

基于 GPC 融合 Adam 的 MIMO 变风量暖通空调 冷却侧节能控制方法

夏林锋^{1,2}, 彭大卫^{1,2}, 李志亮^{1,2}, 董安乐^{1,2}, 朱春会³

(1. 合肥通用机械研究院有限公司, 合肥 230031;

2. 合肥机电产品检测院有限公司, 合肥 230031;

3. 重庆美的通用制冷设备有限公司, 重庆 401336)

摘要: MIMO 系统在变风量暖通空调冷却侧表现为多个变量之间存在强耦合关系; 传统单变量控制难以处理多变量间的耦合效应, 可能导致调节一个变量时引发其他变量波动, 增加能耗或牺牲舒适度; 为保障变风量暖通空调的稳定运行, 提出基于广义预测控制 (GPC) 融合自适应矩估计 (Adam) 的多输入多输出 (MIMO) 变风量暖通空调冷却侧节能控制方法; 在 MIMO 系统中通过变风量条件下的机组参数拟合运算, 定义空调暖通回路与冷却回路之间的换热关系, 以求解空调冷却侧的实时能耗, 完成变风量暖通空调系统的冷却能耗计算; 基于 GPC 反馈校正机制, 设计线性控制器模型, 显式处理 MIMO 系统的耦合关系, 通过预测模型协调多变量调节, 避免单变量控制的冲突; 在此基础上, 根据 Adam 算法的收敛性原则, 实施对空调冷却参数的初始化运算, 从而在泛化处理冷却参数的同时, 补偿模型误差和工况变化, 维持解耦控制的有效性; 进而生成节能控制策略, 完成 MIMO 变风量暖通空调冷却侧节能控制; 实验结果表明, 所提方法能将暖通空调冷却侧的耗电量降低至 1 100 kWh, 且在温湿度恒定的情况下, 所获得的制冷效果相对较优。

关键词: GPC 控制器; Adam 算法; MIMO 系统; 变风量暖通空调; 空调冷却侧; 节能控制

Energy Saving Control Method for MIMO Variable Air Volume HVAC Cooling Side Integrating GPC and Adam

XIA Linfeng^{1,2}, PENG Dawei^{1,2}, LI Zhiliang^{1,2}, DONG Anle^{1,2}, ZHU Chunhui³

(1. Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd., Hefei 230031, China;

2. Hefei General Machinery & Electrical Products Inspection Institute Co., Ltd., Hefei 230031, China;

3. Chongqing Midea General Refrigeration Equipment Co., Ltd., Chongqing 401336, China)

Abstract: Multi input multiple output (MIMO) systems exhibit strong coupling relationships among multiple variables on the cooling side of variable air volume heating, ventilation and air condition (HVAC) systems. It is difficult for a traditional univariate control method to handle the coupling relationships between multiple variables, which may cause fluctuations in other variables when adjusting one variable, leading to an increased energy consumption, or compromised comfort. To ensure the stable operation of variable air volume HVAC systems, a MIMO energy-saving control method for the cooling side of variable air volume HVAC systems is proposed, which combines generalized predictive control (GPC) with adaptive moment estimation (Adam). By fitting the unit parameters under variable air volume conditions in MIMO systems, the heat transfer relationship between the HVAC circuit and the cooling circuit is defined to solve the real-time energy consumption on the cooling side of the air conditioning system and calculate the cooling energy consumption of the variable air volume HVAC system. Based on the GPC feedback correction mechanism, a linear controller model is designed to explicitly handle the coupling relationship of MIMO systems, regulate multiple variables through the predictive model, and avoid conflicts in univariate control. On this basis, according to the convergence principle of the Adam algorithm, the air conditioning cooling parameters are initialized to compensate for model errors and operating conditions changes while generalizing the cooling parameters, thereby maintaining the effectiveness of decoupling control. Further, energy-saving control strategies are generated

收稿日期:2025-09-03; 修回日期:2025-10-24。

作者简介:夏林锋(1986-),男,大学本科,工程师。

引用格式:夏林锋,彭大卫,李志亮,等. 基于 GPC 融合 Adam 的 MIMO 变风量暖通空调冷却侧节能控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(8): 156-164.

to achieve energy-saving control on the cooling side of MIMO variable air volume HVAC systems. Experimental results show that the proposed method can reduce the power consumption on the cooling side of the HVAC to 1 100 kWh, and achieves a better cooling performance under constant temperature and humidity conditions.

Keywords: GPC controller; Adam algorithm; MIMO system; variable air volume HVAC; air conditioning cooling side; energy saving control

0 引言

变风量空调系统通过对送风量的动态调节适应室内负荷变化,以保持稳定的送风温度,实现有效的节能与温度控制,核心组成结构包括变风量末端装置、空气处理机组、风管系统与自动控制系统。其中,变风量末端装置配备了控制器、传感器与风阀结构,能够根据室内温度的变化自动调节出风量。空气处理机组包括供热/冷侧盘管与变频风机,负责集中处理气体流动并动态调整空调总出风量^[1]。风管系统使用低速风道,能够在变工况环境下满足流动气体的组织需求。自动控制系统集成了末端通讯、压力监测以及具体的算法应用模块,支持定静压、变静压与实时风量控制策略。不同于其他类型的冷却管网,变风量空调系统的送风管与风口利用软管直接连接,且风口位置可以随着房间布局而调整。由于系统结构相对简单、故障率较低,所以后续维修与管理的工作量较少。

在变风量暖通空调系统中,MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)机制通过对风量、静压、温湿度等变量的协同控制,提升系统能效与动态响应能力^[2]。由于MIMO系统只能通过解耦运算才能将多变量问题分解为多个独立回路,所以必须采用精准的控制策略才能保证系统的协同作用能力。熊磊等人^[3]提出了利用改进麻雀搜索算法的节能控制方法,利用小样本参量估计呈正态分布且方差未知的总体数据的均值,再遵循轮盘赌规则使个体对象向最优群体学习,从而在增强算法跳出局部最优能力的同时,改进控制参数。虽在小样本条件下具有一定寻优能力,但在高负荷、多变量强耦合的MIMO系统中,易因参数遗留与局部收敛导致控制性能下降,难以适应动态变化的运行工况。杨秀等人^[4]提出了基于改进粒子群算法的优化控制算法,根据空调工作原理,针对各能耗设备构建数学模型,并以调节总能耗最小为目标,选取决策变量,再以能量守恒调节为约束,定义协同优化控制策略。虽以系统总能耗最小为目标进行决策变量选取,但由于模型复杂度较高,在多变量实时协调中易出现优化滞后与响应迟缓,导致控制精度不足。杨世忠等人^[5]提出了基于改进入侵杂草算法的控制技术,针对送风温度与冷却水阀之间的耦合关系进行系统性建模,再结合萤火虫群算法改进入侵杂草算法,实现对空调冷却侧能耗的控制。由于送风温度与冷却水阀之间的耦合关系较为复杂,简单的算法分析并不能实现

