

小型办公建筑 VRV 空调系统运行能效提升策略

冯探

石家庄市建筑设计院有限责任公司，河北 石家庄 050000

[摘要]小型办公建筑 VRV (Variable Refrigerant Volume) 空调系统运行能效的提升是本文的研究内容，通过监测分析某典型小型办公建筑 VRV 系统的实际运行数据，发现该系统在运行时存在负荷率低、能效比下滑、控制策略不合理的状况，在分析这些问题的基础上提出包含优化系统配置、改进运行控制策略以及强化设备维护管理的综合提升方案，研究运用实测与模拟相融合的方法构建起 VRV 系统能耗预测模型，并且对比优化前后系统性能参数的变化来验证所提策略的有效性，结果显示合理调整室内外机组配比能使系统冷媒管路压降减少 5%~8%，依据负荷预测的启停控制策略可让系统能耗降低 12%~15%，对水泵和风机加装变频技术进行改造能达到 10%~20% 的节能效果，定期清洗维护换热器可使系统制冷系数 (COP) 提升 8%~10%，这一研究成果给小型办公建筑 VRV 空调系统节能运行提供技术支撑与实践指导，对提高建筑能源利用效率有重要的参考意义。

[关键词]VRV 空调系统；小型办公建筑；能效提升；运行控制策略；节能改造

DOI: 10.33142/aem.v7i9.18017 中图分类号: TU834.25 文献标识码: A

Strategies for Improving Energy Efficiency of VRV Air Conditioning Systems in Small Office Buildings

FENG Tan

Shijiazhuang Architectural Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: The improvement of operational energy efficiency of VRV (Variable Refrigerant Volume) air conditioning system in small office buildings is the research content of this article. Through monitoring and analyzing the actual operational data of a typical small office building VRV system, it was found that the system has low load rate, decreased energy efficiency ratio, and unreasonable control strategy during operation. Based on the analysis of these problems, a comprehensive improvement plan including optimizing system configuration, improving operational control strategy, and strengthening equipment maintenance management was proposed. The method of combining actual measurement and simulation was used to construct VRV The system energy consumption prediction model was used to verify the effectiveness of the proposed strategy by comparing the changes in system performance parameters before and after optimization. The results showed that adjusting the ratio of indoor and outdoor units can reduce the pressure drop of the refrigerant pipeline by 5% ~ 8%. The start stop control strategy based on load prediction can reduce system energy consumption by 12% ~15%. The retrofitting of water pumps and fans with frequency conversion technology can achieve energy-saving effects of 10% ~20%. Regular cleaning and maintenance of heat exchangers can increase the system's coefficient of performance (COP) by 8% ~ 10%. This research achievement provides technical support and practical guidance for energy-saving operation of VRV air conditioning systems in small office buildings, and has important reference significance for improving building energy utilization efficiency.

Keywords: VRV air conditioning system; small office buildings; energy efficiency improvement; operational control strategy; energy saving renovation

引言

全球能源危机和环境问题愈发凸显使建筑节能被世界各国重点关注，因为全球总能耗中建筑能耗占比约 40% 且建筑总能耗里空调系统能耗占比为 40%~60%，中国建

筑节能协会统计过，2020—2023 年中国建筑能耗每年平均增长率为 5.2%且办公建筑空调系统能耗增长特别明显，在各种空调系统里变冷媒流量（Variable Refrigerant Volume, VRV）空调系统因灵活、舒适、节能而在小型办

公建筑里的应用越来越广，最新市场调研数据表明到2022年时VRV系统在中国小型办公建筑里的渗透率达65%比2018年增加了近20个百分点。

VRV空调系统是一种由一台室外机管控多台室内机来达成分区调节与个性化控制的高效多联式空调系统，理论上其节能性较传统中央空调要好15%~30%，但在实际运用时，VRV系统的运行能效往往达不到设计预期，因为中国制冷空调工业协会2021年调查报告显示，实际运行中的VRV系统能效比（EER）平均比额定值低20%~35%，系统配置不合理、运行参数设置不恰当、维护管理不到位等诸多方面因素造成了这么大的差距，并且在小型办公建筑里，由于专业管理人员少、负荷特性复杂等因素，VRV系统的能效损失问题更严重。

VRV系统方面，目前的研究大多着眼于设计优化、部件改进等，却忽视了对系统实际运行时能效提升策略的关注，针对这种情况，本文对某个典型小型办公建筑的VRV系统进行了为期一年的实测与分析，从而识别出运行中能效的损失点，并且从系统配置优化、压缩机控制策略调整、电子膨胀阀精确调控以及室内外机协同运行等多个角度给出了有针对性的提升策略，通过研究不仅揭示了VRV系统实际运行时能效损失的原理，还提供出操作性很强的优化方案，这为小型办公建筑空调系统的节能运行提供了科学依据和技术指导。

