文章编号：1003-1421(2026)05-0001-18
引用格式：程宏波，万寿星，高强，等.轨道交通多源互补供电系统协同效果评价技术综述[J].铁道运输与经济，2026，48(5)：1-18.
CHENG Hongbo，WAN Shouxing，GAO Qiang，et al. Review on Synergy Effect Evaluation Technologies for Multi-Source Complementary Power Supply Systems in Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(5)：1-18.

轨道交通多源互补供电系统协同效果评价技术综述

程宏波[1]，万寿星[1]，高　强[1]，徐晋卿[1]，葛磊蛟[2]

(1.华东交通大学 电气与自动化工程学院，江西 南昌　330013；2.天津大学 电气自动化与信息工程学院，天津　300072)

摘　要：轨道交通多源互补供电系统涉及系统多、能源杂，子系统间耦合要求高，科学合理地量化其协同效果对系统的全生命周期优化具有重要指导意义。基于“源-网-荷-储-智”架构，结合轨道交通行业特征，总结形成了技术-经济-环境三维度的综合评价指标体系。针对评价中指标的权重分配，分析赋权法的适用性，基于博弈论的组合赋权可化解主客观权重冲突，构建评价权重体系。对比常用的综合评价模型，嵌入不确定性处理机制的多准则妥协解排序评价模型，可兼顾多目标冲突下的折衷解寻优与模糊信息处理，更适配于多维评价需求。研究展望了协同实施效果评价在系统规划设计、设备配置等场景的应用价值，可为轨道交通多源互补供电系统的可持续发展提供理论支持与技术参考。

关键词：轨道交通；多源互补供电系统；协同效果；综合评价；指标
中图分类号：U29-3　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250930001

Review on Synergy Effect Evaluation Technologies for Multi-Source Complementary Power Supply Systems in Rail Transit

CHENG Hongbo[1]，WAN Shouxing[1]，GAO Qiang[1]，XU Jinqing[1]，GE Leijiao[2]

(1. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The multi-source complementary power supply systems in rail transit involve numerous systems and diverse energy sources, with high coupling requirements among subsystems. Quantifying their synergy effect scientifically and rationally has important guiding significance for the full life cycle optimization of the systems. Based on the “source, grid, load, storage, and intelligence” architecture and combined with the characteristics of the rail transit industry, a three-dimensional comprehensive evaluation index system covering technology, economy, and environment was summarized and formed. For the weight allocation of indicators in the evaluation, the applicability of weighting methods was analyzed. The combination weighting based on game theory was used to resolve the conflict between subjective and objective weights, and an evaluation weight system was constructed. Commonly used comprehensive evaluation models were compared. The multi-criteria compromise solution ranking evaluation model embedded with an uncertainty processing mechanism could balance compromise solution optimization under multi-objective conflicts and fuzzy information processing and was more suitable for multi-dimensional evaluation requirements. This paper prospected

收稿日期：2025-09-30　　**修订日期**：2026-03-10
基金项目：国家自然科学基金项目(52467006)；江西省主要学科学术和技术带头人培养项目(20232BCJ22004)

the application value of synergy effect evaluation in scenarios such as system planning and design and equipment configuration, which can provide theoretical support and technical reference for the sustainable development of multi-source complementary power supply systems in rail transit.
Keywords: Rail Transit; Multi-Source Complementary Power Supply System; Synergy Effect; Comprehensive Evaluation; Indicator

0　引言

为响应“双碳”目标，应对轨道交通负荷冲击大、运营能耗高及再生制动能量浪费等难题，融合新能源与储能的多源互补供电系统成为提升轨道交通能效的重要技术途径[1-2]。该系统通过多元主体间的深度耦合与协同互动，有效平抑列车功率冲击，提高能量全过程利用率，展现出显著的节能降碳与运行优化潜力。目前，既有研究主要聚焦于系统架构、规划配置和运行控制3个层面，取得了一系列的技术与理论研究成果，为多源互补供电系统的工程化应用奠定了坚实基础。

系统架构旨在为多元主体搭建物理框架，高仕斌等[3]从顶层设计出发，构建了涵盖“网-源-储-车”的协同供能体系，明确协同互动的基本原则与方向；邓文丽等[4]聚焦于具体能源的接入，分析光伏单元融入交/直流牵引网的可用拓扑结构，为新能源与供电系统的底层协同提供了技术路径。规划配置方面通过优化源-储容量配比，为系统的高效协同运行奠定基础。徐春梅等[5]以能源自洽为目标，运用多目标优化算法对风光储的容量进行配置，通过内部组件协同以达成经济性与轻量化的平衡；刘佳玲等[6]以全生命周期成本最低为目标，建立储能容量优化配置模型，实现储能、新能源与电网间的经济协同。为提升协同的可靠性，刘宇翔等[7]构建了两阶段鲁棒优化模型，以规划新能源与储能容量，确保在应对源-荷强不确定性时，各单元仍能协同配合，保障供电的稳定性。在系统架构和规划配置研究的基础上，我国相关示范应用相继落地。2023年北京地铁15号线实现分布式光伏项目全容量并网运行，自2024年以来，多个网源储车协同供能项目在铁路供电领域投入运营。

关于网源储车系统的运行控制，范鸿炜等[8]设计了一种适用于城轨交通的多端口能源路由器，并提出分层协调控制策略，实现了新能源、储能、牵引负荷等多端口间能量流的灵活调度与协同管理。林俊杰等[9]针对柔性直流牵引系统，构建了网损和购电成本最小的协同节能优化模型，实现了牵引负荷与再生制动能量在时空上的优化匹配与高效协同。

多源互补供电系统通过多种能源形式的相互补充提升轨道交通绿色发展水平，由于涉及的系统多、能源杂，子系统之间的耦合要求高，子系统之间的协同合作对系统的供电质量和绿色发展水平至关重要。目前学术界已针对子系统协同控制策略开展了相关研究，但这些协同控制策略的协同效果和水平缺乏有效的评价方法和模型，不能对协同策略的成效进行区分，也难以对协同策略的改进方向加以指导。因此，需要对多源互补供电系统的协同效果进行科学的量化评估，实现对系统规划、配置、控制及调度的指导。

通过对轨道交通多源互补供电系统协同实施效果的评价技术进行系统综述，从多源互补供电系统的基本概念及框架出发，分析评价指标的选取原则，构建面向协同效果的综合评价指标体系，梳理权重确定与综合评价模型等核心评价方法，并对未来应用前景进行展望，以期为轨道交通多源互补供电系统的可持续发展提供理论支持和技术参考。

1　轨道交通多源互补供电系统的基本概念

1.1　轨道交通多源互补供电系统的基本内涵

轨道交通多源互补供电系统引入了光伏、风力等新能源，以及列车再生制动回馈的电能，形成多源互补的供电格局[10]，旨在整合多种能源形式，实现牵引供电的绿色和稳定运行。主要特征如下。

（1）通过多源互补设计和故障自动切换机制，避免故障导致的运营中断，确保列车在各种天气和运营条件下都能稳定运行，提高牵引供电系统的稳定性与可靠性。

（2）积极利用新能源，提高牵引供电系统的绿色发展水平。

（3）分布式新能源能够根据实际情况和用电需求进行灵活配置，提高了系统的适应性和灵活性。

（4）通过多层级集成架构设计与标准化模块接口技术，将接触网供电、光伏、风电、储能等多源供电设备有机集成，构建起高效协同的供电体系。

轨道交通多源互补供电系统具有稳定性高、安全性强、高效节能、环保可持续、灵活多样以及高度集成等特点，这些特点可为新型轨道交通的快速发展提供有力保障。

1.2　轨道交通多源互补供电系统的基本架构

轨道交通多源互补供电系统是一个集成了先进能源技术、信息技术与控制技术的复杂物理系统。其基本架构可解构为相互作用、深度耦合的“源–网–荷–储”4类物理实体，并通过一个智能化核心进行统一协同调控，轨道交通多源互补供电系统架构如图1所示。

“源”：是系统的能量来源和协同基础，主要由2部分构成：一是作为系统基础电力保障的外部大电网；二是以光伏、风电为代表，部署在轨道交通沿线的分布式新能源[11]。二者形成时空互补的供能格局，其协同效果直接决定了系统的绿色水平与能源自主性。

“网”：承载和分配电能，实现能量协同传输。主要包括为列车供电的牵引网和为车站等供电的电力配电网。先进的电力电子技术应用使其具备了灵活的调控能力，是执行协同指令、保障电能质量和供电可靠性的平台。

“荷”：驱动协同优化的需求侧，具有“源–荷”二象性[12]。主要包含2类：一是功率大、随机性强的牵引负荷；二是具有规律性波动的车站负荷。牵引负荷具有较好的协同潜力：牵引时消耗能量，作为负荷；制动时反馈电能，转变为电源，对其“源–荷”

