

现代有轨电车碰撞脱轨影响因素

杨利军, 张超, 周和超, 詹军

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 运用多刚体动力学理论对有轨电车与汽车在平交道口的碰撞进行仿真分析. 研究表明有轨电车在平交道口受到汽车以 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度侧面撞击时, 有轨电车的最大脱轨系数达到 1.63, 超过标准 GB5599—1985 中规定的第一限度(1.2), 具有较大的脱轨风险. 此外, 撞击后有轨电车的动态响应以及脱轨风险在很大程度上受到碰撞边界条件的影响. 当汽车撞击有轨电车前后两端头车时, 被撞击车辆承受的横向碰撞力仅能通过一侧的车间铰接结构向其他车辆进行传递, 导致有轨电车脱轨系数较高. 随着汽车质量和撞击速度的增加, 碰撞力显著增加, 有轨电车的脱轨系数也逐渐加大. 当有轨电车撞击点与车体质心间距的逐渐加大, 被撞击车辆除了承受剧烈的横向冲击还产生一定的摇头运动, 加剧有轨电车碰撞后脱轨的风险. 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, 加大了有轨电车脱轨的风险.

关键词: 有轨电车; 汽车; 平交道口; 碰撞; 脱轨

中图分类号: U270.2

文献标志码: A

Impact Factors on City Tram Derailment During Collision

YANG Lijun, ZHANG Chao, ZHOU Hechao, ZHAN Jun

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

Abstract: The collision simulation between a city tram and an automobile at the level crossing was carried out based on the multi-body dynamics. The simulation results indicated that when the city tram was impacted laterally by an automobile at the speed of $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, the maximum derailment coefficient of the city tram was 1.63, exceeding the first limit (1.2) defined in the standard GB5599—1985, which meant the collided city tram was at a high risk for derailing. Besides that, the dynamic response and the derailment risk of the

collided city tram were affected seriously by the collision boundary conditions. When the first or the last vehicle of the city tram was collided by the automobile, the lateral impact load could be transmitted to the adjacent vehicle by only one side, which resulted in a high derailment coefficient. In addition, the increasing of the impact mass and the speed of the automobile would increase the impact force obviously. As a result, the derailment coefficient of the city tram increased. If the distance between the impact point and the mass center of the car body increased, the collided city tram endured not only the lateral impact force but also the yaw moment, and therefore, it was at a high risk for derailment. Finally, a bad weather might cause collision accidents as well. The wheel-rail forces against the lateral motion of wheel sets decreased, a derailing was likely to occur.

Key words: city tram; automobile; level crossing; collision; derailment

我国社会的高速发展与城市化进程的加快, 交通拥堵日益加剧, 带来了一系列的社会问题和环境问题. 大力发展公共交通、形成多层次的公共交通网络被视为解决这一问题的良策. 现代有轨电车作为一种介于地铁、轻轨与常规地面公交之间的载运工具, 以其运量适中、清洁环保、投资少、可靠性较高等特点迎来了高速发展. 截至 2016 年 5 月, 我国已有 11 个城市通车运营有轨电车, 其总里程达到 214 km, 在建或规划的有轨电车线路达 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

收稿日期: 2017-04-19

基金项目: 上海市浦江人才计划(16PJ1409500); 中央高校基本科研业务费专项基金(kx0286020172695)

第一作者: 杨利军(1974—), 男, 工学博士, 主要研究方向为轨道车辆结构设计. E-mail: yanglijun_wangpan@163.com

通讯作者: 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

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,由于现代有轨电车采用独立旋转车轮技术降低车体地板面与轨面的距离,一旦有轨电车发生碰撞脱轨事故,传统的地铁复轨救援机构(复轨桥、滚盘滑车、多级式油缸)无法直接放置在有轨电车底部,需要液压起复机等设备对脱轨车辆进行复轨作业^[12].因此,有轨电车脱轨后往往造成较长时间的交通拥堵.为此,本文运用多刚体动力学理论模拟有轨电车在平交道口发生的碰撞事故,并重点分析有轨电车碰撞脱轨的影响因素.