对空调能耗的有效控制。周璇等人^[6]提出了基于改进分层演员-评论者(H-AC, hierarchical actor-critic)算法的优化控制策略,采用H-AC算法优化空调系统运行参数,以解决多时间尺度下的优化问题,再基于智能体架构、网络更新等方式改进H-AC算法,以加快其收敛速度获得更好的控制效果。但在实际MIMO系统中,因算法收敛性与系统动态响应不匹配,易导致控制效果不稳定。贺宁等人^[7]针对VAV空调系统的大滞后、强耦合难点,提出了基于改进天牛群优化算法整定GPC(Generalized Predictive Control)多参数的方法,有效提升了单回路控制性能。然而,该方法的研究对象与控制设计主要集中于单一回路或简化系统,并未显式处理MIMO变风量空调冷却侧中多个变量间的动态耦合与协调问题。

为实现对空调冷却侧能耗的精准调节,设计基于GPC融合Adam(Adaptive Moment Estimation)的MIMO变风量暖通空调冷却侧节能控制方法。GPC结合反馈校正机制与滚动优化原则,对复杂动态系统进行多步预测,适用于具有非线性以及及时滞性的多变量耦合型系统^[8]。Adam综合均方根传播与动量梯度下降思想,通过对参数学习率的动态调整,完成对输入数据的高效训练^[9]。GPC与Adam的融合本质上是在工业过程控制中引入深度学习领域的自适应优化思想,并通过动态调整控制参数提升目标系统的响应速度与鲁棒性。

1 变风量暖通空调系统的冷却能耗计算

MIMO变风量暖通空调系统包含多个输入变量(如送风温度、送风量、冷却水流量等)和多个输出变量(如室内温度、湿度、冷却侧能耗等)。这些变量之间存在复杂的耦合关系,一个变量的变化会引起多个输出变量的改变,并且各变量之间的相互影响难以精确预测和控制。

为此,本文将从3个方面进行变风量暖通空调系统的冷却能耗计算。

1) 通过对机组冷却回路参数进行拟合,建立不同风量条件下冷水机组参数的变化模型^[10],从而能够根据实际的送风量准确计算冷水机组的能耗。

2) 使用侧和热源侧通过换热器能量交互,合理设置换热关系可准确描述能量传递并考虑两回路耦合,全面反映热量交换对冷却能耗的影响。

3) 基于实时能耗数据,节能控制系统可以根据当

前的运行状态和环境条件,动态调整控制策略,以实现实时的节能优化。

通过这 3 方面可使系统能根据实时工况精准调整运行参数,实现优化控制。具体计算内容如下:

1.1 变风量下的暖通空调冷却机组参数拟合

变风量是指暖通空调通过改变机组送风量来适应室内负荷的变化需求,同时保障空调送风温度始终处于恒定状态。末端风阀装置根据温度差值信号调整风阀开度,以改变空调送风量,再根据风管静压传感器所显示的实时压力示数,调节风机转速,达到变风量输入的目的。按照送风需求的不同,可将变风量分为定静压、变静压两种不同的控制环境。

1.1.1 定静压变风量下的参数拟合

定静压变风量环境是指暖通空调风道内某些节点或某一特定节点处的静态负荷压力保持恒定状态^[11]。冷却机组只需通过变频器就可以实现对风机出风量的调节。定静压变风量下的冷却机组参数拟合表示为:

$$C_1 = \beta \cdot \frac{1}{\chi} \cdot \eta \cdot \bar{v} \quad (1)$$

式中, β 为拟合系数, χ 为冷却机组一次线性回归函数; η 为变风量环境下的冷却塔的风机效率, $\bar{v}$ 为定静压负荷下的风机转速均值。

1.1.2 变静压变风量下的参数拟合

变静压变风量环境下,末端风阀长时间保持全开状态,冷却机组需要结合多个连续的定静压数值,才能够实现对风机出风量的调节。在明确末端风阀开度与变静压设定值的情况下,该模式的节能性优于定静压变风量环境。变静压变风量下的冷水机组参数拟合运算为:

$$C_2 = \beta \frac{1}{\chi} + \gamma b_0 \Delta T \quad (2)$$

式中, γ 为风阀开度, b_0 为变静压设定值, ΔT 为冷却机组使用侧进出水温差。变风量下拟合冷却机组参数,可以更好地掌握风阀、风道等空调系统组成部件与风机转速之间的数值关系,为暖通回路与冷却回路换热关系的定义提供数据参考。

1.2 暖通回路与冷却回路的换热关系设置

空调系统暖通回路与冷却回路之间的换热,主要依靠 MIMO 系统在变风量环境下完成空气与水在换热器之间的传热从而利用空气带走热量。暖通回路也叫使用侧回路,负责调节室内空气温度,主要通过空调送风系统将处理后的空气输送至各个区域。冷却回路也叫热源侧回路,主要以水、制冷剂及其他冷却介质吸收空调在变风量环境下所释放的热量,从而实现热量转移^[12]。暖通回路通过末端将室内热量进行转移,并在转移过程中完成降温处理,再由冷冻水将热量带至制冷机组的蒸发器结构之中,最终通过冷却回路将室内热量排放至室

外。考虑定静压变风量下的参数拟合关系,可将暖通回路与冷却回路之间的换热关系如式(3)所示:

$$B = \phi_{\min} \cdot C_1 (T_1 - T_3) \quad (3)$$

式中,换热系数 ϕ 可由公式(4)求得:

$$\phi = \frac{1 - |c_1 - c_2|^{(1-\epsilon)}}{1 - \epsilon(c_1 + c_2)^{(1-\epsilon)}} \cdot C_1 \quad (4)$$

