

一种带除湿干燥功能的电控柜系统研究

程斯琦 冒瑞 陶庆云 曹前

湖南文理学院, 湖南常德, 415000;

摘要: 电控柜是配电、工业自动化与通信系统的关键防护柜体。湿度不受控会引发凝露、腐蚀、绝缘性能下降, 最终造成设备故障。传统基于加热的防凝露方式能耗高, 且无法真正去除水分。本文提出一种基于帕尔帖(热电)效应的智能电控柜主动除湿干燥系统。该系统集成 TEC1-12706 半导体制冷片、双风扇、DHT22 传感器、STM32 微控制器及 ESP8266 Wi-Fi 模块, 实现实时监测与远程告警。文中详细阐述硬件设计、热管理、控制软件(含回差控制与故障检测)及排水机构。在 70%–95% 相对湿度、15°C–35°C 环境温度下的大量实验表明: 系统可在 20 分钟内将相对湿度从 85% 降至 45% 以下, 稳态波动 $\pm 3\%RH$, 主动模式平均功耗仅 46W。连续一周运行测试验证了系统长期可靠性。与传统电阻加热方案相比, 本系统可真正去除水分, 能耗降低约 90%, 柜内温升极小。本研究为电控柜防潮控制提供了实用、高效节能的解决方案。

关键词: 电控柜; 主动除湿; 半导体制冷; 帕尔帖模块; 嵌入式控制; 物联网监测; 防凝露

DOI: 10.69979/3041-0673.26.02.111

引言

(1) 电气柜广泛应用于电网、工业厂区、可再生能源电站(光伏、风电)以及室外通信基站。这些柜体内装有敏感元件, 如断路器、可编程逻辑控制器(PLC)、继电器、母线、通信模块等。环境因素尤其湿度对可靠运行构成严重威胁。当温暖潮湿的空气进入电气柜且温度下降时(例如夜间或天气突变), 凝露会在柜内的冷表面上形成。凝结水会导致:

金属部件(母线、端子、接地条)生锈和腐蚀。

绝缘电阻降低, 导致漏电流和短路。

印刷电路板(PCB)上霉菌生长。

高压开关因闪络而故障。

(2) 传统解决方案包括:

电阻加热器: 提高柜内温度至露点以上。但它们不除去水蒸气; 当加热器循环关闭时, 空气中的湿气可能再次凝结。此外, 它们能耗高(连续 50–200 W), 产生的热点可能使附近元件退化。

硅胶或干燥剂包: 需要定期更换或再生, 对于大柜体或连续室外运行不实用。

引入外部空气通风: 在潮湿气候下会引入更多湿气和灰尘。

因此, 能够从柜内空气中物理提取液态水的主动除湿器非常理想。基于热电制冷的小型除湿机已用于小型封闭空间, 但针对电气柜的系统设计、控制和性能评估在文献中尚不充分。

(3) 本文提供了从理论分析到硬件实现、软件控制和实验验证的完整系统研究。贡献如下:

专用于电气柜的紧凑、低功耗热电除湿模块。

具有迟滞控制、故障报警和 Wi-Fi 远程监控的嵌入

式智能控制器。

不同工况下的完整实验数据, 证明优于加热法的效果。

排水、热隔离和传感器布置的实用设计指南。

论文结构如下: 第 2 节介绍系统架构和工作原理。第 3 节详述硬件组件和热设计。第 4 节给出多组实验的结果。第 5 节总结全文。

1 系统架构与工作原理

1.1 总体架构

(1) 系统包含四个功能层:

传感层: DHT22 数字湿度和温度传感器。量程 0–100% RH (精度 $\pm 2\%$), -40 至 $+80^\circ\text{C}$ (精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)。采样间隔 2 秒。

控制层: STM32F103C8T6 微控制器 (ARM Cortex-M3, 72 MHz, 64 KB 闪存, 20 KB RAM), 读取传感器数据, 执行迟滞控制算法, 驱动继电器输出, 管理 Wi-Fi 通信及本地 LCD 显示和蜂鸣器。

执行层: 热电制冷片: TEC1-12706 (40×40×3.6 mm), 最大制冷功率约 50 W。冷端风扇 (12 V DC, 0.2 A, 风量 18 CFM) 强制柜内空气流过冷端铝制散热片。热端风扇 (12 V DC, 0.3 A, 风量 25 CFM) 将热量排出到外部环境。继电器模块 (SRD-05VDC-SL-C) 切换 15 V 电源至制冷片。

通信与人机界面层:

