

长大下坡道区段限速对轨电车旅行时间影响的计算与仿真研究

杨 坚^{1,2}

(1. 丽江雪山轨道交通有限公司, 674199, 丽江; 2. 中铁建云南投资有限公司, 650220, 昆明 // 高级工程师)

摘 要 目的:我国西南地区的有轨电车线路大多存在长大下坡道。为了保证长大下坡道上有轨电车的运行安全,有轨电车需限速运行,进而影响旅行时间。对此,需要研究长大下坡道区段限速对轨电车旅行时间影响。方法:基于有轨电车牵引计算及区间运行时间计算,通过 Opentrack 软件构建区间运行仿真模型。以丽江有轨电车 1 号线为例,使用优化求解器计算得到长大下坡道区段在不同限速方案下的有轨电车最小运行时间。基于区间运行仿真模型进行线路仿真试验,核算区间通过能力,进而定量分析不同限速对列车通过旅行时间的影响。结果及结论:由仿真试验结果,若长大下坡道的列车限速减小 50%,则线路通过能力降低约 17%。长大下坡道的限速越小,则列车通过旅行时间越长,区间的通过能力越小。

关键词 有轨电车; 长大下坡道; 区段限速; 旅行时间

中图分类号 U292.4: U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.08.017

Calculation and Simulation of Segment Speed Limit Influencing Tram Travel Time on Long-large Downhill Ramp

YANG Jian

Abstract Objective: Many tram lines in the southwest region of China have long-large downhill ramps. To ensure the safe operation of trams on long-large downhill ramp, speed limits need to be imposed, which in turn affect the travel time. Therefore, it is necessary to study the impact of long-large downhill ramp segment speed limit on tram travel time. Method: Based on tram traction calculation and interval travel time calculation, a simulation model for interval operation is constructed using Opentrack software. Taking the example of Lijiang Tram Line 1, the minimum tram travel time in different schemes of long-large downhill ramp segment speed limit is calculated using an optimization solver. Based on the interval operation simulation model, a route simulation test is conducted to evaluate the segment passing capacity and further quantitatively analyze the impact of different speed limits on train

travel time. Result & Conclusion: Based on the simulation test results, if the long-large downhill ramp speed limit is reduced by 50%, the line passing capacity decreases by approximately 17%. The smaller the speed limit, the longer the train travel time and the lower the capacity of segment passing.

Key words tram; long-large downhill ramp; segment speed limit; travel time

Author's address Lijiang Xueshan Rail Transit Co., Ltd., 674199, Lijiang, China

受地形地势影响,我国西南地区的有轨电车线路通常存在长大下坡道,且有些线路的长大下坡道占比很大。在丽江有轨电车 1 号线(以下简称“丽江 1 号线”)中,坡度 $\geq 30\%$ 的长大下坡道线路长 9.66 km,占线路全长的 47.7%,其中区间最大下坡度为 -55% 。长大下坡道会增大有轨电车制动距离,进而加大有轨电车追踪距离。为保证有轨电车在长大下坡道上的运行安全,需对其进行限速,但这又会对线路的通过能力产生影响。因此,有必要研究长大下坡道区段不同限速值对区间通过能力产生的影响。

目前,对长大下坡区段限速方面的研究,主要集中在高速铁路领域。文献[1]综合考虑了高速列车常用制动限速和紧急制动限速的影响,采用合力分析法和分段累加法计算高速列车在下坡运行的限速。文献[2]对高速铁路长大下坡地段列车运行速度进行研究。文献[3]对长大下坡道条件下的高速铁路闭塞分区布置进行研究,通过构建数学模型解决高速铁路长大下坡道闭塞分区布置问题。

对于长大下坡道限速对通过能力的影响,以往的研究大多为定性分析,很少有定量分析。本文按照不同坡度将线路划分为不同区段,基于有轨电车牵引计算和区间运行时间计算,定量计算长大下坡道不同限速下的最小区间旅行时间。基于最小旅

