

文章编号: 1671-6612 (2024) 06-743-10

基于kmeans聚类的主变压器室复合通风运行优化节能研究

肖波¹ 郑月松¹ 王晓玉¹ 王文峰¹ 张萍² 孟华² 阮应君²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院 郑州 510000;

2. 同济大学机械与能源工程学院 上海 201804)

【摘要】 针对郑州市110kV全户内变电站主变压器室的既有通风方式进行运行优化节能研究。基于前期自然通风与机械通风优化设计的研究,提出一种复合通风系统的温度梯度优化运行策略。通过CFD模拟确定满足主变室安全温度所要求的自然通风与机械通风交互运行的启停温度及间隔时长。采用kmeans聚类对郑州市5~10月室外干球温度进行聚类,并采用频率统计折算法对簇的重心位置进行调整,优化温度梯度典型日的确定方法,用于复合通风系统的节能分析。结果表明,所提运行策略可使机械通风全年运行时长从2400h减少至362.7h,节能率约为84.9%,也比基于室外干球温度的通风策略节能约47.1%。本研究具有区域推广价值,对变电站通风系统的安全节能运行具有借鉴意义。

【关键词】 kmeans聚类; 110kV全户内变电站; 主变压器室; 复合通风运行策略; 节能分析
中图分类号 TU119 文献标志码 A

Energy Optimization of Hybrid Ventilation

Operation in Main Transformer Room Based on Kmeans Clustering

Xiao Bo¹ Zheng Yuesong¹ Wang Xiaoyu¹ Wang Wenfeng¹ Zhang Ping² Meng Hua² Ruan Yingjun²

(1. State Grid Henan Economic Research Institute, Henan, 510000;

2. School of mechanical engineering, Tongji University, Shanghai, 201804)

【Abstract】 This work focuses on the optimization of ventilation operation mode to save energy in the existing ventilation of the main transformer room at the 110kV indoor substation in Zhengzhou city. Based on the optimized layout of hybrid ventilation in our previous study, an operation optimization strategy of temperature gradient for a hybrid ventilation system is proposed. CFD simulation was used to determine the start-stop temperature and interval duration of natural and mechanical ventilation to meet the required safe working temperature of the main transformer room. Kmeans clustering was utilized to group the outdoor dry-bulb temperature from May to October in Zhengzhou. Combined with frequency analysis, the centroids of the clusters were adjusted to optimize the typical days. The energy-saving analysis indicated that with the optimized operation strategy, the annual operating time of mechanical ventilation is reduced from 2400h to 362.7h, achieving an energy-saving rate of approximately 84.9%. And a rate of 47.1% around compared to ventilation strategies based on outdoor dry bulb temperature. The operation strategy is expected to have reference for the safe and energy-saving operation of substation ventilation systems with regional versatile value.

【Keywords】 Kmeans clustering; 110kV indoor substation; Main transformer room; Hybrid ventilation operation strategy; Energy-saving

基金项目: 国网河南省电力公司科技计划 (5217L023000A)

作者(通讯作者)简介: 肖波(1981.6-),男,硕士,正高级工程师, E-mail: 623566119@qq.com

收稿日期: 2024-05-15

0 引言

建筑节能是我国实现“双碳”目标的重要举措,其中建筑通风节能具有巨大潜力^[1]。针对住宅、公共建筑及工业建筑等,建筑通风节能研究通常包括系统设计优化及运行优化等^[2]。对于电力系统的变电站建筑,国外研究多关注电气设备的智能化与自动化,对通风系统设计及运行优化的研究相对匮乏^[3]。在我国,由于变电站建筑的通风设计通常按照一般公建规范进行,往往忽视变电站特点而存在较大的节能空间。在变电站等大型电力系统工业建筑中,常常存在多种热源,通常采用自然通风与机械通风相结合的系统设计,以排除站内大量余热。自然通风虽然具有投资少、运行经济等优势,但由于工业辅助用房或工艺条件限制等原因,致使实际变电站中的自然通风往往存在气流组织设计及进排风口布局不合理等问题,同时其易受室内外环境影响,稳定性不高,风量难以控制。所以单纯依赖风压和热压的自然通风散热方式远远无法满足变电站建筑的散热需求和安全标准^[4]。因此,优化自然通风与机械通风系统布局,并基于优化的气流组织流场及温度场分布,研究复合通风系统运行优化策略对于提高通风效率、降低能耗具有重要意义。

除了系统设计外,系统运行优化也是工业建筑通风节能的重要方面。苗轶^[5]等研究了煤矿通风系统的一些重要优化原则和方法,兼顾生产需求与能源节约、制定科学合理的优化方案、保证通风系统的可靠性和稳定性。安怡帆^[6]等针对高污染散发类工业建筑通风系统,提出一种间歇通风策略,基于当前室内污染物浓度而调控通风系统启停的运行策略,在保证室内空气质量的前提下节能达到44.2~62.3%。李建波^[7]等对某半户内变电站的通风散热进行优化研究,对五种工况下主变室的温度和流速分布进行模拟,并给出最优的主变室布局。然而,目前针对变电站的通风研究大多集中在通过优化室内气流组织分布、温度场及流场的特性以满足工艺要求、以及由此实现站的优化设计和优化布局方面,而对变电站通风系统进行运行优化的研究还很有限,尤其是在满足工艺要求的前提下,通过优化通风系统的运行策略以产生节能效益的研究还很少。鉴于当前变电站内的机械通风往往采用较为粗犷的一刀切运行方式,若能结合室外气象参数,对全户内自然通风与机械通风的交互运行展开优化和

