

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-07  
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250328003

## 不同热回收新风多联机系统在住宅中的节能效果分析

周宇珏<sup>1</sup> 黄招彬<sup>2</sup> 徐振坤<sup>2</sup> 高卓贤<sup>2</sup> 王宝龙<sup>1</sup> 石文星<sup>1</sup> 杨子旭<sup>3</sup>

(1 清华大学建筑技术科学系 北京 100084; 2 广东美的制冷设备有限公司 佛山 528311;  
3 北京科技大学能源与环境工程学院 北京 100083)

**摘要** 为解决传统多联机无新风、空气品质差的问题,在实际工程中通常采用多联机与新风机组2套系统,但这两者通常是独立控制。为充分实现多联机和热回收新风机组的协同控制,研发了多联机与新风机组联合运行的新风多联机系统,以降低系统能耗,提高室内环境的舒适性和空气品质。基于多联机全工况性能模型和新排风热回收机组的特性,采用模拟分析方法,探讨常规多联机系统与3种新风多联机系统在南京和北京住宅建筑中的节能效果。研究表明:相比于常规家用多联机新风系统,采用定风量新排风热回收机组可显著降低系统运行能耗,全年节能率在南京和北京分别达到20.7%和30.6%,且节能效果与气候寒冷程度呈正相关;在制热工况下,系统优先采用热回收模式并将新风量控制在最小水平;在制冷工况下,通过引入旁通支路并结合变风量控制策略可进一步提升节能性能,相较于基准方案1,南京和北京的制冷季节节能率分别提高了2.77%和15.31%。

**关键词** 热回收;新风机组;多联机;优化控制;气候区

中图分类号: TU831;TB657.2

文献标识码: A

## Energy Saving Performance of Variable Refrigerant Flow Systems with Different Heat-Recovery Fresh-Air Units in Residential Buildings

Zhou Yujue<sup>1</sup> Huang Zhaobin<sup>2</sup> Xu Zhenkun<sup>2</sup> Gao Zhuoxian<sup>2</sup> Wang Baolong<sup>1</sup>  
Shi Wenxing<sup>1</sup> Yang Zixu<sup>3</sup>

(1. Department of Building Science, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2. Guangdong Midea Refrigeration Equipment Co., Ltd., Foshan, 528311, China; 3. School of Energy and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China)

**Abstract** To address the issues of poor air quality and the lack of fresh air in traditional variable refrigerant flow (VRF) systems, VRF systems and fresh air units are commonly used in combination in practical engineering applications. However, these systems are typically controlled independently. To achieve coordinated operation between VRF systems and heat-recovery fresh-air units, a new integrated VRF fresh-air system was developed, with the aim of reducing system energy consumption and improving indoor comfort and air quality. Based on the full-condition performance model of the VRF system and the characteristics of the heat-recovery unit, simulation analyses were conducted to evaluate the energy-saving effects of conventional VRF systems and of three types of integrated VRF fresh-air systems in residential buildings in Nanjing and Beijing. The results indicate that, compared with conventional residential VRF fresh-air systems, the system equipped with a constant air volume heat-recovery unit significantly reduced the operational energy consumption, achieving annual energy savings of 20.7% and 30.6% in Nanjing and Beijing, respectively. The energy-saving performance was positively correlated with the severity of cold-climate conditions. During the heating season, the new integrated system prioritizes the use of the heat-recovery mode and minimizes the fresh air volume. During the cooling season, the energy-saving performance can be further improved by introducing a bypass branch and combining it with a variable air-volume control strategy. Compared to the primary baseline system, the combined VRF fresh-air system achieved cooling-season energy-saving rates of 2.77% and 15.31% for Nanjing and Beijing, respectively.

**Keywords** heat recovery; fresh air unit; variable refrigerant flow system; optimized control; climate zone

多联机空调(热泵)系统<sup>[1]</sup>自20世纪90年代初引入中国以来,凭借其灵活性和高效性逐渐成为空调

基金项目:国家自然科学基金青年项目(52408115)资助。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China Youth Project (No. 52408115).)

