

地铁列车车钩分级吸能特性模拟^{*}

李术浩¹ 米彩盈^{1,2} 孙树磊³

(1. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都; 2. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 420001, 株洲;
3. 西华大学汽车与交通学院, 610039, 成都//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 为了研究地铁列车车钩的分级吸能特性,在 Matlab 中建立车钩力元的 Simulink 模型,模拟车钩的分级吸能特性,导入 UM 多体动力学软件,建立了单自由度六编组车辆冲击动力学模型。参考 EN 15227—2011《铁道车辆车体的耐碰撞性要求》标准^[1]和相关技术条件要求,在 UM 中分别模拟 8 km/h、15 km/h 和 25 km/h 三种地铁列车连挂碰撞场景。计算结果表明:8 km/h 调车冲击工况,碰撞界面处最大冲击力为 625.50 kN,车钩缓冲器行程为 131.52 mm;15 km/h 轻度冲击工况及 25 km/h 中度冲击工况,碰撞界面最大冲击力均达到压溃管及剪切装置的标定值,其行程分别为 289.21 mm、951.30 mm,满足连挂碰撞要求,且最大冲击力及行程都在相应吸能结构的阈值范围内,验证了车钩力元 Simulink 模型的正确性。

关键词 地铁列车;车钩缓冲器;分级吸能;连挂碰撞;联合仿真

中图分类号 U270.34

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.025

Simulation on Grading Energy Absorption Characteristics of Metro Train Coupler

LI Shuhao, MI Caiying, SUN Shulei

Abstract In order to study the grading energy absorption characteristics of metro train coupler, a Simulink model of coupler force element is established in Matlab software to simulate the coupler grading energy absorption characteristics. By introducing the UM multiple body dynamics software, a single-degree-of-freedom impact dynamics model for the six car train is established. Referring to the EN 15227-2011 Criteria for Railway Vehicle Collision and related technical requirements, three kinds of collision scenarios of connecting subway trains at the speed of 8 km/h, 15 km/h and 25 km/h respectively are simulated in UM. The calculation results show that under 8 km/h shunting impact condition, the maximum impact force at the impact interface is 625.50 kN, the action stroke of the coupler

is 131.52 mm, while under 15 km/h mild impact condition and 25 km/h moderate impact condition, the maximum impact force at the impact interface reaches the calibration value of the crushing pipe and the shearing device, the action strokes are 289.21 mm and 951.30 mm respectively. Since the maximum impact force and stroke are within the threshold of the corresponding energy absorbing structure, the correctness of the coupler force element Simulink model is verified.

Key words metro train; coupler buffer; grading energy absorption; continuous impact; joint simulation

First-author's address School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

车钩缓冲装置(以下简称“钩缓装置”)的力学特性对地铁车辆的动力学性能有着较大的影响,尤其对列车纵向动力学影响较大^[1-2]。地铁列车在运行过程中,钩缓装置连接各车辆,传递和缓和列车在此过程中所产生的纵向冲击,提高旅客的乘坐舒适性^[3]。由于牵引、制动等引起的车辆之间的冲击较小,不足以对钩缓装置造成破坏,故把研究重点放在车辆连挂碰撞时的纵向动力学性能^[4-5]。

在耐撞性列车设计方面,车钩是列车多级吸能系统中不可或缺的组成部分,特别在低速碰撞时,车钩可以吸收全部碰撞能量,车钩的分级吸能特性使得列车在连挂碰撞过程中有序地进行吸能,以最大限度地减轻对乘客的伤害^[6-7]。

由于我国在列车被动安全防护方面的研究起步较晚,且整车碰撞实验成本高,因此,目前我国与列车碰撞相关的实验研究仅仅局限于一些关键吸能部件,对于整列车的耐撞性研究则采用计算机仿真方法^[8]。钩缓装置的结构、材料以及工作原理比较复杂,在有限元仿真中,很难实现对车钩的功能

