

城市有轨电车碰撞联合仿真

周和超, 徐世洲

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 提出非线性有限元和多刚体动力学联合仿真的方法对现代有轨电车碰撞进行模拟, 仿真计算结果表明, 在有轨电车与刚性障碍物倾斜碰撞的过程中, 碰撞角度对车辆是否脱轨具有决定性的影响. 随着碰撞角度的增加, 车辆脱轨的风险急剧上升. 通常情况下为了防止有轨电车碰撞脱轨, 最大的撞击角度应低于 25° . 此外, 轮轨摩擦系数对有轨电车碰撞过程中的脱轨也具有明显的影响. 当轮轨摩擦系数由于雨雪等天气因素降低时, 一方面车辆所需要的制动距离明显增加, 更容易造成有轨电车碰撞事故的发生; 另一方面钢轨对于车轮运动的抑制作用减弱, 加大了车辆脱轨的风险.

关键词: 有轨电车; 碰撞; 脱轨; 仿真

中图分类号: U270.2

文献标志码: A

Research on the City Tram Collision Simulation

ZHOU Hechao, XU Shizhou

(Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In this paper a simulation strategy based on the finite element analyse and multi-body dynamics has been proposed for the collision analyse between a city tram and an oblique obstacle. According to the simulation results the impact angle has been identified as the most determinate factor during the collision between a city tram and an oblique obstacle. With the increased impact angle, the derailment risk of the collided city tram rise significantly. In order to avoid the derailment the maximum impact angle should be reduced to 25° . Besides that, the derailment risk of the collided city tram is also affected by the friction coefficient between wheel and rail. When the friction coefficient decreases due to bad weather, the braking distance of city tram increases, so that the collision accident is more likely to occur. On the other hand, the reduced friction coefficient decreases the wheel-rail forces against the lateral motion of wheel sets. As a result, the collided city tram is more likely to derail.

Key words: city tram; collision; derailment; simulation

随着社会经济的发展以及居民生活水平的不断提高, 城市化、机动化进程加快, 引发严重的交通、环境和能源问题. 为缓解大、中城市出现的交通拥堵、减轻环境污染、节约社会资源, 建设节约型社会, 需要大力发展城市公共交通. 由于现代有轨电车相比地铁、轻轨等轨道交通具有投资少、建设周期短的特点, 相比于常规公共汽车具有运营能力高等优点, 越来越多的城市选择有轨电车来缓解交通压力. 目前, 长春、大连、天津、上海、苏州等地已陆续开通有轨电车线路, 在建或规划的现代有轨电车线路已经达 50 多条, 规划总里程超过 2 000 km^[1]. 现代有轨电车作为一种路面交通方式, 与其他地面交通车辆共享路权, 导致其碰撞事故发生的风险明显高于传统的铁路客车以及地铁或轻轨, 例如长春、苏州、大连等地开通的有轨电车已经出现多起碰撞事故.

目前对于轨道车辆耐碰撞性的研究主要集中在高速列车^[2-6]和地铁^[7-9], 对于城市有轨电车的碰撞分析则相对较少^[10-11]. 此外, 车辆耐碰撞分析一般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, 导致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, 难以满足企业在车辆概念设计和方案设计时快速有效的需求^[12]. 多刚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. 为此, 本文联合非线性有限元和多刚体动力学的技术特点, 对现代有轨电车碰撞进行仿真分析.

收稿日期: 2016-06-15

基金项目: 上海市浦江人才计划(16PJ1409500)

第一作者: 周和超(1985—), 男, 助理教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道车辆被动安全.

E-mail: zhouhechao@tongji.edu.cn

1 联合仿真设计的方法及流程

多刚体动力学和非线性有限元对轨道车辆碰撞联合仿真的技术路线参见图 1. 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,然后运用多刚体动力学技术,以车辆端部吸能结构的力-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.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,完善计算模型、提高计算准确度,亦可利用得到的列车碰撞加速

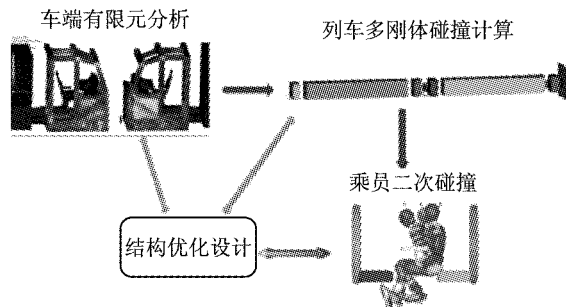


图 1 联合仿真设计流程

Fig.1 Simulation flow for the train collision

2 有轨电车碰撞仿真模型

2.1 有轨电车动力学模型

利用多刚体动力学软件 Simpack 建立有轨电车动力学模型(图 2),该模型由 5 节车辆模块编组而成,各车辆之间通过铰接结构进行连接,车辆两端设有前、后司机室.整个有轨电车模型包含车体、转向架、轮对和连接组件,其中一系悬挂由三方向的线性弹簧组成,二系悬挂包括垂向减振器、弹簧和横向止挡.有轨电车动力学计算参数见表 1.