收稿日期:2025-03-28;修回日期:2025-04-19;录用日期:2025-04-24

行业的重要发展方向。截止2023年,中国多联机销量已突破100万台,年销售额约600亿元,占中央空调市场份额的49.82%<sup>[2]</sup>。多联机产品广泛应用于办公楼、酒店、别墅、学校等各类建筑场景,尤其在家装市场中呈现出快速增长的态势。然而,传统多联机系统无法直接引入室外空气进行通风换气,导致室内空气质量难以满足室内健康和舒适要求,该问题成为多联机技术进一步发展的瓶颈之一<sup>[3]</sup>。

近年来,随着公众对大气污染和呼吸道传染病的关注增加,建筑新风系统的重要性日益凸显<sup>[4]</sup>。为弥补仅有制冷和制热功能的传统多联机系统缺乏新风换气能力的不足,近年来,家装市场中逐渐流行将小型多联机系统与中央新风系统相结合的配置方式。然而,新风系统的引入虽然改善了室内空气质量,但也带来了额外的能耗负担<sup>[5]</sup>。已有研究表明,新风负荷的能耗可占空调总能耗的40%以上<sup>[6]</sup>,因此,在确保室内空气质量的前提下,如何有效引入新风并减轻空调系统能耗负荷,成为亟待解决的问题。

热回收技术是通过回收排风中的能量以预热或预冷新风,是有效降低空调系统能耗的有效手段<sup>[7-10]</sup>。近年来,关于热回收技术的研究主要集中在系统的适用性分析、性能优化以及与其他设备(如空气源热泵)的耦合运行等方面<sup>[11]</sup>。研究表明,新排风热回收系统在不同气候区、不同建筑类型中展现了显著的节能效果,其节能率可达15%~50%<sup>[12]</sup>。然而,热回收系统的节能效果取决于热回收装置的效率、室内外温差以及新排风风机的能耗。在室内外温差较小时,热回收机组回收的冷热量较小,风机能耗的增加成为主导因素,此时应采用新排风旁通模式<sup>[13]</sup>。研究表明,采用具备旁通功能的全热回收装置,其全年节能量可增至约0.85~0.90 kW·h/(m<sup>3</sup>/h)<sup>[14]</sup>。此外,热回收新风机组的风量控制是影响系统性能的关键因素,不同风量控制方法带来的节能效果也各不相同。

虽然热回收新风系统在性能优化和适用性研究方面取得了显著进展,但目前大量研究主要聚焦于单一系统的运行特性方面,而对其与多联机系统协同运行的能效特性关注较少。事实上,多联机系统与热回收系统的协同运行能够充分考虑各子系统之间的相互影响和运行状态,从而实现更优的节能效果,避免单独控制可能导致的能量浪费,进一步提升能源利用效率。因此,本文基于多联机和新风系统的性能模型,探讨多联机系统与采用不同方案新排风热回收系统构成的新风多联机协同控制系统在南京和北京住宅建筑中的能耗特点,并与多联机+定风

量新风系统进行对比,考察其节能效果,为相关系统的研发设计与推广应用提供理论依据和实践指导,并推动多联机与新风系统协同优化控制的应用发展。

## 1 研究方法

本文采用案例研究与模拟仿真相结合的方法研究不同新风多联机系统的特性。首先,根据建筑规模、功能及围护结构参数,采用负荷计算方法确定全年逐时负荷需求,为系统配置提供依据。基于此选择合适的多联机机组和新风系统设备,并建立相应的数学模型。随后,通过模拟仿真分析不同方案的运行特性和能耗水平,以评估其性能表现。在模拟分析中,利用DeST软件<sup>[15]</sup>对全年8760h的逐时房间负荷进行详细模拟,并结合不同地区的逐时气象数据、室内目标温湿度设定以及固定的新风参数(如新风量和新风比),计算整体系统能耗。系统总能耗由新风机组能耗和多联机能耗2部分构成,其中新风机组风机能耗主要受新风量的影响,而多联机能耗则同时受到房间空调负荷和新风负荷的共同影响。

### 1.1 房间模型

选取一栋典型住宅(图1),该建筑的平面尺寸为9.9 m×8.8 m,室内净高为2.9 m,总建筑面积为87.12 m<sup>2</sup>。

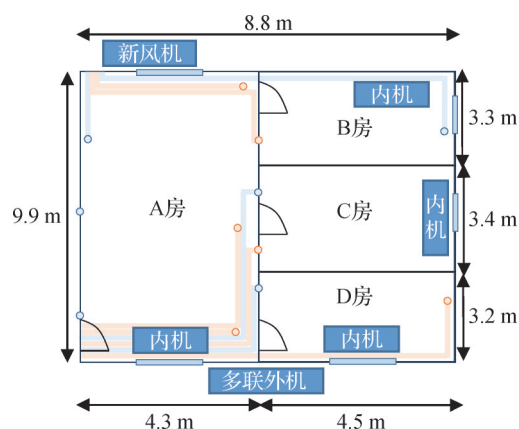


图1 住宅建筑模型平面图

Fig.1 Residential building model floor plans

为了研究系统在不同气候条件下的运行特性,选取南京(夏热冬冷地区)、北京(寒冷地区)作为代表城市,并依据《建筑节能与可再生能源利用通用规范》<sup>[16]</sup>确定各气候区的建筑热工参数(表1)。建筑内部的热扰动因素包括人员、照明和设备散热,同时空调系统的温度设定范围为20~26℃,相对湿度控制在30%~60%。

