文章编号：1671-6612（2026）05-714-10

铁路箱式变电站微正压送风系统防凝露效果研究

芈　赞　周帮福

（中国铁路上海局集团有限公司合肥供电段　合肥　230011）

【摘　要】　铁路沿线箱式变电站常年昼夜温差大、空气湿度高，内部极易产生凝露，引发安全隐患。提出一种针对箱式变电站的微正压送风防凝露系统，选取某铁路沿线箱式变电站开展现场实测，对比有无微正压送风系统下箱式变电站内温湿度、露点温度、凝露现象，验证了微正压送风技术的控湿抑露效果。结果表明，送风系统可维持箱式变电站内的微正压，并隔绝外界湿空气入侵；与无微正压送风系统的箱式变电站相比，有微正压送风时变电站内空气温度可降低 5℃，相对湿度稳定控制在 60%以下；空气露点温度下降 5-10℃，凝露现象被有效消除。该技术适用于铁路无人值守箱式变电站运维需求，为高湿温差工况下户外配电设备环境治理提供了技术参考。

【关键词】　铁路箱式变电站；凝露；微正压送风；温湿度实测；环境调控

中图分类号　TU834.9　　文献标志码　A

Research on the Anti-condensation Effect of Air Supply System with Micro-positive Pressure in Railway Box-type Substation

Mi Zan　Zhou Bangfu

(China Railway Shanghai Bureau Group Co., Ltd, Hefei Power Supply Section, Hefei, 230011)

【**Abstract**】　Box-type substations along railway lines experience significant temperature differences between day and night and high humidity, making them prone to internal condensation and posing safety hazards. This paper proposes a micro-positive pressure air supply anti-condensation system specifically designed for box-type substations. Field measurements are conducted at two box-type substations along a railway line to compare the temperature, humidity, dew point temperature, and condensation phenomena inside the substation with and without the air supply system with micro-positive pressure. The moisture control and condensation suppression effects of the micro-positive pressure air supply technology are validated. The findings indicate that the air supply system can maintain a micro-positive pressure inside the box-type substation and prevent the intrusion of external humid air. Compared to a box-type substation without the micro-positive pressure air supply system, the air temperature inside the substation with the system can be reduced by 5 ℃ , and the relative humidity is stably controlled below 60%. The dew point temperature of the air decreases by 5-10 ℃, effectively eliminating condensation. This technology is suitable for the operation and maintenance needs of unattended box-type substations along railways and provides a technical reference for environmental management of outdoor power distribution equipment under high humidity and temperature difference conditions.

【**Keywords**】　Railway box-type substation; Condensation; Micro-positive pressure air supply; Temperature and humidity measurement; Environmental regulation

0　引言

箱式变电站（简称“箱变”）常设置于铁路沿线的室外场坪或隧道洞室内，其稳定运行对铁路沿线正常供电影响巨大[1]。在南方地区高湿环境下，

作者简介：芈　赞（1974.12-），男，本科，高级工程师，E-mail：282936046@qq.com
通讯作者：周帮福（1971.10-），男，本科，工程师，E-mail：200816189@qq.com
收稿日期：2026-07-16

由于箱变内外温差大、内部湿度高、水汽积聚、密封性不足或通风不良，导致箱变外部水汽蒸发进入箱变内部，常出现设备表面凝露的现象，凝露降低了绝缘性能，加速元器件老化，增加了故障率，使得箱变频频发生事故，影响正常供电，给铁路稳定运行带来较大的隐患[2-4]。当前行业主流防凝露措施包括电加热升温[5,6]、半导体冷凝除湿[7]、被动排风[8,9]、孔洞封堵[10]等。这些措施均存在明显局限性：加热仅提升空气温度、无法减少水汽总量，低温高湿环境下仍易二次结露；半导体除湿单机处理容量有限，大型多舱箱变全域控湿效果不足；单纯排风易形成负压，反而加速外界潮湿空气倒灌；封堵材料易老化开裂，无法长期阻断水汽渗透。微正压通风是近年来配电设备环境治理新兴技术，核心思路为持续送入经过滤干燥新风，维持箱变内 0.5～5Pa 微压差，隔绝外部湿空气、灰尘、盐雾渗透，配合有序气流置换降低内部水汽含量，从源头阻断凝露形成条件。文献[11]提出户外电气箱微正压防护思路，通过新风过滤、压差联动风机实现防潮防尘。现有研究多集中在城市电网预制舱，针对铁路沿线温差大、多隧道、路基电缆沟高湿特殊工况的微正压送风系统研究较少，缺乏长期连续温湿度数据支撑。本文提出了一套基于微正压送风的系统防止箱变内部凝露，并进行了现场实验，通过连续实测数据分析该技术抑露效果，为铁路户外配电设备环境优化提供理论与工程依据。

1　箱式变电站凝露成因与热力学过程

1.1　箱式变电站凝露成因

图 1 所示为某铁路箱变外观和内部图。通过现场分析，箱变内部凝露水汽来源主要包括以下三方面。

（1）外部环境水汽：雨季、雾天空气高湿，箱体门缝、电缆穿孔、检修门密封缝隙形成渗透通道，在水蒸气分压力差作用下持续向内扩散（菲克扩散定律）；

（2）电缆沟内源水汽：路基低洼、排水沟不畅导致沟内积水，常年蒸发形成高湿气流，变压器室内温度常高于 40℃，箱内设备发热形成烟囱效应，气流沿箱体底部缝隙向上涌入，是箱变最主要水汽来源；

