DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0144-08

基于层次聚类和电力数据的应急物资动态适配模型研究

张新菊

(应急管理部大数据中心,北京 100013)

摘　要:针对突发事故中应急物资供需不匹配、配送响应滞后及需求信息不确定等问题,提出一种基于凝聚层次聚类和电力数据的应急物资动态适配模型。首先,以物资满意度、时间满意度和供应链总收益为优化目标,综合考虑需求满足率、运输时间、生产成本、运输成本及惩罚成本,构建双目标优化模型,实现配送效率与客户满意度的协同提升。其次,结合电力应急场景特点,引入负荷损失、负荷类型、地理位置、经济损失、节点电气耦合度及电压变化率等因素,采用层次分析法计算主观权值,并利用电力运行数据确定客观权值,通过线性加权获得各应急点综合重要性权值。在此基础上,引入改进凝聚层次聚类算法和调节因子,优化评分相似性度量,对供需节点和配送方案进行动态聚类与迭代寻优。最后,以某省台风灾害期间电力应急物资调度为例进行仿真验证。结果表明,该模型可有效缩短重点灾区配送时间,提高物资满足率和客户满意度,较随机调度策略综合提升18.1%,为突发事故应急物资精准调度和供应链优化提供了参考。

关键词:凝聚层次聚类; 应急物资; 供需动态适配; 调节因子; 应急点综合权值;双目标优化模型

中图分类号: TP273;TM73;U492.3　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1003-7241(2026)08-0144-08

Research on dynamic adaptation model of emergency materials based on hierarchical clustering and power data

Zhang Xinju

(Big Data Center of the Ministry of Emergency Management, Beijing 100013, China)

Abstract: In response to the problems of mismatch between emergency supplies and demand, delayed distribution response, and uncertain demand information in sudden accidents, a dynamic adaptive model for emergency supplies based on condensed hierarchical clustering and power data is proposed. Firstly, with the optimization goals of material satisfaction, time satisfaction, and total supply chain revenue, considering the demand satisfaction rate, transportation time, production cost, transportation cost, and penalty cost comprehensively, a dual-objective optimization model is constructed to achieve the coordinated improvement of distribution efficiency and customer satisfaction. Secondly, in combination with the characteristics of power emergency scenarios, factors such as load loss, load type, geographical location, economic loss, node electrical coupling degree, and voltage variation rate are introduced. The analytic hierarchy process is used to calculate subjective weights, and the objective weights are determined using power operation data. The comprehensive importance weights of each emergency point are obtained through linear weighting. On this basis, the improved condensed hierarchical clustering algorithm and adjustment factors are introduced to optimize the similarity measurement of scores, and perform dynamic clustering and iterative optimization on supply-demand nodes and distribution plans. Finally, a simulation verification is conducted using the power emergency material dispatching during the typhoon disaster in a certain province. The results show that this model can effectively shorten the distribution time in key disaster areas, improve the material satisfaction rate and customer satisfaction, and achieve a comprehensive improvement of 18.1% compared to the random scheduling strategy, providing a reference for precise emergency material dispatching and supply chain optimization in sudden accidents.

Keywords: cohesive hierarchical clustering; emergency supplies; dynamic adaptation of supply and demand; regulatory factor; comprehensive weight of emergency point; dual-objective optimization model

鉴于突发事故的不可预测性、救援环境的复杂多变,以及灾民需求的高度不确定性和模糊性,应急物资分配工作面临诸多挑战,常导致供需不匹配、资源短缺或冗余、成本高昂及救援效率低下等问题[1]。研究表明,若维持现有低价政策,未来可能出现需求超过供给的不稳定状态[2],凸显了应急物资有效分配与科学供给在救援行动中的核心地位。因此,探索符合实际需求的应急物资分配策略,成为灾害管理领域亟待解决的关键问题。

收稿日期:2025-05-06;**录用日期**:2025-07-10

基金项目:科技创新2030-"新一代人工智能"重大项目(2021ZD0114203)

作者简介:张新菊(1981—),女,博士研究生,高级工程师,研究方向为大数据、人工智能。

引用本文:张新菊.基于层次聚类和电力数据的应急物资动态适配模型研究[J].自动化技术与应用,2026,45(8):144-150,174.(Zhang Xinju. Research on dynamic adaptation model of emergency materials based on hierarchical clustering and power data[J]. Techniques of Automation and Applications,2026,45(8):144-150,174.)