南京和北京的全年新风分布和负荷分别如图2和图3所示。南京最大冷负荷为11.16 kW,最大热负荷为7.47 kW;北京最大冷负荷为10.32 kW,最大热负荷为11.08 kW。且新风分布具有显著的季节性规律。

表1 住宅建筑热工参数

Tab.1 Thermal parameters of residential buildings

城市		南京	北京
屋面	传热系数/[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	0.375	0.239
	热惰性	2.917	3.526
外墙	传热系数/[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	0.729	0.329
	热惰性	2.761	3.349
楼板	传热系数/[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	0.812	0.348
外窗	传热系数/[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	1.4	1.4
人员	人数:3人;人均发热量:53W;人均产湿量:0.061 kg/h;新风量:150 m <sup>3</sup> /h		
照明		15 W/m <sup>2</sup>	
设备		5 W/m <sup>2</sup>	

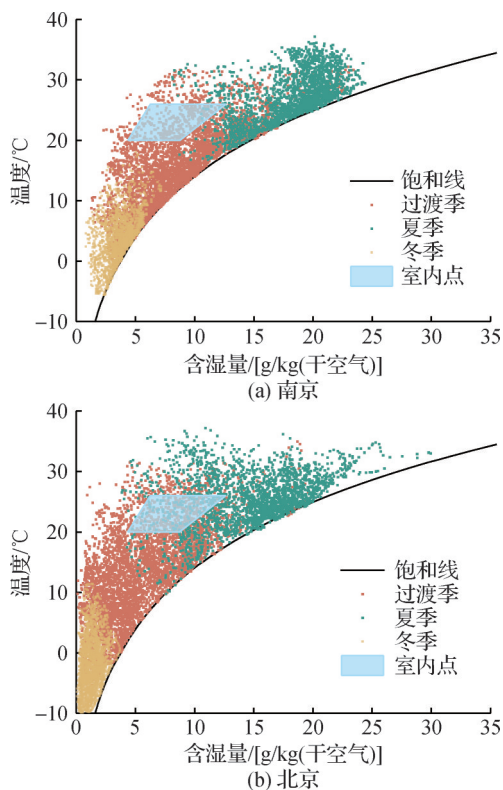


图2 全年新风分布

Fig.2 Fresh air distribution throughout the year

## 1.2 新风多联机系统

以新风多联机协同控制系统(简称“新风多联机系统”)为研究对象,其系统结构如图4所示。该系统由多联机(variable refrigerant flow, VRF)系统(包括室外机组、连接管道及室内机组)和新风系统(包括新

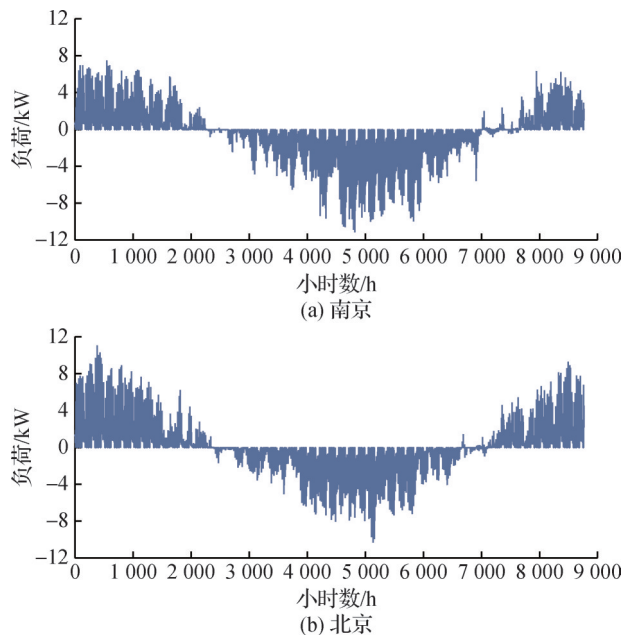


图3 全年负荷分布

Fig.3 Load distribution throughout the year

风机组、新风与排风管道及风口)共同组成。其中,新风系统采用“集中处理、分散送风、集中排风”的运行模式,负责引入室外新风并输送至各房间;多联机系统则主要承担各房间温湿度的调节任务,以保障室内的舒适性。

