

多负荷场景的城轨柔性牵引供电系统节能优化方法

高明^{1,2}, 张钢^{1,3}, 卫巍¹, 王韧宇¹, 陶柏安¹, 熊伟¹

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 北京市地铁运营有限公司供电分公司, 北京 100044;

3. 北京市轨道交通电气工程技术研究中心, 北京 100044)

摘要: 城轨系统运行工况多变, 负荷波动剧烈, 基于静态场景的节能方法难以适配动态负荷需求, 针对此问题, 需准确划分负荷场景, 研究柔性系统节能优化方法, 实现“场景-策略”动态匹配, 提升节能效果。为此, 提出一种考虑多负荷场景的城轨柔性牵引供电系统节能优化方法。首先, 设计基于 t -SNE 的 k -Medoids 负荷聚类方法, 采取降维后聚类的策略, 更精准地反映系统负荷与运行时段及季节间的关联。其次, 构建柔性牵引供电系统节能优化模型, 基于智能优化算法, 以最小化系统总进线能量为目标, 对牵引变电所的虚拟电阻进行调节。最后, 对所提方法进行仿真验证, 结果表明, 所设计的负荷聚类方法有效挖掘负荷的内在特性, 揭示系统负荷与运行时段及季节间的关联, 明确系统运行的 6 种具体场景。该节能优化方法在各运行场景下皆能实现良好的节能效果, 最高节能率可达 4.07%。本文建立的“场景聚类-策略生成-节能调控”的节能优化框架, 以期为城市轨道交通节能运行提供重要的技术支持。

关键词: 城市轨道交通; 柔性牵引供电; 负荷聚类; 节能优化

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)02-0120-09

Energy-Saving Optimization Method for Urban Rail Transit Flexible Traction Power Supply Systems Considering Multiple Load Scenarios

GAO Ming^{1,2}, ZHANG Gang^{1,3}, WEI Wei¹, WANG Renyu¹, TAO Baian¹, XIONG Wei¹

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044; 2. Power Supply Branch of Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing 100044; 3. Beijing Electrical Engineering Technology Research Center, Beijing 100044)

Abstract: Because the operating conditions of urban rail transit systems are highly variable and load fluctuations are severe, traditional energy-saving methods based on static scenarios struggle to accommodate dynamic load demands effectively. Therefore, load scenarios must be accurately identified, and an energy-saving optimization method for flexible traction power supply systems is needed to achieve dynamic “scenario-strategy” matching and improve energy-saving performance. Accordingly, an energy-saving optimization approach for urban rail transit flexible traction power supply systems considering multiple load scenarios is proposed. First, a k -Medoids load clustering method based on t -SNE is designed. A strategy of clustering after dimensionality reduction is adopted to more accurately reflect the correlations between system load and operating periods and seasons. Second, an energy-saving optimization model for the flexible traction power supply system is constructed. Based on an intelligent optimization algorithm, the virtual resistance of traction substations is adjusted to minimize the total incoming energy of the system. Through simulation validation, the effectiveness of the proposed method is verified. The proposed load clustering method effectively

收稿日期: 2025-08-19 修回日期: 2025-10-30

第一作者: 高明, 男, 学士, 高级工程师, 从事城市轨道交通牵引供电研究, 13810935120@139.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4301800); 北京市自然科学基金-丰台创新联合基金项目(L231027)

引用格式: 高明, 张钢, 卫巍, 等. 多负荷场景的城轨柔性牵引供电系统节能优化方法[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(2): 120-128.

Gao Ming, Zhang Gang, Wei Wei, et al. Energy-saving optimization method for urban rail transit flexible traction power supply systems considering multiple load scenarios[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(2): 120-128.

extracts the inherent characteristics of the load, reveals the correlation between system load and operating periods and seasons, and identifies six specific operating scenarios. The proposed energy-saving optimization method achieves good energy-saving performance in various operating scenarios, with a maximum energy-saving rate of 4.07%.

The energy-saving optimization method for urban rail flexible traction power supply system based on load clustering has connected the complete chain of “scene recognition-strategy matching-dynamic adjustment”, which can provide important technical support for energy-saving operation of urban rail transit.

Keywords: urban rail transit; flexible traction power supply; load clustering; energy-saving optimization

城市轨道交通作为低碳出行的核心载体,近年来发展迅速^[1]。随着线网规模和客流规模的逐年扩增,以及绿色双碳政策的推进,城轨能耗已成为行业焦点。在城轨系统中,牵引能耗占比高达40%~60%,因此,面向节能减排的牵引供电系统技术升级成为重要的发展趋势^[2]。

传统牵引供电系统采用不控整流器,为列车提供能量的传输通道^[3]。然而,由于二极管的单向导通性,列车制动产生的能量难以被充分消纳。再生制动能量在直流侧的累积会使得网压大幅升高,对供电系统产生安全威胁。因此,传统牵引供电系统中的列车通常配备车载制动电阻,以消耗过多的再生制动能量^[4]。然而,车载制动电阻的存在仅解决了网压升高,却带来了整车质量的增加与散热负担。

随着大功率电力电子器件的发展,新一代柔性牵引供电系统引入电力电子变流装置,为上述问题提供了变革性的解决路径。柔性牵引供电系统摒弃了传统的二极管整流器,采用全控型电压源型变流器(voltage source converter, VSC)作为能量传递媒介^[5]。由于四象限变流技术与脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)控制技术的采用,柔性牵引供电系统能够实现正向供能与反向馈能的全面可控^[6]。因此,柔性牵引供电系统节能优化控制成为当前的研究重点。