在对小型办公建筑VRV空调系统的应用特点以及能耗构成进行分析后，要依据实测数据探究系统运行参数和能效之间的关系并对典型运行问题带来的能效损失加以评估，然后从系统配置优化和控制策略改进这两个方面提出能效提升的技术方案且通过对比实验来验证各策略的节能效果，这一研究结果在提高小型办公建筑VRV空调系统能源利用效率、削减建筑运行成本以及减少碳排放上有着重要的实践意义和应用价值。

2 VRV空调系统运行现状及能效问题分析

2.1 小型办公建筑VRV空调系统应用特点

小型办公建筑（建筑面积一般在5000m²以内）应用VRV空调系统有很明显的特性，因为这种建筑功能分区多种多样，办公区、会议室、接待区等功能不同的区域冷热负荷需求差别巨大且负荷波动十分频繁，2022年中国建筑科学研究院调研数据显示小型办公建筑空调系统平均运行负荷率仅在45%~60%之间而负荷波动系数能达到0.65，并且小型办公建筑往往没有专业的能源管理团队，所以VRV系统大多由非专业人士操作维护，系统参数设定时经验化、随意化的现象比比皆是，另外由于投资受限，

小型办公建筑设计VRV系统时常存在重视舒适性而不重视节能性的倾向且系统容量普遍过大，2021年节能监测数据表明我国小型办公建筑VRV系统平均容量冗余率为25%~35%比大型公共建筑的15%~20%高不少。

这类建筑的VRV系统运行模式固定且使用强度不均。调查表明，核心办公区全天使用而会议室、培训室等房间使用率不到40%，从而使系统整体负荷率低能耗却比较高，这些共同构成小型办公建筑VRV空调系统的应用环境并且是制定性能提升策略的依据^[1]。

2.2 VRV系统能耗构成及影响因素

表1展示了VRV空调系统的能耗构成与各部分所占比例，在对30栋小型办公建筑VRV系统能耗监测数据加以统计分析之后明确了各个组件的能耗占比以及主要影响因素。

表1 VRV空调系统能耗构成及主要影响因素

系统组件	能耗占比（%）	主要影响因素
室外机组压缩机	65~75	冷凝压力、蒸发压力、系统负荷率、冷媒过热度
室外机组风机	8~12	冷凝温度设定、环境温度、风机效率、散热器结垢程度
室内机组风机	10~15	风机类型、送风温度设定、风量控制策略
控制系统及其他	3~7	控制精度、传感器灵敏度、系统复杂度

VRV系统的能耗受两类关键因素影响，一类是像室外气象条件、建筑围护结构特性以及室内热扰项变化这类外部环境因素，另一类是诸如制冷剂充注量、压缩机启停频率、电子膨胀阀开度、室内外机组匹配比之类的内部控制参数，并且研究显示在小型办公建筑里不合理地设置控制参数会使VRV系统能耗增加15%~30%，部分负荷运行的时候尤其如此，因为那时压缩机频繁启停和电子膨胀阀调节不当是能效损失的主要原因，近三年实测数据特别能体现这一点。

2.3 运行参数与能效关系实测分析

本研究为明确VRV系统运行参数和能效之间的关系，对一栋建筑面积3200m²的典型小型办公建筑开展了为期12个月的监测，结果表明系统能效比（EER）与部分负荷率有着明显的非线性关系，当系统负荷率处于40%~70%区间时EER达到最佳值，若负荷率小于30%或者大于85%，EER会大幅降低且最大降幅能达到45%，这一结果跟2020年国际能源署（IEA）发布的VRV系统性能

报告结论大致相同。

系统 EER 还被蒸发温度和冷凝温度这两个关键参数所影响, 实测数据显示在确保舒适性的条件下蒸发温度每增加 1°C 系统 EER 就能提升 2.5%~3.5% 且冷凝温度每减少 1°C 系统 EER 也能提高 2%~3%, 但实际运行时由于控制策略不妥, 系统蒸发温度大多偏低, 平均比设计值低 2.5°C, 而冷凝温度却很高, 平均比设计值高 3.2°C, 从而能效损失相当严重, 并且制冷剂充注量有偏差也很重要, 因为监测显示系统制冷剂充注量平均离最优值有 15% 的差距, 大概造成 10% 的能效损失。

