

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-465-06

数据中心间接蒸发冷却机组的低温运行问题 及解决方法

陈羿姿

(同方股份有限公司 北京 100083)

【摘要】 针对内蒙古地区低温干燥气候条件下,数据中心应用间接蒸发冷却机组实际运行中出现的换热芯体结露及结冰等问题展开分析,指出问题成因并提出技术解决措施。结合实际运行案例,采取包括室外风机轮询控制、排风旁通预热以及换热芯体结构优化等一系列措施。应用结果表明,通过上述措施,在内蒙古-28.5℃的极端低温工况下,机组换热芯体未出现冰堵现象,风量衰减控制在5%以内,PUE增加约0.015,有效防范了结露与冻结风险,提高机组在严寒条件下的可靠性与能效,为寒冷地区数据中心冷却系统的安全稳定运行提供了实践参考。

【关键词】 数据中心;间接蒸发冷却机组;防结露;防冻

中图分类号 TU83 文献标志码 B

Low-Temperature Operation Issues and Solutions for Indirect Evaporative Cooling Units in Data Centers

Chen Yizi

(Tongfang Co., Ltd, Beijing, 100083)

【Abstract】 This paper analyzes issues such as condensation and freezing of the heat exchange core in indirect evaporative cooling units operating under the low-temperature and dry climate conditions of Inner Mongolia, identifies the causes of these problems, and proposes technical solutions. Based on actual operation cases, a series of optimization measures have been implemented, including outdoor fan polling control, exhaust air bypass preheating, and structural improvements to the heat exchange core. The application results demonstrate that, with the aforementioned measures implemented, no ice blockage occurred in the heat exchanger core of the unit under extreme low-temperature conditions of -28.5℃ in Inner Mongolia. Airflow degradation was maintained within 5%, and the Power Usage Effectiveness (PUE) increased by approximately 0.015. The measures effectively mitigated risks of condensation and freezing, thereby enhancing the reliability and energy efficiency of the unit under severe cold conditions, offering practical insights for the safe and stable operation of cooling systems in data centers located in cold regions.

【Keywords】 Data center; Indirect evaporative cooling unit; Anti-condensation; Freeze prevention

0 引言

随着数字经济蓬勃发展,数据中心行业因算力需求激增迎来新一轮高速增长。然而行业高能耗的现状仍未得到根本性改善,有研究报告预测显示,到2030年全国数据中心总用电量约为5257.6亿千

瓦时,用电量将占到我国全社会用电量的4.8%^[1],节能降耗成为行业可持续发展的关键命题。在此背景下,间接蒸发冷却技术凭借其显著的节能优势,在数据中心冷却系统中得到广泛应用,尤其在干燥寒冷地区如内蒙古,其节能效果更为突出^[2]。但内

蒙古地区冬季持续时间长、平均温度低,春秋季风沙频发,给间接蒸发冷却机组的稳定运行带来诸多挑战,包括换热器冻裂、结霜堵塞、过滤器堵塞等问题,严重影响系统能效与可靠性。本文结合内蒙古地区的气候特征,深入剖析间接蒸发冷却机组实际运行问题及危害,针对性提出解决方案,旨在优化机组配置及运行策略,降低故障风险,全面提升数据中心冷却系统的运行稳定性与节能效益。

1 间接蒸发冷却机组工作原理

蒸发冷却技术是利用不饱和空气与水接触产生热质交换,水在蒸发过程中吸收热量,使得空气和水温度降低形成制冷效果。该过程以空气中的“干空气能”为驱动,可有效延长自然冷源利用时间,节能效果显著。间接蒸发冷却是指通过非直接接触式换热器将直接蒸发冷却得到湿空气的冷量传递给待处理空气实现空气等湿降温的过程^[3]。

间接蒸发冷却机组则是以间接蒸发冷却技术为核心技术的空调设备,其核心部件为间接蒸发冷却换热芯体,本质为空气-空气换热器,室外空气经水喷淋实现蒸发吸热,获取冷量后流经换热器一侧,与换热器另一侧的室内循环空气进行换热,降低室内空气温度;冬季可利用室外低温空气直接通过换热器,借助自然冷量冷却室内空气,完成数据中心设备散热^[4]。