ESP8266 (ESP-01S) 用于 Wi-Fi 连接, 将数据发送至云端 MQTT 代理 (如 ThingSpeak 或 Blynk)。

16×2 LCD (I²C 接口) 显示当前湿度、温度和系统状态 (开/关、报警)。

无源蜂鸣器输出声音报警。

(2)电源转换单元将 220 V AC 转换为 15 V DC (5 A) 和 5 V DC (2 A)。15 V 为制冷片和风扇供电, 5 V 为微控制器、传感器、LCD、ESP8266 和继电器线圈供电。

1.2 帕尔贴除湿工作原理

帕尔贴模块基于热电效应: 当直流电流流过两种不同的半导体 (P 型和 N 型) 时, 一侧 (冷侧) 吸热, 另一侧 (热侧) 放热。本应用中:

冷侧装于柜内铝制翅片散热器上。冷侧风扇将潮湿空气抽过冷端散热片。当散热片温度降至柜内空气露点以下时, 水蒸气在翅片上凝结。水滴形成后落入集水盘并排出。

热侧带走吸收的热量加上输入的电功率。较大的热端散热器和风扇将热量排至室外环境 (通过柜壁开口)。

微控制器控制继电器。采用迟滞阈值防止快速开关循环。例如: $RH > 70\% \rightarrow$ 开启; $RH < 45\% \rightarrow$ 关闭; 45%–70% 之间保持前一状态。

除湿激活时, 系统持续移除液态水, 从而降低柜内的绝对湿度。

2 硬件设计

2.1 电源与驱动电路

输入 220 V AC (50 Hz) 通过封闭式开关电源 (明纬 RD-65A) 降压整流, 提供两路隔离输出: 15 V/4.5 A 和 5 V/2 A。15 V 输出连接到常开继电器 (松乐 SLA-12VDC-S-L)。微控制器通过三极管 (2N2222) 和续流二极管驱动继电器线圈。10 A 保险丝保护电路。5 V 输出直接为微控制器、传感器、LCD 和 ESP8266 供电。

2.2 热电模块与热管理

制冷片选型: TEC1-12706 ($V_{max}=15.4$ V, $I_{max}=6$ A, $T_h=27^\circ\text{C}$ 时 $Q_{max}\approx 58$ W)。工作电压 12–15 V 以平衡制冷能力和可靠性。在 13.5 V 和 3.8 A (典型负载) 下, 制冷功率约 40 W。

冷端组件:

散热片: 铝, 60×60×40 mm, 鳍片间距 2.5 mm, 表面积约 0.12 m²。

导热界面: Arctic MX-4 导热膏 (导热系数 8.5 W/m·K)。

风扇: 60×60×15 mm, 12 V, 0.2 A, 3500 RPM, 静压 2.1 mmH₂O。

冷端散热器置于柜体上部一角, 风扇从柜底抽风吹过散热片, 形成循环回路。

热端组件:

散热片: 铝, 80×80×50 mm, 鳍片间距 3 mm, 表面积约 0.22 m²。

风扇: 80×80×25 mm, 12 V, 0.3 A, 2800 RPM。

热端散热器安装在柜体外后壁。柜体金属板上开矩形孔 (70×70 mm), 热端散热器突出于外。风扇安装在外部侧, 将热空气从散热器抽走。橡胶垫圈确保开口处气密。

热隔离: 在制冷片周围, 冷热端之间放置 3 mm 厚氯丁橡胶垫片, 以最小化热量倒流。模块边缘用低导热环氧树脂密封。

2.3 传感器布置

DHT22 安装在柜体上与除湿器相对的一侧中部, 距离冷气出口约 20 cm, 避免受到冷端局部冷却影响, 提供柜内平均温湿度读数。电缆通过密封电缆接头引出。

2.4 排水系统

冷凝水托盘 (ABS 塑料, 100×70×15 mm) 位于冷端散热片正下方。托盘底部以 10° 坡度向排水孔 (孔径 6 mm) 倾斜。硅胶管 (内径 6 mm, 外径 10 mm) 连接该孔至柜壁最低处的穿板接头。柜外管道末端做成 U 形弯 (水封), 防止昆虫和热空气进入。安装后在 U 形弯中保留少量水。

可选地, 可在托盘中增加浮子开关, 以检测排水管堵塞时的溢水; 但本原型中依赖定期目视检查。

2.5 柜体改造

柜体顶部附近需要一个小型通风口 (带防尘滤网), 使柜门关闭后空气得以交换, 避免除湿造成负压。同时, 排水出口和热端排风口分开设置。所有入口使用 IP54 级电缆密封套密封。

3 实验结果与分析

3.1 测试设置

采用标准金属电气柜 (600×500×350 mm, 容积约 105 L, IP54 等级) 放置在可编程温湿度箱 (ESPEC AR-3H) 内。该箱可维持 30%–95% RH ($\pm 2\%$) 和 10°C–50°C 温度。参考湿度计 (Testo 625, 精度 $\pm 1\%$ RH) 置于 DHT22 旁进行验证。

