机房氟泵空调系统运行模式切换控制策略优化研究

Optimization Research on Operation Mode Switching Control Strategy of Fluorine Pump Air Conditioning System in Computer Room

王　凯[1],王　蕾[2],解军沣[1],郭　凯[1],胡孝俊[1],张　帅[1],程　序[1],贺　晓[1](1. 中讯邮电咨询设计院有限公司,北京 100048;2. 中国联合网络通信集团有限公司,北京 100033)

Wang Kai[1],Wang Lei[2],Xie Junfeng[1],Guo Kai[1],Hu Xiaojun[1],Zhang Shuai[1],Cheng Xu[1],He Xiao[1](1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China; 2. China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China)

摘　要:

针对氟泵空调系统以室外环境温度作为单一判定依据切换运行模式时存在的自然冷源利用不充分等问题,以某市某实验机房为研究对象,构建送回风温差与室外温度双参数、冷量—负荷动态匹配2种优化控制策略。通过TRNSYS搭建系统仿真模型,对比传统控制策略与优化策略的运行特性及节能效果。结果表明2种优化策略的自然冷却运行时长分别提升50.80%和66.29%,系统全年节能率分别达6.62%和8.34%,可有效提高自然冷源利用率。

关键词:

氟泵空调;运行模式切换;控制策略;TRNSYS

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.10.005

文章编号:1007-3043(2026)10-0028-07

中图分类号:TU831.6

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Abstract:

To address the insufficient utilization of natural cold sources when fluorine pump air conditioning systems switch operation modes solely by outdoor ambient temperature, two optimized control strategies are proposed based on an experimental computer room in a city: supply-return air temperature difference combined with outdoor temperature, and dynamic matching between cooling capacity and terminal load. A dynamic simulation model of the system is established based on TRNSYS to compare the operational characteristics and energy-saving performance of the traditional control strategy with the optimized ones. The results indicate that the two strategies increase the natural cooling operation duration by 50.80% and 66.29%, with annual energy-saving rates of 6.62% and 8.34% respectively. The proposed strategies can effectively improve natural cold source utilization.

Keywords:

Fluorine pump air conditioning; Operation mode switching; Control strategy; TRNSYS

引用格式:王凯,王蕾,解军沣,等. 机房氟泵空调系统运行模式切换控制策略优化研究[J]. 邮电设计技术,2026(10):28-34.

0　引言

随着数字经济与云计算技术的快速迭代,数据中心的建设规模和数量呈现快速增长趋势[1],其能耗总量也持续攀升。据中国信息通信研究院统计,2025年全国数据中心用电量达到1 960亿kW·h,占全社会用电量的1.89%,同比增长18.1%,远高于同年全社会5.2%的用电增速。随着智能算力需求的持续爆发,预计2030年我国数据中心用电量占全社会用电量的比重将升至5%~10%[2]。面对日益严峻的能耗压力,探索高效稳定的自然冷却节能技术已成为数据中心绿色低碳发展的关键。

氟泵自然冷却作为一种新型节能技术,可根据室外环境变化开启不同的运行模式,最大程度地利用自然冷源[3],具有节能效果显著、可靠性高、维护成本低等优点[4],目前已在各类数据中心中得到广泛应用。当前,国内外学者围绕氟泵节能空调的原理及节能特性开展了大量研究。刘宏伟[5]等人以上海某风冷精密

收稿日期:2026-09-16

空调数据中心为研究对象，基于TRNSYS搭建了全年动态能耗仿真模型，重点探究了氟泵自然冷却技术对数据中心能耗及PUE的影响规律。韩小磊[6]等人设计了一套氟泵自然冷却空调模块，对氟泵系统模型进行模拟计算，发现氟泵自然冷却机组应用于数据中心冷却时节能效果明显，达到45.6%，综合系统COP显著提高。赵晓[7]等人基于某市全年室外气象参数及节能技术数据研究发现，采用自然冷源叠加蒸发冷却的新型节能技术可使数据中心机楼全年PUE降至1.25以下，为数据中心风冷空调节能技术选择提供了数据参考。王耀南[8]等人以氟泵自然冷却系统为研究对象，对比分析了不同结构氟泵系统的工作原理、控制策略与运行能效，为氟泵系统的工况适配与优化运行提供了数据支撑。黄翔[9]等人构建了蒸发冷凝—氟泵热管空调系统，并对其多模式运行性能进行了实验测试，明确了系统在不同运行模式下的能效差异，验证了该类系统在多气候区的模式切换适应性与节能效果。