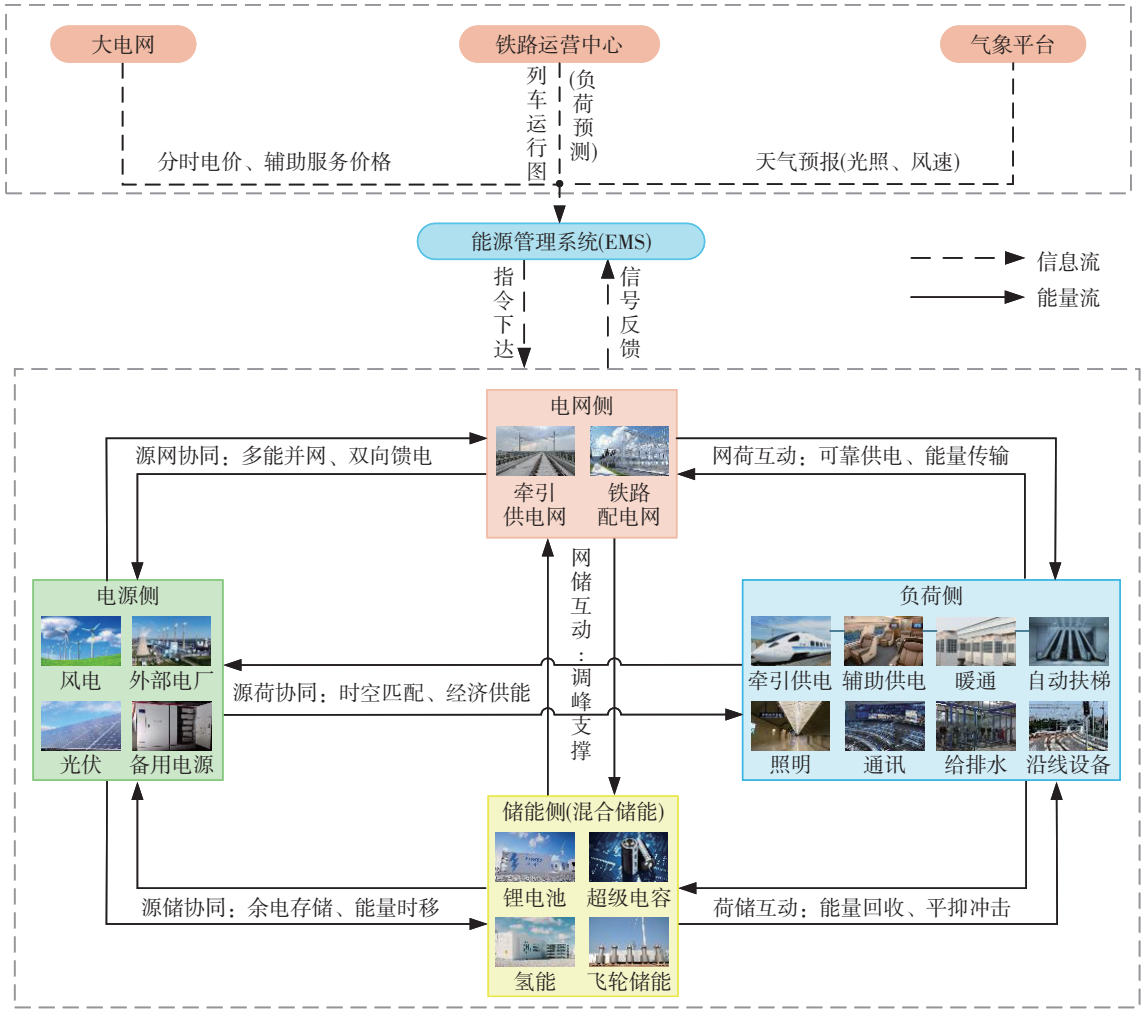

图1　轨道交通多源互补供电系统架构

Fig.1　Architecture of multi-source complementary power supply system in rail transit

特性的协同管理，是实现系统能量时空优化配置的前提。

“储”：通过能量的时移与功率的快速吞吐，为系统提供调节能力。轨道交通系统储能需兼具“高功率”与“高能量”的双重特性：一方面，列车启停与再生制动产生的冲击持续时间短、峰值功率高；另一方面，平抑新能源波动，实现削峰填谷则需要较长时间的能量吞吐，因此需配置由不同类型储能介质构成的混合储能系统[13]。

“智”：以能量管理系统(Energy Management System，EMS)为载体，通过信息物理的深度融合，实现对“源–网–荷–储”的全方位协同调控。其协同路径始于多维度的信息感知，EMS不仅获取列车运行图与客流信息、环境气象数据，还可实时获取来自大电网的分时电价、辅助服务价格等，并实时监测源、网、荷、储的运行状态[14]，通过内置的优化算法，在多时间尺度上进行滚动决策，制定出兼顾安全、绿色与经济的最优协同调度策略。

2　多源互补供电系统协同效果评价指标

2.1　协同实施效果的基本内涵

协同实施效果并非系统各组成单元性能的线性叠加，而是指系统通过“源–网–荷–储–智”的深度耦合与协同调控，实现优于各单元独立运行时的综合效益。

（1）内部协同效果，侧重于系统内部的物理运行特性与效率优化。其主要反映“源–网–荷–储”各单元，在能量流与信息流驱动下的时空匹配和动态平衡能力，重点在于衡量系统内部的能量自洽水平、对运行扰动的抑制能力以及电能质量的改善程度。

（2）外部协同效果，侧重于系统与外部电网的互动及价值实现。其评价系统与上级公共电网之间的能量互动和经济效益，重点在于衡量系统为电网提供的辅助价值，以及利用电网电价等信号所获取的经济收益。

2.2　评价指标选取原则

为综合评价整体效能，遵循科学、合理且具备行业特性的选取原则，具体包括

（1）目标导向。以服务多源互补供电系统的核心建设目标为导向，指标的量化结果必须能直接反映系统在提升供电可靠性、消纳新能源、平抑电网负荷波动及降低全生命周期成本等核心目标上的达成度[15]。指标的设定应能正面评价储能对列车高功率冲击的平抑效果，并衡量沿线新能源出力与列车动态负荷在时空维度上的匹配水平，从而为实现系统价值最大化的调度策略提供决策依据。

（2）整体协同。多源互补供电系统是“源–网–荷–储”高度耦合的复杂整体，因此，评价指标需从系统全局出发，重点衡量各单元之间的协同互动关系。

（3）应用可行。应立足于可通过现有监测系统(牵引变电所自动化系统、能量管理系统)直接测量或通过成熟模型计算得到的物理量，确保数据的可获取性、准确性与一致性。

（4）精简代表。应在全面反映系统性能的基础上力求精简，要能精准刻画多源互补供电系统的独有特征，确保每一项指标都独立地从特定维度对系统性能进行描述，以最少的指标构建最全面的评价画像。

2.3　综合评价指标体系的构建

轨道交通多源互补供电系统的协同效果评价是一个复杂的多属性决策问题，评价指标的选取应借鉴综合能源系统、微电网及其他多源互补系统在更广泛领域已有的共性研究。通过对相关文献的系统性梳理[16–18]，构建涵盖技术、经济和环境维度的指标全集。

然而，轨道交通多源互补供电系统具有高度的行业特殊性：①对供电安全与可靠性的要求极高，远超常规系统；②负荷以强冲击性为主，列车高功率牵引与瞬时再生制动是系统的核心矛盾；③节能目标明确，即最大化回收利用再生制动能量，降低单位运输功耗；④沿线路呈线性或链式分布，区别于园区的“点–面”结构。

因此，评价体系应侧重于能直接表征系统平抑冲击能力(如电压波动率)、保障电能质量(如谐波畸变率)、提升能量自洽水平(如能量回收利用率)和量化核心效益(如单位运输功耗、削峰贡献率)的关键指标[19]。基于上述筛选逻辑，对指标全集进行精简与优化，最终构建了面向轨道交通多源互补供电系统协同效果的三级评价指标体系，轨道交通多源互

补供电系统协同效果评价指标筛选与构建如表1所示[20-37]。

2.4　技术协同性指标

2.4.1　系统稳定性

系统稳定性表征系统在不同负荷条件下维持电能质量稳定输出的能力。

（1）电压波动率(V_{var})，是衡量系统电压偏离额定值幅度的参数[20]。

$$V_{var}=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\frac{\left|V_t-V_{nom}\right|}{V_{nom}}\times 100\% \tag{1}$$

式中：V_{nom}为额定电压，V；V_t为第t时段实测电压值，V；N为统计周期内采样点数。

多源互补供电系统的一个主要目的，就是通过多种能源形式在功率、相位上的相互配合，动态平衡列车牵引和制动带来的冲击性负荷。因此，电压波动率可直观反映出各子系统相互之间协同配合的好坏：协同越高效，功率交换越平稳，对电网造成的电压扰动就越小，电压波动率自然越低。

（2）供电可靠性(R)，指系统在规定时间内持续提供合格电能的能力[21]。

$$R=\left(1-\frac{\sum_{i=1}^{k}T_{fault,\,i}}{T_{total}}\right)\times 100\% \tag{2}$$

式中：$T_{fault,\,i}$为第i次停电持续时间，s；k为统计周期内停电总次数；T_{total}为统计周期内总运行时间，s。

多源互补的架构能够在检测到电网故障的瞬间，精准调度储能系统由功率缓冲单元无缝转变为高品质主电源，并联合其他可用能源形成“孤岛运行”模式，实现牵引负荷不间断供电，从而提高供电可靠性。

（3）负载动态响应时间(T_{settle})，是指系统应对内部负载功率突变时，通过协同控制实现再平衡所需的时间。

$$T_{settle}=T_1-T_0 \tag{3}$$

式中：T_0为功率阶跃发生的时刻；T_1为母线电压进入并持续保持在稳定区间的时刻。

当列车急速启动或制动时，系统的协同控制必须足够敏捷，才能瞬时调动储能等单元进行功率支撑或吸收，以维持母线电压稳定。因此，更短的响应时间直接证明了系统内部信息流与能量流的协同效

表1　轨道交通多源互补供电系统协同效果评价指标筛选与构建

Tab.1　Screening and construction of evaluation indicators for synergy effect of multi-source complementary

一级指标	二级指标	三级可选指标	筛选三级指标	指标解释
技术	系统稳定性	供电可靠性、电压波动率、恢复时间、安全裕度、负载动态响应时间	电压波动率[20]	系统电压瞬时或稳态偏离额定值的幅度
			供电可靠性[21]	系统在规定时间内持续提供合格电能的能力
			负载动态响应时间	系统在标准功率阶跃后恢复至稳态所需的时间
	电能质量	谐波总畸变率、三相不平衡度、闪变值、功率因数、电压/电流畸变率、电压合格率、频率合格率、暂时过电压、短时中断、电力不足期望、年停电时间	谐波总畸变率	电流或电压波形中谐波分量与基波分量的占比
			闪变值[22]	电压波动在一段时期内的累计效果
			电压不平衡度[23]	系统中电压幅值或相位不对称的程度
			功率因数	系统有功功率与视在功率的比值
	能量管理效能	综合能源利用率、能量回收利用率、削峰贡献率、功率指令跟踪性能	功率指令跟踪性能[24]	系统实际输出功率对指令功率的跟随精确程度
			能量回收利用率[25]	系统对再生制动能量进行回收并再利用的效率
			削峰贡献率[26]	系统运行所削减的电网交换功率峰值的比例
	运营成本节约	电能量成本节约、容量电费节约、运维成本	电能量成本节约	系统因减少外购电能度数而节约的费用
			容量电费节约[27]	系统因降低电网峰值需量而节约的费用
经济	经济效益增益	峰谷价差套利收益、参与辅助服务收益、排放权交易收益	峰谷价差套利收益[28]	系统利用电网峰谷价差时移能量获得的净收益
			缓建效益能力[29-30]	系统因延缓上级电网增容改造产生的经济价值
			排放权交易收益[31]	系统通过碳减排在排放权交易市场获得的收益
环境	综合投资决策	全生命周期成本、净现值、内部收益率、动态投资回收期、效益成本比、缓建效益	净现值[32]	项目全生命周期内折现净现金流的总和
			动态投资回收期[33]	项目以折现净收益收回其初始投资所需的年限
	能效提升与排放削减	温室气体减排量、碳排放强度、单位运输功耗、污染物削减量	单位运输功耗[34]	系统完成单位运输周转量所消耗的净电能
			温室气体减排量[35]	系统因节能与能源替代减少的温室气体排放总量
	新能源替代与消纳	新能源渗透率、新能源利用率、新能源替代率	新能源渗透率[36]	系统消耗的新能源电量占总用电量的比例
			新能源利用率[37]	系统消纳的新能源电量占理论可发电量的比例