（3）箱内内源水汽：设备检修开门带入湿空气、绝缘材料缓慢释湿、昼夜温差导致空气持水能力变化叠加，含湿量增加。





图 1　某箱式变电站现场图

Fig.1　Site map of a certain box-type substation

箱体底部电缆沟积水、土壤渗水持续向上蒸腾水汽，金属箱体导热系数大，夜间、阴雨天气箱体外壁快速降温，内壁、母线、开关端子等表面温度快速降至露点以下，极易满足凝露生成条件，设备凝露故障频发。

1.2　箱式变电站凝露热力学过程

凝露产生满足两个必要条件：空气存在饱和水蒸气分压力差、固体壁面温度低于空气露点温度。根据工程热力学露点计算公式（1）和（2）[12]，只要箱式变电站内设备或元器件的表面温度低于该空气露点温度，就会在箱式变电站内产生凝露现象。

$$E_s=6.112\times\exp\left(\frac{17.67\times t}{t+243.5}\right) \tag{1}$$

$$T_d=\frac{237.3\times\ln\left(\frac{\varphi E_s}{6.112}\right)}{17.27-\ln\left(\frac{\varphi E_s}{6.112}\right)} \tag{2}$$

式中：t 为空气干球温度，℃；E_s 为纯水平液面饱和水汽压，hPa；T_d 为露点温度，℃；φ 为相对湿度。

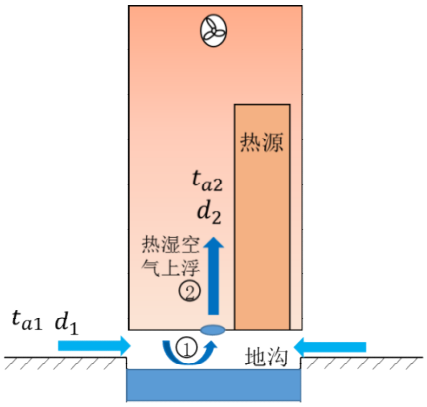
图 2 所示为箱变内空气热湿传递过程。由图 2

（a）可知，由于箱变内存在热压效应，空气会从缝隙、地沟下部空间进入箱变内部，同时由于地沟内水分的蒸发作用，空气从室外经地沟进入箱变时，吸收地沟内的水分，其含湿量显著增加。进入箱变后，内部设备的加热，使其空气温度升高，造成箱变内空气处于高温高湿状态。图 2（b）所示为进风空气的热力学过程，其中①过程为经地沟的等温吸湿过程，②过程为在箱变内的等湿加热过程。箱变内空气状态点为 t_{a2} 和 d_2，空气从室外状态到箱变内的含湿量和温升变化分别用式（3）和式（4）计算。

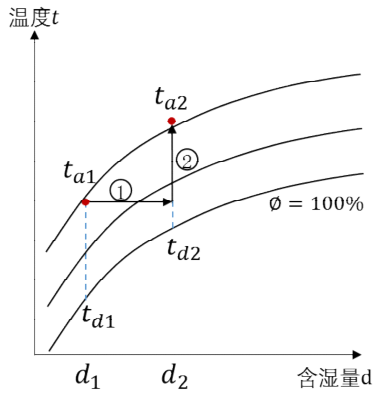
$$\Delta d = d_2 - d_1 \tag{3}$$

$$\Delta t_a = t_{a2} - t_{a1} \tag{4}$$

从图 2（b）可以看出，室外空气经过吸湿过程，空气露点温度升高，从 t_{d1} 升高到 t_{d2}，露点升高后，当夜间室外空气温度降低，箱变的表面温度随之下降，更容易低于该露点温度，产生凝露现象。



