

文章编号: 1671-6612 (2025) 03-431-08

基于 IGWO 的医院空调节能控制方法

章晓光

(浙江大学医学院附属儿童医院 杭州 310000)

【摘要】 研究旨在优化医院空调制冷系统,降低能耗并提高能效。研究通过建立空调制冷系统数学模型,分析了制冷机组、冷冻水泵、冷却水泵和冷却塔风机的能耗特性及其相互依赖关系。采用改进的灰狼优化(IGWO)算法,解决了系统中连续与离散变量耦合的优化问题。实验结果表明,IGWO 算法在多目标优化问题中表现出色,相较于其他算法,能更有效地降低系统总能耗。在实际应用中,通过优化控制策略,实现了平均节能率 10.07%至 15.80%,其中冷却塔风机节能效果最为显著,达到平均 15%的节能率。实验结果验证了所提方法的有效性和实用性,该方法为医院空调制冷系统的节能改造提供了一定的理论依据。

【关键词】 医院空调; 制冷系统; 灰狼优化; 控制策略; 能耗

中图分类号 TP393 文献标志码 A

Energy Saving Control Method for Hospital Air Conditioning Based on IGWO

Zhang Xiaoguang

(Children's Hospital Affiliated to Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou, 310000)

【Abstract】 This study aims to optimize the hospital air conditioning refrigeration system, reduce energy consumption, and improve energy efficiency. The study analyzed the energy consumption characteristics and interdependence of refrigeration units, chilled water pumps, cooling water pumps, and cooling tower fans by establishing a mathematical model of the air conditioning refrigeration system. The improved Grey Wolf Optimization (IGWO) algorithm was adopted to solve the optimization problem of continuous and discrete variable coupling in the system. The experimental results show that the IGWO algorithm performs well in multi-objective optimization problems and can more effectively reduce the total energy consumption of the system compared to other algorithms. In practical applications, by optimizing the control strategy, an average energy-saving rate of 10.07% to 15.80% has been achieved, with the cooling tower fan showing the most significant energy-saving effect, reaching an average energy-saving rate of 15%. The experimental results have verified the effectiveness and practicality of the proposed method, which provides a theoretical basis for the energy-saving renovation of hospital air conditioning refrigeration systems.

【Keywords】 Hospital air conditioning; Refrigeration system; Grey Wolf Optimization; Control strategy; Energy consumption

0 引言

随着社会经济的快速发展和人口老龄化的不断加剧,医院作为提供医疗服务的关键场所,其建筑能耗问题日益凸显,尤其是空调系统能耗,已成为不可忽视的重要方面^[1-3]。空调系统作为医院建筑中的主要能耗来源,其能耗占比持续上升,主要

归因于制冷设备的运行^[4,5]。因此,如何有效降低制冷设备的能耗,已成为医院空调系统节能降耗的关键所在。

近年来,基于变频技术的中央空调系统控制策略研究逐渐增多,旨在通过优化控制算法、提升系统响应速度及稳定性,实现更为精准的能耗控

制^[6]。例如,文献[7]提出了一种酒店中央空调系统的节能改造方案,通过改进设备性能、优化系统运行模式、引入智能控制系统等措施,降低了中央空调的运行成本。然而,酒店与医院在空调系统使用上存在差异,其改造方案并不完全适用于医院空调系统。文献[8]提出了一种基于 BAS-BP 的厂房空调节能智能控制方法。文献[9]提出了一种基于蛇优化算法对 PID 控制器进行改进的控制方法,旨在降低因系统振荡引发的变频风机控制信号波动所导致的能耗升高问题。然而上述方法并未涉及系统内部不同部件之间的耦合关系及群控运行策略。从现有文献来看,大多方法集中在制冷系统单个部件的局部优化上,如冷水机组和变频调速泵等,忽视了系统内部不同部件之间的耦合关系。这种局部优化方法虽然取得了一定的进展,但难以实现整个制冷系统的综合节能效果。

为改善上述问题,本研究提出了一种基于改进灰狼优化(improve grey wolf optimization, IGWO)算法的医院空调节能控制方法。该方法旨在建立一个提升整个系统模型的耦合优化方案,以获得制冷系统的群控运行策略,降低系统运行能耗。本文的创新点主要体现在以下几个方面:首先,构建了一个综合考虑设备启停管理和变频调节控制的优化模型,能够全面地反映医院空调制冷系统的运行特性;其次,提出了一种 IGWO 算法,该算法通过引入混沌映射、非线性收敛因子和动态比例加权策略等改进措施,有效提高了算法的搜索效率和精度,能够更好地适应医院空调制冷系统的复杂优化问题;此外,本文还对制冷机组、冷冻水泵和冷却塔风机等关键设备的运行特性进行了深入分析,并提出了相应的优化控制策略,为实现整个制冷系统的综合节能提供了有力支持。