率高，控制链路敏捷，对动态扰动的抑制能力强。

2.4.2　电能质量

电能质量表征系统输出电压、电流波形偏离理想正弦波的程度。高效的协同控制能对电能质量进行主动优化与管理，是系统精细化协同水平的体现。

（1）谐波总畸变率(*THD*)，由各次谐波有效值的平方和的平方根，与基波有效值的比值计算得出。

$$THD_{\mathrm{I}}=\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty}I_h^2}}{I_1}\times 100\% \tag{4}$$

$$THD_{\mathrm{u}}=\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty}U_h^2}}{U_1}\times 100\% \tag{5}$$

式中：I_1，I_h为基波电流、第h次谐波电流的有效值，A；U_1，U_h为基波电压、第h次谐波电压的有效值，V。

先进的多源互补供电系统可通过协同控制储能变流器，使其兼具有源电力滤波器的功能，主动发出与谐波大小相等、相位相反的补偿电流，从而实现对系统谐波的动态抑制。因此，更低的谐波畸变率，证明了系统超越了简单的能量时移，在更精细的电能形态层面实现了高级协同控制。

（2）闪变值(*FK*)，是电压波动在一段时期内的累计效果，通过灯光照度不稳定造成的视感来反映。根据测量时间周期的不同，分为短时间闪变值FK_{ST}和长时间闪变值FK_{LT}[22]。FK_{ST}可采用符合IEC 61000-4-15：1996的闪变仪进行直接测量，这是闪变量值判定的基准方法，其标准测量周期为10 min。FK_{LT}可通过FK_{ST}计算得出。

$$FK_{\mathrm{LT}}=\sqrt[3]{\frac{1}{12}\sum_{j=1}^{12}\left(FK_{\mathrm{ST}}^{j}\right)^3} \tag{6}$$

式中：FK_{ST}^{j}为2 h内第j个短时间闪变值。

轨道交通的列车启停是典型的波动负荷，其功率的瞬时冲击是引发电网电压快速变化并导致“闪变”的主要原因。多源互补供电系统通过多能源间的高速动态响应，针对负荷侧功率的急剧波动，协同调配各主体出力以提供瞬时有功支撑并实施动态无功补偿，从而有效平抑电压波动并抑制高频电压扰动。因此，闪变值越低，系统平抑瞬时冲击负荷、保障电压平稳的能力就越强。

（3）电压不平衡度(ε_{U})，用以衡量电力系统不平衡的程度[23]，通常以负序电压不平衡度$\varepsilon_{\mathrm{U2}}$表示。

$$\varepsilon_{\mathrm{U2}}=\frac{\left|\dot{U}_2\right|}{\left|\dot{U}_1\right|}\times 100\% \tag{7}$$

$$\dot{U}_1=\left(\dot{U}_{\mathrm{A}}+a\dot{U}_{\mathrm{B}}+a^2\dot{U}_{\mathrm{C}}\right)/3 \tag{8}$$

$$\dot{U}_2=\left(\dot{U}_{\mathrm{A}}+a^2\dot{U}_{\mathrm{B}}+a\dot{U}_{\mathrm{C}}\right)/3 \tag{9}$$

式中：$\left|\dot{U}_1\right|$，$\left|\dot{U}_2\right|$分别为三相电压的正序分量和负序分量的方均根值，V；$\dot{U}_{\mathrm{A}}$，$\dot{U}_{\mathrm{B}}$，$\dot{U}_{\mathrm{C}}$为A，B，C三相电压的相矢量；a代表运算因子，$a=e^{j120^\circ}$。

轨道交通牵引负荷多为不平衡的设备，是导致电网三相不平衡的主要原因。先进的多源互补供电系统可通过其电力电子接口，协同进行相间功率的动态补偿，将系统整体的不平衡负荷主动校正为电网侧的平衡负荷。因此，更低的电压不平衡度，证明系统具备强大的相间功率协同调配能力，对保障电网三相平衡的电能质量贡献显著。

（4）功率因数(*PF*)，是衡量电能被有效利用程度的指标。

$$PF=\frac{P}{S} \tag{10}$$

式中：P为系统的有功功率，kW；S为系统的视在功率，kW。

多源互补供电系统可通过协同控制其内部的电力电子变流器，进行动态无功功率补偿，校正系统的功率因数。一个能长期维持在高水平的功率因数，是系统进行精细化有功/无功协同管理，降低网损、提升经济性的能力体现。

2.4.3　能量管理效能

能量管理效能用于评估能量管理系统在多源功率分配与能量调度方面的执行精度，反映了供电系统内部各单元间的协同配合水平与资源配置效率。

（1）功率指令跟踪性能($RMSE_{\mathrm{P}}$)，量化了系统实际输出功率与能量管理系统(EMS)下达的功率指令值之间的偏差[24]。

$$RMSE_{\mathrm{P}}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(P_{\mathrm{actual},\,i}-P_{\mathrm{cmd},\,i}\right)^2} \tag{11}$$

式中：$P_{\mathrm{actual},\,i}$为第i个采样点的实际功率，kW；$P_{\mathrm{cmd},\,i}$为第i个采样点的指令功率，kW。

协同是通过一系列精确的功率指令来实现的，控制系统的动态性能和稳态精度决定了协同策略的执行保真度。因此，一个更小的跟踪误差，意味着系

统对协同指令的执行力更强，控制回路性能更优。

（2）能量回收利用率(η_{rec})，由回收利用的能量与产生的总再生能量的比值计算得出，即

$$\eta_{rec}=\frac{E_{reused}+E_{stored}}{E_{regen_total}}\times 100\% \tag{12}$$

式中：E_{reused}，E_{stored}，E_{regen_total}分别为被直接再利用的能量、被存入储能系统的能量以及统计周期内回馈的再生制动能量总量，kW·h。

高回收利用率不仅要求储能单元容量足够，更要求协同控制系统能精准预测制动能量的大小和发生时间，并提前部署最优的能量回收路径，最大化地避免能量通过电阻消耗[25]。其是衡量“制动–回收再利用”这一核心协同回路执行效果与效率的关键指标。

（3）削峰贡献率(R_{ps})，通过计算削减掉的峰值功率与基线峰值功率的比值来获得，即

$$R_{ps}=\frac{P_{base_peak}-P_{actual_peak}}{P_{base_peak}}\times 100\% \tag{13}$$

式中：P_{base_peak}为基线峰值功率(无系统协同作用时)，kW；P_{actual_peak}为实际运行中的峰值功率，kW。

削峰填谷是系统协同带来的重要经济和技术价值，直接关系到降低电网的容量费用和延缓电网基础设施的增容投资[26]。该指标直观地反映了协同控制策略在平滑电网负荷这一具体任务上的最终成效。削峰贡献率越高，说明系统能量时移的协同策略越成功，控制执行越精准。

2.5　经济协同性指标

经济协同性旨在量化轨道交通多源互补供电系统在投资可行性与经济增值方面的综合表现。该维度下的指标用于评估系统通过多能源的协同优化调度，在降低运营成本、创造增量收益以及提升项目整体经济价值方面的具体成效。

2.5.1　运营成本节约

运营成本节约用以衡量系统通过协同优化运行，在全生命周期内所减少的各项电力相关支出。

（1）电能量成本节约(CS_E)，指因系统内部能量的高效协同利用，而减少向电网购买电能的费用，可通过系统在统计周期内有效利用的内部能量，乘以当地平均电价得出，即

$$CS_E=\left(E_{regen_used}+E_{renewable_used}\right)\cdot D_{ave} \tag{14}$$

式中：E_{regen_used}为回收再利用的再生制动电量，kW·h；$E_{renewable_used}$为就地消纳的新能源电量，kW·h；D_{ave}为当地电网的平均电能量价格，元/(kW·h)。

多源互补供电系统通过协同控制，回收列车再生制动能量并优先消纳新能源，以此替代外购电能。该指标反映了系统能量闭环协同、提升整体能效所带来的经济价值。

（2）容量电费节约(CS_D)，指因系统协同削减高峰负荷，而减少的按最大需量计收的容量电费，由系统削减的峰值功率乘以容量电价费率计算得出[27]。

$$CS_D=\left(P_{base_peak}-P_{actual_peak}\right)\cdot D_{pg} \tag{15}$$

式中：D_{pg}为当地电网的容量电价，元/(kW·h)。

多源互补供电系统通过协同控制储能系统在用电高峰时段放电，可主动压低系统从电网获取的峰值功率。该指标反映了系统能量时移协同策略在降低电网容量需求方面的经济贡献。

2.5.2　经济效益增益

经济效益增益量化了系统通过多能源协同优化调度，在多源互补供电模式下实现的增量收益与潜在货币化价值。相较于传统供电模式，多源互补供电系统利用多主体的时空互补特性，创造了峰谷价差套利、基础设施缓建及排放权交易等新增经济空间。

