第 52 卷 第 7 期：3327-3338 高电压技术 Vol.52, No.7: 3327-3338
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250829

考虑多因素影响的变压器分区管理与运维检修业务决策方法

廖才波[1]，龚文豪[1]，邵　剑[2]，蒋子豪[1]，谢嘉宏[1]，李金波[1]
（1. 南昌大学能源与电气工程系，南昌 330031；2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，南京 211103）

摘　要：作为电网核心枢纽设备，变压器呈现结构复杂、地理位置分散且地域分布跨度大等特点，导致设备运维检修工作耗时耗力。针对当前变压器运维检修业务缺乏完善管理及决策机制的问题，提出了一种考虑多因素影响的变压器分区管理与差异化运维检修规划方法，以提升设备管理与决策的科学化及智能化水平，降低设备运维检修成本。首先，提出了考虑设备分布情况、电压等级和运检中心承载能力等静态因素的变压器分区管理方法，实现了多运检中心模式下的设备管理及各运检中心的规划选址。其次，综合设备健康状态、运维检修时限要求及运维人员承载力等动态因素，构建了面向变压器差异化检修需求的两阶段优化模型。然后，提出了基于 Dijkstra 算法路径引导机制的改进多目标差分进化算法，实现了设备运维检修业务的规划决策。最后，以某地区电网为对象，开展实例分析，验证了该方法的实用性和有效性。

关键词：变压器；检修决策；差异化检修；两阶段优化模型；多目标差分进化算法

Partition Management, Operation and Maintenance Business Decision-making Method for Power Transformer Considering the Influence of Multiple Factors

LIAO Caibo[1], GONG Wenhao[1], SHAO Jian[2], JIANG Zihao[1], XIE Jiahong[1], LI Jinbo[1]
(1. Department of Energy and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: As the core equipment of the power grid, the transformer presents the characteristics such as complex structure, dispersed geographical location and wide geographical distribution, which leads to the time-consuming and labor-intensive operation and maintenance of the equipment. Aiming at the problem of inadequate management and decision-making mechanism in operation and maintenance business of substation equipment, we put forward a method for the partition management and differentiated operation and maintenance decision of substation equipment considering the influence of multiple factors , so as to enhance the scientific and intelligent level of equipment management and decision-making, and reduce operational and maintenance costs. Firstly, a partition management method of substation equipment considering static factors such as equipment distribution, voltage level and carrying capacity of maintenance center is proposed, which realizes equipment management and the planning and site selection of each center under multi-operation and maintenance center mode. Secondly, a two-stage optimization model is constructed to address the differentiated maintenance requirements of substation equipment, incorporating dynamic factors such as equipment health status, operation and maintenance time constraints, and personnel carrying capacity. Then, an improved multi-objective differential evolution algorithm based on the path guidance mechanism of the Dijkstra algorithm is proposed, achieving the scheme decision-making for equipment operation and maintenance business. Finally, a case study of a regional power grid is carried out, and the practicability and efficiency of the proposed method in the paper are verified.

Key words: transformer; maintenance decision; differentiated maintenance; two-stage optimization model; multi-objective differential evolution algorithm (MODE)

基金资助项目：国家自然科学基金(52367001)；国家电网有限公司科技项目(5700-202455338A-2-1-ZX)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52367001), Science and Technology Project of SGCC (5700-202455338A-2-1-ZX).

0 引言

伴随我国电力系统的跨越式发展，电力企业资产规模持续攀升，在运电力设备数量不断增加[1]。在设备质量、运行条件以及外部环境等因素的综合作用下，变电设备的健康状态和可靠性参差不齐，影响了电网的安全稳定运行水平[2-3]。同时，设备运行年限的增长或未及时进行有效的运维检修也导致其潜在风险的进一步扩大，对设备的差异化管控和精益化管理提出了更高的要求[4-5]。因此，在现有电力设备管理模式下，综合考虑设备管理要求、运检人员工作承载力和设备健康状态等因素，实现运维检修任务与设备状态间的最佳匹配，对提升设备管理水平及保障电网安全稳定运行具有重要意义[6]。当前，电力设备运检任务规划研究主要关注于输电和配电设备的巡检业务，变电设备缺乏科学、完善的运检管理决策机制或方法[7-9]。文献[10]针对输电线路自动巡检中的无人机续航受限问题，提出了基于 K-means++算法的任务分配与改进模拟退火算法的 3D 轨迹优化方法，有效降低了大规模巡检场景的总耗时。文献[11]通过建立检修决策框架和指标体系，并根据决策者意愿动态修正指标权重，采用 D-S 证据理论实现了对检修方式和检修时段的多目标综合优化。文献[12]构建以经济性、安全性和可靠性为目标函数的检修业务优化模型，实现了线路检修业务的降本增效，但研究主要侧重运维工作的计划制定，并未涉及实际运维路径的规划。文献[13]以设备重要度和实时状态评价结果确定配电设备的差异化巡检周期，并采用 A*算法优化巡检路径，在降低巡检工作量的同时实现耗时最小化。上述研究可为变电设备的运维检修任务规划提供一定的参考，但受限于变电设备与输配电设备在设备分布密度、资产重要性及管理要求等方面的差异性，难以直接推广至变电设备管理业务中。因此，构建适用于变电设备的运维检修任务规划方法有助于进一步提升电力设备检修效率，实现运维检修资源的最佳配置，从而提升设备精益化管理水平。

针对变电设备的管理需求，本文提出一种考虑多因素影响的变压器分区管理与运维检修业务决策方法。首先，分析了影响设备分区管理和运检任务规划的动、静态因素，提出了考虑设备电压等级、地理分布及运检中心承载能力等静态因素的变压器分区管理方法。其次，叠加设备健康状态、运检任务时限以及作业时长等动态因素，以运检路径距离、运检耗时与计划天数作为目标函数，构建了变压器差异化检修需求的两阶段优化模型。然后，提出了基于 Dijkstra 算法路径引导机制的改进多目标差分进化算法，实现了设备运维检修业务的方案决策与路径规划。最后，以某地区电网为对象，开展实例分析，验证了本文方法的实用性和有效性。

1 变压器运检业务影响因素及决策框架

变压器作为电网核心枢纽设备，其运行信息包含多源异构数据特征，能够为其他设备提供普适性决策支撑，是变电设备运维检修工作的重中之重和关键瓶颈。为实现区域电网管理视角下的运检资源配置最优化，本文以 35 kV 及以上油浸式变压器为应用对象，提出了基于两阶段优化模型的变压器分区管理与运维检修业务决策方法，即先考虑设备体量、运检资源等静态因素开展运检中心规划，完成运检中心位置选址及其区域适配；再结合设备状态、运检任务时限等动态因素开展运检业务规划，确定变压器的运检计划及其最佳路径。

1.1 静态因素

静态因素主要用于变压器运检中心的规划选址及分区优化，即将电网划分为多个运检区域，由各运检中心负责特定区域内设备的运维检修工作。本文考虑的静态因素主要如下。

1）设备分布情况。包含变压器电压等级、位置及数量，直接决定了设备的重要程度及其运检任务的潜在工作量。由于设备的电压等级、位置及数量等参数在短期内是维持不变的，本文将其视为静态因素。