1 模型建立

1.1 系统组成及控制策略分析

医院空调制冷系统的能耗主要集中在冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵以及冷却塔风机几个关键组件上。医院空调制冷系统的控制策略主要集中在两大方面:一是设备的启停管理,二是变频调节控制。在优化过程中,需细致调控的变量涵盖制冷机组、冷冻水泵、冷却水泵及冷却塔的数量配置,以及冷冻水出口与进口温度的设定值,还有冷却塔风

机的工作频率等。

通常情况下,制冷机组的能效比(Coefficient of Performance, COP)受多种运行参数的影响,包括机组的实际负荷率、冷冻水与冷却水的进出口温度等。然而,在本研究涉及的医院空调制冷系统中,冷冻水的供应与回流温度维持在一个相对稳定的范围内,因此,这些因素对制冷装置性能的影响未被纳入考量。值得注意的是,冷却水的入口温度对制冷机组的 COP 具有重要影响。

1.2 优化模型

基于上述分析,本研究重点探讨了制冷机组在部分负荷工况下,其 COP 与冷却水进口温度之间的关联关系:

$$f_i^{\text{COP}} = \frac{Q_i^{\text{d}}}{W_i^{\text{c}}} = F_1(Q_i^{\text{d}}, T_i^{\text{qint}}) \quad (1)$$

式中: f_i^{COP} 为第 i 时刻制冷机组的 COP; Q_i^{d} 为第 i 时刻蒸发器侧的制冷量, kW; W_i^{c} 为第 i 时刻制冷机组的能耗, kW; T_i^{qint} 为第 i 时刻冷却水入口温度, °C; F_1 为 Q_i^{d} 与 T_i^{qint} 的非线性关系函数。

如果忽略设备、管道和空气之间的热交换,根据热力学第一定律,冷水机组蒸发器段的热交换等于循环冷冻水的制冷量。该过程可建模:

$$Q_i^{\text{d}} = \frac{1}{3600} [\rho_{\text{c}} c_{\text{c}} V_i^{\text{c}} (T_i^{\text{qint}} - T_i^{\text{cout}})] \quad (2)$$

式中: ρ_{c} 为冷冻水密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_{c} 为冷冻水比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$; V_i^{c} 为第 i 时刻的冷冻水流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; T_i^{qint} 为第 i 时刻冷冻水入口温度, °C; T_i^{cout} 为第 i 时刻冷冻水出口温度, °C。

在本研究建立的医院空调制冷系统中,冷冻水泵的工作频率主要由供回水压差决定,冷冻水泵的能耗主要由流量和工作频率决定。因此,该过程可以建立模型:

$$\begin{cases} f_i^{\text{c}} = F_2(\Delta P_i) \\ W_i^{\text{c}} = F_3(V_i^{\text{c}}, f_i^{\text{c}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_i^{c} 为第 i 时刻冷冻水泵的工作频率, Hz; ΔP_i 为第 i 时刻供回水压差, kPa; F_2 为冷冻水泵的工作频率与供回水压差的非线性关系函数; W_i^{c} 为冷冻水泵的能耗, kW; F_3 为冷冻水泵的工作频率与其功耗非线性关系函数。

考虑到医院空调制冷系统采用恒频冷却水泵方案,其能耗特性主要关联于冷却水系统的热交换

效率以及冷却水的进出口温度。值得注意的是，冷却水入口温度并非固定不变，而是随外界环境温度与湿度的波动而波动，这与冷冻水侧能够维持近乎恒定的供水温度形成鲜明对比。具体而言，冷却水进口温度作为影响能耗的关键因素，其变动直接关联到冷水机组的 COP。通常，冷却水进口温度下降时，冷水机组的 COP 会随之提升，这表明冷却水进口温度是一个值得重视的控制与优化变量。在此背景下，本研究聚焦于冷却水泵的小时能耗，发现其主要受制于冷却水的进出口水温。该过程可定义如式（4）所示：

$$W_i^q = F_4(T_i^{\text{qint}}, T_i^{\text{qout}}) \quad (4)$$

式中： W_i^q 为冷却水泵在第 i 时刻的能耗，kW； T_i^{qint} 为冷却水在第 i 时刻的入口温度，℃； T_i^{qout} 为第 i 时刻冷却水出口温度，℃。

冷却塔的控制变量构成复杂，主要包括冷却塔开孔数、冷却塔风机开孔数以及风机转速。这些变量之间存在着密切的相互作用关系。具体而言，冷却塔的开孔数决定了空气流通的通道数量，进而影响冷却效果；而风机开孔数则决定了风机的通风面积，同样对冷却效率产生直接影响。至于风机转速，该变量是调节冷却塔冷却性能的关键因素之一。

