后,防爬器开始接触吸能,防爬器最大可压缩变形为 200 mm,即在压缩 410 mm 后,车体结构也开始碰撞吸能.车辆端部连接的空间关系如图 9 所示.



图 8 列车碰撞示意图

Fig.8 The crash model of train sets

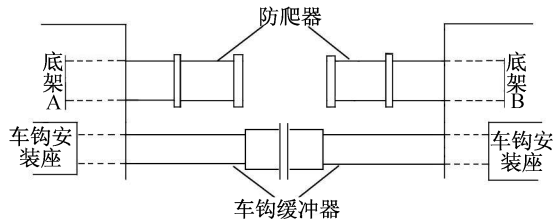


图 9 车辆端部连接示意图

Fig.9 Connection of the middle cars

碰撞后车辆各个分界面间撞击力的时间历程如图 10 所示. 由图中可以看出, 分界面 A1-B1, A1-A2 和 B1-B2 上的撞击力比较大, 分别达到了 4 400 和 2 500 kN. 其他分界面上的载荷都没有超过 1 200 kN, 车钩均未出现失效情况.

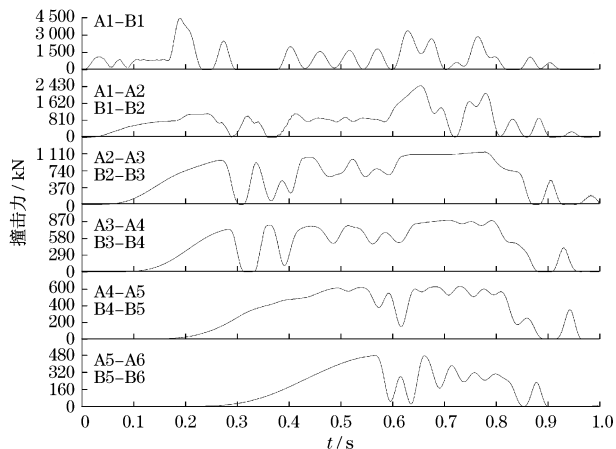


图 10 列车各分界面撞击力—时间曲线

Fig.10 Interfaces of train sets force-time histories

由图 11 和图 12 可以看出, 在 0.2 s 处, 两车界面上 A 车单侧最大变形压缩量已经达到 0.5 m, 根据车钩与防爬器的最大行程为 410 mm 来判断, 可知碰撞分界面上的车钩已经失效, 防爬器也已经完全变形, 司机室结构已经接触, 此时分界面撞击力也到达峰值. 而在 0.65 s 的时候, 列车第 1 节和第 2 节车体分界面的单侧变形也达到了 460 mm, 此时车钩和防爬器已经失效, 分界面两侧的车体结构开始接触, 因此碰撞力也达到了另一个峰值, 为 2 500 kN. 由图 13 中的速度曲线可以看到, 在碰撞 0.82 s 后, 两列车以相同的速度前进.

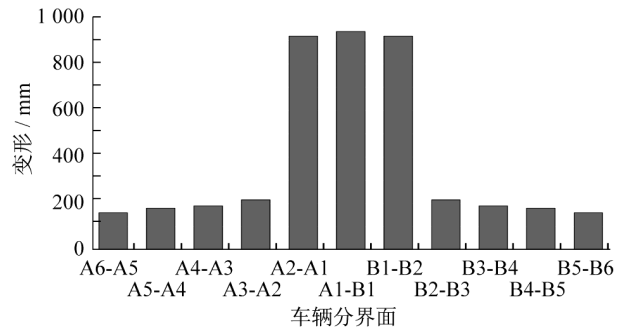


图 11 列车分界面变形图

Fig.11 Deformation of train set interfaces

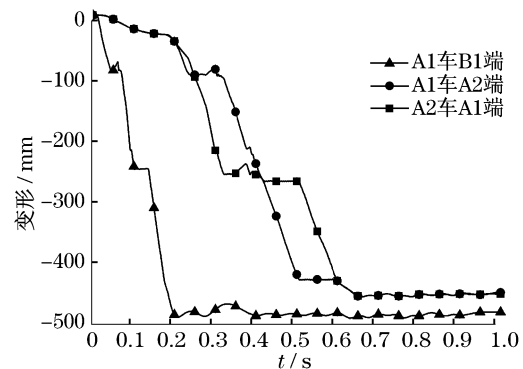


图 12 A1 车两端部吸能区的变形时间历程

Fig.12 Deformation-time histories of the A1 car end absorbed structure

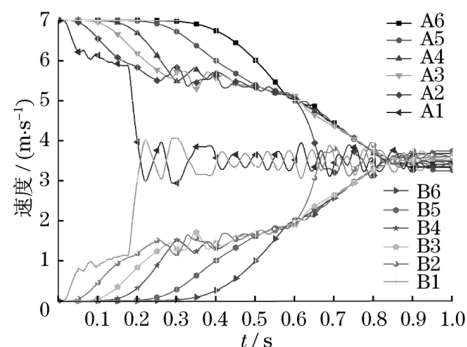


图 13 列车各车辆碰撞后速度

Fig.13 Train sets velocity-time histories after collision

在 $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的碰撞速度下, 列车吸能主要由碰撞分界面及其与之相邻的最近的 2 个分界面来完成, 3 个分界面吸能约占总能量的 90%, 而且 A1-A2 和

B1-B2 分界面吸收的能量也是较高的,约为 A1-B1 分界面的 80%. 将这一结果与文献[12]给出的列车以 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度碰撞工况相比,在较高速度碰撞时,两列车的头车碰撞界面 A1-B1 吸收的动能是 2 个相邻分界面吸收动能的 2 倍多,这也验证了:列车碰撞速度越高,头车碰撞界面产生的动能占整列车的比例越大.因而在速度不太高的碰撞工况中,仅仅关注头车碰撞面的能量吸能是不够的,必须考虑整列车的动能,尤其 2 个头车后端相邻分界面的能量吸收,以提高列车的耐碰撞性能.

