

近断层高速铁路简支梁桥减隔震研究

张素杰, 杨国静, 陈继太, 寇培培

(中国铁路设计集团有限公司, 天津市 300308)

摘要: 在地震带分布密集地区, 近年来我国建设了高速铁路桥梁。邻近断层高速铁路桥梁有遭受强地震破坏的风险。如2022年青海门源地震为例, 硫磺沟高速铁路简支梁桥受损严重, 以致兰新高铁停运, 可见, 对近断层地震动作用下确定合适的高铁简支梁桥抗震体系, 已成为当前强震区近断层高速铁路桥梁抗震设计的亟须解决的问题。采用双曲面球型减隔震支座和环型钢阻尼减隔震支座, 对近活动断层简支梁进行抗震设计, 发现后者对位移的控制能力更强。在8度罕遇地震作用下, 其纵桥向剪力减震率为45%~83%; 弯矩减震率为52%~83%, 支座最大位移为247 mm。优先推荐近断层区采用环型钢阻尼减隔震支座。

关键词: 近断层地震; 高速铁路简支梁桥; 地震响应; 减隔震控制

中图分类号: U442.55; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)04-0063-05

Research on Seismic Isolation of Simple-Supported Beam Bridge for High-Speed Railways near Faults

ZHANG Sujie, YANG Guojing, CHEN Jitai, KOU Peipei

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: High-speed railway bridges have been built in China in recent years in areas with dense seismic zones. High-speed railway bridges near faults are at risk of strong earthquake damage. Taking the 2022 Menyuan earthquake in Qinghai Province as an example, the simple-supported beam bridge of the Liuhuanggou High-Speed Railway was seriously damaged, so that the Lanzhou-Xinjiang High-Speed Railway was suspended. It can be seen that the determination of the appropriate seismic system of the high-speed railway simple-supported beam bridge under the action of near-fault ground motion has become an urgent problem to be solved in the seismic design of near-fault high-speed railway bridges in strong earthquake areas. The hyperboloid spherical seismic isolation bearing and the ring steel damping seismic isolation bearing are used to carry out the seismic design of the simple-supported beam near the active fault. It is found that the latter has a stronger ability to control displacement. Under the 8 degree rare earthquake, the longitudinal shear damping rate is 45%~83%. The damping ratio of the bending moment is 52%~83%, and the maximum displacement of the bearing is 247 mm. Annular steel damping seismic isolation bearings are recommended as the priority option for application in near-fault areas.

Keywords: near-fault earthquake; high-speed railway simple-supported beam bridge; seismic response; seismic isolation control

0 引言

我国高速铁路网络覆盖全国大部分区域, 对于地震带分布密集的地区, 高铁桥梁建设难以实现断层避让原则。铁路桥梁等国家重大工程不可避免地穿过地震易发区, 抗震问题突出^[1-2]。以2022年青海门源地震为例, 跨越发震断层“冷龙岭”的祁连山隧

道和附近铁路桥梁受损严重, 以致高铁停运, 地震中硫磺沟大桥部分主梁出现侧向移位及偏转, 支座出现脱空及固定螺栓剪断, 挡块被撞坏, 轨道板出现侧移, 钢轨和扣件出现损坏等震害。桥墩墩身出现裂缝或者钢筋屈曲等震害^[3-4]。可见, 邻近断层高速铁路桥梁有遭遇强地震破坏的风险。另外, 案例桥梁的高墩涉及到空心桥墩, 其地震反应振型复杂, 也对其抗震能力十分不利^[5]。

当前, 高铁简支梁桥的减隔震研究取得一定进展。学者们运用振动台试验与数值分析等手段, 针对强震下的高铁简支梁桥组合减隔震体系展开深入

收稿日期: 2025-12-05

基金项目: 中国铁路设计集团有限公司科技研发课题(2023A0248008)

作者简介: 张素杰(1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事铁路桥梁、城轨桥梁结构设计工作。

探究,结果表明合理的减隔震体系可有效降低铁路桥梁的地震响应,提高其抗震性能^[6-8]。在减隔震支座的研发与应用方面,摩擦型支座以及多级滑动摩擦自适应隔震支座等新型支座,展现出较好的减隔震效果。通过对支座参数的系统分析与优化,能够进一步提升桥梁的抗震能力,增强其在地震中的稳定性与安全性^[9-11]。与此同时,相关研究还从保障行车安全、应对随机地震响应,对高铁桥梁的减隔震体系进行了探讨^[12-15]。