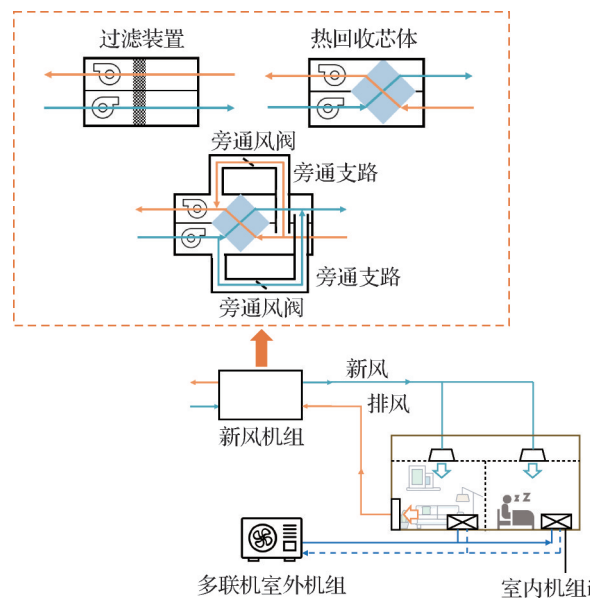


图4 新风多联机系统

Fig.4 VRF system with fresh air unit

### 1.2.1 多联机系统性能模型

为评估多联机系统的全工况运行性能,基于不同室外温度、不同负荷率和室内机开机状态下的实验数据,将多联机系统制冷与制热能效比(coefficient of performance, COP)拟合成与室外温度( $t_{out}$ )、部分负

荷率(part load ratio, PLR)的函数关系,如图5和图6所示。为简化计算过程,本文假设多联机在处理显热负荷和潜热负荷时具备相同的能力。

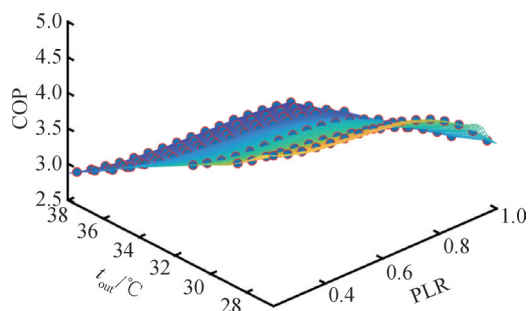


图5 多联机制冷性能曲面

Fig.5 Cooling performance curves of VRF system

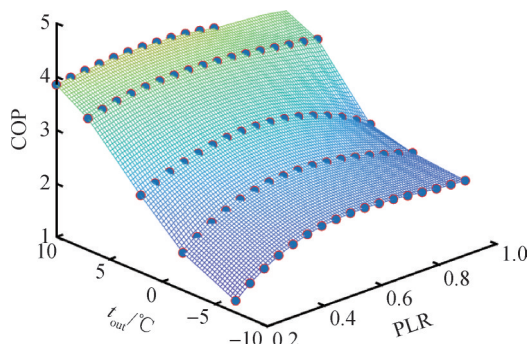


图6 多联机制热性能曲面

Fig.6 Heating performance curves of VRF system

### 1.2.2 新风机组模型

新风系统采用热回收新风机组,表2所示为不同季节热回收新风机组的显热交换效率及全热交换效率的测试数据。结果表明,冬季的热交换效率显著高于其他季节。因此,本文假设显热回收效率和潜热回收效率均等于全热回收效率,并设定冬季的全热交换效率为75%,其余3个季节的全热交换效率统一设定为60%。

此外,为了量化新风系统的运行能耗,基于实验室测试数据,拟合出带热回收新风机组的风机功率与风量之间的关系曲线,如式(1)所示。考虑到热回收芯体、风管及弯头等部件的阻力影响,本文估算仅具备过滤功能的新风机组的风机功率约为带热回收新风机组的75%,如式(2)所示。此外,在旁通运行模式下,带热回收新风机组的风机功率约为其正常运行功率的80%,如式(3)所示。

$$P_1 = 0.0008 \times (G_r^2 + G_p^2) + 5.357 \quad (1)$$

$$P_2 = 0.75P_1 \quad (2)$$

$$P_3 = 0.8P_1 \quad (3)$$

式中: $P_1$ 为带热回收新风机组的风机功率,W; $P_2$ 为仅

过滤新风机组的风机功率,W; $P_3$ 为带热回收新风机组在旁通时的风机功率,W; $G_r$ 为新风风量, $m^3/h$ ; $G_p$ 为排风风量, $m^3/h$ 。