式中, $b_{\min}$ 表示空调系统冷却水热容与饱和湿空气热容中的最小值, T_1 为暖通回路侧的温度, T_3 为空气湿球温度, c_1 表示空调系统暖通回路的换热单元数, c_2 为冷却回路的换热单元数, ϵ 为热容率。当暖通回路的输出风量发生变化时,末端支路中的实时换热量也会随之变化,此时冷却回路需要动态调整冷冻水的输出流量才能够维持暖通回路出水温度的恒定状态。当前情况下,在计算换热系数 ϕ 时空调系统需要通过对平衡阀的调节才能够确保冷却水流的合理分配。

1.3 空调冷却侧的实时能耗求解

暖通空调冷却侧的实时能耗是指冷却回路运行过程中直接或间接消耗的电能,涉及冷却水循环、冷却塔风机运转、制冷机组压缩机运转 3 个行为过程。

1.3.1 冷却水循环能耗

冷却水循环能耗驱动冷却水在制冷机组冷凝器所在的回路与冷却塔所在回路之间循环。根据制冷需求的不同,可将制冷机组冷凝器释放的热量完全或部分输送至冷却塔。对于冷却水循环能耗的计算如式(5)所示:

$$N_1 = \frac{m}{\tau} \cdot B (P_1 + P_2) \quad (5)$$

式中, m 为冷却水泵实时转速, τ 为冷却负荷周期, P_1 为空调暖通回路的额定功率, P_2 为空调冷却回路的额定功率。

1.3.2 冷却塔风机运转能耗

冷却塔风机通过强制通风促进冷却水与冷水机组冷凝器之间的热交换,以降低冷却回路的进水温度^[13]。对于冷却塔风机运转能耗的计算如式(6)所示:

$$N_2 = \phi \cdot V \cdot \tau \cdot B \quad (6)$$

式中, ϕ 为通风量, V 为风机的实际送风量。

1.3.3 制冷机组压缩机运转能耗

制冷机组压缩机提供制冷剂的压缩作用,将低温低压制冷剂压缩成高温高压的气体。对于制冷机组压缩机运转能耗的计算如式(7)所示:

$$N_3 = \frac{1}{B} (p \cdot \tau) \cdot M \quad (7)$$

式中, p 为制冷机组压缩机的瞬时功率, M 为压缩机排气压力。

联立公式(5)~(7),推导空调冷却侧实时能耗的计算式为:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (8)$$

基于空调冷却侧的实时能耗可以准确描述暖通回路

与冷却回路之间的换热关系, 从而使冷却侧节能控制的效果得到保障。

2 基于 GPC 融合 Adam 的空调冷却侧节能控制

变风量暖通空调系统运行环境复杂多变, 不同的季节、天气条件以及建筑使用功能的变化都会对系统的能耗产生影响。能耗计算后如果没有相应的优化机制, 系统就无法根据这些变化自动调整运行参数, 以实现最佳的节能效果。GPC 作为一种先进的预测控制算法, 能够很好地处理多变量之间的耦合关系。它通过对系统未来行为的预测, 提前调整控制输入, 以实现系统的优化运行。在 GPC 控制中, 需要确定一系列的控制参数, 如预测时域、控制时域、权重系数等, 这些参数的选择直接影响控制效果。Adam 优化算法是一种高效的自适应优化算法, 能够快速搜索到最优的控制参数组合。它将动量梯度下降法和自适应学习率调整方法相结合, 根据历史梯度信息自适应地调整学习率, 加快收敛速度, 提高优化效率。因此, 利用 GPC 处理系统的多变量耦合与动态预测问题, 同时引入 Adam 算法在线优化 GPC 控制器自身的关键参数, 以自适应变化的工况, 最终生成高效的节能控制策略。

2.1 线性 GPC 能耗控制

在 MIMO 变风量暖通空调系统中, GPC 算法的反馈校正机制将系统预测输出作为额定值、将实际输出作为目标值。通过对比额定值与目标值形成误差信号, 再利用该误差动态修正未来的系统输入, 从而提升空调系统对输入扰动和参数不确定性的适应能力^[14]。GPC 反馈校正机制的定义基于预测—反馈—修正闭环定义控制逻辑, 如果将空调系统实时冷却能耗作为输入, 通过自回归积分滑动平均运算, 可以直接预测校正后的输出序列^[15]。

为实现对冷却侧能耗的精准控制, 需首先确定 GPC 控制器的核心参数, 包括预测时域 N_y 、控制时域 N_u 和控制加权系数 κ_o 。预测时域 N_y 的选取需覆盖系统的主要动态响应过程, 结合暖通空调系统的惯性特性, 本文将其设定为 15; 控制时域 N_u 反映了控制增量的未来调节步数, 为平衡控制自由度与计算复杂度, 本文取 $N_u=5$; 控制加权系数 κ 用于约束控制动作的剧烈程度, 为防止执行器频繁动作并兼顾系统响应速度, 经初步仿真分析, 设定 $\kappa=0.1$ 。在每个采样时刻 t , 该机制将系统的预测输出 $\hat{y}(t+j|t)$ 作为期望轨迹的参考, 并与系统的实际输出 $y(t)$ 进行比较, 生成预测误差 $e(t) = y(t) - \hat{y}(t|t-1)$ 。本文采用一阶指数滤波方式对该误差信号进行处理, 即:

$$e_f(t) = \beta \cdot e(t) + (1 - \beta) \cdot e_f(t-1) \quad (9)$$

其中: β 为滤波系数, 以此平滑随机扰动带来的高

频波动。经过滤波的误差 $e_f(t)$ 被用于修正基于模型的预测输出序列, 从而形成闭环预测, 增强控制器对模型失配和未知扰动的适应能力。

规定 $a(N)$ 表示空调系统冷却能耗的控制输入, ϵ 表示误差动态修正, $\bar{s}$ 表示自回归积分滑动运算的平均加权参数, $d(N)$ 表示空调系统冷却能耗的输入扰动。基于公式 (11) 推导 GPC 反馈校正机制, 如公式 (10) 所示:

$$A = \epsilon \cdot a(N) \cdot \bar{s} + d(N) \quad (10)$$

$d(N)$ 的取值符合 $d(N) = A - \hat{A}$ 的数学运算条件 (A 表示模型输入为空调系统冷却能耗时的 GPC 机制预测输出)。GPC 机制对冷却能耗的反馈校正采用直接修正模式, 即将误差参量直接叠加到当前输入中, 形成具有补偿作用的反馈控制对象, 再通过对目标控制对象的递推运算, 更新 GPC 模型参数, 从而使节能控制更符合 MIMO 变风量暖通空调系统冷却侧的实时能耗情况。