尽管现有研究已验证氟泵空调系统的节能优势，但其在不同运行模式之间的切换控制策略仍存在优化空间：现有氟泵空调系统多以室外环境温度单一判定依据（下称“判据”）作为运行模式切换条件，通过固定温度设定值实现自然冷却模式与混合制冷模式之间的切换。这种控制方式虽实现简单，但对末端负荷变化的响应能力较弱，难以结合实际冷量需求动态调整运行状态，造成自然冷源利用不充分等问题。因此，本文以某市某实验机房空调系统为研究对象，提出基于送回风温差与室外温度双参数以及基于冷量—负荷动态匹配的2种优化控制策略，并基于TRNSYS软件搭建系统仿真模型，对不同运行模式切换控制策略下系统的运行特性与节能效果进行对比分析。

1 机房概况及系统介绍

1.1 研究对象

本文以某市某实验机房为研究对象。该实验机房建筑面积约407 m²，由一层3个测试机房及配电室等相关功能区域组成。为对氟泵空调系统运行模式切换控制策略进行分析，本文选取其中一间测试机房开展研究。该测试机房采用一拖一的风冷氟泵空调系统，室内侧设置一台房间级空调末端，采用上送前回的气流组织形式为机柜全年连续运行提供制冷保障。系统设备参数如表1所示。

1.2 系统设计参数

表1　系统设备参数

设备	参数	数值
风冷氟泵空调室外机	额定制冷量/ kW	60
	额定功率/ kW	15.9
房间级末端空调	额定制冷量/ kW	60
	额定功率/ kW	3.3
	循环风量/（m^3/h）	13 000

室外气象条件是影响氟泵空调自然冷源利用水平的重要因素。由于不同地区全年温湿度特征差异显著，氟泵空调在各区域的运行特性及节能效果存在明显差异。本文选取某市典型气象数据作为仿真模型输入条件，该市地处华北平原南部，属暖温带大陆性季风气候，四季分明，冷暖气团交替频繁[10]，全年室外气象参数波动较大。

机房室内设计参数应满足《数据中心设计规范》（GB 50174-2017）中机柜进风温度应控制在18~27 ℃，相对湿度不大于60%的要求[11]，以保证信息设备的安全稳定运行。在此基础上，结合现场实际运行工况，本文将机房回风温度设定为35 ℃，送风温度设定为23 ℃，作为系统控制策略设计与仿真分析的基础参数。

1.3 机房冷负荷计算

数据中心或通信机房冷负荷具有显著的内部负荷主导特征，主要由IT设备散热负荷、围护结构传热负荷、照明负荷、新风及人员负荷等组成。其中，IT设备散热负荷占比最大，是机房冷负荷的主要来源。考虑到本次实验机房的建设等级较低，未设置新风系统，且机房人员停留时间较短，新风及人员负荷在总冷负荷中的占比极小，本文在冷负荷计算中，在满足工程计算精度要求的前提下，将新风负荷及人员负荷的影响视为可忽略[12]。

本文采用TRNSYS中的TRNBuild模块建立机房冷负荷计算模型。为提高计算结果的真实性，机柜负载率选取机房典型运行日的实际逐时负载率，以反映不同运行工况下负荷变化规律。机房冷负荷模拟所需的主要参数如表2所示。

机房全年逐时冷负荷模拟结果如图1所示。从图1可以看出，机房冷负荷全年波动幅度相对较小，整体分布在20~50 kW内。由于IT设备散热量大且全年连续运行，机房冷负荷受室外环境温度变化的影响较弱，其变化规律与IT设备负载率呈现较强的相关性。

1.4 系统原理

表2　机房冷负荷计算模型主要参数

参数	数值
尺寸(长×宽×高)	3.3 m×9 m×5 m
服务器机柜数	10架
单机柜平均功率	4.5 kW
同时使用系数	0.9
外墙传热系数	1.2 W/(m²·K)
单位面积照明功率	9 W/m²

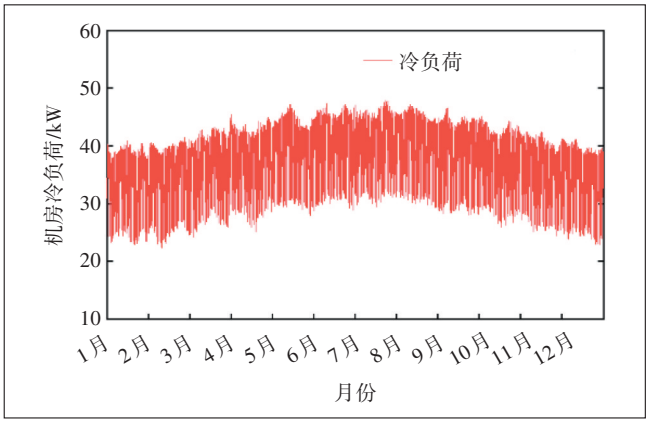


图1　机房全年逐时冷负荷模拟结果

本文研究的氟泵空调系统采用串联式架构,系统原理如图2所示。相对于常规风冷机房空调,该系统在原有制冷剂管路的基础上增加了氟泵、储液罐及相应的控制阀件。系统中氟泵与压缩机通过并联一路单向阀实现旁通设计[13],可根据运行工况实现氟泵与压缩机的独立运行或协同运行。