在柔性牵引供电系统中,其节能潜力的释放仍高度依赖对负荷特性的精准解析与场景化调控策略的生成。随着线网规模扩大与发车密度提升,牵引负荷呈现显著时空异质性。但当前主流节能技术多基于静态场景设计,难以适配动态负荷需求。这种固定策略应对多场景的节能优化模式,由于忽视了负荷曲线的时空关联性,未实现“场景-策略”的动态匹配,节能优化策略常与实际运行需求失配,造成节能效果折损。因此,如何从海量负荷数据中提取典型场景特征,并据此设计动态优化方法,成为制约柔性牵引供电系统节能优化方案有效应用的核心瓶颈。

针对上述问题,本文设计一种考虑多负荷场景的柔性牵引供电系统节能优化方法,构建了数据驱动的

负荷聚类模型,并基于此设计场景自适应的节能优化方法。建立的“场景聚类-策略生成-节能调控”的节能优化框架,可为城市轨道交通经济运行提供完整且有效的决策支撑。

1 考虑多负荷场景的系统节能优化策略

城轨负荷包括牵引负荷与动力照明负荷。动力照明负荷虽会受到外界环境影响,但相对稳定。而牵引负荷存在强波动性,在时间与空间维度下皆存在不平衡的分布特征。对于不同的负荷,需要准确划分场景类型。基于人工经验的划分方式不够准确,难以满足不同场景驱动下的系统运行决策需求。

当前,随着电力测量技术的进步与广泛应用,数据获取日益便捷。借助先进的数据挖掘技术,对庞大的电力数据集进行深入分析,能够揭示电力负荷的重要特征。通过数据驱动的负荷聚类方法,能够更加精准地把握系统运行规律,为优化决策、提升能效管理提供坚实的理论与数据支撑。

同时,为实现柔性牵引供电系统节能潜力的深度挖掘,必须将场景识别与节能优化进行深度融合,形成一套完整的数据驱动、场景自适应的节能优化体系。为此,提出一种考虑多负荷场景的系统节能优化策略,其总体框架如图1所示。

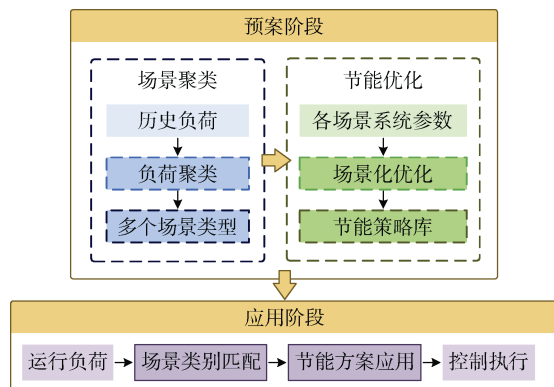


图1 考虑多负荷场景的系统节能优化框架

Figure 1 Overall framework of the energy-saving optimization strategy based on load clustering considering multiple load scenarios

预案阶段是本文的核心,也是策略库的构建过程,旨在为各类典型运行场景预先计算出最优的节能控制策略,由场景聚类 and 节能优化两部分组成。

首先,系统采集并输入海量的历史负荷数据,对负荷特征进行降维与聚类分析。此过程能够从复杂数据中自动、精准地识别出具有显著统计学特征和物理意义的典型运行场景,从而消除传统人工划分方式的主观性与不精确性。

其次,针对聚类得到的每一个典型场景,输入该场景对应的系统参数,以最小化系统总进线能量为目标,利用智能优化算法进行求解。以此建立一个完备的场景-策略映射库,为每个场景生成在不同实时系统状态下,各牵引变电所应采用的最优虚拟电阻值,从而实现秒级、空间差异化的自适应控制。

应用阶段是策略的实时执行过程,保证了系统在动态变化环境中的快速、精准响应。系统在线运行时,首先基于当前的运行负荷数据,识别出当前系统所处的运行场景类型。其次从场景-策略映射库中调用与该场景对应的、预先优化好的控制策略。动态输出每一时刻各牵引变电所应采用的最优虚拟电阻值,并下达至底层控制器执行,最终实现潮流的精准、节能调控。

考虑多负荷场景的系统节能优化框架具体有以下两方面优势:①场景针对性匹配的准确性。通过数据驱动的负荷聚类,确保了运行场景划分的科学性与准确性。在此基础上,为每个场景单独制定优化策略,解决了传统静态或单一策略的弊端,实现了节能优化与场景特性的高度契合。②先预案后应用的高效性。将计算密集型的优化求解过程置于离线预案阶段完成,解决了复杂优化算法在线计算耗时过长、难以满足实时控制要求的工程难题。在线阶段仅需进行轻量级的场景匹配和策略映射,保证了系统响应的快速性和工程应用的可行性。

2 城轨负荷聚类方法

2.1 t-SNE 算法

在原始数据中,存在很多噪声与干扰,这些冗余信息不仅会增加计算的复杂度,还可能掩盖数据中的真实结构和模式。因此,在进行聚类分析之前,需对样本数据进行降维处理,剔除冗余信息,优化分析效率。此外,降维有助于提升聚类结果的性能。一方面,在高维空间中,数据点之间的距离度量可能变得复杂且不准确,影响聚类算法效果。降维可以将数据映射到低维空间,数据点之间的距离度量更加直观和准确,