GPC 算法线性控制主要基于自回归积分滑动平均模型, 在反馈校正机制原则的基础上, 通过对空调系统冷却能耗输入的滚动优化, 判定输出序列中动态参量的线性关系。对于线性 GPC 能耗控制器控制原理如图 1 所示。

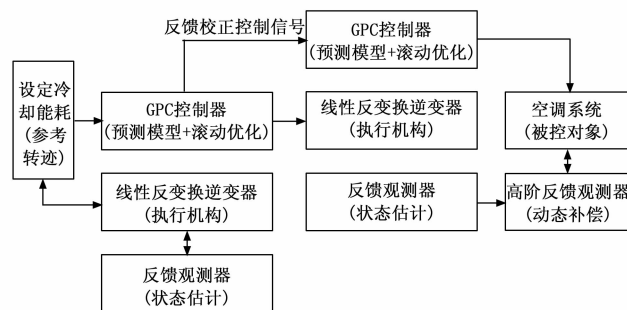


图 1 线性 GPC 能耗控制器控制原理

反馈校正机制规定, GPC 控制器在每个采样时刻都只能针对当前输入与目标信号之间的误差关系, 优化下一步的控制输出^[16]。当采样周期发展到下一时刻时, GPC 控制器对空调系统的冷却能耗输入进行重新优化。因此, 实时比较模型输入与预测输入, 并在修正误差后进行连续预测, 才能实现 GPC 模型对暖通空调冷却侧节能的闭环控制^[17]。在公式 (10) 的基础上, 可将 GPC 算法的线性控制过程表示为:

$$S = \lambda(A^{-1})z(g-1) + \frac{A}{o} \quad (11)$$

式中, λ 为线性差分算子, z 表示 GPC 能耗控制器的线性反变换, g 表示 GPC 模型的预测输入, o 表示当前时刻 GPC 模型对冷却能耗输入的优化。线性 GPC 控制器模型通过反馈校正补偿冷却能耗输入的误差和扰动, 能

够适应 MIMO 变风量暖通空调系统的时变特性。

2.2 基于 Adam 算法的冷却侧能耗收敛性计算

MIMO 变风量暖通空调冷却侧节能控制中, Adam 算法通过对能耗输入学习率与动量参数的动态调整, 实现收敛性分析, 从而获得稳定的运算结果。Adam 算法的收敛性可以通过后悔界分析的方式进行运算, 即目标预测对象与最优参数差之间的数值累计和^[18]。在空调冷却侧节能的凸优化问题中, 若满足目标函数梯度有界、学习率随时间递减的规律, 则表明冷却侧能耗输入的平均损失会随着迭代次数增加而逐渐趋于最优数值解。由于空调冷却侧能耗受到环境温度波动的直接影响, 所以在进行 Adam 算法收敛性运算时, 目标输入函数会表现出动态变化状态^[19]。设定梯度界 $V=0.01$, 学习率 α_t 用指数衰减策略, 初始值为 10^{-3} , 衰减率为 0.95; 动量参数 $\beta_1=0.9$, 二阶矩估计参数 $\beta_2=0.999$, 正则化项 $\lambda=10^{-4}$ 。上述参数设置参考了 Adam 在工业控制中的典型配置, 并结合 MIMO 变风量系统的动态特性进行了初步仿真调优, 以确保在保证收敛速度的同时避免震荡。基于公式 (11), 设 v 表示输入函数的梯度界, f 表示函数学习率, h 表示最优参数差, o 表示目标函数的正则化项, F 表示动量参数, H 表示收敛性超参数, 联立冷却侧能耗输入函数 $a(N)$, 可将 Adam 算法对冷却侧能耗的收敛性分析描述为:

$$D = (1 - v) \cdot \alpha(N) \cdot \left\{ \left\| \frac{[f(h^o)]}{\sqrt{F^{v-1} + H}} \right\|^2 \right\} \quad (12)$$

为验证 Adam 算法的收敛性能, 绘制了迭代次数与损失函数值的关系曲线如图 2 所示。

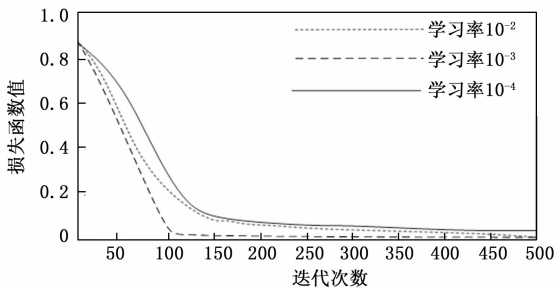


图 2 迭代次数—损失函数曲线

如图 2 所示, 在设定的参数下, 算法在约 100 次迭代后趋于稳定, 损失函数值由初始的 0.85 下降至 0.12 以下, 表明算法具有良好的收敛性。此外, 对比不同学习率下的收敛曲线发现, 10^{-3} 的学习率在收敛速度与稳定性之间取得了最佳平衡。

若 MIMO 变风量暖通空调系统冷却侧节能控制参数保持为离散值, 则其理想化梯度可能呈现稀疏状态。利用 Adam 算法进行收敛性分析, 可以避免控制参数出现过大更新, 提升了节能控制的稳定性。

2.3 融合 GPC 与 Adam 空调冷却参数初始化

参数初始化是控制算法有效启动和快速收敛的关键。本文方法需初始化的核心参数包括控制器的初始控制量以及 Adam 优化器的内部状态。基于空调系统在设计工况下的额定值, 结合实时冷却负荷需求, 设定控制量的初始基准。例如, 冷却水泵频率初始值设定为对应 70% 负荷率的频率值, 冷却塔风机转速则根据当前湿球温度设定为额定转速的 60%。这确保了算法从一个接近实际工作点的、合理的初始状态启动。Adam 优化器的动量项和自适应学习率项均初始化为零向量, 旨在初始阶段保持参数更新的无偏性。

