DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.251100

电气化公路选线要点探析

左伟平
(中国铁路设计集团有限公司,天津市 300142)

摘　要: 电气化公路是公路交通与清洁能源深度融合的新型基础设施,也是助力交通运输行业实现“双碳”国家战略目标的有效途径。随着新能源技术、智能交通技术的发展,电气化公路的选线将更加注重与自动驾驶、车路协同、可再生能源接入的融合,电气化公路选线设计直接影响工程投资、运营效率、安全性能及环境兼容性。通过阐述电气化公路运输系统组成和特点,首先从功能导向、技术适配、经济合理、安全环保等方面提出电气化公路选线核心原则;再从路网衔接与节点选址、平纵线形要求、地质灾害与工程地质、配套设施适配性、环境与社会影响等角度提出电气化公路选线关键技术要点;最后提出重载运输专线、山区、城市周边等不同场景下电气化公路选线技术理念。

关键词: 电气化公路;选线;核心原则;关键技术
中图分类号: U417;TU997　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0115-05

Discussion on Key Technologies for Selection of Electrified Highways

ZUO Weiping
(China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: The electrified highway is a new type of infrastructure integrating highway transportation with clean energy, and also an effective method to help the transportation industry achieve the national "dual carbon" strategic goal. With the development of new energy technologies and intelligent transportation technologies, the route selection of electrified highways will pay more attention to integration with autonomous driving, vehicle-road coordination, and renewable energy access. The route selection and design of electrified highways directly affect project investment, operational efficiency, safety performance, and environmental compatibility. By elaborating on the composition and characteristics of the electrified highway transportation system, this paper first puts forward the core principles of electrified highway route selection from the aspects of function orientation, technical adaptation, economic rationality, safety and environmental protection, then proposes the key technical points of electrified highway route selection from the perspectives of road network connection and node location, horizontal and vertical alignment requirements, geological hazards and engineering geology, supporting facility adaptability, and environmental and social impacts. Subsequently, it presents the technical concepts of electrified highway route selection under different scenarios such as heavy-haul transportation special lines, mountainous areas, and urban peripheries.

Keywords: electrified highway; route selection; core principles; key technologies

0　引　言

电气化公路运输系统[1](如图 1 所示)是基于成熟可靠性的技术,将电气化铁路的安全高效与公路的机动灵活有机结合,并将公路交通与清洁能源深度融合。通过接触网供电、动力电池辅助等技术,实现重载货车或客运车辆的零排放行驶。作为公路交通与能源融合的关键方向,该系统契合“双碳”战略与交通强国建设需求,在政策扶持、技术突破及市场需求的多重推动下,发展前景十分广阔。

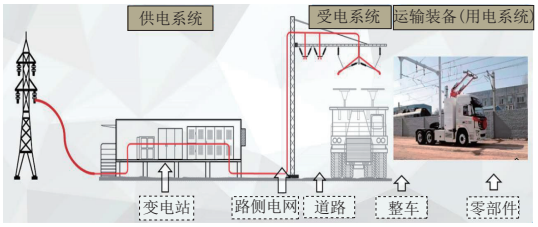


图 1　电气化公路运输系统组成示意图

交通运输部已通过 8 大领域 25 项重点任务推动交通与能源深度融合,为电气化公路建设提供战略

收稿日期:2025-11-20
基金项目:中国铁路设计集团有限公司科技研发课题(2025A0251204)
作者简介:左伟平(1984—),男,工学硕士,高级工程师,从事公路和城市道路设计工作。

支撑。地方层面也积极跟进，例如新疆明确将绿色低碳交通基础设施纳入重点工程，要求新改建国省干线公路配套建设充电基础设施。全国政协委员还建议组建国家层面的推进协调小组，出台专项规划，统筹电气化公路网络布局，这些政策将为其规模化建设扫清制度障碍。中铁六院牵头编制的两项电气化公路行业标准已实施，解决了不同车型兼容性等问题；中车株洲所打造的示范线采用DC1500 V供电制式，系统可靠性达99.2%，验证了接触网方案在复杂路况的适应性[2]。国际上，德国感应充电公路传输效率达91%，美国研发的可磁化混凝土路面充电公路还具备融雪功能，多样技术可适配矿区、港口、城市公交道等不同场景。