氟泵空调系统具有自然冷却、混合制冷、机械制冷3种运行模式,系统可根据室外环境温度及室内末端冷负荷变化,自动切换运行模式[14]。各运行模式的原理如下。

a)自然冷却模式。当室外温度较低时,压缩机停止运行,仅由氟泵驱动制冷剂在系统内循环,利用室外换热器将室内热量排至室外,实现自然冷源的利用。

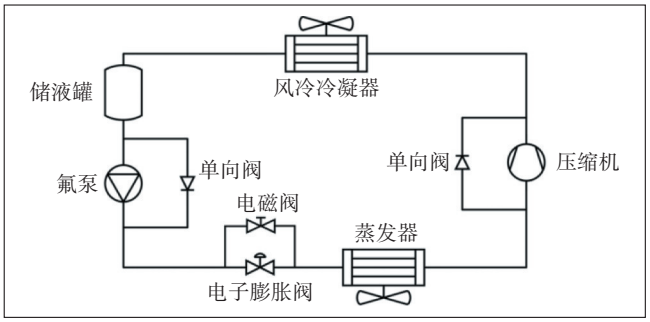


图2　氟泵空调系统原理

b)混合制冷模式。当室外温度处于过渡区间时,制冷剂循环由氟泵、压缩机提供动力,压缩机可根据末端负荷以较低压比运行,充分利用室外自然冷源,有效减少系统运行能耗。

c)机械制冷模式。当室外温度较高时,无法有效利用自然冷源,系统完全依靠压缩机制冷循环提供全部冷量,其运行原理与常规风冷机房空调系统一致。

1.5　系统运行模式切换控制策略设计

本文研究对象实际运行所采用的氟泵空调系统以单一室外环境温度作为运行模式切换的判据,通过固定温度设定值实现3种运行模式的切换:当室外环境温度≤5 ℃时,优先运行自然冷却模式;当5 ℃<室外环境温度≤15 ℃时,切换为混合制冷模式;当室外环境温度>15 ℃时,运行机械制冷模式。该策略的温度设定值根据《数据中心和通信机房用空气调节机组》(GB/T 19413-2024)[15]与机房实际运行工况确定,可根据现场运行反馈灵活调整。

针对上述控制策略造成系统自然冷源利用不充分的问题,本文在保留室外环境温度≤5 ℃强制运行自然冷却、>15 ℃切换为机械制冷的基本逻辑的基础上,重点对室外环境温度处于过渡温区(5~15 ℃)的运行模式切换条件进行优化。

1.5.1　策略1:基于送回风温差与室外环境温度的双参数切换控制

该策略在单一室外环境温度判据的基础上,引入送回风温差作为辅助判据,构成双参数协同切换逻辑。送回风温差可直接反映末端冷负荷强弱,能够弥补单一室外温度判据无法响应机房负载变化的不足。在室外环境温度处于过渡温区时,系统可根据送回风温差反映的负荷水平判断自然冷却模式的切入时机:当送回风温差较小时,表明末端负荷较低,系统优先切入自然冷却模式;当送回风温差增大至设定阈值以上时,重新判定系统运行模式。基于送回风温差与室外环境温度的双参数切换控制逻辑如图3所示。

1.5.2　策略2:基于冷量—负荷动态匹配的切换控制

该策略从冷量供需匹配的角度出发,以自然冷可提供的制冷量与机房实时末端负荷之间的关系作为运行模式切换的主要判据。在室外环境温度处于过渡温区时,若自然冷可提供的制冷量大于末端负荷的α_1倍($1<\alpha_1\leq1.3$,具体值可根据实际控制效果调整),表明自然冷能力具备一定裕度,系统切换为自然冷却模式;否则维持混合制冷模式。相较于策略1,该策略直