（1）峰谷价差套利收益(R_A)，是衡量系统利用峰谷电价差异进行经济性调度的指标[28]。

$$R_A=E_{shift}\cdot\left(D_{peak}-D_{valley}\right) \tag{16}$$

式中：E_{shift}为储能系统由谷向峰的时移总电量，kW·h；D_{peak}和D_{valley}分别为当地电网的峰时段与谷时段平均电价，元/(kW·h)。

分时电价机制为系统运行成本优化提供了空间。多源互补供电系统通过协同调度，控制储能单元在电价低谷时段购入并存储电能，在电价高峰时段释放，实现电能在时间维度上的“低存高用”。该指标反映了系统智能化能量调度协同策略所创造的真实、可实现的增量经济价值。

（2）缓建效益能力(R_{ID})，指因系统协同削峰而避免或推迟电网基础设施增容改造所带来的经济价值[29]，可采用资本回收系数法，将延缓的投资额在其延缓的年限内进行年金化计算[30]。

$$R_{ID}=C_{invest}\cdot\frac{b(1+b)^n}{(1+b)^n-1} \tag{17}$$

式中：C_{invest}为被延缓的电网投资总额，元；b为社

会折现率；n为投资被延缓的年限，a。

通过协同削峰，降低了对区域电网的峰值容量需求，从而使电网运营商可以延缓未来的扩容投资。

（3）排放权交易收益(R_{ET})，指因系统协同提升能效、利用新能源而减少的温室气体及其他污染物的排放量，通过在相应的排放权交易市场(如碳市场)中出售而获得的经济收益。可通过计算系统节约的电网电量所对应的排放削减量，并乘以排放权的市场价格得出[31]。

$$R_{ET}=\left(E_{\text{regen_used}}+E_{\text{renewable_used}}\right)\cdot EF_{\text{grid}}\cdot D_{\text{ET}} \tag{18}$$

式中：EF_{grid}为当地电网的排放因子，$kgCO_2e/(kW\cdot h)$，代表每消耗一度电网电量所对应的温室气体排放量；D_{ET}为排放权(如碳配额)的市场交易价格，元/$kgCO_2e$。

系统协同作用带来的电网电量消耗降低，是产生此项收益的根本原因，该指标将系统的环境效益直接转化为可量化的经济价值。

2.5.3　综合投资决策

在综合上述所有成本节约和收益增量，并计入初始投资的基础上，对项目的整体经济可行性进行宏观评价。

（1）净现值(V_{NPV})，是在项目全生命周期内，所有协同作用带来现金流入的折现值总和，与初始投资及运营成本折现值总和之间的差额。当净现值大于零时，表明项目的经济性在设定的折现率下是可接受的。该指标综合了协同效益、投资成本与资金的时间价值[32]。

$$V_{\text{NPV}}=C_{\text{invest}}-\frac{C_{\text{invest}}}{(1+b)^n}-C_0+\sum_{t=1}^{T}\frac{CS_{E,\,t}+CS_{D,\,t}+R_{A,\,t}+R_{ET,\,t}-C_{O\&M,\,t}}{(1+b)^t} \tag{19}$$

式中：t为年份；T为系统运营寿命，a；CS和R分别为t年的各项成本节约与收益，元；$C_{O\&M,\,t}$为t年的运维成本，元；C_0为初始投资总额，元。

（2）动态投资回收期(T_{DPP})，是指考虑资金时间价值的情况下，项目的累计折现协同净收益等于其初始投资所需的时间[33]。

$$0=C_{\text{invest}}-\frac{C_{\text{invest}}}{(1+b)^n}-C_0+\sum_{t=1}^{T_{DPP}}\frac{CS_{E,\,t}+CS_{D,\,t}+R_{A,\,t}+R_{ET,\,t}-C_{O\&M,\,t}}{(1+b)^t} \tag{20}$$

该指标用于评估项目收回投资成本的速度，协同效益越显著，项目的现金流越好，其动态投资回收期越短。

2.6　环境协同性指标

环境协同性旨在量化系统通过多能源的协同优化调度，在提升能源利用效率、优化能源结构以及降低污染物排放等方面的综合环境效益。

2.6.1　能效提升与排放削减

该维度聚焦于系统通过协同作用，减少完成相同运输任务所需的净能量输入，并由此带来环境排放物削减。

（1）单位运输功耗(E_{con})，可通过统计系统在完成标准运输任务下的净电能消耗与完成的运输周转量计算得出[34]，即

$$E_{\text{con}}=\frac{E_{\text{net_consumed}}}{M\cdot L} \tag{21}$$

式中：E_{con}为净消耗的电网电能，kW·h；M为运输任务的总质量(乘客或货物)，kg；L为运输距离，km。

多源互补供电系统通过协同控制，利用储能单元捕获机车再生制动能量，并将其用于后续的运输任务，构建了内部能量循环，这一协同成效，可通过单位运输功耗进行量化，协同效率越高，系统的净能耗便越低。

（2）温室气体减排量(ΔE_m)，可通过计算系统节约和替代的电网电量所对应的排放削减量得出。

$$\Delta E_m=\left(E_{\text{regen_used}}+E_{\text{renewable_used}}\right)\cdot EF_{\text{grid}} \tag{22}$$

多源互补协同通过2个途径实现碳减排。一是通过再生制动能量的回收，降低对外部电网的购电需求；二是利用光伏、风电等零碳电源的协同调度，实现对电网中传统高碳电力的有效替代[35]。协同效果越好，系统通过能量循环利用及新能源替代所显示的环境效益越显著，该指标值越高。

2.6.2　新能源替代与消纳

该维度聚焦于系统通过协同作用，提升对光伏等新能源的吸纳与利用水平，从而优化自身的能源消费结构。

（1）新能源渗透率(η_{pre})，指新能源发电量在系统总负荷需求中所占比例[36]。

$$\eta_{\text{pre}}=\frac{E_{\text{PV}}+E_{\text{WT}}+E_{\text{RB}}}{E_{\text{load}}}\times 100\% \tag{23}$$

式中：E_{PV}，E_{WT}和E_{RB}分别为光伏、风能和列车制

动回馈系统的发电量，kW·h；E_{load}为轨道交通负荷需求，kW·h。

多源互补供电系统通过储能单元的灵活缓冲与能量时移，平抑新能源出力波动，以最大化提升新能源在牵引供电系统中的就地融入与自洽利用水平。新能源渗透率越高，系统的协同控制对波动电源的接纳与管理能力越强，系统也越清洁、低碳。

（2）新能源利用率(η_{ure})，表征系统对新能源“应发尽用”的程度[37]。

$$\eta_{ure}=\frac{E_{renewable_used}}{E_{renewable_available}}\times 100\% \tag{24}$$

式中：$E_{renewable_available}$为同期新能源设备理论上可产生的总电量，kW·h。

在新能源出力充沛而用电负荷较低时，发电与用电的不匹配会导致清洁电力的弃用。多源互补供电系统通过协同调度，将盈余电力存入储能系统供后续使用，从而提升能量的时空匹配度[38]。系统在时空调度上的协同能力越强，该指标值越高。

3　轨道交通多源互补供电系统协同效果的评价方法

由于多源互补牵引供电系统协同效果评价的指标维度多、非线性、部分指标难以精确量化，单一的评价方法难以全面反映整体协同效果，当前普遍采用组合评价模型，通常分为2个核心环节：首先通过主观、客观或主客观结合的方式确定各级指标的权重，然后运用综合评价模型对评价对象(如不同的规划方案、运行策略等)进行排序选优。

3.1　指标权重的确定方法

协同效果评价是复杂的多属性决策问题，赋权方法需要根据评价的具体阶段、数据可获取性以及指标间的耦合特性来针对性选用。赋权方法主要分为主观赋权、客观赋权和组合赋权三大类。为厘清这些方法的脉络和适用场景，首先对各类主流方法及其优化形式的原理、优缺点进行归纳，然后构建一个赋权方法的作用场景，以辅助研究者根据不同评价过程匹配最优方法。

3.1.1　主观赋权法

主观赋权法将领域专家的经验知识与定性判断转化为量化的权重系数，适用于系统初期数据不足或涉及较多定性因素的场景。主观赋权法特性汇总如表2所示[39-43]。

综合比较，AHP虽常作为基础框架，但其指标独立的假设难以适配轨道交通“源-网-荷-储”的深度耦合特性；相比之下，ANP通过网络结构处理指标间的依赖反馈，更能贴合系统实际。针对多指标评价中专家负担重、易产生逻辑矛盾的问题，BWM通过优化比较路径提供了更高效的选择；而Delphi法则常作为前置程序，用于凝聚群体共识，降低个体判断的不确定性。

鉴于轨道交通多源互补供电系统内部子系统间存在复杂的能量与信息交互，且评价指标体系庞大，单纯的AHP难以胜任。因此，在主观赋权方法的选择上，ANP因能处理耦合关系而更具科学性，BWM因能高效处理多指标而更具实用性，两者结合或根据侧重点选用是更为合理的策略。

3.1.2　客观赋权法

客观赋权法完全依赖指标的客观数据进行权重计算，规避了主观判断的随意性。客观赋权法特性汇总如表3所示[44-52]。

针对数据离散度，EWM应用广泛但易低估稳定型指标价值，A-EWM可弥补此缺陷，但适用场景

表2　主观赋权法特性汇总

Tab.2　Summary of characteristics of subjective weighting methods

主观赋权	优点	缺点	适用条件
层次分析法[39-40](Analytic Hierarchy Process，AHP)	过程条理清晰，易于理解和操作 定性和定量分析相结合	结果依赖专家打分，易引入个人偏见 当指标过多时，判断矩阵易出现逻辑矛盾	用于系统评价初期规划阶段，为非关联指标赋予权重
网络分析法[41](Analytic Network Process，ANP)	能够计算指标间关联反馈权重 模型更真实	计算量大 对专家的系统理解能力要求高	用于计算各子系统深度耦合指标的权重
德尔菲法[42](Delphi)	避免从众效应 提升专家输入信息的收敛性与可靠性	过程漫长，时间精力消耗大 结果通常是一个共识分数或区间	用于AHP/ANP的前置程序，为判断矩阵提供更可靠的共识分数
最优最差法[43](Best-Worst Method，BWM)	减少比较次数，减轻专家负担 结构简单，逻辑一致性强	可能丢失指标之间的部分偏好信息 两级指标完全依赖专家判断	用于评价指标繁多的场景