调控研究,则势必对行业内节能减排大有裨益。

对变电站的通风系统进行优化运行研究,还需要对其节能效果进行科学准确地评估,这时,科学准确地选择典型日至关重要,它需要综合考虑当地典型气象数据的总量、分布特性、典型性及极端性等因素,以确保所选的典型日能够较好地表征原始数据的特征^[8]。常见典型日的选取方法有主观选择法^[9]、聚类法^[10]、抽样法^[11]和最优化选择法^[12]等。主观选择法易受主观因素影响,不适于大规模数据处理。抽样法能够直接从原始数据中抽取样本,简单快捷,但结果随机性大。最优化选择法针对优化目标和约束条件求解,可能涉及复杂的数学模型和计算过程。相比而言,聚类法具有客观性和系统性,能够通过对数据的统计分析和模式识别,自动生成具有代表性的典型日^[13],为克服其可能收敛于局部最优解而导致聚类结果不够理想的缺陷,研究者们又采用改进聚类法^[14]、集成法^[15]及后处理法^[16]等。孙中尉^[14]等通过改进 K-means 聚类选取风-荷典型日,用于风-荷波动特性的评估与电力系统静态稳定裕度的研究。刘倩颖^[17]等利用 kmeans 聚类算法与机器学习的 BP (Back Propagation) 多层前馈神经网络相结合,对建筑总用电和空调用电进行预测。综上,基于 kmeans 聚类与相关方法相结合能够获得代表性数据结果,有效反映数据的分布特征和变化趋势,使所确定的典型日更科学准确,从而能够对优化运行策略的节能效果进行更准确合理的评估。

本文以郑州市典型 110kV 全户内变电站主变压器室的通风散热情景为研究对象,在前期关于主变室“自然通风+机械通风”的复合通风系统优化设计研究基础上^[18],提出一种主变室复合通风系统的温度梯度运行优化策略;同时基于 kmeans 算法对郑州市室外逐时干球温度进行聚类分析,并采用频率统计折算法将聚类中心进行簇重心后处理调整,优化了温度梯度典型日的确定方法,以此对所提出的优化运行策略进行节能评估。

1 主变室既有通风系统的优化设计研究

本文作者前期已针对郑州市典型 110kV 全户内变电站主变室既有复合通风系统进行了优化设计研究^[18]。如图 1a,根据我国变电站防火安全要求,主变压器室与散热间间隔布置。在主变室中间位置布

置主变压器 (见图 1b、d), 其空载损耗 29.5kW, 满载损耗 209kW, 主变室实际最大散热量约 49.8kW。既有自然通风的进风口 (5m×2.1m) 及排风口 (6m×1m) 分别布置在同一侧墙面底部和上部

(见图 1c); 机械通风的排风口 (0.65m×0.65m) 设置在主变室屋顶 (见图 3a), 进风口与自然通风共用, 设计一台定风量轴流风机, 额定风量 20000m³/h。

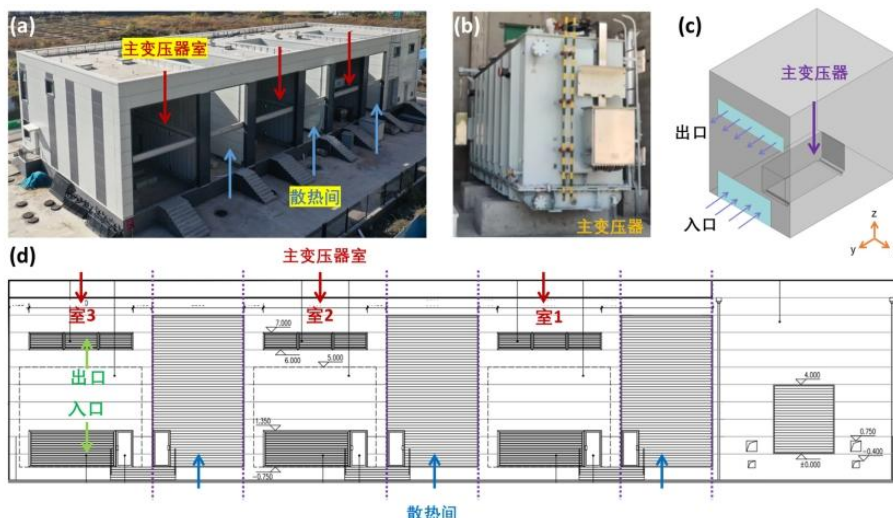


图 1 主变压器室布局及复合通风方式

Fig.1 Layout and ventilation mode of main transformer room

前期研究发现^[18], 上述既有自然通风系统的进、排风口布置不合理, 显著增加室内气流组织短路的风险 (见图 2a-f), 导致变压器附近局部高温, 威胁设备的安全运行。因此, 前期研究对其进行了优化设计, 给出保持既有进风口不变、而在屋顶均布六个排风口 (1m×1m, 见图 2g) 的自然通风优化设计布局, 这样可有效减少主变压器附近局部热量的积聚 (见图 2g-j), 使主变室内的排风温度从 43.39℃ 降至 39.60℃; 自然通风量从 10886m³/h 提高到 12700m³/h。因此, 充分利用热压, 在屋顶均

布排风口或许是自然通风设计的优选方案。

此外, 前期研究还对主变室的机械通风系统进行了优化设计研究, 分析比较了机械排风系统 (侧墙底部进风+屋顶机械排风, 见图 3a) 与机械送风系统 (侧墙机械送风+屋顶均布风口排风, 见图 3f) 对主变压器周围局部热量的排除效果。结果表明^[18], 机械排风系统在主变压器附近各监测点处的风温比机械送风系统平均约低 7.8%。由此可见, 机械排风系统较机械送风系统表现出更佳的散热能力, 是主变室机械通风设计的优选方案。