将 MIMO 变风量暖通空调系统的冷却侧能耗作为被控对象, GPC 算法在控制目标对象的过程中, 针对其受控情况构建自回归积分滑动平均模型, 再通过反馈校正, 实现鲁棒控制。Adam 算法结合动量与自适应学习率动态更新与被控对象相关的控制参数, 以定义平稳的函数运算式。为克服因模型失配或工况突变导致的初始参数偏差问题, 设计了 GPC 与 Adam 的融合校正机制。GPC 算法通过其反馈校正机制实时产生控制增量, 以补偿控制偏差。Adam 算法则根据目标函数的梯度信息, 动态地优化 GPC 控制器自身的柔化系数和控制加权系数等关键内部参数。对控制冷却侧能耗所需的柔化系数进行针对性求解, 从而增强控制作用机制对空调系统复杂工况的适应性^[20]。规定 μ 表示被控对象的时变干扰参数, ϑ 表示相变干扰参数, 且 $\mu \neq \vartheta \neq 0$ 的不等式取值条件恒成立, j_μ 表示基于时变干扰参数的补偿系数, j_ϑ 表示基于相变干扰参数的补偿系数, 联立公式 (11)、(12), 可将融合 GPC 与 Adam 空调冷却参数初始化运算表示为:

$$J = j_\mu j_\vartheta - SD \cdot \frac{a(N)}{\sqrt{\mu^2 + \vartheta^2}} \quad (13)$$

融合运算充分利用了 Adam 算法对被控对象的更新能力以及 GPC 算法对目标输入的校正能力, 通过对 MIMO 变风量暖通空调冷却侧节能控制所需动态物理量的连续运算, 提升算法机制对空调系统动态运行规律的适应性^[21]。

2.4 冷却参数泛化处理

暖通空调系统需要应对不同负载、环境温度等场景^[22], 所以在泛化处理冷却参数时, 应以提升控制方法的跨工况适应性为目标定义具体的运算标准。而硬约束直接限定了关键执行机构的安全与物理运行范围, 其取值依据设备厂家技术手册与行业设计标准确定, 具体包括:

冷却水泵频率下限为 25 Hz, 保障最小流量, 上限为 50 Hz, 不超过电机额定功率。冷却塔风机转速下限 $30\% \times \text{额定}$ $30\% \text{ 额定}$ 保证基本通风, 上限 $100\% \text{ 额定}$ 。

压缩机运行频率范围 30~60 Hz。

空调系统的运行可能面对非线性干扰、时变延迟等不确定性因素, 所以融合 GPC 与 Adam 算法的参数泛化运算还应针对节能控制需求考虑相关的自适应性问题。在实际求解过程中, 泛化运算涉及硬约束、软约束两方面内容。其中, 硬约束是指直接限制与空调冷却运行相关的影响参数的取值范围; 软约束是指在 GPC 与 Adam 算法的结合函数中加入惩罚项, 以引导冷却参数趋近合理区间^[23]。软约束则通过在 GPC 与 Adam 的结合函数中加入惩罚项 $\theta(u)$, 以引导控制参数趋近于能效更优或更稳定的区间, 避免硬性截断导致的控制量突变。惩罚项设计为二次型形式为:

$$\theta(u) = \rho \cdot (u - u_r)^2 \tag{14}$$

其中: u_r 为期望的参数参考值; ρ 为惩罚系数, 通过离线仿真, 分析不同 ρ 取值下系统能效与控制平稳性的权衡曲线, 然后选取能使综合性能指标最优的 ρ 值作为初值。在在线运行阶段, 该惩罚项被纳入 Adam 算法优化的目标函数中, 使得参数在泛化过程中不仅满足动态控制要求, 还能自动朝向节能、平稳的运行区域调整。推导空调系统冷却参数的泛化运算为:

$$K = \sum_{\theta=1}^{+\infty} (\theta J - l_{\theta}) + \omega k_{\theta}^2 \tag{15}$$

式中, l_{θ} 表示基于惩罚项所设定的冷却侧压缩机频率, ω 为损失函数, k_{θ} 为非线性干扰。通过对冷却参数的泛化处理, 不但减少了 GPC 算法与 Adam 算法对能耗输入数据的依赖, 还通过改变惩罚项取值适应系统运行工况的多样性, 在 MIMO 变风量暖通空调冷却侧节能控制中, 有利于提升函数模型的适应能力, 从而使控制效果得到保障。

2.5 空调冷却侧节能控制策略生成

对于 MIMO 变风量暖通空调而言, 其冷却水流量与冷却侧机组能耗呈立方关系, 基于泛化运算标准, 对机组进行变频调速可以达到节能控制的目的。由于冷却水循环供应会对机组冷凝压力恒定状态造成影响, 所以在实施变频调速时, 应以避免水流量过剩作为控制目标。

设定冷却侧机组冷凝压力定值, 根据实际冷却水流量调节机组变频速度^[24]。再在确保空调系统实时能耗稳定的前提下, 合理调整循环冷却水系统中不同部分水流的分配平衡关系, 实现对暖通空调冷却侧的有效节能控制^[25]。

设 r 为恒定的冷却机组水压差, q_r 表示冷凝压力为定值时的机组变频速度, R 表示空调冷却侧机组的变频速度参量, ω 表示冷却水系统中不同部分水流的分配平衡关系, e 为机组负载分配, i 为立方控制参数, 联立公式 (15), 推导空调冷却侧节能控制的定义式如下:

$$E = \omega \left[\frac{1}{\sum_{r=1}^{+\infty} R q_r} \right] \times K \times (e + 1)^{-+} \tag{16}$$

基于 GPC 融合 Adam 的 MIMO 变风量暖通空调冷却侧节能控制方法, 充分融合了广义预测控制的反馈校正原则与自适应矩估计优化算法的不确定性特征, 不但解决了空调系统冷却能耗输出过程中可能出现的时变性问题, 也通过耦合运算的方式, 抑制了能耗输出的波动性变化, 实现了冷却侧的高效节能运行。