其机组内核心部件有金属或高分子材料的空气换热器、由水箱、管道、喷淋泵等组成水循环系统、送、排风机组、集成温湿度传感器、电动阀等设备的控制系统、初、中效过滤系统。工作原理如图1所示^[5]。

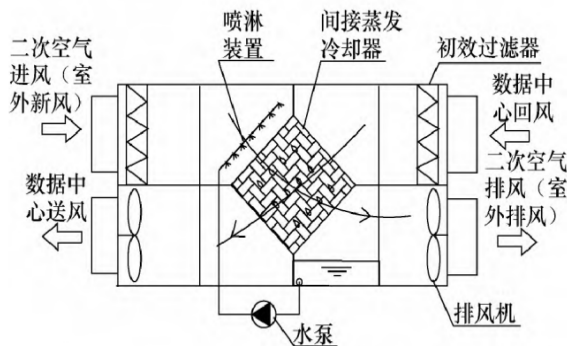


图1 间接蒸发冷却机组工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of the working principle of indirect evaporative cooling unit

2 间接蒸发冷却机组运行问题分析

2.1 水系统与换热器结冰问题

内蒙古地区冬季平均气温在 $-10^{\circ}\text{C}\sim-25^{\circ}\text{C}$,极端情况可达到 -30°C 以下^[6]。在冬季室外低温条件下,间接蒸发冷却机组应停止蒸发冷却运行模式,仅通过室外冷风与室内回风换热即可获得机房所需冷量。此时的机组内部应将水全部排空,不得有残留。但实际运行过程中,水系统的水箱内壁、喷淋管弯头处、水泵腔体等部位易有水残留,在极端温度下出现结冰膨胀,严重时可能导致管道冻裂,再次充水时将产生泄漏,影响机组的正常运行。

冬季运行时室内侧空气的温度和湿度相对较高,室内侧回风的露点温度可能高于室外进风温度。当室外空气进风温度降低至室内回风的露点温度以下时,室内回风通过换热器与室外空气换热的过程中,易在换热器的室内循环侧产生结露甚至是结冰的现象。换热器若结冰将引起换热器堵塞,降低机组换热效率,若结冰严重,还可能造成换热芯体损伤,引起机组运行故障。

在冬季的雨雪天气,低温气流易夹杂雨雪进入机组,在机组内部如过滤器、换热芯体室外进风侧等处产生结冰。

2.2 过滤系统堵塞问题

内蒙古春秋季节大风携带沙尘,导致室外进风侧的初效过滤器易被颗粒物堵塞。同时含湿量较低的干燥空气易导致机组表面积累形成静电场,吸附空中粉尘,加重滤网堵塞现象。滤网堵塞后机组室外进风量减少,将导致冷却效率下降,室内冷量不足出现高温报警,不利于机房内部设备的稳定运行。

2.3 密封件失效问题

内蒙古全年昼夜温差普遍超过 10°C ,部分季节甚至可达 $15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。常规橡胶密封件的弹性在持续低温下会下降,易发生永久变形或开裂。在频繁温差变化中材料本身热胀冷缩带来的应力导致密封件与金属框架间产生间隙,破坏整体机组密封性。渗入缝隙的水分结冰后体积膨胀,加速密封结构剥离。同时内蒙古地区频发的风沙天气,细颗粒物侵入密封界面,可能导致密封件的磨损和老化。密封件失效将导致机组漏风率上升,直接降低机组的冷却效率。

3 技术解决措施

针对间接蒸发冷却机组在内蒙古地区冬季运

行存在的问题从设备本身设计优化、运维管理等多角度提出技术解决措施。

3.1 防结露、防结冰保护措施

3.1.1 预热及保温

在室外排风与室外进风之间安装旁通风阀,利用温度较高的室外排风对进入机组的低温空气进行预加热,使冷空气在接触换热芯体前提升温度,从源头避免因低温空气直接与室内高温回风换热导致的芯体结冰问题。但其代价是降低了自然冷源的利用效率,引入排风提高进风温度,减小了芯体内的换热温差,从而导致风量增加,风机功耗增加。假设在 -15°C 的环境温度下,旁通风阀开度 15%,风机转速需提升约 18%以维持风量,风机功耗增加 30%。由于预热措施仅在低温时段启用,对数据中心全年 PUE 的影响较小,实测数据显示 PUE 仅增加约 0.015。