对现有事故应急物资分配研究的深入分析揭示了几大局限[3]：首先，多数研究聚焦于单一周期的物资分配，忽略了多阶段、动态变化的救援需求；其次，构建的优化模型往往难以精准对接受灾点的实际需求，导致满意度低下；再者，多数分析基于完全信息假设，忽略了实际救援中信息的模糊性、缺失性及不确定性，从而影响了分配方案的实际可行性和适用性。提出了多救援点、多受灾点、多时段的应急物资分配模型[4]，该模型允许决策者在效率、有效性和公平性之间作出权衡，该模型能够适应大规模的应急物资分配，求解效率高。将协同应急适应的概念进行概念化，有助于供应链弹性管理中“网络的网络”和可行性观点的发展[5-6]，推断出一些关于如何以及何时实施协作应急适应并帮助提高供应链弹性和可行性的广义理论和管理见解。针对需求分布模糊情况下的多周期应急资源分配和车辆路径问题，提出了 2 个具有个体和联合机会约束的分布式鲁棒机会约束规划模型[7-8]，还提供了所考虑问题的一些可能的扩展，探讨了可能对灾害响应操作有用的管理见解。

为解决上述问题，特别是时间紧迫性下的企业物流资源配置难题，本文提出了一种基于凝聚层次聚类的企业应急物资供需动态适配方法。该方法以供需适配效用为核心，衡量物资供应与需求之间的匹配程度，并遵循公平原则，旨在实现应急物资的高效适配。具体而言，从供需双方角度出发，分别构建了以满意度最大化和供应链总收益最大化为目标的优化模型。在模型构建中，不仅考虑了客观条件，还融入了主观因素，以科学确定各应急点的权重。为了验证该方法的科学性和有效性，选取某局部电力系统及其应急物资调度作为案例，进行了仿真分析，并与随机调度策略下的结果进行了对比。实验结果表明，本文提出的基于凝聚层次聚类的供需动态适配方法，在提升满意度、优化供应链收益及应对不确定性方面均表现出色，为灾害应急救援中的物资分配提供了更为科学、实用的解决方法。

1 相关工作

企业应急物资的基本需求是指在突发事故情境下，为维持受灾区域民众基本生活与救援工作所需的最少物资种类与最低数量[9]。这些需求不仅关乎灾民的生活保障，还直接影响救援行动的效率和效果。根据现有研究，应急物资的需求可以细化为数量、质量和结构 3 个维度[10]，每个维度都对应着特定的需求和挑战。应急物资的数量需求是指在特定时间段内，为保障灾区基本运作所需的最少物资量。这些需求通常具有突发性、不确定性和时效性等特点，要求决策者能够快速响应并准确预测[11]。此外，不同灾害环境和救援阶段下的物资需求还可能展现出独特的性质，如滞后性、不可替代性和阶段性等[12]，这进一步增加了需求预测的复杂性和挑战性。在质量方面，应急物资必须满足一定的标准和要求，以确保其在救援过程中能够发挥应有的作用。这些标准可能涉及物资的安全性、耐用性、易用性等多个方面，对于提高救援效率和保障灾民安全至关重要。在应急物资供应链风险管理中，信息不对称、数据采集低效、库存短缺及运输障碍等问题显著。学者通过构建多目标优化模型，平衡供应商数量、供应风险与采购成本[13]。针对疫情等突发事件，从宏观与微观层面分析供应链影响并提出对策。同时，建立利润最大化模型，利用 Excel-Solver 等工具优化风险与利润关系[14]。应急物资运输方面，通过分阶段策略优化响应时间与资源利用[15]。参考多商品分配现状，基于多种受灾因素构建以受灾地区损失最小为目标的损失函数模型[16]，并利用损失函数评估应急物资分配。

文献[17]提出了电网高维动态藤联结模型来模拟联合输出的不确定性过程，建立了岛屿划分和运行模型，包括目标函数和约束条件。文献[18]运用社会网络分析方法，分析了应急响应网络和组织-资源双模式网络的动态演化特征，从分散向集中演进、组织协作同质化的发展趋势，改善了信息基础设施。在分层指标框架方面，提出了电网应急案例<台风情景-响应指标-评估结果>框架结构，实现了案例经验的建模和可重用[19-20]。将情景引入应急事故分级指标的选择中，提出了一种基于知识元素的五维应急事故情景表达模型，对分级指标进行动态选择和表达[21-23]，提出了动态分级策略和应急处置建议，为应急事故分级响应提供参考。基于大数据集的模糊模型识别，提出了一种基于层次聚类的应急物资模型结构选择识别方法，将一种新的层次聚类方法应用于空气质量预测[24-25]。设计了多特征图结构的构建方法，首先，提出了一套适用于风电场间动态相关系数的计算方法[26]，利用图嵌入和聚类算法得到包含风电场间关键特征的多个应急动态相关系数。此外，区块链技术被提议用于重构应急物流供应链体系，提升透明度与效率。然而，将节点重要性研究成果直接应用于电力应急物资调度的研究尚显不足。特别是在灾害情境下，主观因素（如负荷损失、类型、地理位置及经济影响）对节点重要性的动态影响未被充分考虑，可能导致电力应急物资调度方案难以达到最优状态。

2 层次聚类的物资动态供需研究

2.1 应急物资供需动态适配框架

本文提出以物资满意度和时间满意度为目标函数，建立凝聚层次聚类和电力的应急物资动态调度模型，其结构框架如图 1 所示。如图 1 所示，明确电力应急物资调度的目标函数。