电气化公路正与光伏、数智化技术深度融合，例如山东枣菏高速的交能融合项目，通过公路沿线光伏板供能，实现绿电自给；华为等企业推动的超充技术、车网互动等，也让电气化公路的能源供应更高效灵活[3]。电气化公路运输系统不但能大幅降低运营成本，助力“双碳”目标实现，也能带动新能源装备制造、智慧交通系统集成、电力设施建设等多个产业链环节发展，未来还可能形成“用户付费+碳交易”“综合供能站配套服务”等多元商业模式，这将进一步提升电气化公路的商业可持续性，推动其从示范项目走向规模化普及[4]。

1　电气化公路选线核心原则

1.1　功能导向原则

选线需明确线路的核心服务对象（如煤炭重载运输、城际客运、港口集疏运等），匹配对应的技术标准[5]。例如，煤炭运输专线需优先衔接矿区、铁路集运站、港口等节点，选线需满足重载车辆的爬坡能力及转弯半径要求；城际客运线路则需兼顾客流覆盖与行驶效率，优先串联城市建成区、交通枢纽（如高铁站、机场）。

1.2　技术适配原则

选线需充分考虑电气化设施的特殊性，如接触网架设对净空、跨径的要求（接触网高度通常为5.5～6.0 m，跨线桥净空需≥6.5 m）、供电基站的间距（通常10～15 km设置1座牵引变电站），避免出现连续急弯、陡坡导致接触网维护困难或供电不稳定[6]。同时，需匹配车辆的受电弓技术参数，确保线路平纵断面设计与车辆行驶轨迹的兼容性。

1.3　经济合理性原则

综合权衡工程投资与运营成本，优先利用既有公路走廊[7]（如高速公路改扩建、国省干线升级），减少土地征用和拆迁量；避开地质复杂区域（如岩溶、滑坡、采空区等），降低地基处理和抗灾工程费用；合理规划供电路径，缩短与电网的衔接距离，降低供电损耗。

1.4　安全与环境兼容原则

选线需避开人口密集区、生态保护区、文物保护区，减少对周边环境的扰动；平纵断面设计需满足行车安全要求，避免长直线接急弯、陡坡接小半径曲线等不利组合；针对山区线路，需考虑落石、泥石流等地质灾害风险，设置防护设施或避让路线；同时，需评估电磁辐射对周边环境的影响，确保符合相关标准。

2　电气化公路选线关键技术要点

2.1　路网衔接与节点选址技术

2.1.1　区域路网协同分析

基于GIS空间分析技术，整合区域现有公路、铁路、港口、矿区等交通资源，构建路网拓扑模型，评估待选线路与既有路网的衔接效率，确保线路融入区域综合运输体系。例如，煤炭运输电气化公路需优先衔接矿区、铁路货运站及国省干道，形成“矿区–铁路–公路”联运通道。

2.1.2　关键节点优化设计

交通枢纽（如互通立交、货运站场）、供电节点（牵引变电站）、服务节点（充电站、维修站）的选址需进行多目标优化。牵引变电站需靠近负荷中心，且便于接入区域电网；互通立交需满足车辆转向需求，减少交织冲突，同时预留接触网架设空间；服务节点需结合车辆续航里程（通常电动重载货车续航≥200 km）合理布局。

2.2　几何线形技术指标要求

电气化公路几何线形以《公路路线设计规范》（JTG D20—2017）为基础，因受电弓和接触网的配合要求制约，对几何线形技术指标要求更为严格，需要更小横向偏移、更平顺线形、更稳定受电窗口，核心目标是要保障受电弓与接触网的稳定性，避免脱弓、磨耗异常等问题。

2.2.1　平面线形

电气化公路平面线形指标选取首先应考虑电气化系统适配因素。

（1）考虑受电弓工作特性

受电弓存在固定的工作包络线，平面线形需严格控制横向偏移量，曲线段横向位移不得超过±0.4 m，确保接触线始终处于受电弓工作范围内。同时，受电弓对线形平顺性要求极高，需避免曲率突变，防止车辆颠簸导致受电弓离线。因此，缓和曲线需保证曲率连续变化，满足受电弓平稳过渡需求，其长度需结合受电弓响应特性适当加长，通常高于普通公路规范要求。

（2）接触网布设要求

接触线需采用恒张力架设，张力偏差不得大于8%。平面线形的曲率变化会直接影响接触网的架设精度和受力状态。曲线半径过小时，接触线拉出值（含最大风偏时跨中偏移值）易超出设计范围：设计值±50 ~ ±200 mm 为轻度损坏，超出±500 mm 为重度损坏。因此，需严格控制圆曲线最小半径，电气化推荐值普遍高于规范一般值。此外，接触网立柱需布置在中央分隔带（宽度≥2.0 m），平面线形需兼顾立柱布设的合理性，避免曲线过急导致立柱间距不均、受力失衡。

