

华南地区住宅建筑毛细管辐射空调系统运行策略研究

郭市伟, 罗诗雨

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年4月1日; 录用日期: 2025年5月1日; 发布日期: 2025年5月8日

摘要

为探究毛细管辐射空调系统在华南地区住宅建筑中的运行效果及能效情况, 文章开展样板间空调系统供冷特性实测研究, 建立压缩机能耗模型并采用EnergyPlus对建筑进行动态冷负荷分析, 最后计算出系统在不同运行模式下的耗电量。结果表明: 间歇运行模式下, 供水流量 $1.31 \text{ m}^3/\text{h}$ 及供水温度 16°C 时, 开机2小时后室内温度达到室内设计温度, 供水温度每升高 2°C 所需时间增加约1小时, 关机1小时后室内温度升高 1°C , 降低供水流量对于室内温度的影响极为显著; 连续运行模式下, 受室外温度及太阳辐射的影响, 7:00~18:00期间室内温度在 25.5°C ~ 27°C 之间波动, 当室外温度不超过 30°C 且无太阳直射时, 供水流量 $0.98 \text{ m}^3/\text{h}$ 及供水温度 20°C 即可满足室内舒适性要求。5~10月份空调采用间歇运行模式较采用连续运行模式节能32.06%。

关键词

毛细管辐射空调系统, 供冷特性, 间歇运行, 连续运行, 能耗

Research on the Operation Strategy of Capillary Radiation Air Conditioning System in Residential Buildings in South China

Shiwei Guo, Shiyu Luo

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 1st, 2025; accepted: May 1st, 2025; published: May 8th, 2025

Abstract

In order to explore the operation effect and energy efficiency of capillary radiation air conditioning

systems in residential buildings in South China, a field study on the cooling characteristics of the model room air-conditioning system was carried out, a compressor energy consumption model was established, and EnergyPlus was used to conduct a dynamic cooling load analysis of the building and the power consumption of the system under different operating modes was calculated. The results show that in intermittent operation mode when the water supply flow rate is $1.31 \text{ m}^3/\text{h}$ and the water supply temperature is 16°C , the indoor temperature reaches the indoor design temperature 2 hours after the power is turned on. The time required for each 2°C increase in the water supply temperature increases by about 1 hour, and one hour after shutdown, the indoor temperature rises by 1°C . Reducing the water supply flow has a significant impact on the indoor temperature. In continuous operation mode, affected by outdoor temperature and solar radiation, the indoor temperature ranges from 25.5°C to 27°C from 7:00 to 18:00. When the outdoor temperature does not exceed 30°C , and there is no direct sunlight, a water supply flow rate of $0.98 \text{ m}^3/\text{h}$ and a water supply temperature of 20°C can meet the indoor comfort requirements. From May to October, the intermittent operation mode of air conditioners saves 32.06% more energy than the continuous operation mode.

Keywords

Capillary Radiation Air Conditioning System, Cooling Characteristic, Intermittent Operation, Continuous Operation, Energy Consumption

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

相较于传统的空调系统,毛细管辐射空调系统以辐射为主的传热方式降低了室内垂直温度差,有效减少了局部不适感,提高了舒适度[1];较高的供水温度提高了机组能效比,降低了建筑能耗[2]。

近年来,对于毛细管辐射空调系统供冷和能耗方面的研究主要集中于探究热源形式、运行模式、供水温度、供水流量等因素的影响[3]。侯波等[4]利用 Fluent 软件探究了供水温度、供水流速、室内温度及辐射板材料对于辐射顶板传热性能的影响。研究表明,供水温度对供冷量的影响较大;供水流量对供冷量的影响较小。陈剑波等[5]利用 EnergyPlus 软件模拟分析了不同冷热源形式下的户式辐射空调系统能耗。研究表明,与常规空气源热泵机组相比,变制冷剂流量(VRF)的多联机系统夏季节能 22.29%、冬季节能 9.14%。杨雯芳[6]对重庆地区毛细管地板辐射系统不同供水温度工况进行了实验研究,并根据实验结果提出了连续供冷、值班供冷和间歇供冷三种运行模式,利用模拟软件对三种运行模式进行能耗分析。研究表明,值班供冷模式节能 18.61%,间歇供冷模式节能 35.9%。

目前我国对于毛细管辐射空调系统的研究主要集中于夏热冬冷地区。华南地区属于典型的夏热冬暖地区[7],受限于高温高湿,夏长冬短的气候特点,华南地区空调季节长,且湿负荷较大,空调运行能耗大,因此毛细管辐射空调系统在该地区的运行效果和能耗情况值得探究。

本文首先在深圳某小型住宅开展供冷特性测试,得出室内辐射表面温度及室内空气温度随时间变化的曲线。由于实验现场无法安装电表以直接获得系统能耗,为此本文根据厂家提供的压缩机性能曲线建立了压缩机的能耗模型,并在焓差实验室内对模型进行验证,计算出机组在不同运行模式下的耗电量和平均 COP,最后利用 EnergyPlus 软件对建筑进行动态负荷研究,得出 5~10 月份系统总能耗,最后提出华南地区毛细管辐射空调系统合理的运行策略。

2. 建筑模型

实验样板房为深圳市盐田区某住宅小区建筑第四十三层的某一户，层高 2.8 m，面积 80 m²，其平面图如图 1 所示。

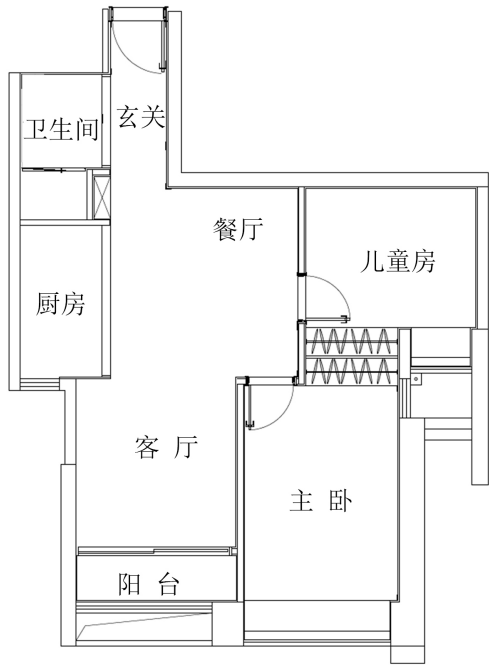


Figure 1. Floor plan of the model house
图 1. 样板房平面图

各围护结构传热系数见表 1。

Table 1. Heat transfer coefficient of the envelope structure
表 1. 围护结构传热系数

围护结构	传热系数 W/(m ² ·°C)
外墙	1.35
内墙	2.27
楼板	2.63
地板	2.85
外窗	2.00

对于辐射空调系统来说，全面辐射供冷室内设计温度可以提高 0.5℃~1.5℃ [8]。新风量应按不小于人员所需新风量，补偿排风和保持空调区空气压力所需新风量之和以及新风除湿所需新风量中的最大值确定[9]。最终确定的夏季空调室内设计干球温度为 26℃，相对湿度为 60%，新风量为 250 m³/h。