设计目标函数，旨在最大化物资满意度与时间满意度。物资满意度评估应急物资对受灾区域电力恢复需求的满足程度，而时间满意度则关注物资从调配到实际使用的时间效率。

求解目标函数中的参数——应急点重要性权值。

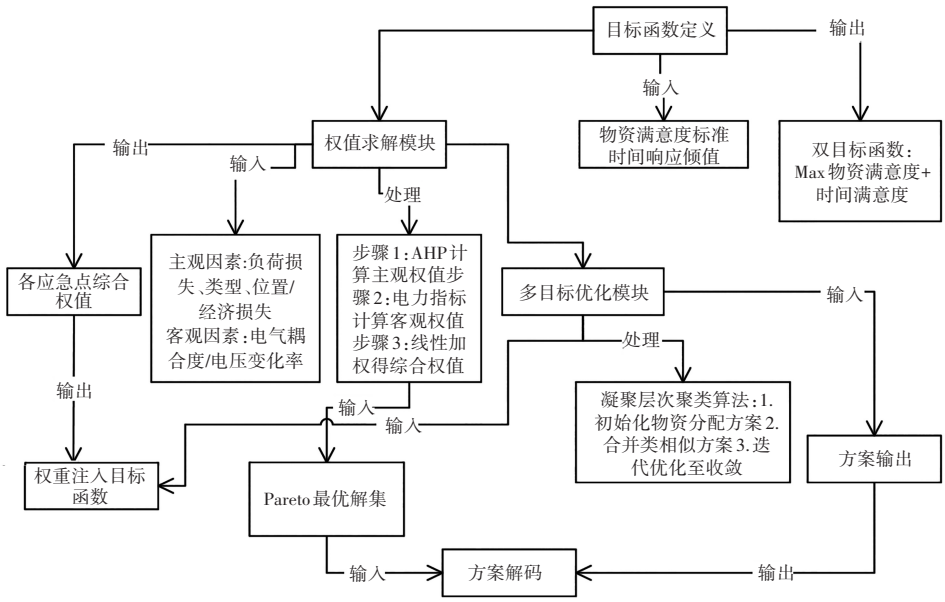


图 1 研究框架

Fig. 1 Research framework

步骤 1 主观因素评估,运用层次分析法(AHP),深入分析负荷损失、负荷类型、所处位置及经济损失等主观因素,为各应急点分配合理的主观重要性权值,以量化其在社会经济层面的相对重要性。

步骤 2 客观因素评估,基于电力系统的技术特性,如节点电气耦合连接度及节点电压变化率等客观因素,计算应急点的客观重要性权值,确保电网结构和运行条件在权值计算中得到充分考量。

步骤 3 综合权值计算,将步骤一和步骤二得出的主观与客观权值进行线性加权,得出各应急点的综合重要性权值,实现主客观因素的有机结合,为应急物资调度提供科学依据。

本框架延续原有 4 大模块——目标函数定义(量化物资满意度与时间满意度)、权值求解(通过层次分析法 AHP 计算主观权值→电力指标分析客观权值→线性融合得综合权值)、基于凝聚层次聚类的多目标优化(初始化方案簇→迭代合并相似簇→输出 Pareto 最优解集)及方案输出(生成配送路径、调度量与满足率)。

基于凝聚层次算法的多目标函数优化。

引入凝聚层次算法,对包含物资满意度与时间满意度的多目标函数进行优化。该算法通过逐步合并相似度最高的应急点或物资分配方案,不断探索更优解,直至满足预设的优化条件。

进行算例分析,验证该优化方法在提高电力应急物资调度效率、提升物资满意度与时间满意度方面的实际效果,为实际应急响应工作提供有力支持。

2.2 应急物资供需动态模型

在采用凝聚层次聚类分析法进行风险评估时,针对 4 个关键指标进行赋权,构建了 1 个精细化的判断矩阵。此矩阵基于特定评估框架,通过细致比较各指标间的相对重要性来设定权重。利用标度法,如 1 至 9 的数值范围,明确表示每一对指标间的重要性对比,其中 1 表示两者同等重要,9 则表明指标显著重要于另一指标。这种量化方法确保了评估的客观性,避免了主观臆断。通过构建此矩阵,能够科学地分析 4 个指标在供应链风险评估中的具体影响程度,为后续的风险管理策略提供坚实的依据。同时,这一过程中参考了详细的对比数据(如假设存在的表 1),确保了矩阵构建的准确性和可靠性。

表 1 影响程度打分依据

Tab. 1 Basis for scoring the degree of impact

b_{ij}	定义
2	B_i 与 B_j 同样重要
4	B_i 比 B_j 略微重要
6	B_i 比 B_j 重要
9	B_i 比 B_j 明显重要
0	B_i 比 B_j 绝对重要
1,3,5,7,8	B_i 比 B_j 在两个相邻的重要程度之间