（3）弓网接触可靠性

平面线形的平顺性直接影响弓网接触力的稳定性。急弯、短直线、曲率突变等线形会导致接触力波动过大，加剧受电弓和接触线的磨耗，甚至引发脱弓事故。因此，需控制直线长度、曲线衔接平顺性，避免S形急弯叠加，确保弓网接触稳定；同时需考虑大风等极端天气下的风偏影响，预留足够的安全余量。

综合考虑电气化公路系统适配性、行车安全与驾乘舒适、普通公路路线设计规范、地形地质与工程经济等因素，电气化公路平面线形技术指标如表1所示。

表1　平面线形技术指标

设计速度/(km·h^{-1})	120	100	80	60
最小圆曲线半径/m	1 200	800	500	250
最大超高值	6%(4%)			
缓和曲线长/m	120	100	80	60
超高渐变率	≤1/250	≤1/220	≤1/200	≤1/180

注：括号内为积雪冰冻地区最大超高值。

2.2.2　纵断面线形

最大纵坡需结合车辆动力性能（电动重载货车设计速度为60 km/h，最大爬坡能力通常为6%）和节能要求，一般限制在3%以内，特殊路段可适当放宽，但需设置缓坡段（通常长度≥300 m），同时应控制坡长，避免长陡坡导致车辆动力不足或制动过热问题。

竖曲线半径需满足行车舒适性和视距要求。凸形竖曲线需避免重载车车顶与跨线构造物发生碰撞，同时保障坡顶视距，需根据车辆最小离地间隙计算竖曲线半径，防止顶起失效；凹形竖曲线要结合重载车外廓尺寸、两侧纵坡坡差等参数，评估车头触头和车尾托尾失效风险。此外，凹形竖曲线上方有跨线构造物时，需额外验算有效净空，确保与重载车高度匹配。

综上所述，电气化公路纵断面线形技术指标如表2 ~ 5所示。

表2　最大纵坡

设计速度 /(km·h^{-1})	120	100	80	60
普通公路规范极限值 /%	3	4	5	6
电气化公路推荐纵坡 /%	2.5	3.5	4.5	5.5

表3　最大坡长

纵坡 /%	设计速度 /(km·h^{-1})			
	120	100	80	60
2%	不限	不限	不限	不限
3%	900	1 100	1 200	不限
4%	—	700	900	1 100
5%	—	—	500	750
6%	—	—	—	300

表4　竖曲线最小半径

竖曲线最小半径 /m	设计速度/(km·h^{-1})			
	120	100	80	60
凸形	20 000	12 000	6 000	3 000
凹形	7 000	5 000	3 500	2 000

表5　竖曲线最小长度

设计速度 /(km·h^{-1})	120	100	80	60
竖曲线最小长度 /m	300	250	200	140

2.2.3　横断面线形

（1）受电弓与受电窗口控制

受电弓存在固定的工作包络线和受电窗口，横断面需严格控制车辆横向摆动范围，确保接触线始终处于受电弓工作范围内。通常受电弓横向容许摆动≤±0.4 m，受电窗口宽度约为0.8 m，这一要求直接决定车道宽度及横向偏移控制标准。为适配这一需求，电气化专用车道宽度需较常规车道适当加宽，建议采用3.75 m，常规车道则保持3.5 m标准；同时曲线路段需在常规加宽值基础上增加0.2 ~ 0.5 m，避免车辆横向偏移超出受电窗口，导致脱弓、断电或接触不良等问题，尤其对于“双弓+双接触线”的电气化系统，需同时控制弓间距与线间距，防止短路故障并保障受电可靠性。

（2）接触网布设与安装要求

接触网作为电气化公路的核心供电部件，其布设方式、支柱位置及安装精度直接影响横断面设计。接触网宜采用架空双极接触悬挂，可选用柔性或刚性悬挂形式。柔性接触网最大跨距不应超过60 m，刚性接触网最大跨距不应超过15 m。横断面需预留接触网支柱的布设空间，优先将支柱设置在公路路肩外侧；若设置在中央分隔带，则需保证中央分隔带宽度≥2.0 m，同时满足支柱侧面限界要求。对于行车道宽3.75 m、硬路肩2.5 m的公路，接触网支柱中心距电气化公路车辆行车道中心的距离宜为6.5 m。此外，横断面需控制接触线导高、拉出值等关键参数，拉出值设计应保证最大风偏时，接触线中心与受电弓滑板中心偏移不大于2.5 m，直线区段支柱处拉出值宜为100 mm，曲线区段需根据半径调整拉出值，确保接触线与受电弓滑板中心轨迹适配。