表2 热回收新风机组的热交换效率测试点

Tab.2 Heat exchange efficiency test points of heat recovery fresh air units

	冬季	梅雨季	夏季	过渡季
显热交换效率	71.9%		61.7%	59.8%
	75.1%		64.9%	61.4%
	79.8%		68.2%	63.1%
	82.2%		69.2%	63.7%
全热交换效率	69.5%	56.3%	59.9%	57.3%
	73.5%	57.9%	62.9%	59.0%
	78.0%	59.2%	65.2%	60.7%
	81.2%	60.2%	66.3%	61.5%

### 1.3 对比方案

本文对4种不同的新风多联机系统方案(表3)进行了性能对比分析,旨在评估各方案对系统能耗的影响。基准方案为仅配备过滤装置的定风量新风多联机系统;对比方案1在此基础上增加了全热回收装置;对比方案2配置了全热回收模块,并在热回收芯体两侧增设旁通支路,使系统能够根据运行工况灵活选择是否经过热回收芯体。在对比方案2的基础上,对比方案3进一步引入可变频的新风量调节策略,以进一步提升节能效果。

表3 不同方案对比

Tab.3 Comparison of different schemes

工况	新风系统	热回收装置	旁通支路	变新风量
常规多联机	×	×	×	×
基准方案	√	×	×	×
对比方案1	√	√	×	×
对比方案2	√	√	√	×
对比方案3	√	√	√	√

## 2 结果和讨论

图7和图8所示分别为不同方案下全年制冷、制热能耗及节能率。计算结果显示,新风机组的能耗主要受运行时间和新风量大小的影响,其全年能耗在不同地区和不同方案间变化较小,基本维持在140~200 kW·h,占全年总能耗的比例不足10%。表明新风机组在提供新风的同时虽会消耗一定能量,但对整体系统能耗的影响相对有限。相比之下,多

联机系统为满足区域内的供暖和制冷负荷需求所消耗的能量占全年总能耗的绝大部分,是决定全年总能耗的关键因素。

在制冷季节,相较于基准方案,对比方案1在南京的节能率为6.6%,而在北京的能耗略有上升。这主要是由于增加热回收后,全年制冷工况点有所增加。对比方案2在南京和北京的节能率分别达到9.21%和3.81%,而对比方案3在南京和北京的节能率则进一步提升至9.37%和7.31%。在南京,增加旁通已基本挖掘了节能潜力,进一步引入变新风对节能效果的提升较为有限;而在北京,变新风仍能显著提高节能效果,这主要是由于该地区在室外新风较冷且室内存在冷负荷的工况较多,适当增加新风量有助于更充分地利用新风的冷量优势。

在制热季节,相比于基准方案,对比方案1在南京和北京的节能率分别达到32.21%和45.46%。引入热回收模块后,多联机系统的能耗显著降低,从而减少了整体能源消耗。且节能率与地区寒冷程度呈正相关,气候越寒冷,节能效果越显著。这主要是由于冬季长期处于低温环境,导致室外新风的预热需求显著增加,而热回收模块能够有效降低新风负荷,从而大幅减少多联机系统的能耗。该差异充分体现了地区气候条件对节能效果的显著影响,并进一步证明了热回收模块在寒冷地区的应用价值更高。此外,对比方案2和对比方案3的节能率与对比方案1相近,表明在制热季节,旁通和变新风策略并未带来额外的优化效果,系统仍然优先选择热回收模式并运行于最小新风量。

以北京为例,图9和图10所示分别为对比方案2中采用热回收与旁通模式下,热负荷与冷负荷在室

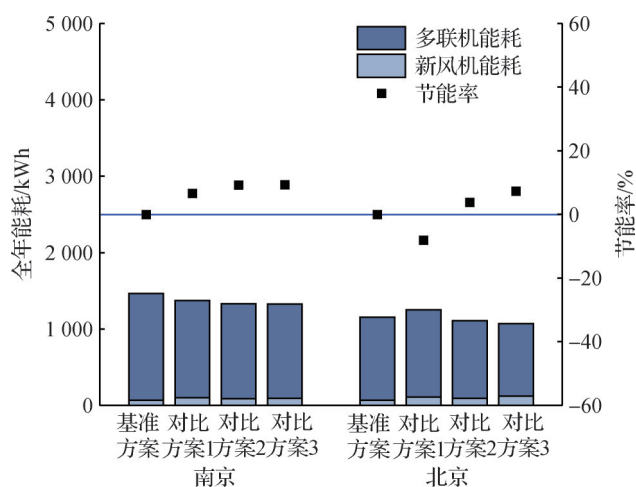


图7 不同方案全年制冷能耗及节能率

Fig.7 Annual cooling energy consumption and energy saving rate of different schemes