（a）空气热湿传递示意



（b）空气的热力学过程

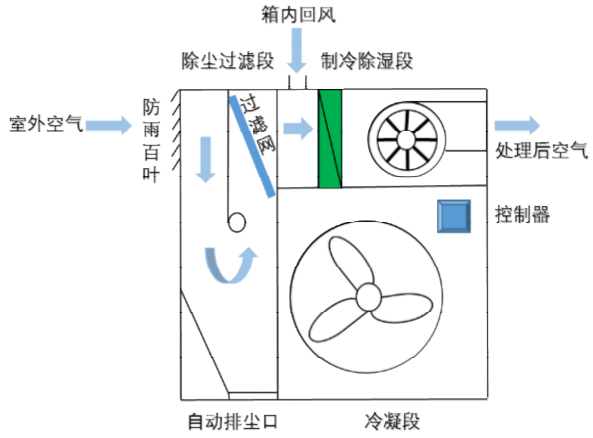
图 2　箱式变电站内空气热湿传递过程

Fig.2　Heat and moisture transfer process in box-type substation

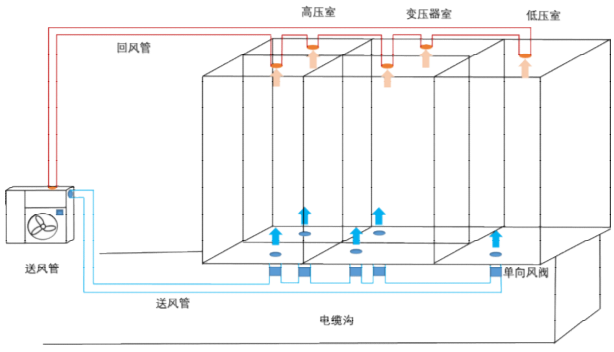
2　正压送风防凝露系统原理与特点

2.1　系统原理

为防止箱变内部凝露，采用箱变内部微正压送风原理，通过在箱变内持续送入经过设备处理后的干燥空气，且控制回风量，保持箱变内部对外部环境的微正压，使得外部环境的水蒸气无法进入箱变内部，降低箱变内部的相对湿度，从而降低内部空气的露点温度，保证内部元器件温度降低时也高于空气的露点温度，避免箱变内产生凝露，同时对送入的空气进行过滤处理，减少灰尘进入，保证箱变内部洁净度，还能对箱变内高温环境进行降温，实现箱变稳定运行，降低故障率。其基本原理如图 3 所示。



（a）制冷除湿原理



（b）送风系统原理

图 3　箱变微正压送风系统原理图

Fig.3　Schematic diagram of micro-positive pressure air supply system for box-type substation

箱变微正压送风系统由新风空调机组和风管系统组成，新风空调机组将新风与回风制冷除湿后由风管分别送入高压室、变压器室、低压室，并形成微正压，防止高湿空气进入内部，内部空气在微正压作用下从排风口排出。风管安装在电缆沟内，

连接新风空调和箱式变电站。机组配备自动清洁的除尘过滤装置，减少维护。风管配备单向阀，防止空气串流。机组带有自控、远控功能等智能化控制。

2.2　系统特点

该系统具有的特点如下：

（1）微正压送风

通过对新风的自动调节，使箱变内部对于环境的正压差在 0.5～5Pa 之间，微正压作用使多余的风量通过箱变的缝隙、电缆孔等位置流向外界环境，有效组织箱变内部的空气阻挡外界环境高湿度空气进入箱变内部，保证箱变内部空气的相对湿度比环境空气湿度低 20%以上，露点温度降低 5～10℃，在箱变内部元器件因地埋电缆导热导致温度降低的情况下，也不会低于露点温度，从而不会凝露。采用变频送风机，依据压差传感器反馈调节转速，稳定维持设定微正压。

（2）升温、恒温、降温一体式除湿设备

利用逆卡诺原理，通过压缩机压缩制冷剂进行除湿，将空气中的水蒸气有组织地凝结成水并排放，经过处理的干空气持续送到箱变内部，保证内部的微正压。环境温度≤5℃时，升温除湿，通过升温和除湿一起降低空气的湿度；5℃<环境温度<25℃时，恒温除湿，降低空气湿度的同时保持温度稳定；25℃≤环境温度，降温除湿，降低空气湿度的同时降低温度。

（3）智能控制免维护远程监测

在达到实际效果的同时，系统和设备具备免维护功能，保证铁路 24 小时，全年运行的要求，具有连接监控系统远程监测和控制，或自行建立传输通道，实现远程监测和控制功能，为后期的稳定运行提供保证。系统和设备易于安装，在实施改造时能快速安装，避免对正常供电的影响。

3　现场实测方案设计

为验证该微正压送风系统的防结露效果，本研究在宁西线某通信基站搭建铁路箱变微正压送风实测平台，进行了现场试验。通过持续温湿度记录及大数据分析方法，研究不同环境中箱变内部水蒸气含量及凝露程度，分析该技术抑露效果。

3.1　实测对象选取

选取宁西线某 2 处相距约 25km 的通信基站箱式变压站作为实测载体，原装置每年雨季内表面均出现明显凝露，具备典型铁路高湿工况特征。两处箱式变电站的尺寸、功率和安装方式均相同，长 4.2m×宽 2.2m×高 2.1m。电缆沟都位于箱式变电站下部，长 4.2m×宽 2.2m×深 1.8m，各房间地面均有开口进出电缆。由于距离较近，室外气象参数无明显差异。如图 4 所示，设置对照组（未安装微正压送风系统）、实验组（安装智能微正压送风系统），采用全年同步连续对比实测。



（a）未安装正压送风系统



（b）安装正压送风系统

图 4　现场实测图

Fig.4　Field measurements

正压送风装置的设计参数，箱式变电站容积约 20~40m^3，设计换气次数按 10 次/小时计算[13]，风量在 200~400m^3/h，设计风量选取 400m^3/h。根据空调工况，在空调工况下额定制冷量为 2500W，新风工况额定制冷量为 3300W，额定输入功率为 1300W。

3.2　测点布置

为了对比验证正压送风系统的防凝露效果，在实验组和对比组的箱变内部布置相应测点，分布如图 5 所示。在贯通高压室的柜子内外、自闭高压室柜子内外和自闭低压室柜外共布置 5 处温湿度传感器，测点位于每个区域的中间位置，高度距离地