表3　客观赋权法特性汇总

Tab.3　Summary of characteristics of objective weighting methods

客观赋权	优点	缺点	适用条件
熵权法[44](Entropy Weight Method，EWM)	权重仅由数据本身决定，避免了主观因素干扰 客观赋权法中最常用、最基础的方法，应用广泛	低估“稳定”指标的重要性 对数据中的异常值和缺失值非常敏感	用于系统已积累大量运营数据的阶段，根据数据的波动性计算各指标权重
反熵法[45](Anti-Entropy Weight Method，A-EWM)	准确识别以“稳定”为优的指标权重	仅作为EWM的补充，不具普适性	用于为系统的“供电可靠性”“电压波动率”等稳定性指标赋予客观权重
变异系数法[46](Coefficient of Variation Method，CVM)	公平比较不同单位和量级的指标	指标的平均值趋近于0时，权重会变得极不稳定	用于比较不同量纲指标的体系赋权
标准差法[47](Standard Deviation Method，SDM)	反映数据的绝对波动情况	无法比较不同单位或不同数量级的指标	用于为指标单位和量级均相同的子集进行赋权
标准影响损失评估法[48](Criterion Impact Loss，CILOS)	权重大小直接反映了该指标避免最差情况的贡献度	依赖数据中的极端值	用于系统规避风险或偏离最差绩效方面的指标赋权
标准相关权重法[49-50](Criteria Importance Through Intercriteria Correlation，CRITIC)	处理多维指标间的协同与制约关系，避免信息冗余	计算复杂，需要计算指标间的相关系数矩阵	用于指标间存在冲突和关联的复杂体系赋权
标准移除效应法[51](Method Based on the Removal Effects of Criteria，MEREC)	从“指标的不可或缺性”角度来赋权	对N个指标进行N次移除和重新计算，过程繁琐	用于需要精准识别哪些指标对多源系统综合效益影响最大，并据此赋权
主成分分析法[52](Principal Component Analysis，PCA)	解决指标间共线性问题，简化权重体系 用于指标过多、体系臃肿的评价	降维过程会丢失部分原始信息 新合成的主成分权重缺乏明确的物理意义	用于指标过多、数据高度相关的场景，重构权重体系而非直接赋权

相对有限。针对量纲差异，CVM比SDM更有效地消除尺度影响，但该方法对低均值数据较为敏感；而对于指标间的强相关性与冲突性，PCA通过降维消除共线性，但代价是新主成分的物理意义模糊。

鉴于轨道交通多源互补供电系统具有数据维度高、指标间耦合强且常存在效益冲突(如经济性与环保性、可靠性与成本)的特点，单一基于离散度的方法可能导致权重分配失真。因此，在客观赋权方法的选择上，CRITIC因其综合考量了指标的对比强度(标准差)与冲突性(相关系数)，既保留了指标物理含义，又量化了多源数据间的协同与制约关系，是处理此类复杂耦合系统的优选方案。

3.1.3　组合赋权法

主观赋权法存在权重确定主观性强的问题，而客观赋权法则对数据质量和分布有较高要求。为克服单一赋权法的固有局限性，将主、客观赋权法相结合的组合赋权策略应运而生，旨在对轨道交通多源互补供电系统的协同效果进行更科学的综合评价。组合赋权法特性汇总如表4所示[53-62]。

综上所述，组合赋权法弥补了主观赋权受人为偏好影响以及客观赋权依赖数据统计特征的局限，实现了定性判断与定量分析的互补，是处理轨道交通多源互补供电系统复杂评价问题的最优策略。

各类组合方法中，代数合成法人为设定系数，存在主观随意性；最大化离差法追求数据区分度而忽视指标的实际物理重要性；修正与调整模型依赖初始主观权重，且修正机制缺乏统一标准；信息融合理论门槛高且计算过程繁琐。

相比之下，博弈论模型寻求主客观权重的最优均衡点，规避了人为偏好的干扰，实现了计算效率与科学性上的平衡，是处理轨道交通多源互补供电系统协同效果赋权问题的优选方案。

基于前文分析，鉴于主观赋权中ANP与BWM分别在处理耦合性与多指标方面具有优势，客观赋权中CRITIC法兼顾指标对比强度与冲突性，推荐采用基于博弈论的ANP-CRITIC或BWM-CRITIC组合赋权模型，以实现评价结果的科学性与稳健性。

3.2　综合评价模型

在完成评价指标体系的构建与赋权之后，评价流程进入到决策阶段。此阶段选择并运用恰当的综合评价模型，将各指标的权重信息与标准化后的性能数据进行有效集成，凝练成一个能够全面反映系统整体优劣的综合性评价值或排序关系，从而为系统方案的优化、比选与决策提供科学支撑。根据评

表4　组合赋权法特性汇总

Tab.4　Summary of characteristics of combination weighting methods

组合赋权	原理	优点	缺点	适用条件
代数合成法	通过加权求和将主、客观权重进行代数合成[53-55]	模型形式简洁，易于实现	组合系数的确定人为设定，引入了新的主观性	用于多源系统赋权的大多数场景，是最常用权重组合方法
博弈论	寻找主、客观权重间的“纳什均衡点”作为最终权重[56-57]	自动协调权重冲突，避免了人为设定组合系数	计算量大	用于协调专家判断与数据表现结论差异较大时的权重
最大化离差	优化权重以最大化各方案得分差距[58]	增强权重的区分度，便于后续方案排序	侧重数据区分度而非物理重要性，变动小的核心指标权重易被低估	用于不同方案、不同控制策略比选
信息融合理论	利用信息熵[59]、模糊集[60]、证据理论[61]等框架，将模糊的、不精确的甚至相互冲突的权重信息进行融合	为处理定性指标的模糊权重提供了有效工具	理论门槛高，需要评价者掌握信息熵、模糊数学或证据理论等复杂的专业知识	用于多源系统这种新生事物，在赋权过程中需处理大量模糊、不精确、不完备信息的场景
修正与调整模型	承认主观权重的先验合理性，利用客观数据反映的信息来对其进行修正或调整，得到最终权重[62]	保留专家意见，解决主观赋权偏离客观实际，以及客观赋权忽视内在规律的问题	权重受初始主观权重的影响较大，客观数据仅起微调作用	用于以专家意见为主导，又通过运营数据对权重进行校准和验证

价目标和输出形式的不同，这些模型大致可分为两大类：一是通过数学聚合得到明确分值的指数评分定量评价方法；二是侧重于通过方案间的两两比较，构建优劣排序关系的优劣区分定性评价方法。针对轨道交通多源互补供电系统多目标、多层次的复杂特性，以及评价过程中可能出现的指标冲突、信息模糊等问题，现有研究已形成多种成熟的评价方法路径，综合评价模型特性汇总如表5所示[63-75]。

总体而言，作为补偿性模型的综合指数法与MAUT侧重于定量评分，但在处理劣势指标时存在局限；ELECTRE与PROMETHEE法虽能解决非补偿性问题，但结果往往仅为部分排序或需设定复杂参数；物元可拓模型则因经典域确定的主观性而受限。相比之下，逼近理想解法中的TOPSIS应用广泛，但在寻求多目标妥协解方面，VIKOR法更具优势；FCE能有效将定性语言转化为定量矩阵，解决模糊性问题；GRA适用于小样本数据，解决了信息稀疏难题；而DEA则凭借无需预设权重的特性，成为客观评估投入产出效率的首选工具。

鉴于轨道交通多源互补供电系统兼具多目标冲突强烈、数据维度高且定性定量指标共存的特点，单一模型难以满足所有评价需求。因此，针对模型选择问题，应构建一套以定量分析为核心、灵活适配各类场景的层次化评价策略：首先，针对系统评价中普遍存在的多目标冲突(如经济性与环保性)，应优先选用VIKOR法作为决策主框架，以寻求各方满意的妥协解；其次，针对评价指标中存在的模糊定性描述或运行初期数据稀疏问题，可将FCE法(用于模糊量化)或GRA法(用于小样本处理)嵌入主框架中，以增强模型对不确定信息的适应性；最后，若评价目标聚焦于不同线路或方案的投入产出效能，则应选用DEA法这一专用工具进行客观评估。

4　轨道交通多源互补供电系统协同效果评价的应用展望

随着多源供能主体的加入，轨道交通多源互补供电系统协同效果的评价开始受到重视。作为多主体系统的关键指标，协同效果评价可为轨道交通多源互补供电系统的规划设计、运营调度等关键环节提供依据，为系统技术升级与低碳化转型提供科学指导。

（1）可指导多源互补供电系统的规划设计。多源系统涉及多种能源形式，如光伏、风力、再生制动、储能等，依据不同的配置种类、设计容量以及运行策略，可预先设计出多种规划配置方案，对这些方案进行协同效果评价，可筛选出综合效益最佳的设计方案。

（2）可指导多源互补供电系统的设备配置。不同类型的能源设备特性不同，如储能设备的充放电效率、功率密度、使用寿命，分布式电源的发电效率、受自然条件影响程度等都存在差异，对设备配置方案的协同效果进行选优，可实现系统设备的最优配置。