从而有助于聚类算法更好地识别数据中的群组结构和模式。另一方面,在高维空间中,聚类算法可能受到数据稀疏性、噪声和异常值等因素的影响,导致聚类结果不稳定或不可靠。通过降维,可以减少这些因素的影响,增强聚类算法的鲁棒性和稳定性。

t 分布随机邻域嵌入^[7](t -distributed stochastic neighbor embedding, t -SNE)作为一种高效的降维算法,相较于传统的主成分分析法,更适合处理非线性关系的数据。其核心思想是基于数据点间的相似性,将数据从高维空间映射至低维空间,同时尽可能保持数据位置关系的一致性。

在原始的高维空间中,初始数据服从高斯分布,因此,可根据每条数据的高斯分布参数计算各点之间的相似度。不同数据样本点 x_i 与 x_j 之间的相似度可由条件概率 p_{ji} 表示:

$$p_{ji} = \frac{\exp\left(-\|x_i - x_j\|^2 / 2\sigma_i^2\right)}{\sum_{k \neq i} \exp\left(-\|x_i - x_k\|^2 / 2\sigma_i^2\right)} \quad (1)$$

式中, σ_i 是以 x_i 为中心的高斯分布的方差,对于不同的 x_i 有不同的 σ_i 。

由于衡量相似度时两个数据点之间的对称性,需要构造一个对称的相似矩阵,因此,将高维空间中的联合概率分布 p_{ij} 定义为 p_{ji} 和 p_{ij} 的均值。

将数据从高维空间映射至低维空间时,数据间的位置关系会发生改变,在低维空间中会出现数据拥挤情况。因此,低维空间中的相似度 q_{ji} 通过柯西分布,即自由度为 1 的 t 分布进行计算:

$$q_{ji} = \frac{\left(1 + \|x_i - x_j\|^2\right)^{-1}}{\sum_{k \neq i} \left(1 + \|x_i - x_k\|^2\right)^{-1}} \quad (2)$$

为维持高维空间与低维空间中数据之间的相对位置关系,需使高维空间与低维空间的概率分布矩阵 $\mathbf{P}$ 与 $\mathbf{Q}$ 尽可能一致。Kullback-Leibler(KL)散度可以用来衡量两个概率分布之间的相似度,KL 散度越小,两个分布之间越相似^[9]。 $\mathbf{P}$ 与 $\mathbf{Q}$ 间的 KL 散度为:

$$\text{KL}(\mathbf{P} \parallel \mathbf{Q}) = \sum_i \sum_j p_{ij} \log_2(p_{ij} / q_{ij}) \quad (3)$$

在求解降维结果的过程中,使用如式(4)中所示的梯度下降方法,逐步更新低维空间中的数据位置。

$$\frac{\partial \text{KL}(\mathbf{P} \parallel \mathbf{Q})}{\partial x_i} = 4 \sum_j \left(p_{ij} - q_{ij}\right) \left(x_i - x_j\right) \quad (4)$$

式中, q_{ij} 为低维空间中的联合概率分布。

t -SNE 算法能够将高维数据有效降维至二维或三维空间, 并在相应的坐标区域内清晰展示。通过这一过程, 能够提取出样本数据的核心特征信息, 进而在此基础上开展聚类分析。这种先降维后聚类的策略, 对于城市轨道交通电力负荷数据的深入分析尤为重要, 能够更为精准地体现系统负荷与运行时段及季节间的关联。

2.2 基于 t -SNE 的 k -Medoids 负荷聚类方法

k -Medoids 也称围绕中心点划分(partitioning around medoids, PAM)算法, 是 k -Means 算法的一种变体, 改善了传统 k -Means 聚类方法中对于异常数据的可容忍度, 其在稳定性上有大幅提升^[8]。

在 k -Means 中, 通过逐步寻找各簇间均值进行数据集的划分。然而, 该算法难以应对噪声数据的干扰。而在 k -Medoids 方法中, 搜寻到均值后, 以距离该均值最近的样本点作为质心, 这种方式可降低算法对噪声点和孤立点的敏感度。利用 k -Medoids 方法进行聚类时, 需进行迭代计算, 通过最小化簇内其余样本与质心间的绝对误差, 对质心进行逐步更新, 实现最终的聚类。

城轨负荷的现场采集数据中常有异常值或噪声值。 k -Medoids 算法对异常值不敏感, 能稳定处理负荷数据, 有效实现聚类。因此, 结合 t -SNE 与 k -Medoids, 充分发挥二者优势, 首先对电力负荷数据进行降维, 可进一步提升聚类效果。具体计算流程如图 2 所示。

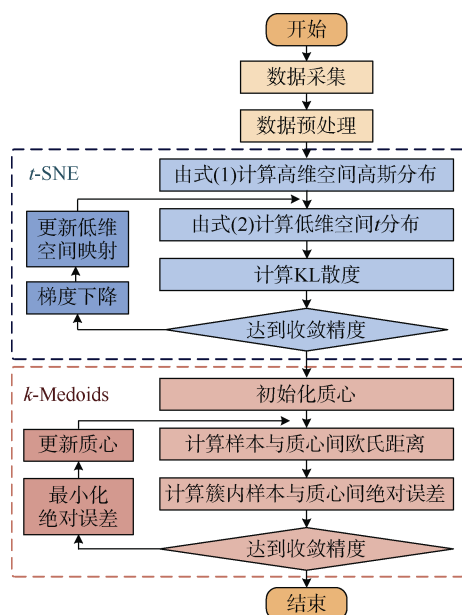


图 2 基于 t -SNE 的 k -Medoids 聚类流程

Figure 2 k -Medoids clustering procedure based on t -SNE

3 柔性牵引供电系统节能优化方法

3.1 柔性牵引供电系统节能优化模型

系统的总耗能是负荷功率的累积, 因此, 可以通过优化系统各时刻功率, 实现全系统节能。传统牵引供电系统由于采用不可控的二极管整流装置, 难以实现功率分布的调控。而在柔性牵引供电系统中, 由于采用了全控型 VSC 器件, 通过其直流外特性的调节, 能够实现功率分布的调控。柔性牵引供电系统中, 功率组成满足

$$P_T + P_S - P_B = P_{in} - P_{waste} \quad (5)$$

式中, P_T 为列车牵引所需功率; P_S 为站所内动照负荷所需功率; P_B 为列车再生制动过程产生的功率; P_{in} 为系统总输入功率; P_{waste} 为总损失功率。

