

文章编号:1005-0523(2015)01-0022-05

# 基于 simulink/stateflow 的列车碰撞时钩缓系统建模

秦舒,毛鑫,沈钢

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院,上海 201804)

**摘要:**针对列车碰撞过程中两车之间的运动状态,设置了车钩连接和分离两大状态,将碰撞过程中钩缓系统的运动细化为弹性压缩、塑形压缩、弹性伸长和车钩力为0的4个子状态,运用 simulink/stateflow 建立仿真模型。基于此,建立了两列单节车碰撞的 Matlab/simulink 仿真模型,观察其在不同撞击速度下的缓冲器特性。分析结果表明,所建立的车钩缓冲器模型能够较好地反映车辆碰撞过程中车钩的实际状态。

**关键词:**车钩缓冲器;碰撞;建模;simulink/stateflow;两列单节车

**中图分类号:**U270.34

**文献标志码:**A

钩缓系统作为地铁车辆重要组成部分之一,通过它实现车辆之间的连接、传递和缓冲地铁车辆运行过程中的牵引力和纵向冲击力,其特性对列车动力学性能有着极大的影响<sup>[1-2]</sup>。缓冲器的动态特性可以通过缓冲器的位移与阻抗力的关系得到,即建立缓冲器位移与阻抗力关系图。缓冲器的工作原理与减振器相同,它在纵向力作用下具有一定的弹性变形,同时变形过程中存在阻尼,阻尼有耗散车厢之间冲击和振动的功能<sup>[3]</sup>。

列车防碰撞结构主要由自动车钩、防爬器、能量吸收装置组成,具体结构如图1所示。当发生列车碰撞事故时,车钩缓冲器做第一级缓冲,在其失效后防爬器做第二级缓冲,防爬器失效后由能量吸收装置做第三级缓冲。为能够实现结构的有序破坏,纵向梁设置了剪切铰,当车钩力增大到一定时,剪切铰在力的作用下即被破坏,使前部较细的纵梁伸入后部较粗的纵梁里,实现车钩与车体的分离<sup>[4]</sup>。

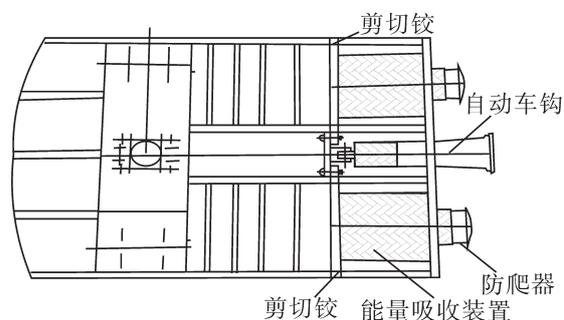


图1 列车端部防碰撞结构

Fig.1 Collision proof structure of train end

## 1 车钩缓冲器研究现状及工作特点分析

列车钩缓系统建模是一个非常复杂的非线性问题,在早期的研究中缓冲器模型多使用简化的模型(线性模型),后来随着计算机技术等的发展,非线性模型在缓冲器建模中得到广泛运用。

Peter, et al<sup>[5]</sup>使用刚度和阻尼的组合建立纯线性的缓冲器模型,张瑞鹏,等<sup>[6]</sup>采用集中质量法建立刚度与阻尼组合的缓冲器模型用于研究列车纵向动力学,改进之处是考虑了由于车钩间隙而造成的车钩力死区。王娜,等<sup>[7]</sup>使用该模型研究了自动车钩的刚度及阻尼系数对列车纵向动力学性能的影响;Durali, et al<sup>[8]</sup>根据缓冲器阻抗特性曲线,使用片段线性化模型模拟缓冲器;张锁怀,等<sup>[9]</sup>将阻尼力简化为阻尼系数和速度

收稿日期:2014-05-30

作者简介:秦舒(1992—),女,硕士研究生,研究方向为轨道车辆动力学建模仿真;沈钢(1963—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为轨道车辆动力学等。