2）运检中心承载能力。其主要取决于区域电网公司内运维检修人员的数量，本文中也将其作为静态因素加以考虑。对于设备的运检业务决策，不同运检中心承载能力上限应与所负责区域内设备的运检任务工作量相匹配。

结合上述静态因素，构建并求解运检中心规划选址模型，可确定运检中心的数量、最佳位置及其所负责区域内的对应变压器。

1.2 动态因素

设备运行状态、运检任务时限及运检人员承载能力等动态因素是变压器运检业务决策所应考虑的关键点，也是导致设备运维检修工作决策相对复杂且困难的直接原因。

1）设备运行状态及其影响。其在一定程度上决定了运维检修工作的内容，即决定何时开展何种运维或检修工作。目前，变压器的状态评价及缺陷诊断方法已相对成熟，为客观反映设备运行状态，综合考虑相关行业标准与文献[14-16]，本文采用检修任务耗时作为其运行状态的量化表征指标。

2）运检任务时限要求。主要指定期或临时运检任务的时限性，包括因设备状态劣化或缺陷而临时增加的巡检或检修业务，定期开展的设备巡视或油中溶解气体分析业务等，属于影响设备运检业务决策的关键因素。该因素由设备的电压等级、运行状态以及检修优先级等共同决定，如对于不同电压等级的油浸式变压器，其离线油色谱的定期检测周期是不同的，也可能随着设备状态劣化而缩短检测周期[17-18]。

3）运检人员承载力。其与运检人员完成相应运维检修工作的时长相关，决定了运检人员能否完成相应区域内主变的运维检修任务。当运检区域内设备的运维检修任务超过运检人员的承载力时，则结合运检中心寻址优化进行任务再分配，即运检人员承载力与运检任务时限共同影响运检中心的划定及运检路径寻优过程。

1.3　运检业务决策总体框架

基于上述静态及动态因素，本文将变压器的运维检修决策过程转化为管理人员、运检人员及设备等共同参与的多方协同问题，即在满足设备管理工作要求的前提下，何时开展设备的运维检修工作，可将设备的平均运检成本降至最低，并最大程度提升设备的可用率。同时，结合现有电力系统中的班组管理模式，引入设备分区管理理念，提出了基于两阶段优化模型的变压器分区管理与运维检修业务决策方法，其总体框架如图 1 所示。

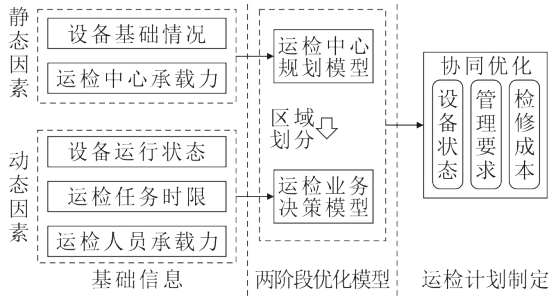


图 1　变压器运检业务决策框架

Fig.1　Business decision framework for transformer operation and maintenance

2　变压器运维检修业务决策模型

为实现区域电网内变压器运维检修计划的精确制定，本文构建了两阶段优化模型，对设备运检计划及路径进行了系统优化。

1）运检中心规划选址模型。基于目标区域内设备与运检人员实际情况，确定所需运检中心的数量，并将各中心与其所负责区域进行适配划分，由所属中心承担相应区域内设备的运维检修工作。

2）变压器运检业务决策模型。在确定运检中心选址及区域划分后，结合设备检修时间窗口、人力资源限制等约束条件，进一步开展各区域内变压器的运检业务排序及路径优化。

2.1　运检中心规划选址模型

运检中心选址的合理性直接影响到运维检修业务效率、覆盖范围和应急响应能力，在选址过程中必须充分考虑设备体量及位置分布情况、运检中心人力资源储备等因素。合理的中心选址不仅能降低设备运维的人力和交通成本、提高检修响应速度，还能优化资源配置，提升运检业务效率。

2.1.1　目标函数

本文在考虑设备分布情况与运检中心承载能力的基础上，建立以资源配置最优为目标的运检中心选址及区域划分模型，其目标函数为：

$$F_{\mathrm{s}}=\min\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\alpha_i x_{ij} d_{ij} y_j \tag{1}$$

式中：F_{s}为运检中心与设备间的总距离；x_{ij}与y_j为决策变量；m为设备数量；n为备选运检中心数量；d_{ij}为结合地理信息系统得到的第i台设备和第j个运检中心间的最短距离；α_i为设备重要度调整系数，按电压等级从低到高依次取值，可使运检中心选址在空间分布上向高重要度设备逼近，提升对关键设备的管控能力。x_{ij}与y_j取值为：

$$x_{ij}=\begin{cases}1, & \text{设备}i\text{归属于运检中心}j\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{2}$$

$$y_j=\begin{cases}1, & \text{运检中心}j\text{启用}\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{3}$$

2.1.2　约束条件

基于上述目标函数，构建运检中心及其所负责区域内设备的约束条件，主要包括以下内容。

1）所有运检中心的总工作承载能力不小于所有设备运维检修业务的总工作量，即：

$$\sum_{i=1}^{m} q_i \le c_j \sum_{j=1}^{n} y_j \tag{4}$$

2）各运检中心的工作承载能力不小于其所负责区域内设备所需的总工作量，即：

$$\sum_{i=1}^{m} q_i x_{ij} \le c_j,\ j=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

3）每处设备的运检工作仅由唯一的运检中心承担，即：

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1,\ i=1,2,\cdots,m \tag{6}$$

4）各运检中心承担的设备数量及运检中心数量满足相应约束条件，即：

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = N_j,\ j=1,2,\cdots,n \tag{7}$$

$$\sum_{j=1}^{n} y_j = p \tag{8}$$

式中：p 表示所有区域需要运检中心的数量；q_i 表示设备 i 运检业务的工作量；c_j 表示运检中心 j 的最大工作承载能力，即该中心所辖区域内设备运维检修业务工作量的上限；N_j 表示运检中心 j 负责的设备数量。

2.2 变压器运检业务决策模型

运检任务排序及路径规划能够显著减少设备运维检修业务的总体路程及所消耗的时间，提高运检覆盖率，有助于提升运检效率及降低运检成本。

2.2.1 目标函数

本文在确定变压器运检中心选址及区域划分的基础上，结合设备运行状态及运维检修时限等动态因素，通过建立多目标运检业务决策模型，进一步对各区域内变压器的运检计划进行优化，其对应的目标函数为：

$$\begin{cases} F_1 = \min \sum_{c\in C} F_1^c = \min \sum_{c\in C} \sum_{m\in M_c} \sum_{k\in K_m} \sum_{i,j\in N} d_{ij} u_{ij}^{mk} \\ F_2 = \min \sum_{c\in C} F_2^c = \min \sum_{c\in C} \sum_{m\in M_c} \sum_{k\in K_m} \sum_{i,j\in N} T_{ij} u_{ij}^{mk} \\ F_3 = \min \sum_{c\in C} F_3^c = \min \sum_{c\in C} \sum_{m\in M_c} \left|K_m\right| \end{cases} \tag{9}$$

