

列车信号系统安全距离分析*

黄文杰¹ 鄢艳丽¹ 马天和² 翟耕慰²

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京;

2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海)

摘要 [目的]为了解决目前移动闭塞信号系统安全距离计算未考虑故障及低黏着系数等恶劣工况,导致安全距离计算时真实性较差、计算精度较低等问题,需研究不同故障类型和低黏着等恶劣工况对列车信号系统安全距离的影响。[方法]建立了信号系统安全距离模型,分析了影响列车安全距离的主要因素;综合考虑列车制动系统、列车纵向动力学及轮轨黏着条件,利用 MATLAB/Simulink 软件搭建包含车载 ATP(列车自动防护)触发紧急制动阶段、牵引切除阶段、惰行阶段、紧急制动建立阶段及紧急制动阶段的安全距离仿真平台;结合列车实际参数及相关标准,对超低黏着工况、部分车辆制动力丧失故障工况和不同列车运行速度工况下的信号系统安全距离进行仿真研究。[结果及结论]紧急停车距离是影响信号系统安全距离的主要因素,其与轮轨黏着条件、线路允许最大运行速度和列车可能发生的故障类型有关。当黏着系数为 0.03、列车运行速度为 120 km/h 时,列车正常工况时的安全距离为 1 520.7 m,最不利工况(故障车为重车、其余为空车时,切除 2 个转向架)下的安全距离为 2 196.7 m。实际应用时应考虑测速误差和位置不确定性,为信号系统安全距离留出一定裕量,以保障列车的运行安全。

关键词 轨道交通; 信号系统; 安全距离

中图分类号 U284.44

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.016

Analysis of Train Signaling System Safety Distance

HUANG Wenjie¹, YAN Yanli¹, MA Tianhe², ZHAI Gengwei²

(1. CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., 210031, Nanjing, China; 2. Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The current calculation of safety distance in the moving block signaling system does not consider adverse working conditions such as faults and low adhesion coefficients, resulting in poor authenticity and low precision in safety distance calculations. It is necessary to study the impact

of the aforementioned adverse conditions on the safety distance of train signaling systems. [Method] A safety distance model for the signaling system is established to analyze the main factors affecting train safety distance. Considering train braking systems, longitudinal dynamics, and wheel-rail adhesion conditions, MATLAB/Simulink software is used to build a simulation platform encompassing stages such as on-board ATP (automatic train protection) trigger emergency braking, traction cut-off, coasting, emergency braking establishment, and emergency braking. Combining actual train parameters and relevant standards, simulation studies on the safety distance of signaling systems under conditions of ultra-low adhesion, partial loss of braking force in some vehicles, and different train operating speeds are conducted. [Result & Conclusion] Emergency stopping distance is the key factor affecting the safety distance of signaling system and is related to wheel-rail adhesion conditions, the line maximum allowable operating speed, and potential fault types. Under normal conditions with an adhesion coefficient of 0.03 and a train speed of 120 km/h, the safe distance is 1 520.7 m. In the most unfavorable condition (a faulty heavy-loaded vehicle with other vehicles unloaded, 2 bogies removed), the corresponding safety distance is 2 196.7 m. In practical applications, speed measurement errors and positional uncertainties should be taken into account to leave a certain margin for signaling system safe distance and ensuring train operation safety.

Key words rail transit; signaling system; safety distance

移动闭塞系统是目前轨道交通车辆运行控制系统运用最为广泛的闭塞制式。与准移动闭塞、固定闭塞制式不同的是,移动闭塞制式的前后车均采用移动定位技术,后续列车的速度曲线会根据前车目标点的移动进行实时计算。安全距离是移动闭塞系统设计时的重要参数,计算安全距离时需考虑轨道黏着条件、列车制动能力等因素。

* 国家重大技术装备攻关工程项目(2019K096)

目前,已有学者对列车信号系统的安全距离进行了一定的研究。文献[1]基于安全距离的基本概念及计算机制,对安全距离计算相关条件进行了定性分析,并对移动闭塞系统中的安全距离特点进行了总结。文献[2]提出通过动能平衡等方法计算列车最不利情况下的制动距离。文献[3]基于原有安全距离模型,提出通过增加前行列车运行速度信息来计算安全距离的优化算法。

以上这些针对安全距离的研究并未包含列车出现故障及黏着系数极低等极端工况,本文综合考虑列车制动系统、列车纵向动力学及轮轨黏着条件,建立了包含车载 ATP(列车自动防护)触发紧急制动阶段、牵引切除阶段、惰行阶段、紧急制动建立阶段及紧急制动阶段的安全距离仿真平台,对列车故障及极低黏着工况下某型列车的安全距离进行了研究。本文研究可为实际列车移动闭塞系统的设计提供一定的工程经验与技术指导。

