

# 山地城市市郊铁路连续长大陡坡设计方案

张文正<sup>1</sup> 蔡涵哲<sup>2</sup> 朱礼佳<sup>1</sup>

(1. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 200092, 上海; 2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州)

**摘要** [目的] 山地城市市郊铁路采用长大陡坡可以有效减少线路长度,降低工程投资,然而设置长大陡坡对列车运行不利,影响列车运营安全。为解决连续长大陡坡的技术难题,满足线路能力、运行间隔及行车速度等行车要求,应对山地城市市郊铁路长大连续陡坡设计方案进行研究。[方法] 以市郊铁路重庆中心城区至南川线东温泉站—黎香湖站区间线路纵断面设计为工程背景,通过仿真模拟对列车在坡道上的牵引和制动性能、列车救援能力及闸瓦热容量等进行检算,并从车辆性能、行车间隔、运营列车救援措施及列车运营安全保障等方面提出相应措施。[结果及结论] 山地城市市郊铁路连续长大陡坡线路纵断面采用连续陡坡+缓坡,即“坡度为35‰、长度为1 000 m的线路+坡度为18.6‰、长度为250 m的线路”的组合形式,可以满足列车牵引启动、故障运行、坡道制动及列车救援等行车要求,从而确保列车运营安全。

**关键词** 山地城市; 市郊铁路; 长大连续陡坡

**中图分类号** U212.34; U239.5

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.08.007

## Design Scheme for Continuous Long-large Steep Slopes in Suburban Railways of Mountainous Cities

ZHANG Wenzheng<sup>1</sup>, CAI Hanzhe<sup>2</sup>, ZHU Lijia<sup>1</sup>

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., 200092, Shanghai, China; 2. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China)

**Abstract** [Objective] In mountainous cities, setting up long-large steep slopes in suburban railways can effectively reduce route lengths and lower construction costs. However, this setup poses challenges for train operation, disturbing train operational safety. To address the technical difficulties caused by continuous long-large steep slopes, and to meet requirements for line capacity, departure intervals, and train speed, it is necessary to study the design scheme for such slopes in suburban railways of mountainous cities. [Method] Using the longitudinal profile design of the suburban railway line from Chongqing city center to Nanchuan Line Dongwenquan Station—Lixianghu Station Interval as the engineering back-

ground, simulations are conducted for checking the calculation of train traction and braking performance on slopes, rescue capability, and brake shoe thermal capacity. Corresponding measures are proposed from various aspects, including vehicle performance, departure intervals, rescue measures for operating trains, and train operational safety guarantee. [Result & Conclusion] The longitudinal profile of suburban railway continuous long-large steep slopes of s in mountainous cities adopts a combination of continuous steep slopes and gentle slopes, namely a combination of 'a slope with 35‰ gradient for 1 000 m track and a slope with 18.6‰ gradient for 250 meter track'. This design can meet the requirements for train traction start-up, fault operation, slope braking, and rescue operations, thereby ensuring train operational safety.

**Key words** mountainous city; suburban railway; long-large steep slope

随着国内轨道交通的发展,陆续出现很多长大陡坡线路工程的纵断面设计参数超出相关设计规范要求。如贵阳轨道交通1号线贵阳北站—雅关站区间高差达90.97 m,平均纵坡达25.41‰;蛮坡站—安云路站区间高差达44.64 m,平均纵坡达25.80‰。文献[1]对贵阳轨道交通1号线贵阳北站—雅关站和蛮坡站—安云路站区间连续长大陡坡进行专题研究,研究结论满足运营安全、车辆适应性、信号系统及防灾救援要求。文献[2]以长沙轨道交通4号线南湖新城站—赤黄路站区间长大陡坡(高差达37.00 m,平均纵坡达19.47‰)为依托,通过陡坡与缓坡组合形式对该线路进行纵断面设计,并运用仿真模拟验证设计的合理性。文献[3]以重庆轨道交通6号线江北城站—五里店站区间(高差达26.00 m,平均纵坡达26.00‰)为依托,从牵引启动和故障制动等方面对该线路进行模拟计算。文献[4]以贵阳轨道交通2号线马王庙站—三桥站区间(高差达80.00 m,平均纵坡达53‰)为依托,对该线路长大坡道的车辆牵引能力和牵引制动性能进行了仿真分析。