针对减隔震简支梁桥展开研究,以潍宿高铁32 m跨径简支梁桥为背景,比较了采用双曲面球型减隔震支座和环型钢阻尼减隔震支座后的地震反应性能,并提出合适的推荐方案。在对潍宿高铁抗震性能研究基础上,给出近断层高铁桥梁合理抗震体系建议,为全线桥梁抗震设计提供技术支撑的同时,也为同类桥梁工程提供借鉴。

1 梁体、桥墩模拟

潍宿高铁主梁为32 m跨径预制无砟轨道预应力混凝土双线简支箱梁。梁体采用强度等级为C50的混凝土,弹性模量 $E=3.45\times10^4$ MPa,泊松比为0.2,密度为2 500 kg/m³。主梁为单箱单室截面,顶板宽12.6 m,底板宽5.5 m,梁高为3.1 m。

采用双线流线形桥墩,主要分为实体墩和空心墩。其中实体墩桥墩总高范围为3~24 m,空心墩桥墩总高范围为25~35 m。桥墩采用强度等级为C35的混凝土,弹性模量 $E=3.15\times10^4$ MPa,泊松比0.2,密度2 500 kg/m³。本桥采用MIDAS Civil软件进行有限元建模,主梁采用弹性梁单元,桥墩采用纤维梁柱单元。

2 减隔震支座模拟

针对潍宿高铁沿线近断裂带,在8度烈度区,为了提高简支梁在罕遇地震下的抗震性能,研究了2种

减隔震方案,分别为双曲面球型减隔震支座方案和环型钢阻尼支座方案。

双曲面球型减隔震支座力与位移关系见式(1):

$$F=W\cdot\mu+W\cdot\frac{\Delta}{R}$$
(1)

式中: W 为支座轴力; Δ 为水平位移; R 为滑动面曲率半径; μ 为摩擦系数。一期恒载和二期恒载造成上部梁体每端反力为6 510 kN,则每个支座承受的竖向荷载(不考虑活载)为3 250 kN。本文计算中, W 取3 250 kN, R 取1 800 mm, μ 取0.06。支座水平位移200 mm时,阻尼力575 kN,等效阻尼比约为0.22。

环型钢阻尼减隔震支座示意如图1所示。环型钢阻尼减隔震支座工作原理为,在罕遇地震工况下,剪断销剪断,中座板与下支座板相对滑动,由摩擦阻尼系统和钢阻尼弹塑性耗能系统共同耗能。与普通减隔震支座相比,由于增加了环形钢阻尼元件,支座能够提供更大的阻尼力及阻尼比,降低地震工况下的墩梁相对位移,可适应更高烈度的地震设防需要。根据环型钢阻尼减隔震支座滞回曲线,提取骨架曲线后确定双线性模型进行模拟。环型钢阻尼隔震支座参数如表1所示。

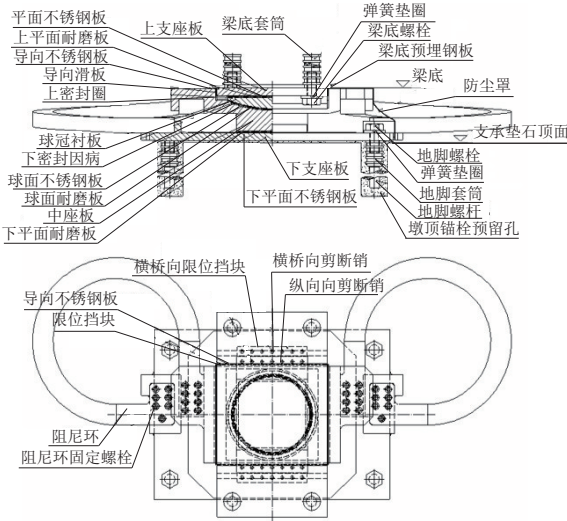


图1 环型钢阻尼减隔震支座(GD)示意图

表1 环型钢阻尼隔震支座参数表

梁型	竖向设计承载力/kN	墩高/m	支座类型	纵桥向 剪力/kN	横桥向 剪力/kN	纵桥向常规 位移/mm	纵、横桥向 地震位移/mm	设计阻尼力/ kN
32 m 无砟混凝土简支梁	4 500	≤9	GD	1 300	850	—	±200	780
			ZX	1 300	850	±30	±200	780
		>9	GD	1 000	900	—	±200	780
			ZX	1 000	900	±30	±200	780