式中：F_1 表示最小化运检成本，可以为距离或费用；F_2 表示最小化运检耗时；F_3 表示最小化运检计划总天数；T_{ij} 表示节点 i、j 之间的总耗时，包括通勤时间与设备运检时间；F_1^c、F_2^c 和 F_3^c 代表每个运检中心的运检成本、运检耗时和运检计划总天数；u_{ij}^{mk} 和 v_c^m 为决策变量，其含义见式(10)和(11)；C、E、M 分别表示运检中心集合、设备集合和运检人员集合；N 表示节点集合，由运检中心集合 C 与设备集合 E 共同组成，即 $N=C\cup E$；M_c 表示归属于运检中心 c 的运检人员集合；K_m 表示运检人员 m 的运检计划集合。u_{ij}^{mk} 和 v_c^m 取值为：

$$u_{ij}^{mk} = \begin{cases} 1, & \text{运检人员}m\text{第}k\text{天从}i\text{前往}j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{10}$$

$$v_c^m = \begin{cases} 1, & \text{运检人员}m\text{归属于运检中心}c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{11}$$

2.2.2 约束条件

基于上述目标函数，构建运检中心、运检人员及其所负责设备运检任务间的约束关系，主要包括：1)运检中心参与运维检修工作的人员数量不能超过该中心所拥有的运检人员总数，即：

$$\sum_{m\in M} v_c^m \le \left|M_c\right|,\ \forall c \in C \tag{12}$$

2）运检人员仅归属于唯一运检中心，即：

$$\sum_{c\in C} v_c^m = 1,\ \forall m \in M \tag{13}$$

3）运检人员至少需要完成 1 处设备的运检任务后才会返回运检中心，即：

$$\sum_{i\in E} \sum_{j\in N} u_{ij}^{mk} \ge 1,\ \forall c \in C, k \in K_m, m \in M_c \tag{14}$$

4）所有运检人员从某处运检中心出发，完成 1 项或多项运检任务后需回到原运检中心，即：

$$\sum_{i\in E} u_{ic}^{mk} = \sum_{i\in E} u_{ci}^{mk},\ \forall c \in C, k \in K_m, m \in M_c \tag{15}$$

5）每台设备在规定时间内仅执行 1 次运检任务，且仅归属于 1 条运检任务链中，即：

$$\sum_{m\in M} \sum_{k\in K_m} \sum_{j\in N} u_{ij}^{mk} = \sum_{m\in M} \sum_{k\in K_m} \sum_{j\in N} u_{ji}^{mk} = 1,\ \forall i \in E \tag{16}$$

6）任何一条运检任务链中的运检耗时不能超过运检人员的单日最大工作时间，即：

$$\sum_{i,j\in N} t_{ij} u_{ij}^{mk} + \sum_{i\in E} s_i \le L_{\max},\ \forall c \in C, k \in K_m, m \in M_c \tag{17}$$

7）运检人员须在规定的运检任务时间要求内完成运检任务，即：

$$a_i^m, b_i^m \in [e_i, l_i]\quad \forall i \in E, \forall m \in M \tag{18}$$

8）连续 2 处设备间的运检顺序一致性满足：

$$a_i^m + s_i + t_{ij} \le a_j^m \tag{19}$$

式中：$L_{\max}$ 为运检人员的单日最大工时；s_i 为设备 i 对应运检任务所需的时间；t_{ij} 为设备 i、j 之间的通勤时间；$[e_i, l_i]$为设备 i 运检任务对应的时间窗口；a_i^m 和 b_i^m 分别为运检人员 m 到达和离开设备 i 所在地的时间。

3　变压器运检业务决策及规划方法

本文所构建的运检中心选址与运检任务决策模型分别属于单目标和多目标组合优化问题。综合考虑模型的复杂程度及求解难度，分别采用K-means-constrained 算法和改进多目标差分进化算法实现上述问题的求解。

3.1　运检中心规划模型求解方法

K-means 聚类算法以最小化数据点与聚类中心的距离为目标，实现聚类内数据点的高度相似性，但其无法独立控制每个聚类的大小，使得算法在处理具有多种约束的场景时效果不佳[19]。本文采用的K-means-constrained 算法是一种改进的 K-means 聚类实现，能够针对各个聚类的实际需求独立设定，确保满足特定的约束条件，在保持高效性的同时，提供了更灵活的聚类控制。其主要步骤如下所述。

步骤 1：通过随机选择、均匀选择等方式，确定出 K 个数据点作为初始聚类中心。

步骤 2：对于数据集中的每个数据点，计算其与所有聚类中心的实际距离，并在满足约束的情况下将其分配至距离最近的聚类中心，若不满足则分配至次近的聚类中心，依次类推。

步骤 3：计算每个聚类中所有数据点的平均值，并将其作为新的聚类中心。

步骤 4：重复步骤 2、3，直至聚类中心不再改变或达到最大迭代次数。

3.2　运检业务决策模型求解方法

差分进化算法(differential evolution，DE)是一种基于群体差异的启发式并行搜索算法，具有原理简单、控制参数少、全局搜索能力强以及收敛速度快等优点，广泛应用于解决复杂的非线性优化问题[20]。鉴于变压器运检业务决策问题的复杂性，本文提出了一种改进多目标差分进化(improved multi-objective differential evolution，IMODE)算法。该算法通过引入 Dijkstra 算法作为局部搜索引擎，迅速构建各节点之间的最优路径网络。同时，结合非支配排序和拥挤度机制[21]，实现运检任务在多个优化目标之间的最优平衡。

3.2.1　改进 Dijkstra 算法

传统 Dijkstra 算法主要用于构建网络指定节点之间的最短路径[22]，难以满足变压器运检业务规划模型中最短路径网络的构建需求。因此，本文基于Dijkstra 算法的寻优策略和算法逻辑进行改进，通过逐次遍历起始节点到剩余节点的所有路径，在迭代过程中对所有路径进行松弛操作来逼近任意 2 个节点之间的最短路径长度，其算法原理如图 2 所示。其中，节点 5 表示运检中心，其余节点表示待检修变压器；R_{ij} 为节点 i 和 j 之间的最短路径。为考虑地理条件对设备运检路径的影响，每条路径 n 包含距离和时间 2 种属性(d_{ij}^n，t_{ij}^n)。以节点 1 和 2 为例，若节点间存在 2 条路径时，优先比较 t_{12}^1 和 t_{12}^2 的数值，以较小者作为最短路径；若 2 个时间参数相同，再取 d_{12}^1 和 d_{12}^2 间的较小者表征最短路径，此时 2 节间的最短路径可表示为 R_{12}=(d_{12}^2，t_{12}^2)。同理，根据图 2 所示网络即可得到任意节点 i 和 j 的最短路径。