在常规运行状态下，冷却塔内风机的转速越高，其产生的空气流动速度就越快，从而增强了热交换效果，使得冷却塔出水温度得以降低。然而，这也相应地增加了冷却塔的耗电量，体现了能耗与冷却性能之间的权衡关系。对于冷水机而言，冷却水入口温度是影响其功耗的重要因素。具体而言，当冷却水入口温度降低时，冷水机所需的制冷量减少，进而降低了其功耗。这一关系体现了冷却塔性能对冷水机运行效率的直接影响。

此外，冷凝器侧的制冷量在制冷系统中占据重要地位，该变量等于蒸发器侧制冷量与制冷机功率之和：

$$Q_i^q = Q_i^d + W_i^c \quad (5)$$

式中： Q_i^q 为第 i 时刻冷凝器侧的冷却能力； Q_i^d 为第 i 时刻蒸发器侧的冷却能力； W_i^c 为冷冻水泵的能耗。该等式揭示了制冷系统中能量转换与传递的基本规律，对于理解冷却塔与冷水机之间的相互作用机制具有重要意义。

冷却塔风机的工作频率，其设定主要依据在于

冷却塔的实时散热需求以及冷却水达到最佳运行状态时所需的入口温度。在实际应用中，利用能耗计算公式，可以对风机的运行策略进行优化调整，以在满足冷却需求的前提下，实现能耗的最小化：

$$\begin{cases} f_i^t = F_5(Q_i^t, T_i^{\text{qint}}) \\ W_i^t = F_6(f_i^t) \end{cases} \quad (6)$$

式中： f_i^t 为第 i 时刻冷却塔散热量，kW； Q_i^t 为第 i 时刻冷凝器侧制冷量，kW； W_i^t 为第 i 时刻的空气质量流量，kg·h⁻¹。

综合上述分析，本研究的主要目标是在制冷季节将医院空调制冷系统的总能耗降至最低。因此，需要优化的目标函数表达式定义如式（7）所示：

$$f_{\text{total}} = \min\{(W_i^c), (W_i^e), (W_i^q), (W_i^t)\} \quad (7)$$

1.3 约束条件

医院空调制冷系统的约束条件主要包括冷水机组的安全运行负荷范围、冷冻水泵的运行频率限制、冷却塔风机运行频率的界限等。上述约束条件共同构成了确保制冷系统安全、高效运行的基础框架。

冷水机组作为制冷系统的核心设备，其运行负荷需维持在特定的安全范围内，以确保设备的高效与稳定运行。具体而言，冷水机组的实际运行负荷需满足不等式约束：

$$Q_{\min} \leq Q_i^d \leq Q_{\max} \quad (8)$$

式中： Q_i^d 为冷水机组的实际运行负荷，kW； $Q_{\min}$ 和 $Q_{\max}$ 分别为冷水机组安全运行负荷的下限和上限。该界限确保了冷水机组既不会因负荷过低而效率低下，也不会因负荷过高而面临过载风险。

冷冻水泵的运行频率是影响制冷系统水流速度和制冷效率的关键因素之一。为确保系统的稳定运行和能效优化，冷冻水泵的运行频率需被严格控制在一定范围内：

$$f_{\min}^c \leq f_i^c \leq f_{\max}^c \quad (9)$$

式中： f_i^c 为冷冻水泵的实际运行频率； $f_{\min}^c$ 和 $f_{\max}^c$ 分别为冷冻水泵运行频率的下限和上限。通过限制运行频率，可以有效避免水泵因频率过低导致的流量不足或频率过高引起的能耗增加。

冷却塔风机负责将冷却水中的热量散发到大气中，其运行频率同样需受到严格控制，以保证冷却效果和能耗之间的平衡。冷却塔风机的运行频率

范围可表示为:

$$f_{\min}^l \leq f_i^l \leq f_{\max}^l \quad (10)$$

式中: f_i^l 为冷却塔风机的实际运行频率; $f_{\min}^l$ 和 $f_{\max}^l$ 分别为冷却塔风机运行频率的下限和上限。合理的运行频率范围有助于维持冷却塔的高效散热性能, 同时减少不必要的能耗。

2 基于改进 GWO 的模型求解

基于前述分析, 在确定医院空调制冷系统优化目标函数及其约束条件后, 关键在于将这些要素有效整合, 以搜索出使系统总能耗达到最小的最优运行策略。然而, 在制冷系统中, 冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵和冷却塔之间存在着紧密的相互依赖关系, 即任何一个部件工作状态的调整都会对其他部件的工作状态产生直接或间接的影响。整个系统展现出强烈的非线性特征, 这导致直接达到全局最优的系统运行状态变得相当复杂。此外, 优化问题还涉及连续变量与离散变量的混合, 进一步增加了求解的难度。鉴于上述挑战, 多目标优化可以同时考虑这些设备的运行状态和相互影响, 从而实现整体系统的优化。为此, 本研究提出了一种改良的灰狼优化 (Improved Grey Wolf Optimization, IGWO) 算法, 提高系统对不确定因素的适应性和鲁棒性, 使得优化策略在不同工况下都能保持较好的性能。IGWO 算法包括狼群初始化、非线性收敛因子、动态比例加权等策略。