1 有轨电车平交道口碰撞模型

运用多体动力学软件 Simpack 建立有轨电车与汽车在平交道口的碰撞场景如图 1 所示,其中汽车以恒定速度从侧面撞击有轨电车,并选用脱轨系数(Y/Q)作为主要评价指标,评估有轨电车碰撞后的脱轨风险.

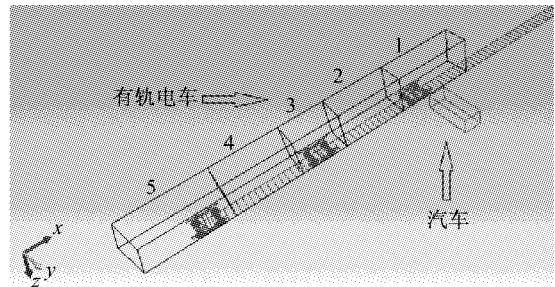


图 1 有轨电车与汽车平交道口碰撞模型

Fig. 1 Collision model between city tram and automobile at level crossing

1.1 有轨电车动力学模型

有轨电车主要由 5 个模块组成,包括 3 个转向架模块和 2 个悬浮模块,其中悬浮模块通过特定的铰接装置与转向架模块进行连接,如图 2 所示.对于转向架模块,车体通过弹簧、垂向减振器以及横向止挡与转向架构架连接,转向架构架通过一系列线性弹簧与轮对相互连接,如图 3 所示.车轮与钢轨之间的作用力采用经典的 Kalker 蠕滑理论进行求解.有轨

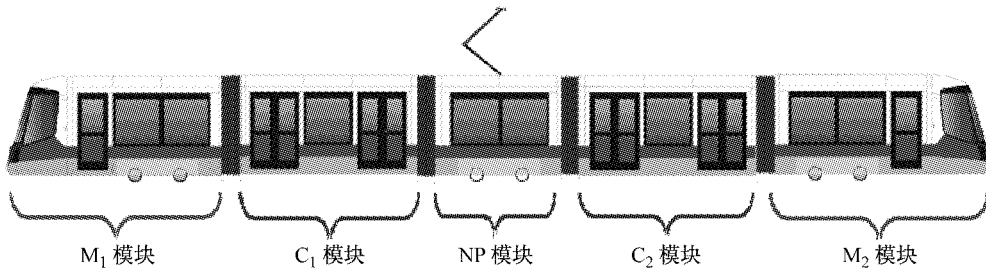


图 2 有轨电车示意图

Fig. 2 Sketch diagram of city tram

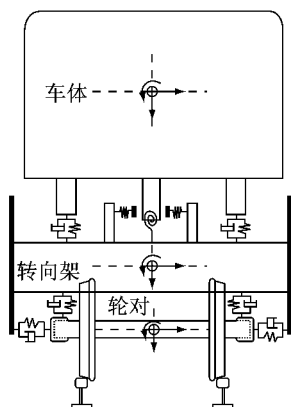


图 3 有轨电车转向架模块示意图

Fig. 3 Sketch diagram of the module with bogie

电车载荷工况以及动力学模型计算参数见表 1 和表 2.

1.2 汽车动力学模型

由于本文主要研究碰撞后有轨电车的动态响

应,因此将汽车简化为具有相应质量的刚体,并以一定速度从侧面垂直撞击有轨电车.考虑到有轨电车站车体底架的刚度远高于汽车的前端刚度,因而在碰撞过程中主要是汽车前端发生较为严重的塑性变形并吸收大部分的碰撞能量.文献[13]通过汽车碰撞试验获取了不同型号汽车前端的刚度特性曲线,如图 4 所示,主要包括以下 3 个阶段:

(1)保险杠变形:碰撞发生后,汽车保险杠首先与有轨电车站车体底架接触并通过塑性变形吸收部分碰撞能量.

(2)端部结构变形:碰撞速度较高时,保险杠完全压溃,汽车端部结构逐步发生塑性变形吸收碰撞能量.

(3)司机室变形:当车端结构完全压溃后,汽车司机室与有轨电车站车体底架进一步撞击,导致碰撞界面作用力大幅增加.

