

文章编号:1671-1637(2015)05-0050-07

基于多质点模型的重载列车动能闯坡性能

王开云, 黄超

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:采用列车多质点纵向动力学模型,研究了列车初速度、列车编组、坡道长度与坡度对列车动能闯坡性能的影响,并与列车单质点模型进行了对比分析,然后结合具体算例对比了2种模型在动能闯坡最大牵引质量方面的差异。分析结果表明:列车闯坡初速度越大,闯坡性能越优;列车闯坡性能随列车编组、坡道长度与坡度的增大而变差;2种模型列车闯坡最低速度的差异随列车闯坡初速度的减小而增加,初速度为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时单质点与多质点模型的列车闯坡最低速度相差 $5.29 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;列车编组、坡长与坡度越大,单质点模型的计算结果越保守;基于单质点模型的列车最大牵引质量为 $8\,250 \text{ t}$,基于多质点模型的列车最大牵引质量为 $8\,750 \text{ t}$,后者比前者增加了 6.1% ;建议采用列车多质点纵向动力学模型计算列车动能闯坡最大牵引质量。

关键词:列车纵向动力学;多质点模型;单质点模型;闯坡性能;牵引质量

中图分类号:U260.131

文献标志码:A

Kinetic energy uphill performance of heavy-haul train based on multi-particle model

WANG Kai-yun, HUANG Chao

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Train multi-particle longitudinal dynamics model was used to analyze the influences of train initial speed, train marshalling, slope length and slope gradient on the kinetic energy uphill performance of train. A comparison between multi-particle model and single particle model was made. A specific example was given to illustrate the difference of the maximum tractive tonnages between the two models in the kinetic energy uphill. Analysis result indicates that the higher the uphill initial speed is, the better the uphill performance is. The uphill performance declines with the increases of train marshalling, slope length and slope gradient. The difference of train uphill lowest speed of two models increases with the decrease of train uphill initial speed. The difference of the uphill lowest speeds of two models is $5.29 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ when the initial speed is $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. The calculation result of single particle model is more and more conservative with the increases of train marshalling, slope length and slope gradient. Train maximum tractive tonnages are $8\,250 \text{ t}$ and $8\,750 \text{ t}$ based on single particle model and multi-particle model respectively, in which the latter is 6.1% higher than the former. It is suggested that the multi-particle longitudinal dynamics model can be adopted to calculate train maximum tractive tonnage in kinetic energy uphill. 3 tabs, 14 figs, 20 refs.

Key words: train longitudinal dynamics; multi-particle model; single particle model; uphill

收稿日期:2015-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51478399);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2682014CX044)

作者简介:王开云(1974-),男,江西萍乡人,西南交通大学研究员,工学博士,从事重载列车动力学研究。

performance; tractive tonnage

Author resume: WANG Kai-yun(1974-), male, researcher, PhD, +86-28-87600773, kywang@home.swjtu.edu.cn.

0 引言

随着中国重载铁路运输的发展,货物列车的牵引质量与编组长度不断增加,在既有线路上开行扩编后的货物列车极有可能面临动能闯坡的问题。张波计算了襄渝线采用和谐系列电力机车后的牵引质量^[1],但未考虑动能坡道对牵引质量的影响;闫永平等对重载列车的途停原因进行了分析,提出了动能坡道的折减公式^[2],但并未考虑列车长度对闯坡性能的影响;董雪婷等基于列车单质点模型对比分析了不同电力机车的牵引性能^[3];Howlett基于同样的模型研究了列车的节能操纵方式^[4];Liu等计算出列车的最佳操作序列以尽量减少能源消耗^[5];李广峰指出在进行机车操纵优化分析时采用多质点模型更贴近实际,但会带来较大的计算量^[6];石红国在列车单质点模型的基础上提出了通过条件化简纵断面来提高列车牵引质量计算精度的建议^[7]。