行时间及运行间隔,通过 Opentrack 软件进行仿真,得到列车运行图,进而定量分析不同限速下的区间通过能力。

1 基于牵引计算的有轨电车运行时间计算

本文通过有轨电车牵引计算和有轨电车区间运行时间计算,基于详细的线路条件及有轨电车特性,按照不同坡度将线路划分为不同行车区段,并确定每个行车区段的长度、曲线半径、坡度、限速值;对于有轨电车,确定车辆质量、有轨电车牵引制动性能、基本阻力及其附加阻力的计算;最终求解输出长大下坡道区段的有轨电车旅行时间。

1.1 有轨电车的牵引计算

考虑到线路坡度设置对有轨电车运行速度的影响,进而对有轨电车区间运行时间产生影响,为此,按照不同坡度将线路划分为不同区段,来定量研究坡度等线路条件对有轨电车运行速度的影响。

1.1.1 有轨电车基本阻力

有轨电车基本阻力主要受有轨电车运行速度的影响,其计算式为^[4]:

$$w_0 = mg(A + Bv + Cv^2) \quad (1)$$

式中:

- w_0 ——有轨电车基本阻力;
- $A、B、C$ ——基本阻力计算系数,按经验取常数;
- v ——有轨电车运行速度;
- m ——有轨电车的质量;
- g ——重力加速度。

1.1.2 有轨电车附加阻力

有轨电车在行车过程中不但受到基本阻力的作用,还受到附加阻力的作用。附加阻力与基本阻力不同,主要取决于线路条件,包括坡道附加阻力、曲线附加阻力、隧道附加阻力。有轨电车经过坡道和曲线线路时产生的阻力^[5],以及有轨电车经过隧道时的附加阻力分别为^[6]:

$$w_i = mg \sin \alpha \quad (2)$$

$$w_r = mg \left(\frac{600}{\rho_r} \right) \quad (3)$$

$$w_s = \mu v^2 \quad (4)$$

$$w_f = mg \left(\frac{600}{\rho_r} + \sin \alpha \right) + \mu v^2 \quad (5)$$

式中:

- w_i ——坡道附加阻力;
- α ——线路坡度;

w_r ——曲线附加阻力;

ρ_r ——线路曲线半径;

w_s ——隧道附加阻力;

μ ——经验常数;

w_f ——总附加阻力。

考虑到有轨电车运行过程的复杂性,本文将有轨电车看作一个质点,依据牛顿第二定律,有轨电车的运行动力学方程可表示为:

$$m(1 + \gamma)a = f - w_0 - w_f \quad (6)$$

式中:

γ ——有轨电车回转系数;

a ——有轨电车加速度;

f ——有轨电车牵引制动力; $f > 0$ 为牵引力, $f < 0$ 为制动力。

1.1.3 有轨电车的牵引制动力约束

对有轨电车在运行过程中受到的牵引制动力的限值进行约束,则有:

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \quad (7)$$

式中:

f_{\min} ——有轨电车最大制动力;

f_{\max} ——有轨电车的最大牵引力。

1.2 有轨电车区间运行时间计算

有轨电车区间运行时间同运行速度及区间长度有关。本文把有轨电车运行区间离散为若干区段,则有:

$$L_{\Delta} = \frac{(v_2 + v_1)t_{\Delta}}{2} \quad (8)$$

式中:

L_{Δ} ——离散区段长度;

t_{Δ} ——离散区段运行时间;

