

# 铁路关键工程与绿色运输组织适应性研究及评价体系构建

张 敏

国能新朔铁路有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

**摘 要：**铁路运输具有运量大、能耗低的绿色比较优势，是交通领域实现“双碳”目标的重要依托。然而，铁路关键工程技术方案与绿色运输组织模式的匹配程度直接影响节能降碳效果。本文聚焦二者适应性问题，从线路平纵断面、车站布局、牵引供电及信号系统等工程要素入手，分析其对绿色运输的促进或制约机制，构建涵盖能效水平、运输结构优化度和碳排放强度的适应性评价指标体系，运用层次分析-熵权法组合赋权模型进行综合评价，并提出绿色运输组织优化路径，为绿色铁路规划设计提供决策参考。

**关键词：**铁路工程；绿色运输；适应性分析；评价指标体系

**引言：**“双碳”目标下，交通运输绿色转型成为国家战略的重要组成部分。铁路单位周转量能耗和碳排放远低于公路和航空，绿色优势显著。然而，铁路关键工程方案与绿色运输组织的适应程度直接影响绿色优势能否充分发挥。当前，工程建设与运输组织分属不同管理阶段，工程方案侧重技术经济性，对运营期绿色运输效能统筹不足。如何在规划设计中纳入绿色运输需求，构建工程与运输协同的适应性评价方法，是铁路绿色化发展的重要课题。本文围绕上述问题开展系统研究，以期绿色铁路建设提供理论支撑。

## 1 铁路关键工程与绿色运输组织的基础理论概述

### 1.1 铁路关键工程的定义与核心技术特征

铁路关键工程是指在铁路建设项目中对线路功能发挥和投资规模具有决定性影响的重点工程，主要包括线路平纵断面工程、车站及枢纽工程、桥隧工程、牵引供电系统和信号控制系统等。其核心技术特征体现在四个方面：一是工程规模大、投资占比高，对项目整体造价影响显著；二是技术标准严格，一旦建成后改造难度大、成本高；三是服役周期长，工程方案对运营效能的影响具有长期锁定效应；四是系统关联性强，各专业工程之间相互制约、相互依存。这些特征决定了关键工程方案一旦确定，将在数十年内框定铁路运营的能耗水平和运输组织方式，因此规划设计阶段将绿色运输需求前置考量至关重要。

### 1.2 绿色运输组织的核心内涵与发展要求

绿色运输组织是以降低能源消耗、减少碳排放和环境影响为目标，通过优化运输模式、运输路径和运营组

织方式实现铁路系统绿色化运行的运输管理模式。其核心内涵包括四个方面：能源结构低碳化，即提高电气化率和清洁能源利用比例；运输效能高效化，即通过优化列车编组、提高牵引效率等措施降低单位周转量能耗；组织模式集约化，即推进大宗货物重载化和多式联运协同化；运营调度智能化，即利用智慧调度系统实现列车节能操纵和再生制动能量高效利用<sup>[1]</sup>。随着国家“双碳”战略深入实施，绿色运输组织已从理念倡导转向刚性约束，要求铁路工程设计方案为绿色运输模式的落地提供充分的硬件支撑和条件保障。

### 1.3 二者适应性研究的理论基础

铁路关键工程与绿色运输组织的适应性研究具有多学科理论基础。系统工程理论强调将工程建设和运输运营视为统一整体，追求全生命周期综合效益最大化，而非单一阶段局部最优。耦合协调理论揭示了工程硬条件和运输软模式之间的交互作用关系：工程条件是运输组织的物质基础，运输需求则引导工程方案优化方向。全生命周期评价理论要求将工程建设和运营维护阶段的能源消耗与环境影响统筹考量，避免绿色运输效益被建设期的高碳排放所抵消。上述理论共同构成了适应性研究的学术基石，为后续机理分析和评价建模提供了方法论指引。

## 2 铁路关键工程与绿色运输组织的耦合作用机理分析

### 2.1 关键工程对绿色运输组织的约束与支撑作用

铁路关键工程对绿色运输组织具有双重影响。从约束角度看，线路平纵断面技术标准（曲线半径、限制坡度）决定了列车节能操纵的空间，过小的曲线半径和过

大的坡度会增加列车运行阻力和牵引能耗；车站布局与到发线有效长度制约重载列车的组合分解能力和多式联运衔接效率；牵引供电容量不足则限制再生制动能量的回收利用水平。从支撑角度看，合理设置的节能坡和较大的曲线半径为低能耗运行创造了条件；综合枢纽中完善的换装设施为“公转铁”“水转铁”提供了硬件保障；智能信号系统为实现列车运行精细化调控奠定了技术基础。关键工程方案的优劣在很大程度上决定了绿色运输组织效能的上限。