在系统运行过程中, 各时刻的负荷需求已定, 因此, 当不调整负荷的运行过程时, 系统总输入功率仅与总损失功率有关。

在柔性牵引供电系统中, VSC 采用如图 3 所示的 $U-I$ 下垂控制^[10]。 AB 段为线性整流区, AC 段为线性逆变区, 当 VSC 功率达到设备容量上限时, 则进入恒定功率区。传统控制保持 BC 段的斜率不变, 而斜率的增大或减小都会使得 B 点和 C 点位置沿着恒功率曲线移动。该下垂外特性可视为构造了一个虚拟电阻, 下垂斜率即为该虚拟电阻的阻值。通过虚拟电阻值的调节, 能够改变牵引变电所节点的直流电压范围与其工作点, 实现潮流的灵活调控。

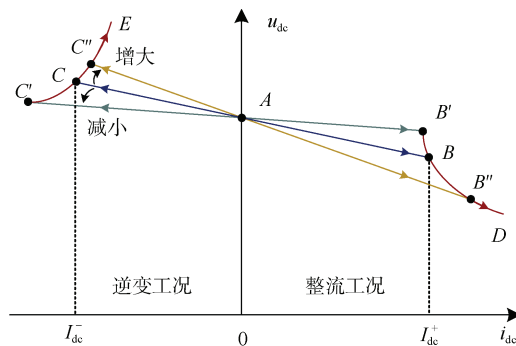


图 3 VSC 外特性曲线

Figure 3 Characteristic curve of the VSC

若列车制动产生的再生功率能够完全由附近牵引列车和站内动照消耗, 则既不会产生返送回电网的功率损失, 也最小化网络流动中的功率损失。然而, 在实际列车运行中, 难以保证列车位置的分布情况, 当牵引与制动列车相距较远, 或小区域内存在多辆同时

处于制动工况的列车,再生制动功率难以被消纳。通过下垂控制,人为改变列车间的功率流动,最大化列车间的功率利用,同时避免过高的网损,可达到降低系统功率损失、最小化系统进线功率的目的。

因此,系统能量优化的目标与优化变量可表示为

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^K P_{in_i} \\ \mathbf{x} = \mathbf{R}_d = [R_{d1}, R_{d2}, R_{d3}, \dots, R_{dj}, \dots, R_{d11}] \end{cases} \quad (6)$$

式中, K 为主变电所总数; P_{in_i} 为第 i 个主变电所进线功率; $\mathbf{x}$ 为优化变量; R_{dj} 为第 j 个牵引变电所的虚拟阻抗值; $\mathbf{R}_d$ 为所有牵引所虚拟阻抗集合。

在优化过程中,约束条件为系统直流侧功率平衡、交流侧功率平衡以及相应的系统安全限制。

3.2 基于 GWO 的系统节能优化方法

实现电力系统最优潮流的传统手段常聚焦于线性规划等数学方法,利用变量的导数信息来探寻最优解。尽管这些数学方法拥有坚实的数学理论基础和严谨的推导过程,但它们在应用中却常常受限于对初始值的高度敏感性,导致算法易于收敛至局部最优解而非全局最优,从而影响求解质量。此外,面对多样化的电力系统场景,传统的数学方法通常需要针对每个特定场景重新进行公式推导与模型构建,这一过程不仅繁琐复杂,而且灵活性低、泛化能力弱。相比之下,智能优化算法展现出了独特的优势。这类算法不依赖于初始值的选择,在解空间内进行全面的搜索,因此更有可能发现全局最优解。此外,智能优化算法具备高度的灵活性与适应性,能够轻松应对包含不同类型优化变量在内的复杂问题,无需针对每个新场景进行繁琐的公式调整或模型重构。

因此,智能优化算法在电力系统最优潮流求解中的应用,不仅有望克服传统数学方法易于陷入局部最优解的局限性,还显著提升了方法在面对多样化电力系统场景时的灵活性与适用性。灰狼(grey wolf optimizer, GWO)算法是一种启发式算法,通过模拟自然界中灰狼的捕猎过程,实现最优解的搜寻^[11]。故本文基于 GWO 算法,进行柔性牵引供电系统的能量优化。

在 GWO 中,依据狼群中个体的不同层级,将群体划分为 α 、 β 、 δ 、 ω 四种角色。其中 α 是群体中的领导者,作为权重最大的个体,引导群体移动; β 狼次之,负责在局部区域搜索更优的解; δ 狼次于 β 狼,为搜索过程提供多样性,避免陷入局部最优;其余个体则属于 ω 群,根据个体经验以及更高层级个体的领导,