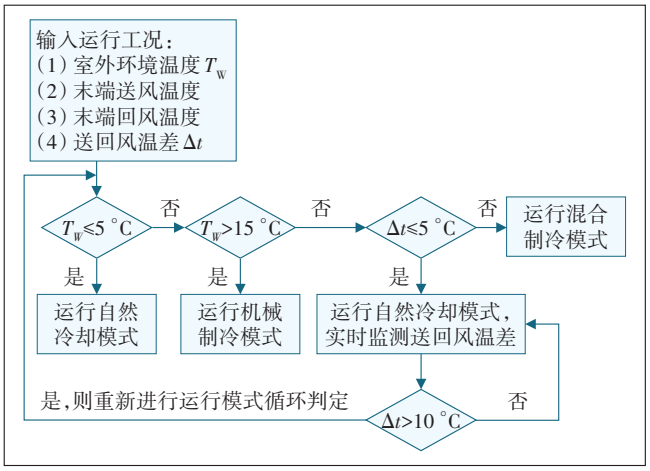


图3　基于送回风温差与室外环境温度的双参数切换控制逻辑

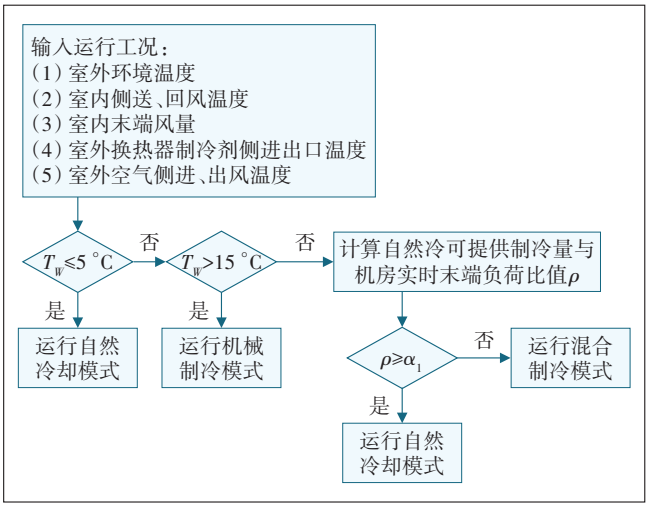


图4　基于冷量—负荷动态匹配的切换控制逻辑

接基于冷量平衡关系进行判定，能够更加准确地反映系统制冷能力与末端需求之间的匹配程度，实现更加精细化的运行模式控制。基于冷量—负荷动态匹配的切换控制逻辑如图4所示。

2 系统仿真模型

2.1 仿真模型介绍

根据串联式氟泵空调系统的结构特点，本文基于TRNSYS软件搭建了系统仿真模型（见图5）。模型主要包括换热器、机械制冷装置、风机、制冷剂泵、建筑末端、控制器及数据输出等模块，通过各模块之间的耦合计算，实现对氟泵空调系统全年运行过程的动态模拟。

为便于后续对不同运行模式切换控制策略进行对比分析，分别建立了传统策略（单一室外环境温度切换控制）、优化策略1（送回风温差与室外环境温度的双参数切换控制）、优化策略2（冷量—负荷动态匹