## 2.2 绿色运输组织对关键工程的反向适配要求

绿色运输组织的实施效果在很大程度上取决于关键工程能否满足其运行条件要求。重载运输要求线路强度充足、车站到发线有效长度达到标准、牵引供电容量满足大功率机车运行需求。多式联运要求车站货场具备足够的换装作业空间，疏港铁路和物流基地的工程配套需同步到位。智慧调度要求信号系统具备双向通信能力、数据基础设施覆盖完整、沿线供电质量稳定可靠。新能源机车（氢能、储能式）的规模化运用对加氢设施和充电设施布局提出了新增工程要求<sup>[2]</sup>。绿色运输组织对关键工程的这些反向需求，应当在工程规划设计阶段就纳入考量，避免因工程条件不具备而导致绿色运输模式“建而不化、推而不行”。

## 2.3 当前二者适配过程中的现存共性痛点

当前铁路关键工程与绿色运输组织的适配过程中存在若干共性痛点。一是规划设计阶段的绿色运输需求论证不充分，工程项目可行性研究中更多关注工程经济性，对运营期绿色运输效能的预测和评估缺乏系统方法。二是工程方案调整与运输组织优化的时序错位，工程建成后才发现运输需求变化或绿色技术发展，此时改造代价巨大。三是绿色运输指标在工程方案比选中的权重不足，节能坡、大半径曲线等绿色设计虽然能够长期降低运营能耗，但其增量成本在前期决策中往往被高估而未被优先采纳。四是工程与运输分属不同管理部门，缺少贯穿全生命周期的协同机制，绿色运输的目标责任在工程阶段难以有效传导和落实。

## 3 适应性评价指标体系构建

### 3.1 评价指标选取原则

适应性评价指标的选取应遵循以下基本原则。科学性原则要求指标能够客观反映关键工程条件对绿色运输组织的支撑或约束程度，概念明确、物理意义清晰。系统性原则要求指标体系覆盖工程要素条件和运输绿色化水平的主要方面，包括线路条件、站场功能、牵

引供电、信号系统以及能耗排放等，避免重要维度缺失。可操作性原则要求指标数据可通过设计文件、统计资料或现场监测获取，定量指标应有明确的计算方法，定性指标应有可操作的等级划分标准。导向性原则要求指标体系能够引导铁路规划设计向绿色低碳方向优化，指标的正负向设计应清晰体现“什么方案更绿色”的价值判断。

### 3.2 多维度分层指标体系搭建

适应性评价指标体系采用目标层-准则层-指标层三级结构。目标层为铁路关键工程与绿色运输组织的适应性综合评分。准则层涵盖四个维度：工程支撑度，反映线路、站场、供电、信号等关键工程对绿色运输模式的物理支撑能力；运输绿色度，表征单位运输周转量的能源消耗和碳排放水平；衔接顺畅度，评价多式联运换装效率和运输结构优化程度；运营协调度，衡量调度组织智能化和列车运行节能化水平。各准则层下分别设置若干具体指标，形成定性与定量相结合的完整指标体系。指标选择时注重铁路行业特色，如节能坡比例、再生制动能量利用率、电气化率、集装箱海铁联运比重等均为铁路绿色运输的关键表征指标<sup>[3]</sup>。

### 3.3 基于层次分析法-熵权法的组合权重赋值模型构建

为避免单一赋权方法的局限性，本文采用层次分析法与熵权法相结合的组合赋权方法确定指标权重。层次分析法（AHP）属于主观赋权法，通过专家对各层级指标的重要性进行两两比较，构造判断矩阵后计算权重并进行一致性检验，体现行业专家经验的价值判断。熵权法属于客观赋权法，根据各指标数据的离散程度计算信息熵和权重，指标数据差异越大则权重越高，避免主观偏好带来的偏差。组合权重通过乘法归一化合成：首先将 AHP 权重与熵权法权重相乘，然后对各指标组合权重进行归一化处理，得到最终权重值。该方法兼顾了专家经验与数据客观性，使评价结果既符合专业认知又具有数据支撑，在铁路工程项目评价中具有较好的适用性。

### 3.4 适应性等级划分标准

适应性综合评价结果需通过等级划分予以解读。本文采用五级划分方案：优（综合评分 $\geq 90$ 分）表示关键工程与绿色运输组织高度适配，绿色运输效能充分发挥；良（80~89分）表示适配性较好，存在少量优化空间；中（70~79分）表示基本适配但存在若干短板，需在运营阶段针对性改进；合格（60~69分）表示适配性不足，部分关键工程条件制约了绿色运输效果，建议

在近期改造中优先解决；不合格（< 60 分）表示适配性严重不足，关键工程方案与绿色运输需求存在系统性矛盾，需进行较大幅度的工程改造或运输模式调整。等级划分标准为后续适应性评估结果的应用和优化方向判定提供了明确依据。