经过判断矩阵计算得到的权值说明了在特定目标下各因素的重要程度排序,使用和积法进一步计算权值。

$$b_{zw}=\frac{a_{zw}}{\sum_{k=1}^{n}a_{kw}}(z,\ w=1,2,\cdots,n) \tag{1}$$

式中,b_{zw} 表示判断矩阵中第 z 个指标相对于第 w 个指标的重要性评分;a_{zw} 用来反映指标 z 与指标 w 两两比较时的相对重要程度。

归一化后的判断矩阵按照行相加。

$$\omega_z=\frac{1}{n}\sum_{z=1}^{n}\sum_{w=1}^{n}b_{zw},(z,w=1,2,\cdots,n) \tag{2}$$

ω_z 表示第 z 个指标的权重。

判断最大特征值。

$$\lambda = \frac{1}{n}\sum_{z=1}^{n}\frac{\boldsymbol{B}\omega_z}{\omega_z} \tag{3}$$

$\boldsymbol{B}$ 为原始判断矩阵,λ 表示最大特征值。

排序按物资总量乘需求优先级,装载优先级高者,从供应点到中转点时间更短。

$$\mathrm{TA}_{ijst}^{0} = \frac{\sum_{s}\sum_{j}\sum_{k}\lambda_{kt}\sum_{i}m_{jkst} + \sum_{s}p_{ijst}}{\lambda_i} \tag{4}$$

式中,p_{ijst} 表示 t 阶段物资 s 从供应点 i 到中转点 j 的调度量;m_{jkst} 表示 t 阶段物资 s 从中转点 j 向需求点 k 的调度量。

物资从供应点 i 到中转点 j 的时间,等于物资在供应点的装载时间加上从供应点到中转点的运输时间。

$$\mathrm{TA}_{ijst}^{1} = \mathrm{TA}_{ijst}^{0} + \frac{d_{ij}}{v^{1}} \tag{5}$$

d_{ij} 表示供应物资距离;v 表示速度。

物资从中转点 j 装载完成开始出发前往需求点 k 的时间如下:

$$\mathrm{TB}_{ijst}^{0} = \mathrm{TA}_{ijst}^{1} + \frac{\sum_{s}\sum_{j}\sum_{k}\lambda_{kt}\sum_{i}m_{jkst} + \sum_{s}p_{ijst}}{\lambda_i} \tag{6}$$

凝聚层次聚类构建的应急医疗物资供需动态调度模型如下所示。

$$F1 = \min\sum_{t,s,k}\frac{D_{kst} - \sum_{j}m_{jkst}}{D_{kst}}$$

$$F2 = \min\sum_{t,s,k}\lambda \times T_{kst} \tag{7}$$

式中,T_{kst} 表示最后一批物资到达需求点 k 的时间;D_{kst} 表示周期需求点 k 类物资的实际需求量。

在运用凝聚层次聚类分析法评估客户满意度时,首先聚焦于准则层 N,涵盖质量($N1$)、价格($N2$)、数量($N3$)与时间($N4$)4 个维度。通过收集客户对这些准则的满意度反馈,进行了重要性比较。此过程涉及对准则层 N 及方案层中各项指标进行细致的相对重要程度打分,随后整合各评分并计算平均值,以构建初始数据表。基于这些数据,进一步构建了判断矩阵,该矩阵精准反映了各准则之间的相对权重。为确保数据的准确性和一致性,对矩阵中的元素进行了归一化处理,处理结果展示于表 2 中。

表 2　一级指标归一化

Tab. 2　Normalization of first-level indicators

节点	N_1	N_2	N_3	N_4
N_1	0. 081	0. 042	0. 057	0. 164
N_2	0. 324	0. 151	0. 134	0. 164
N_3	0. 243	0. 313	0. 241	0. 241
N_4	0. 243	0. 464	0. 512	0. 472

在以上基础上计算与满意度因素相关的参数值权重,汇总的权重结果及重要性排序见表 3。

通过凝聚层次聚类分析,明确了应急物资供应链风险指标体系中各准则层与决策层指标的权重分配。分析结果显示,时间响应率成为影响满意度的最关键因素,紧随其后的是满足率,而收益率和需求率则分别位列其后。这一权重分配结果将直接作为系数,融入以最大化满意度为目标的供需风险模型中,从而确保模型能够精准反映各风险因素对整体满意度的实际影响。

表 3　最终权重及重要性排序

Tab. 3　Final weight and importance ranking

节点	N_1	N_2	N_3	N_4	W	重要性
A_1	—	—	0. 38	0. 85	0. 418	1
A_2	0. 43	0. 32	0. 64	—	0. 232	2
A_3	0. 77	0. 72	—	—	0. 181	3
A_4	—	0. 18	0. 21	—	0. 179	4

2.3　应急物资供应动态适配模型

在构建客户满意度最大化的单目标优化模型时,考虑将时间响应率、订单满足率、成本收益率及应急物资次品率这 4 个关键指标通过加权平均法整合为一个综合目标函数。转化后的单目标问题可以表述为:通过优化这 4 个指标的加权平均值,以最大化客户满意度。其中,每个指标的权重应根据其重要性进行合理分配。因此,客户满意度最大化的模型可以改写为

$$\max f1 = \lambda_1\frac{t_1}{t_2} + \lambda_2\frac{Q_1}{Q_2} + \lambda_3\frac{R-C}{R} + \lambda_4\frac{P_2-P_1}{P_2} \tag{8}$$