面 1.5m，在箱变外部布置室外空气温湿度传感器。根据上述测试的温湿度数据，同步计算室内外实时露点。同时，通过箱变内部的监控器，实时记录箱内壁凝露发生频次。

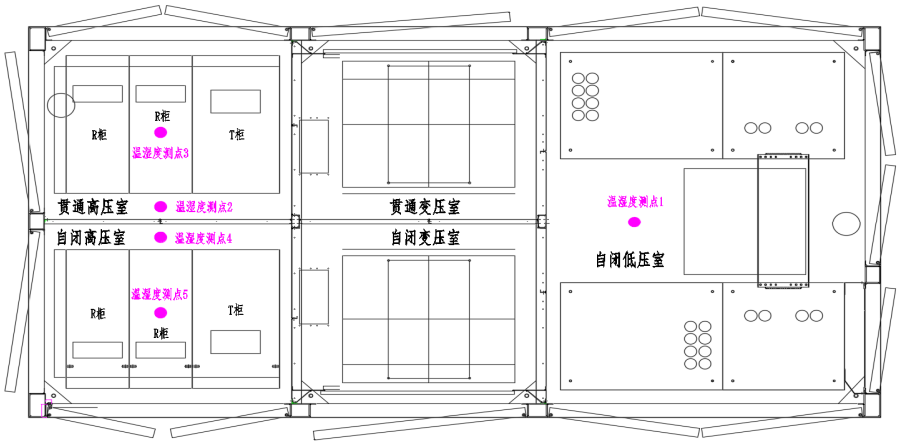


图 5　现场实测测点分布

Fig.5　Distribution of measuring points on site

3.3　实测仪器

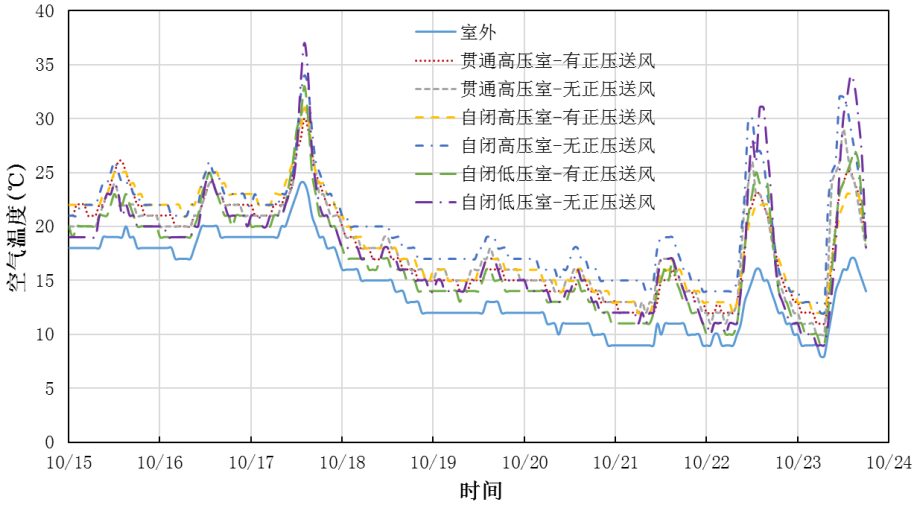
现场测试主要仪器设备有 testo175H1 温湿度自记仪（温湿度量程分别为-20~55℃、0～100%RH，精度分别为±0.4℃、±2%RH）、监控摄像头。温湿度每小时记录一次数据。

4　结果与分析

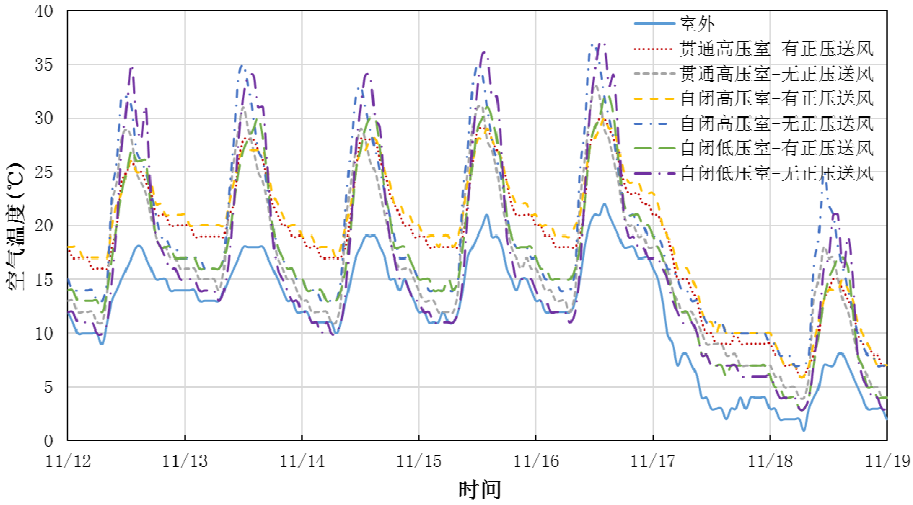
10 月和 11 月是该地区容易凝露的时段，监测中也出现了凝露现象。因此，分别选取 2025 年 10 月和 11 月部分时段的室外和箱内各空间温湿度、露点温度、含湿量和箱内结露情况进行对比分析，结果如下。

