

绿色低碳节能建筑中自然通风与机械通风协同控制策略对室内热舒适及能耗影响研究

张露兮

淮北职业技术学院，安徽 淮北 235000

DOI:10.61369/ETQM.2025110042

摘要：在全球低碳战略与建筑节能需求推动下，自然通风与机械通风协同控制成为绿色建筑环境调控核心方向。本文结合绿色低碳节能建筑特性，分析两种通风方式互补优势，构建“动态感知—分级调控—能效优化”协同控制策略框架，探究其在不同气候、建筑功能分区下对室内热舒适（PMV-PPD指标、空气龄、气流组织均匀性）与建筑能耗（空调、风机、综合能耗）的影响机制。结果显示，实时监测室外温湿度、风速及室内热环境参数，动态调整通风运行模式与参数配比，可在满足GB/T 50785—2012热舒适要求的同时，降低建筑通风空调系统能耗15%—25%，为绿色低碳建筑通风系统设计与运行优化提供理论和实践支持。

关键词：绿色低碳建筑；自然通风；机械通风；协同控制；室内热舒适

Research on the Impact of Synergistic Control Strategies for Natural and Mechanical Ventilation on Indoor Thermal Comfort and Energy Consumption in Green, Low-Carbon, and Energy-Efficient Buildings

Zhang Luxi

Huaibei Vocational and Technical College, Huaibei, Anhui 235000

Abstract : Driven by global low-carbon strategies and the demand for building energy efficiency, the synergistic control of natural and mechanical ventilation has become a core direction for environmental regulation in green buildings. This paper analyzes the complementary advantages of these two ventilation methods in the context of green, low-carbon, and energy-efficient buildings. It constructs a synergistic control strategy framework based on "dynamic sensing—hierarchical regulation—energy efficiency optimization" and explores its impact mechanisms on indoor thermal comfort (PMV-PPD indicators, air age, uniformity of airflow distribution) and building energy consumption (air conditioning, fans, and overall energy consumption) under different climatic conditions and building functional zones. The study reveals that real-time monitoring of outdoor temperature, humidity, wind speed, and indoor thermal environment parameters, along with dynamic adjustments to ventilation operation modes and parameter ratios, can meet the thermal comfort requirements specified in GB/T 50785—2012 while reducing the energy consumption of building ventilation and air conditioning systems by 15%—25%. This provides theoretical and practical support for the design and operational optimization of ventilation systems in green, low-carbon buildings.

Keywords : green, low-carbon buildings; natural ventilation; mechanical ventilation; synergistic control; indoor thermal comfort

引言

在全球能源危机与生态环境问题愈发严峻这一大背景之下，建筑行业因其作为能源消耗以及碳排放的重点领域，所以其低碳转型理所当然地成为达成“双碳”目标的关键环节。自然通风，作为一种属于零能耗的环境调控的方式，能够借助室外自然气流去实现室内空气更新和热环境调节，但却受到室外气候条件诸如风速、风向、温湿度以及建筑布局等限制，致使其稳定性与适用性存在不足；而机械通风尽管可以依靠设备以强制调控气流参数的方式来保障室内环境的稳定性，然而却需要消耗大量的电能，这无疑与低碳建筑所

秉持的节能目标存在矛盾之处^[1]。在此背景下，自然通风与机械通风的协同控制策略由此应运而生，该策略的核心要点就在于通过运用科学的控制逻辑，将两种通风方式所具备的优势加以整合，目的是在满足室内热舒适需求的这样一个前提之下，尽可能最大限度地去降低能源消耗。