1 信号系统安全距离模型及影响因素分析

安全距离是指在信号系统安全距离模型框架下,考虑各项可能影响列车制动性能的因素,保证列车不会与前行列车发生冲突的情况下,通过计算得到的列车常规制动停车点与极限目标点之间最小的距离^[4]。信号系统安全距离模型示意图如图 1 所示。其中:A 阶段为车载 ATP 触发紧急制动阶段;B 阶段为牵引切除阶段;C 阶段为惰行阶段;D 阶段为紧急制动建立阶段;E 阶段为紧急制动阶段;A 阶段—E 阶段这 5 个阶段对应的列车行驶距离称为列车紧急停车距离。

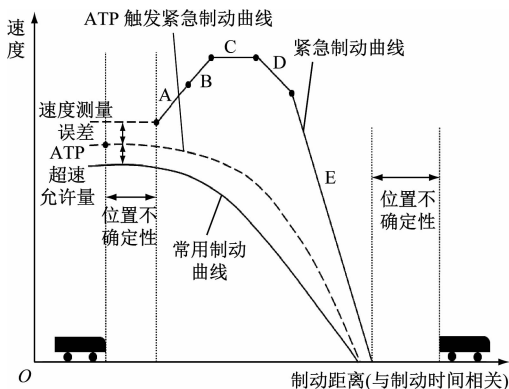


图 1 信号系统安全距离模型示意图

Fig. 1 Diagram of signaling system safety distance model

基于实际列车运行数据,A 阶段—E 阶段的列车行驶距离在列车紧急停车距离中的占比分别为:

A 阶段列车行驶距离占比为 0.223 8%、B 阶段列车行驶距离占比为 0.226 7%、C 阶段列车行驶距离占比为 0.227 1%、D 阶段列车行驶距离占比为 0.198 9%、E 阶段列车行驶距离占比为 99.123 5%。由于 D 阶段和 E 阶段均属于列车紧急停车过程中的制动阶段,故本文着重对 D 阶段和 E 阶段的列车行驶距离(也称为紧急制动距离)进行详细建模,对比分析不同轮轨黏着条件、轴重及故障等工况下的列车紧急制动距离,以获得不利条件下的列车信号系统安全距离,以及故障工况下的列车最大速度限值。

2 安全距离仿真平台

安全距离仿真平台主要包括制动系统模型、轮轨黏着模型、列车动力学模型和牵引及惰行阶段模型。制动系统模型包含制动电子控制单元模型和制动系统气路模型等。其中,制动电子控制单元模型用于计算制动缸的目标气压值,制动系统气路模型用于模拟真实气路并计算制动缸实际压强,既而由基础制动装置输出夹钳夹紧力,作用于轮对并进行制动。轮轨黏着模型用于计算轮轨间的黏着力。列车动力学模型基于列车各零部件的动力学方程,根据所施加的夹钳夹紧力和轮轨黏着力计算列车速度、减速度和制动距离。牵引及惰行阶段模型将牵引特性曲线输入列车动力学模型来模拟列车牵引及惰行阶段的运动情况。采用 Amesim 软件建立制动系统气路模型,采用 MATLAB/Simulink 软件建立其余模型部分。

2.1 制动电子控制单元模型

制动电子控制单元主要用于将司机控制室发出的制动指令(目标减速度或制动级位)通过一系列计算及制动力的分配,转换为每个制动缸的目标压强,进而控制制动缸的充排气动作。制动电子控制单元模型以目标减速度为输入,参数设置包括折算后的轮对旋转质量、闸片摩擦因数等。

2.2 制动系统气路模型

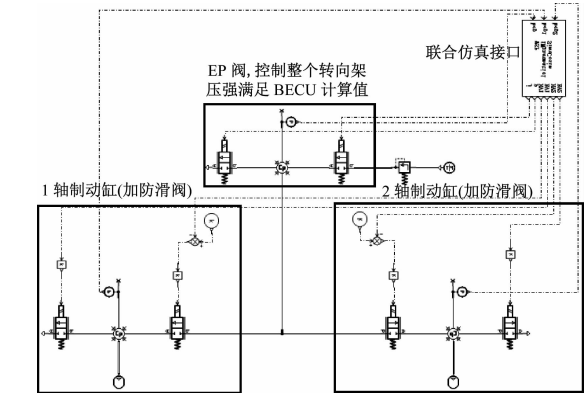
制动系统气路模型用于模拟制动过程中各气动单元的动作情况。在实际列车运行过程中,为防止列车滑行,需配备防滑控制装置,为了能完整地体现实际制动系统的气路构造,本文所建立的制动系统气路模型添加了防滑电磁阀。保压阀和排风阀的动作规律如表 1 所示。建立包含 EP(电空转换)阀、防滑阀、中继阀、各轴制动缸等部件的架控