上述研究对象均为设计速度为 80 ~ 100 km/h 的城市轨道交通,而非市郊铁路。为指导市郊铁路长大陡坡设计,本文以重庆市郊铁路重庆中心城区至南川线(以下简称“市郊铁路南川线”)东温泉站—黎香湖站区间为背景,研究山地城市长大连续陡坡纵断面设计思路,为今后类似工程提供参考。

## 1 我国长大陡坡相关规范梳理

当前颁布的国家标准中,仅 GB 50157—2013《地铁设计规范》和 TB 10624—2020《市域(郊)铁路设计规范》对长大陡坡或长大坡道有明确规定。GB 50157—2013 规定:正线坡度大于 24‰,连续高差达 16 m 以上的长大陡坡地段,应根据线路平、纵断面及气候条件等核查车辆编组及其牵引和制动的动力性能、故障运行能力<sup>[5]</sup>,明确长大陡坡的坡度和抬升高度。TB 10624—2020 规定:对正线长大坡道应进行行车检算,同时满足线路能力、行车间隔、行车速度、牵引能力、制动能力及运营救援等设计要求<sup>[6]</sup>,未明确坡度和抬升高度,难以指导长大陡坡线路纵断面设计。

地方标准中涉及长大坡度的主要有 DBJ 50 T-354—2020《城轨快线设计标准》。该标准规定:线路坡度 $\leq 20‰$ 时,坡段长度不做限制;25‰的坡度长度不宜大于 8.0 km;30‰的坡度长度不宜大于 3.0 km;35‰的坡度长度不宜大于 1.0 km;50‰的坡度长度不宜大于 0.5 km。应对长大坡度进行行车检算,以满足线路能力、运行间隔及行车速度等要求<sup>[7]</sup>。

虽然上述标准已对长大陡坡的坡度和高差做了明确要求,但部分工程仍超上述标准要求。特别是位于山地城市的轨道交通,由于其地形标高差异极大,难以参考这些标准进行长大陡坡线路纵断面设计,须对其进行专项研究并合理确定线路坡度。

## 2 长大陡坡线路纵断面设计

市郊铁路南川线是重庆主城区东南方向的一条快速融城通道,最高运行速度为 160 km/h,采用山地市域 D 型车<sup>[8]</sup>。其中东温泉站—黎香湖站区间线路长度为 19.4 km,途经桃子荡山、东温泉山及丰盛场背斜等多处山脉<sup>[9]</sup>。市郊铁路南川线东温泉站—黎香湖站区间线路示意图见图 1。

东温泉站—黎香湖站区间穿越多处山体,东温

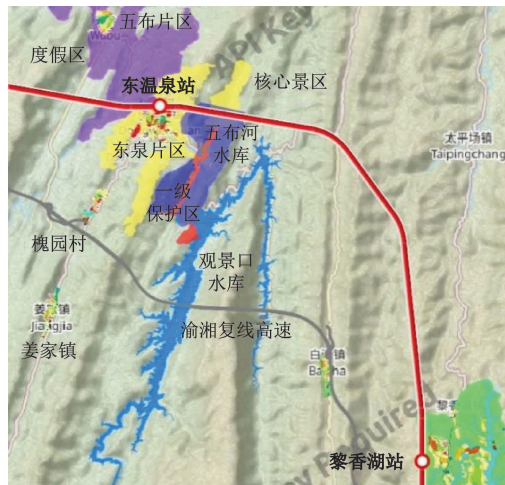


图 1 市郊铁路南川线东温泉站—黎香湖站区间线路示意图

Fig. 1 Diagram of Dongwenquan Station – Lixianghu Station Interval route of suburban railway Nanchuan Line