$v_1、v_2$ ——有轨电车在离散区段内运行的初速度、末速度。

1.2.1 有轨电车初末速度限制

对有轨电车运行初始速度和末速度进行约束,确保有轨电车在起点的速度 v_0 与在终点的速度 v_z 都为 0,即:

$$v_0 = v_z = 0 \quad (9)$$

1.2.2 线路固定速度限制

为了严格保证有轨电车在长大下坡道上的运行安全,有轨电车在线路各离散区段的运行速度都绝对不能超过该区段的限速值 v_{\max} 。即:

$$0 \leq v \leq v_{\max} \quad (10)$$

1.3 基于牵引计算的有轨电车运行时间计算模型

由有轨电车牵引计算和有轨电车区间运行时间计算可得基于牵引计算的有轨电车运行时间计算模型。该模型的输入参数为 $m、g、\gamma、\rho_t、\alpha、A、B、C、\mu、v_a、v_b、v_{\max}、f_{\min}、f_{\max}、L_{\Delta}$ ；决策变量为 $a、v、f、w_0、w_f、t_{\Delta}$ 。

模型目标为最小化总旅行时间 t_s ，约束为式(1)、式(5)一式(10)。

2 基于 Opentrack 的有轨电车区间运行仿真模型

2.1 线路基本条件

丽江 1 号线位于云南省丽江市玉龙雪山南侧山麓,南起游客中心站,北至玉龙雪山站,串联了丽江市主要旅游景区及客流集散点,是丽江城市轨道交通线网规划中的旅游快速骨干通道。丽江 1 号线线路全长 20.465 km,共设 5 座地面站,分别为游客中心站、白沙古镇站、玉水寨站、东巴谷站和玉龙雪山站,平均站间距为 5.052 km。

丽江 1 号线线路坡度基本与地面自然坡度一致,全线共设 28 个坡段,最大纵坡为 -55.0‰ (下坡)。丽江 1 号线有轨电车运行状态通常为持续上坡和持续下坡。丽江 1 号线不同坡度的坡段数量如表 1 所示。

2.2 仿真模型的建立

本文通过 Opentrack 软件对该项目线路进行仿真,得到丽江 1 号线仿真线路图如图 1 所示。仿真模型的构建流程如图 2 所示。主要构建步骤如下:

1) 线路基础设施建模。该步骤还包括对线路

表 1 丽江 1 号线不同坡度的坡段数量表

Tab. 1 Counts of ramp on Lijiang Line 1 with different slope gradients

$\alpha/\text{‰}$	坡段数/个	长度/m	长度占比/%
0 ~ <10	2	780	3.811
10 ~ <20	11	6 105	29.831
20 ~ <40	10	6 420	31.371
40 ~ <50	2	2 160	10.555
50 ~ <55	2	3 750	18.324
55 ~ <60	1	1 250	6.108

长度、坡度、半径、限速条件、有无隧道等线路基础设施进行定义。

2) 区段、进路和运行线设置。区段是由一系列连续的双顶点和双顶点之间的轨道组成,区段的起讫点为主信号机,1 个区段只能被 1 列有轨电车占用。进路由同一方向的 1 个或多个区段组成。运行路线包括 1 个或多个进路。

3) 有轨电车的有轨电车构建。包括车辆基础数据准备、车辆牵引类型构建及有轨电车类型构建等 3 个步骤。

4) 有轨电车运行线定义和时刻表构建。根据有轨电车牵引计算得到的区间运行时间及相应的行车间隔来定义某段时间(如 30 min)内的有轨电车运行。其中行车间隔 $t_{\text{间}} = \text{列车周转时间} / \text{运用车列数}$ 。时刻表数据是用来定义某条运行线及其类型的。时刻表和运行线之间有着密切的关系。运行线所对应的时刻表数据包括运行线编号、车站、到站时间、离站时间和最小停站时间等。