一、自然通风与机械通风的特性及协同控制基础

(一) 自然通风的技术特性与适用边界

自然通风主要是依赖室外自然风压与室内外热压两者所形成的空气压差来驱动气流的流动，它所具有的核心优势在于具备零能耗以及零碳排放的特点，并且还能够引入新鲜的室外空气，从而有效提升室内空气的品质。依据驱动力的不同，自然通风大体上可以区分为风压通风与热压通风这两种类型：风压通风比较适用于室外风速相对稳定处于1.5–3m/s且风向具有一定规律的区域，通过对建筑立面的进风口与出风口精心设计来形成气流通道；热压通风则是巧妙利用室内外空气密度存在的差异例如夏季室内温度高于室外、冬季低于室外这种情况，通过上下通风口去形成垂直的气流，适用于温差相对较大的气候条件之下^[2]。不过，自然通风的性能受到室外环境限制的程度十分显著：要是室外风速低于0.5m/s的时候，就会出现气流驱动力不足的状况，进而无法满足室内通风量所要求通常民用建筑人均所需新风量为30m³/h；当室外温度过高比如在夏季超过30°C或者过低冬季低于5°C的时候，自然通风将会导致室内热环境出现恶化的情况，使得空调系统的负荷有所增加；除此之外，室外空气质量像是PM2.5浓度、污染物含量等因素同样也会对自然通风的使用造成限制。

(二) 机械通风的技术特性与能耗瓶颈

机械通风通过风机、风道、空气处理设备等组成的系统，强制控制气流的流量、温度、湿度与洁净度，其核心优势在于稳定性强、调控精度高，可在复杂气候条件下保障室内环境品质^[3]。根据功能需求，机械通风可分为全空气系统、空气–水系统与局部排风系统：全空气系统适用于大型公共建筑（如商场、写字楼），可实现全空间的气流调控；空气–水系统结合了空气处理与水系统换热优势，能耗低于全空气系统；局部排风系统则针对厨房、卫生间等污染集中区域，实现定向空气净化。但机械通风的能耗问题突出：风机运行能耗占通风系统总能耗的60%–70%，尤其在全空气系统中，为满足大空间气流组织需求，风机需维持较高风压与风量，能耗显著；此外，空气处理设备（如加热器、加湿器、过滤器）的运行也会增加能源消耗。

(三) 协同控制的核心逻辑与技术基础

自然通风跟机械通风所进行的协同控制，绝非那种简单认定为的“自然通风优先”抑或“机械通风补充”，而实际上是一种以室内外众多参数相互耦合起来的动态调控之类的过程，其核心的逻辑重点便在于“依据实际需求分配且发挥优势彼此互补”：一旦室外的气候条件处于适宜状态（就像温度处在18–26°C这个区间、风速在1–2.5m/s范围、PM2.5浓度低于50 μg/m³等情形）的时候，主要便以自然通风的方式为主，此时机械通风会处在待机或者低负荷运行状态，从而借助自然能源来达成室内的需求；然而当室外条件超越了自然通风所适用的边界情况时，机械通风会依照室内热环境的实际需求，对其运行参数进行动态地调整，

并且与此同时，通过对气流组织展开优化工作，辅助自然通风提升通风效果（比如借助机械通风来增强室内外的压差，以此强化自然气流的流动等）^[4]。说到实现协同控制所依赖的技术基础，总共涵盖三个主要方面：其一为参数感知系统，该系统借助部署在室外的温湿度传感器、风速风向传感器以及空气质量传感器，还有部署在室内的热舒适传感器（诸如PMV传感器、空气龄传感器等）以及CO₂浓度传感器，实时对环境参数展开采集工作，以便为控制决策提供必需的数据支撑；其二是控制算法，此算法基于机器学习或者模糊控制理论，构建起一种“室外参数–室内需求–通风模式”之间的映射模型，进而实现通风方式能够自动进行切换以及参数得以优化；其三为执行系统，这其中包含可调节外窗（例如电动百叶窗、呼吸式幕墙之类）、变频风机、可调式风道阀门等设备，用来确保控制策略可以精准地得到执行。

二、自然通风与机械通风协同控制策略构建

基于绿色低碳节能建筑所具备的技术需求，同时结合不同的气候条件以及建筑功能所具有的特性，本文构建起一种“动态感知–分级调控–能效优化”这样的三级协同控制策略，以此来达成两种通风方式能够实现精准的协同。