式列车制动系统气路模型,如图2所示。

表 1 保压阀和排风阀的动作规律

Tab. 1 Action law of pressure retaining valve and exhaust valve			
列车状态	保压阀控制信号	排风阀控制信号	防滑阀状态
正常制动	0	0	充气
检测到滑行	1	1	排风
达到保压条件	1	0	保压
黏着恢复	0	0	充气
非法状态	0	1	非法

注:在正常工作状态下的制动防滑过程中,保压阀动作为0、排风阀动作为1的列车状态是不会出现的,因此将其定义为非法状态。



注:BECU为制动电子控制单元。

图2 架控式列车制动系统气路模型示意图
Fig. 2 Diagram of air circuit model of bogie controlled train braking system

2.3 列车动力学模型

列车动力学模型是基于列车实际结构所建立的列车各部件模型,考虑部件间的相互作用,通过将制动力施加于列车上反映列车整体运动状态的变化,该模型的输出参数有位移、速度、减速度等。

在实际列车运行过程中,列车具有纵向、垂向及横向三个方向的自由度,但在制动过程中并不关注车厢垂向、横向的舒适度指标,且在暂不考虑曲线通过工况的情况下,列车制动工况各性能指标主要与列车的纵向自由度有关。此外,由于列车纵向自由度与横向、垂向自由度的耦合度较小,故可对列车动力学模型进行简化,建立时仅考虑其纵向自由度。列车动力学模型示意图如图3所示,该模型包括了车体、二系悬挂、一系悬挂、转向架构架、车轮等部件。

2.4 轮轨黏着模型

轮轨黏着模型通过改变黏着系数等输入参数,

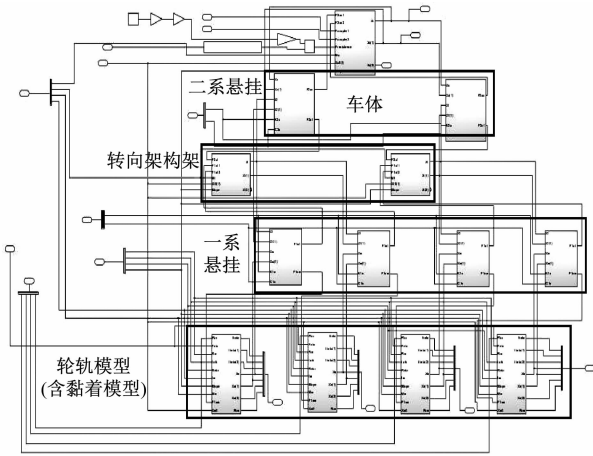


图3 列车动力学模型示意图
Fig. 3 Diagram of train dynamics model

基于不同轨面条件,计算出不同轨面条件下的黏着力,需考虑列车运行速度、轴重等参数与轮轨黏着系数间的相互关系。

基于 Polach 黏着理论^[5]建立轮轨黏着模型。轮轨间黏着力 F_a 可以表示为:

$$F_a = \mu Q = \frac{2Qf}{\pi} \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon^2} + \arctan \varepsilon \right) \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{2C\pi a^2 b_s}{3Qf} \tag{2}$$

$$f = f_0 [(1 - A) e^{-B\omega} + A] \tag{3}$$

式中:

- μ ——轮轨黏着系数;
- a ——轮轨椭圆接触区纵半轴长度;
- b ——轮轨椭圆接触区横半轴长度;
- C ——轮轨接触剪切刚度;
- Q ——轴重;
- s ——滑移率;
- f_0 ——轮轨最大静摩擦因数;
- $A、B$ ——摩擦因数调节参数;
- ω ——轮轨间的相对滑动速度。