表 1 有轨电车载荷工况

Tab.1 Loading conditions of city tram

负载	M ₁ 模 块/kg	X/ mm	Y/ mm	Z/ mm	C ₁ 模 块/kg	X/ mm	Y/ mm	Z/ mm	NP 模 块/kg	X/ mm	Y/ mm	Z/ mm	C ₂ 模 块/kg	X/ mm	Y/ mm	Z/ mm	M ₂ 模 块/kg	X/ mm	Y/ mm	Z/ mm
AW0 空载	11 910	3 107	2	1 149	5 569	3 185	34	1 840	8 696	2 249	2	1 253	5 511	3 102	-21	1 835	11 852	3 105	2	1 153
AW1 座客载荷	12 886	3 046	1	1 149	5 813	3 189	64	1 811	9 672	2 253	2	1 242	5 755	3 110	-53	1 806	12 828	3 043	2	1 153
AW2 定员载荷	14 951	3 085	1	1 170	10 706	3 232	18	1 577	10 847	2 257	2	1 249	10 648	3 189	-12	1 573	14 893	3 083	1	1 174
AW3 超员载荷	15 639	3 096	1	1 175	12 338	3 238	11	1 541	11 239	2 258	2	1 250	12 279	3 202	-6	1 537	15 581	3 094	1	1 179

表 2 有轨电车动力学计算参数

Tab.2 Basic parameters of city tram

质量/kg		一系弹簧刚度/ $10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$			二系弹簧刚度/ $10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$			二系垂向阻尼/ $10^3 \text{ Ns} \cdot \text{m}^{-1}$	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			
1 670	750	1	5	5	0.8	1	1	5	0.008	0.335

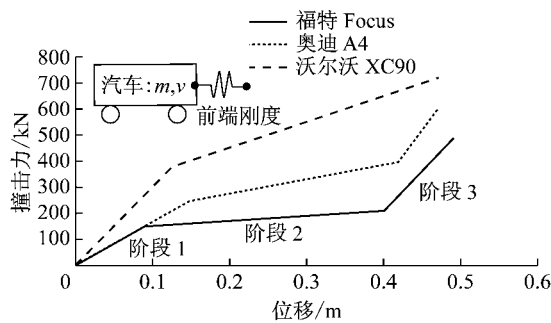


图 4 汽车前端刚度特性

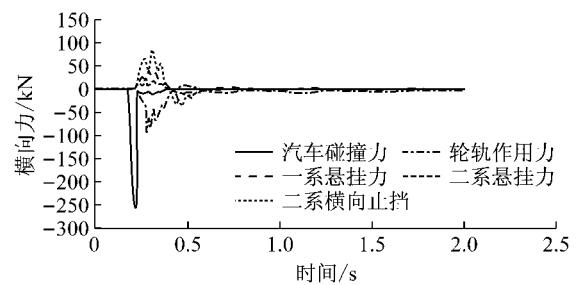
Fig.4 Force-displacement diagram of the automobile

为了准确地模拟汽车撞击有轨电车时汽车端部的塑性变形和碰撞吸能特性,本文利用 Simpack 软件中 196 号力元“FE196:弹塑性弹簧”并参照图 4 中汽车端部的刚度特性曲线来模拟汽车与有轨电车的碰撞力.该碰撞力分别作用在汽车的保险杠和有轨电车转向架上方的底架处,距离轨面高度为 0.3 m.

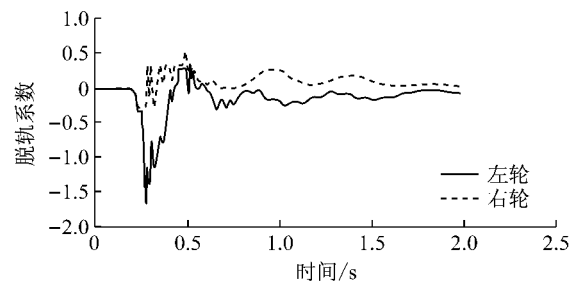
如图 1 所示,当有轨电车在平交道口受到汽车以 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度横向撞击时,有轨电车车体在横向碰撞力的作用下向左侧移动,并撞击横向止挡,将碰撞力传递到转向架构架,然后通过一系弹簧传递到独立轮对,并通过轮轨摩擦力实现整个系统的平衡.从图 5 中可以看出,有轨电车受到的最大横向碰撞力为 259 kN,轮轨横向力最大值为 103 kN,与此同时有轨电车最大脱轨系数在 0.288 s 达到最大值 1.63,超过标准 GB5599—1985^[14] 中规定的第一限度 1.2,这也意味着有轨电车在碰撞过程中具有脱轨的风险.