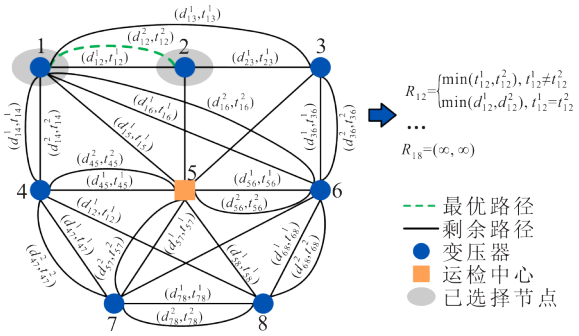


图 2　改进 Dijkstra 算法基本原理

Fig.2　Fundamental principle of the improved Dijkstra's algorithm

3.2.2　改进多目标差分进化算法

在变压器运检任务的优化过程中，传统算法可能面临“早熟”收敛和陷入局部最优等问题[23-25]，本文对算法作出了如下改进。

1）染色体编码。本文设计的双层混合编码结构如图 3 所示，第 1 阶段模型中，染色体长度为候选中心与待运检设备数量之和，前半部分以 0、1 编码表示候选中心是否被启用，后半部分以整数编码表示设备运检任务由编号对应的运检中心承担。针对第 2 阶段模型路径细化过程，为每段路径都设置 1 个染色体标签，染色体前 2 位分别表示该段路径的起始与终止的节点编号，第 3 位表示承担该段路径运检工作的中心编号，第 4、5 位表示该段路径的距离与时间成本，末尾剩余的染色体片段则表示截至当前各运检中心的累计运检天数。

2）控制参数自适应调整策略。变异因子 F 和交叉因子 C_R 显著影响 MODE 算法的收敛效率，当两者取值较大时，可以拓展算法的搜索空间，但可能导致算法收敛速度变慢，全局最优解精度降低；

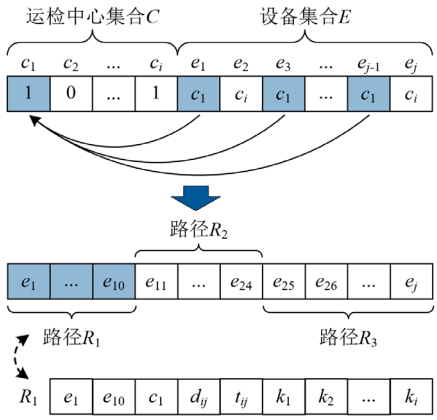


图 3 染色体编码方法

Fig.3 Chromosome encoding scheme

较小时则有助于提升算法的局部搜索能力及收敛速度，但同时也增加了“早熟”的风险。为解决该问题，本文引入了控制参数自适应调整策略，使得算法在迭代初期能够维持良好的种群多样性，并在迭代后期聚焦于局部区域收敛，其更新规则为：

$$F = F_0 \cdot 2^{e^{1-\frac{t_{\max}}{t_{\max}+1-t}}} \tag{20}$$

$$C_R = \frac{1}{2}\left(1+\cos\left(\frac{10\pi f_{\text{FLOOR.MATH}}(t,10)}{t_{\max}}\right)\right) \tag{21}$$

式中：F_0为初始变异因子；t为当前迭代次数，$t_{\max}$为最大迭代次数；$f_{\text{FLOOR.MATH}}(t, 10)$表示向下取整到10的倍数，即每迭代10次更新1次交叉因子。

基于 K-means-constrained 算法和改进 MODE 算法，本文所构建的变压器运维检修业务决策模型的求解流程如图 4 所示。

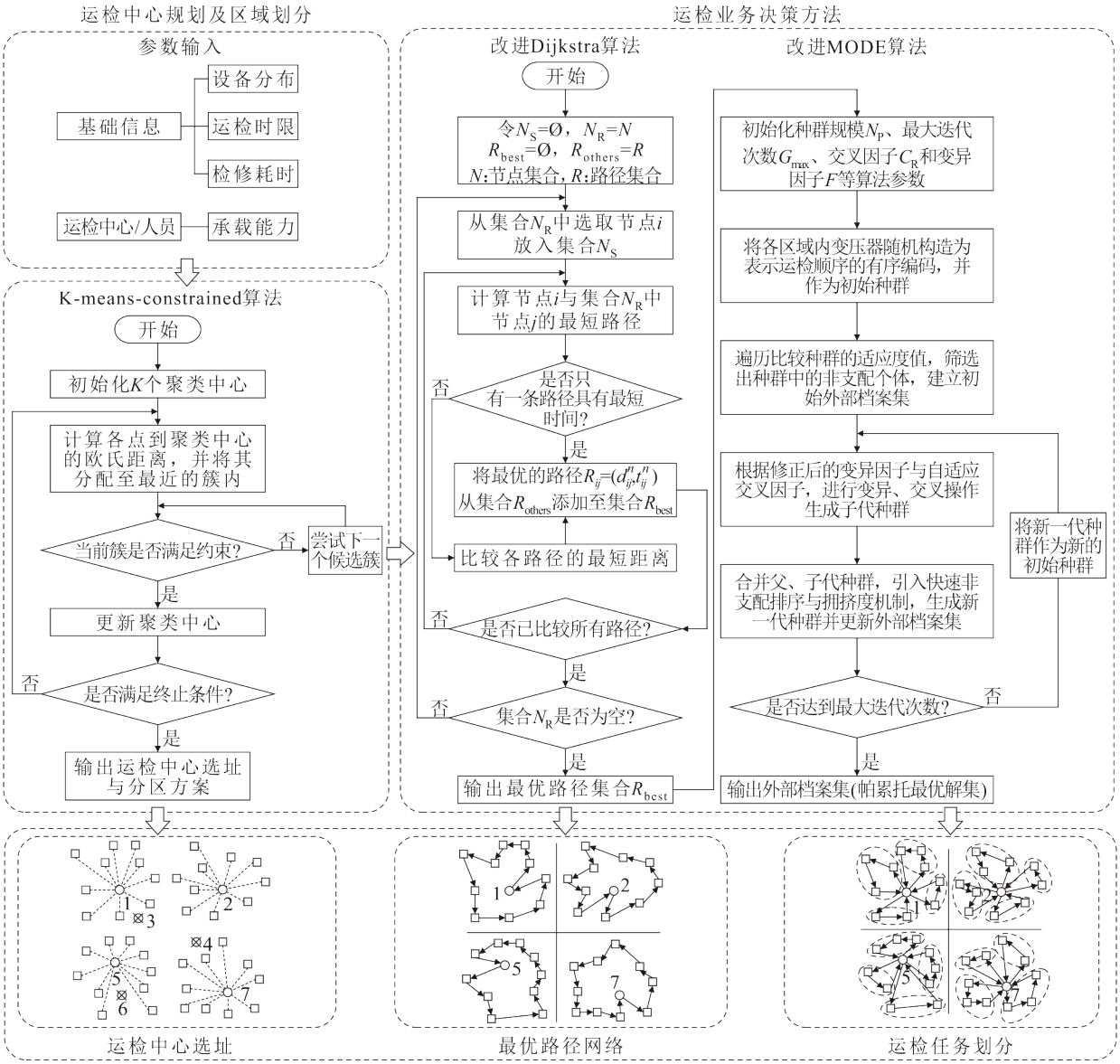


图 4 变压器运检业务决策模型求解流程

Fig.4 Solution process for transformer operation and maintenance business decision-making model