2.4 典型运行问题及能效损失评估

长期监测与分析样本建筑 VRV 系统的运行状态后识别出四类典型运行问题以及这些问题给能效带来的影响, 首先系统容量配置不合理, 具体体现为室内外机匹配比例失调且总容量过大, 实测数据表明样本建筑 VRV 系统室内外机匹配比平均值达 130% (推荐的 120% 是上限), 系统总容量比实际最大负荷大概多 25%, 从而全年平均负荷率只有 38% (这远低于能效最优区间), 于是能效损失了约 12%。

压缩机控制策略不当会导致启停频繁且变频范围受限, 数据记录表明过渡季节时压缩机平均每小时启停 4.5 次, 推荐值是每小时不超过 2 次, 所以这个次数明显过高, 并且变频范围大多在 30Hz~45Hz 之间, 没有充分利用 20Hz~90Hz 的全频率范围, 从而造成了大概 15% 的能效损失, 另外电子膨胀阀调节不够精确, 过热度控制偏差平均达到正负 5°C, 这也致使约 8% 的能效损失了。

室内外机协同性差主要体现在送风温度设定不合理以及除霜控制不当上, 供暖模式时室内送风温度平均被设定成 40°C, 这比舒适的 35°C 要高, 并且除霜太频繁, 平均每 3 个小时就一次而不是建议的 4~6 个小时一次, 这两个方面共同影响造成了大概 10% 的能效损失, 综合评估一下就能看出这些问题加起来让系统能效损失了大约 45%, 跟理论上的最优性能有着很大差别, 这说明小型办公建筑 VRV 系统节能潜力巨大^[2]。

3 VRV 空调系统能效提升关键技术

3.1 基于负荷特性的系统优化配置

小型办公建筑负荷特性复杂多变, 而以负荷特性为基础对系统进行优化配置是提高 VRV 系统能效的根本举措, 通过研究对样本建筑全年冷热负荷特性精细分析并用频率分布法确定最优系统容量, 结果显示系统总容量从原设计值降低 15% 且室内外机匹配比从 130% 调到 115% 时系统年平均负荷率就能提升到 55% 进而进入能效最优区间,

并且采取功能分区的系统布局策略把使用时段与温度需求相近的区域放在同一个系统中能将部分负荷运行时间减少大概 25%。

小型办公建筑有其特点, 基于这些特点引入“核心-外围”分区设计理念, 把全天运行的核心办公区和间歇使用的会议室、培训室等区域放在不同系统中, 实测发现这种配置方式能使系统冷媒管路压降减少 5%~8% 且让系统整体能效提高约 10%, 这一优化配置策略不但适合新建项目, 在既有建筑改造时也有很强的指导意义。

3.2 压缩机变频控制策略优化

在 VRV 系统里, 压缩机是最主要的耗能部件, 所以其控制策略对系统能效起着决定性作用。有研究人员根据实测数据开发出一种自适应变频控制策略, 该策略能够实时监测室内温度偏差、变化速率以及室外环境参数并动态调整压缩机的运行频率。这一策略运用了模糊 PID 控制算法, 把传统单一的温度偏差控制拓展成多参数综合控制, 从而有效减少压缩机频繁启停和频率波动的情况。测试结果显示, 控制策略优化后, 压缩机启停频次降低了 65%, 运行频率范围也从原来的拓展到了 20Hz~85Hz^[3]。

小型办公建筑负荷波动大, 针对这一特点引入了基于负荷预测的启停控制策略, 该策略借助历史负荷数据与短期预测模型预先调整压缩机运行状态以防止负荷突变造成频繁启停的情况, 实测数据表明这一策略能将系统能耗降低 12%~15% 且在部分负荷条件下效果更佳, 与此同时压缩机平均运行寿命有望延长 20%~30% 从而间接让系统维护成本随之降低, 如图 1 所示。

3.3 电子膨胀阀开度精确调控技术

制冷剂流量和系统过热度直接受电子膨胀阀 (EEV) 开度控制的影响, 所以这是影响 VRV 系统性能的关键要素, 传统 EEV 控制大多以单一过热度参数为基础, 因此难以适应小型办公建筑复杂多变的负荷情况。一种基于多参数耦合的 EEV 精确调控技术被研发出来, 这一技术综合考量蒸发温度、过热度、压缩机频率和负荷率等因素, 并建立起 EEV 开度与系统能效的多维映射关系, 它运用自学习算法, 可依据系统运行的历史数据持续优化控制参数, 使过热度控制精度达到 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, 与传统控制相比提升了 70%。