^{*} 国家重点实验室开放课题(2017ZJKF02、2017ZJKF04);国家重点研发计划项目(2018YFB1201603);四川省教育厅科技成果转化重大培育项目(18CZ0017)

性建模,即在仿真时仅模拟车钩的实际工作原理。

目前,对于轨道车辆碰撞性能研究,主要采用大型通用非线性有限元仿真分析软件,如 LS-DYNA。但是,采用显式有限元模拟存在计算规模大、计算时间长等缺点,在列车防碰撞设计初期,采用建立多体动力学模型的方法,可以有效提高列车的设计效率。因此,准确地模拟车钩在列车碰撞过程中的吸能特性就显得尤为重要。

由于车钩缓冲装置具有独特的力学特性,在 UM 软件平台中已有的模型单元和函数均不能直接表达。本文通过在 Matlab 中编写车钩力元 Simulink 计算模型,模拟车钩在列车碰撞过程中的吸能特性,在 UM 中建立六编组列车碰撞动力学模型,进行 UM 与 Matlab/Simulink 联合仿真,分析列车碰撞仿真结果,验证车钩力元 Simulink 模型的正确性,具有重要的工程实践意义。

1 车钩力元 Simulink 模型

1.1 车钩分级吸能原理

城轨列车的耐撞性结构包括车钩缓冲装置、车端的承载和专用吸能结构。头车前端一般设计有车钩缓冲装置,包括缓冲器、压溃管和剪切螺栓装置。在列车碰撞过程中,缓冲器、压溃管和剪切螺栓装置依次吸能。

1.2 缓冲器过渡阶段处理方法

列车纵向动力学性能很大程度上取决于缓冲器的动力学特性,而缓冲器的力-行程特性曲线直接反映其力学特性^[9]。当缓冲器处于加载或卸载状态时,作用过程是连续的,但当从加载到卸载或从卸载到加载过渡时,其特性曲线上均会出现跳跃现象,即有间断点。

象,即有间断点。

对列车进行连挂碰撞动力学分析时,需要对缓冲器特性曲线的间断点进行处理,保证运动微分方程的连续性,同时也保证动力学系统的动态平衡,以使其更加真实地反映缓冲器的特性。

对于缓冲器间断点的处理方法有很多种,有时间法、速度法、位移法和平衡法。黄运华^[10]对缓冲器特性曲线间断点的算法进行了分析研究,对比了这 4 种方法,介绍了具体实施方法及其优缺点。分析表明,采用阻抗力随速度变化的方法处理缓冲器特性曲线的间断点,是最为行之有效的方法,它相对于其他方法具有较强的可操作性,并在列车纵向动力学分析中得到广泛运用。

本文采用速度法处理缓冲器间断点。在速度法中,缓冲器的阻抗力 F 被描述为相对位移 Δx 和相对速度 Δv 的函数,即

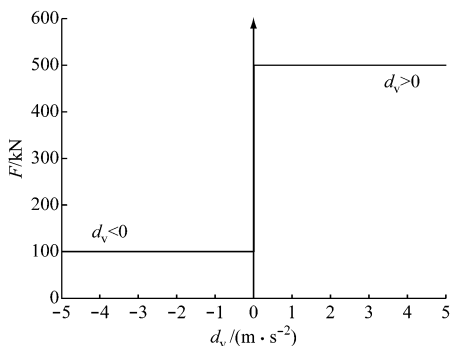
$$F = f(\Delta x, \Delta v) \quad (1)$$

在 t 时刻,当 $\Delta v > 0$ 或 $\Delta v < 0$ 时,缓冲器处于加载或卸载阶段,阻抗力沿着加载或卸载曲线变化。 F 与 Δv 关系如图 1a) 所示。显然,在 $v = 0$ 时,即在加载与卸载阶段过渡时刻,特性曲线存在间断点问题。考虑阻抗力随速度变化时,在数学上仍可考虑用类似位移法的思路处理间断点,在过渡阶段做过渡曲线,如图 1b) 所示。在区间 $[-\varepsilon, \varepsilon]$ 上须满足莱布尼茨条件(ε 为一极小的正数,取 0.005 m/s):