列车多质点模型的建模难点主要集中在钩缓装置与空气制动装置等子系统非线性特性的处理方面。Geike运用线性钩缓系统模型研究了地铁车辆运行过程中纵向车钩力过大的原因^[8];Cole等充分考虑了车钩间隙与缓冲器阻抗迟滞特性等因素,对比分析了3种不同类型钩缓装置对列车纵向动力学性能的影响^[9];马卫华等从缓冲器静态与动态阻抗特性出发,对弹性胶泥型缓冲器和摩擦胶泥型缓冲器进行了对比分析^[10];Piechowiak仿真分析了克诺尔阀的结构参数与空气制动系统性能的匹配关系^[11];魏伟针对中国重载列车的实际情况,采用数值方法建立空气制动系统的仿真模型^[12];Ansari等对列车纵向动力学进行了较综合的研究,考虑了缓冲器刚度及阻尼、列车运行速度、空重车分布等因素^[13];Nasr等分析了制动系统延时对列车纵向动力学性能的影响,研究结果表明压钩力随延时的增

加而增加,而拉钩力随延时的增加而减小,最大压钩力或拉钩力出现的位置并未随延时变化而发生改变^[14];石红国等以城市轨道交通列车为研究对象,对比分析了多质点模型与单质点模型在工况转化方面的差异,结果表明多质点模型更接近实际操纵情况^[15];Zhuan等采用多质点模型从能耗及车钩力入手提出了最优操纵算法,其中车钩采用了分段线性模型^[16];Chou等将分段线性模型进一步完善为具有迟滞特性的车钩模型^[17]。

综上所述可知,列车多质点模型较为完善,为更精确地描述长编组重载列车的动能闯坡性能提供了理论基础,但采用多质点模型研究列车动能闯坡问题的相关工作不多。本文基于列车纵向动力学理论,采用列车多质点模型,分析了动能坡道长度、动能坡道坡度、列车编组数量、列车闯坡初速度等因素对长编组重载列车闯坡性能的影响,并与传统单质点模型进行了对比。

1 模型建立

1.1 列车多质点模型

列车多质点纵向动力学模型见图1,列车共有 n 节车辆, i 为车辆编号,以每节车辆作为一个单自由度质点,考虑列车纵向运动的所有因素,包括机车的牵引和动力制动特性、列车空气制动系统和钩缓装置的特性及各种运行阻力,再对车辆建立运动微分方程,详细求解列车中各车辆的纵向运动状态。

车辆受力见图2, α 为车辆 i 所处线路断面的坡角,车辆的纵向动力学微分方程为

$$m_i a_i = A_{i-1} - A_i - B_i + C_i - D_i - E_i \quad (1)$$

式中: m_i 为车辆 i 的质量; a_i 为车辆 i 的加速度; A_i 为车钩力; B_i 为车辆的运行阻力,包括基本运行阻力、坡道阻力、曲线阻力与起动阻力等; C_i 为牵引力,仅作用于机车; D_i 为机车的动力制动力,仅作用于机车; E_i 为车辆的空气制动力。

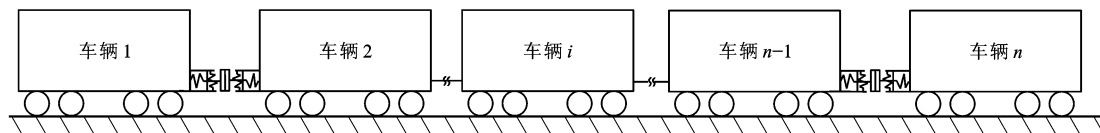
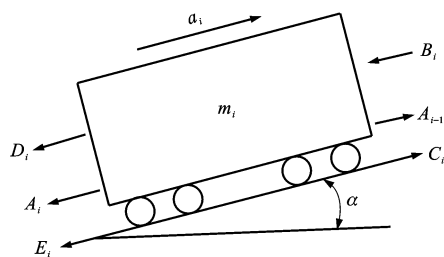