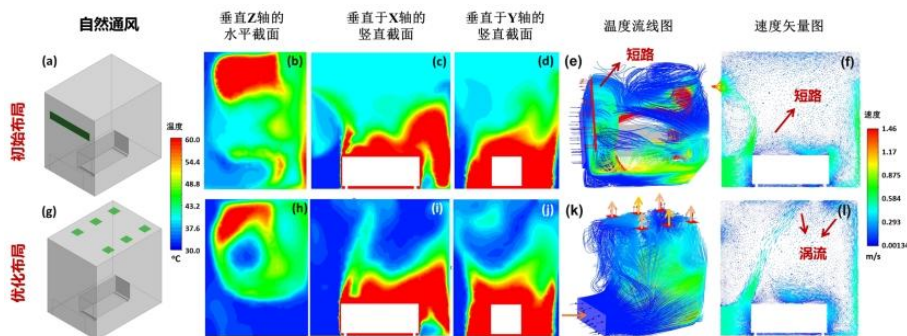


图 2 自然通风布局优化前后主变室温度云图、温度流线图及速度矢量图^[17]

Fig.2 Temperature cloud map, streamline, and velocity vector map of the main transformer room before and after layout optimization of natural ventilation^[17]

2 复合通风运行策略优化

当前主变室内的安全运行温度是不超过 45℃。

主变室既有通风方式为, 平时利用墙面百叶自然通风, 当室温达到 45℃ 时, 主变室侧墙上部的自然

排风口百叶关闭，同时启动机械排风；而当室温降到 35℃时，机械排风停止，自然排风电动百叶开启，恢复自然通风。机械排风全年开启时间为 5~10

月份，其中夏季全开，过渡季高温天气全开，该主变室机械排风每年的实际运行时间约 2400h。

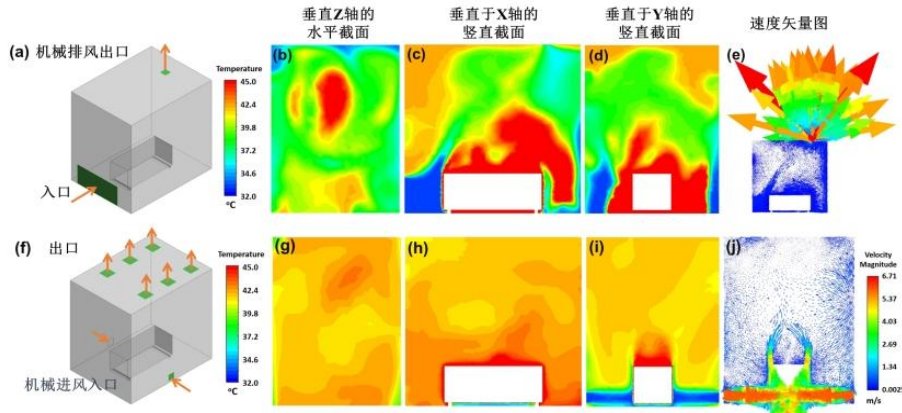


图 3 机械排风与机械送风模式下主变室温度云图及速度矢量图^[17]

Fig.3 Temperature cloud map and velocity vector map of the main transformer room under mechanical exhaust and mechanical supply modes^[17]

2.1 气候调研

为更准确地研究主变室全年自然通风与机械通风交互运行的优化策略，本研究首先调研了郑州地区在过去 13 年中每年 5~10 月份的气象数据。如图 4 所示，郑州市在这期间的最高温度为 37~41℃，月平均最高温度为 29~36℃，月平均最低温度为 10~13℃。为使后续分析更加科学合理，本文采用国际标准的典型气象年（TMY, Typical Meteorological Year）数据进行研究。

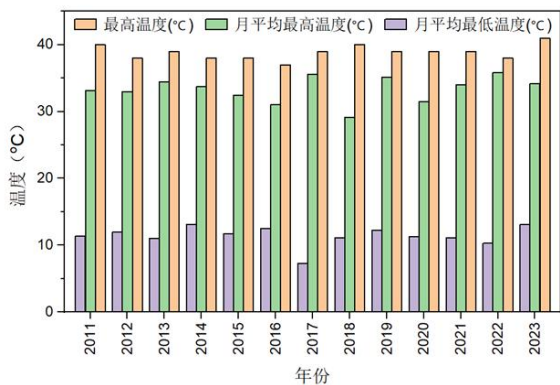


图 4 郑州市近年 5~10 月份室外干球温度

Fig.4 Outdoor dry-bulb temperature in Zhengzhou city from May to October in recent years

2.2 复合通风运行策略优化

通风效果往往与室外气象参数有密切关联。主变室既有的复合通风运行模式较为粗犷，缺乏对室外气象干球温度的准确分析，致使复合通风效果不

佳，导致能耗攀升和运行成本增加。本研究基于前期复合通风系统的优化设计，探索了在不同室外温度梯度下，自然通风与机械通风交互运行时，满足排风温度不超过 45℃要求的机械通风启闭温度及开启时间，提出一种新的温度梯度复合通风运行策略。通过延长自然通风时长，减少机械通风开启时长，以达到节能的效果。

根据郑州市 TMY 数据，本研究首先将 5~10 月室外干球温度 t 分成以下温度梯度区间，即 $t \leq 22^\circ\text{C}$ 、 $22 < t \leq 29^\circ\text{C}$ 、 $29 < t \leq 31^\circ\text{C}$ 、 $31 < t \leq 33^\circ\text{C}$ 、 $33 < t \leq 35^\circ\text{C}$ 及 $t > 35^\circ\text{C}$ 。其次分别研究不同温度梯度区间内，主变室的机械通风启闭温度，及与自然通风交互运行的时间间隔。