3. 空调系统构成

由图 2 看出，VRF 多联机辐射空调系统主要由制冷剂系统、水系统及风系统组成[10]，制冷主机为变制冷剂流量的热泵型多联机，辐射末端为毛细管席。

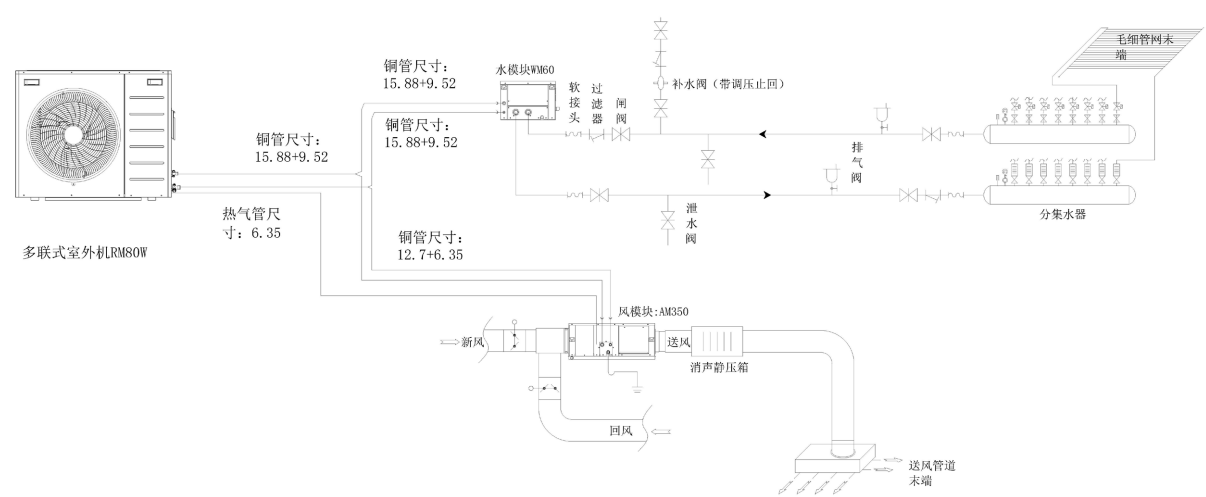


Figure 2. Schematic diagram of the air conditioning system
图 2. 空调系统原理图

具体设备参数见表 2。

Table 2. Equipment table
表 2. 设备表

设备	参数
室外机	额定制冷量 8000 W；额定制热量 8240 W；额定制冷功率 2470 W；额定制热功率 2500 W
风模块	额定新风量 350 m³/h；额定功率 65 W；机外余压 130 Pa；出风露点温度 ≤ 11℃；送风温度 15℃~25℃
水模块	额定制冷量 6000 W；额定制热量 6180 W；含泵功率 180 W；额定水流量 1.72 m³/h

4. 供冷特性实测分析



Figure 3. Data collection interface
图 3. 数据采集界面

于 2023 年 8 月 17 日至 2023 年 9 月 26 日开展实验研究, 在连续运行模式及间歇运行模式下分别改变供水温度(20°C 、 18°C 、 16°C)及供水流量($1.31\text{ m}^3/\text{h}$, $0.98\text{ m}^3/\text{h}$), 得出辐射表面温度及室内空气温度随时间变化的曲线。为了降低各工况间的影响, 每个测试工况持续 2~3 天, 选择最后一天的数据作为实验数据。受台风天气的影响实际开展实验的天数为 24 天。

实验期间开启所有房间的空调系统, 选取主卧的数据进行分析, 实验数据的采集依靠智能监控系统, 界面如图 3 所示。

4.1. 间歇运行模式下供冷特性实测分析

4.1.1. 供水温度对供冷特性的影响

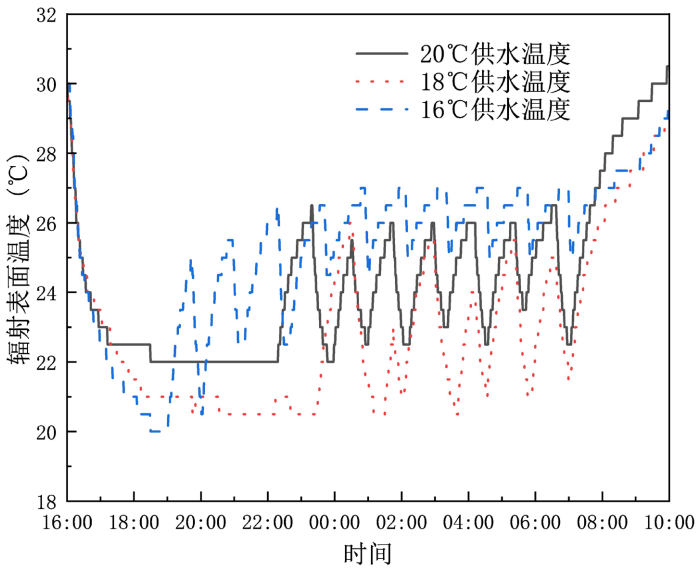


Figure 4. Diagram of the temperature of the radiant surface under different water supply temperatures
图 4. 不同供水温度下, 辐射表面温度的变化

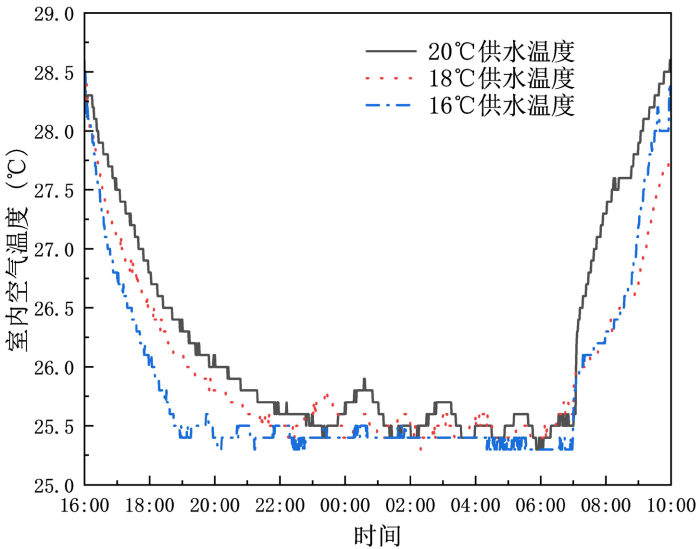


Figure 5. Diagram of indoor air temperature at different water supply temperatures
图 5. 不同供水温度下, 室内空气温度的变化