的函数,建立了非线性的缓冲器模型。类似地,魏伟,等<sup>[10]</sup>用函数的方法来描述缓冲器特性:

$$\begin{aligned} F &= K \Delta X + C \Delta X' \\ K &= f_1(\Delta X) \\ C &= f_2(\Delta X') \end{aligned}$$

式中: $F$ 为车钩力; $\Delta X$ 为相对位移; $\Delta X'$ 为相对速度。然后根据缓冲器实验曲线,经过大量的数值分析,确定 $f_1$ 和 $f_2$ 函数,最终建立缓冲器模型。

Duncan和Webb<sup>[11]</sup>于1989年提出具有迟滞特性的缓冲器模型,它包括了前面提到了间隙特性,近似阻抗特性以及压死后的冲击特性。在后期的缓冲器研究中关于非线性迟滞特性的缓冲器模型有不同的数学表达,但基本原理仍与Duncan和Webb提出的模型类似。黄运华,等<sup>[12]</sup>探求重载列车使用的缓冲器特性,建立了多种不同特性的非线性迟滞特性缓冲器模型;常崇义,等<sup>[13]</sup>通过描述悬挂系统中悬挂力的数学方程模拟了钢摩擦缓冲器的干摩擦阻尼迟滞特性,同时通过大量缓冲器的冲击实验结果拟合出缓冲器的动态特性曲线的加载曲线,进而建立了钢摩擦缓冲器数值模型。

基于缓冲器特性曲线的迟滞特性,重点分析了列车碰撞时以缓冲器为主的钩缓系统的几种运动状态,并将其提炼为5种逻辑状态,最后用simulink/stateflow快速方便地完成钩缓系统复杂的逻辑关系建模,同时用两列单节车的纵向动力学仿真模型进行了碰撞验证。

通过对车钩缓冲器的运动过程分析,知其运动是由有限的几个状态按一定的条件转换,循环进行的。因此解决状态的转换是此类仿真的关键,在simulink仿真环境下的stateflow,能够方便地实现这种复杂的逻辑系统建模和仿真。stateflow是有限状态的图形实现工具,它生成的监控逻辑通过Input和Output口可以直接嵌入到simulink模型下,从而实现二者的无缝连接,使用户可以用图形化的工具来实现各个状态之间的转换<sup>[14-15]</sup>。

当车钩缓冲器作一级缓冲时,存在弹性压缩、弹性伸展两个状态;当防爬器作二级缓冲时存在剪切变形、塑性压缩和防爬器压溃3个状态;当由能量吸收装置作三级缓冲时存在塑性压缩和压溃两个状态。

基于上述理论可将缓冲器特性曲线分为以下几段:①弹性压缩;②弹性伸展;③剪切变形阶段及防爬器塑性压缩;④压溃;⑤车体能量吸收装置塑性压缩。

## 2 缓冲器特性曲线复杂逻辑关系建立

假设缓冲器的行程为 $L_0$ ;变形过程中缓冲器的位移为 $x$ ;变形过程中缓冲器所达到的最大位移为 $x_{\max}$ ;车钩开始脱落时缓冲器的位移为 $L_1$ ;缓冲器的速度为 $v$ ;车钩力为 $F$ ,其中 $F$ 由 $x, x_{\max}, v$ 唯一确定,即 $F=f(x, v, x_{\max})$ 。

1) 弹性压缩阶段。此时 $v>0$ ,缓冲器特性曲线为一曲线,可通过数值分析的方法插值求得不同 $x$ 时的车钩力。

2) 弹性伸展阶段。此时 $v<0$ ,缓冲器特性曲线为一曲线,可通过数值分析的方法插值求得不同 $x$ 时的车钩力。

3) 塑性压缩及剪切变形阶段。当弹性压缩阶段至缓冲器行程 $L_0$ 时,随着力的增加进入塑形压缩阶段,当 $v>0$ 且 $x>x_{\max}$ 时处于塑性压缩状态; $v>0$ 且 $x_{\max}$ 不变时处于压缩已压溃部分的状态,车钩力不变。此时缓冲器特性曲线为平行于位移轴的直线,可求得不同 $x$ 时的车钩力。