参考文献[19]中的方法，利用 Ansys 软件建立主变室通风系统三维模型。主变室的长宽高分别为 7.5m×10m×9.75m，位于中间位置的主变压器三维尺寸为 2.15m (X 轴)×5.56m (Y 轴)×3.05m (Z 轴)（见图 1），主变压器和散热器为分体式布置，设备底部距地面高度约 1.5m。建模时，忽略室内的绝缘子、端子箱、避雷针等次要结构，将主变压器本体简化成为 2.05m (X 轴)×5.38m (Y 轴)×3.05m (Z 轴)的长方体。设备发热量及通风系统相关参数见本文第一节。为保证数值模拟的收敛性和计算速度，对模型进行合理简化，采用四面体网格。本研究建立了 3 套不同网格数量的模型进行网格独立性验证，以研究网格疏密对模拟结果的影响。3 套网

格的数量分别为 35 万、80 万和 106 万, 均在主变压器处进行相同比例的局部加密。网格独立性验证采用 Roache^[20] 提出的网格收敛指数 (GCI, Grid Convergence Index) 进行评价, 其中安全系数及精度阶数分别取 3 和 2, 以室内平均温度为关键指标进行计算, 相邻数量网格的 GCI 分别为 0.1%, 0.2% 和 0.2%, 可见即使最粗糙的 35 万网格也足以满足室内温度的模拟精度需求, 进一步提升网格数量对计算结果精度的提升不大, 综合考虑后选取中等密度的 80 万网格体量, 网格质量 0.83, 基于质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程, 以及标准 $k-\epsilon$ 模型模拟室内空气温度。CFD 模拟结果如图 5 所示。图 5a

表明, 当室外温度低于 22°C 时, 自然通风散热方式可使主变室排风温度持续低于 35°C 以下, 满足通风要求; 相似地, 当室外温度升至 29°C 时, 尽管自然通风排风温度从 33°C 上升至 40°C 附近, 依然满足主变室通风要求 (见图 5b)。然而, 当室外温度进一步提高, 主变室将可能面临超温的风险。在室外温度高于 29°C 时, 通过自然通风散热, 主变室排风温度呈现急剧上升的趋势, 随着室内主变压器损耗热量的不断积累, 排风温度可能超过 45°C 。考虑到散热响应较排风温度响应缓慢, 因此在排风温度尚未达到 45°C 时, 开启机械通风, 以避免主变室超温预警。