2.1 狼群初始化

GWO 算法的性能, 尤其是其寻找最优路径的能力和收敛速度, 在很大程度上依赖于初始化灰狼种群的多样性^[10,11]。种群的多样性有助于提升算法在搜索空间中的探索能力。传统 GWO 算法采用随机方式初始化狼群位置, 这一做法主要影响算法的搜索效率。因此, 为了提升效率, 初始化种群应在初始搜索空间中尽可能实现均匀分布。

在优化过程中, 混沌映射对优化算法的收敛速度具有积极影响^[12]。混沌序列因其非线性、遍历性等特点, 能够有效防止算法陷入局部最优解, 因此在智能算法的动态和全局搜索空间优化中得到了广泛应用。在常用的混沌映射中, Logistic 映射和 Tent 映射尤为突出。然而, Logistic 映射在遍历性方面表现不如 Tent 映射, 且其初始参数的敏感性导致映射点在边缘区域密度较大, 而在中间区域密

度较小, 这不利于最优路径的规划。然而, Tent 映射也存在小周期性的问题。为了克服这一局限, 本研究在 Tent 映射中引入了一个随机变量, 以期进一步提升算法的性能。改进后的 Tent 映射定义如式 (11) 所示:

$$y_{k,j+1} = \begin{cases} vy_{k,j} + \frac{1}{N}\xi & y_{k,j+1} \in [0, 0.5] \\ \kappa(1 - y_{k,j}) + \frac{1}{N}\xi & y_{k,j+1} \in (0.5, 1] \end{cases} \quad (11)$$

式中: $y_{k,j+1}$ 为第 k 个灰狼种群在 $j+1$ 个迭代的映射值; $y_{k,j}$ 为第 k 个灰狼种群在 j 个迭代的映射值; ξ 为 0 和 1 之间的随机变量; κ 为混沌因子; N 为种群总数。引入随机变量可以保持 Tent 映射的遍历性和规律性, 有效地解决了 Tent 在迭代过程中落入小而不稳定的周期点的问题, 使初始化的狼群位置在搜索空间中均匀分布。

初始化完成后, 将上述随机 Tent 映射转换到灰狼群的搜索空间:

$$x_{k,j} = x_{\min} + y_{k,j}(x_{\max} - x_{\min}) \quad (12)$$

式中: $x_{k,j}$ 为第 k 个灰狼种群在 $j+1$ 个迭代的位置; $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为灰狼位置的上下限。

2.2 非线性收敛因子

在 GWO 中, 收敛因子的特性对算法的全局搜索能力和局部开发能力产生深远影响。全局搜索能力指的是算法能够引导灰狼群体探索尚未探索的区域, 以避免陷入局部最优解, 这在传统 GWO 中尤为关键, 因为灰狼群体需要在整个搜索空间内寻找猎物。相对地, 局部开发能力则侧重于在小范围内提高搜索精度。当灰狼群体意图包围并攻击猎物时, 其局部开发能力直接决定了收敛速度。因此, 收敛因子在 GWO 中扮演着至关重要的角色。

传统 GWO 采用的收敛因子通常为线性递减因子。然而, 值得注意的是, 医院空调制冷系统优化问题的目标函数往往呈现出非线性变化的特征, 这意味着线性递减的收敛因子可能并不完全适用于此类问题。此外, GWO 的运行过程可大致分为全局搜索和局部开发两个阶段。在算法初期, 全局搜索占据主导地位, 旨在寻找最优解的大致位置; 而在中后期, 算法则转向局部开发, 以进一步提高解的精度。这两个阶段对收敛因子的需求存在显著差异。

鉴于上述分析, 本研究提出了一种基于高斯分

布变化曲线的收敛因子。该收敛因子能够更好地适应医院空调制冷系统优化问题的非线性特征,并在 GWO 的不同阶段提供更为合适的收敛速度。通过引入这种非线性收敛因子,算法在全局搜索阶段能够更有效地探索未知区域,同时在局部开发阶段则能够更快地收敛到最优解。基于高斯分布变化曲线的收敛因子定义如式 (13) 所示:

$$a = \begin{cases} \phi \frac{1}{\sqrt{2\pi}(T_{\max}/3)} e^{-\frac{t^2}{2(T_{\max}/3)^2}} & t \leq \zeta T_{\max} \\ \varphi \frac{1}{\sqrt{2\pi}(T_{\max}/3)} e^{-\frac{t^2}{2(T_{\max}/3)^2}} & \zeta T_{\max} < t \leq T_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: ϕ 和 φ 分别为不同迭代次数遵循的衰减因子,这些值随着迭代次数的变化而变化; ζ 为截断因子; t 为当前迭代次数; $T_{\max}$ 为最大迭代次数。