图1 列车纵向动力学模型

Fig. 1 Longitudinal dynamics model of train

图 2 车辆 i 的受力Fig. 2 Forces of vehicle i

对于组成列车的 n 节车辆,可列出 n 个运动微分方程,组成一个二阶微分方程组,本文采用新型显式积分方法对此方程组进行数值积分求解^[18]。

1.2 钩缓系统模型

钩缓系统是车辆的重要组成部分,其建模的准确性将会直接影响到列车纵向动力学的仿真结果。本文采用的钩缓系统模型见图 3。

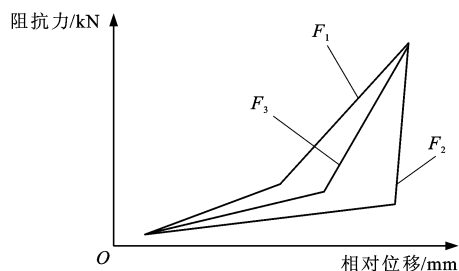


图 3 钩缓系统模型

Fig. 3 Model of draft gear system

当钩缓系统加载时,根据相邻两车的位移差在加载曲线 F_1 上插值出阻阻力,同理可知钩缓系统卸载时则在卸载曲线 F_2 上插值出阻阻力。当缓冲器从加载曲线跳转到卸载曲线时,由于 2 条曲线存在差值,会出现积分的间断点,本文采用“速度法”处理钩缓间断点^[19-20],具体过程如下

$$F = \begin{cases} F_1 & \Delta v \geq v \\ F_3 + (F_1 - F_3) \frac{\Delta v}{v} \operatorname{sgn}(\Delta v) & -v < \Delta v < v \\ F_2 & \Delta v \leq -v \end{cases} \quad (2)$$

$$F_3 = \frac{F_1 + F_2}{2} \quad (3)$$

式中: F 为车钩力; F_1 为加载时缓冲器的阻阻力; F_2 为卸载时缓冲器的阻阻力; F_3 为缓冲器阻阻力的均值; Δv 为相邻两车的速度之差; v 为转换速度。

1.3 计算流程

单质点模型完全忽略列车长度对牵引性能的影响,在建模时将整列车简化为一个单自由度的质点,因此,在动能闯坡仿真分析时,任意时刻整列车均处于同一线路坡度上。而多质点模型由于考虑了列车

中各机车车辆沿线路的纵向分布,在每一个积分步长中,都可以根据每节车辆的线路里程依次确定其所处的线路坡度,再分别计算各车辆所受到的坡道阻阻力,具体流程见图 4。图 4 中: t 为时间; T 为计算时长; S_i 为车辆 i 的位置; L_i 为车辆的长度; x_i 为车辆的位移。与单质点模型相比,采用多质点模型进行重载列车动能闯坡计算更符合工程实际情况,其计算结果也更为精确。

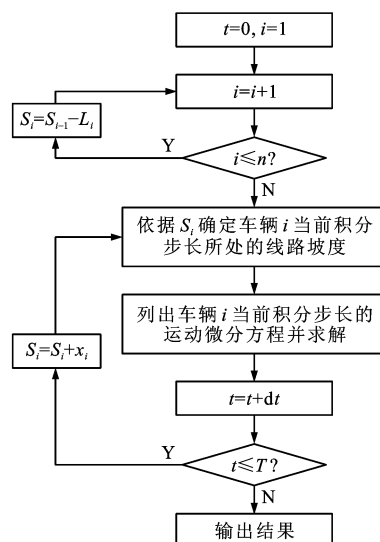


图 4 多质点模型计算流程

Fig. 4 Calculation flow of multi-particle model

2 仿真结果分析

在重载列车动能闯坡过程中,通过坡顶的速度越大,表明进一步提升牵引质量的空间越大,即此重载列车闯坡性能越优异。为对 2 种模型的动能闯坡性能进行对比分析,参考国内某重载线路上的万吨重载列车编组,设置仿真列车的编组形式为 SS_4 机车(2 辆重联)+C70 货车。线路的设置见图 5,前段为 800 m 水平线路,中段为坡长为 L 、坡度为 R 的坡道,后段为 2 200 m 水平线路。

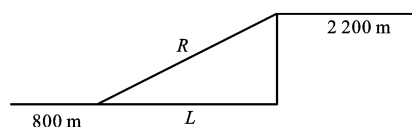


图 5 线路纵断面

Fig. 5 Vertical section of track

2.1 列车初速度与编组对闯坡性能的影响

研究重载列车初速度对闯坡性能的影响时动能坡道参数与重载列车编组为工况 1,研究重载列车编组对闯坡性能的影响时动能坡道参数与重载列车初速度设置为工况 2(表 1)。