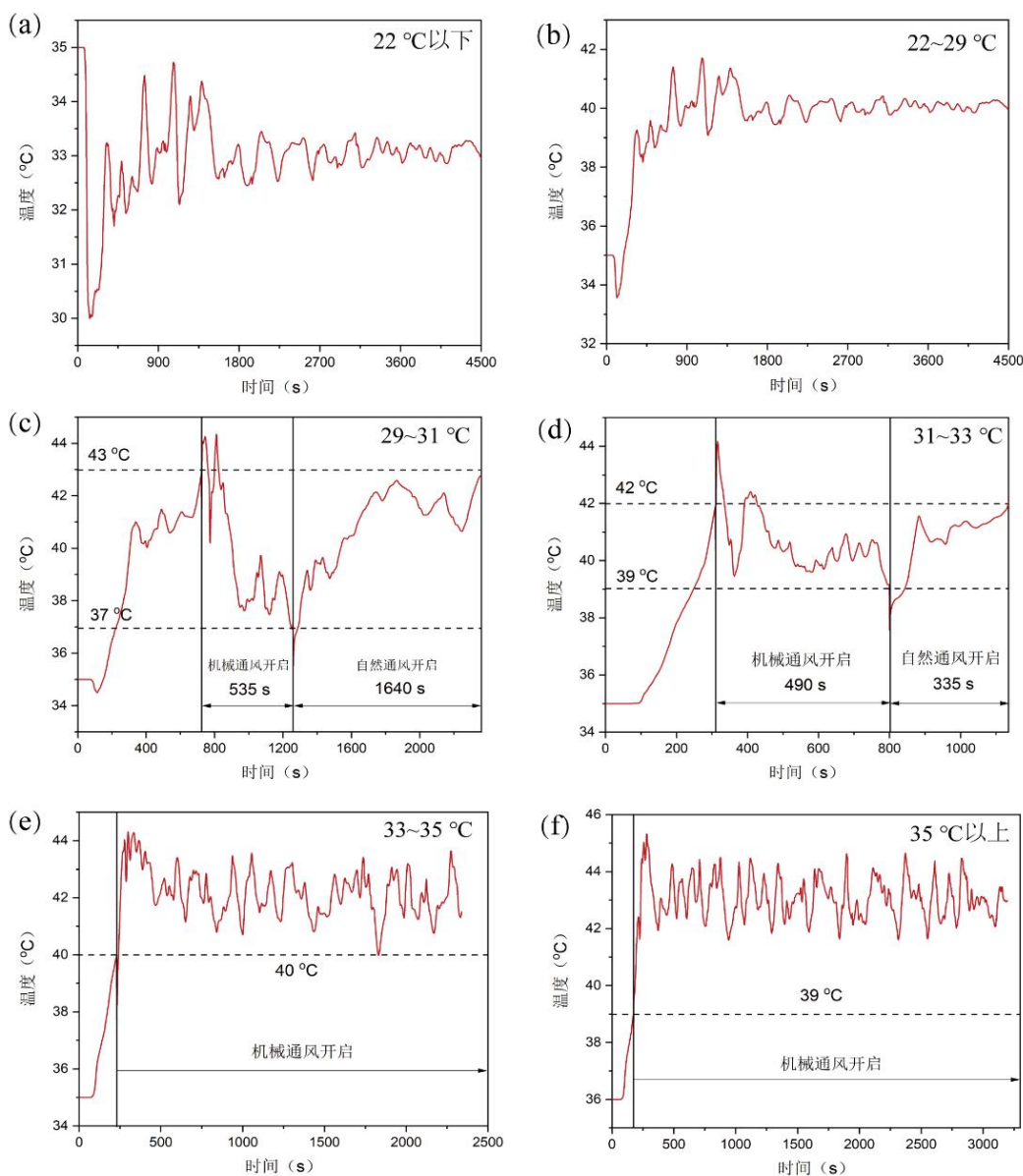


图 5 不同室外温度梯度下室内温度随时间变化

Fig.5 Variation of indoor temperature with time under different outdoor temperature gradients

根据 CFD 数值模拟结果(见图 5c),在 29~31℃ 的温度区间内,当自然通风排风温度达到 43℃ 时开启机械通风,室内温度降低至 37℃ 时,排风温度不再降低,即可关闭机械通风。这种方式可有效避免主变室超温,同时又可以减少机械通风开启时间。在该温度区间内,机械通风与自然通风开启的时长分别约是 535s 和 1640s,如表 1 所示。随着室外温度的升高,在 31~33℃ 的温度区间内,机械通风启闭温度有所降低,开启时长有所增加。启闭温度分别为 42℃ 和 39℃,机械通风和自然通风的交互开启时长分别约为 490s 和 335s(见表 1)。当温度区间在 33~35℃ 及 35℃ 以上时(见图 5e 和 5f),自然通风已无法使房间降温,需持续开启机械通风,以防止室内超温报警。这种基于室外温度梯度的复合通风运行策略如表 1 所示。

表 1 基于室外温度梯度的复合通风运行策略

Table 1 Hybrid ventilation operation strategy based on outdoor temperature gradient

室外干球温度 $t/^\circ\text{C}$	机械通风开启温度 $/^\circ\text{C}$	机械通风关闭温度 $/^\circ\text{C}$	机械通风时长 $/\text{s}$	自然通风时长 $/\text{s}$
$t \leq 29$	—	—	—	一直开启
$29 < t \leq 31$	43	37	535	1640
$31 < t \leq 33$	42	39	490	335
$33 < t \leq 35$	40	—	一直开启	—
$t > 35$	39	—	一直开启	—

3 典型日温度确定及分析

为对所提出的复合通风系统优化运行策略进行节能评估,针对郑州市不同季节的典型日甄选至关重要。根据郑州市 TMY 数据,本研究基于 kmeans 聚类对 5~10 月份室外逐时干球温度进行聚类,并采用频率统计折算法对聚类中心进行簇重心后处理调整,确保所选的典型日能够较好地表征原始气象温度的特征。

3.1 Kmeans 聚类原理^[21]

Kmeans 聚类算法通过衡量样本间的距离来确定它们的相似性,进而将样本集 x_1, x_2, \dots, x_n 划分为 m 个簇(分类数)。每个簇 C_i (第 i 类聚类中

心域)的均值向量为该簇的类中心 φ_i ,即:

$$\varphi_i = \frac{1}{|N_i|} \sum_{x \in C_i} x \quad (1)$$

其中: N_i 是簇 C_i 中的样本数。

Kmeans 算法的目标是寻找 m 个质心,以最小化平方误差 MSE (Minimum Squared Error)。平方误差 MSE 越小,则簇内样本的相似度越高。

$$MSE = \sum_{i=1}^m \sum_{x \in C_i} \|x - \varphi_i\|_2^2 \quad (2)$$

该算法首先从样本集 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 中,随机选择 M 个样本 $[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k]$ 作为初始质心,计算样本 x_i 与质心 φ_j 间的距离,并将样本分配给离它最近的质心所在的簇;随后,重新计算每个簇的质心,并不断重复这一过程,直到满足平方误差 MSE 小于预设阈值,以将样本集按期望分成 m 个簇。

3.2 最佳聚类数的确定

原始数据集为郑州市 5~10 月逐时室外干球温度,共计 4416 条数据。以日期为列向量、时刻为行向量组成 184×24 的矩阵,采用 kmeans 聚类算法,利用 Python 中 sklearn 库的 Kmeans.inertia 方法确定聚类值。该方法类似于损失函数,其值越小表示类自身越紧密,类与类之间越清晰,聚类效果越好。将计算结果绘制成手肘图,如图 6 所示,最佳聚类数为 4。

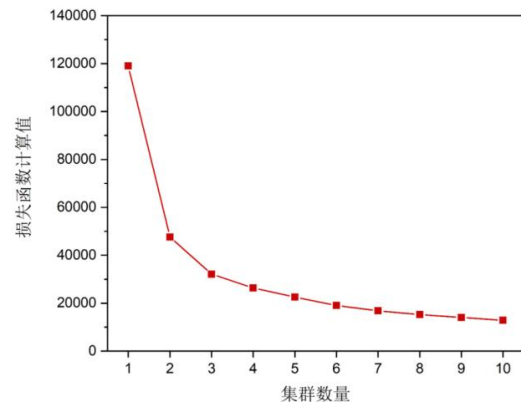


图 6 基于 kmeans 聚类算法手肘图

Fig.6 Elbow diagram based on kmeans clustering algorithm

3.3 聚类结果分析与优化

表 2 为郑州市室外逐时干球温度的聚类结果,共分为 A、B、C、D 四类,相同颜色和数字表示同一类。A 类主要集中在 6~8 月份及 9 月初几天,属于夏季高温天气,聚类中心位于 8 月 12 日(见表 3)。B 类主要集中在 5 月及 9~10 月,聚类中