从图 4 看出, 由于系统具有防结露控制, 因此在运行的第一个小时内, 不同供水温度下辐射表面温度的下降速率相差不大。供水温度为 16°C 时, 辐射表面温度大多在 $24^{\circ}\text{C}\sim 27^{\circ}\text{C}$ 之间波动; 供水温度达到 18°C 和 20°C 时, 辐射表面温度在所能达到的最低温度(20.5°C 和 22°C)与 26.5°C 之间波动。这可能是因为 16°C 供水温度下, 运行初期通过辐射方式向房间提供的冷量更多, 后期主要依靠新风系统维持房间温度。

从图 5 看出, 供水温度为 16°C 时, $18:00$ 室内空气温度达到室内设计温度, 供水温度每升高 2°C , 室内空气温度达到室内设计温度的时间就会增加 1 小时。供水温度越低, 室内温度下降至室内设计干球温度用时越少。 $7:00$ 关闭空调后, 室内空气温度开始上升, 供水温度在 16°C 及 18°C 时, 关机 1 小时后室内温度升高 1°C ; 供水温度为 20°C 时, 关机 1 小时后室内温度升高 2°C 。

假设住宅人员在室时间为 $8:00\sim 18:00$, 建议使用间歇运行模式, 回家前 2 小时提前打开空调以满足舒适性要求, 离家前 1 小时提前关闭空调以减少能耗。

4.1.2. 供水流量对供冷特性的影响

从图 6 看出, 供水温度为 20°C , 供水流量为 $0.98\text{ m}^3/\text{h}$ 时, 辐射表面温度一直维持在最低温度, 室内空气温度直到关机才达到最低值, 说明分集水器对应支路电动阀一直保持开启状态, 始终未满足房间降温需求。

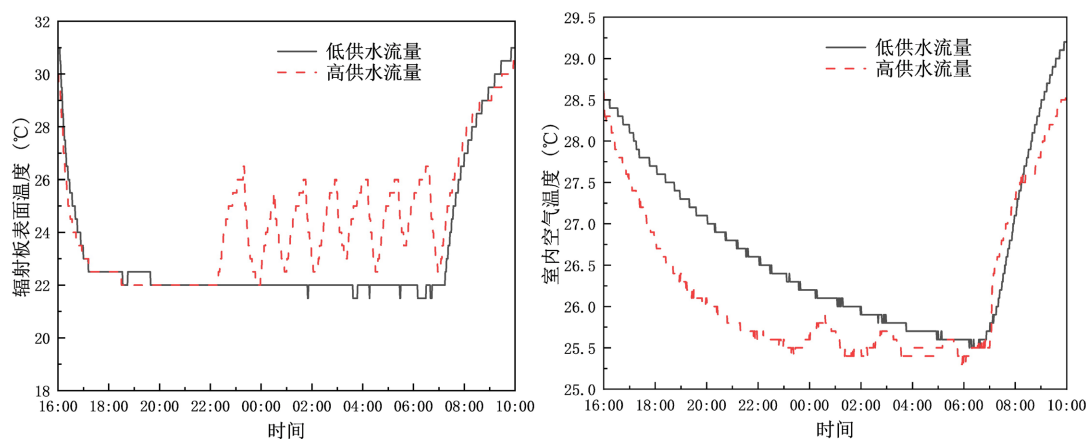


Figure 6. The variation of radiant surface temperature and indoor temperature with time at 20°C water supply temperature and different water supply flows

图 6. 供水温度为 20°C 时, 不同供水流量下, 辐射表面温度与室内温度随时间的变化

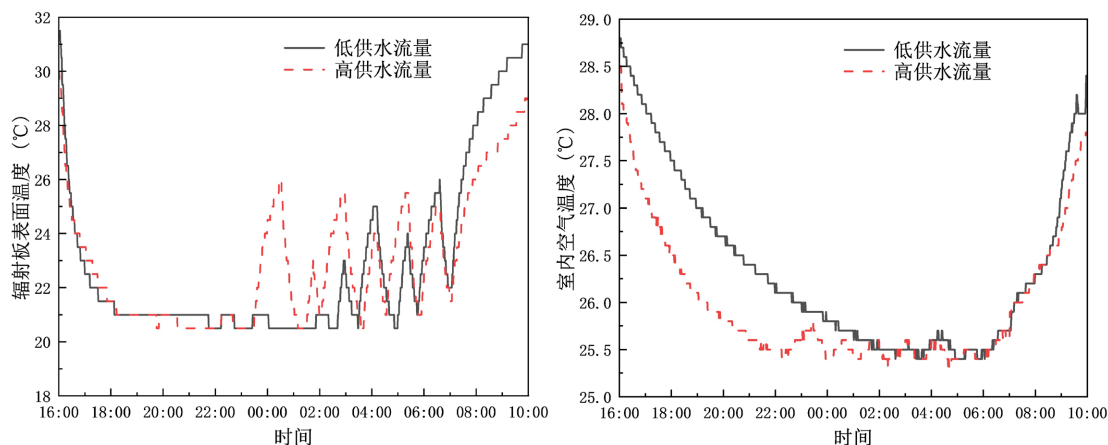


Figure 7. The variation of radiant surface temperature and indoor temperature with time at 18°C water supply temperature and different water supply flows

图 7. 供水温度为 18°C 时, 不同供水流量下, 辐射表面温度与室内温度随时间的变化

从图 7 看出, 供水温度为 18°C 时, 低供水流量 $0.98\text{ m}^3/\text{h}$ 与高供水流量 $1.31\text{ m}^3/\text{h}$ 相比, 室内温度达到室内设计温度的时间延后了约 3 小时。

从图 8 看出, 供水温度为 16°C 时, 低供水流量 $0.98\text{ m}^3/\text{h}$ 与高供水流量 $1.31\text{ m}^3/\text{h}$ 相比, 室内温度达到室内设计温度的时间延后了约 2 小时。