逐步向最优解靠近。其位置更新方式为:

$$\begin{cases} \mathbf{D} = |\mathbf{C} \cdot \mathbf{X}_p(t) - \mathbf{X}(t)| \\ \mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}_p(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{D}$ 为更新后的个体位置向量, $\mathbf{X}_p$ 为目标位置, $\mathbf{X}$ 为灰狼位置, $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{C}$ 皆为系数向量,当 $|\mathbf{A}| > 1$ 时,搜索范围扩大, $|\mathbf{A}| < 1$ 时,搜索范围减小。

灰狼算法利用多个个体引领,且在搜索过程中,三类领导者的引导性存在随机性的变化,能够更好地跳出局部最优。因此,本文基于 GWO 算法,实现系统的节能优化,具体流程如下:

1) 初始化种群与寻优参数,并对种群个体进行归一化处理。获得随机生成的 20 组个体,每组含 11 个值,分别对应 11 个牵引变电所的虚拟阻抗。

2) 计算种群中个体的适应度,即各组虚拟阻抗组合下系统的总进线能耗。并对适应度值进行排序,划分 α 、 β 、 δ 、 ω 。 α 即为当前种群中最佳各所虚拟阻抗集合。

3) 判断种群个体的适应度值是否达到收敛条件,若已达到,则输出最优的个体位置,即满足要求的各所虚拟阻抗集合。若未达到,按式(7)进行个体的更新。

4 算例分析

为验证所设计的负荷聚类与节能优化方法的有效性,基于 Matlab 进行仿真验证。对实测负荷数据进行聚类,并划分多种运行场景,对不同场景下的技能优化效果进行有效性验证。

4.1 负荷聚类分析

在电力监控与数据采集系统(power supply control and monitoring automation system, PSCADA)中采集某站的牵引变电所与降压变电所实测的负荷数据,并进行离群值去除、缺失值填补、数据规范化等预处理操作。

针对牵引负荷的聚类结果,采用 DBI 作为评价指标,计算公式如(8)所示, DBI 值越小,表示聚类效果越佳。当聚类个数 k 分别为 2~6 时,牵引负荷聚类效果(DBI)值分别为 0.499、0.711、0.726、0.789、0.762。当牵引负荷聚类个数设为 2 时, DBI 值达到最小,聚类效果最佳,因此牵引负荷可分为两类。

$$DBI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \max_{j \neq i} \left(\frac{|\bar{S}_i + \bar{S}_j|}{|\omega_i - \omega_j|_2} \right) \quad (8)$$

式中, N 表示聚类的个数; $\bar{S}_i$ 表示第 i 类中所有样本点到该聚类中心的平均距离,用于衡量类内的紧密程

度： $|\omega_i - \omega_j|_2$ 表示第*i*类和第*j*类的聚类中心之间的欧式距离，用于衡量类间的分离程度。

图 4(a)展示了 *k* 为 2 时的聚类结果及负荷情况。根据图 4(b)的负荷曲线特征，可按工作日与休息日对牵引负荷进行类别划分。工作日牵引负荷呈现出明显的早晚高峰特征。休息日，由于乘客出行减少，牵引负荷无明显的早晚高峰。综上所述，牵引负荷可按日类型与运行时段进行分类：第一类对应于工作日的高峰时段；第二类则为休息日全天与工作日的低谷时段。

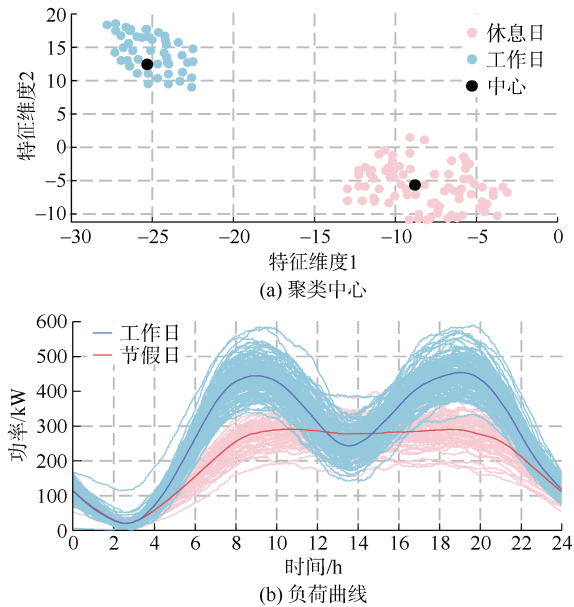


图 4 牵引负荷聚类结果
Figure 4 Clustering results of traction load

动照负荷在不同聚类个数 *k* 为 2~5 时，DBI 值分别为 0.559、0.512、0.607、0.660。当动照负荷聚类个数设为 3 时，DBI 值达到最小，聚类效果最佳，因此确定聚类个数 *k* 为 3。

图 5(a)展示了 *k* 为 3 时的，聚类结果及负荷情况。根据图 5(b)的负荷曲线特征，动照负荷可分为 3 类：春秋季、夏季和冬季。

基于牵引负荷与动照负荷的聚类结果，牵引供电系统的运行场景可组合为 6 类，如表 1 所示，分别对应三类季节下的两大牵引负荷特性。

4.2 节能优化效果分析

基于某实际线路进行节能优化方法的仿真验证，以实际线路条件与运营组织为输入，根据不同运行时段与季节与以上 6 种运行场景进行动态匹配，以实现不同场景下针对性的节能优化。