4.1　不同空间温度结果

图 6 所示为有无微正压送风系统时室外和箱变内不同空间的温度逐时变化结果。10 月 15 日−23 日期间，3 个房间无微正压送风系统时温度最高为 37.0℃、最低为 9.0℃、平均值为 18.5℃，有微正压送风系统时温度最高为 33.0℃、最低为 9.0℃、平均值为 17.8℃。11 月 12 日−19 日期间，3 个房间无微正压送风系统时温度最高为 37.0℃、最低为 3.0℃、平均值为 17.0℃，有微正压送风系统时温度最高为 32.0℃、最低为 3.0℃、平均值为 18.1℃。由于箱变内部不同空间均有热源散热加热空气，不同空间温度均高于室外，午后室外温度较高时，无微正压送风工况的各空间温度比室外高 10−15℃左右，最高达到 37℃。正压送风系统除保持箱内微正压外，对空气有一定降温和除湿作用，所以相同功能的空间，有正压送风时，其空气温度有明显的下降，最高温度降低了 5℃左右。



（a）2025 年 10 月 15 日−10 月 23 日



（b）2025 年 11 月 12 日–11 月 19 日

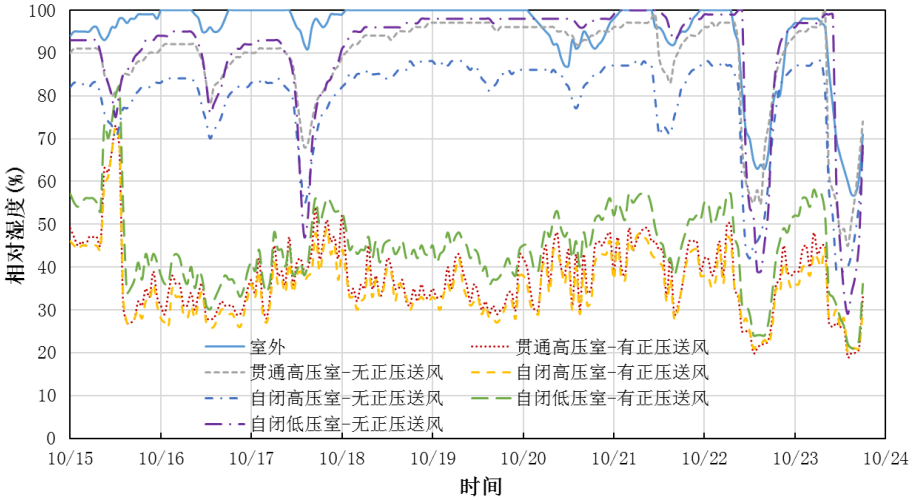
图 6　箱变内外不同空间的温度逐时变化

Fig.6　Hourly changes in temperature of different spaces inside and outside the box-type substation

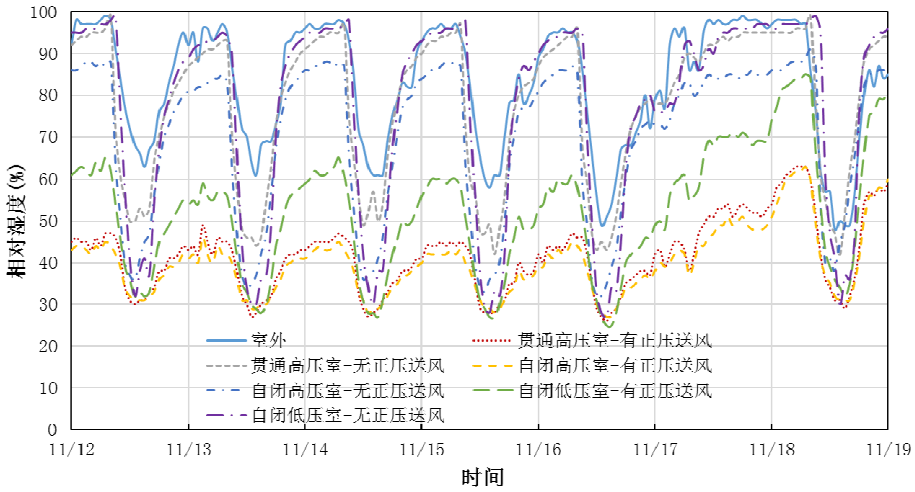
4.2　不同空间湿度结果

图 7 所示为有无微正压送风系统时室外和箱变内不同空间的湿度逐时变化结果。10 月 15 日–23 日期间，3 个房间无微正压送风系统时湿度最高为 100%、最低为 29%、平均值为 86.3%，有微正压送风系统时湿度最高为 82%、最低为 19%、平均值为 39.3%。11 月 12 日–19 日期间，3 个房间无微正压送风系统时湿度最高为 99%、最低为 27%、平均值为75.1%，有微正压送风系统时湿度最高为85%、最低为 25%、平均值为 44.8%。10 月室外湿度特别高，多数时间已达到 90%以上，通过箱变内部热源加热后，其温度上升但相对湿度有所降低，其含湿量仍然较高。由于正压送风系统的降温除湿作用，所以相同功能的空间，有正压送风时，其空气湿度有明显的下降，从 80%–90%降低至 30%–50%的范围内。11 月时，室外空气湿度在 60%–100%之间波动，箱变内变化更大，有正压送风时，箱变内最高湿度从 99%降低至 60%左右。

由结果可见，经热源加热仅提升温度无法降低水汽总量，外界高湿空气持续渗入，湿度居高不下；正压送风依靠微压差阻断外源水汽，持续置换箱内湿气，从根源上压低空气含水量，相对湿度长期维持在安全区间。