4　算例分析

4.1　算例基础信息

基于某地区电网的实际情况，本文开展了所述模型与方法的可行性验证及分析，选取该区域内的 5 处 500 kV、10 处 220 kV、15 处 110 kV 及 20 处 35 kV 变电站，并预先设定 6 处候选运检中心，其位置分布如图 5 所示。假设运检人员每天最大工作时间为 8 h，结合运检中心的人员情况，各候选中心的工作承载能力设定为[12，17，20，15，10，16]。结合电压等级与健康状态等因素，不同变电站内变压器的运检时限与检修耗时等参数如附录 A 中表 A1 所示。同时，通过地理信息系统导入设备位置和交通信息，确定各节点间的距离和时间成本。

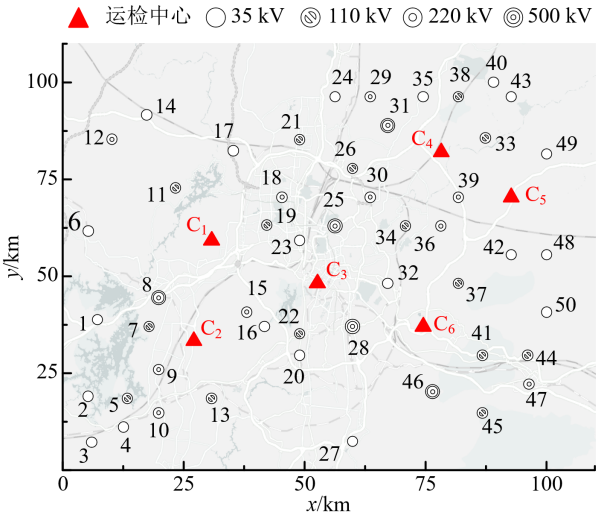


图 5　变压器及运检中心分布情况

Fig.5　Distribution of transformers and operation and maintenance centers

4.2　算例结果分析

基于上述基础信息，采用 K-means-constrained 算法求解运检中心选址及分区，检修区域的动态划分过程如图 6 所示。模型求解初期，已选用的运检中心(图 6 实心三角形)并未发生变化，但各色块所对应的运检区域则随着动态优化过程出现了明显的变化。随后，通过启用一些新的备选中心（图 6 空心三角形），尝试获取运检中心与各变压器间的最短检修距离。此时，运检中心由 1、2、3、4 更新为 2、3、4、6，并通过继续优化得到了最终的运检中心选址与分区方案。

在确定运检中心选址与区域划分之后，根据设备的运检时限要求进一步优化运检计划。由于 IMODE 算法在针对多个目标函数时无法得到唯一的最优解，故生成由 30 种最优运检方案组成的 Pareto 最优解集，如图 7 所示。

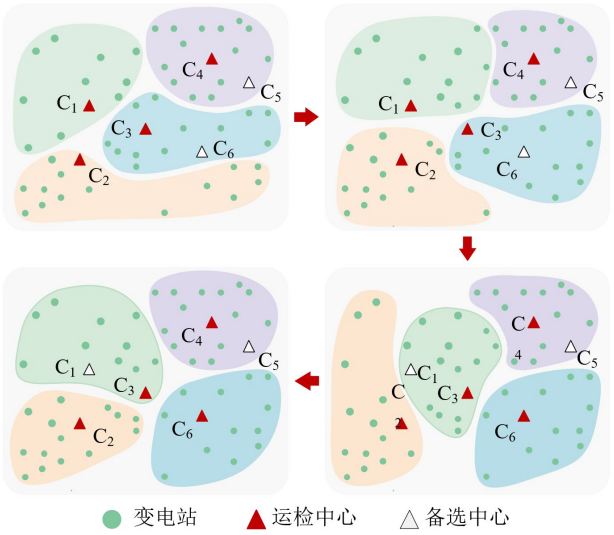


图 6　运检区域动态划分

Fig.6　Dynamic division of inspection area

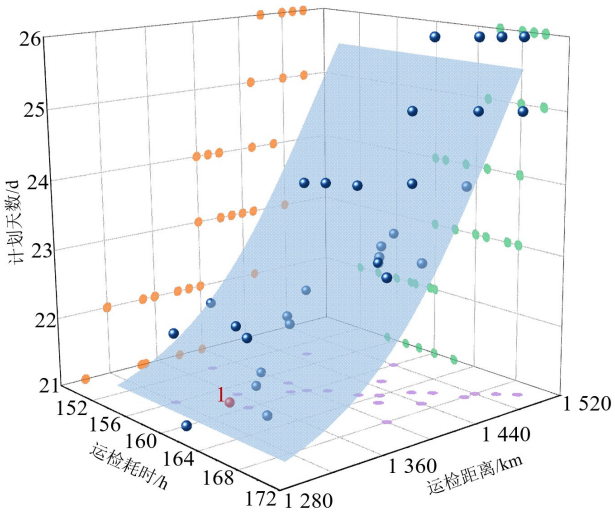


图 7　Pareto 最优解集

Fig.7　Pareto optimal solution set

根据图 7 可知，在运检计划优化过程中，运检耗时随着运检距离的增加而延长，计划天数则受到两者的共同影响，即运检距离较长且耗时较高的方案会导致计划天数的增加。然而在资源受限时，通过合理优化调度策略，能够在避免运检距离和运检耗时过度增长的同时有效降低计划天数。由此可见，3 个目标函数之间呈现出复杂的非线性制约关系，存在多种权衡与优化的可能。以图 7 中的 Pareto 前

沿点 1 为例，其对应的运检路径如图 8 所示，具体运检计划见附录 A 中表 A2。其中，运检任务总耗时为 158.41 h，运检距离为 1 346.64 km，各运检中心的任务执行天数为 5 d 或 6 d。该方案在满足全域设备覆盖的前提下，各中心所负责设备的运检任务均可在规定时限内完成，并以较短的运检距离与运检耗时实现了最短的总计划天数。

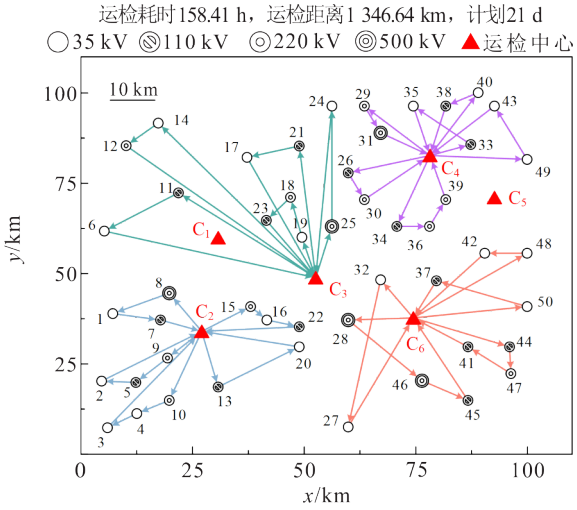


图 8 前沿点 1 对应的运检路线

Fig.8 Maintenance route corresponding to frontier point 1

为进一步验证本文算法在处理设备突发情况的有效性，构建以下场景：在第 1 天时，原归属于 2 号中心第 5 天计划的 22 号设备突发缺陷，需在 24 h 内应急检修。然而，受限于中心运检人员承载能力和其余设备检修时限的约束，其内部针对故障设备的运检任务无法进行有效调整，因此须将该任务重新分配，更新后的运检计划如图 9 与表 1 所示。对比更新前后运检计划可知，故障设备的运检任务已分配至 3 号中心的第 2 天工作计划中，更新后的路径虽然导致了总计划天数的增加，但运检距离与运检耗时差异不大，说明本文方法在面对突发检修任务时具有良好的动态响应能力与应急处理机制。