(一) 动态感知层

在这个三级协同控制策略当中，首先动态感知层乃是协同控制的重要基础，此层需要实现对室内外环境参数进行全面且实时的采集工作，其中核心感知参数涵盖：于室外参数方面，有温度（精度达到±0.5°C）、湿度（精度为±3%RH）、风速（精度为±0.1m/s）、风向（精度是±5°）、PM2.5浓度（精度±5 μg/m³）、CO₂浓度（精度±50ppm）；在室内参数方面，则有热舒适指标（即PMV值、PPD值）、空气龄（精度±0.5s）、气流速度（精度±0.1m/s）、温度分布均匀性（要求室内最大温差需≤2°C）、CO₂浓度（其控制目标为≤1000ppm）、相对湿度（控制目标设定在40%–60%）。室外的传感器被安装在建筑屋顶或者立面没有遮挡的区域，目的是避免阳光直接照射以及局部气流对其产生干扰；而室内的传感器则按照功能分区进行布置，就像办公区域每50m²部署1个PMV传感器，对于人员较为密集的区域（例如会议室），会增加CO₂浓度传感器的布置密度。传感器所采集到的数据，通过物联网（IoT）平台实时传输到控制中心，数据的更新频率设定为1–5min/次，以此来确保控制决策具有时效性^[5]。

(二) 分级调控层

根据我国《民用建筑热工设计规范》（GB 50176–2016）的气候分区，结合室外参数与室内热舒适需求，将协同控制分为三个等级以实现通风模式的动态切换。其中，一级协同（自然通风主导模式）的适用条件为室外温度18–26°C、相对湿度40%–60%、风速1–2.5m/s、PM2.5浓度≤50 μg/m³，且室内PMV值处于–0.5–0.5（热舒适范围），其控制策略为开启可调节外窗（开

启度50%–100%），利用风压与热压实现自然通风，机械通风系统处于待机状态，仅开启局部排风（如卫生间排风），风机频率维持在30Hz（低负荷运行），并通过调节外窗开启度与开启位置优化气流组织，确保室内空气龄≤10s，CO₂浓度≤800ppm，该模式下通风系统能耗主要来自局部排风风机，单位面积能耗可控制在1–3kWh/(m² · 月)，较纯机械通风降低80%以上。二级协同（自然通风与机械通风互补模式）适用条件为室外温度超出一级协同范围（如夏季26–30°C、冬季10–18°C），或风速0.5–1m/s、PM2.5浓度50–100 μg/m³，室内PMV值偏离热舒适范围（-1–0.5或0.5–1），控制策略为自然通风与机械通风协同运行，通过机械通风参数调整弥补自然通风不足，夏季开启外窗（开启度30%–50%）引入室外气流，同时启动机械通风系统的新风预处理功能（如间接蒸发冷却），将新风温度降至26°C以下后送入室内，风机频率维持在40–50Hz，冬季开启外窗（开启度20%–30%）引入新鲜空气，机械通风系统开启加热功能，将新风温度升至18°C以上，同时利用室内回风（回风率60%–70%）降低加热能耗，此外还通过机械通风的气流组织优化（如侧送下回、顶送下回）增强自然气流的扩散效果，确保室内温度分布均匀性≤1.5°C，该模式下通风系统单位面积能耗约为8–12kWh/(m² · 月)，较纯机械通风降低30%–40%。三级协同（机械通风主导模式）适用条件为室外温度极端（夏季>30°C、冬季<10°C），或风速<0.5m/s、PM2.5浓度>100 μg/m³，室内PMV值严重偏离热舒适范围（<-1或>1），控制策略为关闭外窗，以机械通风为主导，自然通风停止运行，机械通风系统根据室内热需求调整参数。

（三）能效优化层

为确保协同控制策略的长期节能效果，需建立全周期能耗监控与反馈机制，其中能耗监控环节通过建筑能源管理系统（BEMS），实时监测通风系统的风机能耗、空气处理设备能耗，以及空调系统的联动能耗（如自然通风对空调负荷的削减量），形成能耗数据库；能效评估环节则基于能耗数据，计算通风系统的能效比（EER，即单位能耗提供的通风量），明确一级协同模式下EER应≥5m³/(h · W)、二级协同≥3m³/(h · W)、三级协同≥2m³/(h · W)的目标要求，若监测数据显示EER低于对应目标值，系统将自动触发参数调整（如优化风机频率、调整外窗开启度）；反馈优化环节进一步利用机器学习算法，依托历史数据（如不同季节、不同时段的能耗与热舒适数据），对协同控制的参数阈值（如一级协同的温度范围、二级协同的风机频率区间）进行动态优化，以此提升策略对不同工况的适应性与整体节能效果。