心位于 5 月 25 日。C 类的分布较为分散, 从 5 月到 10 月均有出现, 是次于 A 类的高温天气。D 类主要集中于 10 月, 聚类中心为 10 月 23 日。图 7 展示了这四类的室外逐时干球温度分布性状。从图中可见, 各类分布曲线随时间呈现相似的变化趋势, 且分布较为集中, 这表明采用上述 kmeans 聚类方法计算时, 类内差距较小, 而类间差异较大, 聚类结果合理。

从聚类分布可以看出, B 类和 D 类所对应的温

度相对较低, 属于过度季节。如图 8 所示, B 类的聚类中心是 5 月 25 日, 其温度变化范围为 14.2~26.2℃, 未超过 29℃; 同样, D 类的聚类中心为 10 月 23 日, 其温度变化范围为 12.3~17.6℃, 处于比 B 类更低的温度范围。从图 7 可见, 这两类的所有逐时温度均未超过 29℃, 说明聚类中心能够反映该类温度的数据特征, 因此对 B 类和 D 类, 可以将各自的聚类中心分别作为其典型日, 用于后续节能分析。

表 2 Kmeans 聚类结果

Table 2 Results based on kmeans clustering

月份	日期																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
5	B	B	B	C	B	B	C	C	C	B	B	C	C	B	B	B	D	B	C	C	C	B	B	B	C	A	C	A	A	C	
6	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	B	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
7	C	A	A	A	A	A	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	A	A	A	C	C	C	A	A	A	A	
8	A	A	A	C	A	A	C	A	A	A	A	A	C	C	C	C	A	A	A	C	C	C	C	A	A	A	A	A	C	C	C
9	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	C	B	B	B	D	B	B	B
10	D	B	B	B	D	D	D	D	D	D	B	B	B	B	B	D	D	B	D	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	D	D

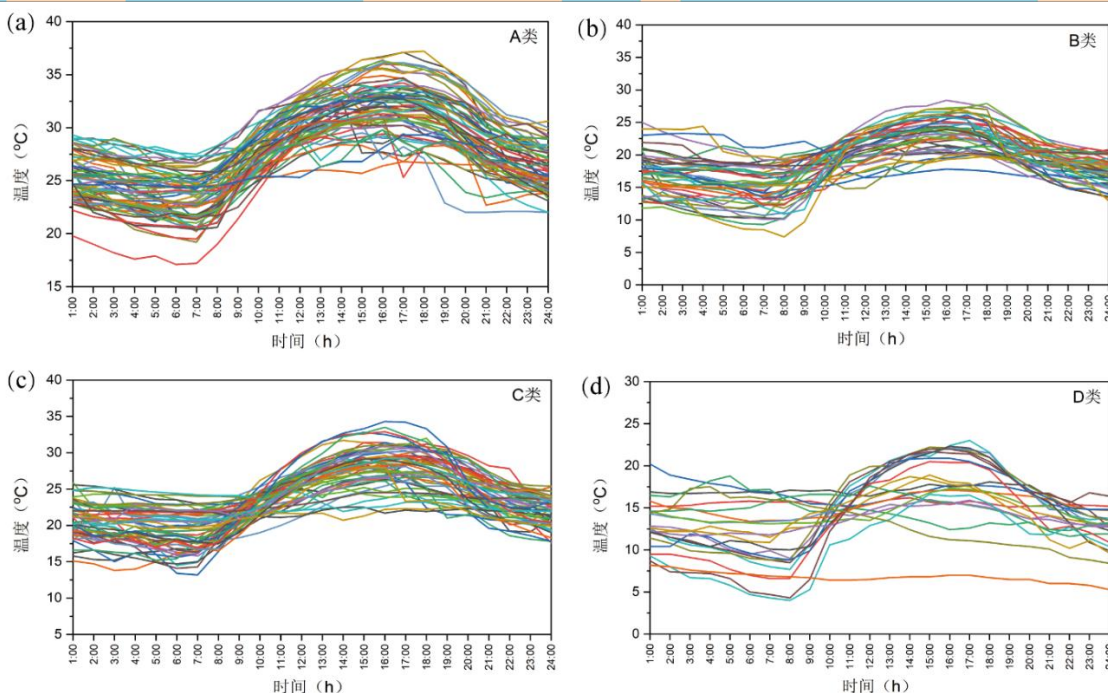


图 7 聚类结果汇总表

Fig.7 Summary of cluster results

表 3 Kmeans 聚类结果汇总表

Table 3 Summary of kmeans cluster results

类别	A 类	B 类	C 类	D 类
样本个数	64	43	55	22
样本占比	34.78%	23.37%	29.89%	11.96%
聚类中心	8 月 12 日	5 月 25 日	7 月 8 日	10 月 23 日

不同于 B 类和 D 类, A 类与 C 类都属于高温天气, 聚类中心分别为 8 月 12 日和 7 月 8 日, 它们所对应的室外温度变化范围分别为 23.4~29.8℃和 20.9~29.3℃。从图 7 中可以看出, 这两类均有大量数据点处于 29~37℃ 的温度范围, 尤其是 A 类。因此, A 和 C 类的聚类中心并不适合作为这两类的典型日。