4) 防爬器压溃阶段。 $v>0$ 且 $x>x_{\max}$ 时处于压缩状态; $v>0$ 且 $x_{\max}$ 不变时处于压缩已压溃部分的状态,车钩力不变。此时缓冲器特性曲线为平行于位移轴的直线,可求得不同 $x$ 时的车钩力。

5) 车体能量吸收装置。 $v>0$ 且 $x>x_{\max}$ 时处于压缩状态; $v>0$ 且 $x_{\max}$ 不变时处于压缩已压溃部分的状态,车钩力不变。此时缓冲器特性曲线为平行于位移轴的直线,可求得不同 $x$ 时的车钩力。

根据上述逻辑关系可建立图2所示的stateflow状态机图。

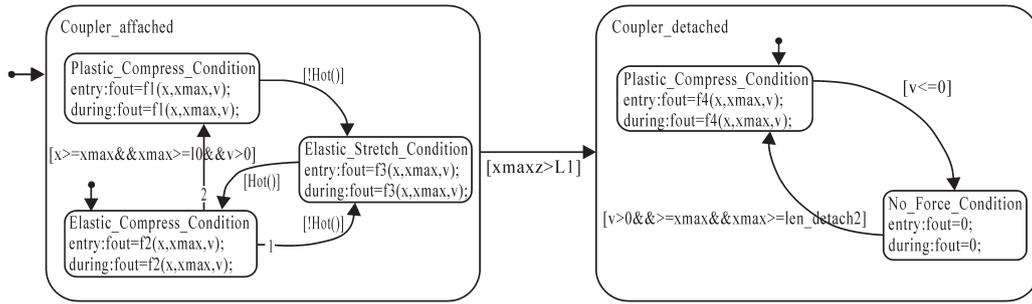


图2 车钩缓冲器 stateflow 状态机图

Fig.2 The state machine diagram of coupling buffer

将上述状态机图作为模块然后利用 simulink 建立基于 simulink/stateflow 的车钩缓冲器模型如图 3 所示。

3 仿真模型验证

为了更好地分析缓冲器的特性曲线,以半自动车钩(气液缓冲器)为例,根据其标准参数(该缓冲器的参数设置如表 1 所示)编程绘制了该缓冲器的静态特性曲线,如图 4 所示。

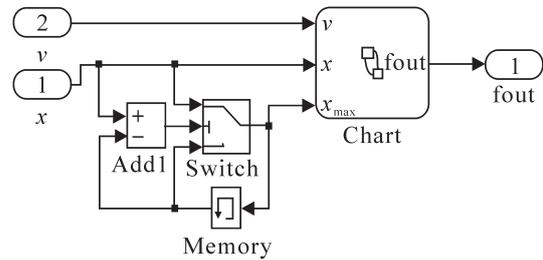


图3 simulink 系统仿真图

Fig.3 Simulink system simulation diagram

表 1 半自动车钩(气液程缓冲器)

Tab.1 Semi automatic coupler (gas-liquid history buffer)

压缩强度 /kN	拉伸强度 /kN	车钩长度(从端面到轴销)/mm	车钩重量 /kg	带减震器的车钩牵引杆			车钩最大水平摆角 /( $^{\circ}$ )	可对中角度范围 /( $^{\circ}$ )	
				行程/mm	最大负载 /kN	断开力 /kN			吸收容量 /kJ
1 250	850	1 230 $\pm$ 5	373	100	1 000	80	85 $\pm$ 0.1	$\pm$ 6	$\pm$ 15