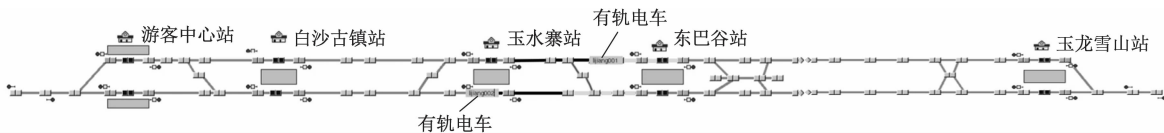


图 1 丽江 1 号线仿真线路图

Fig. 1 Simulation route diagram of Lijiang Line 1

3 线路仿真试验

3.1 线路仿真试验的数据取值

本文选取丽江 1 号线玉龙雪山站—东巴谷站下行方向区间(以下简称“玉东区间”)的线路进行线路仿真试验。玉东区间线路长度为 11.240 km,有整条线路中最大的坡度。根据坡度,玉东区间划分

为 13 个行车区段,其中区段 1、2、4、6、8、9、11 的坡度 $\alpha \geq 30\text{‰}$ 。考虑行车安全需对有轨电车限速。限速方案如表 2 所示。

丽江 1 号线有轨电车的车辆参数取值为: $m = 65\,370\text{ kg}$, $\gamma = 0.061\,2$, $A = 1.02$, $B = 0.023$, $C = 0.000\,42$ 。计算可得,有轨电车设计最大运行速度 $v_M = 70\text{ km/h}$ 。

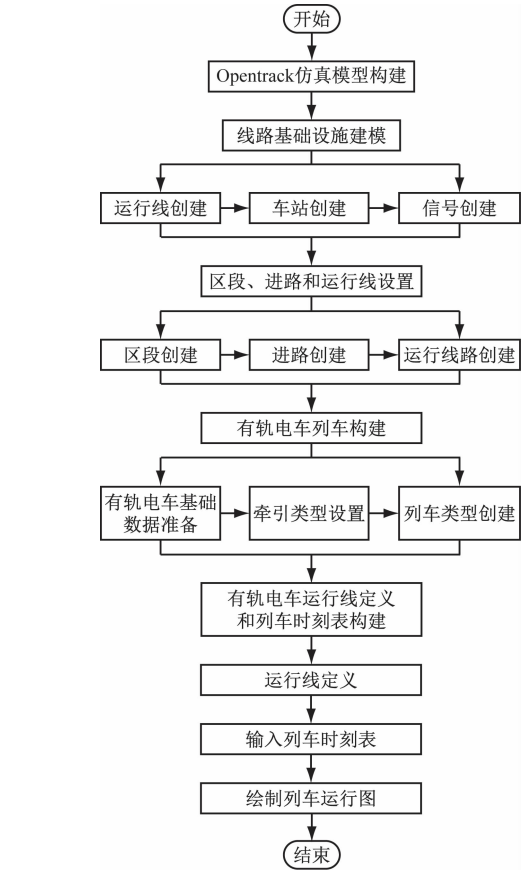


图 2 仿真模型的构建流程图

Fig. 2 Flow chart of simulation model construction

表 2 玉东区间各行车区段的 α 和 v_{\max}

Tab. 2 α and v_{\max} of each train operation segment in Yudong Interval

行车 区段	L_{Δ}/m	$\alpha/\%$	$v_{\max}/(\text{km/h})$		
			限速 方案一	限速 方案二	限速 方案三
1	410	-41.0	50.0	40.0	26.0
2	2015	-52.5	45.0	36.0	23.4
3	285	-10.0	45.0	45.0	45.0
4	2 900	-55.0	40.0	36.0	23.4
5	280	-10.0	45.0	45.0	45.0
6	1 160	-53.5	46.0	36.0	23.4
7	300	-10.0	55.0	55.0	55.0
8	940	-45.4	50.0	40.0	26.0
9	600	-55.0	45.0	36.0	23.4
10	310	-7.5	60.0	60.0	60.0
11	260	37.0	65.0	55.0	40.0
12	1 330	16.4	65.0	65.0	65.0
13	450	4.0	60.0	60.0	60.0