3 桥梁结构地震响应

简支梁桥跨抗震计算采用32 m+32 m跨度组合。

一期恒载和二期恒载造成上部梁体每端反力为6 510 kN,静活载造成的最大反力为每端2 927 kN。当考虑多遇地震的横桥向地震作用的时候,按照规

范要求^[16],横向考虑 50% 的活载地震效应,竖向荷载则按列车竖向静活载全值计取。

依据活动断层段工程场地地表地震动参数表,按照“多遇地震、罕遇地震”两阶段设计,两水准设防。多遇地震响应计算采用的地震动参数取自安评报告, $A_g=0.25\text{ g}$, $T_g=0.45\text{ s}$ 工程场地(0.25g 地震动参数可以包络最新地震动参数),该处工程场地位于近活动断层范围,具有较好的代表性。该烈度区多遇地震动峰值加速度略小于规范 8 度 0.3g 水平,而罕遇地震动峰值加速度及周期均较大,尤其是动峰值加速度已超越铁路震规 9 度 0.4g 罕遇地震水平,最大达 0.59g,简支梁墩梁位移应控制在

250 mm 以内。

3.1 普通支座设计

采用 MIDAS Civil 建立全桥有限元模型,本文采用时程分析方法对桥梁进行地震响应分析。基于 Newmark- β 法进行计算分析,并且分别取参数 γ 和 β 的默认值为 0.50 和 0.25。采用瑞利阻尼,阻尼比取 5% 分析法。

选取 3 条时程波输入模型,结果参照最大值取用。罕遇地震加速度度峰值为 0.59g 时,采用普通支座计算桥墩结构响应结果见表 2。该表汇总了不同墩高的桥墩在纵、横向地震作用下,墩顶、墩底及桩顶截面的最大剪力、轴力与弯矩响应值。

表 2 时程响应最大值记录(普通支座)

桥墩编号	位置	纵向			横向		
		剪力/kN	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
P1 墩 5 m	墩顶	27 148.08	95.17	2.49	29 469.4	0	0.01
	墩底	29 630.5	98.47	133 363	32 772.5	0	149 727
	桩顶	36 875.9	100.15	142 457	32 973.3	0	150 985
P2 墩 10 m	墩顶	30 074.14	65.9	1.78	24 499.8	0	0.02
	墩底	32 980.9	71.99	317 405	26 618.4	0	258 677
	桩顶	33 281.8	72.89	318 758	26 805.7	0	259 553
P3 墩 14 m	墩顶	31 361.03	64.59	1.76	17 369.1	0	0.02
	墩底	36 116.1	67.23	487 183	20 435.2	0	374 261
	桩顶	36 337.9	67.33	490 182	20 579.3	0	375 320
P4 墩 24 m	墩顶	27 238.52	89.08	2.46	17 313.28	0	0.01
	墩底	36 381.8	114.61	775 898	25 717.1	0	520 894
	桩顶	37 187.5	126.96	776 849	26 752.7	0	523 034
P5 墩 35 m	墩顶	21 644.16	40.39	1.15	16 273.14	0	0.01
	墩底	30 041.5	56.58	973 635	25 005.2	0	753 235
	桩顶	30 480.1	59.51	974 953	26 520.9	0	753 540

3.2 减隔震支座

3.2.1 双曲面球型减隔震支座

罕遇地震($A_g=0.59\text{ g}$, $T_g=0.6\text{ s}$)工况下,采用双曲面球型减隔震支座在罕遇地震下的计算位移均超出 300 mm,单独使用双曲面球型减隔震支座不能满足工况需求。

3.2.2 环型钢阻尼减隔震支座

为了研究环型钢阻尼减隔震支座的耗能性能,对该类型支座进行了逐级加载实验,通过实验得到了支座荷载和支座位移的关系曲线即滞回曲线。提取环型钢阻尼减隔震支座滞回曲线的关键点,得到支座的骨架曲线(见图 2)。支座通过边界条件中的多折线模拟,输入支座荷载和支座位移关系。