在保温与主动加热方面,可通过加装自限温电伴热带,通过持续的温度维持,杜绝死水结冰对管路造成的损坏。针对水系统防冻问题,电伴热功率选型应基于管道热损失进行计算,电伴热功率 Q 应满足公式 (1)。

$$Q = \frac{2\pi\lambda(T_{\text{air}} - T_{\text{env}})}{\ln\left(\frac{D}{d}\right) + \frac{2\lambda}{Dh_o}} \quad (1)$$

式中: λ 为保温层导热系数,岩棉取 $0.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; T_{air} 为维持温度,取 5°C ; T_{env} 为环境温度,取内蒙地区极端低温 -30°C ; D 为保温层外径; d 为管道外径; h_o 为保温层外表面放热系数,经验公式为 $1.163(6 + 3\sqrt{\omega})$, ω 为风速,可取 5m/s 。

如对 DN50 的喷淋主管外包 30mm 岩棉,计算所需维持功率为 12W/m ,实际选型采用 15W/m 的自限温电伴热带,确保在极寒天气下管道内残留水不结冰。

3.1.2 水系统排空

针对室内回风在换热芯体表面结露、结冰的问题,优化冷凝水排出路径,加速冷凝水排除,避免大面积结冰。通过将换热芯体以 45° 倾斜安装,利用重力构建高效排水坡度。当室内高温回风与室外低温空气进行换热,在换热芯体表面形成冷凝水析

出时,冷凝水能及时从芯体下方排出至接水盘,避免冷凝水积聚在芯体内部,有效阻断低温环境下水分逐步冻结形成冰堵的风险,保障换热芯体的换热效率与空气流通路径的畅通。

为确保低温环境下,机组以干模式运行时内部水系统能够排空,在运维过程中可进行主动排水和强制吹扫。在水箱底部、喷淋管道最低点处等安装排水阀,停机时打开排水阀,使机组内大部分积水排出;随后引入干燥压缩空气,从预设的吹扫口对机组内部水系统进行分段吹扫,确保管道内壁、阀门腔体及换热部件缝隙中的残留水分彻底吹净,杜绝低温环境下残留水分冻结导致管道破裂或部件损坏。

3.1.3 物理防护

针对冬季雨雪进入机组的问题,可在机组进风口处悬挂挡风板,此类挡风板可采用防腐合金或阻燃复合材料制成,具备良好的抗风载能力和耐候性。安装时应根据进风口尺寸进行定制,确保挡风板与机组外壳紧密贴合,形成有效的气流屏障。通过改变气流方向,减少冷空气夹带雨雪直接侵入机组,同时利用挡风板的倾斜角度引导雪水向地面导流,避免雪水随气流进入进风口。加装挡风板单台机组的成本增加约 1.5%,属于低增量、高收益的安全措施,可在设备生产阶段纳入标准配置。

在换热芯体的新风进风口或排风口,部署可调节的挡风板或电动风阀,通过动态调整进风通道的有效截面积,精确控制风量并提升空气流速,从而缩短低温空气在换热芯体内部的滞留时间,避免因长时间热交换导致表面温度降至冰点以下而产生结露或结冰。

3.2 防风沙堵塞措施

针对风沙堵塞过滤网及干燥静电加剧粉尘堆积问题,机组可采用大容尘量、低阻力自清洁型滤料,增大过滤面积并优化流道设计降低初始压差;壳体结构宜采用导电复合材料或接地金属框架,结合电离式静电消除装置集成于进风段,持续中和气流携带电荷,消除静电吸附效应。可在过滤网外层增设不锈钢纱网,起到防柳絮、大颗粒沙尘的作用,减少过滤网磨损及维护频次。加装不锈钢纱网占整机成本的 0.5%,但主要过滤网寿命可延长 2-3 倍,堵塞率下降 40%-70%。