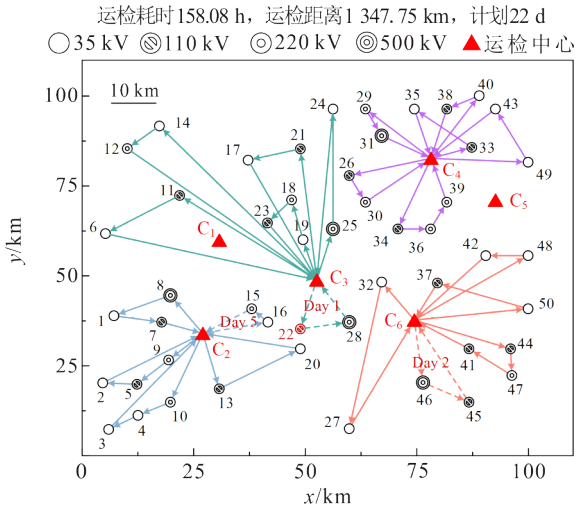


图 9 更新后的运检路线

Fig.9 Updated maintenance route

表 1 更新后的运检计划

Table 1 Updated maintenance schedule

中心	第 k 天	运检路线	运检距离/km	运检耗时/h	操作
C_2	5	C_2-15-16-C_2	32.30	5.15	修改
C_3	2	C_3-22-28-C_3	36.26	5.01	新增
C_6	2	C_6-46-45-C_6	53.04	5.04	修改

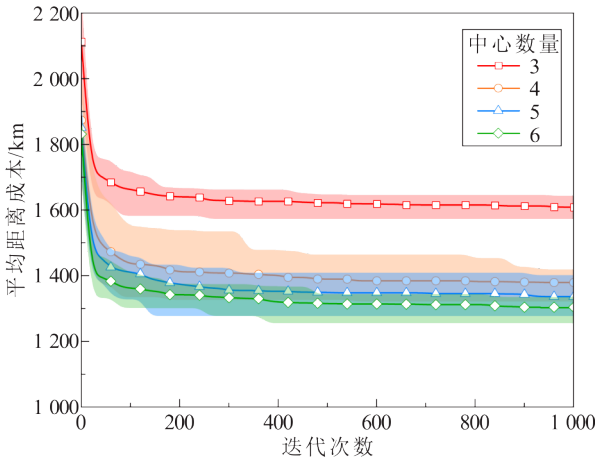


图 10 运检中心数量对求解结果的影响

Fig.10 Influence of the number of operation and maintenance centers on the solution results

4.3 对比研究

4.3.1 影响因素研究

本文所述模型中运检中心数量是影响运检任务分区和运检任务规划决策的关键因素。本文结合多次对比分析，得到了不同运检中心数量影响下的平均检修距离成本，其结果如图 10 所示。

从图中可以看出，仅选择 3 个运检中心时，由于受到中心承载能力的限制，导致最终的平均距离成本超过 1 600 km。当运检中心增加至 4 个时，平均距离成本降低约 23.6%。运检中心的数量继续增加，平均距离成本仅表现出略微降低，说明 4 个运检中心的承载能力已经足够满足该地区日常运检任务的需求。因此，通过合理规划运检中心的位置，在少量运检中心的数量下即可满足区域内设备的总体检修需求，降低设备检修成本。

4.3.2　算法对比研究

为验证本文所提算法的有效性，针对求解质量、求解效率及稳定性 3 个维度，对传统 MODE 算法、NSGA-II算法以及 IMODE 算法进行对比分析。其中，稳定性评价采用统计学中的变异系数(coefficient of variation，CV，用 V_C 表示)指标[26]，变异系数越大则表明算法运行结果差异性越大，其计算式为：

$$V_C=\frac{\sigma}{\mu}\times 100\% \tag{22}$$

式中：μ 为均值；σ 为标准差。其分别反映数据分布的集中趋势与离散程度。3 种算法性能对比结果如表 2 与图 11 所示，其中各算法的目标函数值及求解时间均取 50 次独立运行结果的平均最优值，图中 V_{C1}、V_{C2}、V_{C3} 分别对应运检耗时、运检距离与计划天数 3 个优化目标的变异系数。

表 2　不同算法的求解结果及性能对比

Table 2　Solution results and performance comparison of different algorithms

算法	运检距离/km	运检耗时/h	计划天数/d	求解时间/s
IMODE	1 326.8	151.1	21.1	543.5
MODE	1 447.6	165.8	23.5	498.3
NSGA-II	1 385.2	162.5	22.8	580.2

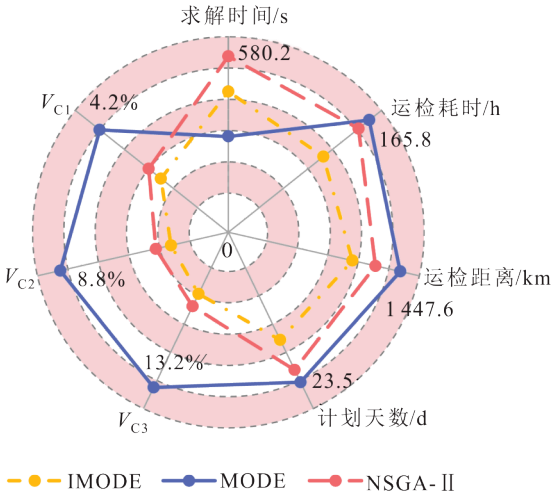


图 11　基于不同算法的求解结果对比

Fig.11　Comparison of solution results based on different algorithms

研究结果表明：在 3 种算法中，MODE 算法展现出了最快的求解速度，能够迅速定位优质解域，但其稳定性与 NSGA-II算法存在明显差距，暴露了传统差分策略在复杂约束下的波动性缺陷。相比之下，IMODE 算法得到的运检距离与耗时均有显著下降，并能够有效抑制算法波动，且求解速度较 NSGA-II算法提升 6%以上，稳定性指标较标准 MODE 改进 40%以上。综上所述，本文算法在各项指标上均出现较优结果，能够对多个目标函数进行均衡求解，保证良好的求解效率与稳定性，验证了其在变压器分区管理及运检决策问题中的有效性。

5　结论

针对当前变电设备运维检修业务缺乏完善管理及决策机制的问题，本文提出了一种考虑多因素影响的变压器差异化运维检修规划方法，以提升设备管理与决策的智能化水平，降低设备运维检修成本。本文的主要工作及结论如下所述。

1）综合考虑地理分布、运检中心承载能力与运维检修时限要求等因素，并兼顾设备重要程度与健康状态的差异性，提出了考虑多因素影响的变压器检修决策方法。

2）构建了变压器分区管理与运维检修业务决策的两阶段优化模型，实现了多运检中心选址与分区管理，并针对各区域内设备进一步开展运检业务排序及路径优化，有助于设备运维检修计划的精确制定。

3）提出了一种基于 Dijkstra 算法路径引导机制的改进多目标差分进化算法，在提供最短运检路径网络的同时，结合非支配排序与拥挤度机制，确保帕累托最优解集具有良好的分布性能，实现运检计划的最优化。算例分析结果表明，该算法能够高效求解设备检修决策问题，可满足现场应用需求。

本文提出了一种面向区域电网的变压器分区管理及运检任务决策方法，可实现兼顾设备管理要求、检修成本及设备可靠性的运检任务优化排序。目前，该方法已成功应用于油中溶解气体离线检测等不停电业务，后续考虑设备停电损失影响等因素可进一步实现停电检修任务的决策优化。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1]　杨挺，耿毅男，郭经红，等. 人工智能在新型电力系统智能传感、通信与数据处理领域应用[J]. 高电压技术，2024，50(1)：19-29.
YANG Ting, GENG Yinan, GUO Jinghong, et al. Applications of artificial intelligence in sensing, communication, and data processing in the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 19-29.