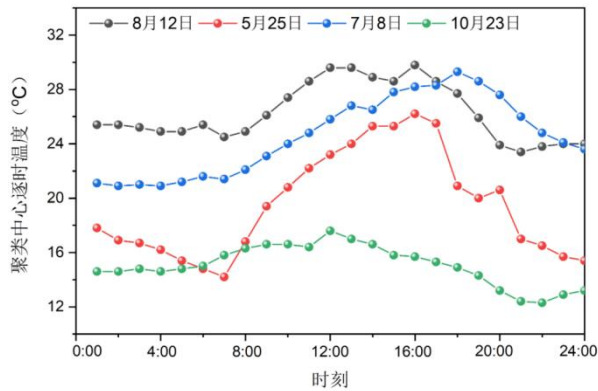


图 8 聚类中心逐时温度数据

Fig.8 Hourly temperature data of cluster centers

为了使所选择的 A 类和 C 类典型日能够更准确地反映聚类样本集中温度变化的数据特征, 本研究根据簇内样本的分布情况对簇的重心位置进行调整, 以更好地代表簇内样本的特点。通过 pathon 的爬虫软件对 A 类样本数据集的室外逐时干球温度进行统计, 发现处于 33°C 以上的数据点出现的频次为 133, 处于 31~33°C (不含 31°C) 的频次为 193, 而处于 29~31°C (不含 29°C) 的频次为 247, 低于或等于 29°C 的频次为 963, 根据 A 类样本集总数, 可计算出 A 类在各温度区间出现的频率, 由此折算出 A 类典型日中处于以上各温度梯度范围所出现的时间分别为 2h、3h、4h 和 15h。同样对 C 类典型日也做类似的折算处理, 如图 9 所示。

表 4 基于 kmeans 聚类结果优化后的温度分布情况表

Table 4 Optimized temperature distribution based on kmeans clustering

时间类别	1:00-11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00-24:00
A	$t \leq 29^\circ\text{C}$	$29 < t \leq 31^\circ\text{C}$	$31 < t \leq 33^\circ\text{C}$		$t > 35^\circ\text{C}$		$31 < t \leq 33^\circ\text{C}$		$29 < t \leq 31^\circ\text{C}$		$t \leq 29^\circ\text{C}$
B					29°C 及以下						
C		—			$29 < t \leq 31^\circ\text{C}$	$31 < t \leq 33^\circ\text{C}$	$29 < t \leq 31^\circ\text{C}$			$t \leq 29^\circ\text{C}$	
D					29°C 及以下						

4 复合通风运行策略节能分析

设置三种主变室的通风运行策略:

(1) 既有通风策略 I

按照变电站主变室的既有通风运行方式, 每年在 5~10 月份风机实际开启时长约为 2400h。

(2) 基于室外干球温度的通风策略 II

根据本文 2.2 的研究结果, 当室外 $t \leq 29^\circ\text{C}$ 时, 主变室内温度始终低于 45°C , 可以满足设备运行

要求。因此在 5~10 月期间, 设定: 当室外 $t \leq 29^\circ\text{C}$ 时关闭风机, 采用自然通风方式散热; 当室外 $t > 29^\circ\text{C}$ 时则关闭自然排风口, 开启风机机械排风。经统计, 郑州市在典型气象年 TMY 的 5~10 月期间, 需要开启风机的时长为 686h。

根据温度梯度样本点在 24 小时内分布占比情况, 发现 33°C 以上的温度主要集中在 15:00~16:00 时段, $31\sim 33^\circ\text{C}$ 温度范围主要集中在 14:00 及 17:00~18:00, $29\sim 31^\circ\text{C}$ 温度范围主要集中在 12:00~13:00 及 19:00~20:00; 而其他时间段温度处于 29°C 及以下。同样, C 类也采用相同的方法对数据进行了处理。 $31\sim 33^\circ\text{C}$ 温度范围主要集中在 16:00; $29\sim 31^\circ\text{C}$ 温度范围主要集中在 15:00 及 17:00; 而其他时间段温度处于 29°C 及以下。由此, 基于 kmeans 聚类及频率统计折算法所得的各典型日室外温度分布如表 4 所示。

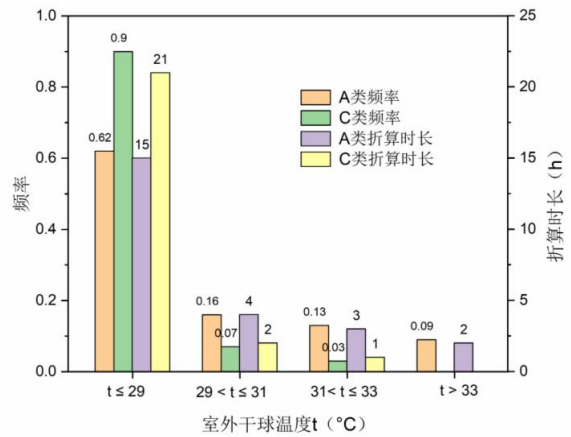


图 9 聚类中心不同温度区间的频率及折算时长

Fig.9 Frequency and conversion time duration of different temperature ranges in cluster centers

要求。因此在 5~10 月期间, 设定: 当室外 $t \leq 29^\circ\text{C}$ 时关闭风机, 采用自然通风方式散热; 当室外 $t > 29^\circ\text{C}$ 时则关闭自然排风口, 开启风机机械排风。经统计, 郑州市在典型气象年 TMY 的 5~10 月期间, 需要开启风机的时长为 686h。

(3) 复合通风运行策略 III

基于以上复合通风温度梯度运行策略, 并结合基于 kmeans 聚类结果优化的温度分布情况, 本研

究分析了优化后的郑州市5~10月份机械通风开启时长情况。A类样本集在29~31℃、31~33℃及33℃以上各温度范围的机械通风单日开启时长分别约为1.0、1.8及2.0h,日总时长约为4.8h。C类样本集在29~31℃及31~33℃温度范围的机械通风单日开启时长分别约为0.5及0.6h,日总时长约为1.1h。根据表3所示,A类和C类的样本数分别为64和55个,则A类和C类折算到年总时长分别约为307.2h和55.5h。因此,在5~10月期间需要开启风机的总时长约为362.7h。