采用环型钢阻尼减隔震支座在罕遇地震下的计算结果见表 3。其纵桥向和横桥向的支座位移均介

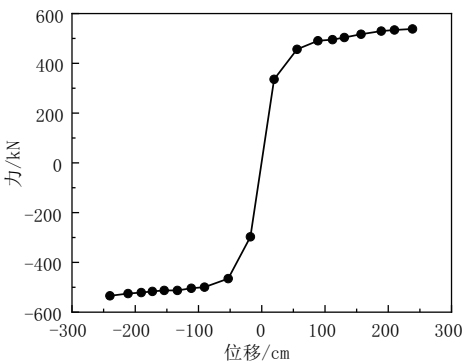


图 2 环型钢阻尼减隔震支座骨架曲线

于 180 ~ 250 mm,满足设计需求。

4 减震效果对比

8 度($A_g=0.25\text{ g}$, $T_g=0.45\text{ s}$)罕遇地震作用下,设置普通支座(不设减隔震装置)与设置双曲面球型减隔震支座和环型钢阻尼减隔震支座,桥墩时程响应最

表3 时程响应最大值记录(环型钢阻尼减隔震支座)

桥墩编号	位置	纵向				横向			
		剪力/kN	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	支座位移/mm	剪力/kN	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	支座位移/mm
P1墩5 m	墩顶	3 661.72	59.01	1.48		3 659.58	0	0	
	墩底	6 191.94	64.86	25 834.8	242.4	6 326.3	0	25 836.8	247
	桩顶	6 408.62	64.14	25 842.3		6 562.25	0	26 052.7	
P2墩10 m	墩顶	3 662.66	101.85	2.57		3 671.6	0	0	
	墩底	5 864.32	111.24	57 975.5	243.44	7 011.78	0	47 565.5	228.25
	桩顶	6 093.79	113.13	58 713.5		7 379.44	0	47 166.4	
P3墩14 m	墩顶	6 440.08	60.41	1.57		6 396.88	0	0.03	
	墩底	9 005.22	67.78	113 133	180.01	8 166.84	0	112 087	229.86
	桩顶	9 299.15	73.57	113 531		8 467.95	0	112 792	
P4墩24 m	墩顶	5 655.30	51.1	1.34		5 654.98	0	0.02	
	墩底	11 828.80	78.06	222 604	244.88	11 342.4	0	194 696	224.14
	桩顶	13 155.60	91.33	223 919		12 473	0	196 110	
P5墩35 m	墩顶	6 438.34	36.14	0.02		6 429.06	0	0.97	
	墩底	12 902.70	52.53	323 820	237.6	13 442.2	0	359 744	197.2
	桩顶	13 714.90	57.13	323 747		14 692.1	0	360 223	

大值对比,并给出了减震率(见表4、表5)。设置双曲面球型减隔震支座后,地震动参数罕遇地震(0.59g, 0.6 s)过大,计算位移均超过300 mm以上,不适用于本工况,不再做详细计算。

表4 0.25g,0.45 s环型阻尼减隔震支座纵桥向减隔震效果

桥墩类型	纵桥向					
	剪力/kN			弯矩/(kN·m)		
	减震前	减震后	减震率	减震前	减震后	减震率
P1墩(5 m)	36 875.9	6 408.62	83%	142 457	258 34.8	82%
P2墩(10 m)	33 281.8	6 093.79	82%	318 758	587 13.5	82%
P3墩(14 m)	36 337.9	9 299.15	74%	490 182	113 531	77%
P4墩(24 m)	37 187.5	13 155.6	65%	776 849	223 919	71%
P5墩(35 m)	30 480.1	13 714.9	55%	974 953	323 747	67%

表5 0.25g,0.45 s环型阻尼减隔震支座横桥向减隔震效果

桥墩类型	横桥向					
	剪力/kN			弯矩/(kN·m)		
	减震前	减震后	减震率	减震前	减震后	减震率
P1墩(5 m)	32 973.3	6 562.25	80%	150 985	26 052.7	83%
P2墩(10 m)	26 805.7	7 379.44	72%	259 553	47 166.4	82%
P3墩(14 m)	20 579.3	8 467.95	59%	375 320	112 792	70%
P4墩(24 m)	26 752.7	12473	53%	523 034	196 110	63%
P5墩(35 m)	26 520.9	14 692.1	45%	753 540	360 223	52%