泉站地面标高约为 286 m,黎香湖站地面标高约为 806 m;两座车站均为地面站,轨面标高相差约为 520 m,平均坡度达 32.09‰,导致该区间出现长大陡坡。由于 TB 10624—2020 未对长大陡坡的坡度、坡段长度及抬升高度做明确要求,因此参考 DBJ 50 T-354—2020,同时结合国内长大陡坡工程案例,其线路纵断面设计时在相邻陡坡间应插入 20‰以下的缓坡。长大陡坡设置如下:坡度为 35.0‰(线路长度为 1 000 m) + 坡度为 18.6‰(线路长度为 250 m) + 坡度为 35.0‰(线路长度为 1 000 m) + 坡度为 18.6‰(线路长度为 250 m)。市郊铁路南川线东温泉站—黎香湖站区间线路纵断面示意图见图 2。

虽长大陡坡设置满足 DBJ 50 T-354—2020 的要求,但从线路纵断面来讲仍属于长大连续陡坡。根据 TB 10624—2020 和 DBJ 50 T-354—2020,对该区间进行行车检算,包括牵引计算、列车救援、紧急制动及闸瓦热容量计算等方面。

### 2.1 列车在坡道上的牵引性能检算

市郊铁路南川线车辆采用山地市域 D 型车,内部交路初、近、远期均采用 4 节编组列车(3M + 1Tc)(Tc 为带司机室的拖车,M 为无受电弓的电力车);贯通交路初、近期采用 4 节编组列车(3M + 1Tc),远期采用 6 节编组列车(4M + 2Tc)。列车启动的工作原理是列车启动牵引力克服其基本阻力和坡道阻力而产生的启动加速度使列车启动。当列车启动加速度  $> 0.083 \text{ m/s}^2$  时才可实现启动。6 节编组列车的技术参数为:列车运行速度为 0 ~ 40

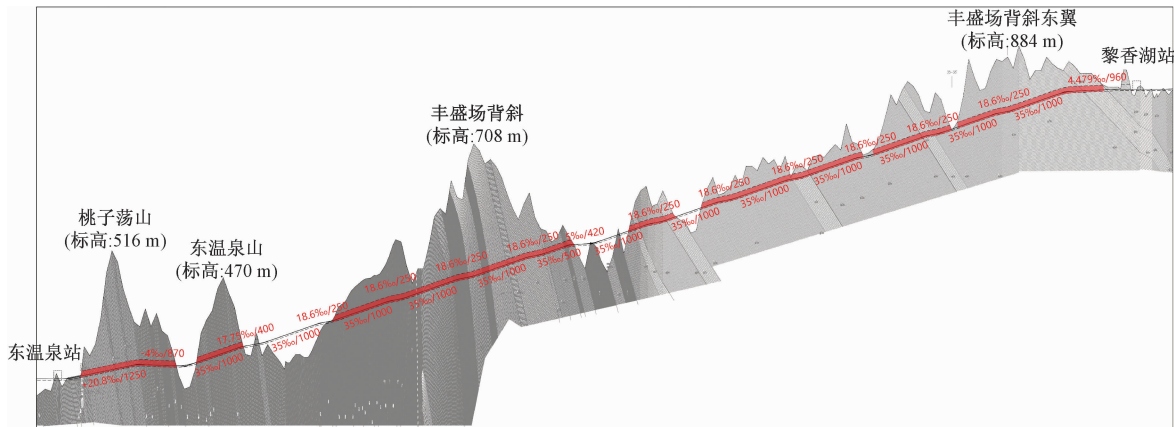


图 2 市郊铁路南川线东温泉站—黎香湖站区间线路纵断面示意图

Fig. 2 Longitudinal profile diagram of Dongwenquan Station – Lixianghu Station Interval route of suburban railway Nanchuan Line

km/h 时的平均加速度为  $0.9\text{ m/s}^2$ , 列车运行速度为  $0\sim160\text{ km/h}$  时的平均加速度  $\geq 0.35\text{ m/s}^2$ 。4 节编组列车的技术参数为: 列车运行速度为  $0\sim40\text{ km/h}$  时的平均加速度为  $1.00\text{ m/s}^2$ , 列车运行速度为  $0\sim160\text{ km/h}$  的平均加速度  $\geq 0.53\text{ m/s}^2$ 。列车在  $35\%$  的坡道上的牵引性能检算结果见表 1。