注: α 以上坡为正, 下坡为负。

3.2 线路仿真试验结果分析

本文使用 IBM ILOG CPLEX12.7 优化求解器对有轨电车运行时间进行求解, 根据各位置处的有轨电车 v 及线路 α 绘制不同限速方案下有轨电车运行速度曲线如图 3 所示, 牵引制动力曲线如图 4 所示。

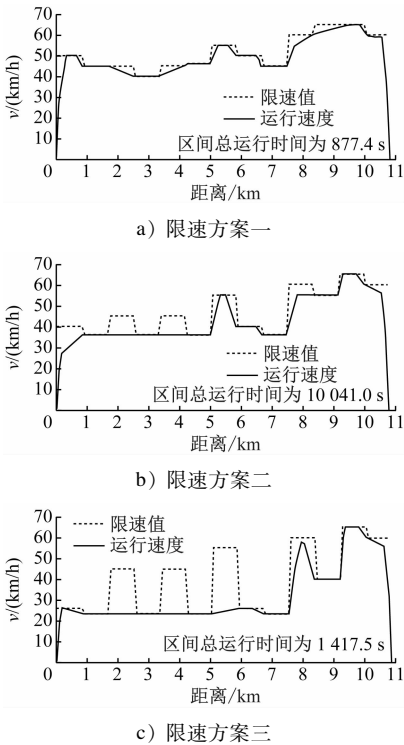
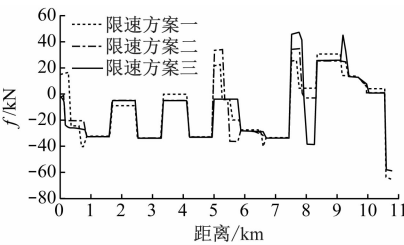


图 3 不同限速方案下的有轨电车运行速度曲线

Fig. 3 Tram operation speed curves in different speed limit schemes



注: 牵引时 f 为正, 制动时 f 为负。

图 4 不同限速方案下的有轨电车牵引制动力曲线

Fig. 4 Tram traction and braking force curves in different speed limit schemes

求解得到 3 个限速方案下的有轨电车区间总运行时间、区间总牵引制动力, 具体如表 3 所示。

由表 3 可以看出: 在确保有轨电车运行安全的前提下, 当长大下坡道的限速越低时, 有轨电车区间总旅行时间越长, 区间总牵引力越小, 区间总制

动力越大。

表 3 不同限速方案下的有轨电车区间 t_s 、区间总牵引力及总制动力

Tab.3 Tram interval t_s , total traction force and total braking force in different speed limit schemes

限速方案	t_s/s	总牵引力/kN	总制动力/kN
限速方案一	887.40	698.48	-212.95
限速方案二	1 041.00	685.49	-221.03
限速方案三	1 417.50	659.82	-232.04

进而,基于不同限速方案下的区间最小旅行时间,分别计算行车间隔时间。因本研究只考虑了长大下坡道不同区间限速对有轨电车在该区间内运行时间的影响,故对 $t_{\text{间}}$ 的计算进行了简化处理。

计算过程如下:分别选取不同限速方案下的区间总运行时间作为玉东区间下行方向的运行时间,其他区间运行时间沿用《丽江城市综合轨道交通项目一期工程可行性研究报告》的相关数据。经计算,不同限速方案对应的 $t_{\text{间}}$ 分别为 5.5、5.7、6.0 min。

利用 Opentrack 软件分别对不同限速方案下的 $t_{\text{间}}$ 进行仿真分析,得到部分时段运行图。其中限速方案一的部分时段运行图如图 5 所示。由仿真结果可知,在限速方案一和限速方案二下,玉东区间 30 min 可通过 6 列有轨电车;在限速方案三下,玉东区间 30 min 可通过 5 列有轨电车。由此进一步计算可知,若长大下坡道的有轨电车限速 v_{max} 减小 50%,则线路通过能力将降低约 17%。