表 1 列车编组及线路设置

Tab. 1 Train marshalling and track setting

工况编号	列车初速度/(km·h ⁻¹)	货车数量/veh	坡长/km	坡度/%
1	60~80	108	2	1
2	70	68~108		

图 6 给出了列车以 60 km·h⁻¹ 的初速度实施动能闯坡时,车辆 1、货车 54、108 的速度时程曲线,各车辆的速度无明显差异,因此,以机车 1 的速度作为列车的速度。

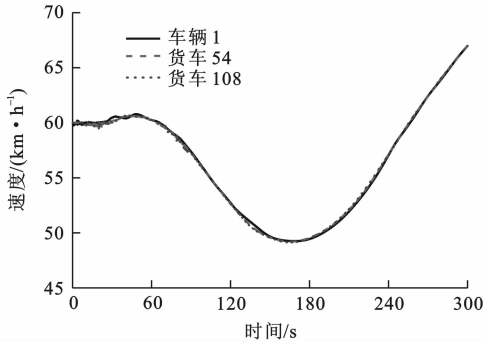


图 6 机车与车辆的时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of locomotive and vehicles

图 7 给出了初速度为 60 km·h⁻¹ 时单质点与多质点模型的列车运行速度随线路里程的变化趋势,前 0.8 km 为平路,中间 2.0 km 为上坡,坡度为 1%,后 2.2 km 为平路,在经过变坡点时,单质点模型的速度曲线有明显的“折角”现象,而多质点模型的速度曲线较平滑,这是因为单质点模型假设全部车辆均处于同一坡度的坡道上,当坡度变化时,列车受到的坡道阻力会发生突变,而多质点模型是随着列车的前行,各车辆依次出现坡度改变,因此,多质点模型更为符合实际的列车运行工况。同时,单质点模型的最低速度出现在动能坡道的坡顶(2.8 km 处),而多质点模型的最低速度出现在动能坡道坡顶之前,两者的最低速度相差 5.29 km·h⁻¹,说明单质点模型在计算列车的闯坡性能时趋于保守。

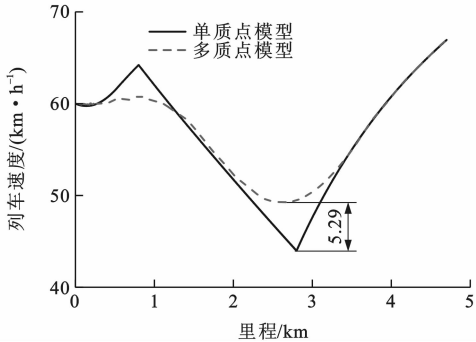


图 7 两种模型的闯坡性能对比

Fig. 7 Uphill performance comparison of two models

图 8 给出了不同初速度下 2 种列车模型的闯坡最低速度及其速度差。列车的闯坡最低速度随着闯坡初速的增加而增加,即重载列车闯坡的初速度越高,闯坡性能越优;列车的闯坡初速度越低,2 种模型的速度差越大,即单质点模型的计算结果越保守。

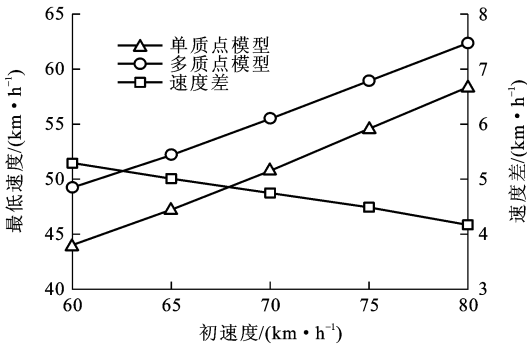


图 8 不同初速度对列车闯坡性能的影响

Fig. 8 Influence of different initial speeds on train uphill performance

图 9 给出了不同编组条件下 2 种模型的闯坡最低速度及其速度差。列车的闯坡最低速度随着列车编组的增加而降低,列车的编组越长,2 种模型的速度差越大。由此可知,列车的编组越长,闯坡性能越差,且单质点模型的计算精度越低。