（a）2025 年 10 月 15 日–10 月 23 日

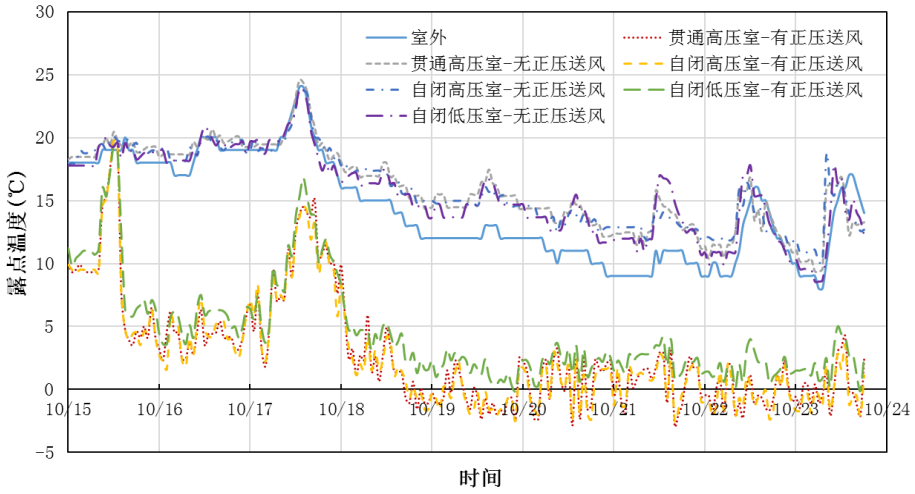


（b）2025 年 11 月 12 日–11 月 19 日

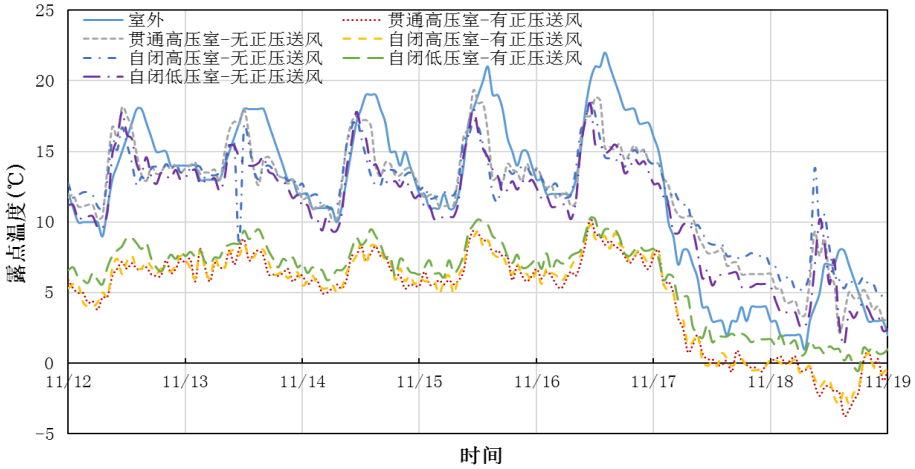
图 7　箱变内外不同空间的湿度逐时变化

Fig.7　Hourly changes in humidity within different spaces inside and outside the box-type substation

4.3　不同空间露点温度结果



（a）2025 年 10 月 15 日–10 月 23 日



（b）2025 年 11 月 12 日–11 月 19 日

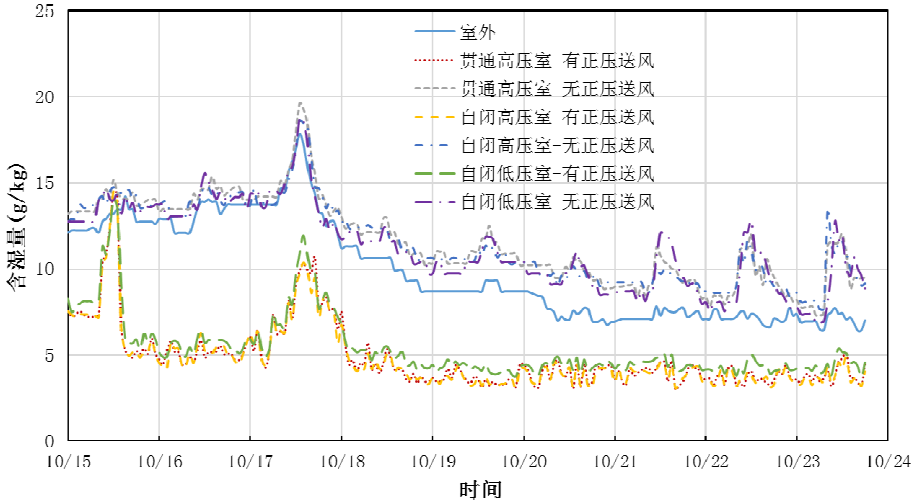
图 8　箱变内外不同空间的露点温度逐时变化

Fig.8　Hourly changes in dew point temperature in different spaces inside and outside the box-type substation