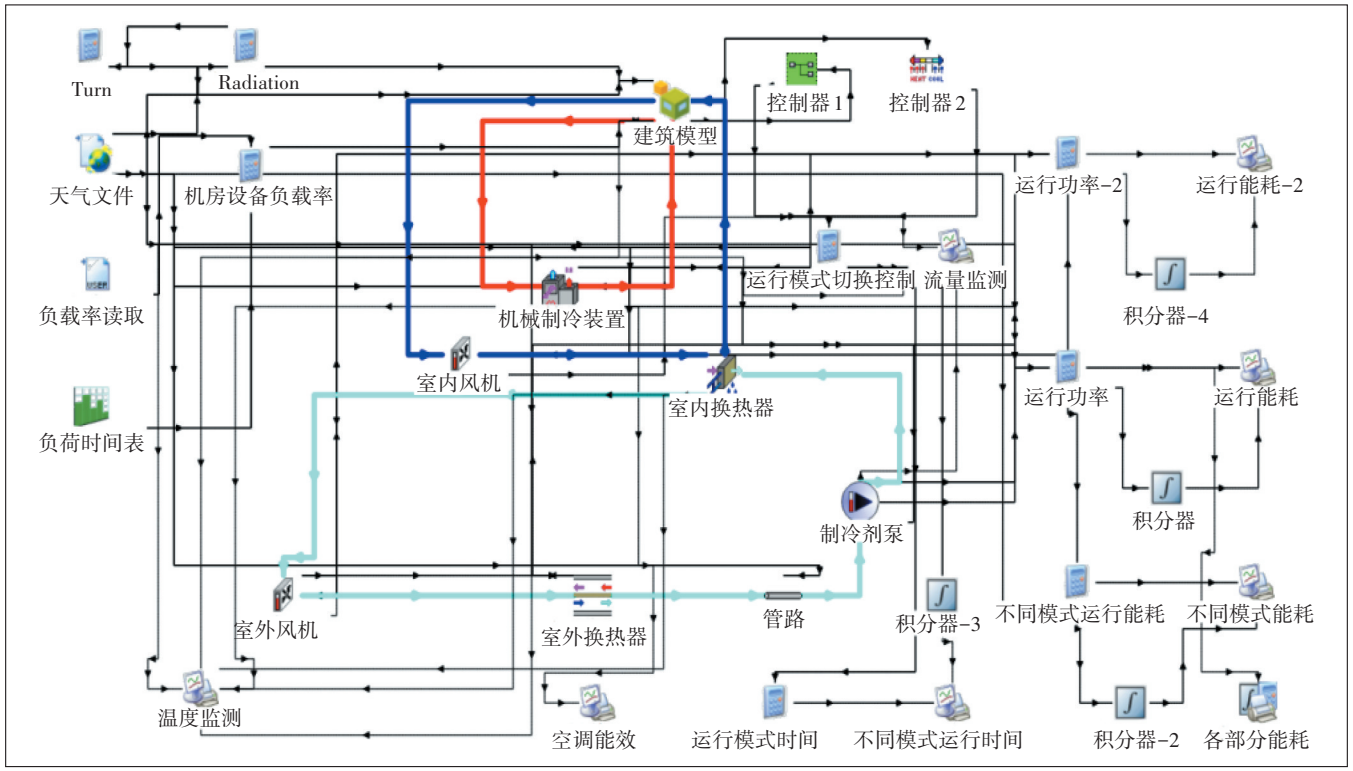


图5　氟泵空调系统仿真模型

配切换控制)3种控制模型。在仿真模型中,除控制策略外,其余系统结构、设备参数及气象输入等边界条件均保持一致,保证不同控制策略之间的可比性。

2.2 优化控制策略模型

对于传统的切换控制策略,模型仅基于室外环境温度信号,通过设定温度阈值实现3种运行模式的判定与切换。在此基础上,本文通过引入控制器及计算模块,实现2种优化策略的模型构建。

a)优化策略1通过增加送回风温差计算模块,利用Type2b控制器构建双参数控制逻辑。模型将送回风温差作为末端冷负荷的直接表征参数,与室外温度信号共同参与模式切换判断,实现过渡温区下系统运行模式的动态调节。

b)优化策略2通过TRNSYS计算器模块构建自然冷负荷计算模型,实时计算自然冷可提供的制冷量与机房末端实时冷负荷,并以二者匹配关系作为模式切换判据。

自然冷可提供的制冷量由室外换热器实际换热能力决定,采用对数平均温差法进行实时计算,表达式如下:

$$Q_c = K \times A \times \Delta T_{lm} \tag{1}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\left(t_{r1} - t_{o2}\right) - \left(t_{r2} - t_{o1}\right)}{\ln \frac{t_{r1} - t_{o2}}{t_{r2} - t_{o1}}} \tag{2}$$

其中,Q_c为自然冷可提供的制冷量,单位为kW;K为换热器总传热系数,单位为W/(m²·K);A为室外换热器换热面积,单位为m²;ΔT_{lm}为制冷剂与室外空气的对数平均温差,单位为K;t_{r1}为室外换热器制冷剂侧进口温度,单位为℃;t_{r2}为室外换热器制冷剂侧出口温度,单位为℃;t_{o1}为室外换热器空气侧进风温度,单位为℃;t_{o2}为室外换热器空气侧出风温度,单位为℃。

机房末端实时冷负荷基于室内空气侧热平衡原理计算,其表达式如下:

$$Q_l = c_a \times \rho_a \times V_a \times \left(t_{a1} - t_{a2}\right) \tag{3}$$

其中,Q_l为机房末端实时负荷,单位为kW;c_a为空气定压比热容,单位为kJ/(kg·℃);ρ_a为室内空气密度,单位为kg/m³;V_a为末端风量,单位为m³/h;t_{a1}为空调回风温度,单位为℃;t_{a2}为空调送风温度,单位为℃。

3 仿真结果与分析

3.1 系统运行特性分析

为分析不同切换控制策略对系统运行特性的影响,本文从机房温控稳定性与系统运行模式切换特性2个角度出发,对上述3种控制策略下系统全年逐时回风温度、系统运行模式变化及时长进行对比分析,结果分别如图6、图7和图8所示。