2.3 动态比例加权策略

传统 GWO 在狼群位置更新过程中依赖于均值作为核心策略,然而,这一方法在实践中展现出的性能并不理想。为了优化搜索效率与精度,本研究提出了一种动态比例加权更新策略。该策略的核心在于摒弃了单一的均值更新方式,转而采用一种基于个体适应度和当前位置信息的比例加权机制。具体而言,通过细致考量每个灰狼个体的适应度值与其在搜索空间中的位置,该策略能够动态地调整各灰狼在位置更新过程中的贡献度,从而引导灰狼群以更为精确和高效的方式逼近全局最优解。这一改进旨在提升算法在复杂优化问题中的探索与利用能力,确保灰狼优化算法的整体性能得到实质性提升。动态比例加权策略定义如式 (14) 所示:

$$\begin{cases} W_a = \frac{f_a + f_\beta + f_\gamma}{f_a}, W_\beta = \frac{f_a + f_\beta + f_\gamma}{f_\beta}, W_\gamma = \frac{f_a + f_\beta + f_\gamma}{f_\gamma} \\ V_1 = \frac{|X_1| + |X_2| + |X_3|}{|X_1|}, V_2 = \frac{|X_1| + |X_2| + |X_3|}{|X_2|}, V_3 = \frac{|X_1| + |X_2| + |X_3|}{|X_3|} \\ X_{\text{new}} = \frac{V_1 W_a + V_2 W_\beta + V_3 W_\gamma}{3} \end{cases} \quad (14)$$

式中: α 、 β 和 γ 分别为狼群中的狼首领、狼副手、狼顾问; f_a 、 f_β 和 f_γ 分别为狼首领、狼副手、狼顾问的适应度函数; W_a 、 W_β 和 W_γ 分别为狼首领、狼副手、狼顾问的权重; X_1 、 X_2 和 X_3 分别为狼首领、狼副手、狼顾问在狩猎过程中对猎物位置的估计和相应的移动位置; X_{new} 为灰狼的更新位置。

IGWO 算法流程图如图 1 所示。

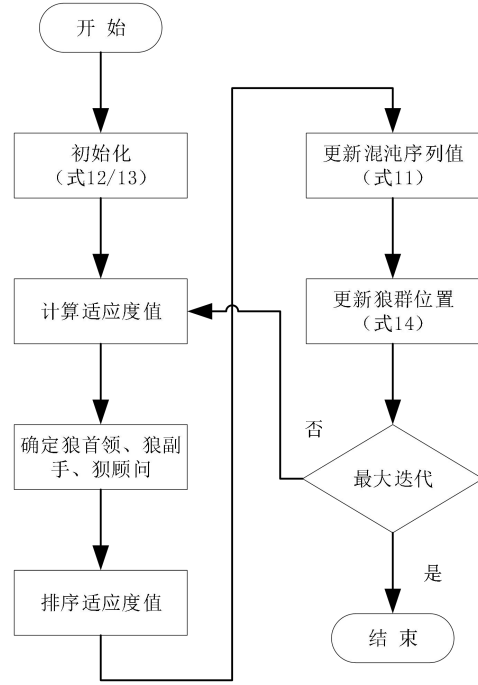


图 1 IGWO 算法流程图

Fig.1 Flowchart of IGWO algorithm

3 实验与分析

在实验环节中,首先通过数值模拟对所提出的 IGWO 算法的优化性能进行评估,以此作为验证其效能的基础步骤。该测试旨在系统地分析 IGWO 在解决优化问题上的表现,确保其在理论上具备优越性。随后,研究选取了一组关于空调制冷系统的节能控制案例作为实际应用场景,进一步验证 IGWO 算法的实际优化性能。

3.1 参数设置与 Pareto 评估指标

实验环境配置详情如下:实验采用搭载了 Intel Core i9 处理器的计算机,该处理器配备 32GB DDR4 内存,确保了充足的内存资源用于数据处理和算法执行。操作系统为 Windows 10,提供了稳定的运行环境和丰富的应用程序支持。实验平台则选用了 Matlab R2019a 版本,其强大的数值计算能力和丰富的工具箱为算法的编写、调试及性能评估提供了极大便利。

本研究采用了两种重要的评估指标:反世代距离 (Inverted Generational Distance, IGD) 和超体积 (Hypervolume, HV)。IGD 通过计算算法解集与真实 Pareto 前沿之间的平均最小欧几里得距离,