由图 4 的静态特性曲线,可以看出车钩缓冲器的吸能缓冲过程包括弹性拉伸、弹性压缩、塑性压缩以及压溃时无力作用这几个状态,图 4 中曲线 2 为弹性拉伸、曲线 1 为弹性压缩、位移在 0.28 ~ 0.35 间的线段 3 为塑性压缩及剪切变形阶段(塑性压缩至无法变形才会发生剪切螺栓被剪断,产生剪切变形)、位移在  $\geq 0.42$  mm 的线段 4 为防爬器及车体压溃阶段,基本上符合前述的缓冲器逻辑建模分析的 5 个阶段。

为验证所建缓冲器模型的合理性,以两节列车碰撞为例,选取了相应的缓冲器标准参数建立了两节车碰撞模型进行仿真分析<sup>[16]</sup>。前车静止在轨道上,施以停车制动,制动摩擦系数为 0.15,后列车以一定的速度撞击前车。两节车的纵向动力学模型如图 5 所示。

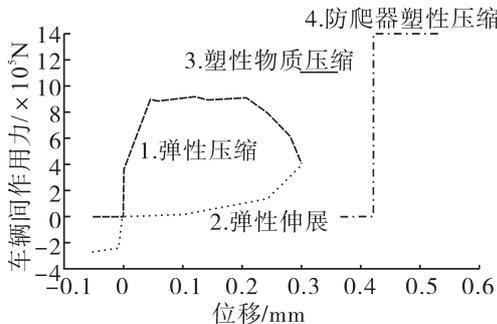


图4 缓冲器静态特性曲线

Fig.4 Buffer static characteristic curve

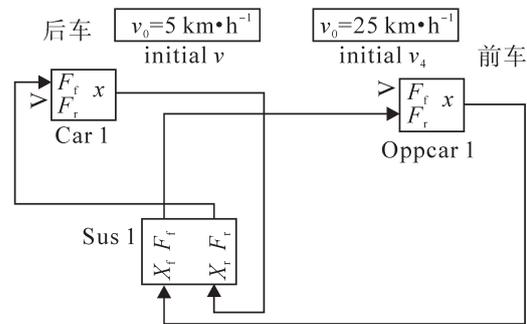


图5 两节车碰撞纵向动力学模型

Fig.5 Two car collision longitudinal dynamics model

当后车以  $v_0=5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  撞击前车时,仿真结果如图6所示。

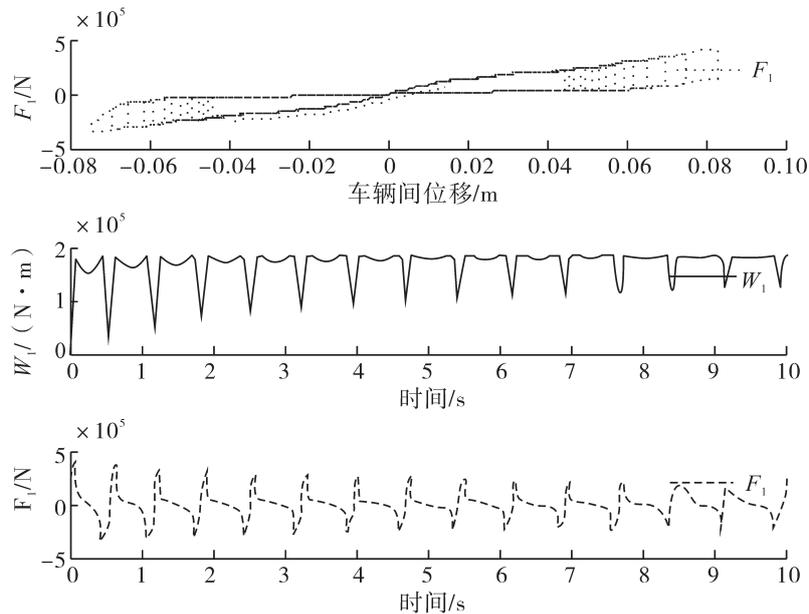


图6 后车的位移\_时间曲线、缓冲器吸收能量曲线和车辆间作用力曲线

Fig. 6 The displacement time curve, energy absorbing curve and force of the rear vehicle