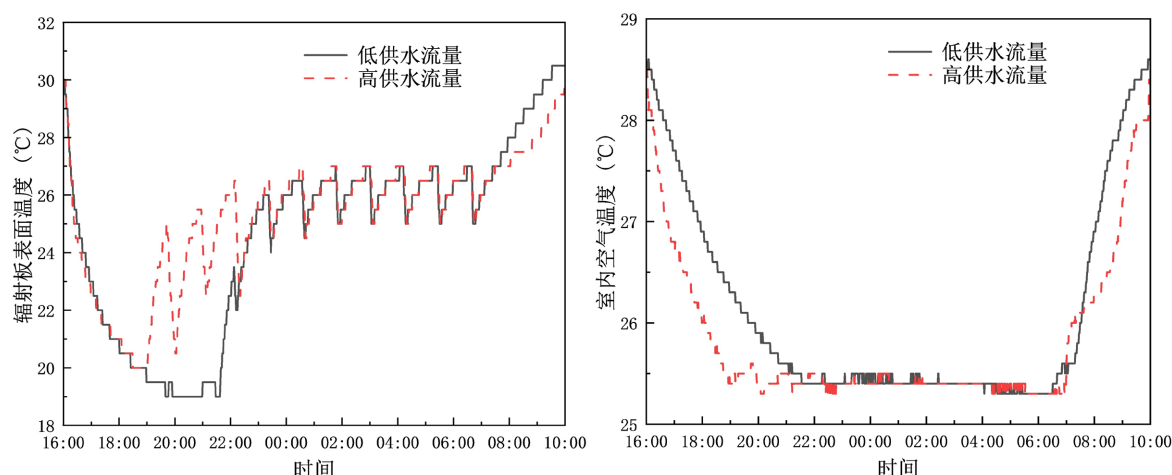


Figure 8. The variation of radiant surface temperature and indoor temperature with time at 16°C water supply temperature and different water supply flows

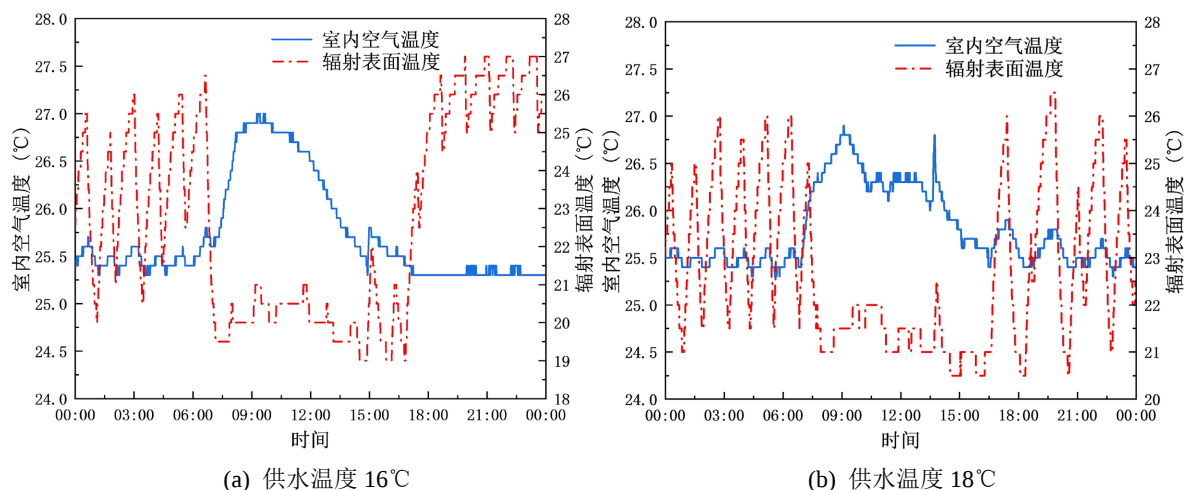
图 8. 供水温度为 16°C 时, 不同供水流量下, 辐射表面温度与室内温度随时间的变化

结果表明, 在间歇运行模式下, 改变供水流量对于室内空气温度的影响较为显著, 因此不建议在该运行模式下降低供水流量。

4.2. 连续运行模式下供冷特性实测分析

4.2.1. 供水温度对供冷特性的影响

从图 9 看出, 供水温度为 16°C 及 18°C 时, 室内空气温度在 7:00~18:00 时会产生大幅波动, 这是因为室外温度及太阳辐射强度升高后, 室内温度上升, 分集水器对应支路电动阀开启, 辐射表面温度下降; 供水温度为 20°C 时, 室内温度即使在 7:00~18:00 时波动也比较平稳, 这是因为受台风天气影响, 测试时室外最高温度为 30°C , 所以室内空气温度波动也相对平稳。



(a) 供水温度 16°C

(b) 供水温度 18°C

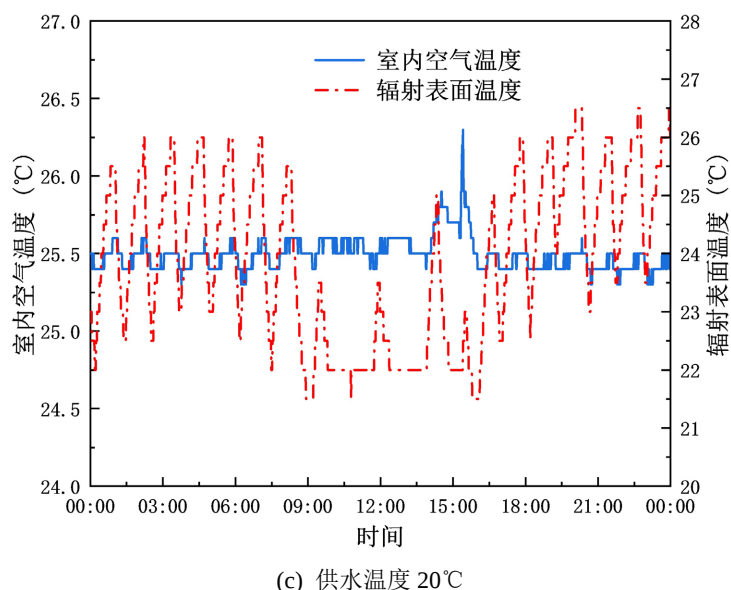


Figure 9. The variation of radiant surface temperature and indoor temperature with time at different water supply temperatures
图 9. 不同供水温度下, 辐射表面温度与室内温度随时间的变化