反映了算法解集与理想解的接近程度；而 HV 则通过衡量算法生成的最优解集与目标空间中预设参考点所围成的体积，评估了算法在探索和利用搜索空间方面的综合性能。

3.2 数值模拟分析

为了验证所提出的 IGWO 算法在多目标优化问题中的可行性和有效性，研究选用了具有不同特征的 ZDT 系列测试函数作为基准。这些测试函数的 Pareto 最优边界形状各异，为评估算法性能提供了全面的挑战。

在实验中，采用 IGD 和 HV 这两个常用的多目标优化性能指标。为确保实验结果的可靠性和稳定性，每种算法均独立运行 50 次，并取其均值作为最终结果，以消除随机误差的影响。参与对比的

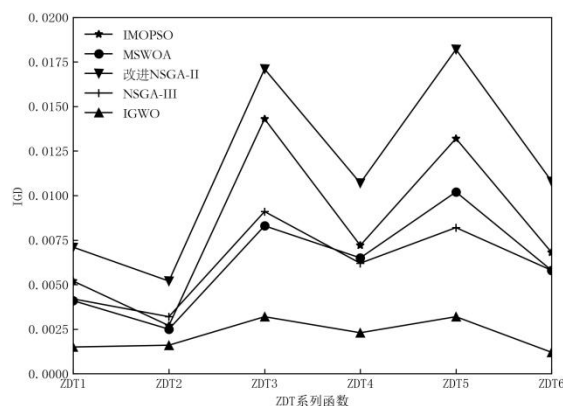
算法包括：

(1) 改进的多目标粒子群优化算法 (IMOPSO)：该方法通过引入改进的粒子更新策略和精英保留机制，提高了算法在求解多目标优化问题时的收敛性和多样性。

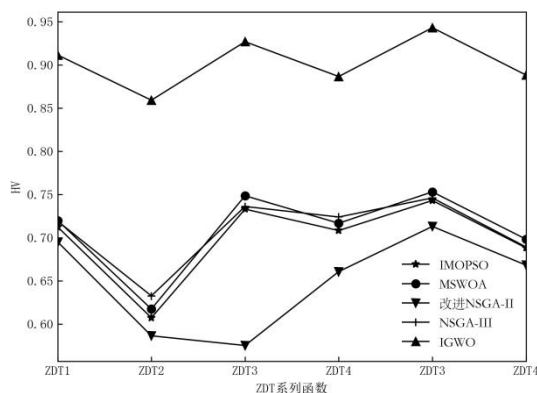
(2) 混合策略鲸鱼优化算法 (MSWOA)：该方法结合了鲸鱼优化算法和其他优化策略，旨在提高算法的全局搜索能力和求解效率。

(3) 改进 NSGA-II 算法：该算法在 NSGA-II 的基础上进行了优化，以增强其在复杂多目标优化问题中的性能。

(4) NSGA-III：作为多目标优化领域的经典算法，NSGA-III 通过引入参考点和多样性保持策略，实现了对高维目标空间的有效搜索。



(a) IGD 指标对比结果



(b) HV 指标对比结果

图2 不同算法在 ZDT 系列测试函数上的数值模拟对比结果

Fig.2 Comparison of numerical simulation results of different algorithms on ZDT series test functions

图2所示为不同算法在 ZDT 系列测试函数上的数值模拟对比结果。通过对比和分析这些数据，可以清晰地看出 IGWO 算法在解决多目标优化问题中的优势。实验结果表明，IGWO 算法在 ZDT 系列测试函数上展现出了出色的性能。与 IMOPSO、MSWOA、改进 NSGA-II 以及 NSGA-III 相比，IGWO 算法在求解质量上更具优势。具体而言，在 IGD 指标上，IGWO 算法在多数测试函数上均取得了最低值，表明其能够找到更接近真实 Pareto 前沿的解集。在 HV 指标上，IGWO 算法同样表现优异，具有更高的 HV 值，这反映了算法在探索和利用搜索空间方面的综合能力。

综上所述，本研究通过一系列的实验验证，证明了 IGWO 算法在解决多目标优化问题中的可行性和有效性。与现有的多目标优化算法相比，

IGWO 算法在求解质量、运行效率以及算法稳定性方面均表现出色，为进一步的算法应用和推广提供了有力的支持。

3.3 医院空调节能控制分析

本研究聚焦于某市一座总建筑面积为 15 万平方米的医疗建筑，该建筑由地上 16 层和地下 1 层组成。为提升能源利用效率，研究针对其制冷系统进行了优化分析。通过全面收集 2020 年制冷季节（4 月 1 日至 10 月 30 日）的气象参数、建筑冷负荷以及各设备的逐小时能耗数据，为后续的系统优化奠定了坚实基础。此外，在收集阶段特别关注了室外干球温度的逐小时变化数据，这是影响制冷系统能耗的关键因素之一。同时，记录了冷冻水供回水温度维持在 7/12℃时的系统状态，以及冷却水进口温度在 16℃至 25℃范围内的波动情况。