图6中  $F_1$  为车辆间的作用力,  $W_1$  为缓冲器吸收的能量。

由图6可以看到,当撞击速度为  $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  时,缓冲器的最大压缩量为  $0.085 \text{ m}$ ,车辆间的最大作用力没有超过  $500\,000 \text{ N}$ ,远小于车钩缓冲器的剪切强度  $1\,250\,000 \text{ N}$ ,缓冲器在很短的时间内吸收了  $2\,000 \text{ J}$  左右的能量,此时仅由缓冲器吸收能量,剪切螺栓未被剪坏。

当后车以  $v_0=25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  撞击前车时,仿真结果如图7所示。

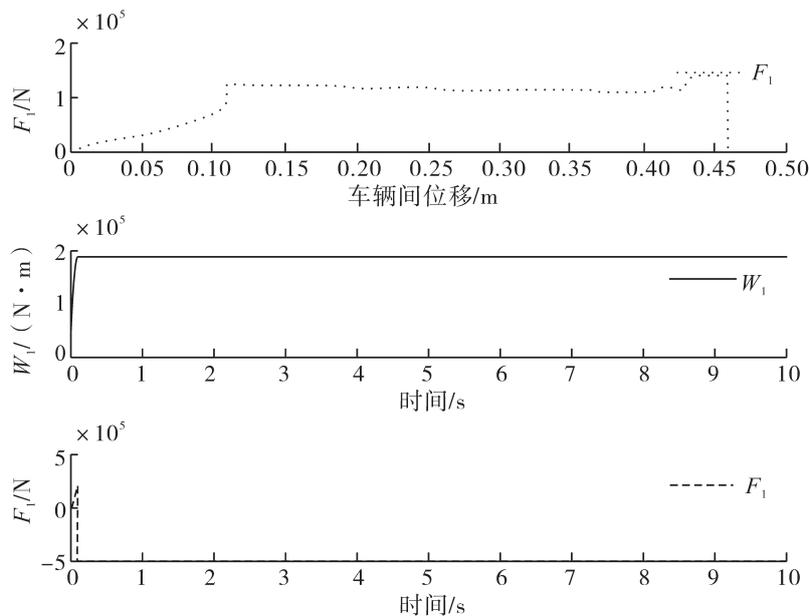


图7 后车的位移\_时间曲线、缓冲器吸收能量曲线和车辆间作用力曲线

Fig. 7 The displacement time curve, energy absorbing curve and force of the rear vehicle

由图7可以看到当撞击速度为  $25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  时,缓冲器的最大压缩量为  $0.465 \text{ m}$ ,车辆间的最大作用力超过

了 1 400 000 N, 此时车钩缓冲器在剪切螺栓的作用下被剪切失效, 撞击力直接作用于防爬器和车体上, 缓冲器和防爬器在很短的时间内吸收了 500 000 J 的碰撞能量。

#### 4 结论

1) 从数据驱动建模的角度出发, 对钩缓系统实际的不同状态进行细分, 摒弃了传统观念, 提出了一种新的缓冲器建模方法, 具有很好的理论意义。

2) 用两节列车碰撞的模型分析了不同撞击速度时缓冲特性曲线、车辆受力和能量吸收情况, 仿真结果符合实际情况, 验证了基于 simulink/stateflow 建立的钩缓系统模型的可靠性。