表5　综合评价模型特性汇总

Tab.5　Summary of characteristics of comprehensive evaluation models

方法类别	具体方法	核心思想	优点	缺点	适用条件
综合指数评分法	加权模型	通过数学聚合，将各指标的加权性能凝聚成一个综合指数[63-64]	原理简单，易于实现，计算过程简单	极端劣势指标可能被其他优势指标完全掩盖	用于需要将多维指标转化为单一分数的直观比较场景
	多属性效用理论(Multi-Attribute Utility Theory，MAUT)	通过构建效用函数，将工程技术参数映射为决策者的满意度[65]	能刻画决策者对不同指标的非线性偏好和风险态度	效用函数构建过程复杂，且高度依赖主观判断	用于高风险、高成本的重大工程决策
逼近理想解法	优劣解距离法(Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution，TOPSIS)	同时度量方案与虚拟的最优解和最劣解的距离，并据此排序[66]	几何意义清晰，原理直观，易于理解	增删方案可能导致排序变化	用于多方案的横向对比选优
	多准则妥协解排序法(VIKOR)	在最小化群体效益和个体遗憾间，寻求各方接受度最高的折衷解[67]	适用于指标间冲突强烈的场景，能找到一个最接近理想的妥协解	计算量大	用于需要在技术、经济、环境等冲突指标间寻求妥协的决策
优序关系评价法	消除与选择转换现实法(Elimination and Choice Expressing Reality，ELECTRE)	设定一致性阈值，判断方案间的优于、劣于或不可比关系[68]	允许方案间存在无法比较的关系，更符合现实决策	结果通常只能得到部分排序，且阈值的设定困难	用于处理指标间的非补偿性与价值冲突
	偏好排序组织评价法(Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations，PROMETHEE)	通过构建6种优先函数来精细刻画一个方案优于另一方案的偏好强度[69]	优先函数类型清晰，便于决策者根据指标实际意义进行选择	决策者需要为每一个指标选择一种优先函数并设定参数	用于如净现值等指标差异巨大时的精细排序
基于模糊数学	模糊综合评价法(Fuzzy Comprehensive Evaluation，FCE)	将定性语言或边界不清的标准转化为可计算的定量隶属度[67，70-71]	能解决标准边界不清、指标难以精确量化的问题	运算中易丢失中间信息导致分辨率降低	用于轨道交通评价中难以精确量化的定性或模糊指标
基于系统关系	灰色关联分析法(Grey Relational Analysis，GRA)	分析方案数据序列与理想序列的几何形态相似度进行排序[72]	原理简单，易于实现，且适用于小样本	忽略了数据本身的绝对大小	用于轨道交通早期或数据稀疏、信息不充分的评价场景
	数据包络分析法(Data Envelopment Analysis，DEA)	无需预设权重，客观评估系统的投入产出效率[73]	完全由数据驱动，避免了权重设定中的主观偏见	极易受到异常数据或噪声的干扰	用于需要客观评估不同轨道线路或系统运营效率的场景
	物元可拓模型	将评价对象、特征及量值构造成物元，通过计算与标准区间的关联度进行等级划分[74-75]	擅长处理指标间的矛盾与不相容问题	经典域和节域的确定过程复杂且带有一定主观性	用于处理系统中的矛盾与不相容问题，实现对协同水平的精准、量化评级

（3）可指导多源互补供电系统的优化调度。多源互补供电系统中供需动态变化，如列车运行、负载波动、天气变化、电价波动等，需对能源分配进行动态调整，优化各能源的出力比例和调度策略，以适应不同负荷需求，实现效率、成本和碳排放的最优。

（4）可指导多源互补供电系统应急响应能力和自愈能力的建设。风能、光伏、电网及储能系统在供电能力和响应速度方面具有互补性，突发情况下，可优化应急调度策略，合理分配备用电源，提高系统对极端天气、突发故障等风险的抵御能力。

（5）可指导既有轨道交通供电系统的改造升级。多源互补供电系统中新型电气设备具有更好的调控特性，如高频变压器与储能装置可降低网损、提高再生制动能量回收率。新设备的选用需从全生命周期成本和碳减排效果方面综合量化长期收益，可用于指导新设备、新技术的选用，为传统供电系统的改造升级提供依据。

5　结论

在梳理轨道交通多源互补供电系统架构特征的基础上，针对协同效果评价这一核心问题，探讨了指标体系的提炼原则、权重确定的科学路径以及综合评价模型的适用边界，形成如下结论。

（1）轨道交通多源互补供电系统通过不同形式能源之间的时空互补，利用新能源波动与轨道交通牵引负荷波动之间的协同，可降低系统对电力网络

的冲击，提高轨道交通的绿色运营水平。系统存在多种形式的供能主体，各主体之间特性存在差异，多主体之间的协同控制是实现轨道交通安全稳定供电的有效途径。

（2）协同效果是衡量多主体系统内部之间相互配合效果的关键指标，表征了系统在“源-网-荷-储”深度耦合下超越各单元独立运行的综合增益，可为系统的规划、配置、控制及调度提供科学指导。轨道交通多源互补供电系统协同效果评价涵盖技术、经济、环境3个维度，聚焦于能反映系统高冲击负荷、高可靠性需求、源-荷二象性及线性分布特性的关键指标，构建综合评价体系，为科学量化系统协同成效提供依据。

（3）轨道交通多源互补供电系统运行数据日益丰富，为实现客观数据规律与专家经验知识的有效融合，应优先采用组合赋权法。基于博弈论的ANP-CRITIC或BWM-CRITIC组合赋权模型，利用博弈均衡机制化解主客观权重冲突，规避单一赋权法的局限性，可以构建更符合实际运行特性的指标权重体系。

（4）轨道交通多源互补供电系统协同效果的量化评价能够精准揭示子系统间的互动程度与深度耦合水平。VIKOR法作为量化决策主框架可寻求多目标冲突下的最优折衷解，并嵌入FCE或GRA模型，增强对不确定信息的处理能力，为系统规划方案比选与运行策略优化提供坚实的决策依据。

构建的多维指标体系与遴选出的组合评价方法论，为轨道交通多源互补供电系统协同效果的量化评价提供了一套完备的理论框架与工具集，并可为轨道交通多源互补供电系统的规划设计、设备配置、优化调度、应急保障及升级改造提供全生命周期的决策支持。未来的研究可聚焦以下方向：一是融合大数据与人工智能，构建数据驱动的动态评价模型，提升评价的实时性与精准度；二是深化不同运营场景下的实证研究，通过多维实测数据验证并修正评价理论；三是探索“评价—优化”的反馈机制，研究评价结果如何反哺系统控制策略，形成闭环管理。

参考文献：

[1] 鞠益宏．多能互补综合能源电力系统的建设模式研究[J]. 科技资讯，2024，22(24)：173-175.
JU Yihong. Research on the Construction Mode of Multi-Energy Complementary Integrated Energy Power System[J]. Science & Technology Information，2024，22(24)：173-175.

[2] 吴　磊，张凌云，吴宗臻，等．城轨交通多源协同能量管理策略及经济性分析[J]. 铁道运输与经济，2024，46(12)：50-60.
WU Lei，ZHANG Lingyun，WU Zongzhen，et al. Strategy and Economic Analysis of Multi-Source Collaborative Energy Management for Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(12)：50-60.

[3] 高仕斌，罗嘉明，陈维荣，等．轨道交通“网-源-储-车”协同供能技术体系[J]. 西南交通大学学报，2024，59(5)：959-979，989.
GAO Shibin，LUO Jiaming，CHEN Weirong，et al. Rail Transit “Network-Source-Storage-Vehicle” Collaborative Energy Supply Technology System[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2024，59(5)：959-979，989.

[4] 邓文丽，戴朝华，陈维荣．轨道交通能源互联网背景下光伏在交/直流牵引供电系统中的应用及关键问题分析[J]. 中国电机工程学报，2019，39(19)：5692-5702.
DENG Wenli，DAI Chaohua，CHEN Weirong. Application of PV Generation in AC/DC Traction Power Supply System and the Key Problem Analysis under the Background of Rail Transit Energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE，2019，39(19)：5692-5702.

[5] 徐春梅，张逸飞，刘苏瑶，等．轨道交通能源自洽系统方案设计与配置优化[J]. 交通运输工程学报，2024，24(4)：43-55.
XU Chunmei，ZHANG Yifei，LIU Suyao，et al. Scheme Design and Configuration Optimization of Self-Consistency Energy Systems for Rail Transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2024，24(4)：43-55.

[6] 刘佳玲，秦博宇，蔡其聪，等．计及可再生能源接入的城市轨道交通储能容量优化配置[J]. 电网技术，2025，49(2)：709-718.
LIU Jialing，QIN Boyu，CAI Qicong，et al. Capacity Planning of Energy Storage for Urban Rail Transit Systems Considering Renewable Energy Integration[J]. Power System Technology，2025，49(2)：709-718.

[7] 刘宇翔，陈艳波，田昊欣，等．基于两阶段鲁棒优化的轨

道交通自洽能源系统新能源-储能规划配置[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4713-4723.
LIU Yuxiang，CHEN Yanbo，TIAN Haoxin，et al. New Energy and Energy Storage Planning Configuration in Rail Transportation Self-Consistent Energy Systems Based on Two-Stage Robust Optimization[J]. High Voltage Engineering，2024，50(10)：4713-4723.

[8] 范鸿炜，张煌辉，崔宪阳，等. 考虑储能和新能源的城市轨道交通能源路由器拓扑设计与控制策略研究[J]. 中国测试，2024，50(10)：1-11.
FAN Hongwei，ZHANG Huanghui，CUI Xianyang，et al. Study on Topology Design and Control Strategy of Urban Rail Transit Energy Router Considering Energy Storage and New Energy Sources[J]. China Measurement & Test，2024，50(10)：1-11.

[9] 林俊杰，杨明豪，李占赫，等. 城市轨道交通柔直牵引供电系统协同节能运行控制[J]. 电网技术，2026，50(2)：505-514.
LIN Junjie，YANG Minghao，LI Zhanhe，et al. Collaborative Energy-saving Control of Urban Rail Flexible Traction Power Supply System[J]. Power System Technology，2026，50(2)：505-514.

[10] 安星锟，田奥博，吴　磊，等. 铁路沿线光伏储能接入牵引网技术研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(11)：13-20.
AN Xingkun，TIAN Aobo，WU Lei，et al. Technology of Photovoltaic and Energy Storage Access to Traction Network along Railway Line[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(11)：13-20.

[11] 董　默. 基于出力特性及长短期记忆网络的分布式光伏场站功率预测方法[J]. 山西电力，2024(6)：19-24.
DONG Mo. Study on Power Prediction Method of Distributed Photovoltaic Station Based on Output Characteristics and LSTM Network[J]. Shanxi Electric Power，2024(6)：19-24.

[12] 肖永刚. 高速铁路牵引变电所照明系统能效优化研究[J]. 光源与照明，2025(2)：22-24.
XIAO Yonggang. Research on Energy Efficiency Optimization of Lighting System in High Speed Railway Traction Substation[J]. Lamps and Lighting，2025(2)：22-24.