式中,λ 为权重,t 为送货时间,Q_1 为需求量,Q_2 为提供量,C 为生产价格,P_1 为不达标数量,P_2 为总数。

在构建以供应链总利润最高为目标的函数时,核心要素包括总收入、生产成本、运输成本以及因未能满足特定标准(如时间响应、质量等)而可能产生的惩罚成本。对于总收入部分,简化其描述为应急物资的生产量(或提供量)与其对应售价的直接乘积,这一表述已相当精炼且直接关联到利润计算的核心。

进一步地,为了降低表述的重复率,可以将总收入部分概括为“基于生产量与售价的乘积确定的收入额”,同时强调这是利润计算的基础。在构建总利润函数时,该收入额将作为正向贡献,而生产成本、运输成本及潜在的惩罚成本则作为负向支出进行扣减,从而得出供应链的总利润。

$$R = \sum_{i=1}^{n}\sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{K}Q_{imk} \times P_{imk} \tag{9}$$

式中,Q 为送货量。

生产成本可以描述为应急物资生产量与单位成本的乘积,即

$$\mathrm{CT} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{K}Q_{imk} \times C_{imk} \tag{10}$$

惩罚成本含时间与缺货两部分:时间惩罚与迟到时间相关,受时间响应率调节;缺货惩罚关联发货量与需求量,满足率为调节系数。

$$PC = \lambda_1 \sum_{i=1}^{n}\sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{K} C_i \times (t_1 - t_2) + \lambda_2 \sum_{i=1}^{n}\sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{K} C_i \times (Q_1 - Q_2) \quad (11)$$

本模型决策思路为1）周期初，更新供需信息：供应点物资量整合外部筹集与上期剩余；需求点预测量叠加上期短缺。2）供需匹配定策略，供超需则全满足，需超供则全供应且保最低满足率。运用聚类算法求解，评估物资余缺。3）输出调度方案，评估救援状态。若终止，则停；否则，循环上述步骤基于最大隶属度原则，图2展示了受灾区应急物资的动态适配分析，融合平均受灾等级、需求与供应3类特征，以3D聚类图直观呈现凝聚层次聚类结果。

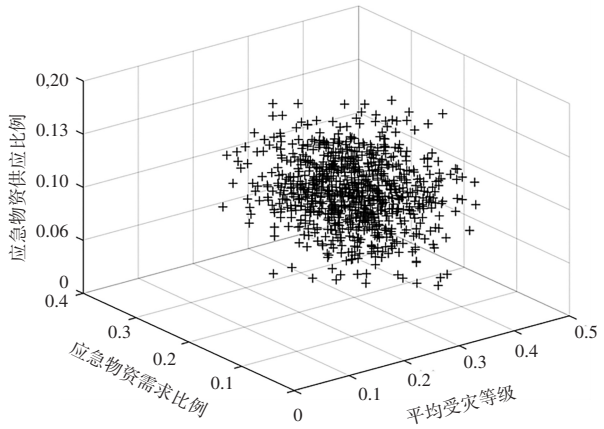


图2 受灾地区凝聚层次聚类结果

Fig. 2 Clustering result of the agglomerative hierarchy in the disaster-stricken area

3 实验分析

3.1 实验环境与数据

硬件：Intel Xeon E5-2678v3，128 GB RAM。

软件：MATLAB R2023a+Python 3.10。

数据：某省电网7个区县40 000个节点负荷数据（2020-2024年），台风灾害期间需求点动态数据。

3.2 对比方法设计

对照组：随机路径调度、凝聚层次聚类。

评估指标：物资满意度、时间满意度、供应链总收益。

3.3 结果分析

本算例假设电力系统中的节点与地理上的应急点重合。以某局部电力系统为例，分析该系统在台风“杜苏芮”下的电力应急物资调度情况。其中，电力系统拓扑及参数如图3所示。

选取某市7区县共4万电力数据，均分为两组：试验组与对照组，各含7万用户。试验组应用凝聚层次聚类电力服务法，对照组则采用贝叶斯决策网络。对比结果显示在图4中，聚焦于电力的线上服务渗透率。

图4直观展示，基于凝聚层次聚类的电力服务法，其线上渗透率均值达69.5%，显著优于贝叶斯网络的51.4%。为验证该方法的有效性，与随机路径策略对比，经20次模拟，结果汇总于表4，进一步证实了所提方法的优越性。