由图 14 可知,在 0.2 s 时 A1 和 B1 车的最大加速度达到了 $9.0g$,也就是在头车的车钩和防爬器均已经失效,车体开始接触的瞬间.若要降低加速度的峰值,需要合理地设计防爬器和车体的刚度曲线的过渡连接,以减少突变.

在地铁车辆运用中,很多属于低速碰撞,为了减少碰撞对车体和乘员的伤害,有必要改善列车后续车辆的端部吸能结构设计,比如除了在头车安装防爬吸能装置外,在后续车辆之间也应加装此类吸能装置,增加列车的碰撞能量吸收能力,减少刚性冲击对车体结构和乘员的伤害.同时,列车纵向各个吸能部件的刚度曲线匹配也要合理,保证列车在发生碰撞时合理有序的变形.

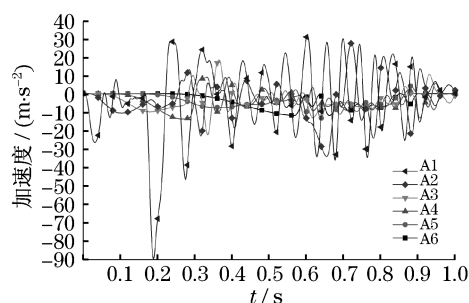


图 14 A 列车各车辆加速度

Fig.14 Acceleration of train set A

4 结论

(1) 在中低速碰撞工况下,除了首当其冲的碰撞面——头车前端部外,头车与第 2 节车体端部连接处吸收的动能占有较大比例;因而这些部位的吸能设计也应予以充分重视.这也证实了,对以较低速度运行的城市轨道交通车辆,必须从列车系统着手,而不应仅从单节车辆的角度来进行被动安全设计以及碰撞性能评价.

(2) 本文提出的采用联合仿真方法进行列车耐碰撞性能分析是可行的.该方法对于列车整体的被动安全设计和后续的列车耐碰撞性能优化具有积极的现实意义.

参考文献:

- [1] Lu G. Energy absorption requirement for crashworthy vehicles [J]. IMechE: Part F, 2002, 216: 31.
- [2] Sutton A. The development of rail vehicle crashworthiness [J]. IMechE: Part F, 2002, 216: 97.
- [3] Lewis J H. Structural crashworthiness-possibilities and practicalities [J]. IMechE: Part F, 2002, 216: 117.
- [4] David Tyrell. US rail equipment crashworthiness standards [J]. IMechE: Part F, 2002, 216: 123.
- [5] David Tyrell. Rail passenger equipment accidents and the evaluation of crashworthiness strategies [J]. IMechE: Part F, 2002, 216: 131.
- [6] 王文斌. 轨道车辆耐碰撞结构及乘员安全防护技术研究 [D]. 上海: 同济大学机械工程学院, 2006.
WANG Wenbin. The crashworthiness design of railway vehicle and passive safety of occupant [D]. Shanghai: Tongji University. College of Mechanical Engineering, 2006.
- [7] 王文斌, 赵洪伦. 高速客车轻量化车体耐碰撞结构的优化设计 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(11): 1499.
WANG Wenbin, ZHAO Honglun. Lightweight design of crashworthy carbody structure for high-speed passenger train based on optimization [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(11): 1499.
- [8] 刘金朝, 房加志, 王成国, 等. 铁道客车大变形碰撞仿真研究 [J]. 中国铁道科学, 2004, 25(6): 1.
LIU Jinzhao, FANG Jiazhi, WANG Chengguo, et al. Simulation research on finite deformation crashworthiness of railway passenger car [J]. China Railway Science, 2004, 25(6): 1.
- [9] 田红旗. 客运列车耐冲击吸能车体设计方法 [J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(1): 110.
TIAN Hongqi. Crashworthy energy absorbing car-body design method for passenger train [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(1): 110.
- [10] 房加志. 轨道车辆碰撞以及结构优化的仿真研究 [D]. 北京: 中国农业大学理学院, 2005.
FANG Jiazhi. Simulation study on crash of railway passenger vehicle and structure optimization [D]. Beijing: China Agricultural University. College of Science, 2005.
- [11] Karina J M. Collision dynamics modeling of crash energy management passenger rail equipment [D]. [S. l.]: Tufts University, 2008.
- [12] 陆冠东. 铁道车辆的耐碰撞性设计 [J]. 铁道车辆, 2007, 45(10): 1.
LU Guandong. The bumping resistance design for rolling stock [J]. Rolling Stock, 2007, 45(10): 1.