#### 4 适应性提升的绿色运输组织优化路径

##### 4.1 基于关键工程特征的运力精准匹配优化

适应性的提升首先要求运力组织与工程条件实现精准匹配。在铁路关键工程已定的条件下，应根据线路曲线半径、限制坡度、牵引供电容量等技术参数，合理确定列车牵引定数和运行速度，避免超工程能力的运力安排导致能耗剧增和设备过度损耗。对于线路条件较好的区段，应充分发挥大功率机车和重载列车的效能优势，实现单位周转量能耗的最小化。对于条件受限区段，应通过优化列车编组和运行图铺画方式，在工程约束范围内寻求能耗与效率的最优平衡。运力精准匹配的本质是以工程特征为约束条件，以能耗最小化为目标函数，构建精细化运力资源配置模型，实现“工程条件可知、运力安排有据、能耗排放可控”。

##### 4.2 全链条能耗精细化管控优化

能耗管控应从单一运行环节向全链条延伸，构建覆盖牵引、站区、维保三大环节的系统性能耗治理体系。全面推广应用列车节能操纵技术，通过惰行控制、下坡限速优化及自动过分相策略，降低列车运行单位能耗，同时将再生制动能量利用纳入运行图编制优化模型，量化评估不同会让站方案下的再生能量回收效益，优先采用有利于再生制动利用的列车交路铺画方案，最大化能量回收效率。推进绿色车站建筑节能标准实施，对站区照明、空调通风及动力设备实行分时分区智能控制策略，根据列车到发和旅客流量动态调节设备运行工况，同时建设车站屋面光伏发电系统，实现自发自用、余电上网，降低车站外部购电需求<sup>[4]</sup>。积极推广桥隧绿色养护技术工艺，优化养护维修作业组织和机具配置，降低日常维护中的燃料消耗和材料碳排放。同步建设覆盖“牵引能耗-站区能耗-维保能耗”全链条的综合能耗监测平台，实现各级能耗数据的自动采集、异常识别与优化反馈，形成能耗精细化管控的闭环机制。

##### 4.3 多式联运衔接组织优化

多式联运是绿色运输体系的重要支柱，其衔接效率直接关系到铁路绿色优势能否在综合运输层面得到充分发挥。枢纽工程布局应充分考虑与港口、公路、物流园区的空间衔接，合理设置专用铁路和疏港通道，缩短

换装转运距离。优化货场功能分区与装卸作业流程，推广应用集装箱直达转运和甩挂运输等高效模式，减少中间环节的碳排放。建立铁路与水运、公路的运力协调机制，通过信息共享平台实现货物全程跟踪和运力精准调配。将换装效率指标纳入枢纽站运营考核，围绕“无缝衔接”目标持续优化多式联运节点布局和作业组织，使铁路的绿色运输优势在全链条中得到最大化释放。

##### 4.4 工程运维与运输组织的协同低碳改造

适应性的持续提升需要工程运维与运输组织形成协同联动。在既有工程条件下，通过技术升级挖掘绿色运输潜力，如在既有线路上实施智能信号系统改造、牵引供电增容和接触网优化，提升列车运行效率。在养护维修方面，推行绿色养护技术（如轨道打磨节能工艺、桥隧预防性加固），减少维护活动本身的碳足迹。在运输组织方面，根据工程维护的时空约束优化列车运行图安排，将天窗作业影响降到最低。建立“工程状态监测-运输组织调整-能耗排放评估”的协同响应机制，当工程设施性能发生变化时，运输组织能够同步做出适应性调整，实现工程运维与运输组织在全生命周期内的动态协同和持续低碳化改进。

#### 结束语

本文从系统工程和耦合协调理论出发，分析了关键工程对绿色运输的约束与支撑机制及反向适配要求，揭示了规划设计阶段绿色需求论证不足、工程运输时序错位等共性痛点，构建了涵盖工程支撑度、运输绿色度、衔接顺畅度和运营协调度的四维适应性评价指标体系及组合赋权模型。在此基础上，提出了运力精准匹配、能耗精细化管控、多式联运衔接优化和协同低碳改造四方面提升路径，为绿色铁路方案比选、既有线改造评估及企业节能降碳管理提供了方法支撑。

#### 参考文献

- [1] 刘秋奇, 倪少权, 孙一宸, 等. 铁路关键工程与绿色运输组织适应性研究及评价体系构建 [J]. 铁道经济研究, 2025(3): 50-60.
- [2] 梁祚溥. 大型铁路站房工程施工关键技术与应用研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2026, 25(10): 82-84.
- [3] 尹峰. 铁路大宗货物全程一体化运输组织研究 [J]. 铁路物流, 2025, 43(10): 38-43, 48.
- [4] 赵志荣, 倪继娜, 游艳雯, 等. 面向更大牵引质量的重载列车运输组织关键技术探讨 [J]. 铁道货运, 2024, 42(6): 1-5, 74.