由此可见,对于主变室的定频风机,运行策略III较策略I的年节能率约为84.9%;较策略II的节能率约为47.1%。

5 结论

对郑州市110kV全户内变电站主变压器室的复合通风运行策略进行优化研究,基于前期复合通风系统的优化设计研究,提出一种主变室复合通风系统温度梯度运行优化策略,通过CFD数值模拟确定了满足主变室安全温度要求的自然通风与机械通风交互运行的启闭温度以及运行时长。通过kmeans聚类对郑州市5~10月室外干球温度进行聚类,确定最佳聚类个数为4,采用频率统计折算法对簇的重心位置进行调整,以更准确地反映簇内样本温度变化的数据特征,进而确立温度梯度典型日,用于复合通风系统运行优化策略的节能分析。研究表明,文本提出的优化运行策略可使机械通风全年运行时长从既有的2400h减少至362.7h,定频风机节能率为84.9%;也比基于室外干球温度的通风策略节能约47.1%。

本研究虽然针对110kV全户内变电站中的单个主变室,但研究方法可推广至全户内变电站中的所有主变室以及其他运行方式相似的设备间,如电容器室等;也可推广至河南省以及黄河流域覆盖区内的全户内变电站,对变电站的安全节能运行具有借鉴意义。

本研究也存在不足之处,例如均为仿真模拟而缺乏现场实测数据。事实上,该变电站为全户内无人值守型,全站具有建筑BAS(Building automation system)系统,可实时采集各风系统、水系统及能耗运行参数,但由于该站仅运行不足一年,自动监测数据有限;随着运行时间的增长,后续可考虑利

用BAS生成的大数据,采用基于深度强化学习(DRL, Deep Reinforcement Learning)等黑箱方法对通风运行策略进行优化研究,也可以与本文的白箱模拟进行对比。

参考文献:

- [1] Zhang M, Han W, He Y, et al. Natural Ventilation for Cooling Energy Saving: Typical Case of Public Building Design Optimization in Guangzhou, China[J]. Applied Sciences-Basel, 2024,14(2):610.
- [2] Yin X, Muhieddeen M W, Razman R, et al. Multi-objective optimization of window configuration and furniture arrangement for the natural ventilation of office buildings using Taguchi-based grey relational analysis[J]. Energy and Buildings, 2023,296:113385.
- [3] Dhanamjayulu C, Sanjeevikumar P, Muyeen S M. A structural overview on transformer and transformer-less multi level inverters for renewable energy applications [J]. Energy Reports, 2022,8:10299-10333.
- [4] Rios R G, Garelli L, Storti M, et al. Numerical and experimental thermo-fluid dynamic analysis of a power transformer working in ONAN mode[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,112:1271-1280.
- [5] 苗轶.煤矿通风系统运行与维护优化[J].能源与节能, 2023,(9):219-221.
- [6] 安怡帆.工业厂房全面通风排污系统间歇运行策略的优化研究[D].西安:西安建筑科技大学,2023.
- [7] 李建波,陈阳,汤龙华,等.半户内变电站通风散热的数值模拟及优化研究[J].能源研究与利用,2024,(2): 15-20.
- [8] 郭浩泽,朱晨烜,张贻山,等.一种基于改进模糊聚类算法的自适应典型日选取方法[J].智慧电力,2022,50(1): 60-67.
- [9] 刘娇扬,郭力,杨书强,等.配电网中多光储微网系统的优化配置方法[J].电网技术,2018,42(9):2806-2815.
- [10] 欧雪梅,王亮,王曦,等.基于灰色关联-聚类分析的办公建筑分类与能耗基准线研究[J].制冷与空调,2021, 35(3):389-394.
- [11] Zhu J, Zhang Y. Probabilistic load flow with correlated wind power sources using a frequency and duration method[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2019,13(18):4158-4170.

- [12] Poncet K, Hoschle H, Delarue E, et al. Selecting Representative Days for Capturing the Implications of Integrating Intermittent Renewables in Generation Expansion Planning Problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(3):1936-1948.
- [13] 侯若松,杨书强,郭力.微电网的典型日选取方法[J].云南电力技术,2019,47(2):16-22.
- [14] 孙中尉,李鹏飞,王子辉,等.基于风-荷典型日聚类的电力系统静态稳定裕度评估[J].电网与清洁能源,2023,39(2):92-102,113.
- [15] Ismkhan H, Izadi M. K-means-G*: Accelerating k-means clustering algorithm utilizing primitive geometric concepts[J]. Information Sciences, 2022,618:298-316.
- [16] Ulug R, Karslioglu M O. A new data-adaptive network design methodology based on the k-means clustering and modified ISODATA algorithm for regional gravity field modeling via spherical radial basis functions[J]. Journal of Geodesy, 2022,96(11):91.
- [17] 刘倩颖,阮应君,时翔,等.基于kmeans聚类与BP神经网络算法的办公建筑逐时电负荷预测[J].热能动力工程,2018,33(3):138-144.
- [18] Xiao B, Wang X, Zheng Y, et al. Layout optimization of hybrid ventilation inside the main transformer room for a typical 110 kV substation[C]. 2024 The 6th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems, Kyoto, Japan, April 5-7 (In press).
- [19] 秦文慧.110kV户内变电站通风散热的数值模拟及优化研究[D].南京:东南大学,2019.
- [20] Roache P J. Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1997,29:123-160.
- [21] 周志华.机器学习[M].北京:清华大学出版社,2016.