设置环型阻尼减隔震支座后,纵桥向剪力减震率为55%~83%;弯矩减震率为67%~82%,基本表现为随桥墩高度增加减震率减小的趋势,即高桥墩的减震效果不及低桥墩。横桥向剪力减震率为45%~80%;弯矩减震率为52%~83%,支座最大位移为247 mm。

因线路也有部分区域位于8度($A_g=0.22\text{ g}$, $T_g=0.4\text{ s}$)烈度区,作者也分析了该罕遇地震作用下,设置普通支座(不设减隔震装置)与设置双曲面球型减隔震支座和环型阻尼减隔震支座,桥墩时程响应最大值对比,以纵桥向减震率为例,见表6、表7。

表6 0.22g,0.4 s双曲面球型减隔震支座纵桥向减隔震效果

桥墩类型	纵桥向					
	剪力/kN			弯矩/(kN·m)		
	减震前	减震后	减震率	减震前	减震后	减震率
P1墩(5 m)	18 672	3 158	83%	94 369	15 356	84%
P2墩(10 m)	14 165	3 772	73%	141 873	33 622	76%
P3墩(14 m)	11 698	3 883	67%	155 076	45 227	71%
P4墩(24 m)	14 440	6 165	57%	273 549	102 101	63%
P5墩(35 m)	13 997	5 756	59%	398 370	155 476	61%

表7 0.22g,0.4 s环型阻尼减隔震支座横桥向减隔震效果

桥墩类型	横桥向					
	剪力/kN			弯矩/(kN·m)		
	减震前	减震后	减震率	减震前	减震后	减震率
P1墩(5 m)	18 672	3 931	79%	94 369	18 844	80%
P2墩(10 m)	14 165	4 510	68%	141 873	39 516	72%
P3墩(14 m)	11 698	4 537	61%	155 076	48 803	69%
P4墩(24 m)	14 440	6 927	52%	273 549	111 703	59%
P5墩(35 m)	13 997	7 361	47%	398 370	184 004	54%

可以看出,双曲面球型减隔震支座与环型阻尼减隔震支座对0.22g 0.4 s地区的减震效果大致相当,但双曲面球型减隔震支座的摩擦耗能不及环形阻尼器的塑性变形+摩擦的组合耗能,因此摩擦摆支座最大位移达到265 mm,而环型钢阻尼减隔震支座最大

位移为 200 mm。故环型阻尼减隔震支座与双曲面球型减隔震支座减震率大致相当情况下,能更好地控制墩顶位移。

5 结 语

采用双曲面球型减隔震支座和环型钢阻尼减隔震支座,对近活动断层简支梁进行抗震设计。总结如下。

(1)强震下环型钢阻尼器通过滞回耗能,消耗大量的地震动输入结构的能量,从而起到减小简支梁桥墩梁相对位移的作用。其支座最大位移为 247 mm,符合设计要求。

(2)设置环型阻尼减隔震支座后,纵桥向和横桥向剪力减震率在 45%~83%,弯矩减震率为 52%~83%,且纵桥向弯矩表现出随桥墩高度增加减震率减小的趋势。

(3)双曲面球型减隔震支座的摩擦耗能不及环型阻尼器的塑性变形+摩擦的组合耗能。推荐高烈度区简支梁高铁桥梁减隔震设计采用环型钢阻尼减隔震支座方案,以达到控制位移目标。

参考文献:

[1] 石岩,王东升,孙治国.近断层地震动下的高速铁路桥梁减震设计[J].中国铁道科学,2014,35(6):34-40.
[2] 刘也,任叶飞,王大增,等.2022年青海门源地震引起的兰新高铁硫磺沟大桥地表同震位移研究[J].中国铁道科学,2022,43(5):42-50.
[3] 王军文,田茂东,郝玉军,等.硫磺沟大桥的地震破坏机理研究[J].

