

箱式变电站通风系统结构对温升控制效果的影响研究

姚 尧

湖南平高开关有限公司 湖南长沙 410006

摘 要：箱式变电站（以下简称“箱变”）作为现代城市电力系统中的关键中压配电节点，承担着电能变换、分配及过载保护等多重功能，其封闭结构在运行高负荷时易引发设备过热、绝缘老化甚至热击穿等安全隐患。特别是在夏季高温环境下，箱变的散热问题更加突出。现有研究多聚焦于材料耐温性能、电器布局优化等方面，而对通风结构本身在温升控制中的作用研究较少。本文基于不同类型通风系统结构，对温升控制效果进行了仿真与实验研究，比较自然通风、单侧强排、双侧强排及顶部强排通风结构下的热场分布，分析其对变压器、开关柜等关键设备温升的控制效果，并提出优化建议。

关键词：箱式变电站；通风系统；温升控制

前言：

随着城市化和配网扩容，箱式变电站因占地小、建设快、布局灵活，成为中低压电力系统核心设备，广泛应用于多场景。箱变内变压器等核心发热设备在密闭环境运行，热量难自然对流释放，易引发油温超限、元件热退化等安全事故。目前国内外虽有箱变通风研究，但多聚焦风量与风机布置，缺乏系统化结构优化及应用验证，通风系统工程适配性与控制策略集成度需提升。

1 箱式变电站通风系统结构

箱式变电站作为配电系统的重要组成部分，其内部集成了变压器、高压开关柜、低压配电装置、电缆通道等多个发热元件，设备布置紧凑，运行过程中产生大量热量。若热量不能及时有效排出，极易造成设备温升过高，影响绝缘性能与运行寿命，甚至引发热击穿等安全事故。因此，通风系统结构的合理性对保障箱式变电站的散热效率与安全稳定运行具有关键作用。通常情况下，箱式变电站的通风结构分为自然通风与机械通风两大类。自然通风系统依赖箱体本身的百叶窗、通风口等开孔，利用热压差和风压差实现气流交换。该结构设计简洁、运行成本低，但在夏季高温或高负荷运行条件下散热能力有限，容易形成顶部热堆积，不利于长时间稳定运行。而机械通风则通过配置风机强制空气流动，常见的结构包括单侧风机送排风、双侧对称送排风、顶部强制排风等。风机布局方式、通风路径设计、风量控制策略等，均直接影响通风系统的整体效能。

近年来，为进一步提高箱变的通风效率，工程实践中

逐渐采用复合式通风结构，即结合双侧送风与顶部排风，通过形成“低进高出”式气流通道，实现热量快速带走与局部热源的定向冷却。此外，还可结合智能控制系统，实现基于温度变化的风机启停调节，进一步提升能效比和系统响应能力。

2 数值仿真建模与模拟设置

2.1 实验条件

为研究不同通风系统结构对箱式变电站内部温升控制效果的影响，本文采用 CFD（计算流体力学）方法进行数值仿真分析，使用 ANSYS Fluent 软件构建完整的三维热场仿真模型，模拟各通风结构下的气流组织与温度分布规律。整个仿真过程包括几何建模、网格划分、物理模型设置、边界条件设定、求解器参数选择及仿真收敛控制等关键步骤，确保模拟过程具有高度的工程可行性和热工精度。

2.2 实施步骤

2.2.1 几何建模与组件参数设置

依据实际工程中的典型箱式变电站尺寸与布局，构建包括变压器、高压开关柜、低压柜、电缆沟与外壳结构的三维实体模型。变压器选用 1600kVA 油浸式变压器，发热功率设定为总容量的 2.5%，即约 40kW，均匀分布于铁芯与绕组区域。开关柜与母线室发热功率分别设定为 3kW 和 1.5kW，并以体积热源的方式加载。

2.2.2 网格划分与质量控制

采用 ICEM CFD 对几何模型进行结构化与非结构化混合网格划分，变压器、电缆沟、通风道等热敏区域采用加密处理，

最小单元尺寸控制在 5mm 以内，保证模拟中高梯度区的温度与速度场变化能被充分捕捉。最终网格数约为 175 万个单元，通过网格无关性验证，确认模拟结果误差在 3% 以内。

2.2.3 物理模型与求解器设置

选用压力为主的 SIMPLE 算法进行稳态求解，湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型以模拟内部气流的涡流特性；能量方程开启用于计算温度场，空气作为不可压缩理想气体处理。对于箱体外壳设定为不导热绝热壁面，进风口温度设置为 35℃，风速依据不同结构设定为 1.5~2.5 m/s；排风口设为定压出口，模拟热空气自由排出过程。