（3）弓网接触可靠性保障

横断面的平整度、横向坡度（超高）直接影响受电弓与接触线的接触力稳定性。接触网与受电弓间静态接触力需控制在70～140 N，动态接触力需符合对应设计速度的指标要求，以避免燃弧、硬点等问题。横断面需严格控制超高值，最大超高不超过6%，积雪冰冻区≤4%，同时需优化超高渐变率，避免路面横坡突变导致车辆颠簸，进而引发接触力波动，加剧受电弓和接触线磨耗。此外，横断面需避免路肩、边坡等结构对接触网的干扰，确保接触网架设精度和受力稳定性，接触线波动传播速度不应小于线路最高行车速度的1.4倍。

综上所述，电气化公路横断面线形技术指标如表6所示。

表6　横断面线形技术指标

设计速度/(km·h^{-1})	120	100	80	60
车道宽度/m	3.85	3.85	3.75	3.75
曲线路面加宽值/m	0.2～0.5			
受电弓横向工作偏移/m	≤±0.4			
接触网立柱段中央分隔带宽度/m	≥2.0			

2.3　地质灾害与工程地质选线技术

山区电气化公路地质选线技术的核心是“规避地质风险、适配地形条件、平衡工程成本与安全性”，尽量沿山脊或缓坡布线，避免切坡填方，减少滑坡、泥石流风险[8]。

2.3.1　地质勘察与风险评估

采用综合地质勘察手段[9]（遥感、物探、钻探等），查明线路沿线的地层岩性、地质构造、水文地质条件及不良地质体（如采空区、岩溶、滑坡等）分布特征。基于层次分析法（AHP）建立地质灾害风险评估体系，划分高、中、低风险区，优先选择低风险区布线。

2.3.2　不良地质路段处理技术

滑坡地段：采用绕避为主，无法绕避时可设置抗滑桩、挡土墙，或采用减重加载、排水疏干等措施。

泥石流地段：优先选在泥石流沟谷上游或侧方稳定区域，必要时设置导流堤、拦挡防护工程。

采空区：煤炭产区需重点排查，选线优先避让；无法避让时，需采取注浆回填、设置抗滑桩等处置措施，确保路基稳定性[10]。

岩溶区：避开溶洞密集区，对孤立溶洞采用回填或跨越方案。

2.4　电气化设施适配选线技术

2.4.1　接触网架设适配设计

线路平纵断面变化需避免接触网出现硬点、拉弧等问题，曲线段需考虑接触网的拉出值（通常≤400 mm）和抬升量，确保受电弓与接触网的可靠接触[11]。

跨线桥、隧道等构筑物需预留接触网安装空间，隧道净空需≥6.5 m，桥梁跨径需满足接触网立柱布置要求（通常立柱间距≤50 m）[12]。

2.4.2　供电系统协同选线

牵引变电站选址需靠近线路负荷中心，且与区域电网变电站的距离≤10 km，降低供电线路损耗。

供电线路路径需避开障碍物，优先沿公路用地范围布线，减少征地成本与施工干扰。

考虑可再生能源接入（如风电、光伏等），选线时预留接入通道，提高能源利用效率。

2.5　环境与社会影响控制技术

2.5.1　生态环境敏感区避让

利用GIS生态敏感性评价模型，识别线路沿线的生态保护区、水源涵养区、珍稀动植物栖息地等敏感区域，优先采用避让方案；无法避让时，需采取生态防护措施[13]（如植被恢复、野生动物通道等）。

2.5.2　电磁辐射与噪声控制

接触网电磁辐射强度随距离增加快速衰减，选线时需确保线路与居民区、学校、医院等敏感点之间的距离≥20 m；同时，优化线路平纵断面，减少车辆制动噪声和接触网摩擦噪声对周边环境的影响[14]。