土木工程学报,2025,58(11):117-127.
[4] Zhou G, Zhu Z, Tang Y, et al. Seismic scenario reproduction and damage mechanism analysis of Liuhuanggou Bridge under near-fault earthquake[J].Bulletin of Earthquake Engineering, 2023, 21: 6091-6120.
[5] 孙治国,王东升,李宏男,等.钢筋混凝土空心桥墩应用及抗震性能研究综述[J].交通运输工程学报,2013,13(3):22-32.
[6] 董俊,曾永平.九度地震区高铁组合减隔震体系桥梁振动台试验研究[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(7):112-123.
[7] 董俊.九度强震区高铁简支箱梁减隔震体系研究[J].铁道标准设计,2024,68(4):131-137.
[8] Wei B, Wang X, Cao S, et al. Research on friction-type bearings for high-speed railway bridges based on the concept of quasi-isolation[J].Engineering Structures, 2025, 328: 119674-119674.
[9] Zou S, Wang H, Fang S, et al. Seismic isolation effect and parametric analysis of simply supported beam bridges with multi-level sliding friction adaptive isolation bearing[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2025, 188(PA): 109000-109000.
[10] 艾庆华,胡佳欢,马文芳.近断层脉冲型地震作用下高铁简支梁桥减隔震支座参数分析[J].铁道标准设计,2025,69(11):117-123.
[11] 李雪红,程梦梦,孙磊,等.基于行车安全性的高铁桥梁横桥向减隔震体系研究[J].振动与冲击,2021,40(3):117-124.
[12] Li Hy, Yu Zw, Mao Jf, et al. Effect of seismic isolation on random seismic response of high-speed railway bridge based on probability density evolution method[J]. Structures, 2021(29): 1032-1046.
[13] 冯亚成,雷晓峰,陈应陶,等.高速铁路大跨混凝土简支梁桥减隔震方案研究[J].铁道标准设计,2020,64(增刊1):57-62;103.
[14] 王传坤,杨孟刚.基于摩擦摆支座的高速铁路连续梁桥减隔震研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(3):564-572.
[15] 冯亚成,雷晓峰,陈应陶,等.高速铁路大跨混凝土简支梁桥减隔震方案研究[J].铁道标准设计,2020,64(增刊1):57-62;103.
[16] GB 50111—2006 铁路工程抗震设计规范(2009年版)[S].

(上接第 43 页)

管理年报(2024年)》EB/OL].(2025-03-26)[2025-09-26].https://www.mee.gov.cn/yw/gz/dqhbh/ydyhjl/202503/t20250330_1105009.shtml.
[5] 加强治理移动源 打好蓝天保卫战[N/OL].陕西科技报,2025-05-17(7).https://szb.snkj.com/sxkj/20250517/html/page_06_content_000.htm.
[6] 谁从新能源汽车产业链中获益最多[N/OL].青年参考,2017-08-16(22).https://qnck.cyou.com/html/2017-08/16/nbs.D110000qnck_22.htm.
[7] GB/T 31486—2015 电动汽车用动力电池性能要求及试验方法[S].
[8] 纪常伟,孙洁洁,汪硕峰,等.三元 18650 电池低温放电特性的实验研究[J].北京工业大学学报,2018(10):1335-1339.
[9] 李冠雷,杨国勋,陈鹏,等.电气化公路交直流混合供电系统最优潮流分析[J].石家庄铁道大学学报,2014(3):120-125.

[10] 冷雪.开启公路及矿山运输“电气化”时代:中车大同公司为有效解决全球公路节能降碳运输技术难题提供“中国方案”[N/OL].山西日报,2023-03-20(5).http://epaper.sxrb.com/shtml/sxrb/20230320/848683.shtml.
[11] 潘露扬,高瑞麒,于得森.电气化公路应用前景[J].环球市场信息导报,2018(14):133.
[12] 罗钟,张焕,杜鹏.一种电气化公路数据贯通系统设计[J].中国科技信息,2025(11):122-124.
[13] GB 30510—2018 重型商用车燃料消耗量限值[S].
[14] 付志坚,王磊明,刘继永,等.“双碳”背景下电气化公路运输系统绿色低碳效益探析[J].交通节能与环保,2024(4):1-5.
[15] 李红标,郑泽东,李永东.货运交通电气化技术的电气化公路方案与氢能方案对比研究[J].控制与信息技术,2024(1):40-44.