3 实验分析与结果

为验证基于 GPC 融合 Adam 的 MIMO 变风量暖通空调冷却侧节能控制方法的有效性, 以变风量暖通空调为原型, 其结构如图 3 所示。

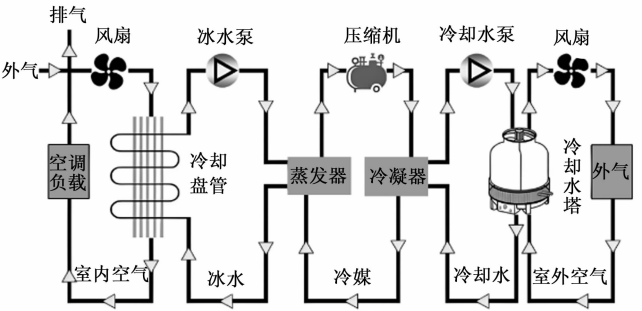


图 3 变风量空调系统运行原理

在图 3 所示的变风量空调系统中, 整个系统通过空气循环和水循环的协同工作, 实现对室内空气温度、湿度和品质的控制。同时, 变风量特性使得系统能够根据实际需求灵活调节风量, 达到节能运行的目的。

实验过程中, 相关实验仪器的设置及其具体型号如表 1 所示。

表 1 实验仪器参数及型号

仪器名称	仪器型号	性能参数
温湿度仪表	GH/WS-A1	精度: $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 H : $\pm 3\text{ \%RH}$; 量程 T : $0\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 H : $0\sim 100\text{ \%}$
电表	DDZY666	0.5 级精度, 在 $1\text{ \%}\sim 120\text{ \%}$ 额定电流内保持误差标准
冷量表	JN-2100RLB	$4\sim 95\text{ }^{\circ}\text{C}$, 准确度 2 级

实验步骤:

- 1) 系统初始化与参数配置。启动变风量暖通空调实验系统, 进行冷却能耗的实时计算。配置 GPC 控制器与 Adam 优化算法的核心参数。
- 2) 数据采集与模型输入。在每个采样时刻, 系统采集送风温度、送风量、冷却水流量、室内温湿度等变量数据, 并输入至已建立的冷却能耗计算模型中, 求解得到实时冷却侧能耗值。
- 3) GPC 滚动优化与反馈校正。以实时冷却能耗作

为输入，运行 GPC 控制器。控制器根据设定的预测时域和控制时域，对未来系统行为进行多步预测，并基于反馈校正机制对预测输出进行修正，生成初步的控制指令。

4) Adam 参数自适应优化。将 GPC 控制器的性能指标作为目标函数，利用 Adam 算法动态优化 GPC 控制器的内部参数，以补偿模型误差并适应工况变化。

5) 控制策略生成与执行。综合 GPC 的优化输出与 Adam 的参数调整结果，结合参数泛化处理中的硬约束与软约束，生成最终的节能控制策略，并下发给执行器，完成一个控制周期。

6) 循环执行。重复步骤 2) ~5)，实现闭环的在线滚动优化控制。参数设置如表 2 所示。

表 2 参数设置

参数类别	参数名称	取值/范围
GPC 控制器	预测时域	15
	控制时域	5
	控制加权系数	0.1
	误差滤波系数	0.9
Adam 优化器	初始学习率	10^{-3}
	学习率衰减率	0.95
	动量参数	0.9
	二阶矩估计参数	0.999
	正则化项	10^{-8}
系统与约束	冷却水泵频率	[25,50]Hz
	冷却塔风机转速	[30%,100%]额定
	惩罚系数	0.05

保持室内负荷恒定，并持续运行 2 h 后，分析实验空调由 0 达到满负荷运行状态过程中，其出风温度的变化情况，如图 4 所示。

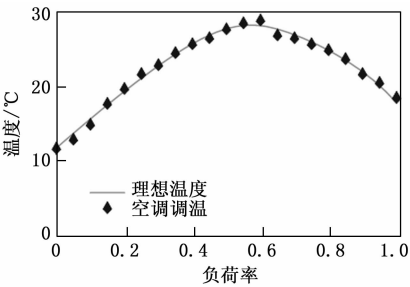


图 4 末端调温状态与理想温度的关系

对于理想温度曲线的描述：空调负荷率达到 0.4 之前，末端出风温度始终表现出不断增大的变化趋势，且平均增幅较大。这是因为在负荷率较低时，冷水机组制冷量相对较小，随着负荷率逐渐增加，冷水机组需要一定时间调整制冷量输出，而末端送风系统在初始阶段可能因制冷量供应的动态变化，导致出风温度逐渐上升；空调负荷率在 0.4~0.6 之间时，末端出风温度依然不

断增大，直至取得最大值 29℃，但平均增幅明显减小。这是由于随着负荷率进一步增加，冷水机组的制冷量调节逐渐接近满足末端负荷需求的状态，温度上升速度减缓；后续实验过程中，出风温度持续下降，但依然高于开始实验时的出风温度。这是因为当负荷率达到一定程度后，冷水机组制冷量可能超过末端当前实际需求，使得出风温度有所回落，但仍高于初始状态。

实验过程中，空调调温曲线与理想温度曲线保持高度符合状态，表示实验调温情况极为接近理想温度负荷标准，所得实验结果的准确性相对较高。

在冷却塔不存在故障的情况下，动态调整冷冻水流量，使得冷却侧的供回水温差波动范围保持在±0.5℃内，以避免因温度波动而影响实验结果的准确性。

本次研究基于 GPC 融合 Adam 的 MIMO 变风量暖通空调冷却侧节能控制方法（方法 1）、利用改进麻雀搜索算法的节能控制方法（方法 2）、基于改进粒子群算法的优化控制算法（方法 3）设计实验，通过分析冷却侧实时耗电量以及恒定温湿度下的制冷效果确定所研究方法的控制作用强度。

方法 2：利用改进麻雀搜索算法的节能控制方法。该方法依据文献 [3] 实现，其通过正态分布估计与小样本学习机制增强算法在参数优化中的局部搜索能力，并采用轮盘赌规则使个体向最优群体学习，以提升跳出局部最优的能力。选取该方法作为对比，旨在验证本文方法在处理高维强耦合 MIMO 系统时，相较于这类基于群体智能改进的算法，在避免局部最优和参数遗留问题方面的优势。

方法 3：基于改进粒子群算法的优化控制算法。该方法依据文献 [4] 实现，其以空调系统总能耗最小为目标构建各能耗设备的数学模型，并基于能量守恒约束选取决策变量，定义协同优化策略。选取该方法作为对比，旨在验证本文方法在面对复杂动态工况时，相较于这类虽然全局寻优能力强但模型复杂、实时性相对较差的算法，在动态响应速度与控制精度方面的优越性。