华南地区夏季多台风天气, 台风期间室外温度波动较大。在连续运行模式下, 当室外空气温度较低时可以适当提高供水温度以节能。

4.2.2. 供水流量对供冷特性的影响

由图 9 可知, 受室外温度的影响, 供水温度为 16°C 及 18°C 时的测试期间, 即使在高供水流量 1.31 m³/h 的工况下, 也不能满足室内降温需求, 因此不再对其低供水流量工况进行结果分析。对比图 10 和图 9(c) 发现, 低供水流量在 0.98 m³/h 时, 室内空气温度波动范围变大, 且辐射空调系统用于调节室内温度波动所需的时间更长, 即分集水器对应支路电动阀开启的时间更长。

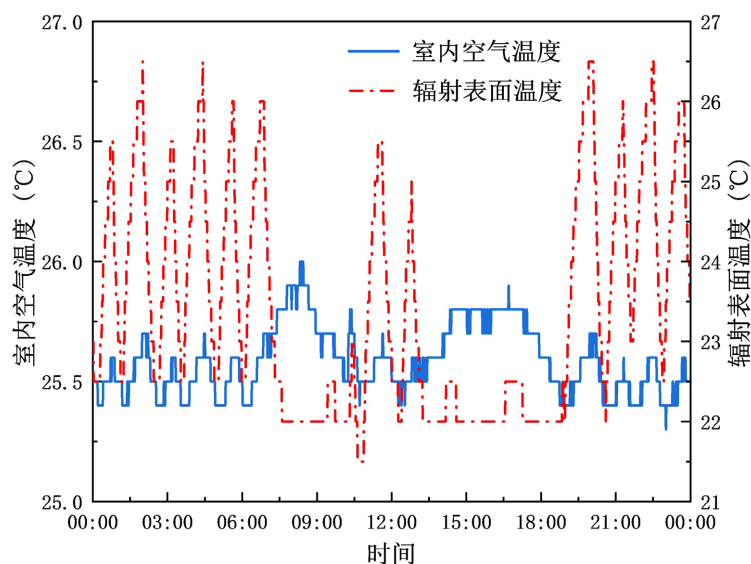


Figure 10. The variation of indoor air temperature and radiant surface temperature over time when the water supply temperature is 20°C and the water supply flow rate is 0.98 m³/h

图 10. 供水温度为 20°C, 供水流量为 0.98 m³/h 时, 室内空气温度和辐射表面温度随时间的变化

5. 压缩机性能计算

此次实验采用的压缩机型号为三菱 TNB220FLHMC 旋转式变频压缩机,压缩机额定工况参数见表 3。

Table 3. Compressor rating table
表 3. 压缩机额定工况表

型号	三菱 TNB220FLHMC
制冷量(W)	7130
输入功率(W)	2200
COP (W/W)	3.24
蒸发温度(℃)	7.2
冷凝温度(℃)	54.4

5.1. 建立压缩机模型

受实验条件限制,实验现场无法安装电表,因此根据厂家所提供的性能曲线,构建压缩机能耗模型以获取每个测试工况的能耗情况,见图 11。

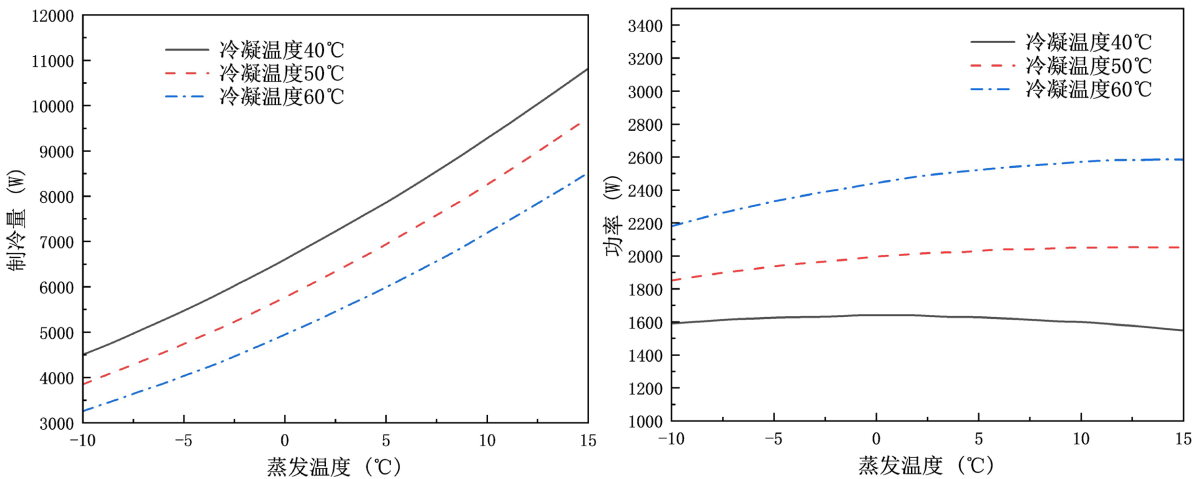


Figure 11. Under 60 Hz, the variation of the cooling capacity and input power of the compressor with changes in evaporation temperature and condensation temperature

图 11. 60 Hz 下, 压缩机制冷量及输入功率随蒸发温度及冷凝温度的变化

当压缩机频率不变时,对图 11 中制冷量及输入功率随蒸发温度和冷凝温度的变化情况进行二次多项式拟合[11]:

$$z = a + bX + cX^2 + dY + eY^2 + fXY \tag{1}$$

式中: z 为实际制冷量或实际输入功率(W); X 为冷凝温度(℃); Y 为蒸发温度(℃); $a\sim f$ 为曲线拟合系数,拟合系数见表 4。

Table 4. Table I of fitting coefficients
表 4. 拟合系数表I

系数	制冷量拟合系数	输入功率拟合系数
a	9745.933 42	933.057 89
b	-75.865 13	2.980 57

续表

c	-0.069 96	0.366 62
d	327.659 77	-33.529 27
e	2.876 37	-0.498 51
f	-2.183 85	0.869 78