2.2.4 边界条件与通风结构方案设定

本研究分别对四种典型通风结构进行建模与对比：①自然通风：仅设置左右百叶窗开孔，不设风机，靠自然对流实现换气；②单侧强排风：在箱体一侧设置进风与排风风机各一台，风量设置为 2500 m³/h；③双侧强排：在两侧对称布置进排风机，单侧风量 2000 m³/h；④复合通风结构：在双侧基础上增加顶部轴流风机（3000 m³/h），形成垂直热气抽离通道。

2.2.5 仿真流程与收敛控制

仿真采用稳态热力求解，初始化选用标准场变量设置，每个结构方案分别运行 1500 步，残差收敛标准为 1e-5，重点监测箱变顶部与关键发热设备附近的温度变化，提取最大温度值、平均温升、气流速度矢量分布等结果进行对比分析。

2.3 测试结果

2.3.1 各结构下箱变内部关键点温度对比

表 1 各结构下箱变内部关键点温度对比

通风结构类型	变压器上方温度 (℃)	开关柜区域温度 (℃)	顶部平均温度 (℃)
自然通风	78.3	72.5	75.8
单侧强排风	72.6	68.1	70.9
双侧强排风	67.9	64.5	66.2
双侧 + 顶部复合通风	65.7	62.2	63.5

各结构下箱变内部关键点温度对比见表 1。不同通风结构在内部关键热区的温控效果差异明显。自然通风结构因无强制气流带动，顶部与核心设备温升最为严重，最高达 78.3℃，超出设备推荐工作温度上限。而单侧强排风虽有改善，但因气流分布不均，存在部分区域温度偏高。双侧强排风结构在温控上有所提升，气流覆盖面更广可有效抑制设备过热。最终，采用双侧进风 + 顶部排风复合结构的箱变温升控制效果最佳，顶点及设备温度均显著下降，热场分布更

均衡。

2.3.2 热流组织效率与通风结构关联度分析

热流组织效率与通风结构关联度分析结果如表 2 所示。热流速度及其在高温区域的覆盖率是衡量通风结构换热效率的重要指标。自然通风的气流速率极低，导致热量在设备上与箱体顶部聚集；而双侧强排结构大幅提升了热流流速，使热交换更充分，特别是顶部高温层得到显著改善。在双侧 + 顶部复合结构中，热流以“下进侧导、上排”形式贯通热源区域，气流组织效率提升至 92.4%，最大风速达 1.46m/s，显著优于其他方案，是当前测试中换热效率最优的结构。

表 2 热流组织效率与通风结构关联度分析

通风结构类型	最大热流速度 (m/s)	平均热流速度 (m/s)	高温区热流覆盖率 (%)
自然通风	0.25	0.12	35.7
单侧强排风	0.78	0.44	62.3
双侧强排风	1.25	0.73	81.6
双侧 + 顶部复合通风	1.46	0.89	92.4

2.3.3 环境温度对通风结构稳定性的影响

环境温度对通风结构稳定性的影响结果见表 3。测试表明，在不同环境温度下，各通风结构对内部温升的抑制能力差异进一步扩大。随着外界温度上升，自然通风结构的控温能力急剧下降，温升幅度最大，从 25℃提升至 45℃环境时，箱变内部温升高达 61.7℃。单侧强排结构在 35℃以上环境中已出现温控压力，热堆积加剧。而复合通风结构对高温外部环境具有良好的适应性，即使在极端 45℃环境中，最大温升仍控制在 40℃以内，保障了设备运行的热稳定性和安全性。

表 3 环境温度对通风结构稳定性的影响

外部环境温度 (℃)	自然通风最大温升 (℃)	单侧强排最大温升 (℃)	复合通风最大温升 (℃)
25	45.2	35.7	28.4
35	53.1	42.9	33.6
45	61.7	50.3	38.5

3 以提升温升控制效果的箱式变电站通风系统结构优化方案

3.1 优化通风路径结构：构建“低进—高排”立体流动通道

根据仿真以及实测数据说明，传统自然通风以及单侧通风结构在热流组织方面有着十分突出的局限性，主要问题是气流路径短并且流向受到限制，使得热量滞留在顶部或者角落区域，形成典型的“热岛”现象，优化通风路径的首要方