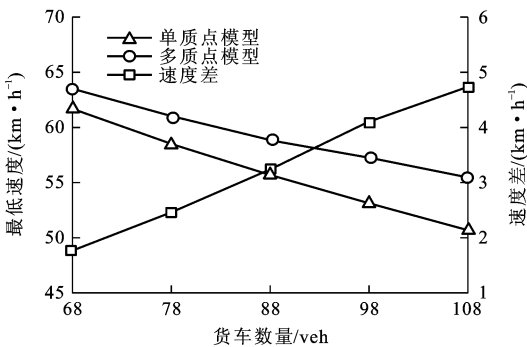


图 9 不同编组对列车闯坡性能的影响

Fig. 9 Influence of different marshallings on train uphill performance

2.2 坡长与坡度对列车闯坡性能的影响

在研究动能坡道的长度对重载列车闯坡性能的影响时,动能坡道参数与列车编组为工况 3,研究动能坡道的坡度对重载列车闯坡性能的影响时,动能坡道参数与列车编组为工况 4(表 2)。

表 2 线路参数设置

Tab. 2 Setting of track parameters

工况编号	列车初速度/(km·h ⁻¹)	货车数量/veh	坡长/km	坡度/%
3	70	108	1~3	1.0
4	70	108	2	0.6~1.0

图 10、11 分别给出了不同坡长、坡度下 2 种列

车模型的闯坡最低速度及其速度差。列车的最低速度随着坡长和坡度的增大而近似线性减小,2种模型的速度差则不断增大,说明动能坡道的长度与坡度越大,单质点模型的计算精度越低。

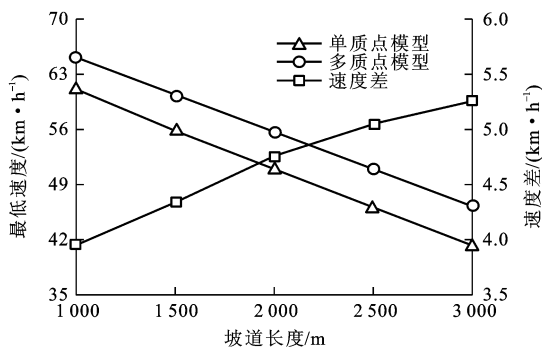


图 10 不同坡长对列车闯坡性能的影响

Fig. 10 Influence of different slope lengths on train uphill performance

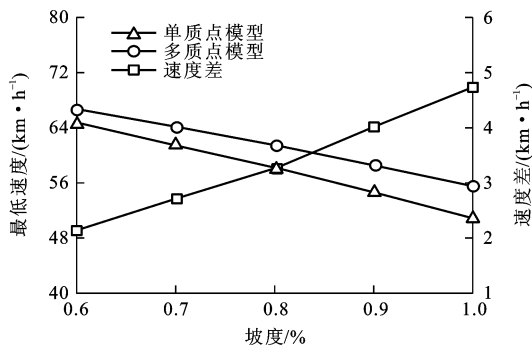
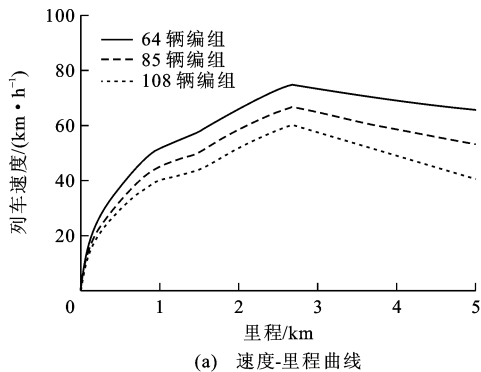


图 11 不同坡度对列车闯坡性能的影响

Fig. 11 Influence of different slope gradients on train uphill performance

3 算 例

列车动能闯坡牵引质量试凑法的原则为所求牵引质量的列车通过坡顶的速度恰好是机车的计算速度。具体步骤为:先假定3列不同编组的列车,牵引质量分别为 M_1 、 M_2 、 M_3 (图 12),从指定地点起动,