2.5.3　社会影响协调

选线过程中充分调研沿线土地利用规划、居民意愿，避免大规模拆迁；对煤炭运输线路，需协调矿区、村庄的通行需求，设置专用通道或立交分离，减少对地方交通的干扰。

3　特殊场景电气化公路选线适配技术

3.1　重载运输专线（如煤炭运输）

选线优先衔接矿区、货运站场，采用“直达式”路径，减少迂回绕行。

平纵断面设计以“平缓”为原则，限制坡度≤3%，最小曲线半径≥250 m，确保重载车辆稳定行驶。

加强路基和桥梁承载能力设计，路基压实度≥95%，桥梁设计荷载采用公路-Ⅰ级以上标准。

牵引变电站间距可适当缩短（8～10 km），确保供电稳定性，满足重载车辆高功率需求。

3.2　山区电气化公路

采用“沿溪线+山脊线”相结合的选线方案，避免大规模切坡填方。

利用隧道、桥梁跨越不良地质区域，降低地质灾害风险。

平纵断面设计需考虑车辆制动安全需求，连续下坡路段设置避险车道和制动冷却设施。

接触网架设需适应山区地形变化，采用柔性接触网，增加立柱稳定性设计。

3.3　城市周边电气化公路

优先利用既有公路改扩建，减少土地征用。

采用“高架+地面”相结合的方式，避开城市建成区核心区域。

接触网设计需考虑城市景观，采用低净空、紧凑型接触网，或在核心区域采用地下敷设[15]（如隧道）。

加强与城市公共交通的衔接，设置换乘枢纽，提升综合运输效率。

4　选线方案优化与决策方法

4.1　多目标优化模型

构建以“工程投资、运营成本、安全性能、环境影响”为目标的多目标优化模型，采用遗传算法、粒子群算法等智能优化算法，求解最优选线方案。以山西某煤炭运输电气化公路为例，通过模型计算得出“沿既有矿区公路改扩建”方案较“新建线路”方案投资节约 20%，环境影响降低 30%。

4.2　GIS 与 BIM 融合应用

利用 GIS 技术进行空间分析、地质灾害评估、生态敏感性分析，实现选线的可视化和智能化。

结合 BIM 技术构建线路三维模型，模拟接触网架设、桥梁隧道施工、车辆行驶状态，提前发现设计冲突，优化方案细节[16]。

整合 GIS 与 BIM 数据，建立选线方案数据库，为后续施工及运营管理提供数据支撑。

4.3　公众参与与专家评审

通过问卷调查、听证会等方式，广泛征求沿线居民、企业及政府部门的意见，优化选线方案。

组织交通工程、电气化技术、地质勘察、环境评估等领域的专家进行评审，从技术可行性、经济合理性、安全可靠性等方面对方案进行论证，确保选线方案科学合理。

5　结论与展望

电气化公路选线是一项融合交通工程、道路工程、电气化技术、地质勘察、环境科学等多学科的系统工程，其核心在于平衡功能需求、技术适配、经济成本与安全环保四大要素。在实际工程中，需结合线路的服务对象（如重载运输、客运）、区域地理条件（如山区、矿区）、路网衔接需求，灵活运用平纵断面优化、地质灾害避让、电气化设施适配等关键技术，通过多目标优化模型和 GIS/BIM 技术提升选线的科学性和智能化水平。

未来，随着新能源技术、智能交通技术的发展，电气化公路选线将更加注重与自动驾驶、车路协同、可再生能源接入的融合。例如，通过车路协同数据优化线路线形以提升行驶效率，结合光伏公路技术实现能源自给自足。同时，针对特殊区域（如矿区、山区）的选线技术将进一步细化，形成个性化的设计方案，为电气化公路的大规模推广应用提供技术支撑。

参考文献：

[1] 张耀平，刘本林．电气化公路及电力汽车技术经济分析[J]．交通节能与环保，2013(6)：38-43.

[2] 黄少雄，蒋海峰，杨文银，等．电气化公路技术进展及在中国应用的可行性分析[J]．公路交通科技，2020(8)：118-126.

[3] 李齐丽，刘杰，毛宁，等．电气化公路运输系统技术方案探索[J]．交通节能与环保，2022(2)：5-10.

[4] 张铁忠．电网路面供电及双动力汽车技术方案探讨[J]．能源技术，2010(1)：42-44.

[5] 郑泽东，刘昊，李永东，等．电气化公路技术研究[J]．中国公路学报，2019(5)：132-141.

[6] 韩雪，田卉，刁萌萌，等．电气化高速公路系统在我国的前景展

（下转第 175 页）