案是构建“低位进风—顶部高位排风”的立体气流通道，以此保证热量可顺着气流上浮并且快速被带出。在具体设计的时候，应该在箱变左右两侧底部对称设置进风口，同时在顶部中央区域安装高效抽风风机，形成垂直向上的主导气流路径，进风口要布置在设备下部空腔区域，采用铝合金防雨百叶加上防虫网结构，防护等级不低于 IP44，进风面积不小于总箱体侧面积的 10%，顶部排风口应采用轴流式低噪风机，单台排风量不低于 3000 m³/h，排风口配合风压传感器控制风机变频运行，以便适应不同热负载变化。这种“下进上出”的气流路径顺应热空气上升规律，还可借助风机吸力带动整体热量迁移，经过仿真验证可将热流覆盖率提升至 90% 以上，在夏季高温负荷运行的时候，该结构可实现降温幅度达 13~15℃，降低设备热应力与绝缘老化风险，从结构源头解决散热瓶颈。

3.2 强化通风系统智能联动控制机制

通风结构的优化并非仅局限于硬件配置方面，还应当构建一套契合运行状态的智能控制机制，以此达成热管理系统的动态响应以及能耗控制的协同优化，测试数据说明，在复合通风结构里，风机若长期处于定频高转状态，将会致使部分区域出现过冷现象、能耗过高，并且系统对于突发温升事件的响应会滞后。

在箱变内部的关键热源区域布置不少于 4 个高精度温度传感器，其精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，这些传感器分别安装在变压器顶部、开关柜后部、电缆沟出口以及顶部排风通道处，同时结合边缘计算设备来进行实时的温升监控，一旦有任一监测点的温度超过了预设的阈值，比如 60℃，系统就会自动启动相应的风机，并且依据多个监测点之间的温差计算结果来调整排风的风速以及风机开启的组数，以此实现对局部热点的优先处理以及对整体负载的调节。该系统还需要与 SCADA 系统进行联动，达成数据上传、预警推送以及历史分析等功能，并且有远程控制与维护的接口，借助智能联动控制，可把风机的运行时间减少大约 30%，平均每年节能约 8%，有效地抑制峰值温升的突变，提高整体运行的安全性以及能效水平。

3.3 改进箱体结构热绝缘与风道引导设计

除了对气流组织与控制系统给予优化之外，通风结构的改进还需要追溯到箱体自身的热管理性能方面，当前现有

的箱变结构大多采用单层钢板焊接或者夹芯板结构，这种结构的热阻系数相对较低，在高温环境之下容易出现外部热量“灌入”以及内部热量“蓄积”这两个方面的问题，在结构设计过程中引入多层热绝缘材料以及导风结构，是控制温升的关键补充措施。

在箱体内壁关键区域（如变压器上方及顶部）加装 10mm 厚纳米气凝胶保温层（导热系数 $<0.02\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ），可阻隔外部热辐射。同时在箱体顶部内设导风板，引导热流汇聚至排风口，避免顶部热流出现“打旋”或者短路回流的情况。另外在电缆沟通道口加装铝镁合金隔热风道板（带调节百叶窗），防止冷空气非重点区域直排，提升冷气利用率。这些结构优化措施虽非通风设备，不过在整个系统运行过程中能起到热控“屏障”以及“引流”这两方面的作用。配合通风系统可实现内部温升控制的系统级闭环提升，最终把温度分布差异控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 的范围内，提升散热均衡性与结构稳定性。

结语：本文研究箱式变电站通风系统，经数值仿真与实地测试，证实“下进风—顶部排风”复合通风结构在温升控制等方面优势显著。优化方案提出构建立体通道、引入智能控制、强化隔热设计等措施，形成多维协同热管理方案。研究显示，该策略能使箱内高温区降温约 15℃，均衡热流分布，保障设备稳定运行，对提升箱式变电站高负荷运行的安全性和可靠性有重要工程价值与推广意义。

参考文献：

- [1] 王湘涛, 薛玉栋. 预装式变电站结构对温升的影响研究[J]. 城市建筑空间, 2024,31(S2):426-427.
- [2] 颀定文, 杨生泽, 李童, 等. 箱式变电站及组合式变压器温升试验系统设计应用[J]. 机械研究与应用, 2024,37(05):140-143.
- [3] 王霞娃, 冯丹丹, 王维娟. 箱式变电站的影响温升试验判定因素探究[J]. 电气传动自动化, 2024,46(03):67-70.
- [4] 张琪英, 徐石, 蓝许梅, 等. 地埋式箱式变电站的设计与研究[J]. 电气时代, 2022,(04):65-68.
- [5] 赵博文. 组合式变电站损耗及温升问题研究[D]. 沈阳工业大学, 2020.DOI:10.27322/d.cnki.gsgyu.2020.000604.
- [6] 钟文, 许燕妮. 基于箱式变电站设计方案优化[J]. 轻工科技, 2014,30(05):59.