(a) 速度-里程曲线

得到其动能坡道的坡顶速度 V_1 、 V_2 、 V_3 ,由 $P_1(M_1, V_1)$ 、 $P_2(M_2, V_2)$ 、 $P_3(M_3, V_3)$ 三个点拟合一条曲线,根据机车计算速度 V_4 在拟合曲线上通过插值得到对应的牵引质量 M_4 ,即为列车动能闯坡的最大牵引质量,对应点为 P_4 。列车编组与牵引质量见表 3,SS₄ 机车的计算速度 V_4 为 $51.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

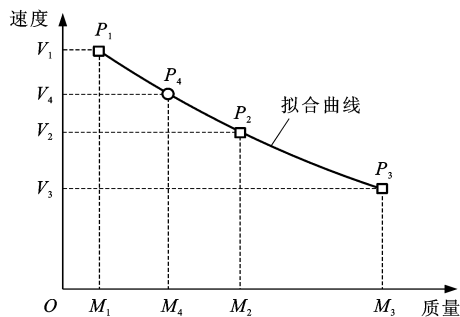


图 12 牵引质量试凑法

Fig. 12 Trial and error method of tractive tonnage

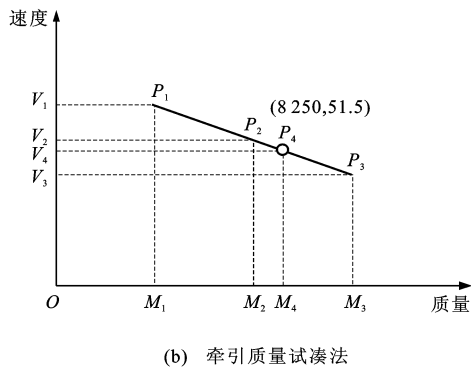
表 3 列车编组与牵引质量

Tab. 3 Train marshalling and tractive tonnage

列车编组	牵引质量/t
2 辆 SS ₄ 重联+64 辆 C70	5 990(M_1)
2 辆 SS ₄ 重联+85 辆 C70	7 956(M_2)
2 辆 SS ₄ 重联+108 辆 C70	10 110(M_3)

图 13、14 分别给出了基于单质点与多质点模型的动能闯坡牵引质量试凑法结果,线路组成为 0.8 km 的平路,0.5 km 坡度为 0.4% 的上坡,1.0 km 坡度为 0.1% 的下坡,2.0 km 坡度为 1.0% 的下坡。基于单质点模型的最大牵引质量为 8 250 t,基于多质点模型的最大牵引质量为 8 750 t,比基于单质点模型的计算结果增加了 6.1%。