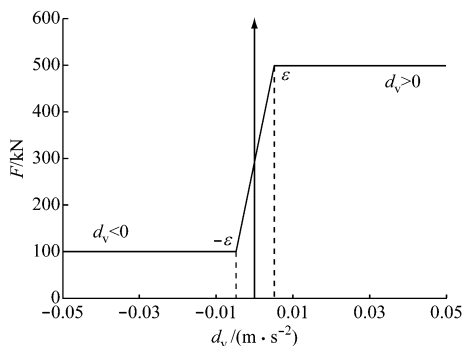
$$\left| \frac{\partial F}{\partial \Delta v} \right| \leq L \quad (2)$$

式中:

L ——为莱布尼茨系数,且 $L > 0$ 。



a) 力与相对速度关系图



b) 力与相对速度过渡处理

图 1 缓冲器阻抗力与相对速度关系示意图

此时,整条曲线已经连续,但是在个别点存在

拐点,因此需对过渡曲线进行光滑处理。本文选择

三角函数 $\sin x$ 来构造过渡曲线,因为三角函数 $\sin x$ 为无数阶可导,光滑性比较好。如图2所示,在过渡阶段 $[-\varepsilon, \varepsilon]$ 上构造函数 $y = A\sin(\alpha x) + \beta$, 其中, $A = \frac{1}{2}(f(1) - f(2)), \alpha = \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi}{2\varepsilon}, \beta = \frac{1}{2}(f(1) + f(2))$, 最终得到缓冲器阻抗力过渡函数公式为:

$$y = \frac{1}{2}(f(1) - f(2))\sin\left(\frac{\pi}{2\varepsilon}x\right) + \frac{1}{2}(f(1) + f(2))$$

(3)

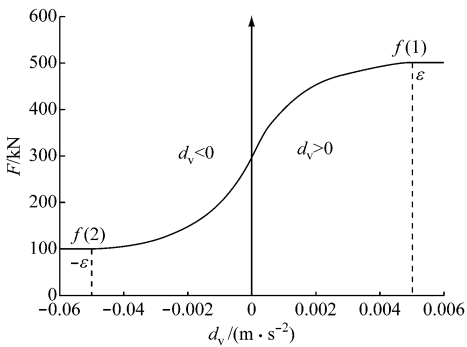


图2 光滑过渡的缓冲器阻抗力与相对速度关系示意图

2 UM 与 Matlab 联合仿真

根据列车撞击过程中的力学规律,在 Matlab/Simulink 中编写车钩力元子程序,并将其编译成动态链接库与 UM 连接。UM 与 Matlab/Simulink 联合仿真过程如图3所示。不同位置的车钩对应不同的序号,头车碰撞界面处车钩力元的计算程序如图4所示。

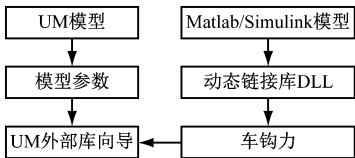


图3 联合仿真流程图

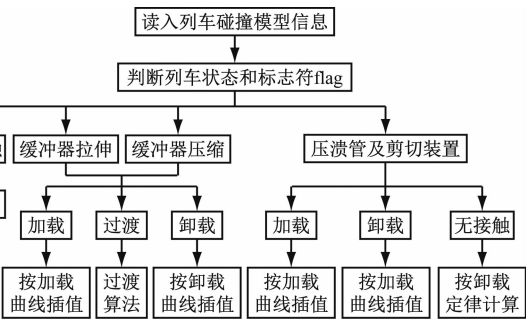


图4 车钩力元算法流程图

仿真分析的每一步都要调用车钩力元子程序。每次运行子程序时要读入列车碰撞动力学模型的信息,进行模型状态的判断,并对标志符 flag 赋值。根据不同的 flag 值选择对应阶段的车钩阻抗力计算方法,对模型进行进一步的判断,如加载、卸载等,然后根据不同的模型状态选择不同的特性曲线或计算方法进行计算。