暖通空调冷却侧耗电量的具体实验情况如图 5 所示。

分析图 5 可知，基于方法 1 所得实验曲线表示空调冷却侧耗电量在一段时间的增长趋势后，开始逐渐趋于稳定，其最大值约为 1 100 kWh，从时间配比的角度来看，能耗增长部分的时间占比约为 45%、能耗稳定部分的时间占比约为 55%，明显稳定能耗部分在耗电曲线中更为突出。方法 2、方法 3 实验曲线的增幅趋势与方法 1 较为类似，这两组曲线的最大值明显高于方法 1，但能耗稳定部分的时间占比却不及方法 1。综上所述可知，在冷却侧实时耗电控制方面，方法 1 的应用性能更突出。

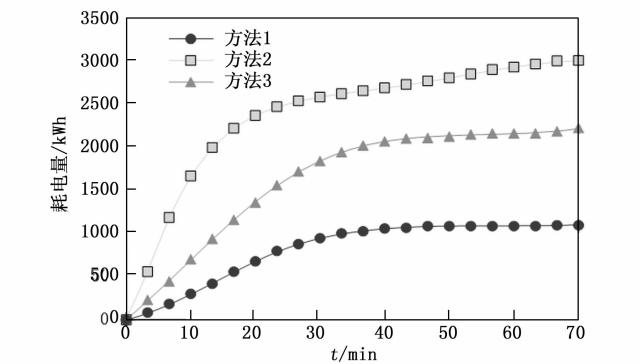


图 5 暖通空调冷却侧的实时耗电实验

为量化评估不同控制方法的节能效果与运行稳定性,对图 5 所示的暖通空调冷却侧实时耗电实验数据进行统计分析。本实验选取平均耗电量作为能效水平的核心指标,耗电量标准差作为系统运行稳定性的评价指标,并计算了以方法 1 为基准的相对节能率。统计结果如表 3 所示。

表 3 不同控制方法下冷却侧耗电量统计分析

控制方法	平均耗电量/kWh	耗电量标准差/kWh
1	892.5	45.2
2	1 056.8	68.7
3	1 183.4	92.1

如表 3 所示,方法 1 在平均耗电量与耗电量标准差两项指标上均显著优于对比方法。其平均能耗最低 892.5 kWh,分别比方法 2 和方法 3 降低了 15.5% 和 24.6%,体现了突出的节能优势。同时,方法 1 的耗电量标准差最小 45.2 kWh,表明其控制过程最为平稳,能有效抑制系统波动,这与 GPC 算法良好的动态响应特性及 Adam 算法对控制参数的自适应整定密切相关。对比方法因其在解耦能力与工况适应性上的不足,导致了更高的平均能耗与运行波动。

在不考虑其他影响因素时,进入冷却塔之前、从主机出来的较高温度的冷却侧进水与经过冷却塔散热后、回到主机的温度相对较低的冷却侧出水二者差值越大,意味着冷却塔散热效果越好。由此,以湿度 50%、温度 17.3℃ 为标准,设定空调温湿度恒定状态,并对冷却侧进水、出水进行取样,以测定其具体的温度水平。对于恒定温湿度下空调制冷效果的实验如图 6 所示。

分析图 6 可知,恒定温湿度下空调冷却侧进水温度的差值并不明显,3 组数值极为接近,最多极值差不超过 2℃。但方法 3 组的出水温度相对较高,平均值接近 9.3℃;方法 2 组的出水温度小于方法 3,其平均值为 8℃,且在实验过程中没有表现出波动状态;方法 1 组的出水温度相对较低,最大值没有达到 8℃,最小值也

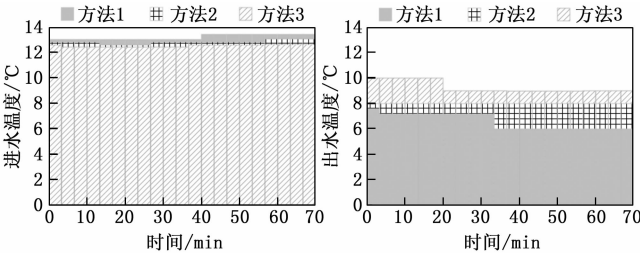


图 6 空调制冷效果实验

仅为 6℃,均值为 6.5℃。综上可知,在恒定温湿度实验环境下,方法 1 冷却侧进、出水温度的差值水平更高,表示该方法控制下空调的制冷效果更好。根据制冷原理,温差 ΔT 与系统制冷量 Q 及冷却水流量 G 满足关系: $Q = c \cdot C \cdot G \cdot \Delta T$,其中 c 为水的比热容。在冷却水流量相对稳定的条件下, ΔT 与制冷量 Q 呈正相关。因此,方法 1 组更低的出水温度及更大的进出水温差,直接证明了其在相同条件下能够转移更多的热量,即制冷效果更优。这一优势源于本文方法对冷却侧参数更为精准和协同的控制,通过 GPC 与 Adam 的融合优化,提升了换热器的整体换热效率,从而使冷却塔能在更低的出水温度下稳定运行。

为了验证所提方法在实际运行的复杂工况下的综合性能,设计了变负荷与变室外温度的联合实验场景。该实验模拟了夏季某日办公建筑的典型负荷变化:在实验起始阶段,设定室内负荷率为 40%,室外干球温度为 30℃;在中期,负荷率线性增至 100%,室外温度升至 35℃;在末期,负荷率回落至 60%,室外温度降至 32℃。选取系统总耗电量(kWh)作为能效指标,室内温度平均绝对误差(℃)作为舒适度指标,控制指令平均变化率(Hz/s)作为系统稳定性与设备磨损指标。各方法在该复杂场景下的性能对比如表 4 所示。

表 4 不同方法在该复杂场景下的性能对比

性能指标	方法 1	方法 2	方法 3
系统总耗电量/kWh	1 058	1 285	1 396
室内温度平均绝对误差/℃	0.28	0.45	0.51
控制指令平均变化率/(Hz/s)	0.15	0.33	0.41