2.5 牵引及惰行阶段模型

基于信号系统安全距离模型, D 阶段和 E 阶段的紧急制动距离可通过本文所建立的制动系统仿真模型进行计算, A 阶段—C 阶段的列车行驶距离则需在上述制动系统仿真模型的基础上输入牵引特性曲线计算公式,通过开关模块划分为牵引阶段和惰行阶段,各阶段对列车施加不同的作用力,并根据不同的作用力计算公式建立牵引及惰行阶段模型。根据实际列车牵引特性曲线,牵引力为一个与速度相关的分段函数,牵引力在列车运行速度为

67.5 km/h 处分段,列车牵引力经验公式可以表示为:

$$F_1 = \begin{cases} 279\,000, & 0 \leq v < 67.5 \\ 18\,832\,500/v, & v \geq 67.5 \end{cases} \quad (4)$$

式中:

F_1 ——列车牵引力,单位 N;

v ——列车运行速度,单位 km/h。

列车在牵引惰行阶段的牵引力计算公式可以表示为:

$$F = \begin{cases} F_1, & 0 \leq t < t_1 \\ F_1 - \frac{F_1}{t_2 - t_1}(t - t_1), & t_1 \leq t < t_2 \\ 0, & t_2 \leq t < t_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

t ——列车运行时间;

F ——A 阶段、B 阶段、C 阶段的车体受力;

t_1 ——A 阶段结束时刻;

t_2 ——B 阶段结束时刻;

t_3 ——C 阶段结束时刻。

2.6 构建安全距离仿真平台

将所建立的制动电子控制单元模型、制动系统气路模型、列车纵向动力学模型、轮轨黏着模型和牵引及惰行阶段模型集成为 6 节编组列车(4 动 2 拖)安全距离仿真平台,如图 4 所示。首先,通过轮轨黏着模型设置黏着条件,然后通过制动电子控制单元模型计算制动缸的目标压力,制动系统气路模型计算制动缸实际压强,最后通过列车动力学模型计算列车速度、减速度和制动距离。

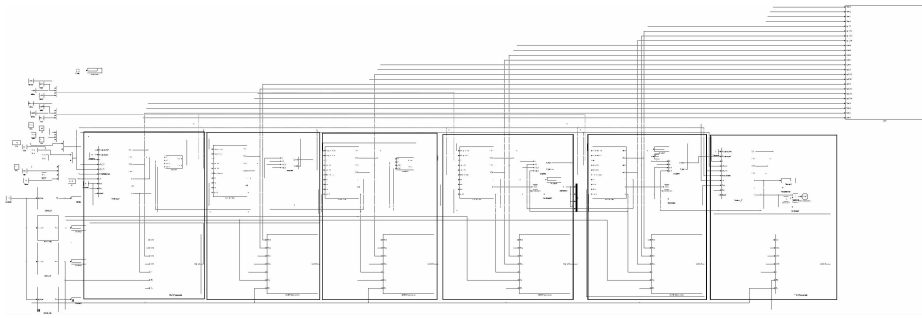


图 4 安全距离仿真平台示意图

Fig. 4 Diagram of safety distance simulation platform

3 信号系统安全距离研究

根据信号系统安全距离模型及相关定义,安全距离为最不利条件下的紧急停车距离与正常条件下常用制动距离之差,因此计算时应考虑最不利工况。通过对多种列车故障工况进行分析,并结合标准中的相关规定,设计多种工况进行仿真分析,获得最不利条件下的列车紧急停车距离和正常条件下的常用制动距离,进而计算信号系统安全距离。

3.1 基于安全距离仿真平台的列车故障工况分析

列车由于紧急阀泄露或排风不止等故障导致无法施加制动力,造成列车紧急停车距离有所延长。结合我国某型列车实际发生的制动力无法完全施加的故障情况,本文考虑不同载重类型、不同制动力丧失程度(切除 1 个转向架与切除 2 个转向架)等工况对安全距离进行分析。故障工况类型分为:故障工况 1——全空车,切除 1 个转向架;故障工况 2——全重车,切除 1 个转向架;故障工况 3——故障车为重车、其余为空车时,切除 1 个转向架;

故障工况 4——全空车,切除 2 个转向架;故障工况 5——全重车,切除 2 个转向架;故障工况 6——故障车为重车、其余为空车时,切除 2 个转向架。

基于安全距离仿真平台可以获得不同故障工况下,列车制动平均减速度与黏着系数间的关系,如图 5 所示。由图 5 可知:故障工况 6 的列车平均减速度最小,制动距离最长,因此判断故障工况 6 为最不利故障工况。由于故障工况 6 在实际线路中较为少见,因此本文也对故障工况 5 这一较为常见的最不利故障工况进行分析。