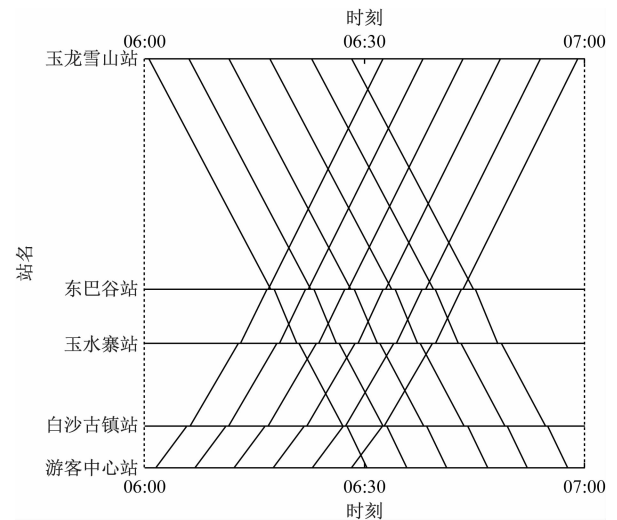


图 5 限速方案一的有轨电车部分时段运行图
Fig.5 Tram operation diagram of some time periods in speed limit Scheme 1

由试验结果可知, v_{max} 与有轨电车通过能力呈反比关系: v_{max} 越低,则区间运行时间越长,对应的 $t_{\text{间}}$ 也就越长,相应的线路通过能力就越低。

4 结语

针对西南地区有轨电车线路存在的坡度大、坡道长问题,往往采用区间限速来保证有轨电车在长大下坡道上的行车安全。本文基于有轨电车牵引计算及区间运行时间计算,建立区间运行仿真模型,定量分析了长大下坡道区间限速对有轨电车通过能力的影响。以丽江有轨电车 1 号线的线路及有轨电车数据进行实例分析。根据示例仿真分析结果分析,在确保有轨电车运行安全的前提下,长大下坡道限速减小 50%,线路通过能力降低了约 17%。由此总结:长大下坡道的限速方案会影响有轨电车的区间运行时间及该区段的行车间隔,进而影响该区段的线路通过能力;对长大下坡道限速越小,有轨电车区间总旅行时间越长,对应的行车间隔时间也越大,区间的通过能力就会越小。

参考文献

[1] 包维民, 闫海峰, 习子文. 长大坡道货物列车下坡限速检算分析[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(4): 66.
BAO Weimin, YAN Haifeng, XI Ziwen. Calculation and analysis on limiting speed of freight train running downhill on long and steep slopes [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7 (4): 66.

[2] 张守帅, 田长海. 高速铁路长大下坡地段列车运行速度相关问题研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(3): 124.
ZHANG Shoushuai, TIAN Changhai. Study on related problems of train operation speed on long heavy down grade of high speed railway[J]. China Railway Science, 2017, 38(3): 124.

[3] 高国隆, 张杰, 杨晓军. 长大下坡道条件下的高速铁路闭塞分区布置研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(2): 73.
GAO Guolong, ZHANG Jie, YANG Xiaojun. A study on the high speed railway signal block layout for long downhill grade line[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(2): 73.

[4] ZHANG T, WANG Z. The approximation of the train resistance based on improved PSO-RBF[C] // Proceedings of 2020 Chinese Control and Design Conference (CCSC). Hefei: IEEE, 2020:896.

[5] 高翔, 周毅, 贾冰, 等. 动车组隧道附加阻力试验研究[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(3): 44.
GAO Xiang, ZHOU Yi, JIA Bing, et al. Experimental study of the EMU tunnel additional resistance[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(3): 44.