2 有轨电车碰撞影响因素分析

有轨电车碰撞事故往往具有较强的突发性和随



a 横向作用力



b 脱轨系数

图 5 有轨电车动态响应

Fig.5 Dynamic responses of the city tram

机性,因此难以准确地界定有轨电车发生碰撞时的边界条件.与此同时,汽车撞击有轨电车时的碰撞速度、位置以及方向等诸多因素均对有轨电车撞击后的动态响应甚至脱轨风险造成显著的影响.为此,本文从多角度综合比较不同边界条件下有轨电车平交道口碰撞的脱轨风险.

2.1 汽车碰撞速度

为了研究汽车撞击速度对有轨电车脱轨程度的影响,将汽车的运行速度设置为 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \sim 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.由于汽车自身携带的动能与速度的平方成正比,随着碰撞速度的提升,汽车与有轨电车的碰撞力从 137 kN 上升到 378 kN,其最大塑性变形也由 0.082 m 增加到 0.381 m(图 6a).此外,当汽车的

碰撞速度超过 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,结合图 4 可知不仅保险杠完全压溃,汽车前端结构也发生了一定程度的塑性变形.与此同时,随着汽车碰撞速度的增加,有轨电车车体的横移和侧滚速度均大幅度提升,分别增加了 264% 和 341%(图 6b、图 6c).图 6d 显示的是有轨电车 1 位轮对左侧车轮的脱轨系数,从中可以清楚的看出,随着汽车碰撞速度的增加,有轨电车的

脱轨系数逐渐加大,从 0.53 上升至 4.08,增长了 670%.当汽车的撞击速度超过 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,有轨电车的脱轨系数超过标准 GB5599—1985 的限定(1.2),具有较大的脱轨风险.因此,汽车在通过平交道口时应注意控制行车速度,既能有效避免碰撞事故的发生,又能降低有轨电车被撞后的脱轨风险.