图 2 过滤网外层增设不锈钢纱网实物图

Fig.2 Actual photograph of the filter screen with additional stainless steel wire mesh installed on its outer layer

在运维层面,可设置压差传感监测滤网两侧压差,监控滤网堵塞情况并建立季节性清洁规程,在风沙高发期加密滤网拆洗频次,并采用导电液静电消除剂对换热翅片与壳体表面进行定期喷涂,减少静电堆积。

3.3 密封优化措施

换热器边框、过滤段框架、风机箱法兰、水管穿孔等部位的密封件优选抗老化效果好、耐温范围宽的密封材料,并在密封结构设计预留热胀冷缩补偿余量,适应内蒙古地区极端温差工况。机组的气密性框架采用双层面板结合聚氨酯保温层,做好保温层厚度核算并有阻断冷桥的保温设计,降低环境低温对机组内部的影响,相比普通机组,增设保温层单台机组成本增加约 10%~15%。

3.4 智能运维措施

3.4.1 远程监控与预警

机组运行状态参数全部接入数据中心智能运维平台,进行实时监测,设置预警系统,及时发现机组运行问题,提升机组运行稳定性。如换热器进出口温差,正常温差应维持 $\geq 8^{\circ}\text{C}$,低于 5°C 发出告警;换热器进出口风压差,较基准值上升 15%~30%时触发告警,上升 $>30\%$ 表示换热器可能发生严重堵塞需停机保护;水箱水温低于 5°C 时触发一级告警,低于 0°C 触发二级报警并联动电加热等。

3.4.2 定期维护与检查

为确保冬季设备稳定运行,应提前完成电伴热系统有效性验证,并清除换热器积尘以维持热交换效率;同时对机组实施泄水及强制吹扫处理,避免管道因低温冻结。在换热通道内部署红外传感器与

温度探头,实时监测结霜状态,并基于划分的换热区域实施分区除霜策略,当特定区域检测到结霜时,仅关闭该区域对应室外进风阀门,阻断冷空气进入,启动加热除霜,其余区域持续运行。定期执行换热芯体拆卸清洗程序,尤其针对非金属芯体的宽片距结构,防止污垢堆积引发的局部低温结冰现象,从而保障设备在低温环境下的持续高效运行。

4 工程案例与应用效果

4.1 项目概况

某金融数据中心项目位于内蒙古和林格尔新区,机房建设等级按照国标 A 级机房标准设计,为充分利用内蒙古地区的自然冷源,模块机房采用间接蒸发冷却机组,全年供冷,具有独立的喷淋降温系统及压缩机补冷。机房内 IT 机柜功率负荷按 8kW 计算,间接蒸发冷却机组的冗余配置原则为 N+X。

间接蒸发冷却机组通过侧墙百叶送风口进入模块机房,弥散式送风,机房内部为冷环境,热回风通过封闭热通道进入吊顶内,再通过风道进入空调机组回风侧。机组可根据室外环境温度切换运行工况:当室外干球温度 $\leq 15^{\circ}\text{C}$ (可调)时,室外空气可通过换热器将室内热负荷完全置换出去,关闭压缩机和喷淋泵,在干工况下运行;当室外干球温度 $> 15^{\circ}\text{C}$ (可调)且湿球温度 $\leq 18^{\circ}\text{C}$ (可调)时,室外空气经喷淋后可通过换热器将室内热负荷完全置换出去,此过程无需压缩机,为湿工况运行;当室外湿球温度 $> 18^{\circ}\text{C}$ (可调)时,经喷淋的室外空气不能完全将室内热负荷置换出去,需要压缩机补充制冷,此过程为混合工况。据内蒙古呼和浩特气象参数统计,干工况运行时间可达 5778 小时,占全年机组运行时间的 66%;湿工况运行时间可达 2542 小时,占全年机组运行时间的 29%;混合工况运行时间约 440 小时,占全年机组运行时间的 5%。