单质点模型的计算精度随列车编组的增大而降低,因此,随着货运列车编组的不断增大,建议采用基于多质点模型的牵引质量试凑法计算列车动能闯坡的最大牵引质量。



(b) 牵引质量试凑法

图 13 单质点模型的牵引质量试凑法

Fig. 13 Trial and error method for tractive tonnage of single particle model

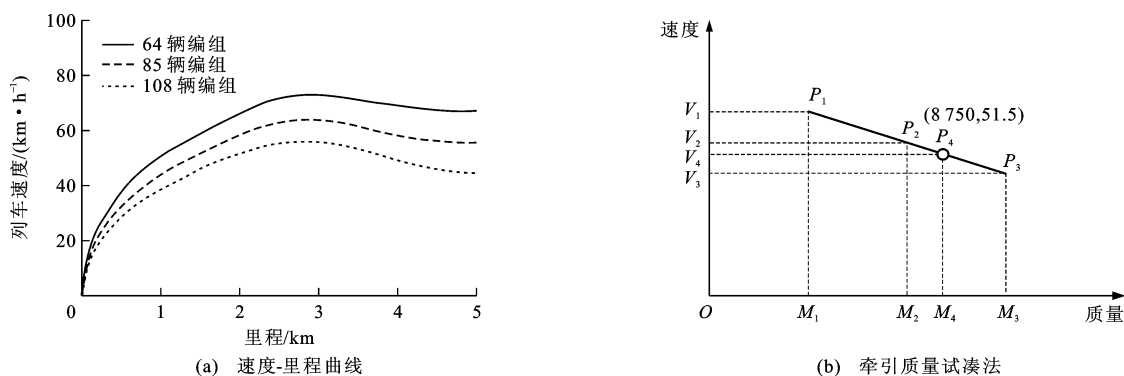


图14 多质点模型的牵引质量试凑法

Fig. 14 Trial and error method for tractive tonnage of multi-particle model

4 结 语

(1)列车的坡顶速度随闯坡初速度的增大而增大,随列车编组、动能坡道长度与动能坡道坡度的增大而减小。

(2)列车的闯坡初速越高,单质点模型的计算精度越高;列车编组、动能坡道长度与坡度越大,单质点模型的计算精度越低。

(3)采用基于单质点模型的动能闯坡牵引质量试凑法确定列车的最大牵引质量时,其计算结果趋于保守,因此,从尽可能发挥铁路运能的角度出发,建议采用基于多质点模型的动能闯坡牵引质量试凑法来计算列车的动能闯坡最大牵引质量。

参考文献:

References:

- [1] 张 波. 襄渝线 HXD1 型电力机车牵引性能仿真及试验研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(5): 68-75.
ZHANG Bo. Simulation and test study on the traction performance of HXD1 electric locomotive on Xiang-Yu Line[J]. China Railway Science, 2012, 33(5): 68-75. (in Chinese)
- [2] 闫永平, 吴宜诚. 重载列车途停原因分析及对策[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(4): 83-86.
YAN Yong-ping, WU Yi-cheng. Analysis on heavy haul train in-section halt and its countermeasures[J]. Railway Locomotive and Car, 2010, 30(4): 83-86. (in Chinese)
- [3] 董雪婷, 黄 超. 大功率交流传动电力机车牵引特性分析[J]. 兰州交通大学学报, 2010, 29(1): 90-94.
DONG Xue-ting, HUANG Chao. Analysis of tractive characteristics of high-power AC transmission electric locomotives[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2010, 29(1): 90-94. (in Chinese)
- [4] HOWLETT P. Optimal strategies for the control of a train[J]. Automatica, 1996, 32(4): 519-532.
- [5] LIU R, GOLOVITCHER I M. Energy-efficient operation of rail vehicles[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2003, 37(10): 917-932.
- [6] 李广峰. 基于牵引计算的机车优化操纵方案研究与应用[J]. 铁道机车车辆, 2008, 28(5): 48-50.
LI Guang-feng. Research and application of locomotive optimization operation project based on the traction calculation[J]. Railway Locomotive and Car, 2008, 28(5): 48-50. (in Chinese)
- [7] 石红国. 线路纵断面化简对列车牵引质量的影响分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2013, 11(4): 45-48.
SHI Hong-guo. Influence of railway longitudinal section simplification on train traction load capacity[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2013, 11(4): 45-48. (in Chinese)
- [8] GEIKE T. Understanding high coupler forces at metro vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(4): 389-396.
- [9] COLE C, SUN Y Q. Simulated comparisons of wagon coupler systems in heavy haul trains[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2006, 220(3): 247-256.
- [10] 马卫华, 宋荣荣, 揭长安, 等. 缓冲器阻抗特性对重载列车动力学性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(2): 59-64.
MA Wei-hua, SONG Rong-rong, JIE Chang-an, et al. Influences of buffer impedance characteristics on dynamics performances for heavy haul train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(2): 59-64. (in Chinese)
- [11] PIECHOWIAK T. Verification of pneumatic railway brake models[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(3): 283-299.
- [12] 魏 伟. 列车空气制动系统仿真的有效性[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 104-109.
WEI Wei. The validity of the simulation for train air brake system[J]. China Railway Science, 2006, 27(5): 104-109. (in Chinese)
- [13] ANSARI M, ESMAILZADEH E, YOUNESIAN D. Longitudinal dynamics of freight trains[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2009, 16(1/2): 102-131.
- [14] NASR A, MOHAMMADI S. The effects of train brake delay time on in-train forces[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, 224(6): 523-534.
- [15] 石红国, 彭其渊, 郭寒英. 城市轨道交通牵引计算模型[J].