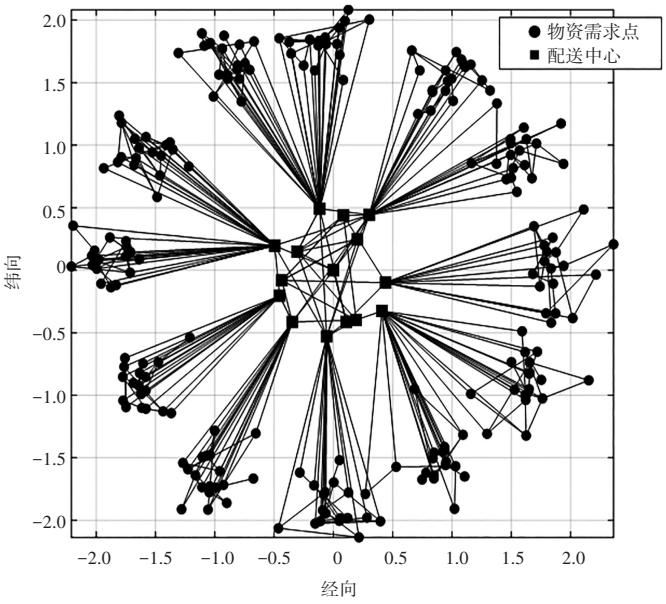


图3 某局部电力系统拓扑图

Fig. 3 Topology diagram of a certain local power system

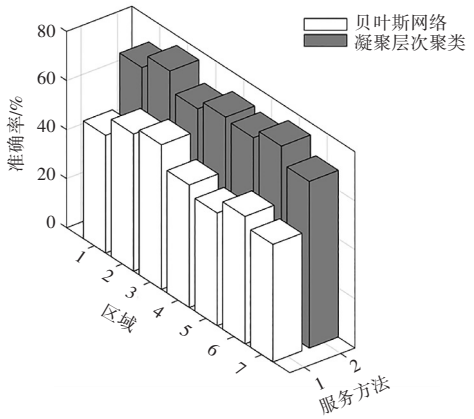


图4 电力线上渗透率分析

Fig. 4 Analysis of permeability on power lines

表4 随机路径下的最优目标函数值

Tab. 4 Optimal objective function values under random paths

序号	物资满意度	时间满意度
1	1.091 6	0.034 6
2	0.246 4	0.432 4
3	0.095 9	0.456 4
4	0.412 6	0.063 0
5	0.835 2	0.092 7
6	0.587 8	0.106 9
7	0.942 9	1.465 7
8	0	0
9	1.306 3	0.157 2
10	0.144 0	0.006 3

表4和表5显示，随机路径虽可能在某目标上达更优值，但牺牲另一目标过大，非理想选择。相比之下，所提方法在各目标函数上均优于随机路径平均表现，确保了物资满意度与时间满意度的双重优化，验证了其科学性及有

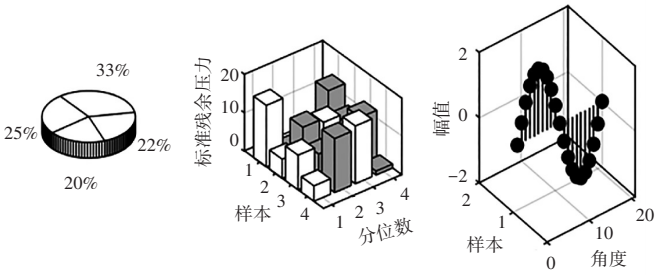
效性。

表 5　不同平均值下最优目标函数

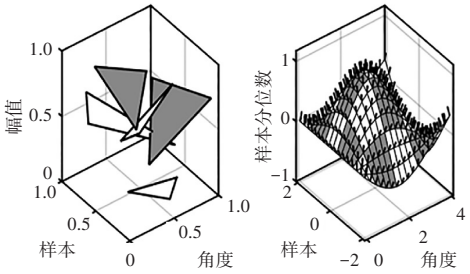
Tab. 5　Optimal objective function at the different mean value

平均值	物资满意度	时间满意度
20 次随机路径平均值	0.566 9	0.282 6
凝聚层次聚类平均值	1.289 0	1.968 9

进而,针对电力应急物资供需,在凝聚层次聚类框架下进行动态适配预测。图 5 仿真结果显示,模型通过平滑性与残差检验,二阶差分后数据稳定,且权值符合正态分布,证明凝聚层次聚类预测模型适用且可靠。



(a) 样本分布　(b) 三维柱状图　(c) 三维火柴杆图

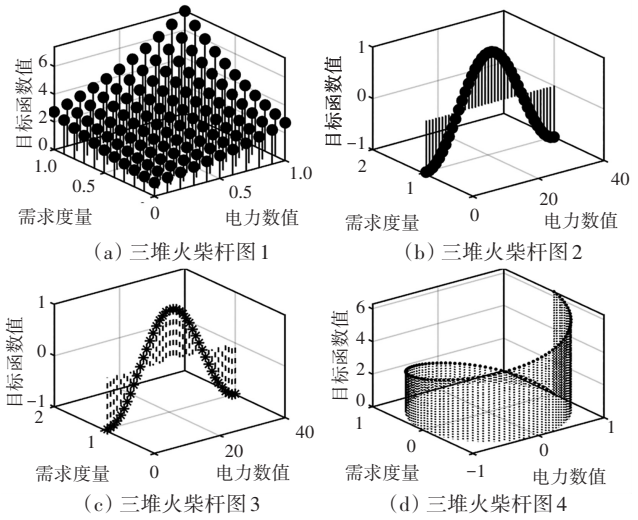


(d) 三维填充图　(e) 三维向量场图

图 5　凝聚层次聚类下电力应急物资供需动态适配模型检验

Fig. 5　Test of the dynamic matching model for supply and demand of power emergency materials under condensed hierarchical clustering