4.2 冬季运行问题

4.2.1 停机状态结露或结冰

间接蒸发冷却机组安装交付前期,由于机房负载较低,室内负荷较小,只开启部分机组运行,其余机组长时间处于停机状态,导致机组内部室内空气侧的壁面温度冷却至室外温度,同时机房内为控制环境湿度开启加湿器,导致室内侧空气湿度较

大。室内含湿量较大的空气通过风阀等部位渗漏至停机机组内部,出现停机状态下的机组换热器室内空气侧壁面结露或结冰现象。

当机房负载逐渐升高、室内负荷逐步达到设计条件的情况下,若冗余部分的机组采用冷备运行的方式,则长时间未开机的备用机组同样会出现前期低负载运行时,停机机组内部结露或结冰的问题。

4.2.2 运行状态机组换热芯体结露或结冰

当室外温度极低,一般在低于 -10°C 时,室外低温进风使机组内换热芯体表面温度降低,降低至室内空气露点温度以下时,室内空气侧开始出现结露现象,若温度持续过低,冷凝水逐渐结霜甚至结冰,在换热器的通道内集聚形成冰堵。



图 3 换热芯体结冰实物图

Fig.3 Actual photograph of the icing of the heat exchange core

4.3 解决措施

4.3.1 采用保温风阀

在风阀叶片内部填充玻璃棉或聚氨酯保温材料,选用密封性好、漏风量小的风阀,有效避免停机状态下室内空气渗漏现象,避免停机机组内部结露或结冰。如机房负载无法保持机组持续开启,且风阀密封性较差,则建议现场运维人员对暂时无法开启的停机机组的送回风口采取封堵措施,避免机房漏湿至机组内部。

4.3.2 机组热备运行

当机房内负载升高、室内负荷逐渐达到设计条件时,间接蒸发冷却机组采用热备运行模式,即所有机组均处于开机状态,且在部分负荷条件下运行,可有效避免停机机组内部结露或结冰问题,同时室内送风更加均匀,减少局部热点问题。

4.3.3 室外风机轮询策略

对于冬季运行状态下换热器芯体在室内空气侧有产生冷凝水或结冰的问题,主要通过减少结冰

处的室外进风量,控制室内侧表面温度高于 0°C 进行缓解。控制逻辑设计把外风机分组,采用可设定轮询时间的方式,进行分组间轮询的策略。具体逻辑如下:

(1) 根据实际负载和现场气候情况,判断机组是否需要进入防结露模式。

(2) 进入该模式后,判断室外环境温度,若在某个设定值维持 30min 以上时,机组快速进入外风机轮询调节,此时判断外风机转速和冷量需求。

(3) 若外风机已达最小转速且冷量需求小于下限,关闭一组室外风机,再判断芯体室内侧送风温度是否大于室内侧回风露点温度+余量,若是则退出防结露模式,若否则继续在该模式下运行。

(4) 若实际室外温度较高,结露是由于实际机房负载较低导致室内侧送风温度低于室内回风露点温度+余量,可首先降低外风机,降到最小仍未满足芯体室内侧送风温度大于室内侧回风露点温度+余量,则增大室内风机转速,降低换热温差,提高送风温度,防止结露。

(5) 外风机增加送风温度控制,为了防止芯体结露需要根据送风温度控制室外风量,避免送风温度低于露点温度。若送风温度仍然偏低,关闭一组室外风机,直至芯体室内侧出风温度大于室内侧回风露点温度+余量,退出防结露模式。

4.3.4 芯体结构设计优化

芯体呈 45° 倾斜放置,当内侧有冷凝水析出时,能及时从芯体下方流出,排出至接水盘,避免冷凝水积聚在芯体内部,逐步结冰,形成冰堵。

4.3.5 热风旁通预热措施

当室外温度低于 5°C 时,根据间接蒸发冷却机组的室外进风温度,调节旁通阀开度,使得机组的室外排风混入机组平台,预热机组进风,保证机组的室外进风温度不低于 5°C ,防止换热芯体出现结露或结冰现象。