表 1 列车在 35‰的坡道上的牵引性能检算结果

Tab. 1 Checking calculation results of train traction performance on 35‰ slope

工况	起动加速度/( $\text{m/s}^2$ )		最高运行速度/( $\text{km/h}$ )		检算结论
	6 节编组列车	4 节编组列车	6 节编组列车	4 节编组列车	
正常工况	上坡起动	0.51	0.61		可正常起动
	上坡运行		160	160	可正常运行
故障工况 (AW3)	列车失去 1/4 动力	0.28	0.36		可正常起动
	列车失去 1/2 动力	0.09	0.11		列车仍能在正线的最大坡道上起动, 并行驶至邻近车站清客后返回车辆段
	无动力列车 救援运营	0.09	0.11		列车可在正线的最大坡道上牵引(或推送)至邻近车站, 其清客后被牵引至车辆段

注: AW3 为超超载荷。

由表 1 可见: ①正常及故障工况下, 列车在  $35\%$  坡度上的起动加速度大于 GB 50157—2013 要求的  $0.083\text{ m/s}^2$  时才能正常起动; ②列车在损失 1/4 及 1/2 动力的情况下, 满足 GB 50157—2013 规定的列车故障运行能力; ③列车在坡道上救援满载的无动力列车, 满足 GB 50157—2013 规定的列车

救援能力。

2.2 列车救援能力分析

本线初、近期均开行 4 节编组列车, 远期为 4/6 节编组列车混跑。4/6 节编组列车荷载和阻力如表 2 所示。

表 2 4/6 节编组列车荷载和阻力

Tab. 2 Load and resistance of 4/6-car formation train

项目	工况	Tc 车质量/t	M 车质量/t	总质量/t	起动阻力/kN	坡道附加阻力/kN
6 节编组列车	AW0	44.00	44.00	264.00	12.936	90.552
	AW2	58.40	60.86	360.24	17.652	123.562
	AW3	66.92	70.82	417.12	20.439	143.072
4 节编组列车	AW0	45.00	46.00	182.00	8.918	62.426
	AW2	59.98	62.32	242.60	11.887	83.212
	AW3	66.12	71.20	274.64	13.457	94.202

注: AW0 为空载; AW2 为额定载荷。



对 4/6 节编组列车的救援能力进行检算。35‰坡道上 4/6 节编组列车轮轨之间的黏着系数  $\mu$  的计算结果见表 3。

表 3 4/6 节编组列车在 35‰坡道上运行时的  $\mu$

Tab. 3 Adhesion coefficient  $\mu$  during 4/6-car formation train operating on 35‰ slope

项目	列车总质量/t	起动阻力/kN	坡道附加阻力/kN	牵引力/kN	$\mu$
4 节编组列车救援 4 节编组列车	456.64	22.38	156.63	219.18	0.16
4 节编组列车救援 6 节编组列车	599.12	29.36	205.50	287.57	0.21
6 节编组列车救援 4 节编组列车	538.64	26.39	184.75	258.54	0.15
6 节编组列车救援 6 节编组列车	681.12	33.37	233.62	326.92	0.19

注:列车总质量为救援列车和故障列车质量之和。

根据 TB/T 1407.1—2018《列车牵引计算》, $\mu$  的常用计算公式如下: $\mu = 0.24 + 12/(100 + 8v)$  ( $v$  为列车最高运行速度)。当最高运行速度为 160 km/h 时,列车轮轨间  $\mu$  的计算值为 0.248 7。根据车辆初步方案,单台牵引电机输出最大转矩约为 2 600 Nm,推算  $\mu$  为 0.23。因此,列车在 35‰坡道上的救援工况均可实现。由于  $\mu$  的计算值大于常规计算值的 0.18,为保证救援成功,需采取相应措施,如撒砂或开启高加速模式,适当增加轮轨黏着力。