3.2 列车安全距离仿真计算

当黏着系数为 0.5、最大平均常用制动减速度为 1.0 m/s^2 时,对列车制动过程进行仿真计算,所获得的不同列车运行速度下,列车的制动距离仿真结果如表 2 所示。

根据标准 UIC 541-5—2016 *Brakes-Manufacturing specifications for various brake parts-Wheel Slide Protection device (WSP)* 中关于轮轨黏着系数等级

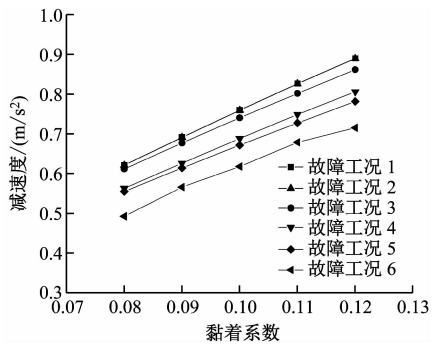


图 5 不同故障工况下列车制动平均减速度与黏着系数间的关系

Fig. 5 Relationship between train braking average deceleration and adhesion coefficients under fault conditions

表 2 不同列车运行速度下的列车制动距离仿真结果

Tab.2 Simulation results of train braking distance under different train operating speeds

列车运行速度/(km/h)	列车制动距离/m
120	563.3
100	372.4
80	252.3
60	143.0

的划分,基于实际线路可能存在的最不利轨面黏着条件,当列车运行速度分别为 120 km/h、100 km/h、80 km/h、60 km/h,黏着系数为 0.03、0.04、0.06、0.08 时,分别对列车在正常工况、故障工况 5 和故障工况 6 下的列车紧急停车距离进行分析。根据安全距离的定义,将所获得的列车紧急停车距离减去表 2 中的制动距离,可以获得不同工况下的安全距离仿真计算结果,如表 3 所示。

由表 3 可知:不同工况下,安全距离有所差异;故障工况 6 的安全距离最长;当黏着系数为 0.03、列车运行速度为 120 km/h 时,列车正常工况时的安全距离为 1 520.7 m,故障工况 6 的安全距离为 2 196.7 m,此时即为本文所研究的最不利工况。由于实际应用中不同线路的最不利黏着条件有所不同,因此信号系统输入的安全距离值也会有所差异,如:热带地区线路的最低黏着系数较大,因此所设置的安全距离较短;常年雨雪天或树叶多的地区,线路的最低黏着系数较小^[6],因此所设置的安全距离较长。表 3 中的不同黏着系数条件下的安全距离值也为不同气候环境下铁路线路安全距离的设置提供了一定的参考。此外,安全距离还与允许列车运行的最大速度有关,线路允许列车行驶的最

表 3 不同工况下的列车安全距离仿真计算结果

Tab.3 Train safety distance simulation calculation results under different working conditions

列车运行速度/ (km/h)	黏着系数	安全距离/m		
		正常工况	故障工况 5	故障工况 6
120	0.08	325.5	503.7	577.7
	0.06	563.7	787.7	908.7
	0.04	1 037.7	1 352.7	1 561.7
	0.03	1 520.7	1 908.7	2 196.7
100	0.08	246.0	369.6	432.4
	0.06	415.4	572.7	668.6
	0.04	764.6	974.6	1 132.6
	0.03	1 108.6	1 369.6	1 585.6
80	0.08	150.6	230.0	280.7
	0.06	262.9	364.9	438.2
	0.04	506.2	631.9	748.7
	0.03	736.5	859.7	1 049.7
60	0.08	96.2	142.5	178.5
	0.06	163.5	223.4	273.8
	0.04	317.2	383.4	461.4
	0.03	457.0	539.4	644.0

大速度越高,安全距离设置就越长。

综上所述,信号系统安全距离输入值的设定与实际列车线路环境条件、允许列车运行的最大速度和可能发生的故障类型有关。此外,由于本文模型未考虑测速误差、位置不确定性误差等因素,故在实际应用中需添加一定的安全裕量,以保证列车运行的安全性。

4 结语

本文对信号系统安全距离模型进行了分析,得出了列车紧急制动阶段占比约为 99% 的结论。利用 MATLAB/Simulink 软件搭建安全距离仿真平台,对列车故障进行分析,主要获得以下几个结论:

1) 紧急停车距离是影响信号系统安全距离的主要因素,受到线路最不利黏着条件、线路允许最大运行速度和故障类型的影响。黏着条件越差,线路允许的最大运行速度越高,紧急停车距离越长,进而导致信号系统的安全距离越长。