3 仿真分析

3.1 地铁列车多体碰撞场景

以某型六节编组地铁车辆为例,根据 EN 15227—2011《铁道车辆车体的耐撞性要求》,为了更好地验证车钩力元 Simulink 模型,提出了城轨列车多体碰撞的场景:一列六节编组列车以一定的速度碰撞一列静止的、不制动的相同编组列车(如图5所示)。选取了3种具有代表性的速度工况(8 km/h、15 km/h 和 25 km/h)进行连挂碰撞仿真分析,分别代表调车冲击、轻度冲击和中度冲击^[11]。T_c 车的质量为 31 000 kg, M_p 车的质量为 33 000 kg。

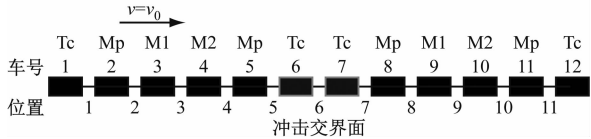


图5 城轨列车碰撞场景示意图

3.2 车钩基本参数代入 Simulink 模型

地铁车辆采用弹性胶泥缓冲器,可承受一定的拉压载荷,车钩各吸能装置参数如表1所示,其阻抗力-行程特性曲线如图6所示。

表1 车钩各吸能装置参数

车钩装置	参数名称	标记	数值
缓冲器	最大静压缩力/kN	Fhcqymax	750
	最大压缩行程/mm	Lhcqymax	73
	最大静拉伸力/kN	Fhcqlmax	260
	最大拉伸行程/mm	Lhcqlmax	35
压溃管	工作标定值/kN	Fykg	800
	最大工作行程/mm	Lykg1	240
		Lykg2	100
剪切装置	标定值/kN	Fjq	900
	可释放行程/mm	Ljq	10

将上述车钩吸能装置参数输入到 Simulink 模型中,将各加载、卸载曲线输入到 1-D LookupTable 模块,运行后检查模型有无错误。

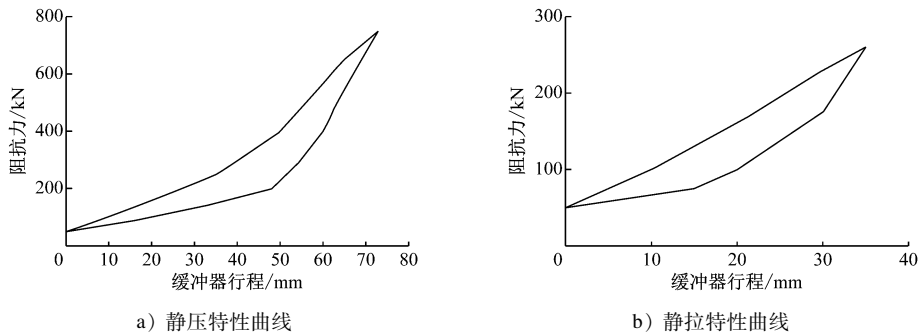


图6 缓冲器力-行程特性曲线

3.3 计算结果分析

在 UM 中分别进行 8 km/h、15 km/h 和 25 km/h 三种速度工况下的碰撞仿真,得到各工况下各车钩的车钩力以及车钩作用行程。列车在连挂碰撞过程中,头车间的碰撞最为恶劣,故在分析碰撞结果时,重点放在头车之间车钩即分界面 6 处的碰撞情况。若此处车钩满足碰撞吸能要求,则其余车钩均能满足吸能要求。

在 8 km/h 速度碰撞工况下,车钩缓冲器吸收冲击能量,压溃管不触发作用,如图 7 所示分界面 6

处车钩力曲线。图中可见,该工况下最大车钩阻力为 620.50 kN,小于缓冲器最大压缩力,车钩最大压缩工作行程为 131.52 mm,小于 2 倍缓冲器的最大压缩行程,满足碰撞要求。