[13] 李　波，杨永标. 储能双向响应系统中双向变流器闭环稳定性建模[J]. 工业加热，2022，51(11)：38-42.
LI Bo，YANG Yongbiao. Closed-Loop Stability Modeling of Bi-Directional Converter in Bi-Directional Energy Storage Response System[J]. Industrial Heating，2022，51(11)：38-42.

[14] 张宇翔，刘天阳，张凌云，等. 中老铁路光伏发电应用与实践研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(10)：8-17.
ZHANG Yuxiang，LIU Tianyang，ZHANG Lingyun，et al. Research on Application and Practice of Photovoltaic Power Generation in China-Laos Railway[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(10)：8-17.

[15] 王　恒，秦雷雷，蒋玲茜，等. 浙江省道路运输企业绿色发展监测及健康诊断机制研究[J]. 价值工程，2024，43(23)：14-17.
WANG Heng，QIN Leilei，JIANG Lingxi，et al. Research on Green Development Monitoring and Health Diagnosis Mechanism of Road Transport Enterprises in Zhejiang Province[J]. Value Engineering，2024，43(23)：14-17.

[16] 王庆刚，杨谋存，朱跃钊，等. 可再生能源多能互补热电气联产系统评价方法综述[J]. 电网技术，2021，45(3)：937-950.
WANG Qinggang，YANG Moucun，ZHU Yuezhao，et al. Review on Evaluation Methods of Combined Heating，Power and Biogas System Coupled with Renewable Energy[J]. Power System Technology，2021，45(3)：937-950.

[17] 屈小云，吴　鸣，李　奇，等. 多能互补综合能源系统综合评价研究进展综述[J]. 中国电力，2021，54(11)：153-163.
QU Xiaoyun，WU Ming，LI Qi，et al. Review on Comprehensive Evaluation of Multi-Energy Complementary Integrated Energy Systems[J]. Electric Power，2021，54(11)：153-163.

[18] 周煜韬，王洪达，焦志鹏，等. 微电网效能评价指标体系与评价方法研究综述[J]. 广东电力，2025，38(8)：63-79.
ZHOU Yutao，WANG Hongda，JIAO Zhipeng，et al. Review of Microgrid Efficiency Evaluation Index Systems and Methods[J]. Guangdong Electric Power，2025，38(8)：63-79.

[19] 王文坦，周　全，侯　强，等. 综合能源多能互补关键技术研究现状及发展趋势[J]. 长江技术经济，2024，8(2)：101-107，116.
WANG Wentan，ZHOU Quan，HOU Qiang，et al. Key Technologies of Multi-Energy Complementary for Integrated Energy Sources：Research Status and Development Trends[J]. Technology and Economy of Changjiang，2024，8(2)：

101-107，116.

[20] 邓　威，严宇杨，陈跃辉. 基于概率潮流的实际配电网电压质量评估[J]. 湖南电力，2018，38(2)：29-34，38.
DENG Wei，YAN Yuyang，CHEN Yuehui. Voltage Quality Evaluation of Actual Distribution Network Based on Probabilistic Load Flow[J]. Hunan Electric Power，2018，38(2)：29-34，38.

[21] 李宇辉. 大单边供电在地铁故障处置及运营组织中的应用[J]. 铁道运输与经济，2022，44(4)：139-144.
LI Yuhui. Application of Large One-Way Feeding in Metro Failure Handling and Operation Organization[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(4)：139-144.

[22] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 电能质量术语：GB/T 32507—2024[S]. 北京：中国标准出版社，2025：16-18.

[23] 国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 电能质量 三相电压不平衡：GB/T 15543—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009：2-4.

[24] 张　晶，刘晓巍，张松涛，等. 全球能源互联网标准体系优先领域研究[J]. 供用电，2018，35(8)：61-66，72.
ZHANG Jing，LIU Xiaowei，ZHANG Songtao，et al. Studies on Priority Areas of Standard System for Global Energy Interconnection(GEI)[J]. Distribution & Utilization，2018，35(8)：61-66，72.

[25] 吴　磊，舒洋浩，周斌彬，等. 基于配置与能量管理协同的铁路光储系统经济性提升策略[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(11)：4711-4723.
WU Lei，SHU Yanghao，ZHOU Binbin，et al. Economic Enhancement Strategy for Railway Photovoltaic Energy Storage System Based on Collaborative Configuration and Energy Management[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(11)：4711-4723.

[26] 杨欢红，杨镇瑜，黄文焘，等. 面向分时跨区削峰填谷的货运铁路储能牵引系统设计与优化[J]. 上海交通大学学报，2025，59(12)：1784-1794.
YANG Huanhong，YANG Zhenyu，HUANG Wentao，et al. Design and Optimization of Freight Railway Energy Storage Traction System for Time-Sharing Cross-Regional Peak Shaving and Valley Filling[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University，2025，59(12)：1784-1794.

[27] 杨　颢. 基于全寿命周期成本的贯通同相牵引供电系统优化设计[D]. 成都：西南交通大学，2018.

[28] 王艺博，刘红丹，周忠旭，等. 新兴市场背景下考虑高铁配储的日前-日内两阶段优化策略[J]. 电力自动化设备，2025，45(11)：80-87，160.
WANG Yibo，LIU Hongdan，ZHOU Zhongxu，et al. Day-Ahead and Intra-Day Two-Stage Optimization Strategy Considering High Speed Rail with Energy Storage in Context of Emerging Markets[J]. Electric Power Automation Equipment，2025，45(11)：80-87，160.

[29] 胡竞秋，张　轩，严心然，等. 基于主客观赋权法的综合能源系统效益评估方法[J]. 广东电力，2023，36(1)：1-8.
HU Jingqiu，ZHANG Xuan，YAN Xinran，et al. Benefit Evaluation Method of Comprehensive Energy System Based on Subjective and Objective Weighting Method[J]. Guangdong Electric Power，2023，36(1)：1-8.

[30] 王凤娟，徐玖平. 多能互补发电系统：概念框架、知识图谱与集成优化[J]. 中国管理科学，2025，33(1)：62-75.
WANG Fengjuan，XU Jiuping. Multi-Energy Complementary Generation Systems：Conceptual Framework，Knowledge Map and Integrated Optimization[J]. Chinese Journal of Management Science，2025，33(1)：62-75.

[31] 吴文华. 碳交易下含风电场的源网荷协同规划模型研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2020.

[32] 李雪梅，毛雨濛，焦德涵. 考虑时间价值的铁路建设项目工期调整决策研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：182-191.
LI Xuemei，MAO Yumeng，JIAO Dehan. Decision-Making of Railway Construction Project Schedule Adjustment Considering Time Value[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(8)：182-191.

[33] 石锦扬，张金英，周岩梅，等. 铁路车站光伏储能系统设计及生命周期环境经济分析[J]. 铁道运输与经济，2024，46(10)：43-50.
SHI Jinyang，ZHANG Jinying，ZHOU Yanmei，et al. Design of Photovoltaic Energy Storage System and Life Cycle Environmental Economic Analysis for Railway Stations[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(10)：43-50.

[34] 梁亚莉，李　倩，李杲岭. 综合运输成本变化对铁路货运量的影响研究[J]. 价格理论与实践，2024(2)：98-102.
LIANG Yali，LI Qian，LI Gaoling. Research on the Impact

of Changes in Comprehensive Transportation Costs on Railway Freight Volume[J]. Price: Theory & Practice, 2024(2): 98-102.

[35] 毛保华，赵义馨，李宁海，等. 我国高速铁路与民航客运碳排放因子及其影响因素研究[J]. 北京交通大学学报，2024，48(4)：11-21.
MAO Baohua, ZHAO Yixin, LI Ninghai, et al. Study on Carbon Emission Factors and Their Influencing Factors in High Speed Railway and Civil Aviation Passenger Transport in China[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(4): 11-21.

[36] 储兆诤，张晓悦，王　涛. 碳中和背景下可再生能源发电产业研究[J]. 能源与节能，2023(5)：16-19.
CHU Zhaozheng, ZHANG Xiaoyue, WANG Tao. Renewable Energy Power Generation Industry under Background of Carbon Neutrality[J]. Energy and Energy Conservation, 2023(5): 16-19.

[37] 曹孙喆. 德国铁路公司碳中和发展策略探析[J]. 铁道运输与经济，2023，45(2)：140-146.
CAO Sunzhe. Research on Carbon Neutrality Development Strategy of Deutsche Bahn AG[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(2): 140-146.

[38] 彭　晔. 轨道交通新能源开发利用潜力研究[J]. 现代工业经济和信息化，2022，12(7)：20-22.
PENG Ye. Research on the Development and Utilization Potential of New Energy in Rail Transit[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, 12(7): 20-22.

[39] 郭艳飞，任雪桂，鞠　力，等. 基于层次分析法的综合能源系统能效评估方法研究及应用[J]. 电力科学与技术学报，2018，33(4)：121-128.
GUO Yanfei, REN Xuegui, JU Li, et al. The Comprehensive Efficiency Evaluation Method for Integrated Energy System Based on AHP[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 121-128.

[40] 李亚利. 基于层次分析-模糊综合评价法的新能源电力系统储能技术评价[J]. 自动化应用，2024，65(3)：109-111.
LI Yali. Energy Storage Technology Evaluation of New Energy Power System Based on AHP-Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J]. Automation Application, 2024, 65(3): 109-111.

[41] 李仁芳. Y园区综合能源服务投资项目风险评估[D]. 南京：南京工业大学，2023.

[42] 王成江，李红艳，范开明，等. 基于Delphi法和分层模型的输电线路状态评价[J]. 三峡大学学报(自然科学版)，2012，34(5)：52-57.
WANG Chengjiang, LI Hongyan, FAN Kaiming, et al. State Evaluation of Power Transmission Line with Delphi Method Based on Hierarchical Model[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2012, 34(5): 52-57.

[43] WANG Y N, LIANG Y Z, LI C, et al. Operation Performance Evaluation of Urban Rail Transit PPP Projects: Based on Best Worst Method and Large-Scale Group Evaluation Technology[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 4318869.

[44] 王子萌. 基于熵权法碳配额分配的掺氢综合能源低碳经济调度方法[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2024.