接下来，通过 IGWO 计算得到了优化后各设备在整个制冷季节的逐小时能耗数据。为进一步评估优化效果，研究统计了制冷站改造前后的设备能耗，并计算了各设备在不同制冷时段的节能率。节能率的计算公式如式（15）所示：

$$\mu = \frac{W^c - W^m}{W^c} \times 100\% \tag{15}$$

式中： μ 为节能率； W^c 为整个制冷季节的原始运行能耗，kWh； W^m 为优化后整个制冷季的运行能耗，kWh。

医院空调控制节能率统计结果如表 1 所示。

表 1 医院空调控制节能率统计结果

Table 1 Statistical results of energy-saving rate of hospital air conditioning control

月份	制冷机组	冷冻水泵	冷却水泵	冷却塔
5	0.1205	0.1402	0.0552	0.1401
6	0.0935	0.1611	0.0458	0.1385
7	0.0764	0.0785	0.0553	0.1185
8	0.0632	0.0612	0.0617	0.1713
9	0.1132	0.0844	0.0487	0.1612
10	0.1373	0.1413	0.0785	0.1586
均值	0.1007	0.1111	0.0575	0.1480

在对制冷机组进行优化后，发现其在节能方面具有潜力。特别是在制冷周期的开始和结束阶段，节能效果尤为突出。数据显示，采用群控系统的机组在这些时期的能耗比未采用群控系统的机组低约 10.7%至 15.8%。这一现象的原因是在这些时期，制冷机组通常在较低的负荷率下运行。通过引入群控系统，可以更有效地调节制冷机组的运行，以适应不断变化的负荷需求，从而使机组保持在较为节能的运行状态。

对于冷冻水泵而言，其节能效益在制冷季节的开始和结束时同样表现出色。具体而言，在制冷季节的开始和结束时，通过变频调节，冷冻水泵的能耗比固定频率运行时低约 20%。然而，在负荷率较高的制冷季中期，由于水泵需要更频繁地在额定频率下运行，节能效果并不明显，能耗仅比固定频率运行时低约 5%。这主要是因为部分负荷运行时，冷冻水泵通过恒压差控制，并结合变频技术调整流量，以此实现节能目标。然而，在制冷季节的中期，由于负荷率较高，水泵多数时间在额定频率附近运行，导致节能率有所降低。

即便冷却水泵依然采用定频控制，通过对冷却塔风机进行变频控制优化后，整个冷却系统的能耗，包括冷却水泵和冷却塔，均有所减少。实验数据显示，优化后的冷却塔风机能耗比未优化前低约 15%，而冷却水泵的能耗也有所下降，尽管幅度较小。冷却水系统的能耗受到多种因素的影响，包括环境温度、湿度以及用户侧负荷等。因此，在降温季节内，能耗的变化趋势并不明显。综合来看，该系统在节能方面具有较大的潜力。

综上所述，通过对制冷机组、冷冻水泵和冷却塔风机的优化控制，整个制冷系统的节能潜力得到了有效挖掘。这些优化措施不仅提高了系统的能效，还为实现可持续发展和降低运行成本提供了有效途径。通过对不同节能方法的详细数据对比和分析，可以得出结论，综合运用群控系统、变频技术和优化控制策略，可以在不同的运行阶段实现节能目标，从而为制冷系统的节能改造提供了科学依据。

4 结论

随着社会经济的快速发展和人口老龄化的加剧，医院作为提供医疗服务的重要场所，其建筑能耗问题日益突出，尤其是空调系统的能耗问题。空调系统是医院建筑中的主要能耗来源，其能耗占比持续上升，主要归因于制冷设备的运行。因此，如何有效降低制冷设备的能耗，已成为医院空调系统节能降耗的关键所在。本文针对医院空调制冷系统的能耗问题，提出了一种基于 IGWO 算法的节能控制方法。首先，构建了一个综合考虑设备启停管理和变频调节控制的优化模型，重点探讨了制冷机组在部分负荷工况下，其 COP 与冷却水进口温度之间的关联关系，并建立了相关模型。然后，提出了一种 IGWO 算法，该算法通过调整参数和策略，有效解决了连续与离散变量耦合的优化问题，实现了整体系统的高效运行和能耗降低。最后，通过数值模拟和实际案例分析，验证了所提方法的有效性和优越性。

尽管本文提出的方法在一定程度上提高了医院空调制冷系统的能效，但仍存在一些不足之处。例如，本文主要针对制冷机组、冷冻水泵和冷却塔风机等关键设备进行了优化，而对其他辅助设备如阀门、管道等的优化控制策略研究较少，这些设备