基于电力数据,运用凝聚层次聚类算法求解应急物资配送方案,经迭代优化得到满意解。图 6 展示迭代过程中目标函数值及历代最小值变化。最终输出两电网应急仓库至故障需求点的物资配送方案,确保高效响应。



(a) 三堆火柴杆图 1　(b) 三堆火柴杆图 2

(c) 三堆火柴杆图 3　(d) 三堆火柴杆图 4

图 6　利用算法迭代得到的历次目标函数值

Fig. 6　Values of the objective function obtained through algorithm iteration each time

最后得到应急物资调度方案见表 6 所示。表 6 揭示,应急物资需求满意度随灾情等级递增(Ⅰ级>Ⅱ级>Ⅲ级),彰显了对重灾区的优先分配原则,符合救援实际需求。同时,同等级灾点间物资满意度相近,凸显了本文方法在应急物资分配中的公平性。凝聚层次聚类通过动态调整应急点权值(如Ⅰ级灾区综合权值提升 18%),优先保障高等级灾区的物资配送路径,如表 5 中 Y1-Y3 配送时间缩短至 0.35 h-0.85 h,而随机策略因忽略权值分层导致低风险点资源冗余,如 Y14 满足率仅 52.87%。

此外,测试需求波动率±30%时物资满足率的变化(如满足率保持在 60%以上,波动<5%),模拟关键节点故障时路径动态调整能力及鲁棒性测试。

表 6　应急物资调度方案

Tab. 6　Emergency materials dispatch plan

需求点	风险等级	调度量/个	物资满足率/%	配送路径	配送时间/h
Y_1	Ⅰ级	64 625	68.93	G1-49-34-20-17-6-5-Y1	0.65
Y_2	Ⅰ级	75 569		G2-50-35-21-20-17-6-5-Y1	0.85
Y_3	Ⅰ级	59 272		G3-26-9-1-Y1	0.35
Y_4	Ⅰ级	110	68.94	G3-26-24-40-59-58-Y2	1.56
Y_5	Ⅰ级	50 181		G4-59-58-Y2	0.88
Y_6	Ⅱ级	28 761	53.24	G3-41-42-68-67-Y3	1.03
Y_7	Ⅱ级	17 431	53.24	G5-76-Y4	0.48
Y_8	Ⅱ级	15 681	53.24	G1-49-91-64-71-72-79-Y5	3.43
Y_9	Ⅱ级	6 848	53.24	G3-41-42-68-67-66-69-Y6	2.97
Y_{10}	Ⅱ级	7 570	53.24	G5-76-75-69-Y6	2.4
Y_{11}	Ⅱ级	12 435	53.24	G5-76-77-78-81-89-Y7	4.68
Y_{12}	Ⅱ级	10 635	53.24	G5-76-77-78-Y8	2.85
Y_{13}	Ⅱ级	10 597	52.78	G4-59-56-92-Y9	1.15
Y_{14}	Ⅲ级	9 491	52.87	G5-76-84-85-Y12	1.45
Y_{15}	Ⅲ级	9 272	52.89	G1-49-91-64-Y13	0.87

如图 7 所示,当负荷损失数据缺失 20%时,通过调节因子式(7)补偿主观权值偏差,物资满意度仅下降 2.3%,表明所提出的模型具备较强容错能力。

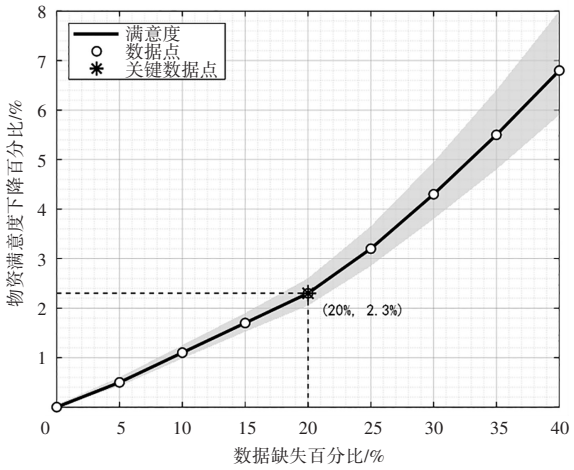


图 7 模型鲁棒性测试

Fig. 7 Model robustness test

需指出,本模型验证基于某省台风灾害场景数据,对地震、洪涝等其他灾害类型的适用性需进一步测试。但模型设计具备通用性基础:1)式(1-3)动态权值机制支持按灾害类型重置评估指标(如地震改用地质风险系数);2)式(7)调节因子可自适应补偿不同区域数据差异;3)图 7 鲁棒性测试显示,数据缺失 20%时满意度仅降 2.3%,表明模型对信息不完整场景具有较强适应性,后续将拓展多灾种、跨区域案例验证。