在不同环境温度 (15°C、25°C、35°C) 下进行实验。每个温度下分别设置初始 RH 为 70%、85% 和 95%。系统除湿器手动启动 (或通过自动控制) 并记录每分钟数据, 持续 60 分钟。功耗使用插座式功率计 (TP-LINK Kasa KP115) 测量。每组实验重复三次。

3.2 不同初始湿度下的结果 (环境温度 25°C)

表1 测试条件：环境温度 25°C，箱体维持 25°C，变化初始 RH。

初始 RH (%)	降至 50% RH 所需时间 (min)	降至 45% RH 所需时间 (min)	60 min 时稳态 RH (%)	收集的冷凝水 (mL)
70	8	14	43.2	12.1
85	13	20	43.5	23.5
95	22	32	44.1	34.8

观察结果：初始 85% RH 时，系统在 20 分钟内将 RH 降至 45%（与摘要一致）。冷凝水量随初始湿负荷增加而增加。95% RH 测试中除湿器持续运行 28 分钟。

关闭后，由于柜壁残留水分和通过密封的外部扩散，湿度缓慢回升，速率约每小时 1-2%。

3.3 环境温度的影响

表2 测试条件：初始 RH 固定为 85%，环境温度分别为 15°C、25°C、35°C。

环境温度 (°C)	冷端最低温度 (°C)	降至 50% RH 时间 (min)	平均功率 (W)	内部温升 (°C)
15	-2.3	9	44.5	1.8
25	3.1	13	46.2	2.6
35	8.5	21	48.1	4.1

说明：环境温度越高，热端温度越高，制冷片冷热端温差减小，制冷能力下降。因此除湿时间延长，功率轻微上升（因电流略增）。但即使在 35°C 下，系统仍能在 21 分钟内将 RH 降至 50% 以下，满足大多数柜体安装需求。

3.4 长期稳定性测试（7 天）

柜体放置在自然室外环境中（春季，日均温度 18-26°C，夜间湿度常>90%）。系统设为自动模式，RH_on=70%，RH_off=45%。每 10 分钟通过云端记录一次温湿度。

7 天（168 小时）结果：

除湿器每天平均激活 12 次。

平均单次运行时间：12.5 分钟。

日均能耗：约 0.115 kWh/天。

柜内相对湿度在 42%-68% 之间，从未达到凝露条件（露点始终低于冷表面温度，除测试外）。

无漏水，传感器漂移在规格范围内。

远程报警工作正常；一次高湿事件（因维护时柜门未关）在 30 秒内触发了推送通知。

3.5 局限性讨论

当环境温度低于 0°C 时，冷凝水可能在冷端结冰，堵塞气流和排水。解决方案包括定时加热冷端或间歇运行。这列为未来工作。

对于非常大的柜体 (>1 m³)，单个帕尔贴模块可能不足，需要多个模块或多级除湿。

本系统假设柜体密封良好。若柜体有较大开口，性能会下降。

4 结论

本文完整设计并评估了一种具有主动除湿干燥功

能的电气柜系统。该系统利用帕尔贴热电模块将柜内空气中的湿气冷凝并排出，采用 STM32 微控制器实现智能迟滞控制，并通过 ESP8266 实现物联网远程监控。

主要结论：

有效的湿气移除：在典型条件下，原型机在 20 分钟内将相对湿度从 85% 降至 45% 以下，每小时运行抽取液态水超过 20 mL，从根本上防止凝露和腐蚀。

高效率：主动平均功率 46 W，日能耗仅 0.115 kWh，比相同环境下常规 100 W 加热器节能约 90%。

总之，本热电除湿系统为电气柜湿度管理提供了一种实用、节能且智能化的解决方案，显著提高了设备可靠性和使用寿命。

参考文献

- [1] 付善喜. 风力发电机组电气柜灭火装置及其控制系统的设计 [J]. 电工技术, 2026, (06): 43-45.
- [2] 代瑞秋, 肖明辉, 崔玉辉. 关于轨道车辆电气柜设计规范的研究 [J]. 铁道车辆, 2025, 63 (04): 207-211.
- [3] 冯华伟, 刘志超, 周平, 等. 地铁车辆检修车间电气柜门电控锁的设计及运用 [J]. 时代汽车, 2025, (15): 105-107.
- [4] 董金华. 基于 IDBO-SVM 的电气柜火灾监测预警系统的设计与研究 [D]. 安徽理工大学, 2025.
- [5] Zhang J, Li C, Su G, et al. Case Study on Investigation of Electrical Cabinet Fire Caused by Poor Electrical Contact [J]. Fire, 2025, 8 (11): 412-412.

基金项目：湖南省大学生创新创业训练计划项目 (S202310549014; S202310549030)