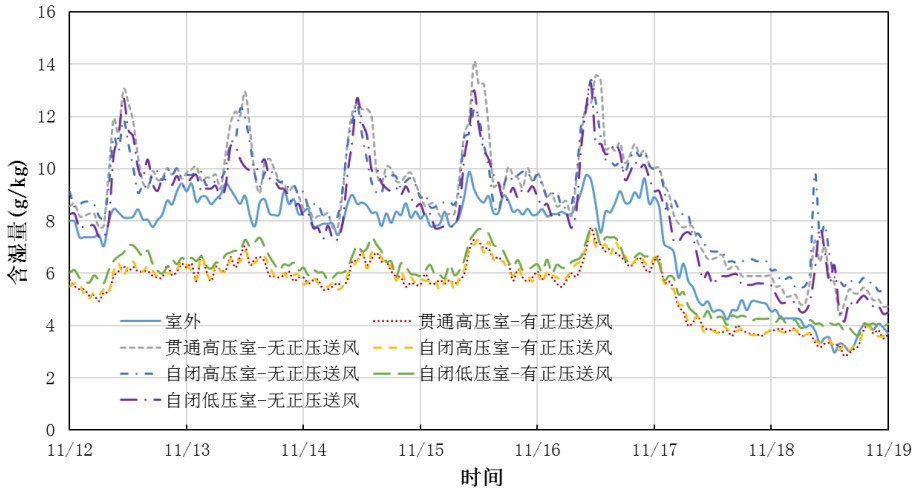
图 8 所示为有无微正压送风系统时室外和箱变内不同空间的露点温度逐时变化结果。10 月 15 日−23 日期间，3 个房间无微正压送风系统时露点温度最高为 24.6℃、最低为 8.6℃、平均值为 15.8℃，有微正压送风系统时露点温度最高为 19.4℃、最低为-2.9℃、平均值为 3.4℃。11 月 12 日−19 日期间，3 个房间无微正压送风系统时露点温度最高为 18.4℃、最低为 1.3℃、平均值为 11.6℃，有微正压送风系统时露点温度最高为 10.3℃、最低为-3.7℃、平均值为 5.3℃。由于正压送风系统的降温除湿作用，所以相同功能的空间，有正压送风时，其空气露点温度下降 5−10℃，大大降低了结露风险。

4.4　不同空间含湿量结果

图 9 所示为有无微正压送风系统时室外和箱变内不同空间的含湿量逐时变化结果。10 月 15 日−23 日期间，3 个房间无微正压送风系统时含湿量最高为 19.6g/kg、最低为 6.9g/kg、平均值为 11.4g/kg，有微正压送风系统时含湿量最高为 14.5g/kg、最低为 3g/kg、平均值为 5.0g/kg。11 月 12 日−19 日期间，3 个房间无微正压送风系统时含湿量最高为 14.1g/kg、最低为 4.1g/kg、平均值为 8.7g/kg，有微正压送风系统时含湿量最高为 7.7g/kg、最低为 2.9g/kg、平均值为 5.6g/kg。无微正压送风时，由于进风吸湿，箱内各空间含湿量均比室外空气含湿量高，中午时室内外温差大、热压作用强，进风量大，含湿量增加更多。由于微正压送风系统的降温除湿作用，所以相同功能的空间，有微正压送风时，其空气含湿量显著下降，多数时间能控制在 4−7g/kg 的范围，比室外空气含湿量更低，结露风险小。



（a）2025 年 10 月 15 日−10 月 23 日



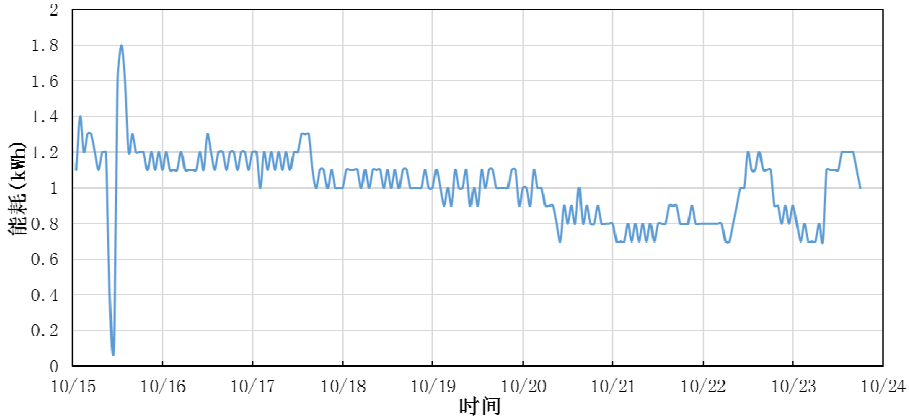
（b）2025 年 11 月 12 日−11 月 19 日

图 9　箱变内外不同空间的含湿量逐时变化

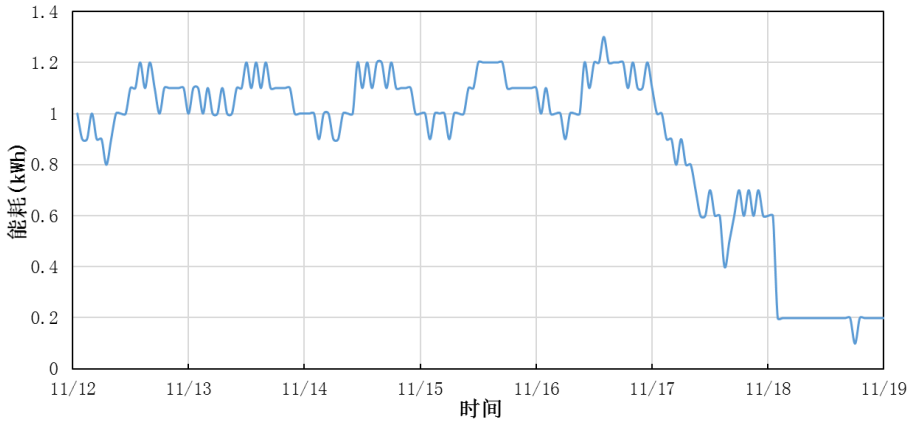
Fig.9　Hourly changes in moisture content in different spaces inside and outside the box-type substation