### 2.3 列车在坡道上的制动性能检算

列车制动原理是列车的制动力与基本阻力之和克服坡道下滑力而产生的制动减速度使列车制动。当列车制动减速度大于 0 时,列车即可实现制动。根据山地市域 D 型车的相关参数,其在平坡运行时的常用制动减速度为  $1.0 \text{ m/s}^2$ ,紧急制动减速度为  $1.2 \text{ m/s}^2$ ;列车在 35‰坡道上由下滑力产生的加速度为  $0.35 \text{ m/s}^2$ ,因此常用制动剩余减速度为  $0.65 \text{ m/s}^2$ ,紧急制动剩余减速度为  $0.85 \text{ m/s}^2$ ,即列车制动力大于下滑力。从剩余加速度分析,列车以最高运行速度 160 km/h 在 0‰的平坡和 35‰的坡道上以各种速度运行时,其常用制动和紧急制动距离见表 4 和表 5。

表 4 列车常用制动距离

Tab. 4 Train common braking distance

坡度/‰	$a/( \text{m/s}^2 )$	$v/( \text{km/h} )$	$s/\text{m}$
0	1.00	160	987.65
35	0.65	160	1 519.47

注: $a$  为列车制动减速度; $s$  为制动距离。

在坡度为 35‰的下坡道上,若要满足其与平坡相同的制动距离,常用制动初速度需限制在 129 km/h,紧急制动初速度需限制在 134 km/h,即列车在长大陡坡上需限速运行,应取两者最小限速值。

表 5 列车紧急制动距离

Tab. 5 Train emergency braking distance

坡度/‰	$a/( \text{m/s}^2 )$	$v/( \text{km/h} )$	$s/\text{m}$
0	1.20	160	823.05
35	0.85	160	1 161.95

通过计算可得出:①制动初速度相同的情况下,坡度为 35‰下坡道上的列车常用制动和紧急制动距离均较平坡长;②若要与平坡下列车的制动距离相同,坡度为 35‰下坡道上列车的常用制动和紧急制动初速度均需限制在 129 km/h,对应的制动距离分别为 987.71 m(常用制动)和 755.31 m(紧急制动);③对于本线 4M+2Tc 的 6 节编组列车及 3M+1Tc 的 4 节编组列车,动车占比分别为 66.7% 和 75.0%,制动性能优良,制动能力满足运营需求。

### 2.4 闸瓦热容量计算

AW3 工况下,列车在黎香湖站—东温泉站区间长大陡坡上电制动失效,此时以 160 km/h 制动初速度进行紧急制动。对该工况下的盘形制动摩擦副制动热容量进行计算。粉末冶金闸片主要以金属粉末与非金属粉末的混合物作为原料,经过成型并在高温下烧结制成。当该闸片长时间工作温度超过  $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时(如纯空气模拟运营工况),可能会出现物理力学性能衰退,摩擦性能衰减,其磨耗量会显著增加,闸片寿命随之缩短。因此,在评价列车长时间处于较高温度热负荷仿真结果时,一般建议铸钢制动盘形制动摩擦副温升不超过  $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且短时铸钢制动盘形制动摩擦副温升不超过  $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。铸钢制动盘对偶粉末冶金闸片制动摩擦副表面温升-时间关系曲线如图 3 所示。

由图 3 可见:列车以 160 km/h 的制动初速度在长大陡坡上进行紧急制动时,摩擦副表面最高温度为  $375 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,该温度值低于铸钢制动盘对偶粉末冶金

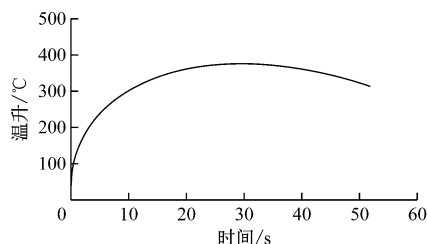


图 3 铸钢制动盘对偶粉末冶金闸片制动摩擦副表面温升-时间关系曲线

Fig. 3 Temperature rise-time relationship curve of braking friction surface between steel brake disc and coupled powder metallurgy brake pad

闸片制动摩擦副的许用温度极限,满足该工况的制动要求。

### 3 列车运营安全保障措施

#### 3.1 车辆性能要求

1) 为保证列车在长大坡道条件下满足正常运营工况和故障救援工况的性能要求,推荐 4 节编组列车采用 3M+1Tc 的动力布置,6 节编组列车采用 4M+2Tc 的动力布置。