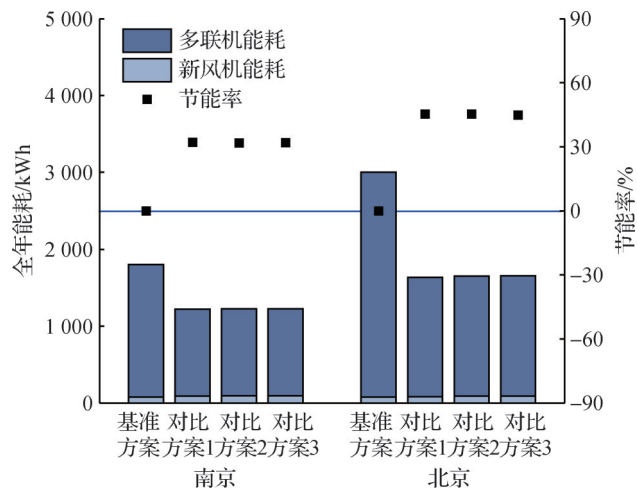


图8 不同方案全年制热能耗及节能率

Fig.8 Annual heating energy consumption and energy saving rate of different schemes

外温湿度条件下的三维分布特性。由图9可知,当室内存在热负荷时,系统选择热回收模式运行。该运行模式的选择主要基于冬季工况的特点:室内为热负荷,同时室外新风温度通常低于室内温度。系统通过利用室内排风中的余热对新风进行预加热,从而显著减少新风处理的加热量,有效降低运行能耗并提升系统的整体能效。相比之下,在室内以冷负荷为主时,系统更倾向于选择旁通模式运行。从新风参数的分布特性分析可以发现,在旁通模式下,新风焓值大多介于室内设定点的最低焓值与最高焓值之间。这表明直接引入新风即可处理较大的室内冷负荷,额外借助全热回收模块进行能量回收反而会导致新风利用潜力下降和系统能耗增加。然而,在某些特殊工况下,系统仍然选择热回收模式运行,主要包括2种典型情形:其一,新风温湿度较低且室内冷负荷较小,此时通过热回收模块对新风进行预加热后,送风状态能与室内较小的冷负荷需求相匹配;其二,新风温度接近室内温度但湿度较高,且室内冷负荷较大,此时直接引入新风后带来的显热负荷增加较小但会增加较多的潜热负荷,通过热回收模块对新风进行预处理,能有效减少进入室内的湿负荷,降低除湿需求,提高运行效率。

在南京和北京的制冷季节中,筛选出非最小新风量工况点,并将其负荷分布与对比方案2进行对比(图11)。研究表明,新风优化点大部分出现在室内负荷为冷负荷,而新风负荷为热负荷的情况下,此时对比方案3通过适当增加新风量,以利用新风负荷抵消部分室内冷负荷,从而有效降低系统的总能耗。其中,北京的优化点数量显著多于南京,因此在北京地区,对比方案3在对比方案2的基础上能够实现更

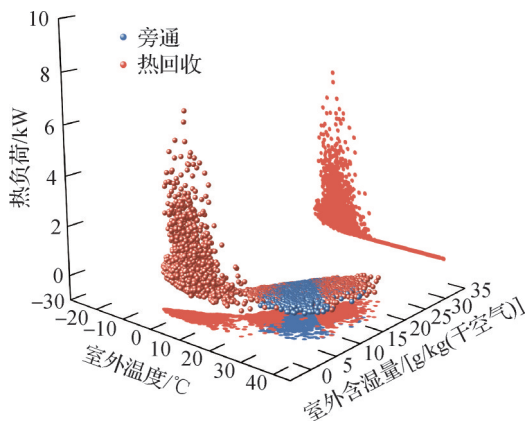


图9 不同工况点的热负荷与室外温湿度

Fig.9 Heat load, outdoor temperature and humidity at different operating points

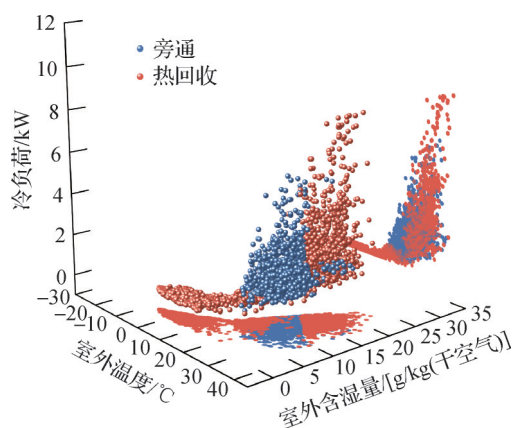


图10 不同工况点的冷负荷与室外温湿度

Fig.10 Cooling load, outdoor temperature and humidity at different operating points