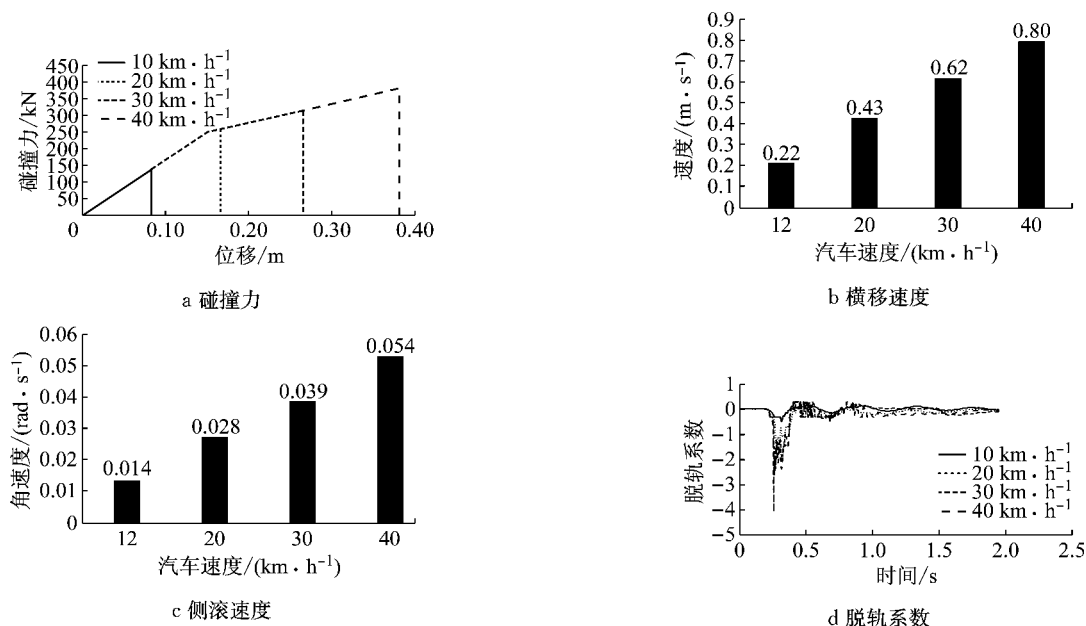


图 6 撞击速度对有轨电车动态响应的影响

Fig. 6 Effects of the impact speed on the dynamic responses of the city tram

2.2 汽车碰撞质量

汽车质量的增加也将导致碰撞能量的加剧,从图 7 可以清楚地看出,随着汽车质量从 1.2 t 增加至 2.0 t,碰撞力由 240 kN 增加至 270 kN,有轨电车的横移和侧滚速度分别由 $0.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.022 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $0.52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.033 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.与此同时,有轨电车的脱轨风险也逐渐加大,其最大脱轨系数从 1.08 增加至 2.13.由此可知,有轨电车在平交道口受到汽车撞击时,相比于质量较小的轿车,质量更大的公交车甚至货车将更容易导致有轨电车撞击后的脱轨.

2.3 汽车碰撞角度

在实际碰撞事故中,当汽车驾驶员意识到将与有轨电车发生碰撞时往往会操纵方向盘试图进行避让,因而碰撞发生后汽车与有轨电车之间并不是 90° 的垂直正面碰撞,而具有一定的倾斜角度.当发生倾斜碰撞时,汽车与有轨电车碰撞界面的法向碰撞力将在纵向(x 方向)具有部分分量,从而在一定程度上减少了作用在有轨电车的横向碰撞力(y 方向).如图 8 所示,当汽车撞击角度从 90° 垂直碰撞减小至

45° 倾斜碰撞时,有轨电车承受的最大横向碰撞力从 259 kN 减少至 195 kN,与此同时有轨电车的最大脱轨系数从 1.63 降低到 0.94,较为安全.

2.4 有轨电车载重

有轨电车作为一种公共交通工具,其空载和满载时的质量差别非常明显(表 2).随着有轨电车载重的不断增加,其抗撞击能力得到明显的提升,如图 9 所示,当有轨电车超员负载时(AW3),车体的横向运动速度相对于空载情况(AW0)减少了 19%.与此同时,有轨电车的最大脱轨系数也从 3.05 降低到 1.40,减少了 54%.

2.5 轮轨摩擦系数

车轮与钢轨之间的摩擦系数是决定轮轨作用力的的重要因素,在有轨电车受到汽车横向撞击的过程中,横向碰撞力导致车体向左侧运动,并经过悬挂系统传递到轮对,使左侧车轮与钢轨形成轮缘接触,而此时的轮轨摩擦力将抑制轮对的进一步横移和向上爬升.当轮轨摩擦系数由于雨雪等气候因素降低时该抑制能力也会下降,轮对的横移量增加.如图 10 所示,当轮轨摩擦系数从 0.4 降至 0.1 时,轮对的最

大横移量从 7.83 mm 增加到 8.16 mm. 与此同时, 脱轨系数从 1.35 上升至 2.33, 增大了 73%. 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, 也更容易造成汽车与有轨电车的碰撞事故.