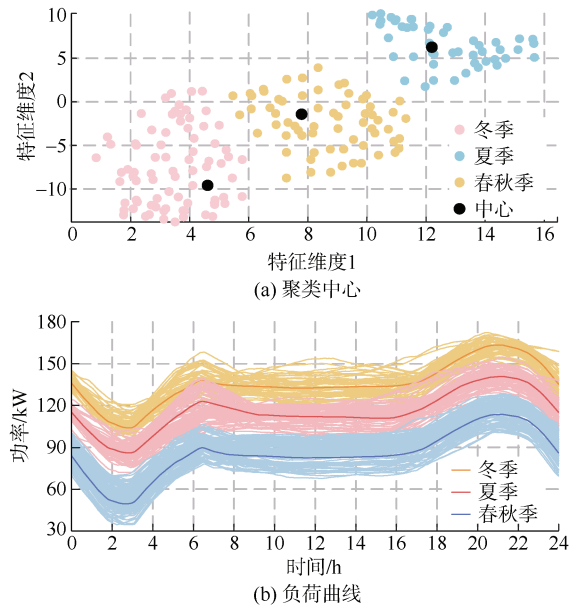


图 5 动照负荷聚类结果
Figure 5 Clustering results of station load

表 1 牵引供电系统 6 种典型运行场景
Table 1 Six typical operating scenarios in the traction power supply system

场景	时段		场景参数		
			载荷	发车间隔/s	负荷率/%
1	冬	高峰	AW2	120	10
2		低谷	AW1	240	8
3	夏	高峰	AW2	120	9
4		低谷	AW1	240	7
5	春/秋	高峰	AW2	120	7
6		低谷	AW1	240	6

为全面评估所提方法的性能，对比了 3 种控制策略下的系统总牵引能耗：

- 1) 恒压控制：作为基础基准，所有牵引变电所工作在恒定直流电压模式。
- 2) 固定下垂控制(优化前)：所有牵引所采用一个统一的、固定的下垂系数(虚拟电阻设置为 0.05 Ω)。
- 3) 自适应下垂控制(优化后)：采用本文所提方法，各牵引变电所的虚拟电阻值不仅在空间上各不相同，并且能够根据系统实时的负荷状态进行秒级的动态调整。

各主变电所优化前后的进线能量如图 6 所示。表 2 所示为 6 种场景下具体能耗数据与节能效果对比，相较于优化前，在所有场景下的节能率皆不低于 2.50%，最高可达 4.07%。

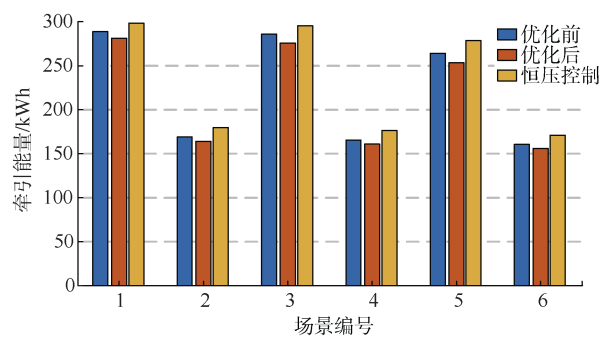


图 6 优化前后系统总牵引能量

Figure 6 Total traction energy before and after optimization

表 2 各场景下节能优化效果

Table 2 Energy saving optimization effects in various scenarios

场景	优化前/kWh	优化后/kWh	节能率/%
1	288.803	281.218	2.626
2	169.077	164.218	2.874
3	285.943	275.818	3.541
4	165.696	160.927	2.937
5	264.189	253.417	4.077
6	160.623	155.995	3.046

在恒定发车间隔下，随着动照负荷率的递减，系统能耗下降速率逐渐增大。因此，在低动照负荷率下，系统能量优化潜力更大。具体而言，当动照负荷率较高时，交流系统内的能量吸收能力相对更强。此时，再生制动能量能够直接由牵引变电所反馈吸收，虚拟电阻调节产生的节点间的能量流动对能量优化无法产生较大影响。反之，当动照负荷率较低时，再生制动能量无法在站内消纳利用，只能通过直流系统中的流动进行消耗，此时自适应虚拟电阻的调节作用尤为显著。原本需由牵引变电所反馈至交流系统的能量，能够在增大直流系统中能量流动灵活性的情况下，传输至更远处正在牵引的列车，用于其牵引供能，达到更为高效的能量吸收效果。

4.3 优化变量影响分析

本节选择场景 6 作为案例，选择 3 种列车空间分

布情况进行分析，分别对应近距离、中距离、远距离 3 种情况。3 种情况下各牵引所的虚拟电阻优化结果如表 3 所示。由于虚拟电阻的调控不仅会带来能量流动的变化，还会对各牵引所的工作点网压带来影响，虚拟电阻的调节必须确保全线电压处于安全范围内，在 1 500 V 系统中，安全网压为 1 000~1 800 V^[12]。因此，本节将对优化后虚拟电阻值变化对能量流动及网压的影响进行分析。

近距离情况下，制动列车生成的能量可由本区间或相邻区间中的牵引列车吸收，如图 7(a)所示。由于线上运行列车较多，为突出展示效果，仅展示运行功率绝对值大于 1 MW 的列车。从图中可以看出，此时列车 1 和列车 3 处于同一区间，列车 2 和列车 4 处于同一区间，且节点间存在明显压差，牵引列车和制动列车可实现能力的就近消纳。从表 3 中可以看出，此时各所虚拟电阻值较小，基本接近恒压控制。这是