高的节能效果。进一步分析这些优化点所对应的运行模式(旁通模式或热回收模式,见图12),结果表明,在南京,所有新风优化点均处于旁通模式;而在北京,优化点涵盖旁通模式和热回收模式,其中以旁通模式为主。在旁通模式下,虽然变新风策略导致新风机能耗有所增加,但由于多联机能耗大幅降低,而多联机在系统总能耗中占据主导地位,因此整体能耗降幅较为显著,约为11.5%。在热回收模式下,新风热负荷在进入热回收单元前显著高于室内冷负荷,而经过热量回收后略低于室内冷负荷。通过变新风策略,增大新风热负荷使其更好地匹配室内负荷需求,从而使新风机成为系统的主要能耗来源。因此,室外新风较冷且室内热源较大的工况越多,室内热负荷高于新风冷负荷的程度越大,优化潜力也越大。

### 3 结论

本文针对常规多联机与新排风热回收的家用多

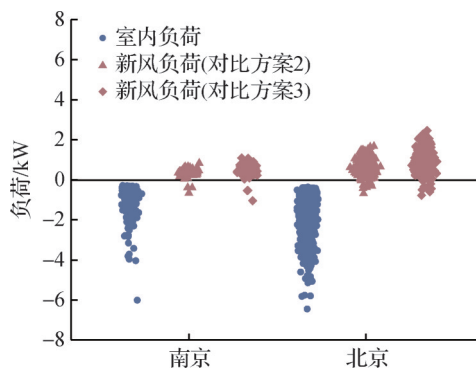


图11 不同方案新风优化点负荷分布

Fig.11 Load distribution at fresh air optimization points of different schemes

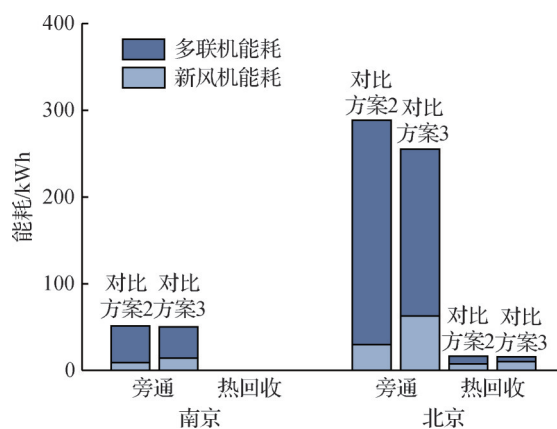


图12 不同方案新风优化点能耗对比

Fig.12 Comparison of energy consumption at the optimization point of fresh air for different schemes

联机系统方案,结合机组的全工况性能模型,系统研究了不同方案在南京和北京住宅建筑的节能效果及运行特性,得到如下结论:

1)增加热回收显著降低了机组的运行能耗,在南京和北京的全年节能率分别可达20.7%和30.6%。且节能率与地区寒冷程度呈正相关,体现了热回收技术在低温气候中的优越性。

2)在制热工况下,系统优先采用热回收模式运行,并将新风量控制在最小水平;在制冷工况下,通过引入旁通支路并结合变新风量控制策略,可进一步提升系统的节能性能。在2种策略协同作用下,系统在南京和北京地区相较于基准方案1的节能率分别提升了2.77%和15.31%。此外,当室外新风温度较低且室内处于冷负荷条件时,优先启用旁通支路运行,并适当增加新风量,有助于进一步降低系统的整体能耗。