[45] 周依希，李晓明，瞿合祚. 基于反熵-AHP二次规划组合赋权法的电网节点综合脆弱性评估[J]. 电力自动化设备，2019，39(7)：133-140.
ZHOU Yixi, LI Xiaoming, QU Hezuo. Node Comprehensive Vulnerability Assessment of Power Grid Based on Anti-Entropy-AHP Quadratic Programming Combination Weighting Method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 133-140.

[46] 陈伟清，张学垚，赵文超，等. 基于粗糙集与变异系数法相结合的智慧交通评价体系研究[J]. 数学的实践与认识，2019，49(2)：191-197.
CHEN Weiqing, ZHANG Xueyao, ZHAO Wenchao, et al. A Study on the Intelligent Traffic Evaluation System Based on the Combination of Rough Set and Coefficient of Variation[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49(2): 191-197.

[47] 罗赟骞，夏靖波，陈天平. 网络性能评估中客观权重确定方法比较[J]. 计算机应用，2009，29(10)：2624-2626，2631.
LUO Yunqian, XIA Jingbo, CHEN Tianping. Comparison of Objective Weight Determination Methods in Network Performance Evaluation[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(10): 2624-2626, 2631.

[48] VALENTINAS P, EDMUNDAS KAZIMIERAS Z, ASKOLDAS P. An Extension of the New Objective Weight Assessment Methods CILOS and IDOCRIW to Fuzzy MCDM[J]. Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research, 2020, 54(2): 59-75.

[49] SHI H T，LI Y F，JIANG Z N，et al. Comprehensive Power Quality Evaluation Method of Microgrid with Dynamic Weighting Based on CRITIC[J]. Measurement and Control，2021(54)：1097-1104.

[50] 宋朋飞，亢朋朋，孟铁强，等. 基于CRITIC权重法的风光发电单元灵活性控制方法[EB/OL].(2025-03-06)[2025-09-20]. https：//link. cnki. net/urlid/12. 1420. TM. 20250306. 1532. 007.

[51] 王羿博，韩　峰，刘泽龙. 基于多目标优化算法组合赋权的风沙区铁路线路方案优选研究[EB/OL].(2025-07-01)[2025-09-20].https：//doi. org/10. 13238/j. issn. 1004-2954. 202502010001.

[52] 骆腾燕. 模型-数据混合驱动的综合能源系统运行可靠性评估[D]. 广州：华南理工大学，2022.

[53] LEI Y，YAN X B，YANG S H，et al. Comprehensive Benefit Evaluation Analysis of Multi-Energy Complementary Off-Grid System Operation[J]. Energies，2025，18(9)：2159.

[54] 贾开华，于云霞，范秀波，等. 基于AHP-EWM综合赋权和TOPSIS法的多能互补系统综合评价[J]. 中国电力，2023，56(7)：228-238.
JIA Kaihua，YU Yunxia，FAN Xiubo，et al. Multi-Criteria Comprehensive Evaluation of Multi-Energy Complementary System Based on AHP-EWM and TOPSIS Method[J]. Electric Power，2023，56(7)：228-238.

[55] 樊燕燕，韩诗雨，江　旭，等. 基于组合赋权-欧氏距离的高原铁路运营期安全系统韧性评价[J]. 铁道科学与工程学报，2023，20(9)：3536-3546.
FAN Yanyan，HAN Shiyu，JIANG Xu，et al. Highland Railway Operational Safety System Resilience Evaluation Based on Combined Weighting-Euclid Distance[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2023，20(9)：3536-3546.

[56] 何应超，徐　雷，李厚俊，等. 基于博弈组合赋权和GRA-MARCOS的虚拟电厂储能选型方法[J]. 科学技术与工程，2025，25(18)：7621-7630.
HE Yingchao，XU Lei，LI Houjun，et al. Virtual Power Plant Energy Storage Selection Method Based on Game Combination Weighting and GRA-MARCOS[J]. Science Technology and Engineering，2025，25(18)：7621-7630.

[57] 汤明润，李若旸，程晓钰，等. 基于博弈论-改进云模型的新能源电力系统适应性评估[J]. 电力系统保护与控制，2025，53(7)：40-51.
TANG Mingrun，LI Ruoyang，CHENG Xiaoyu，et al. Adaptability Evaluation of New Energy Power Systems Based on Game Theory and an Improved Cloud Model[J]. Power System Protection and Control，2025，53(7)：40-51.

[58] 南　斌，董树锋，徐成司，等. 基于改进离差最大化方法的电网关键线路综合辨识[J]. 电网技术，2022，46(10)：4076-4084.
NAN Bin，DONG Shufeng，XU Chengsi，et al. Comprehensive Identification of Critical Lines in Power Grid Based on Improved Maximizing Dispersions Method[J]. Power System Technology，2022，46(10)：4076-4084.

[59] 牛东晓，李金超，李金颖. 基于信息熵的电力大用户优先级组合评价[J]. 电力需求侧管理，2008，10(2)：16-20.
NIU Dongxiao，LI Jinchao，LI Jinying. Combination Evaluation of Large Electric Customers' Priority Based on Entropy[J]. Power Demand Side Management，2008，10(2)：16-20.

[60] 蔡　文，张金威，吴祥胜，等. 基于犹豫模糊集-前景理论的火电企业减碳路径综合评价[J]. 水利水电技术(中英文)，2024，55(S2)：604-611.
CAI Wen，ZHANG Jinwei，WU Xiangsheng，et al. Comprehensive Evaluation of Carbon Emission Reduction Technologies for Thermal Power Generation Enterprises Based on Hesitant Huzzy Set-Prospect Theory[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2024，55(S2)：604-611.

[61] 王思萌. 基于模糊DEMATEL：熵值法与证据理论的海上风电项目风险评价研究[D]. 青岛：青岛理工大学，2025.

[62] 杨妍璨. 配电网改造方案多属性决策研究[D]. 长沙：中南林业科技大学，2019.

[63] 宋天奇，叶祚鸿，姚自林. 基于加权DEA模型的电网企业技术改造投资优选策略[J]. 微型电脑应用，2021，37(2)：161-162，172.
SONG Tianqi，YE Zuohong，YAO Zilin. Research on Optimization Strategy of Power Grid Enterprise Technical Transformation Project Based on DEA Model[J]. Microcomputer Applications，2021，37(2)：161-162，172.

[64] 姜　军，潘　光，宋保维，等. 复杂系统多属性决策方法[J]. 火力与指挥控制，2012，37(2)：102-104.
JIANG Jun，PAN Guang，SONG Baowei，et al. Study on Multi-Attribute Decision Making for Complex System[J]. Fire

Control & Command Control，2012，37(2)：102-104.

[65] 陈　津. 地铁车辆方案比选与中小运量城轨制式选型决策研究[D]. 北京：北京交通大学，2022.

[66] 李梓嘉，周　佳，彭方旭. 基于熵权TOPSIS法的抽水蓄能电站与光伏配套开发综合评价[J]. 水电能源科学，2025，43(3)：205-209，195.
LI Zijia，ZHOU Jia，PENG Fangxu. Comprehensive Evaluation of Integrated Development of Pumped Storage Power Stations and Photovoltaic Systems Based on Entropy Weight TOPSIS Method[J]. Water Resources and Power，2025，43(3)：205-209，195.

[67] 张小丽，姜力荣，马　睿，等. 基于可变毕达哥拉斯模糊和VIKOR耦合方法的水资源系统韧性评价[EB/OL].(2025-08-15)[2025-09-20].https：//link. cnki. net/urlid/32. 1356. TV. 20250815. 1223. 006.

[68] BARRAK E，RODRIGUES C，ANTUNES C H，et al. Applying Multi-Criteria Decision Analysis to Combine Life Cycle Assessment with Circularity Indicators[J]. Journal of Cleaner Production，2024，451：141872.

[69] 李　曈. 并网型微电网项目的综合评价研究[D]. 北京：华北电力大学，2020.

[70] 计　蓉，侯慧娟，盛戈皞，等. 基于组合赋权法和模糊综合评价的电力设备状态数据质量评估[J]. 高电压技术，2024，50(1)：274-281.
JI Rong，HOU Huijuan，SHENG Gehao，et al. Data Quality Assessment for Power Equipment Condition Based on Combination Weighing Method and Fuzzy Synthetic Evaluation[J]. High Voltage Engineering，2024，50(1)：274-281.

[71] 谢小军，马　虹，薛申芳，等. 基于区间直觉模糊的多属性决策模型以及在投资项目评估中应用研究[J]. 数学的实践与认识，2025，55(1)：15-25.
XIE Xiaojun，MA Hong，XUE Shenfang，et al. Research on Multi-Attribute Decision-Making Model Based on Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy and Its Application in Investment Project Evaluation[J]. Mathematics in Practice and Theory，2025，55(1)：15-25.

[72] 赖阳雨. 基于熵值法和灰色关联分析法的九江乡镇配电网建设成效分析[D]. 南昌：南昌大学，2022.

[73] 赵乐冰，王　蕾，万　灿，等. 基于数据包络分析法的城市综合能源系统分环节能效评价[J]. 电力系统自动化，2022，46(17)：132-141.
ZHAO Lebing，WANG Lei，WAN Can，et al. Segmented Energy Efficiency Evaluation of Urban Integrated Energy System Based on Data Envelopment Analysis Method[J]. Automation of Electric Power Systems，2022，46(17)：132-141.

[74] 任宇路，程昱舒，吕相沅，等. 运营商区域管理低碳综合评价指标体系和方法研究[J]. 电测与仪表，2026，63(1)：24-33.
REN Yulu，CHENG Yushu，LYU Xiangyuan，et al. Research on Low-Carbon Comprehensive Evaluation Index System and Method for the Operator Regions Management[J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2026，63(1)：24-33.

[75] 马丽叶，张　涛，卢志刚，等. 基于变权可拓云模型的区域综合能源系统综合评价[J]. 电工技术学报，2022，37(11)：2789-2799.
MA Liye，ZHANG Tao，LU Zhigang，et al. Comprehensive Evaluation of Regional Integrated Energy System Based on Variable Weight Extension Cloud Model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2022，37(11)：2789-2799.

(责任编辑　金　晶)