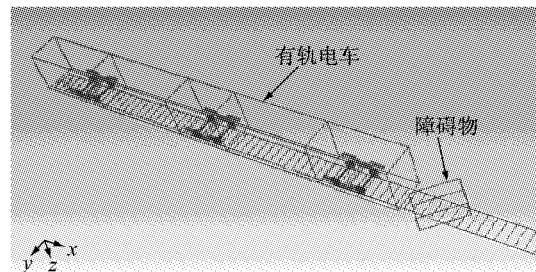


图 2 有轨电车碰撞模型

Fig.2 Tram collision model

表 1 有轨电车计算参数

Tab.1 Basic parameters of tram

线密度/ (kg · m ⁻¹)	质量/kg		一系弹簧刚度/(10 ⁶ N · m ⁻¹)			二系弹簧刚度/(10 ⁶ N · m ⁻¹)			二系垂向阻尼/ (10 ³ N · s · m ⁻¹)	二系横向 间隙/m	车轮半 径/m
	转向架	轮对	垂向	横向	纵向	垂向	横向	纵向			
1 150	2 200	750	1.0	5.0	5.0	0.8	1.0	1.0	1	0.015	0.3

2.2 吸能元件的力学特性

现代有轨电车在结构设计时均考虑了耐碰撞性能,具体体现在司机室前端安装了防爬吸能装置,用以吸收车辆发生碰撞时自身所携带的动能.根据防爬吸能装置的有限元分析(图 3)^[13]可获得司机室端部碰撞力-变形曲线,并利用 Simpack 软件的 196 号力元“FE196:弹塑性弹簧”来简化模拟(图 4).

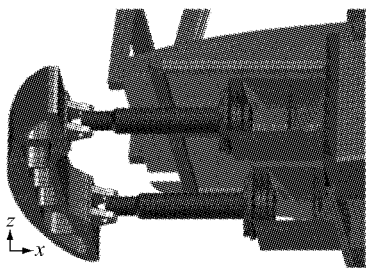


图 3 有轨电车车端结构有限元分析

Fig.3 Finite element simulation of tram end structure

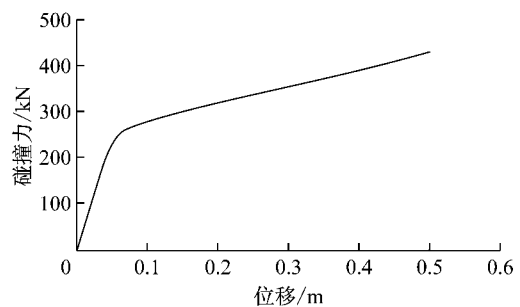


图 4 有轨电车车端结构简化曲线

Fig.4 Force-displacement diagram of the tram end structure

3 有轨电车碰撞仿真分析

3.1 有轨电车与倾斜障碍物碰撞研究

针对有轨电车与地面交通车辆在混合运行时容易发生的碰撞事故,选取规范^[14](EN15227)中相对

应的碰撞工况 3 进行仿真计算(图 5),其中有轨电车以 $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速率与 3t 刚性障碍物(相当于小型卡车质量)发生 45° 倾斜碰撞,刚性障碍物覆盖车辆整个横截面,并具有 x, y 2 个方向的平动自由度.

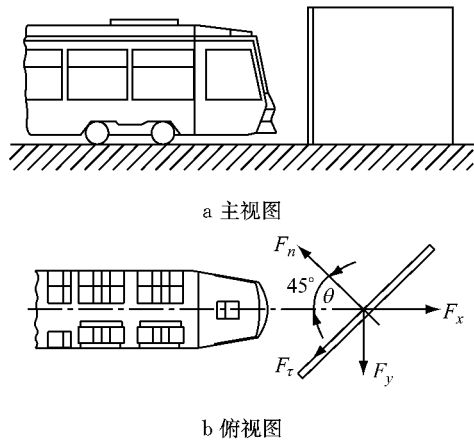


图 5 有轨电车碰撞工况

Fig.5 Corner obstacle collision scenario

图 6 显示的是有轨电车碰撞过程中的速度和加速度大小的历程,其中有轨电车最大减速度大小为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,远小于 EN15227 中规定的 $7.5 g$,刚性障碍物(小型卡车)由于质量相对较小,其最大加速度大小为 $95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,超过 EN15227 中的规定,这也意味着有轨电车与障碍物碰撞的过程中,有轨电车内的乘客冲击较小,比较安全,而障碍物(小型卡车)内的乘员冲击较大,更加危险.