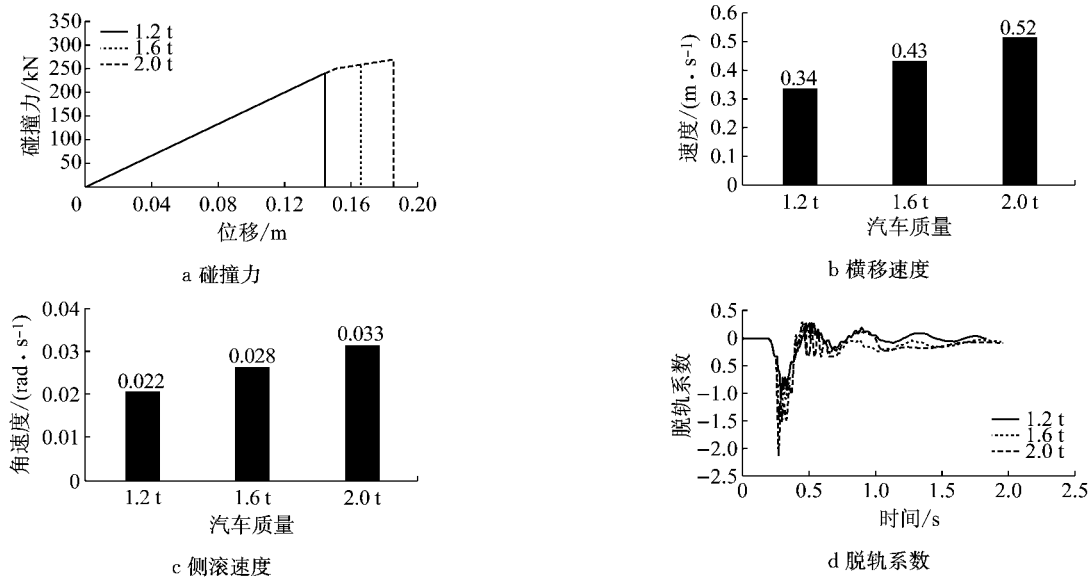


图 7 撞击质量对有轨电车动态响应的影响

Fig.7 Effects of the impact mass on the dynamic responses of the city tram



图 8 撞击角度对有轨电车动态响应的影响

Fig.8 Effects of the impact angle on the dynamic responses of the city tram

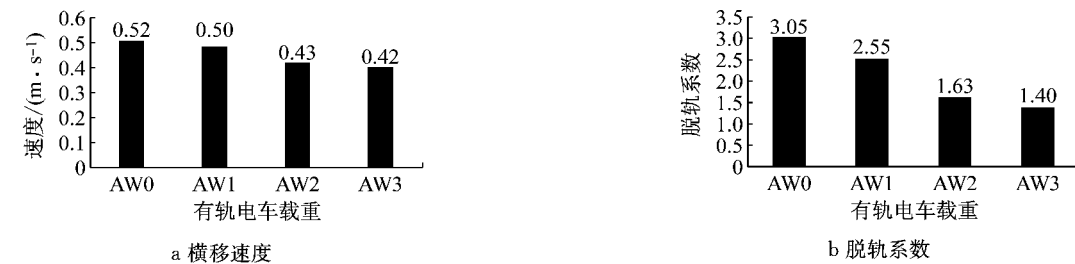


图 9 载重对有轨电车动态响应的影响

Fig.9 Effects of the loading condition on the dynamic responses of the city tram

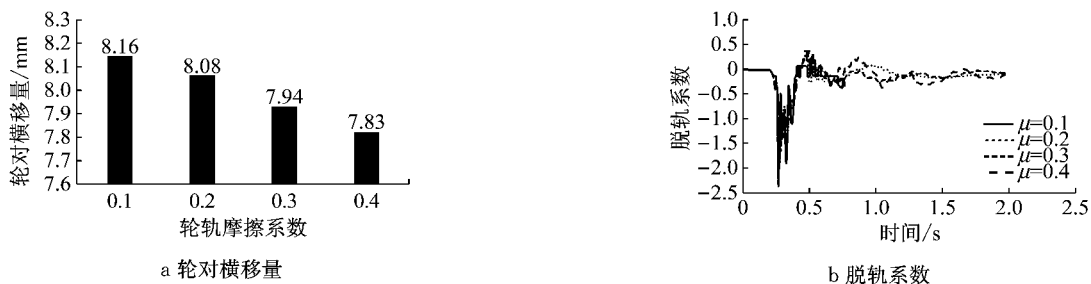


图 10 轮轨摩擦系数对有轨电车碰撞响应的影响

Fig.10 Effects of the friction coefficient between wheel and rail on the dynamic responses of the city tram

2.6 有轨电车碰撞位置

对于较为常见的 5 模块编组的现代有轨电车, 由于结构的差异性, 例如, 转向架模块和悬浮模块, 各模块在平交道口受到汽车撞击时的动态响应将有所不同, 如图 11 所示. 图 11a 中, 当有轨电车前后两端头车(第 1 或第 5 节车)受到汽车撞击时, 被撞击车辆承受的横向碰撞力仅能通过一侧的车间铰接结构向其他车辆进行传递, 导致作用在该车辆轮对上的横向力较大, 脱轨系数较高; 当有轨电车中间车辆(第 2、3、4 节车)受到汽车撞击时, 被撞击车辆承受的横向碰撞力通过相邻两侧的车间铰接结构向其他车辆进行传递, 因而作用在该车辆轮对上的横向力较小, 脱轨系数较低. 此外, 当汽车与有轨电车头车碰撞时, 随着撞击点与头车质心间距的逐渐加大, 被撞击的头车除了承受剧烈的横向冲击外还将产生一定的摇头运动, 如图 11b 所示, 导致轮对脱轨系数增加, 加剧有轨电车碰撞后脱轨风险, 如图 11c 所示.