2) 考虑黏着系数为 0.03 时的超低黏着工况,列车以最高设计速度 120 km/h 正常运行时的安全

(下转第 94 页)

参考文献

- [1] XI Y L, SAXE S, MILLER E. Accessing the subway in Toronto, Canada; access mode and catchment areas[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2543(1): 52.
- [2] LI X, LIU Z, MA X. Measuring access and egress distance and catchment area of multiple feeding modes for metro transferring using survey data[J]. Sustainability, 2022, 14(5): 2841.
- [3] EOM J K, CHOI J, PARK M S, et al. Exploring the catchment area of an urban railway station by using transit card data: case study in Seoul[J]. Cities, 2019, 95: 102364.
- [4] GUTIÉRREZ J, CARDOZO O D, GARCÍA-PALOMARES J C. Transit ridership forecasting at station level: an approach based on distance-decay weighted regression[J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19(6): 1081.
- [5] DEBREZION G, PELS E, RIETVELD P. Choice of departure station by railway users [J]. European Transport, 2007 (37): 78.
- [6] ZHU Z, HE Y, GUO X, et al. Improved huff model for estimating urban rail transit station catchment areas considering station choices [J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021: 1.
- [7] YOUNG M A, BLAINEY S P. Development of railway station choice models to improve the representation of station catchments

in rail demand models[J]. Transportation Planning and Technology, 2018, 41(1): 80.

- [8] TSAMBOULAS D, GOLIAS J, VLAHOYANNIS M. Model development for metro station access mode choice[J]. Transportation, 1992, 19(3): 231.
- [9] 董志国. 上海轨道交通出行方式链模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(7): 15.
- DONG Zhiguo. On the trip chain model of Shanghai urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(7): 15.
- [10] DIANA M, PRONELLO C. Traveler segmentation strategy with nominal variables through correspondence analysis[J]. Transport Policy, 2010, 17(3): 183.
- [11] WEN C H, WANG W C, FU C. Latent class nested logit model for analyzing high-speed rail access mode choice[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48(2): 545.
- [12] MCFADDEN D. Quantitative methods for analyzing travel behaviour of individuals: some recent developments[J]. Cowles Foundation Discussion Paper, 1977(474): 1.

· 收稿日期:2022-09-26 修回日期:2022-11-07 出版日期:2024-02-10
Received:2022-09-26 Revised:2022-11-07 Published:2024-02-10
· 通信作者:戴骏晨,工程师,djesse@foxmail.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 87 页)

距离为 1 520.7 m;故障车为重车、其余为空车时,故障车切除 2 个转向架的安全距离为 2 196.7 m。

3) 当列车出现转向架故障时,通常采用降速运行,只要将其最高运行速度限制在速度阈值之下即可。该速度阈值对应的紧急制动距离应不大于最差黏着情况下列车的紧急制动距离,可据此确定故障车的最大限速。

本文得出的安全距离仅为理论值,在实际应用中应考虑测速误差及位置不确定性误差等因素,为安全距离留出一定的安全裕量,避免列车与前车相撞。

参考文献

- [1] 宋云. 移动闭塞中安全距离的分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2009, 6(3): 45.
- SONG Yun. Analysis of safety distance in CBTC[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2009, 6(3): 45.
- [2] 张滔. 移动闭塞信号系统的安全距离计算浅析[J]. 铁道通信信号, 2010, 46(6): 24.
- ZHANG Tao. Calculation of safety distance for moving block signalling system[J]. Railway Signalling & Communication, 2010, 46

(6): 24.

- [3] 罗志刚, 侯涛. 列车安全距离优化算法研究与仿真[J]. 铁道学报, 2014, 36(8): 49.
- LUO Zhigang, HOU Tao. Optimization algorithm of safe distance between running trains and simulation[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(8): 49.
- [4] 龙安宝. 轨道交通移动闭塞安全距离的仿真研究[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(6): 49.
- LONG Anbao. On the simulation of safe distance in moving block [J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(6): 49.
- [5] POLACH O. A fast wheel-rail forces calculation computer code [J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 33(S1): 728.
- [6] 谭江. 高速轮轨黏着特性及增黏措施试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- TAN Jiang. Experimental investigations on the wheel/rail adhesion at high speeds and adhesion enhancement[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

· 收稿日期:2023-04-10 修回日期:2023-04-10 出版日期:2024-02-10
Received:2023-04-10 Revised:2023-04-10 Published:2024-02-10
· 通信作者:黄文杰,正高级工程师,hwj_2003@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license