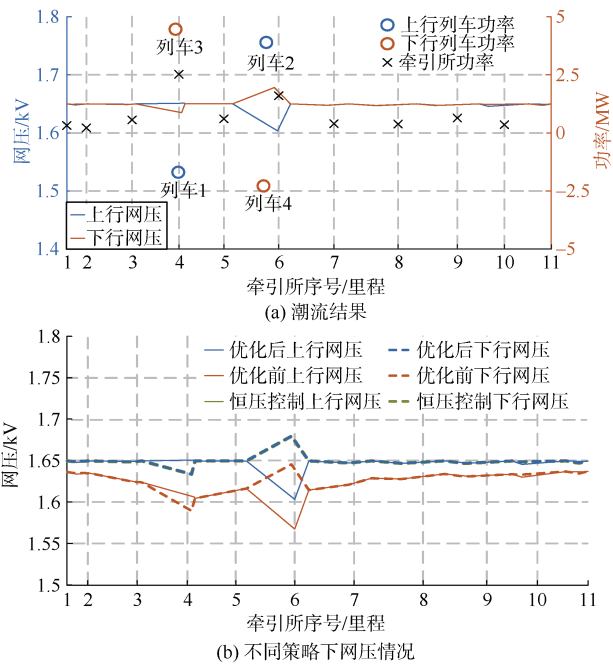


图 7 近距离情况下的优化结果

Figure 7 Optimization results under close distance conditions

表 3 虚拟电阻结果对比

Table 3 Comparison of virtual resistance results

Ω

距离	各牵引变电所虚拟电阻值										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
近	0.000 3	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 4	0.000 1	0.000 5
中	0.07	0.04	0.19	0.17	0.12	0.17	0.20	0.13	0.02	0.08	0.19
远	0.20	0.20	0.20	0.13	0.15	0.20	0.03	0.20	0.20	0.20	0.04

因为此时无需通过虚拟电阻对节点网压进行调节,列车自身功率变化带来的网压波动即可满足节点间的能量流动。这一时刻下采取不同控制策略产生的全线网压如图 7(b)所示,从图中也能够看出,采用优化后虚拟阻值的网压与恒压控制下的网压曲线重合。

中距离情况下,列车间的能量需跨越 2~3 个供电区间进行传输,如图 8(a)所示。从图中可以看出,此时列车 3 的能量须跨区域传输至列车 1 和列车 2 进行消纳吸收。从表 5 中可以看出,列车 1 与列车 3 之间各所的虚拟电阻值较大,而两端较低。这也反映了增大虚拟电阻能够提升功率流动。此时不同控制策略下的网压情况如图 8(b)所示,能够看出,经优化后,节点间压差增大,更有利于能量流动,但网压仍能维持在安全范围内。

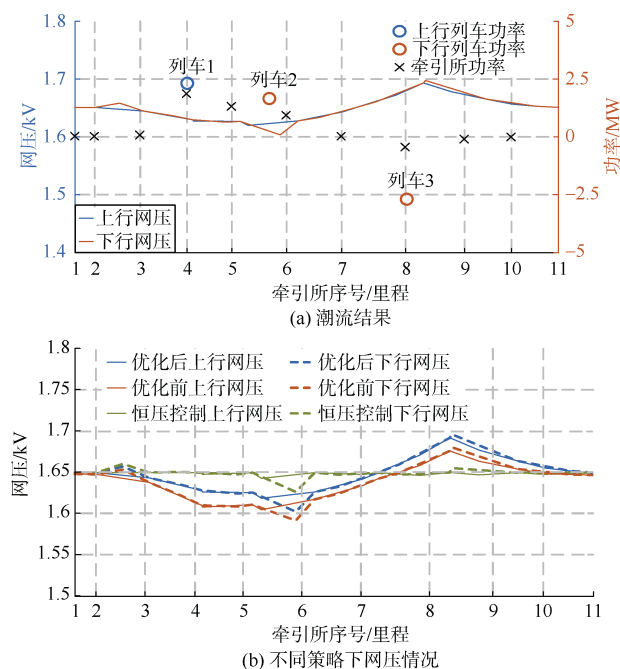


图 8 中距离情况下的优化结果
Figure 8 Optimization results under medium distance conditions

远距离情况下,列车之间需跨越多个供电区间实现功率消纳,如图 9(a)所示。此时列车 1 与列车 2 相距较远,仅依靠列车自身功率带来的网压差不足以产生能量的流动。因此,从表 5 中可以看出,此时全线多个站所都增大了虚拟电阻值,以提升列车之间的能量传输。此时的各控制策略下的网压情况如图 9(b)所示,与中距离情况类似,采用优化后策略的节点电压仍处于安全范围内,但压差更大,能量流动更加便利。

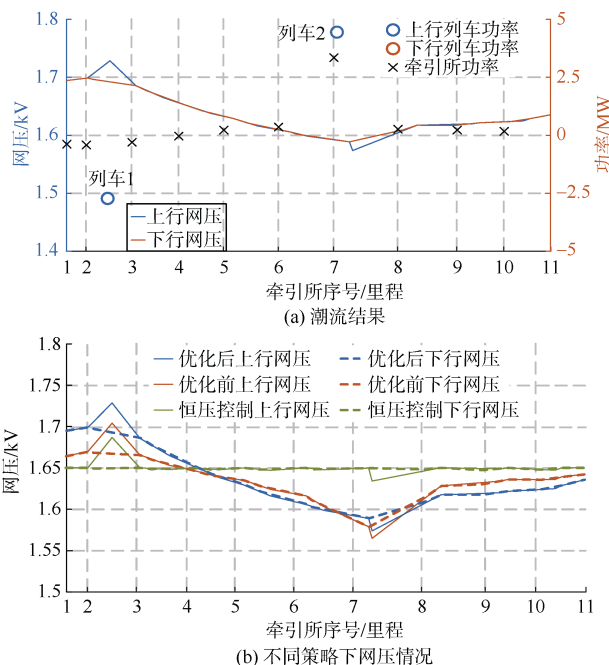


图 9 远距离情况下的优化结果
Figure 9 Optimization results under long distance conditions

5 结论

在城市轨道绿色经济的发展需求下,基于柔性牵引供电系统的节能优化成为研究重点。然而,当前研究多基于静态场景开展,难以适配城轨系统中的动态负荷场景需求。因此,本文提出了一种考虑多负荷场景的城轨柔性牵引供电系统节能优化方法。