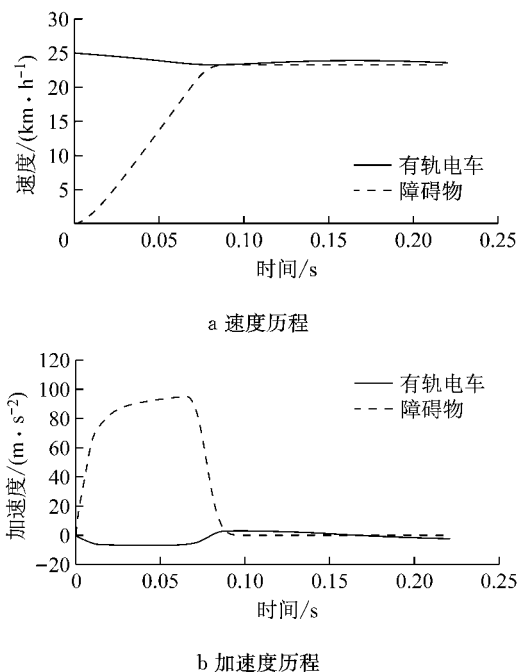


图 6 有轨电车碰撞速度和加速度历程

Fig.6 Velocities and accelerations of the tram and obstacle

由图 7 可见,最大碰撞力为 300 kN,最大塑性变形为 0.14 m. 结合图 4 可以看出,碰撞后有轨电车端部的防爬吸能装置仅发生了较少部分的塑性变形,整个缓冲吸能系统仍具有较高的剩余余量,有轨电车的主体结构没有受到损坏.

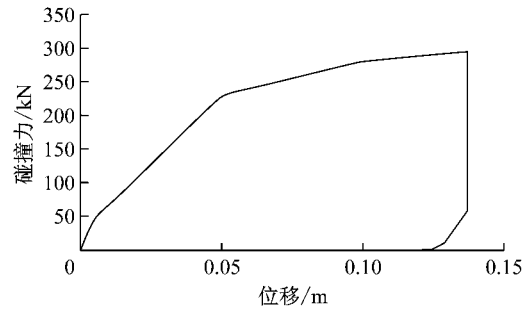


图 7 有轨电车碰撞时法向碰撞力
Fig.7 Normal impact force of the tram

由于有轨电车与障碍物发生 45° 倾斜碰撞,法向碰撞力会在横向(图 5 中 y 轴方向)产生一定的分量,并在碰撞过程中推动有轨电车向左移动. 该横向碰撞力将先后通过有轨电车的二系弹簧、横向止挡以及一系弹簧传递到各个轮对. 图 8 显示的是有轨电车一位轮对左右车轮的脱轨系数,从中可以清楚看出在 0.065 s 时,左侧车轮的脱轨系数达到最大值 3.41,超过国标《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》(GB5599—1985)^[15] 中的相关规定(1.2),而右侧车轮的脱轨系数为零. 结合仿真(图 9)可知,此时有轨电车在巨大的横向碰撞力作用下轮对撞击左侧钢轨,同时由于横向碰撞力形成的侧滚力矩导致车体绕着左侧轮轨接触点侧滚,轮对右侧轴重全部转移到左侧车轮,从而导致右侧车轮跳起,极易引发有轨电车的脱轨. 此外,整个有轨电车碰撞仿真仅占用 CPU 几分钟的计算时间,相比于几十个小时的有限元碰撞分析方法具有明显的计算速度优势.

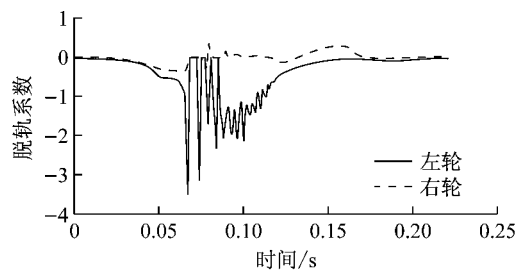


图 8 左右车轮脱轨系数
Fig.8 Derailment coefficients of the left and right wheels

3.2 碰撞角度对有轨电车脱轨风险的影响

根据仿真分析可知,有轨电车与障碍物以 45° 的

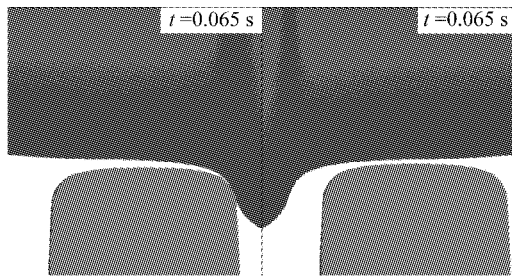


图 9 轮轨接触仿真

Fig.9 Simulation of the wheel-rail contact

角度倾斜碰撞时极易引发车辆的脱轨. 图 10 显示的是不同碰撞角度下轮对脱轨系数的最大值, 从中可见, 随着有轨电车与障碍物碰撞角度的不断增加, 轮对脱轨系数明显上升, 当碰撞角度超过 25° 时脱轨系数超过标准规定限值, 容易引发有轨电车的脱轨.