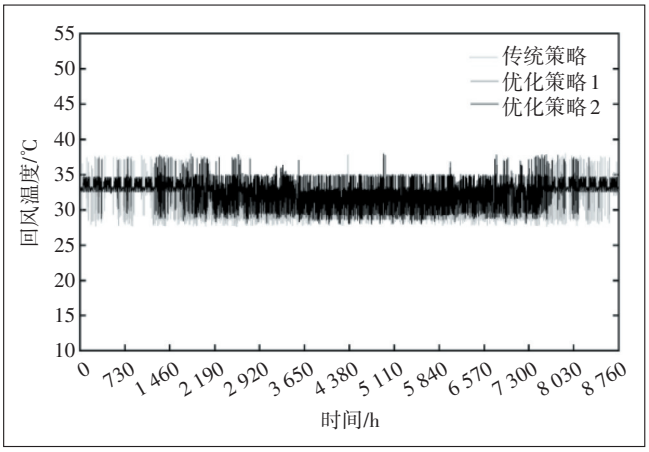
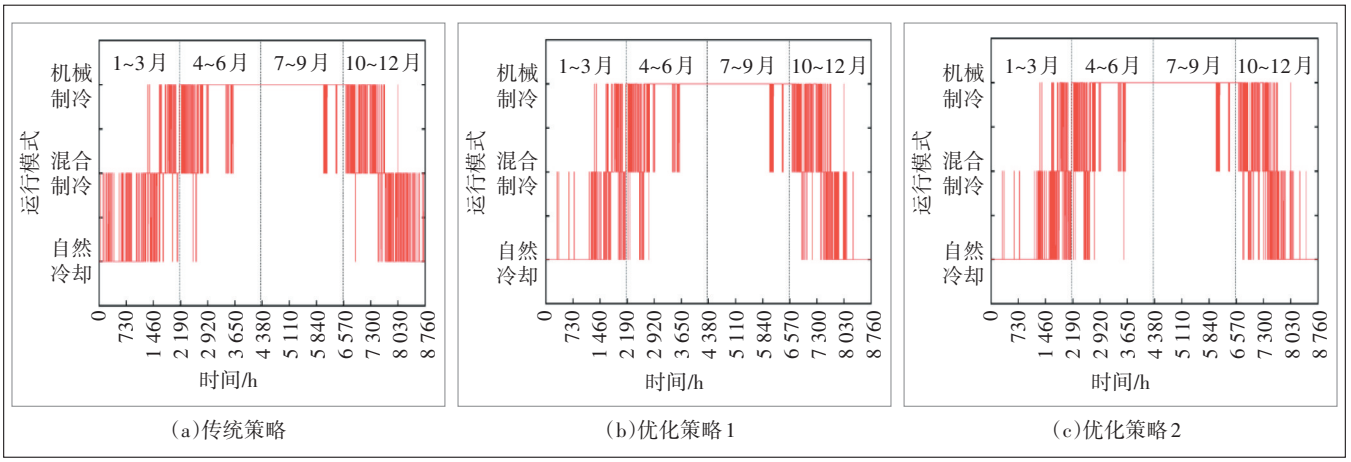


图6 不同控制策略下系统回风温度情况

本文氟泵空调系统中的室内外风机及压缩机均以35 ℃回风温度为设定值进行变频调节,系统可根据末端负荷变化调整供冷能力,使回风温度保持相对平稳。由图6可知,3种控制策略下机房全年回风温度整体可控制在28~38 ℃。自然冷却模式下机房回风温度波动幅度最小,基本维持在32~35 ℃。系统在少数极端工况变化或模式切换时刻出现瞬时波动,回风温度突增,最高温度为37~38 ℃,分析认为其原因为系统在不同运行模式切换过程中,压缩机启停产生瞬时工况冲击,导致冷量输出出现短时滞后,引发回风温度短暂升高。

对比3种控制策略的温控效果可知,三者温控水平整体相近,均可满足机房长期稳定运行要求。2种优化策略的回风温度波动范围与尖峰出现频次均略优于传统控制策略,主要原因在于优化策略通过优化5~15 ℃过渡温区的模式切换逻辑,延长了自然冷却模式的运行时长,减少了压缩机启停频次,使系统温控稳定性小幅提升。

由图7可知,系统可依据室外环境温度及末端负荷自动切换运行工况。冬季室外温度较低、过渡季机房负荷较小时,仅依靠自然冷源即可满足机房供冷需求;随着室外温度升高,自然冷源供冷能力不足以覆盖机房负荷时,系统进入混合制冷模式,此时压缩机开启,为系统补充冷量;当室外温度较高时,自然冷源无法提供有效供冷,系统切换至机械制冷模式,由压