2) 车辆采用电制动和空气制动的复合制动方式,充分发挥电制动功能,制动时优先进行再生制动,最大限度地将能量返回电网;空气制动采用盘形制动,以提高制动性能。

3) 防滑控制。每根车轴应配备一个防滑控制阀;车轮防滑保护装置应对每根轮轴单独控制,从而对每个轮对实现及时的防滑保护,最大程度地避免列车滑动,保护车轮不受擦伤,缩短制动距离。

4) 空转控制和保护。车辆牵引系统应充分利用轮轨黏着条件,按列车载重从空车到超员范围内自动调整牵引力和电制动力的的大小,使列车在 AW0、AW2、AW3 工况下保持起动加速度和制动减速度基本不变,并具备反应及时、有效可靠的空转和滑行控制等能力。

#### 3.2 行车间隔要求

本线最高运行速度为 160 km/h,系统能力为 20 对/h,则最小行车间隔为 3 min。最高运行速度为 160 km/h 的列车采用当前信号技术在区间的行车追踪间隔为 140 s。列车在 35‰下坡道上的常用减速度和紧急减速度分别为  $0.65 \text{ m/s}^2$  和  $0.85 \text{ m/s}^2$ ,常用制动距离和紧急制动距离分别为 1 519 m 和 1 162 m,常用制动时间和紧急制动时间分别为 68 s 和 52 s;ATO(列车自动运行)时间取 3 s,列车空走

时间取 3 s;列车从起动、制动到停车的时间分别为 74 s 和 58 s,且均小于最小追踪间隔 140 s。由此可见,理论计算可满足系统能力需求和运营安全。

#### 3.3 运营列车救援措施

长大陡坡对于故障列车救援路径无影响,一般采用后续列车推送的方式,将故障列车就近推送至停车线或车辆基地。故障列车推送路径见图 4。



图 4 故障列车推送路径

Fig. 4 Faulty train push path

列车在长大陡坡上运行时可能存在雨天下坡段  $\mu$  降低的问题,可提前根据天气情况采用撒砂或增设防滑链等措施。

#### 3.4 列车运营安全保障

1) 根据信号指令计算列车在长大陡坡上的最高运行速度,其目的是尽力使列车处于电制动和空气制动有效控制范围内,避免高速运行列车失控。

2) 在线路条件较差的情况下,为保证车轮踏面与轨道的黏着性能,可采用撒砂措施。

### 4 结语

市郊铁路南川线东温泉站—黎香湖站区间受地形标高因素控制,不可避免地存在长大陡坡,该区区间线路纵断面采用连续陡坡+缓坡,即“坡度为 35.0‰、长度为 1 000 m 的线路+坡度为 18.6‰、长度为 250 m 的线路”的组合形式,车辆采用山地市域 D 型车,可以满足牵引起动、故障运行、坡道制动及列车救援等设计要求,实现列车运营安全,为今后类似工程提供参考。

### 参考文献

- [1] 何建枝. 贵阳轨道交通 1 号线长大连续坡道及运营安全研究[J]. 都市快轨交通, 2011, 24(6): 29.  
HE Jianzhi. Study on continuous long and sloping route and operation safety for Guiyang Metro Line 1[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011, 24(6): 29.
- [2] 王春森. 城市轨道交通线路长大陡坡设计的探讨[J]. 隧道建设, 2012, 32(2): 184.  
WANG Chunsen. Discussion on design of long steep slope section