在实际运行过程中也会对系统的能耗产生一定影响。另外,本文的优化模型和算法主要基于理想化的假设条件,如忽略了设备老化、维护不当等因素对系统性能的影响,在实际应用中可能会受到一定的限制。

未来的工作可以从以下几个方面展开:首先,进一步完善优化模型,将更多的辅助设备纳入考虑范围,建立更为全面的系统模型,以更准确地反映医院空调制冷系统的实际运行情况;其次,针对实际应用中的复杂工况,如设备老化、维护不当等,研究相应的优化控制策略,提高模型和算法的鲁棒性和实用性;此外,还可以探索将人工智能、大数据等先进技术与优化算法相结合,实现对医院空调制冷系统的智能化、精细化管理,为实现医院建筑的节能减排和可持续发展提供更为有效的技术支持。

参考文献:

- [1] 陈相坤,李鸿伊,林淑敏,等.大温差技术用于医院建筑的最优节能分析[J].福建建设科技,2024,(5):125-128, 140.
 - [2] 蒋海刚.医院空调水系统数字化监控与智慧运行[J].建筑节能(中英文),2024,52(9):68-73.
 - [3] 杨涵淋,於仲义,陈焰华,等.某大型综合医院不同院区建筑用能特征及节能策略分析[J].暖通空调,2024, 54(10):159-164.
 - [4] 尹卓,李国良,李明,等.光伏直驱冰蓄冷空调系统电能特性及蓄冷供冷性能分析[J].云南师范大学学报(自然科学版),2020,40(1):12-15.
 - [5] 程勇,谌小栋,李玮,等.医院中央空调冷冻站能效提升策略和方法[J].中国医院建筑与装备,2024,25(6):64-71.
 - [6] 王知亮.绿色建筑设计理念在建筑设计中的应用策略[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(29):83-85.
 - [7] 蔡锦乾,班艳玲.酒店中央空调系统节能改造案例分析[J].建筑科技,2024,8(9):39-41.
 - [8] 张荣强,夏伟敏,王丹,等.BAS-BP 控制模型在化工厂空调节能中的应用研究[J].粘接,2024,51(9):124-127.
 - [9] 高可君,方晓蓉,刘文意,等.数据中心空调系统节能优化策略[J].能源研究与信息,2024,40(3):153-159.
 - [10] Fattahi H, Ghaedi H, Armaghani D J. Optimizing fracture toughness estimation for rock structures: A soft computing approach with GWO and IWO algorithms[J]. Measurement, 2024,238:115306.
 - [11] Pu Y, Huang Z, Wang J, et al. Research on Pricing and Dynamic Replenishment Planning Strategies for Perishable Vegetables Based on the RF-GWO Model[J]. Symmetry, 2024,16(9):1245-1245.
 - [12] Li Y, Liu Y, Lin C, et al. An Improved Pelican Optimization Algorithm Based on Chaos Mapping Factor[J]. Engineering Letters, 2023,31(4).
-
- (上接第 387 页)
- [26] 冯雪茹.采用P204萃取钒渣酸浸液中钒的基础研究[D].沈阳:东北大学,2015.
 - [27] Liu C, Liu T, Zhang Y M, et a. Preparation of electrolyte for vanadium redox flow battery from sodium-polyvanadate precipitated wastewater[J]. Separation and Purification Technology, 2020,(116582): 240.
 - [28] 李丹.含钒氯化物溶液短流程制备高纯硫酸氧钒研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所),2017.
 - [29] Li D, Chen D S, Zhang G Z, et al. Preparation of Highly Pure Vanadyl Sulfate from Sulfate Solutions Containing Impurities of Iron and Aluminum by Solvent Extraction Using EHEHPA[J]. Metals, 2017,7(3):106.
 - [30] Liu H, Zhang Y M, Liu T, et al. Preparation of vanadium electrolyte from vanadium shale leaching solution with high concentration chloride using D2EHPA[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023,33(5):1594-1608.
 - [31] 胡幼文.页岩富钒液皂化萃取深度净化制备高容量钒电解液研究[D].武汉:武汉科技大学,2023.
 - [32] 田宇楠.从钒钛磁铁矿渣的废酸浸出液中萃取钒的研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2016.
 - [33] Yun Guo, Jie Huang, Jun-Kai Feng. Research progress in preparation of electrolyte for all-vanadium redox flow battery - ScienceDirect[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2023,118:33-43.
 - [34] 徐从美,文越华,陈东辉,等.一种利用树脂交换和化学沉淀结合制备全钒液流电池电解液的方法:CN106129442A[P].2016-11-16.
 - [35] 白云龙,段彦凯,王鸿飞,等.用含钒浸出液制备钒电池电解液的方法:CN103427104A[P].2013-12-04.