4.3.6 融冰控制措施

如芯体出现部分结冰现象时,通过遮挡室外芯体下半部分,阻止室外冷风进入换热芯体,对应芯体室内的结冰部位通过温度较高的室内回风气流流过,加热融化芯体结冰部分。

4.4 运行效果实测数据

在采取上述措施之后,选取 2024 年 1 月连续 72 小时运行数据进行分析,具体效果如表 1 所示。

表 1 间接蒸发冷却机组防冻措施实施前后对比表

Table 1 Comparison of freeze protection measures for indirect evaporative cooling units before and after implementation

测试 工况	环境温度 /℃	措施实施前现象	措施实施后数据	改善效果
极端低温	-28.5	换热芯体严重冰堵，风量下降 40%	芯体无冰堵，风量衰减<5%	风量恢复 95%
低温运行	-15.2	室外风机全开，送风温度 1.2℃， 有结露风险	启动轮询策略，送风温度 12.5℃	消除结露风险
停机状态	-20.0	停机 24h 后芯体底部积水结冰	停机 24h 无结冰，电伴热维持 6℃	防止设备冻裂

5 结论与展望

在内蒙古地区独特的寒冷、干燥、强风沙环境下应用间接蒸发冷却机组虽然能显著降低数据中心 PUE 值，但实际运行过程中可能出现换热芯体结露、结冰、过滤器堵塞等多种问题，影响系统运行的可靠性、节能效果和设备寿命。针对这些关键挑战，本文通过深入分析其成因，提出一系列优化措施，并举出工程应用实例，实测数据显示，优化后的系统在-28.5℃环境下仍能稳定运行，机组全年 PUE 仅增加 0.015。

随着“东数西算”工程的深入推进，数据中心绿色低碳发展的要求也更加严格，间接蒸发冷却机组在寒冷干燥地区的应用前景广阔。为进一步提升该类型机组的运行能效与适应性，可从机组本身换热器材料、智能运维模型建立等方面继续深入探索，比如研发具有更高疏水性、防结霜涂层或特殊表面结构的芯体材料，从源头上抑制冷凝水附着和结冰倾向；深度融合人工智能和数据分析技术，搭建更为精准的结冰、堵塞预测模型，实现基于气象

条件与运行参数的主动调控，优化运行策略等，通过不断的实践积累和优化创新，完全实现间接蒸发冷却机组在寒冷干燥地区的可靠、高效、绿色运行目标。

参考文献：

[1] 王永真,唐豪,魏一鸣,等.中国数据中心综合能耗及其灵活性预测[J].北京理工大学学报(社会科学版),2025,27(2):12-18.

[2] 肖芳斌,彭玉成,蔡俊豪.间接蒸发冷却技术在数据中心的应用与对比分析[J].制冷与空调,2022,22(5):66-72.

[3] 肖新文.间接蒸发冷却空调机组应用于数据中心的节能分析[J].暖通空调,2019,49(3):67-71.

[4] 王红利,黄翔,寇凡,等.数据中心用蒸发冷却(凝)技术发展现状[J].制冷与空调,2021,21(11):1-6.

[5] 金洋帆.数据中心用板式间接蒸发冷却器的布水试验研究[D].西安:西安工程大学,2021.

[6] 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.

(上接第 464 页)

[5] 张小梅,胡永胜,戎晔.团体标准 T/CRAAS 1039-2023(T/CECA 20026-2023)《高效空调制冷机房系统能效监测与分级标准》解析[J].制冷与空调,2024,24(8):7-11.

[6] 徐健.某商场空调冷冻水大温差系统分析[J].建筑热能通风空调,2015,34(3):62-65.

[7] 毛华雄.高效制冷机房技术现状与分析[J].制冷与空调,2022,22(11):10-14.

[8] 张瑞,刘昶,冯泽.基于 BIM 的城市轨道交通地下车站装

配式高效制冷机房应用[J].暖通空调,2018,48(1):99-103.

[9] T/CRAAS 1039-2023,高效空调制冷机房系统能效监测与分级标准[S].北京:中国建材工业出版社,2023.

[10] 吴少光.夏热冬冷地区某购物中心高效制冷机房设计思考[J].制冷与空调,2025,25(8):84-90.

[11] 刘晓,王清勤,何维.建筑节能改造全生命周期成本效益分析模型及应用[J].建筑科学,2020,36(4):1-8.