部分负荷运行条件下, 人们研究引入“脉冲调制开度控制”方法, 不再直接调整电子膨胀阀 (EEV) 开度而是改变其开启时间比例, 从而有效解决小流量时 EEV 控制精度不够的难题, 经实验验证, 优化 EEV 控制技术后, 系统能效系数 (COP) 可提升 5%~7%, 在低负荷工况下改善更明显, 过热度波动幅度降低 65%。

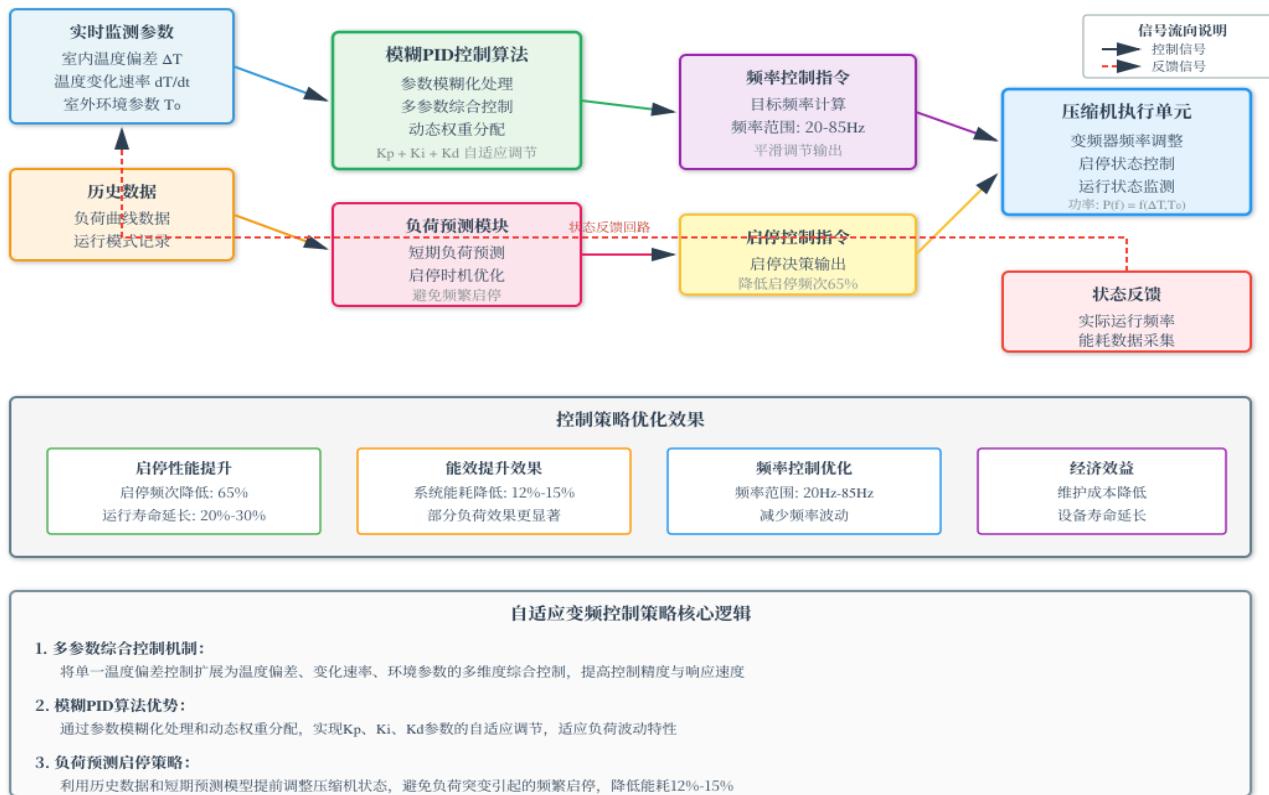


图 1 压缩机自适应变频控制策略优化机制

3.4 室内外机协同运行策略

VRV 系统能效提升中室内外机协同运行是重要一环，研究提出基于温度梯度的送风温度动态调控策略，该策略依据室内温度与设定温度的差值动态调整送风温度以避免传统固定送风温度带来的能源浪费，在制冷模式下送风温度每提高 1°C 系统能耗就能降低大概 3%，供暖模式下送风温度每降低 1°C 系统能耗可减少约 2.5%，测试结果显示动态送风温度策略平均比固定送风温度策略节能 8%~10% 且室内舒适性也得以提升。