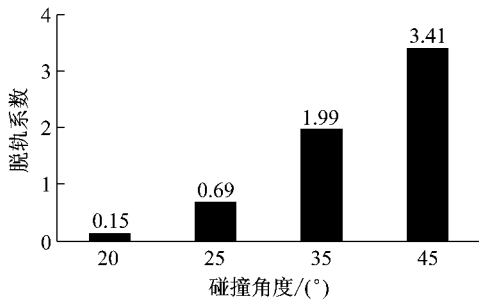
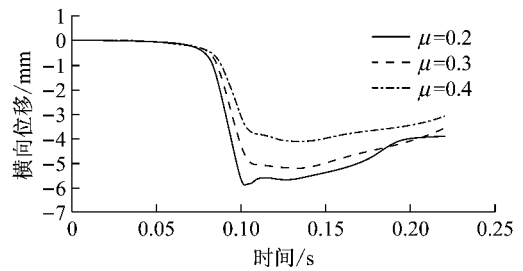


图 10 碰撞角度对脱轨系数的影响

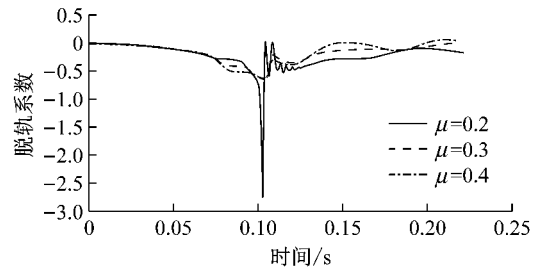
Fig.10 Effects of the impact angle on the derailment coefficient

3.3 轮轨摩擦系数对有轨电车脱轨风险的影响

车轮与钢轨之间的摩擦系数是决定轮轨作用力的因素. 在有轨电车与障碍物倾斜碰撞的过程中, 碰撞力的横向分量导致车体向左侧运动(图 5), 并使左侧车轮与钢轨形成轮缘接触(图 9), 此时的轮轨摩擦力将抑制轮对的进一步横移和向上的爬升. 当轮轨摩擦系数由于雨雪等气候因素降低时该抑制作用也会下降, 导致轮对的横移量增加, 例如, 图 11a 显示的不同轮轨摩擦系数下有轨电车与障碍物以 25° 的角度倾斜碰撞时轮对的横移量, 当轮轨摩擦系数从 0.4 降低到 0.2 时, 轮对的最大横移量从 4.1 mm 增加到 5.9 mm. 同时左侧轮轨接触点也逐渐上升, 加大了轮对爬轨的风险. 图 11b 显示的是轮轨摩擦系数对轮对脱轨系数的影响, 从中可以清楚看出, 当轮轨摩擦系数降低到 0.2 时, 脱轨系数升高到 2.67, 超过标准规定限值, 这也意味着有轨电车可能发生脱轨. 此外, 当轮轨摩擦系数减小时, 车辆所需要的制动距离明显增加, 也更容易造成有轨电车碰撞事故的发生.



a 横向位移



b 脱轨系数

图 11 摩擦系数对横向位移和脱轨系数的影响

Fig.11 Effects of the friction coefficient on the wheelset lateral displacement and derailment coefficient

4 结论

(1) 提出非线性有限元和多刚体动力学联合仿真的方法对现代有轨电车进行碰撞研究, 该方法可大幅度地减少计算时间, 并广泛适用于轨道车辆碰撞事故的重现模拟、车辆结构的被动安全设计以及后续性能优化.

(2) 现代有轨电车与刚性障碍物倾斜碰撞过程中, 碰撞角度对车辆是否脱轨具有决定性影响. 随碰撞角度增加, 车辆脱轨风险急剧上升. 若参照 EN15227 标准中的规定, 有轨电车与刚性障碍物进行 45° 的倾斜碰撞, 其脱轨系数高达 3.41. 通常为为了防止脱轨现象的发生, 最大碰撞角度应低于 25°.

(3) 轮轨摩擦系数对有轨电车碰撞过程中的脱轨现象也具有明显的影响. 当轮轨摩擦系数由于雨雪等气候因素降低时, 一方面车辆所需要的制动距离明显增加, 更容易造成有轨电车碰撞事故的发生; 另一方面钢轨对于车轮运动的抑制作用减弱, 加大了车辆脱轨的风险.

参考文献:

[1] 彭丰. 半独立路权条件下有轨电车交叉口信号控制仿真优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.