交通运输工程学报, 2005, 5(4): 20-26.

SHI Hong-guo, PENG Qi-yuan, GUO Han-ying. Traction calculation model of urban mass transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 20-26. (in Chinese)

[16] ZHUAN X, XIA X. Cruise control scheduling of heavy haul trains[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(4): 757-766.

[17] CHOU M, XIA X, KAYSER C. Modelling and model validation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(4): 501-509.

[18] ZHAI Wan-ming. Two simple fast integration methods for

large-scale dynamic problems in engineering[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39(24): 4199-4214.

[19] 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, 2005, 40(1): 9-12.

HUANG Yun-hua, LI Fu, FU Mao-hai, et al. Comparison of algorithms for discontinuity on the characteristics curves of draft gears[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(1): 9-12. (in Chinese)

[20] WANG Kai-yun, HUANG Chao, ZHAI Wan-ming, et al. Progress on wheel-rail dynamic performance of railway curve negotiation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(3): 209-220.

(上接第 49 页)

[9] ACARMAN T, OZGUNER U, HATIPOGLU C, et al. Pneumatic brake system modeling for systems analysis[C]// SAE International. Truck and Bus Meeting and Exposition. Warrendale: SAE International, 2000: 1-9.

[10] TAGHIZADEH A, GHAFARI A, NAJAFI F. Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications[J]. Comptes Rendus Mecanique, 2009, 337(3): 131-140.

[11] MESSINA A, GIANNOCARO N I, GENTILE A. Experimenting and modelling the dynamics of pneumatic actuators controlled by the pulse width modulation (PWM) technique[J]. Mechatronics, 2005, 15(7): 859-881.

[12] 魏 伟, 杜念博. 重载列车制动管路对制动性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(5): 49-54.

WEI Wei, DU Nian-bo. Influence of braking pipe on braking performance for heavy haul train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 49-54. (in Chinese)

[13] DING S X, ZHANG P, NAIK A. Subspace method aided data-driven design of fault detection and isolation systems[J]. Journal of Process Control, 2009, 19(9): 1496-1510.

[14] 曹宏发, 乔 峰, 温熙圆, 等. 和谐号动车组制动系统故障再现及分析[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(5): 43-47.

CAO Hong-fa, QIAO Feng, WEN Xi-yuan, et al. Reproduction and analysis of failure for braking system of CRH₃ EMU[J]. Railway Locomotive and Car, 2011, 31(5): 43-47. (in Chinese)

[15] NIU Gang, ZHAO Ya-jun, TRAN Tung-van. Fault detection and isolation based on bond graph modeling and empirical residual evaluation[J]. Proceedings of the Institution of

Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(3): 417-428.

[16] 黄志武, 刘建刚, 刘伟荣, 等. 基于解析冗余关系的法维莱制动机系统故障诊断技术[J]. 铁道学报, 2013, 35(3): 29-35.

HUANG Zhi-wu, LIU Jian-gang, LIU Wei-rong, et al. Fault diagnosis of Faiveley braking system based on analytical redundancy relations[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(3): 29-35. (in Chinese)

[17] PUGI L, MAVLEZZI M, ALLOTTA B, et al. A parametric library for the simulation of a Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) pneumatic braking system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218(2): 117-132.

[18] 陆 强, 杨美传. 基于 AMESim 的地铁车辆空气制动系统的建模及仿真[J]. 液压气动与密封, 2011, 31(10): 45-48.

LU Qiang, YANG Mei-chuan. Modeling and simulation methodology of pneumatic braking system in metro vehicles using AMESim[J]. Hydraulics Pneumatics and Seals, 2011, 31(10): 45-48. (in Chinese)

[19] KAMINSKI Z. Mathematical modeling of the pneumatic relay emergency valve for dual-line agricultural trailer braking systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2011, 226(5): 603-612.

[20] 曹 源, 王玉珏, 马连川, 等. 基于 DTW 的车辆轴温监测方法[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(3): 78-84, 100.

CAO Yuan, WANG Yu-jue, MA Lian-chuan, et al. Monitoring method of vehicle axle temperature based on dynamic time warping[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(3): 78-84, 100. (in Chinese)