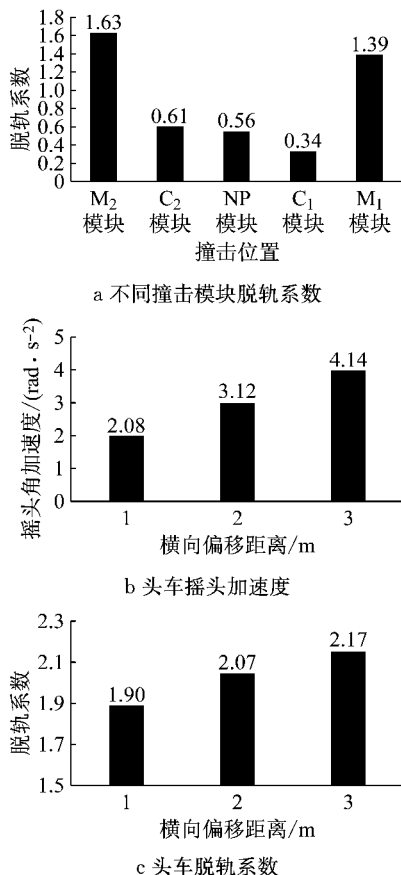


图 11 撞击位置对有轨电车碰撞响应的影响

Fig. 11 Effects of the impact position on the dynamic responses of the city tram

3 结论

(1) 有轨电车在平交道口受到汽车侧向撞击时,

有轨电车的动态响应以及脱轨风险在很大程度上受到碰撞边界条件的影响. 当汽车以 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度 90° 正面撞击有轨电车时, 有轨电车的最大脱轨系数达到 1.63, 超过标准 GB5599—1985 中规定的第一限度(1.2), 这也意味着被撞击的有轨电车具有较大的脱轨风险. 此外, 随着汽车质量和撞击速度的增加, 碰撞界面的碰撞力显著增加, 进而加剧有轨电车的脱轨风险.

(2) 汽车碰撞角度以及有轨电车的撞击位置对有轨电车撞击后的脱轨风险影响显著. 随着碰撞角度的减小, 有轨电车的脱轨系数逐渐降低. 当汽车撞击有轨电车前后两端头车时, 有轨电车的脱轨风险较高. 此外, 随着有轨电车撞击点与车体质心间距的逐渐加大, 被撞击车辆除了承受剧烈的横向冲击还将产生一定的摇头运动, 加剧有轨电车碰撞后脱轨的风险.

(3) 有轨电车的承载状态以及轮轨摩擦系数也对撞击后的脱轨风险影响明显. 随着有轨电车载重的增加, 撞击后车辆脱轨的风险逐渐降低. 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, 加大了有轨电车脱轨的风险.

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.
PENG Feng. Optimization of tram signal control at intersection under semi-independent way condition [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [2] 张志新, 肖守讷, 阳光武, 等. 高速列车乘员碰撞安全性研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(10): 24.
ZHANG Zhixin, XIAO Shoune, YANG Guangwu, et al. Research on collision safety of high-speed train crews & passengers[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(10): 24.
- [3] 聂天琦, 任尊松, 孙守光, 等. 高速动车组碰撞安全性研究[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(4): 11.
NIE Tianqi, REN Zunsong, SUN Shouguang, et al. Research on collision safety of high-speed EMU[J]. Railway Locomotive & Car, 2015, 35(4): 11.
- [4] LING L, DHANASEKAR M, THAMBIRATNAM P D, et al. Lateral impact derailment mechanisms, simulation and analysis [J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 94: 36.
- [5] HAN H S, KOO J D. Simulation of train crashes in three dimensions[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 40(6): 435.

(下转第 259 页)