1) 将 t -SNE 降维方法与 k -Medoids 聚类算法结合,实现了城轨负荷特性的聚类,揭示了系统负荷与运行时段及季节间的关联。

2) 构建了柔性牵引供电系统节能优化模型,基于智能优化算法,对牵引变电所的虚拟电阻进行调节,以实现系统总进线能量的最小化。

本文所提出的考虑多负荷场景的柔性牵引供电系统节能优化方法,建立了“场景聚类-策略生成-节能调控”的节能优化框架,在 6 种具体的负荷场景下皆能实现适配性节能优化,最高节能率可达 4.07%。该方法可为城市轨道交通节能运行提供重要的技术支持,具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2024 年度统计和分析报告[R]. 北京, 2025.

- CHINA Association of Metros. Statistical and analysis report on urban rail transit in 2024[R]. Beijing, 2025.
- [2] 李舟, 夏学杰, 郑晓彬, 等. 多技术协同驱动下的北京市轨道交通节能减碳策略研究[J]. 节能与环保, 2025(7): 3-9.
- Li Zhou, Xia Xuejie, Zheng Xiaobin, et al. Study on energy saving and carbon reduction strategies of Beijing rail transit driven by multi-technology synergy[J]. Energy conservation & environmental protection, 2025(7): 3-9.
- [3] 刘安邦, 陈曦, 赵千川, 等. 地铁线路储能装置与牵引装置联合优化配置方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(9): 1408-1414.
- Liu Anbang, Chen Xi, Zhao Qianchuan, et al. Optimization method for allocations of energy storage systems and tractions for metro systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(9): 1408-1414.
- [4] 霍长龙. 城市轨道交通车辆段再生制动能量电阻吸收装置选型及散热分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(3): 130-134.
- Huo Changlong. Selection and heat dissipation analysis of regenerative braking energy absorption device in urban rail transit depot[J]. Urban mass transit, 2024, 27(3): 130-134.
- [5] 王海, 李占赫, 白雪莲, 等. 城市轨道交通柔性直流牵引供电技术应用研究[J]. 电气化铁道, 2023, 34(1): 64-68.
- Wang Hai, Li Zhanhe, Bai Xuelian, et al. Study on application of flexible DC traction power supply technology on urban rail transit[J]. Electric railway, 2023, 34(1): 64-68.
- [6] 常雨欣, 陈佳琪, 祁生花, 等. 含双向变流装置的城市轨道交通牵引供电系统研究进展[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(9): 188-192.
- Chang Yuxin, Chen Jiaqi, Qi Shenghua, et al. Research progress of urban rail transit traction power supply system with bidirectional converters[J]. Urban mass transit, 2024, 27(9): 188-192.
- [7] 王宁, 郭梓昱, 田淑珂, 等. 基于融合特征 t-SNE 降维的控制图质量异常模式识别[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(7): 2381-2393.
- Wang Ning, Guo Ziyu, Tian Shuke, et al. Control chart quality abnormal pattern recognition based on hybrid feature t-SNE fusion[J]. Systems engineering: theory & practice, 2024, 44(7): 2381-2393.
- [8] 许良财, 邵振国, 陈飞雄. 基于 haar 小波编码和改进 K-medoids 算法聚合的用户负荷典型区间场景挖掘[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 154-160.
- Xu Liangcai, Shao Zhenguo, Chen Feixiong. Typical interval scene mining of consumer load based on haar wavelet coding and improved K-medoids algorithm aggregation[J]. Electric power automation equipment, 2022, 42(6): 154-160.
- [9] 李旭霞, 张琳娜, 郑晓明, 等. 基于 KL 散度的储能电站分布鲁棒规划方法[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 46-55.
- Li Xuxia, Zhang Linna, Zheng Xiaoming, et al. KL divergence-based distributionally robust planning method for energy storage plants[J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(4): 46-55.
- [10] 王勇, 杨铎, 石春珉, 等. 基于修正电压指令的城轨双向变流器均流策略[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(3): 138-145.
- Wang Yong, Yang Duo, Shi Chunmin, et al. Current balancing strategy for urban rail bidirectional converters based on modified voltage command[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(3): 138-145.
- [11] 崔靖凯, 王凯, 范正奇, 等. 基于改进灰狼算法的冗余机械臂最优轨迹规划[J]. 控制与决策, 2025, 40(5): 1457-1466.
- Cui Jingkai, Wang Kai, Fan Zhengqi, et al. Optimal trajectory planning of robotic manipulator based on improved grey wolf optimizer[J]. Control and decision, 2025, 40(5): 1457-1466.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城市轨道交通直流牵引供电系统: GB/T 10411—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. D.C.traction power supply system for urban rail transit: GB/T 10411—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.

(编辑: 王艳菊)