在 15 km/h 速度碰撞工况下,缓冲器及压溃管共同吸收冲击能量,剪切装置不能触发工作。由图 8 可见,该工况下最大车钩阻力为 800 kN,达到压溃管标定值,车钩最大工作行程为 289.21 mm,小于头车间 2 倍车钩缓冲器和压溃管的最大行程,满足碰撞要求。

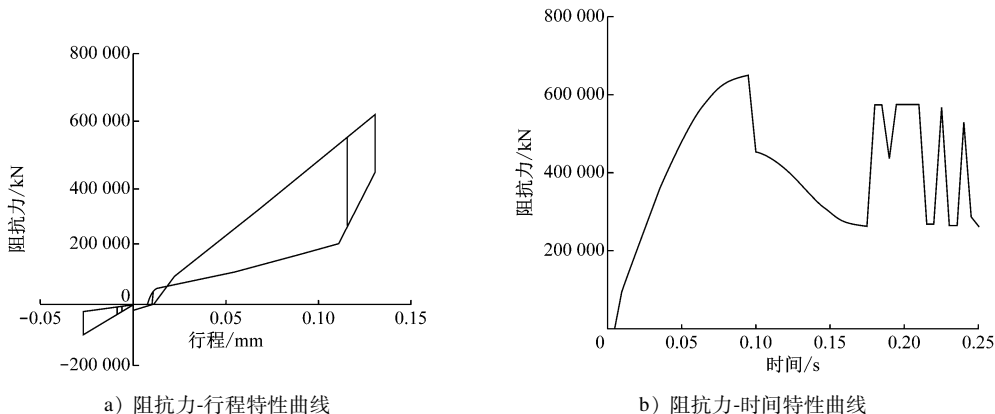


图7 8 km/h 速度工况下分界面 6 处车钩力曲线

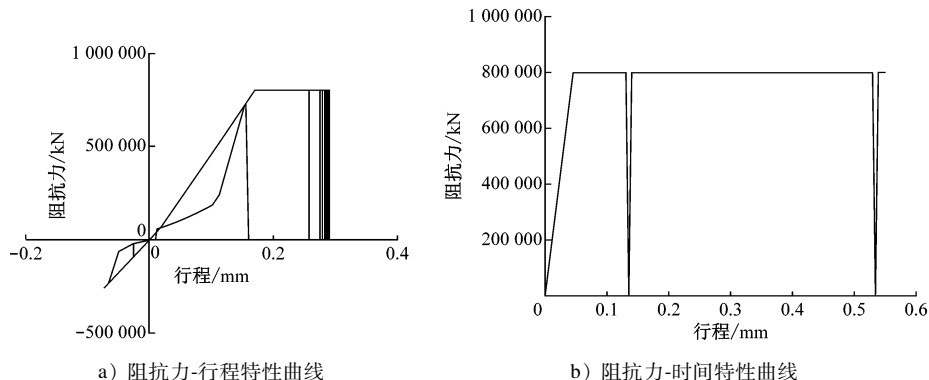


图8 15 km/h 速度工况下分界面 6 处车钩力曲线

在 25 km/h 速度碰撞工况下,车钩吸收部分冲

击能量,剪切装置触发,车钩脱落,后续的能量由防

爬器及车端吸能结构吸收。分界面 6 处车钩最大阻力及最大工作行程均超过车钩缓冲装置的标定值。

其余各分界面处的车钩状态如表 2 所示。从表中数据可以看出,在各速度工况下,车钩最大阻抗

力均未超过对应阶段的阻抗力阈值,与之对应的车钩最大工作行程也在对应阶段的范围内,并且随着碰撞速度的提高,最大车钩最大阻抗力及最大工作行程不断增大,表现出明显的分级吸能特性,验证了车钩力元 Simulink 模型的正确性。