4.5　微正压送风系统能耗分析

对实验组的微正压送风系统的能耗进行统计分析，结果如图 10 所示。大部分时间微正压送风系统接近满负荷运行，电耗在 1.0−1.2kWh 之间。11 月 17 日−19 日，空气含湿量较低，系统开启时间短，能耗降低。



（a）2025 年 10 月 15 日−10 月 23 日



（b）2025 年 11 月 12 日−11 月 19 日

图 10　微正压送风系统逐时能耗

Fig.10　Energy consumption of micro-positive pressure air supply system

4.6　箱变内结露现象

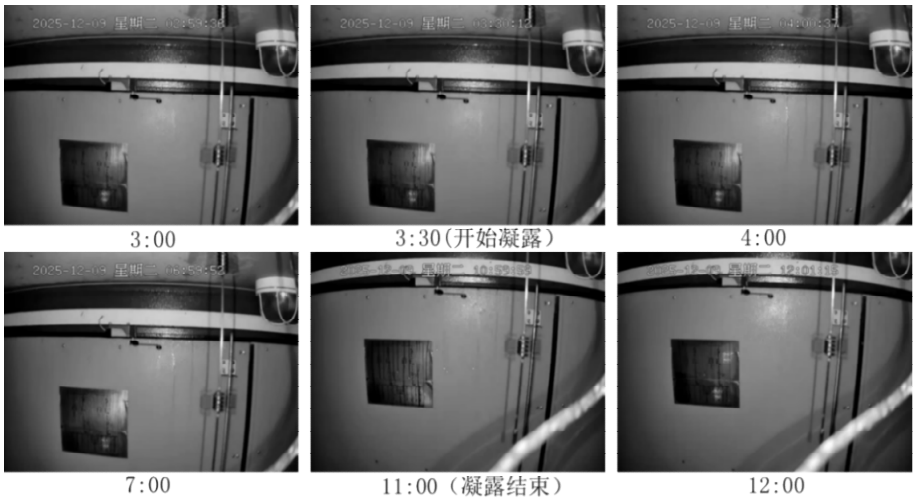


图 11　箱变内表面结露情况

Fig.11　Condensation on the interior surface of the box-type substation

通过现场箱变内摄像头的长时间监测发现，安装有微正压送风的箱变内完全没有结露现象，而没有安装微正压送风的箱变，易在夜间至早上室外温度低的时段出现凝露现象。如图 11 所示，12 月 9 日，无微正压送风的箱变内从凌晨 3:30 在壁面出现凝露，上午 11:00 左右凝露结束，该段时间处于室外温度最低的时段。

5　结论

本文针对铁路沿线箱式变电站内易出现表面凝露的现象，开展了理论分析和实验对比研究，得出如下结论：

（1）铁路沿线箱变凝露主要由电缆沟内源水汽、外部高湿空气双重渗透叠加箱体内外大温差共同诱发；

（2）提出了一种微正压送风防凝露技术，通过向箱变内各空间持续送入过滤干燥新风，形成一定室内外微压差，依靠压差阻隔，切断水汽侵入通道、降低箱变内各空间绝对湿度；

（3）现场实测表明微正压送风系统可有效降低箱变内温度 5℃，箱内相对湿度稳定控制在 60% 以下，空气露点温度下降 5–10℃，含湿量大大降低，且低于室外空气，凝露现象得到有效消除。

参考文献：

[1] 杨林,黎文生.箱式变电站在铁路供电系统中的应用[J].大众科技,2011,(8):132-133,131.

[2] 王楚源,李克文,乐权兴,等.户外开关箱防凝露措施研究[J].广西电业,2025,(6):67-72.

[3] 常小铖.变电站内端子箱凝露机理分析及防凝露措施探讨[J].科技与企业,2015,(6):247.

[4] 尹小本.箱式变电站应用中的常见问题及对策[J].中国高新技术企业,2011,(13):123-124.

[5] 燕飞飞.浅谈预装式变电站预制舱凝露危害及预防措施[J].机电信息,2023,(1):1-4.

[6] 王志勇,姜天生,郭明皇.风电、光伏箱式变电站内部凝露、结冰的现状和治理方案[J].变压器,2018,55(3):37-40.

[7] 周锦寅.半导体冷凝除湿在箱式设备内的研发和应用[J].农村电气化,2018,(7):75-77.

[8] 洪峰,陈众,李静漪,等.城市箱式变电站的防凝露措施[J].浙江电力,2013,32(9):67-69.

[9] GB/T 17467-2020,高压/低压预装式变电站[S].北京:中国标准出版社,2020.

[10] 朱世民,蒋志军.浅谈变电站端子箱凝露结霜的危害和防治[J].科技创新与应用,2015,(33):210.

[11] 邓振民.城市轨道交通箱式变电站防潮防凝露方案浅析[J].电气化铁道,2016,(s):83-84.

[12] Bolton D. The computation of equivalent potential temperature[J]. Monthly Weather Review, 1980,108(1): 1046-1053.

[13] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.