额定工况下制冷量和输入功率随频率的变化如图 12 所示。对其进行二次多项式拟合：

$$y = a + bx + cx^2 \quad (2)$$

式中： y 为实际输入功率与额定输入功率之比或实际制冷量和额定制冷量之比； x 为频率(Hz)； a 、 b 、 c 为修正系数。拟合系数见表 5。

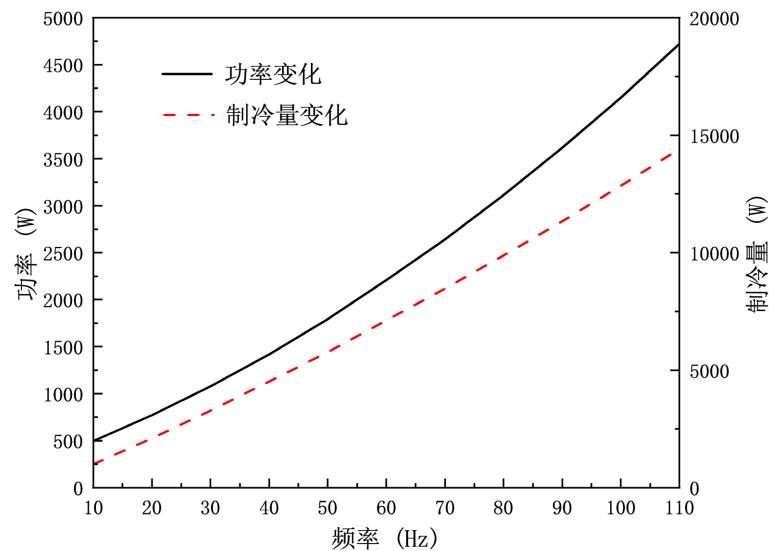


Figure 12. Graph of cooling capacity and input power variation with frequency under rated operating conditions

图 12. 额定工况下制冷量和输入功率随频率变化图

Table 5. Table II of fitting coefficients

表 5. 拟合系数表II

系数	制冷量拟合系数	输入功率拟合系数
a	-0.012 580 645	0.113 272 727
b	0.014 782 609	0.010 377 273
c	3.36466E-05	7.36364E-05

5.2. 模型验证

为了确保模型的准确性，在焓差室内对压缩机的性能展开测试，选择三组工况进行测试，实验测试数据见表 6。

对比分析实验结果和模拟结果，可以看出误差都在 10%以内，因此可以将拟合得到的性能曲线作为能耗计算的依据。

Table 6. Table of comparison of compressor performance test and simulation numerical results
表 6. 压缩机性能实验与模拟数值对比表

参数	单位	测试 1	测试 2	测试 3
蒸发温度	℃	4.1	1.9	8.7
冷凝温度	℃	50.2	47.5	52.6
频率	Hz	69	75	40
实验功率	W	2479.07	2484.52	1479.85
实验制冷量	W	7682.04	9138.35	4721.36
模拟功率	W	2406.67	2500.31	1404.01
模拟制冷量	W	7827.05	8252.56	4826.95

5.3. 计算结果分析

在供冷特性实测期间采集压缩机蒸发温度、冷凝温度、频率 3 个参数, 利用上述模型计算出压缩机在不同实验工况下的制冷量、输入功率和平均 COP。通过计算得到, 连续模式下, 机组平均 COP 为 4.3, 间歇运行模式下, 机组启动阶段(前 1 h)平均 COP 为 3.61, 压缩机在不同供水温度及不同运行模式下的耗电量见表 7。

Table 7. Power consumption meters under different operating conditions
表 7. 不同工况下的耗电量

运行模式	运行参数	耗电量
连续运行	供水温度 16℃	23.6 度
	供水温度 18℃	21.6 度
	供水温度 20℃	18.7 度
间歇运行	供水温度 16℃	14.3 度
	供水温度 18℃	13.2 度
	供水温度 20℃	13.1 度

分析可得, 间歇运行模式节能率为 29.9%~39.4%。

6. 系统能耗模拟

6.1. 空调系统模型

EnergyPlus 采用模块化的系统模拟方法[12]。毛细管辐射空调系统通常包括空气环路和水环路两部分, 空气环路包括空调设备和空气配送系统, 水环路包括冷热源设备、热交换器、管道、水泵等。系统空气环路和水环路图如图 13 所示。

毛细管辐射空调系统的搭建需在 Construction: Internal Source 模块中设置内热源参数, 将 Source Present after Layer Number 参数指定为“4”, 以定位毛细管网于石膏板与石灰石膏砂浆夹层; 为防止表面结露, 需通过 Temperature Calculation Requested after Layer Number 参数监控最外层结构温度; 同时将 CTF 传热模型维度调整为二维传热模式(Dimensions for the CTF Calculation), 并将 Tube Spacing 参数固定为 20 mm 确保管网均匀分布, 具体参数配置逻辑及操作界面如图 14 所示。

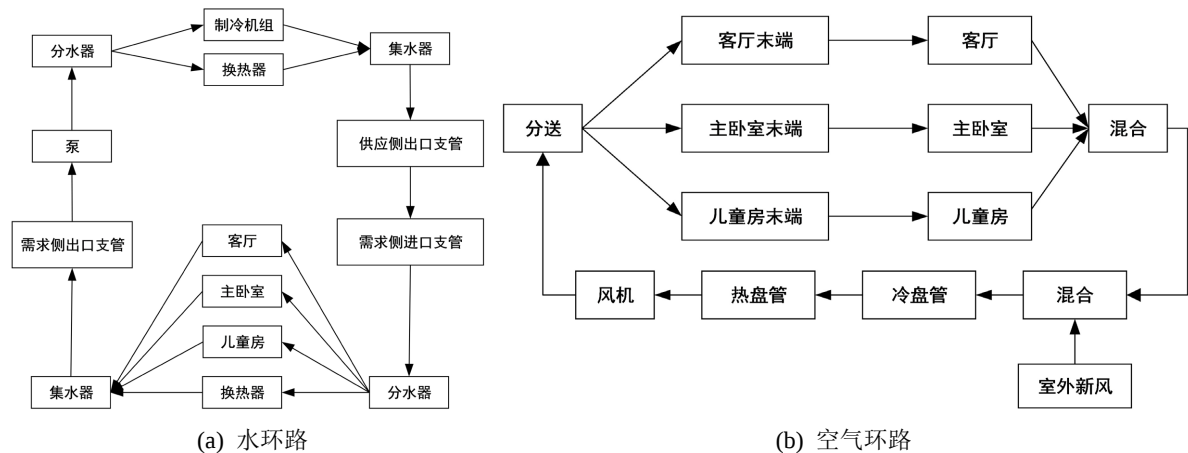


Figure 13. System loop diagram
图 13. 系统环路图

Field	Units	Obj1
Name		Radiant Ceiling
Source Present After Layer Number		4
Temperature Calculation Requested After Layer Number		4
Dimensions for the CTF Calculation		2
Tube Spacing	m	0.02
Two-Dimensional Temperature Calculation Position	dimensionless	0
Outside Layer		diban
Layer 2		shuinishajiang
Layer 3		120mm gangjinhunningtu
Layer 4		plasterboard
Layer 5		shihuishigaoshajiang