（a）传统策略　（b）优化策略1　（c）优化策略2

图7　不同控制策略下系统运行模式分布

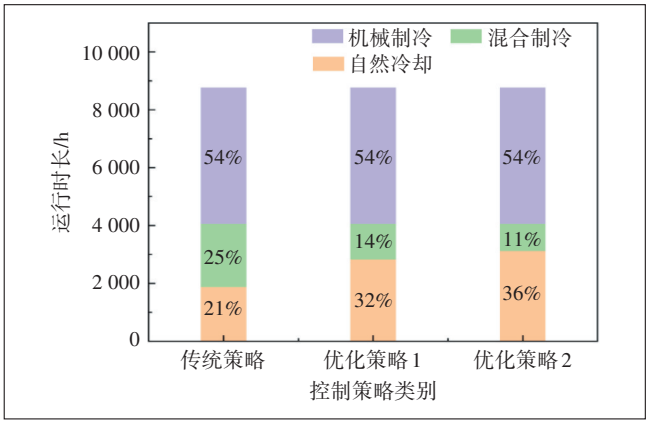


图8　不同控制策略下系统各模式运行时长

缩机独立承担机房全部冷负荷。

图8对比了3种控制策略下系统各模式的运行时长。本文所提的优化控制策略的核心在于优化了自然冷却与混合制冷模式之间的切换时机，因此3种方案下机械制冷模式的全年运行时长保持一致。相较于传统控制策略，优化策略1、2均可在机械制冷时长不变的前提下，缩减混合制冷模式的运行时长，显著提升自然冷却模式运行时间。其中，优化策略1的全年自然冷却模式时长较传统策略的1 879.74 h提升至2 834.70 h，延长了50.80%；优化策略2通过对自然冷可提供冷量与机房负荷的实时匹配计算，在机房低负荷工况下进一步挖掘自然冷源利用潜力，经统计，全年自然冷却模式时长由1 879.74 h提升至3 125.76 h，延长了66.29%。

3.2　系统节能性分析

为量化不同控制策略对系统节能性的影响，验证前述运行特性优化的节能效果，本节对3种控制策略下氟泵空调系统的能耗特性展开分析。本研究中系统能耗主要由室内外风机、氟泵及压缩机能耗3部分构成，通过TRNSYS软件对氟泵空调系统进行全年动态仿真，得到3种控制策略下系统能耗特性，分别如图9和图10所示。

由图9可知，优化策略下系统全年总能耗较传统控制策略均有显著降低，优化策略1全年耗电量为48 321.19 kW·h，较传统策略，其节能率达6.62%；优化策略2节能效果更为突出，全年耗电量为47 428.21 kW·h，较传统策略，其节能率提升至8.34%。从分项能耗来看，风机与氟泵能耗受控制策略影响较小，三者差异不大；压缩机能耗则呈明显下降趋势，传统策略下压缩机能耗占比最高，为45.05%，优化策略1、优化策略2的压缩机能耗占比分别降至39.46%和37.21%。

由图10可知，3种控制策略下逐月能耗均呈现明显的季节性特征。不同控制策略间的能耗差异主要集中在冬季与过渡季（1~4月、10~12月），而夏季（6~9

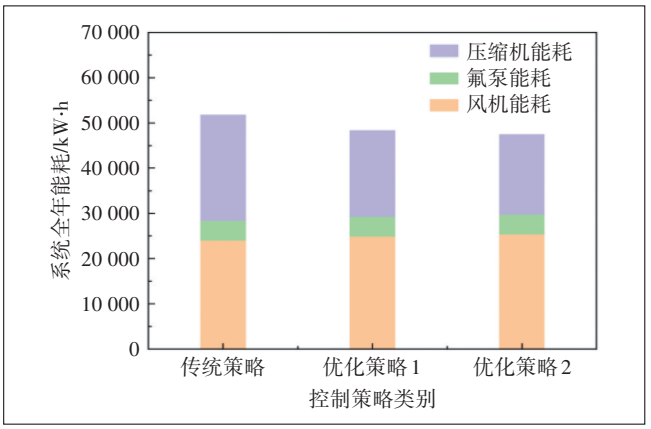


图9　不同控制策略下系统全年能耗及分项能耗对比

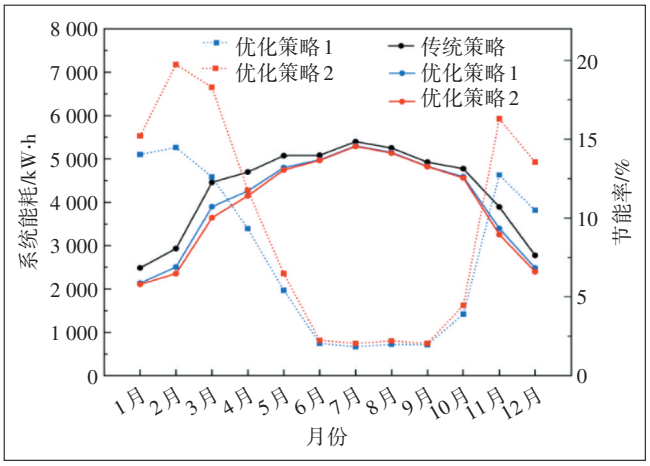


图10　不同控制策略下系统逐月能耗及节能率

月)各控制策略的能耗水平基本接近,原因在于夏季室外温度偏高,自然冷源无法满足机房供冷需求,系统均以机械制冷模式为主,控制策略差异对能耗影响较小。优化策略1与优化策略2在冬季与过渡季表现出良好的节能效果,其中2月份节能效果最为突出,节能率分别达到14.47%和19.74%。优化策略2在多数月份的节能率均高于优化策略1,表明其对自然冷源的利用更为充分,对负荷与冷量匹配的判断更为精准,整体节能优势更为明显。