[2] 蒲天骄，韩笑. 新型电力系统中人工智能应用的关键技术[J]. 电力信息与通信技术，2024，22(1)：1-13.
PU Tianjiao, HAN Xiao. Research on key technologies in the application of artificial intelligence in new type power systems[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(1): 1-13.

[3] 李鹏，赵亚汝，范须露，等. 适用于规划-运行两阶段的配电网可靠性等级划分及评估方法[J]. 高电压技术，2024，50(5)：2042-2051.
LI Peng, ZHAO Yaru, FAN Xulu, et al. Reliability classification and evaluation method of distribution network suitable for planning-operation two stages[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2042-2051.

[4] 严英杰，盛戈皞，王辉，等. 基于高维随机矩阵大数据分析模型的输变电设备关键性能评估方法[J]. 中国电机工程学报，2016，36(2)：435-445.
YAN Yingjie, SHENG Gehao, WANG Hui, et al. The key state assessment method of power transmission equipment using big data analyzing model based on large dimensional random matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 435-445.

[5] 刘畅宇，王小君，尚博阳，等. 基于渐进式认知发现的新型配电网故障定位方法[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1156-1164.
LIU Changyu, WANG Xiaojun, SHANG Boyang, et al. Fault location method based on stepwise cognition-discovery in new distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1156-1164.

[6] 周远翔，陈健宁，赵亮，等. 电力设备数智化发展历程与大语言模型智能体应用展望[J]. 高电压技术，2025，51(8)：4089-4109.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHAO Liang, et al. Evolution of digitization and intelligence of power equipment and prospects for application of large language model based agent[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4089-4109.

[7] 许易经，韩学山，杨明，等. 基于设备在线监测的电网状态检修决策模型[J]. 电力系统自动化，2020，44(23)：72-81.
XU Yijing, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Decision-making model of condition-based maintenance for power grid with equipment on-line monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 72-81.

[8] 赵勇彪，张雨柔，邵晓琪，等. 基于 SCAS-YOLO 的变压器电力设备渗漏油检测研究[J]. 电力信息与通信技术，2025，23(8)：41-52.
ZHAO Yongbiao, ZHANG Yurou, SHAO Xiaoqi, et al. Study on oil leakage detection of transformer power equipment based on SCAS-YOLO[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2025, 23(8): 41-52.

[9] 张炜，王佳琳，张镱议，等. 基于役龄回退分析的电力设备检修决策方法研究[J]. 电力工程技术，2020，39(4)：201-206.
ZHANG Wei, WANG Jialin, ZHANG Yiyi, et al. The equipment maintenance decision method based on the analysis of the age reduction[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 201-206.

[10] 高云飞，胡钰林，刘鸣柳，等. 多无人机输电线路巡检联合轨迹设计方法[J]. 电子与信息学报，2024，46(5)：1958-1967.
GAO Yunfei, HU Yulin, LIU Mingliu, et al. Joint multi-UAV trajectory design for power line inspection[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(5): 1958-1967.

[11] 敖蕾蕾，王慧芳，张弛，等. 基于 D-S 证据理论的输变电设备状态检修多目标群决策[J]. 电网技术，2014，38(6)：1627-1633.
AO Leilei, WANG Huifang, ZHAGN Chi, et al. Multi-objective and group decision-making research based on D-S evidence theory in condition-based maintenance for transmission and transformation equipment[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1627-1633.

[12] 文志强，舒乃秋，彭辉，等. 输电线路差异化运维计划优化[J]. 电网技术，2015，39(4)：1101-1108.
WEN Zhiqiang, SHU Naiqiu, PENG Hui, et al. Differentiated operation and maintenance scheduling optimization of transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1101-1108.

[13] 杨志淳，沈煜，杨帆，等. 周期及路径综合优化的配电设备巡检策略[J]. 高电压技术，2020，46(4)：1424-1433.
YANG Zhichun, SHEN Yu, YANG Fan, et al. Inspection strategy of distribution equipment for period and path comprehensive optimization[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1424-1433.

[14] 国家能源局. 油浸式变压器(电抗器)状态检修导则：DL/T 1684—2017[S]. 北京：中国电力出版社，2017.
National Energy Administration. Guide for condition based maintenance strategy of oil-immersed power transformers (reactors): DL/T 1684—2017[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2017.

[15] 国家能源局. 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则：DL/T 1685—2017[S]. 北京：中国电力出版社，2017.
National Energy Administration. Guide for condition evaluation of oil-immersed power transformers (reactors): DL/T 1685—2017[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2017.

[16] 廖才波，蒋子豪，杨金鑫，等. 变压器健康状态实时预警方法及可解释性分析[J]. 高电压技术，2025，51(10)：5155-5165.
LIAO Caibo, JIAGN Zihao, YANG Jinxin, et al. Real-time warning method and interpretability analysis of transformer health condition[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(10): 5155-5165.

[17] 国家能源局. 变压器油中溶解气体分析和判断导则：DL/T 722—2014[S]. 北京：中国电力出版社，2015.
National Energy Administration. Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil: DL/T 722—2014[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2015.

[18] 国家电网公司. 输变电设备状态检修试验规程：Q/GDW 1168—2013[S]. 北京：中国电力出版社，2013.
State Grid Corporation of China. Regulations of condition-based maintenance & test for electric equipment: Q/GDW 1168—2013[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2013.

[19] 董冰冰，李秉华，高常胜. 油纸绝缘缺陷局放 UHF 抗干扰定位及优化布置方法[J]. 电力工程技术，2024，43(1)：181-191.
DONG Bingbing, LI Binghua, GAO Changsheng. UHF anti-interference positioning and optimal layout method of oil-paper insulation defect partial discharge[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 181-191.

[20] FENG Z K, NIU W J, ZHOU J Z, et al. Scheduling of short-term hydrothermal energy system by parallel multi-objective differential evolution[J]. Applied Soft Computing, 2017, 61: 58-71.

[21] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[22] SHI Y H, LIN Y, LIM M K, et al. An intelligent green scheduling system for sustainable cold chain logistics[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 209: 118378.