Figure 14. Internal heat source module configuration diagram
图 14. 内热源模块设置图

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		keting Radiant Ceiling	zhuowo Radiant Ceiling	ertongfang Radiant Ceiling
Availability Schedule Name		RadiantSys Sch keting	RadiantSys Sch woshi	RadiantSys Sch woshi
Zone Name		Keting Zone	zhuowo Zone	ertongfang Zone
Surface Name or Radiant Surface Group Name		Surface 21	Surface 31	Surface 24
Fluid to Radiant Surface Heat Transfer Model		ConvectionOnly	ConvectionOnly	ConvectionOnly
Hydronic Tubing Inside Diameter	m	0.0035	0.0035	0.0035
Hydronic Tubing Outside Diameter	m	0.0043	0.0043	0.0043
Hydronic Tubing Length	m	autosize	autosize	autosize
Hydronic Tubing Conductivity	W/m-K	0.4	0.4	0.4
Temperature Control Type		MeanAirTemperature	MeanAirTemperature	MeanAirTemperature
Setpoint Control Type		HalfFlowPower	HalfFlowPower	HalfFlowPower
Heating Design Capacity Method		HeatingDesignCapacity	HeatingDesignCapacity	HeatingDesignCapacity
Heating Design Capacity	W	autosize	autosize	autosize
Heating Design Capacity Per Floor Area	W/m2			
Fraction of Autosized Heating Design Capacity				
Maximum Hot Water Flow	m3/s			
Heating Water Inlet Node Name				
Heating Water Outlet Node Name				
Heating Control Throttling Range	deltaC			
Heating Control Temperature Schedule Name				
Cooling Design Capacity Method		CoolingDesignCapacity	CoolingDesignCapacity	CoolingDesignCapacity
Cooling Design Capacity	W	autosize	autosize	autosize
Cooling Design Capacity Per Floor Area	W/m2			
Fraction of Autosized Cooling Design Capacity				
Maximum Cold Water Flow	m3/s	autosize	autosize	autosize
Cooling Water Inlet Node Name		Zone keting Cooling Water Inlet Node	Zone zhuowo Cooling Water Inlet Node	Zone ertongfang Cooling Water Inlet Node
Cooling Water Outlet Node Name		Zone keting Cooling Water Outlet Node	Zone zhuowo Cooling Water Outlet Node	Zone ertongfang Cooling Water Outlet Node
Cooling Control Throttling Range	deltaC	2	2	2
Cooling Control Temperature Schedule Name		RADIANT COOLING SETPOINTS	RADIANT COOLING SETPOINTS	RADIANT COOLING SETPOINTS
Condensation Control Type		SimpleOff	SimpleOff	SimpleOff
Condensation Control Dewpoint Offset	C	0.5	0.5	0.5

Figure 15. Diagram of the low-temperature radiant air conditioner module
图 15. 低温辐射空调模块设置图

Field	Units	Obj1
Name		AirLoop Fan
Availability Schedule Name		System Sch
Fan Total Efficiency		0.7
Pressure Rise	Pa	1000
Maximum Flow Rate	m3/s	0.082
Motor Efficiency		0.9
Motor In Airstream Fraction		1
Air Inlet Node Name		Heating Coil Outlet
Air Outlet Node Name		Supply Fan Outlet
End-Use Subcategory		General

Figure 16. Air loop setup diagram
图 16. 空气环路设置图

在低温辐射空调模块(Zone HVAC: Low Temperature Radiant: Variable Flow)中对空调系统运行时间、毛细管位置和进出水环路节点进行设置, 并通过表面温度与室内露点温度差值(0.5℃)设定防结露启停阈值, 具体模块设置如图 15 所示。