表 2 不同速度工况下分界面最大冲击力及车钩最大压缩行程

车钩 编号	最大冲击力/kN			最大压缩行程/mm		
	8 km/h 工况	15 km/h 工况	25 km/h 工况	8 km/h 工况	15 km/h 工况	25 km/h 工况
1	348.50	600.03	128.13	72.40	125.47	128.13
2	436.38	800.00	800.00	91.67	172.27	176.75
3	446.02	800.00	800.00	95.21	177.66	185.26
4	458.18	800.00	800.00	99.81	181.18	199.40
5	496.46	800.00	800.00	107.66	190.16	747.80
6	625.50	800.00	900.00	131.52	289.21	951.30
7	496.75	800.00	800.00	104.49	189.96	747.70
8	458.28	800.00	800.00	99.53	180.60	199.80
9	447.14	800.00	800.00	95.86	177.32	185.40
10	435.10	800.00	800.00	91.55	172.16	176.82
11	348.30	600.28	128.49	73.42	125.71	128.49

4 结论

1) 在 UM 多体动力学软件中,目前尚无准确模拟地铁车辆车钩缓冲器的力元,基于车钩缓冲器的力学特性,在 Matlab 中建立了车钩缓冲器力元 Simulink 模型,可以准确地反映其力学性能。

2) 在多体动力学分析软件 UM 中,模拟了以三种不同碰撞速度下的地铁列车连挂碰撞工况,建立了 Matlab/Simulink 车钩力元控制程序,可以高效快速地获得列车碰撞时不同截面间的车钩力、缓冲器和压溃管的行程变化情况。

3) 基于某型地铁车辆的编组情况和质量分布,分析了三种速度工况下的连挂碰撞计算结果:列车以 8 km/h 速度碰撞时,缓冲器吸收全部冲击能量;列车以 15 km/h 速度碰撞时,缓冲器和压溃管能够将冲击能量全部吸收耗散;列车以 25 km/h 速度碰撞时,则会触发剪切装置,车钩失效,剩余能量由防爬器及车端吸能结构吸收,满足 EN 15227 标准的要求。

4) 基于不同连挂碰撞速度下仿真结果,车钩缓冲器的阻抗力-行程曲线能够反映车钩力-行程曲线,且车钩最大阻抗力及车钩最大压缩行程均在相应吸能结构的阈值范围内,验证了车钩力元控制程序的正确性和合理性。

参考文献

[1] CEN. Railway applications; crashworthiness requirements for railway vehicle bodies; EN 15227—2011 [S]. Brussels: CEN, 2011.

[2] 杨俊杰, 刘建新, 罗世辉, 等. 重载组合列车机车车钩稳定控制实验[J]. 西南交通大学学报(自然科学版), 2009(6): 882.

[3] 陈静, 禹建伟. 西安地铁 1 号线列车车钩缓冲装置吸能仿真计算[J]. 城市轨道交通研究, 2014(3): 112.

[4] 张锁怀, 孟旭. 地铁车辆连挂冲击非线性动力学模型[J]. 机械工程学报, 2012, 48(9): 111.

[5] GEIKE T. Understanding high coupler forces at metro vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(4): 389.

[6] 李健, 沈钢. 列车防碰撞装置及动力学仿真[J]. 铁道车辆, 2001(7): 5.

[7] MILHO J F. Validated multibody model for train crash analysis [J]. International Journal of Crashworthiness, 2010, 8(4): 339.

[8] 周和超, 徐世洲. 城市有轨电车碰撞联合仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017(5): 750.

[9] 何翠微, 李芾, 孙树磊, 等. 重载机车车辆调车连挂冲击特性分析[J]. 机车电传动, 2015(2): 40.

[10] 黄运华, 李芾, 傅茂海, 等. 缓冲器特性曲线间断点算法比较[J]. 西南交通大学学报(自然科学版), 2005(1): 9.

[11] 肖守纳, 张志新, 阳光武, 等. 列车碰撞中钩缓装置模拟方法[J]. 西南交通大学学报(自然科学版), 2014(5): 831.

(收稿日期: 2018-11-29)