3) 使用 simulink/stateflow 相结合的仿真方法, 可以有效模拟车钩缓冲器的工作过程, 在仿真过程中可以清楚地看到状态转换图之间的自动切换, 符合真实工况, 实现了车钩缓冲器不同状态的逻辑控制, 对列车纵向动力学的研究具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 孙树磊, 李芾. 车辆冲击数值模拟研究[J]. 西南交通大学学报, 2013(6):10-13.
- [2] 吴庆, 罗世辉. 重载电力机车钩缓系统建模研究[J]. 铁道机车车辆, 2012(8):1-15.
- [3] 程海涛, 钱立新. 长大货物列车制动时纵向动力学模型及求解方法初探[J]. 铁道车辆, 1998(8):3-8.
- [4] 陈大名, 张泽伟. 铁路货车新技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004:21-43.
- [5] PETER CRUBER, MOHAMED M, BAYOUMI. Suboptimal control strategies for multi-locomotive powered trains transactions on automatic control[J]. Train Technology, 1982(3):13-15.
- [6] 张瑞鹏, 张有玉. 铁路车辆纵向动力学仿真建模研究[J]. 军事交通学院学报, 2005(3):13-18.
- [7] 王娜, 马卫华. 启动车钩的弹簧刚度和阻尼系数对列车纵向动力学的影响[J]. 大连交通大学学报, 2010(9):12-22.
- [8] MOHAMMAD DURAI, BASSBAK SHADMEHRI. Nonlinear analysis of train derailment in severe braking[J]. Transactions of the ASME, 2003(1):2-5.
- [9] 张锁怀, 张平满. 地铁调车作业中车钩缓冲器冲击特性分析[J]. 机械设计与研究, 2010(1):12-20.
- [10] 魏伟, 赵连刚. 两万吨列车纵向动力学性能预测[J]. 大连交通大学学报, 2009(2):14-20.
- [11] DUNCAN, WEBB P A. The longitudinal behavior of heavy haul trains using remote locomotives[C]//The Fourth International Heavy Haul Railway Conference, Brisbane, 1989.
- [12] 黄运华, 李芾. 车辆缓冲器特性研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005:13-27.
- [13] 常崇义, 王成国, 马大伟, 等. 2万 t 组合列车纵向力计算研究[J]. 铁道学报, 2006(2):23-48.
- [14] 徐必勇, 叶兴梅. 基于 Simulink/Stateflow 的液压冲击器混合建模与仿真[J]. 建筑机械, 2009(2):13-17.
- [15] 陆冠东. 车辆系统动力学计算方法研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001:23-48.
- [16] 吴海超. CRH3 动车虚拟驾驶仿真系统的设计与实现 [J]. 华东交通大学学报, 2012, 29(2):31-35, 46.

(下转第 34 页)

## Study on Regional Logistics Competitiveness of the Poyang Lake Ecological Economic Zone

Huang Yong, Zhou Qing, Liu Zhu

(School of Mechatronical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The regional logistics competitiveness has become one of the core components of regional competitiveness, which has been the inevitable practical requirement for the objective evaluation of the regional logistics competitiveness research. Taking on the nine cities of the Poyang Lake ecological economic zone as the research object, this paper analyzes the current situation of the competitiveness of regional logistics development, establishes the regional logistics competitiveness evaluation system of Poyang Lake ecological economic zone through the index variable selection, and adopts cluster and factor analysis of SPSS for ranking logistics competitiveness of the cities. Finally the countermeasures and suggestions are put forward accordingly.

**Key words:** the Poyang Lake ecological economic zone; regional logistics; competitiveness; cluster analysis; factor analysis

(责任编辑 王建华 李萍)



(上接第26页)

## The Hook Buffer System Modeling during Train Collision Based on Simulink/Stateflow

Qin Shu, Mao Xin, Shen Gang

(Institute of Railway and Urban Mass Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** According to the process of train collision and the state between two vehicles, it sets up two major states of the coupling and separation. It divides the collision process into four states: elastic compression, compression, elastic elongation and 4 substates of 0 coupler force. It also establishes the simulation model by using simulink/stateflow. Based on this, a simulation model of two list car collision is built up for observing buffer characteristics at different impact velocities. The analysis results show that, coupler buffer model established in this paper can better reflect the actual state of the coupler in the process of vehicle collision.

**Key words:** coupler buffer; collision; modeling; simulink/ stateflow; two list of cars

(责任编辑 刘棉玲)