送风系统采用定风量风机模块(Fan: Constant Volume), 空气环路节点等具体设置如图 16 所示。

6.2. 模拟结果分析

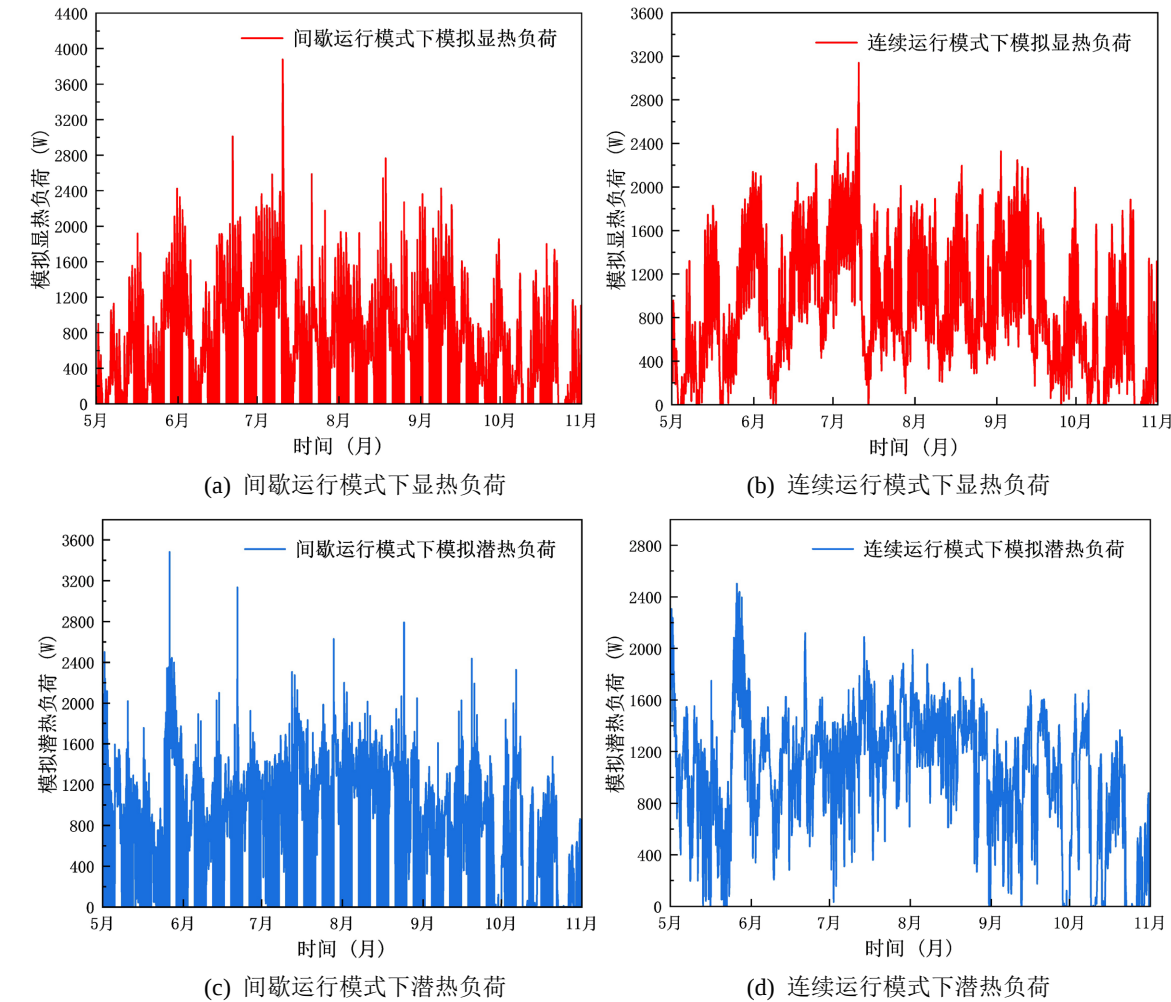


Figure 17. Simulation results of latent heat and sensible heat load under two operating modes
图 17. 两种运行模式下潜热及显热负荷模拟结果

在 EnergyPlus 中对建筑在 5~10 月的空调负荷进行模拟分析, 样板房在两种运行模式下的显热和潜热负荷如图 17 所示。

两种运行模式下, 潜热负荷占总负荷的比重均较大, 这是因为华南地区室外空气湿度较高, 建筑新风量较大, 因此需要处理的新风潜热负荷较多。5~10 月份中, 间歇运行模式最大冷负荷值为 6550 W, 连续运行模式最大冷负荷值为 4910 W, 这是因为对于该样板房而言, 间歇运行模式下启动阶段的负荷与运行阶段的负荷差异巨大, 连续运行模式下系统 75% 的时间都在满负荷的 50% 以下运行, 潜热负荷占空调负荷的比重见表 8。

Table 8. Proportion table of latent heat load to total load

表 8. 潜热负荷占总负荷的比重

月份	间歇运行模式			连续运行模式		
	总冷负荷(kW)	显热占比(%)	潜热占比(%)	总冷负荷(kW)	显热占比(%)	潜热占比(%)
5 月	962.56	38.18	61.82	1191.01	33.49	66.51
6 月	1141.96	49.81	50.19	1357.04	43.27	56.73
7 月	1347.50	47.25	52.75	1545.49	40.75	59.25
8 月	1256.50	42.44	57.56	1521.82	36.93	63.07
9 月	1016.24	51.44	48.56	1175.53	45.87	54.13
10 月	615.09	44.72	55.28	779.75	44.29	55.71

对两种运行模式下的总负荷进行积分运算, 利用计算得到的压缩机平均 COP 进行耗电量计算, 得出夏季 5~10 月份连续运行模式耗电量为 2590.83 kW·h, 间歇运行模式耗电量为 1760.16 kW·h。辐射空调采用间歇运行模式的能耗低于连续运行模式的能耗, 夏季运行节能率为 32.06%。

7. 结论

本文对毛细管辐射空调系统的供冷特性展开实测研究, 建立压缩机性能模型并进行验证, 计算出压缩机在不同运行模式下的平均 COP, 利用 EnergyPlus 软件对 5~10 月份的空调冷负荷进行模拟, 计算出 5~10 月份的系统耗电量。得出如下结论:

1) 辐射空调采用间歇运行模式时, 16℃供水温度下机组开启 2 小时后空气温度降至室内设计温度, 且供水温度每升高 2℃, 所需时间增加约 1 小时; 系统关机 1 小时后室内温度仅升高 1℃~2℃; 供水流量对于启动阶段房间温度的影响极为显著。建议回家前 2 小时提前开启空调, 离家前 1 小时提前关闭空调, 不建议减小供水流量。

2) 华南地区夏季多台风天气, 台风期间室外温度波动较大。辐射空调采用连续运行模式时, 如果室外最高温度不超过 30℃, 建议将辐射空调供水温度设定为 20℃或降低供水流量, 以节约空调能耗。

3) 华南地区夏季长达 6 个月, 空调制冷季节长, 出于节能考虑, 建议工作日采用间歇运行模式, 周末采用连续运行模式。对 5~10 月份的能耗计算分析表明, 采用间歇运行模式, 整个夏季将节能 32.06%。

4) 本研究存在以下局限性及未来改进方向: 受实验条件限制, 系统耗电量通过压缩机性能曲线与实验数据联合推算, 存在计算误差; 实验环境未模拟人员活动、门窗启闭等动态热湿扰动, 后续需构建多扰动耦合场景以验证系统调控能力; 此外, 针对华南地区春季“回南天”极端湿度工况, 需补充独立新风除湿效能的实测数据, 以完善辐射空调系统的全年湿度控制策略。

参考文献

- [1] Tian, Z., Yang, L., Wu, X. and Guan, Z. (2020) A Field Study of Occupant Thermal Comfort with Radiant Ceiling Cooling and Overhead Air Distribution System. *Energy and Buildings*, **223**, Article ID: 109949. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109949>
- [2] Saber, E.M., Tham, K.W. and Leibundgut, H. (2016) A Review of High Temperature Cooling Systems in Tropical Buildings. *Building and Environment*, **96**, 237-249. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.029>
- [3] 谭跃龙, 邓文昊, 陈伟, 等. 辐射供冷空调研究综述[J]. 上海节能, 2023(9): 1324-1332.
- [4] 侯波, 梁珍. U 型毛细管网辐射顶板传热性能的数值模拟分析[J]. 建筑热能通风空调, 2019, 38(4): 14-17.
- [5] 陈剑波, 赵蒙, 王飞. 多联机户式辐射空调系统节能分析[J]. 暖通空调, 2018, 48(9): 54-57.
- [6] 杨雯芳. 重庆地区居住建筑毛细管网地板辐射供冷运行模式研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [7] 梁江, 王玮, 张碧婷, 等. 温湿分控空调系统在华南地区住宅的应用研究[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(3): 56-59.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ142-2012 辐射供暖供冷技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50736-2012 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.
- [10] 陈超, 黄惠, 贾永宏. 多联机空调系统在西北地区展览型建筑中的应用[J]. 暖通空调, 2022, 52(S1): 112-114.
- [11] 唐杰, 林志扬, 莫莉. 多项式回归与一致性研究: 应用及分析[J]. 心理学报, 2011, 43(12): 1454-1461.
- [12] 潘毅群, 吴刚, Volker Hartkopf. 建筑全能耗分析软件 Energy Plus 及其应用[J]. 暖通空调, 2004(9): 2-7.