[23] 陈昊，李琳，王亚琦，等. 多目标差分进化算法改进与电工钢片磁致伸缩模型参数辨识[J]. 中国电机工程学报，2024，44(5)：2047-2057.

CHEN Hao, LI Lin, WANG Yaqi, et al. Improvement of multi-objective differential evolution algorithm and parameters identification of magnetostriction model of electrical steel sheet[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 2047-2057.

[24] 程真，司赶上，李振钢，等. 基于自适应差分进化算法的 LED 光谱匹配[J]. 光学学报，2022，42(9)：0930004.
CHENG Zhen, SI Ganshang, LI Zhengang, et al. LED spectral matching based on adaptive differential evolution algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0930004.

[25] 肖鹏，邹德旋，张强. 一种高效动态自适应差分进化算法[J]. 计算机科学，2019，46(6A)：124-132.
XIAO Peng, ZOU Dexuan, ZHANG Qiang. Efficient dynamic self-adaptive differential evolution algorithm[J]. Computer Science, 2019, 46(6A): 124-132.

[26] 刘威，张东霞，丁玉成，等. 基于随机矩阵理论与熵理论的电网薄弱环节辨识方法[J]. 中国电机工程学报，2017，37(20)：5893-5901.
LIU Wei, ZHAGN Dongxia, DING Yucheng, et al. Power grid vulnerability identification methods based on random matrix theory and entropy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5893-5901.



廖才波(通信作者)
1989—，男，博士，副教授，硕导
主要从事输变电设备多物理场仿真分析及状态评估方面的研究工作
E-mail: lcb1752@126.com

LIAO Caibo
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



龚文豪
2000—，男，硕士生
主要从事输变电设备状态评估方面的研究工作
E-mail: 2351057852@qq.com

GONG Wenhao

收稿日期　2025-06-04　修回日期　2025-12-25　编辑　曾文君

附录 A

表 A1　变压器基本信息

Table A1　Basic information of the transformer

设备编号	电压等级/kV	运检时限/d	检修耗时/h	设备编号	电压等级/kV	运检时限/d	检修耗时/h	设备编号	电压等级/kV	运检时限/d	检修耗时/h
1	110	7	1	18	500	1	2	35	110	7	1.5
2	110	5	2	19	220	7	1	36	500	5	0.5
3	110	7	1	20	110	7	1.5	37	220	7	1.5
4	110	3	0.5	21	220	3	1.5	38	220	5	2
5	220	7	1	22	220	7	1.5	39	500	7	1
6	110	7	1	23	110	5	2	40	110	3	1
7	220	3	2	24	110	7	1.5	41	220	7	1
8	1 000	7	1.5	25	1 000	5	1	42	110	7	2
9	500	7	0.5	26	220	7	2	43	110	5	1
10	500	5	1.5	27	110	1	1	44	220	7	1
11	220	5	0.5	28	1 000	7	1.5	45	220	5	1
12	500	7	0.5	29	500	7	2	46	1 000	3	0.5
13	220	1	2	30	500	1	1.5	47	500	7	1.5
14	110	7	0.5	31	1 000	7	1	48	110	5	1.5
15	500	5	1	32	110	3	1	49	110	7	1
16	110	7	2	33	220	7	1.5	50	110	7	2
17	110	7	1	34	220	3	1.5	-	-	-	-

表 A2　前沿点 1 对应的运检计划

Table A2　Maintenance schedule corresponding to frontier point 1

中心	计划天数	运检路线	时间窗口/h	运检距离/km	运检耗时/h
C_2	1	C_2-13-20-C_2	[C_2, 0.0]-[1.02, 3.02]-[4.42, 5.92]-[7.36, C_2]	57.96	7.36
	2	C_2-10-4-3-C_2	[C_2, 0.0]-[1.33, 2.83]-[3.36, 3.86]-[4.37, 5.37]-[7.59, C_2]	68.91	7.59
	3	C_2-8-1-7-C_2	[C_2, 0.0]-[0.86, 2.36]-[3.27, 4.27]-[4.97, 6.97]-[7.70, C_2]	47.95	7.70
	4	C_2-9-5-2-C_2	[C_2, 0.0]-[0.70, 1.20]-[1.85, 2.85]-[3.38, 5.38]-[7.11, C_2]	54.22	7.11
	5	C_2-15-16-22-C_2	[C_2, 0.0]-[0.84, 1.84]-[2.18, 4.18]-[4.67, 6.17]-[7.59, C_2]	46.32	7.59
C_3	1	C_3-19-18-23-C_3	[C_3, 0.0]-[1.00, 2.00]-[2.42, 4.42]-[5.07, 7.07]-[7.73, C_3]	49.11	7.73
	2	C_3-21-17-C_3	[C_3, 0.0]-[2.07, 3.57]-[4.34, 5.34]-[7.44, C_3]	89.00	7.44
	3	C_3-30-20-C_3	[C_3, 0.0]-[0.90, 1.90]-[3.72, 5.22]-[7.91, C_3]	97.37	7.91
	4	C_3-25-24-C_3	[C_3, 0.0]-[1.75, 2.25]-[3.65, 4.65]-[7.27, C_3]	103.82	7.27
	5	C_3-14-12-C_3	[C_3, 0.0]-[3.03, 3.53]-[4.05, 4.55]-[7.60, C_3]	118.81	7.60
C_4	1	C_4-26-30-C_4	[C_4, 0.0]-[1.82, 3.82]-[4.62, 6.12]-[7.90, C_4]	43.99	7.90
	2	C_4-34-36-39-C_4	[C_4, 0.0]-[1.92, 3.42]-[4.15, 4.65]-[5.46, 6.46]-[7.58, C_4]	45.76	7.58
	3	C_4-40-38-C_4	[C_4, 0.0]-[2.13, 3.13]-[3.94, 5.94]-[7.46, C_4]	44.61	7.46
	4	C_4-49-43-C_4	[C_4, 0.0]-[2.16, 3.16]-[4.78, 5.78]-[7.85, C_4]	58.46	7.85
	5	C_4-29-31-C_4	[C_4, 0.0]-[2.07, 3.57]-[4.38, 5.88]-[7.19, C_4]	41.92	7.19
	6	C_4-33-35-C_4	[C_4, 0.0]-[1.01, 2.51]-[4.16, 5.66]-[7.18, C_4]	41.83	7.18
C_6	1	C_6-32-27-C_6	[C_6, 0.0]-[0.88, 1.88]-[4.59, 5.59]-[7.75, C_6]	86.32	7.75
	2	C_6-28-46-45-C_6	[C_6, 0.0]-[0.97, 2.47]-[4.01, 4.51]-[5.28, 6.28] -[7.94, C_6]	74.17	7.94
	3	C_6-48-42-C_6	[C_6, 0.0]-[2.05, 3.55]-[4.03, 6.03]-[7.72, C_6]	63.31	7.72
	4	C_6-50-37-C_6	[C_6, 0.0]-[1.67, 3.67]-[4.97, 6.47]-[7.33, C_6]	57.48	7.33
	5	C_6-44-47-41-C_6	[C_6, 0.0]-[1.48, 2.48]-[2.97, 4.47]-[5.25, 6.25] -[7.19, C_6]	55.30	7.19