4　结论

本文以某市某实验机房氟泵空调系统为研究对象,提出了送回风温差与室外温度双参数优化策略及冷量—负荷动态匹配的优化策略,并通过TRNSYS软件搭建系统仿真模型,对3种控制策略下系统的运行特性与节能性进行对比分析。主要结论如下。

a)3种控制策略均能将机房全年回风温度稳定控制在28~38 ℃,满足机房设备长期稳定运行要求。相较于传统策略,优化策略1将自然冷却模式时长由1 879.74 h提升至2 834.70 h,延长50.80%,优化策略2提升至3 125.76 h,延长66.29%,有效延长了自然冷却模式运行时长,提升了自然冷源利用率。

b)相较于传统控制策略,优化策略1全年耗电量为48 321.19 kW·h,节能率达6.62%,优化策略2全年耗电量为47 428.21 kW·h,节能率提升至8.34%;优化策略1与优化策略2在冬季与过渡季表现出良好的节能效果,2月份节能率分别达到14.47%和19.74%,表明优化控制策略提高了过渡季自然冷利用率,减少压缩机运行时间,有效减少系统能耗。

c)本文所提出的2种优化控制策略通过延长自然冷却模式运行时长、降低压缩机运行时长,实现系统高效节能。优化策略2对自然冷源利用更充分,节能优势更明显,可为氟泵空调系统的控制优化与节能改造提供数据支撑和技术参考。

参考文献:

[1] 林冬. “双碳”背景下我国绿色数据中心建设的思考与研究[J]. 节能,2023,42(4):73-76.
[2] 国家发展改革委价格成本和认证中心,华电电力科学研究院有限公司,《新型智慧供热发展蓝皮书》编写组. 面向双碳目标的新型智慧供热发展蓝皮书[M]. 北京:中国经济出版社,2024.
[3] 张桠熙,韩海晓,李骏,等. 风冷氟泵空调全寿命周期碳排放和环境经济研究[J]. 暖通空调,2024,54(增刊1):285-289.
[4] 王泉. 数据中心自然冷却技术的应用[J]. 机械与电子控制工程,2023,5(11):238-240.
[5] 刘宏伟,黄国瑞,白聚莹,等. 风冷精密空调数据中心的能耗分析研究[J]. 制冷技术,2023,43(5):66-72.
[6] 韩小磊,涂淑平,李学章. 应用于数据中心的氟泵自然冷却机组的模拟计算[J]. 制冷,2018,37(2):75-79.
[7] 赵晓,丁卫科,田振武,等. 数据中心用风冷式空调制冷系统节能应用分析[J]. 制冷,2025,44(1):76-79.
[8] 王耀南. 氟泵自然冷却技术对风冷空调系统能效和成本的影响分析[J]. 制冷与空调,2025,25(7):72-78.
[9] 黄翔,杨柳,褚俊杰,等. 蒸发冷凝-氟泵热管空调系统节能特性研究[J]. 制冷与空调,2025,25(3):40-43.
[10] 韩晋仙,朱笑歌,李建华. 郑州市空气环境质量变化研究[C]// 2019中国环境科学学会科学技术年会论文集(第一卷). 西安:中国环境科学学会,2019:551-557.
[11] GB 50174-2017　数据中心设计规范[S].
[12] 陈瑞,许家翔,曹军. 数据中心间接蒸发冷却复合空调系统的节能运行分析[J]. 暖通空调,2024,54(10):113-119.
[13] 曾海源,杨凯中. 氟泵自然冷却在数据机房的应用分析[J]. 日用电器,2025(6):93-96.
[14] 吴祥辉,王凯,安冬,等. 氟泵多联空调技术在北方某数据中心的应用研究[J]. 邮电设计技术,2024(10):31-35.
[15] GB/T 19413-2024　数据中心和通信机房用空气调节机组[S].

作者简介:
王凯,工程师,硕士,主要从事空调研发工作;王蕾,高级工程师,硕士,主要从事数据中心及通信局房规划建设管理、通信配套基础设施及节能减排技术管理工作;解军洋,助理工程师,硕士,主要从事空调研发工作;郭凯,高级工程师,硕士,主要从事通信机房空调制冷相关技术研究工作;胡孝俊,高级工程师,硕士,主要从事数据中心基础设施研发工作;张帅,工程师,硕士,主要从事空调研发工作;程序,正高级工程师,学士,主要从事数据中心研究咨询管理工作;贺晓,正高级工程师,硕士,主要从事数据中心研究咨询管理工作。