上述结论为新风多联机系统优化设计提供了重要的理论支持,同时也为家用多联机新风系统的节能策略制定奠定了基础。未来,将通过优化设备设

计和提升容量参数,进一步分析不同地区最适配的新风机组规模和系统形式,以全面增强系统的节能性能和运行效率。

#### 参考文献

- [1] 石文星,成建宏,赵伟,等.多联式空调技术及相关标准实施指南[M].北京:中国标准出版社,2011.(SHI Wenxing, CHENG Jianhong, ZHAO Wei. Guide to the implementation of multi-connected air conditioning technology and related standards [M]. Beijing: Standards Press of China, 2011.)
- [2] V客暖通网.2023年度中国中央空调市场总结报告[R].[网络发布]:V客暖通网,2023.(vkhvacr. 2023 China Central Air Conditioning Market Summary Report [R]. [Online]: vkhvacr, 2023.)
- [3] GOETZLER W. Variable refrigerant flow systems [J]. *Ashrae Journal*, 2007, 49(4): 24-31.
- [4] 成家豪,张春路.住宅用排风热回收新风机组的能效评价[J/OL].制冷学报,1-9.[2025-05-16].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.TB.20241028.1347.002.html>. (Cheng Jiahao, Zhang Chunlu. Energy efficiency evaluation of residential fresh air units with exhaust air heat recovery [J/OL]. *Journal of Refrigeration*, 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.TB.20241028.1347.002.html>.)
- [5] ROULET C A, HEIDT F D, FORADINI F, et al. Real heat recovery with air handling units [J]. *Energy and Buildings*, 2001, 33(5): 495-502.
- [6] 胡建文,成浩,周敏,等.既有建筑能耗测试及节能改造案例分析[J].暖通空调,2022,52(增刊2):329-332.(HU Jianwen, CHENG Hao, ZHOU Min, et al. Case study on energy consumption test and energy-saving transformation of existing buildings [J]. *Journal of HV&AC*, 2022, 52(Suppl. 2): 329-332.)
- [7] LI Yueming, WU Jingyi. Energy simulation and analysis of the heat recovery variable refrigerant flow system in winter [J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(7): 1093-1099.
- [8] HUNT W, UPADHYE H, DOMITROVIC R, et al. Variable refrigerant flow-heat recovery performance characterization [J]. *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 2012, 17: 138e147.
- [9] LAVERGE J, VAN DEN BOSSCHE N, HEIJMANS N, et al. Energy saving potential and repercussions on indoor air quality of demand controlled residential ventilation strategies [J]. *Building and Environment*, 2011, 46(7): 1497-1503.
- [10] 张文,聂金哲.新风热回收系统在我国不同气候区典型建筑中的适用性研究[J].建筑科学,2022,38(8):194-200.(ZHANG Wen, NIE Jinzhe. Study on applicability of heat recovery ventilation system in typical buildings in different climate regions of China [J]. *Building Science*, 2022, 38(8): 194-200.)
- [11] 张文.新风热回收系统气候适用性及性能优化研究[D].北京:北京建筑大学,2023.(ZHANG Wen. Study on climate applicability and performance optimization of fresh air heat recovery system [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023.)
- [12] 李函龙.动态温湿度工况下新风热回收机组性能及其适用性研究[D].北京:北京建筑大学,2024.(LI Hanlong. Study on performance and applicability of fresh air heat recovery unit under dynamic temperature and humidity conditions [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2024.)
- [13] 田靖,郝翠彩,田树辉,等.一种适用于寒冷地区近零能耗居住建筑的新风系统[J].建筑科学,2020,36(4):14-17.(TIAN Jing, HAO Cuicai, TIAN Shuhui, et al. A ventilation system for nearly zero energy residential buildings in cold regions [J]. *Building Science*, 2020, 36(4): 14-17.)
- [14] 王立峰,曹阳,袁涛,等.近零能耗居住建筑中采用热回收装置全年节能量计算方法研究[J].暖通空调,2021,51(8):83-87.(WANG Lifeng, CAO Yang, YUAN Tao, et al. Research on calculation methods of annual energy saving using heat recovery devices in nearly zero energy residential buildings [J]. *Journal of HV&AC*, 2021, 51(8): 83-87.)
- [15] 清华大学建筑技术科学系环境与设备研究所.建筑能耗模拟软件 Dest [EB/OL].(2023-07-13)[2024-01-27].<https://www.dest.net.cn/zy>. (Institute of Environment and Equipment, Department of Building Technology Sciences, Tsinghua University. Building energy simulation software Dest [EB/OL]. (2023-07-13) [2024-01-27]. <https://www.dest.net.cn/zy>.)
- [16] 建筑节能与可再生能源利用通用规范:GB 55015—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.(General code for energy efficiency and renewable energy application in buildings: GB 55015—2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.)

#### 通信作者简介

杨子旭,男,副教授,北京科技大学能源与环境工程学院,15862178772,Email:yangzixu95@163.com。研究方向:制冷与热泵节能技术。

#### About the corresponding author

Zixu Yang, male, associate professor, School of Energy and Environmental Engineering, University of Science & Technology Beijing, 86-15862178772, E-mail:yangzixu95@163.com. Research fields: energy-saving technology of refrigeration and heat pump.