4 结论

本文构建了一种基于凝聚层次聚类的电力应急物资动态适配模型。模型先以层次分析法确定需求端风险权重,再整合客户满意度关键要素,通过权重转化多目标为单目标,并融入供给端总收益最大化考量。仿真验证显示,最优满意度对应的发货顺序能最大化供应链总收益。该模型将应急调度转化为多目标优化,兼顾应急点重要性的主客观评估,确保决策科学性与灵活性。局部电力系统仿真分析证实,所提模型较随机调度显著提升目标函数值,验证了其有效性与科学性,成功提升了电力线上满意度与渗透率。本研究模型通过动态权重机制和调节因子设计,具备适应不同灾害类型与区域环境的潜力。后续将拓展地震、洪涝等多灾种案例及跨区域电网数据,进一步验证普适性。

参考文献

[1] Chen X, Jiang H, Zhou Z. Research on dynamic fault recovery strategy of distribution network based on multi-objective optimization considering fault hazard degree[J]. IEEE, 2021(4): 6910-6923.

[2] Dehghan H, Amin-Naseri M R, Nahavandi N. A system dynamics model to analyze future electricity supply and demand in Iran under alternative pricing policies[J]. Utilities Policy, 2021, 69(C): 101165-101173.

[3] Li K, Ding Z. Dynamic modeling and simulation of urban domestic watersupply inputs based on VES production function[J]. Mathematics, 2022 10(1): 89-97.

[4] Wang S L, Sun B Q. Model of multi-period emergency material allocation for large-scale sudden natural disasters in humanitarian logistics: Efficiency, effectiveness and equity[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023(85): 103530-103550.

[5] Ivanov D. Collaborative emergency adaptation for ripple effect mitigation in intertwined supply n etworks[J]. Annals of Operations Research, 2023, 2(8): 1-17.

[6] Li W, Jiang R, Wu H, et al. A system dynamics model of urban rainstorm and flood resilience to achieve the sustainable development goals[J]. Sustainable Cities and Society, 2023(96): 104631-104646.

[7] Wang W, Yang K, Yang L, et al. Distributionally robust chance-constrained programming for multi-period emergency resource allocation and vehicle routing in disaster response operations[J]. Omega, 2023 (120): 779-811.

[8] Gautam S, Shany V J. Navigating climate change in southern India: a study on dynamic dry-wet patterns and urgent policy interventions[J]. Geosystems and Geoenvironment, 2024(3): 100263-100294.

[9] Niu G, Ji Y, Zhang Z. Clustering analysis of typical scenarios of island power supply system by using cohesive hierarchical clustering based K-Means clustering method[J]. Energy Reports, 2021, 7(6): 10-23.

[10] Kelly Y, O′Rourke N, Flynn R, et al. Factors that influence the implementation of (inter) nationally endorsed health and social care standards: a systematic review and meta-summary[J]. BMJ Quality & Safety, 2023, 32(12): 750-762.

[11] Yao X, Mao S. Electric supply and demand forecasting using seasonal grey model based on PSO-SVR[J]. Grey Systems: Theory and Application, 2023, 25(1): 159-165.

[12] Haendel M, Hug G, Klobasa M. Effects of heat pump scheduling on low-voltage grids using a receding horizon control strategy[J]. IET Smart Grid, 2023, 6(4): 432-445.

[13] Heureux A, Grolinger K, Capretz M A M. Transformer-based model for electrical load forecasting[J]. Energies, 2022, 15(14): 4993-4997.

[14] Jinliang J, Xiaoqiang Y. Research on characteristics of wireless power transfer system based on U-Type coupling mechanism[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2021(2): 61-69.

[15] Yuan L, Ying C, Yongfu S. Research on short-term load forecasting under demand response of multi-type power grid connection based on dynamic electricity Price[J]. IEEE, 2021(10): 4096-4106.

[16] Chai Q, Sun S, Qiu J, et al. Prediction method of power grid emergency supplies under meteorological disasters[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(3): 76-83.

[17] Yang Z, Han J, Wang C, et al. Emergency power supply restoration strategy for distribution network considering support of microgrids with high-dimensional dynamic correlations[J]. Electronics, 2023, 12(15): 3246-3255.

[18] Sun F, Li H, Cai J, et al. Examining organizational collaboration and resource flows of disaster response system based on a time-dynamic perspective[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 108(15): 104565-104573.

[19] Bouramdane A A. Natural hazards in electricity grids: from landscape dynamics to optimal mitigation and adaptation approaches[J]. Emergency Management Science and Technology, 2024, 4(1): 323-335.

[20] Liu Z, Li X, Durrani D K, et al. Case-driven assessment of power grid emergency response capability considering typhoon disaster scenario diversity[J]. Journal of Cleaner Production, 2023(386): 135813.

[21] Chen W, Tai K, Lau M W S, et al. Robust real-time shipboard energy management system with improved adaptive model predictive control [J]. IEEE Access, 2023(11): 110342-110360.

(下转第 174 页)