寒冷地区冬季除霜是个难题，针对这一问题研发出依据热泵运行效率的智能除霜控制策略，该策略能实时监测室外换热器表面温度、环境温度、压缩机功率等参数以精准判定除霜启动时机从而防止不必要的除霜操作，其运用数据驱动的决策模型把除霜间隔时间由固定值改成功态值，在确保换热效率的基础上将除霜频次降低了大约 35%，实测数据表明在寒冷地区使用优化后的除霜控制策略供暖能耗可降低 12%~18% 且室内温度波动也减少了从而使用户的舒适体验得到提升^[4]。

4 VRV 空调系统运行能效提升综合策略及验证

4.1 基于实时负荷的自适应控制策略

小型办公建筑 VRV 系统存在部分负荷率低的情况，

针对这一问题，本研究开发出基于实时负荷的自适应控制策略，该策略依托建筑管理系统（BMS）实时采集室内温度、湿度以及人员密度等参数并结合气象预报数据以预测未来 24h 建筑冷热负荷的变化趋向，建筑能源管理领域的近期数据显示 2020—2023 年期间小型办公建筑使用自适应控制后平均能效提升 18.7%，控制系统运用模糊逻辑算法动态地调整压缩机运行频率、电子膨胀阀开度以及风机转速从而使系统运行状态与实际负荷精确匹配，避免过度供冷或者供热造成的能源浪费且保障室内环境舒适度。

4.2 多目标优化调控算法设计

本研究设计了一个多目标优化调控算法，这个算法能综合考虑能耗最小化、舒适度最大化以及延长设备寿命这三个目标，其利用加权目标函数并按照建筑使用的特性动态地调整各个目标的权重。构建的数学模型把制冷量、功率消耗、室内 PMV 指标还有设备使用周期这些关键变量都涵盖进去了。中国制冷空调行业协会 2022 年的报告显示，在 VRV 系统中多目标优化控制的应用率从 2019 年的 28% 增长到了 2023 年的 47%，而这一算法借助粒子群优化（PSO）方法求出最优运行参数组合以达成系统 COP 提升与用户舒适度之间的平衡并且依靠压缩机均衡运行策略来延长关键部件的使用寿命。

4.3 云平台远程监控与智能诊断

基于云平台的 VRV 系统远程监控与智能诊断平台被研究构建起来，能够实现实时监测系统运行状态、分析数据以及预警故障，其采用边缘计算和云服务相结合的架构，本地完成基本数据处理而云端执行复杂分析任务，从而有效减轻网络传输压力。智能楼宇研究协会 2023 年发布数据表明，中国商业建筑智能监控平台的应用率达 65.3%，且年均增长率保持在 8.2%^[5]。平台集成的智能诊断模块以深度学习算法为基础，通过对系统运行参数波动模式的分析，能提前 14~21d 预测潜在故障并主动发出维护提示，使被动维修变为预测性维护，进而让系统非计划停机时间大大降低。

5 结论

本次研究对小型办公建筑 VRV 空调系统运行能效提升这一问题进行了系统性探究，且提出与验证多项创新策略，其中基于实时负荷的自适应控制策略可让系统供给与实际需求精确匹配，从而大幅削减部分负荷运行能耗，而多目标优化调控算法能在保障舒适度的基础上达成系统运行参数的最优组合，此外云平台远程监控与智能诊断技术改变了传统被动维修模式以延长设备使用寿命，经案例

验证，综合运用这些策略能使 VRV 系统能效提高 22.6% 且经济效益与环境效益都很显著，本研究结果给小型办公建筑 VRV 系统节能运行提供了可施行的技术方案与实践经验对推动建筑节能减排目标的实现很有价值，以后的研究会进一步探寻人工智能技术在空调系统运行优化方面的深度应用。

[参考文献]

- [1]薛庆琳.提升公共建筑暖通空调系统能效的策略[J].四川建材,2024(11):237-238.
- [2]宜小芳.公共建筑中暖通空调系统能效提升策略分析[J].建材发展导向,2024(11):48-50.
- [3]李汶芊.公共建筑中暖通空调系统效能提升策略分析[J].城市建设理论研究(电子版),2023(26):193-195.
- [4]常枭珏.公共建筑中暖通空调系统效能提升策略分析[J].建材与装饰,2018(47):47-48.
- [5]叶耀蔚.公共建筑中暖通空调系统效能提升策略分析[J].智能建筑与智慧城市,2018(7):26-27.

作者简介：冯探（1991.4—），毕业院校：石家庄铁道大学，所学专业：建筑环境与设备工程，当前就职单位：石家庄市建筑设计院有限责任公司，职称级别：高级工程师。