(下转第 109 页)

4 结论

1) 该竖井的空间效应明显,三维模拟较平面计算更符合实测的围护桩变形规律。

2) 混凝土支撑可减小其所处位置桩体的内倾,预压力可降低最终的支撑轴力值且有助于抑制桩的水平位移,但对竖井围护桩沉降的影响较小。

3) 采用现浇法时,完整地施作每道钢筋混凝土支撑共需 35 d。而实际中,2[#]竖井各道支撑完整安装所需的时间分别为 17、14、8、13、11、10、10 d。该竖井紧邻高边坡且开挖深度大,预制混凝土支撑由于提前施加预应力可以充分激发围护桩后的被动土压力,从而减小桩的水平位移,更好地保证竖井稳定性。

此外,预制混凝土支撑能克服锚索支护在土层中锚固力不足的缺陷,充分结合钢支撑与现浇混凝土支撑的优势,保证支护体系的整体性、刚度大且施工效率高,适用于边坡附近。

参考文献

- [1] 任建喜,谭牧凡.黄土地区地铁车站深基坑变形规律[J].城市轨道交通研究,2021,24(8):55.
REN Jianxi, TAN Mufan. Deformation pattern of deep foundation pit of metro station in loess area[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(8): 55.

- [2] 王飞,郑余朝,罗川疆.兰州地铁黄河岸滩深大竖井结构设

(上接第 104 页)

- [6] 中铁二院工程集团有限责任公司.丽江城市综合轨道交通项目一期工程可行性研究报告[R].成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2018.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Feasibility study report of Lijiang urban integrated rail transit project phase I [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2018.
- [7] 任冲.高寒山区长大坡道铁路列车下坡限速研究[J].高速铁路技术,2019,10(2):14.
REN Chong. Study on speed limit of downhill trains on long-slope railways in Alpine and cold region[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(2): 14.
- [8] 郑昊迪.高速铁路长大坡道设置对动车组运行的影响研究

- 计及力学特性研究[J].城市轨道交通研究,2019,22(1):15.

WANG Fei, ZHENG Yuchao, LUO Chuanjiang. On the deep & large shaft structural design and mechanical characteristics of Lanzhou Metro on Yellow River floodplain[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(1): 15.

- [3] 林志斌,李元海,刘继强.软土基坑变形时空演化规律研究[J].现代隧道技术,2016,53(3):82.

LIN Zhibin, LI Yuanhai, LIU Jiqiang. A study on the spatial-temporal evolution regularity of the deformation of a foundation pit in soft soil[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(3): 82.

- [4] 汪鹏程,文杰,邵长征,等.基于数值分析的深基坑围护结构优化设计[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2016,39(9):1248.

WANG Pengcheng, WEN Jie, SHAO Changzheng, et al. Optimization design of retaining structure of deep excavation based on numerical analysis[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2016, 39(9): 1248.

- [5] 李强,骆发江,李鹏,等.一种预制装配式竖井内支撑结构:202010819455.1[P].2020-11-13.

LI Qiang, LUO Fajiang, LI Peng, et al. Prefabricated vertical shaft internal support structure: 202010819455.1 [P]. 2020-11-13.

- [6] 黄生根,付卓,吴军林.洞桩法施工引起土体变形的规律研究[J].铁道工程学报,2018,35(1):11.

HUANG Shenggen, FU Zhuo, WU Junlin. Study of soil deformation caused by construction with PBA method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(1): 11.

(收稿日期:2021-11-21)

- [D].北京:北京交通大学,2021.

ZHENG Haodi. Study on the influence of high-speed railway long-steep ramps on the operation of EMU train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

- [9] 范晓佳.高寒山区30‰长大坡道列车下坡限速研究[C]//朱颖.“川藏铁路建设的挑战与对策”2016学术交流会议论文集.北京:人民交通出版社股份有限公司,2016:314.

FAN Xiaojia. Research on train downhill speed limit of 30‰ long-large ramp in high-altitude mountainous area[C]//ZHU Ying Proceedings of 2016 Academic Exchanges on Challenge and Countermeasures of Sichuan-Tibet Railway Construction. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2016: 314.

(收稿日期:2023-02-06)