- of urban rail transit lines [J]. Tunnel Construction, 2012, 32 (2): 184.
- [3] 王学贵. 重庆地铁6号线长大坡道列车运行能力研究[J]. 中国铁路, 2013(10): 61.  
WANG Xuegui. Study on train running capacity on long-large ramps in Chongqing Metro Line 6 [J]. Chinese Railway, 2013 (10): 61.
- [4] 李涛, 王维, 王代富. 山地城市轨道交通长大坡道路方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(11): 73.  
LI Tao, WANG Wei, WANG Daifu. Selection of route with long-steep ramp for urban rail transit in mountainous cities [J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(11): 73.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [6] 国家铁路局. 市域(郊)铁路设计规范: TB 10624—2020 [S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2020.  
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of suburban railway: TB 10624—2020 [S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2020.
- [7] 重庆市住房和城乡建设委员会. 城轨快线设计标准: 渝建标 [2020]17 号 [A]. 重庆: 重庆市住房和城乡建设委员会, 2020.
- Chongqing Municipal Committee of Housing and Urban-Rural Development. Design standard for urban rail transit: YJB [2020] No. 17 [A]. Chongqing: Chongqing Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development, 2020.
- [8] 重庆市发展和改革委员会. 关于市郊铁路重庆中心城区至南川线工程可行性研究报告的批复 [R]. 重庆: 重庆市发展和改革委员会, 2022.  
Chongqing Municipal Development and Reform Commission. Reply to the feasibility study report on the suburban railway project from Chongqing Central City to Nanchuan Line [R]. Chongqing: Chongqing Municipal Development and Reform Commission, 2022.
- [9] 重庆市勘测院. 市郊铁路重庆中心城区至南川线工程岩土工程勘察报告 [R]. 重庆: 重庆市勘测院, 2022.  
Chongqing Survey Institute. Geotechnical investigation report of suburban railway project from Chongqing Central City to Nanchuan Line [R]. Chongqing: Chongqing Survey Institute, 2022.
- 收稿日期: 2024-01-04 修回日期: 2024-01-28 出版日期: 2024-08-10  
Received: 2024-01-04 Revised: 2024-01-28 Published: 2024-08-10  
• 通信作者: 张文正, 高级工程师, 460210270@qq.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 38 页)

- FENG Yonghua, ZHANG Zhenxian, LIANG Haixiao, et al. Research on the causes and improvement measures for low-frequency shaking of EMU [J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(5): 11.
- [5] 王月. 论述铁路线路晃车原因与整治 [J]. 科技与创新, 2017 (19): 51.  
WANG Yue. Discussion on causes and treatment of train oscillation on railway line [J]. Science and Technology & Innovation, 2017(19): 51.
- [6] 戴焕云, 杨震寰, 干锋. 轨道车辆轮轨等效锥度管理措施研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2021(12): 12.  
DAI Huanyun, YANG Zhenhuan, GAN Feng. Research on management measures of wheel-rail equivalent slope of rail vehicles [J]. Modern Urban Transit, 2021(12): 12.
- [7] 曾京, 干锋, 罗光兵. 轨道车辆轮轨关系检测及等效锥度管理 [J]. 现代城市轨道交通, 2021(6): 29.  
ZENG Jing, GAN Feng, LUO Guangbing. Inspection on wheel and rail interface of rail vehicles and management of equivalent conicity [J]. Modern Urban Transit, 2021(6): 29.
- [8] 练兴平, 杨晓刚, 汪杰, 等. 成灌线某晃车地段 CRTS III 型板式无砟轨道层间离缝整治研究 [J]. 铁道标准设计, 2018, 62 (11): 34.
- LIAN Xingping, YANG Xiaogang, WANG Jie, et al. Research on the connection damage remediation of CRTS III ballastless track in train shaking area of Chengdu to Dujiangyan high-speed railway [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(11): 34.
- [9] 高雅, 时瑾, 李克飞. 轨底坡对运营地铁轮轨接触特性的影响分析 [J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(6): 25.  
GAO Ya, SHI Jin, LI Kefei. Influence of rail cant on wheel-rail contact characteristics of operating metro [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(6): 25.
- [10] 孙善超, 王卫东, 刘今朝, 等. 基于车辆系统稳定性分析的晃车现象研究 [J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2): 82.  
SUN Shanchao, WANG Weidong, LIU Jinzhao, et al. Study of carbody's severe vibration based on stability analysis of vehicle system [J]. China Railway Science, 2012, 33(2): 82.
- 收稿日期: 2022-03-02 修回日期: 2022-04-07 出版日期: 2024-08-10  
Received: 2022-03-02 Revised: 2022-04-07 Published: 2024-08-10  
• 第一作者: 张雁珍, 高级工程师, 1003733674@qq.com  
通信作者: 王文斌, 研究员, 15682538713@163.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