三、协同控制策略对室内热舒适与能耗的影响分析

（一）对室内热舒适的影响

室内热舒适是建筑环境调控的核心目标，本文结合PMV-

PPD指标、空气龄与温度分布均匀性分析协同控制策略的影响。依据GB/T 50785–2012标准，PMV需处于-0.5–0.5且PPD≤10%，一级协同模式下自然通风结合气流优化使PMV稳定在-0.3–0.3、PPD≤5%，二级协同模式机械通风预处理新风可调整PMV至达标范围、PPD控制在8%–10%，三级协同模式机械精准调控保障指标达标并控湿提升舒适感。空气龄通常要求≤15s，一级协同穿堂风将其降至8–10s且CO₂≤800ppm，二级协同结合强制气流维持在10–12s、CO₂≤900ppm，三级协同全空气过滤确保空气龄达标且PM2.5≤35 μg/m³。温度分布上，一级协同调外窗使温差≤1.5°C，二级协同结合送风方式控温差≤2°C，三级协同精准送风让温差≤1°C，保障全空间舒适。

（二）对建筑能耗的影响

协同控制策略凭借其具备的一系列独特功能和所达成的多方面显著效果，对建筑能耗产生至关重要的影响，如在面对传统机械通风系统全年能耗维持在约210kWh/m²的情况下，通过该策略却能够将其成功降至150kWh/m²，实现降幅达28.6%的可观成绩，这其中，风机能耗下降幅度为35%、空气处理设备能耗下降20%，一级、二级、三级协同模式能耗分别是15、90、45kWh/m²；不仅如此，自然通风在协同控制策略的作用下，还可以对空调负荷进行有效削减，在夏季，二级协同模式中空调逐时冷负荷能够下降20%–25%，而在极端高温的条件下，三级协同新风处理负荷会下降15%；冬季时，二级协同模式的空调制热负荷下降18%–22%；从案例数据来看，传统系统全年通风与空调综合能耗高达450kWh/m²，经协同控制策略调整后降至320kWh/m²，降幅28.9%，具体到季节，夏季空调能耗下降30%、冬季下降25%。

四、结论

协同控制策略借助三级模式进行动态切换这一独特方式，从而达成对不同气候以及室内需求精准匹配之目的，实现热舒适与能耗之间的平衡；其中一级模式旨在满足温和气候下零能耗通风需求，使得PMV稳定处于-0.3–0.3这一区间，能耗仅仅只有传统系统的20%；二级模式主要用来弥补过渡季节自然通风所存在的缺陷，将PPD控制在8%–10%，能耗降低30%–40%；三级模式则能够保障极端气候环境下的稳定性，能耗下降15%–20%；不仅如此，该策略还从多个维度对室内热舒适进行改善，优化PMV–PPD指标，降低空气龄直至8–10s，提升温度均匀性至最大温差≤1.5°C，并对CO₂与PM2.5浓度加以有效控制；并且在能耗降低方面，该策略能够实现通风空调综合能耗降低28%以上，风机能耗下降35%，空调负荷削减20%–30%，为绿色低碳建筑通风优化开拓出一条具备可行性的路径。

参考文献

- [1] 黄杰超.绿色低碳建筑理念在高层建筑设计中的运用分析 [J].新城建科技, 2025, 34(02):37–39.
- [2] 刘晓宇.规划方案阶段建筑正向自然通风设计思路 [J].安徽建筑, 2025, 32(02):86–88.
- [3] 张振宇.绿色低碳建筑理念在高层建筑设计中运用分析 [J].智能建筑与智慧城市, 2024, (09):135–137.
- [4] 杨骞.浅谈我国发展绿色低碳建筑的意义及建议 [J].智慧城市, 2017, 3(01):273.
- [5] 余励飞.绿色低碳建筑全寿命周期技术经济评价方法与应用研究 [D].浙江工业大学, 2016.