如表 4 所示,在模拟真实环境的复杂动态场景下,方法 1 在能效、舒适度与系统稳定性 3 个维度上均展现出显著优势。在能效方面,方法 1 的系统总耗电量远低于方法 2 与方法 3,这是因为 GPC 算法对多变量耦合关系的显式处理与 Adam 算法对控制参数的自适应整定,使得系统在负荷与温度变化时能快速、协同地调整风量、水流量等参数,始终逼近最优能效点运行。在舒适度方面,方法 1 维持了最低的室内温度平均绝对误差,这得益于 GPC 的多步预测与反馈校正机制,能够提前

应对系统惯性,有效抑制了过调和波动。在系统稳定性方面,方法 1 的控制指令平均变化率最低,表明其控制动作更为平滑,这有利于减少执行机构的机械磨损并延长设备寿命,而对比方法由于解耦不充分和参数整定僵化,导致了更频繁和剧烈的控制动作。

4 结束语

为提升复杂空调系统运行稳定性、优化系统能效,本文提出的基于 GPC 融合 Adam 的 MIMO 变风量暖通空调系统冷却侧节能控制方法。实验结果表明,实验调温情况接近理想温度负荷标准,结果准确性较高。在冷却侧实时耗电控制方面,所提方法空调冷却侧耗电量在增长后趋于稳定,稳定能耗部分占比突出,应用性能更优;在恒定温湿度制冷效果上,所提方法冷却侧进、出水温度差值水平更高,制冷效果更好。综上,所提方法在变风量暖通空调系统冷却侧节能控制中表现更为出色。

未来,随着智慧化城市建设以及“双碳”目标的深入推进,对空调系统的能耗调节与节能控制将进一步融合深度学习算法、数字孪生等技术,一方面实现空调系统由“节能”到“减碳”的转型,另一方面保障区域性能源网络的动态平衡。

参考文献:

- [1] 赵乙凡,李 威,姜昌伟. 基于群体热感觉和区域占用率的多区域变风量空调系统优化控制方法 [J]. 暖通空调, 2024, 54 (2): 98-106.
- [2] 胡安中,黄丽君. 一比特 sigma-delta 调制全数字大规模 MIMO 系统的遍历可达频谱效率分析 [J]. 电信科学, 2025, 41 (2): 120-128.
- [3] 熊 磊,苗雨润,范新舟,等. 一种利用改进麻雀搜索算法的中央空调系统节能控制方法 [J]. 上海交通大学学报, 2023, 57 (4): 495-504.
- [4] 杨 秀,刘欣雨,孙改平,等. 基于改进粒子群算法的中央空调系统节能优化控制 [J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38 (3): 65-75.
- [5] 杨世忠,逢 铎. 基于改进入侵杂草算法的空调送风温度控制 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2023, 42 (2): 250-256.
- [6] 周 璇,莫浩华,闫军威. 基于改进 H-AC 算法的冷源系统节能优化控制策略 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2025, 53 (1): 21-31.
- [7] 贺 宁,李俊辰,李 尚,等. 基于改进 BSO 算法的 VAV 空调系统 GPC 参数整定 [J]. 控制工程, 2024, 31 (6): 1114-1122.
- [8] 秦兆博,侯嘉晖,李致远,等. 基于混合 LQR/H ∞ 与 GPC 的深海集矿车内外环控制 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2025, 52 (6): 24-35.
- [9] 吴青云,高景辉,李 昭,等. 基于 Adam 优化卷积神经网络的火电厂大数据平台预警模型测试与应用 [J]. 科学与技术, 2023, 23 (35): 15075-15083.
- [10] 杨世忠,逢 铎,李善伟. 基于改进 GSO-BPNN 的变风量空调冷却水控制 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (6): 319-324.
- [11] 杨进学. 亚洲金融大厦标准办公单元变风量空调系统自控策略分析 [J]. 暖通空调, 2022, 52 (1): 126-131.
- [12] 成 简,陶乐仁,李 猛,等. R410A 在光管及强化管管外冷凝换热的数值研究 [J]. 热能动力工程, 2024, 39 (5): 86-92.
- [13] 宋金时,钟 平,梁 强,等. 带有机力通风冷却塔的机组冷端优化研究 [J]. 热能动力工程, 2022, 37 (2): 116-121.
- [14] 贺 宁,李俊辰,李 尚,等. 基于改进 BSO 算法的 VAV 空调系统 GPC 参数整定 [J]. 控制工程, 2024, 31 (6): 1114-1122.
- [15] 杜子学,蒋大卫,吴 晶. 跨座式单轨车载空调系统故障时间序列预测方法研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (3): 130-135.
- [16] 谢浩然,胡纯福,卢 萌,等. 基于级联线性-非线性自抗扰控制器的永磁直线同步电机速度控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44 (15): 6158-6169.
- [17] 王 涛,傅铮翔,俞鹏先,等. 基于 TMS320F28335 的多通道互联控制器设计 [J]. 电子设计工程, 2024, 32 (6): 6-10.
- [18] 王子豪,龙 烨,仇 轲,等. 基于 Adam 算法的光学相控阵输出光束校准方法 [J]. 物理学报, 2024, 73 (9): 117-125.
- [19] 李 博,郭星燃,李娟莉,等. 基于 LSTM-Adam 的刮板输送机链传动系统故障预警方法 [J]. 工矿自动化, 2023, 49 (9): 140-146.
- [20] 孔祥书,郑文刚,张 馨,等. 基于数据-物理混合模型的菇房空调节能控制方法 [J]. 农业工程学报, 2025, 41 (4): 309-317.
- [21] 丁震萍,杜震宇,华 靖,等. 逆流式露点蒸发冷却器的参数分析及结构优化 [J]. 太原理工大学学报, 2023, 54 (2): 375-383.
- [22] 罗吴敏,刘 伟,张洁雄,等. 建筑暖通空调冷水温度节能控制方法设计 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (8): 286-290.
- [23] 席瑞翎,季 亮,姜恩宇,等. 基于参数自修正的配电网故障定位数字孪生技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52 (11): 11-20.
- [24] 方 志,梁彩华,白 曦. 基于末端调节信号的空调冷冻水变流量运行策略 [J]. 建筑科学, 2023, 39 (6): 189-196.
- [25] 张 政,房安之,赵晓冬,等. 分离式辐射制冷-空调混合制冷系统的节能效果研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2024, 54 (6): 1561-1566.