

基于改进 BP 神经网络的风冷热泵除霜 智能控制方法研究

张蓄金

(河南应用技术职业学院 基础教学部, 河南 郑州 450042)

摘要:当前的智能除霜过程没有考虑机组本身对除霜的影响,造成以 BP 神经网络为主的控制方法能耗高,效率低。该文提出改进 BP 神经网络控制风冷热泵除霜控制方法。结合质量守恒定理,明确风冷热泵中湿空气和风机翅片管热器间的换热关系,通过计算控制单元进口和出口处含湿量差值得到风冷热泵的结霜量;使用北方苍鹰优化算法改进 BP 神经网络,将空气侧换热器结霜相关参数和机组系统对结霜的影响参数作为网络输入,基于结霜量输出换热器除霜开始时间和加热结束时间,实现风冷热泵除霜智能控制。实验结果表明,所提控制方法可在 170 s 以内解除冻霜,并将结霜过程中的运行压力波动维持在 0.3 MPa,降低能源消耗的同时加快了除霜效率,确保空调设备能高性能平稳运行。

关键词:风冷热泵;结霜量;除霜控制;改进 BP 神经网络;霜层厚度

中图分类号: TB657.5

文章编号: 1000-0682(2024)05-0088-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.05.017

Research on intelligent control method of air-cooled heat pump defrosting based on improved BP neural network

ZHANG Xujin

(Basic Teaching Department, Henan Technical Institute, Henan Zhengzhou 450042, China)

Abstract: The current intelligent defrosting process does not consider the impact of the unit itself on defrosting, resulting in high energy consumption and low efficiency of the control method mainly based on BP neural network. This article proposes an improved BP neural network control method for defrosting of air-cooled heat pumps. Based on the principle of conservation of mass, clarify the heat transfer relationship between moist air and the finned tube heat exchanger in the air-cooled heat pump. Calculate the frost formation of the air-cooled heat pump by calculating the difference in moisture content between the inlet and outlet of the control unit. Using the Northern Eagle Optimization Algorithm to improve the BP neural network, the frosting related parameters of the air side heat exchanger and the influence parameters of the unit system on frosting are taken as network inputs. Based on the amount of frosting, the defrosting start time and heating end time of the heat exchanger are output, achieving intelligent control of defrosting for air-cooled heat pumps. The experimental results show that the proposed control method can remove frost within 170 seconds and maintain the operating pressure fluctuation during the frosting process at 0.3 MPa, reducing energy consumption while accelerating defrosting efficiency, ensuring high-performance and stable operation of air conditioning equipment.

收稿日期: 2024-03-28

基金项目: 开封市 2022 年度软科学研究计划项目项目: 网络新环境下高校加强网络阵地建设(2204029)

第一作者: 张蓄金(1983—), 男, 河南开封人, 本科, 高校讲师, 研究方向为电子信息工程。E-mail: zhangxujin2024@yeah.net

Keywords: air-cooled heat pump; frost formation amount; defrost control; improve BP neural network; frost layer thickness

0 引言

风冷热泵系统作为一种高效、环保的空调机组^[1],在调节室内温度方面发挥着重要作用。然而,在低温高湿的环境中,其室外换热器表面常常会出现结霜现象。这种结霜现象是由于空气中的水蒸气在低温条件下凝结在蒸发器表面所形成的。随着霜层的逐渐加厚,它不仅会降低热交换效率,增加空气流动阻力,而且长期累积还可能对设备造成损害,影响系统的整体性能和稳定运行。因此,解决风冷热泵系统的结霜问题,对于保障其正常运行、提高能源利用效率具有重要意义^[2]。在此背景下,风冷热泵智能除霜技术的研究显得尤为重要。通过实时监测系统的运行状态,精准控制除霜过程,不仅可以有效防止霜层对系统性能的影响,还可以降低能耗,提高系统的稳定性和可靠性。此外,智能除霜技术的研究还有助于推动制冷技术的创新与发展,为风冷热泵系统的广泛应用和可持续发展提供有力支持。

在探讨风冷热泵智能除霜技术的过程中,可以发现许多学者和研究人员已经在这一领域进行了深入的研究,并提出了多种有效的解决方案。例如魏文哲^[3]等针对不同地区气候条件差异大问题,通过构建不同工况下机组空气侧换热器结霜模型,确定六种除霜判据依据的隶属度,搭建模糊规则表,给予除霜指令,实现控制;在该方法中,由于未考虑机组本身的特性,给出的除霜指令可能不够智能化,这会导致系统频繁启动除霜操作或者使用较大能量进行除霜,从而增加了控制能耗。任岩超^[4]等量化不同厂家空气源热泵的除霜控制点,并计算了其与机组内部参数之间的联系,通过预测模型实现对除霜行为的控制;该方法通过预测模型对除霜行为进行控制,但如果预测模型未考虑到机组本身的工作状态、能效特点等因素,可能无法准确预测除霜需求,导致控制行为不理想,从而增加了控制能耗,降低了效率。Ma^[5]国外研究小组将多台室外机热泵并联,利用冷凝器出口的热液依次对室外机进行除霜,通过线性模型计算出室外温度和湿度间关系,明确除霜启动控制点和结束点,实时线性分析室外温度和湿度间关系确实可以做到精准除霜,但是这种方法采用线性模型计算室外温度和湿度之间的关系存在局限性,未能充分考虑到机组本身的工作状态、性能参

数等因素。机组的工作特性会受到各种因素影响,线性模型无法准确地反映机组实际的除霜需求,导致控制准确性不足,进而增加了能耗。Feng^[6]在除霜控制方法中引入尖点突变理论,构建除霜起始指数模型,令控制方法能更好地掌握除霜起始时间和结束时间。该方法虽然引入了尖点突变理论来构建除霜起始指数模型,但尖点突变理论本身的适用性也需要考虑。该理论可能假设了某种默认的除霜特征,而未考虑到机组本身可能存在独特的除霜行为,导致理论模型的准确性不高。

为了最大限度地减少结霜对机组运行造成的不利影响,除霜策略必须根据实时的结霜程度进行精准调整。鉴于结霜问题涉及多个因素,且这些因素之间可能存在复杂的非线性关系,BP神经网络因其强大的自动学习和适应能力,成为实现除霜策略精确控制的有效工具。然而,BP神经网络虽然具有诸多优点,但也存在一些局限性,如收敛速度慢和易陷入局部最优等。为了克服这些缺点,该研究提出对BP神经网络进行改进,通过实时监测和预测结霜状态,实现智能除霜。通过这一方法,期望能够更精确地控制除霜过程,提高机组运行的稳定性和效率,推动风冷热泵技术的进一步发展。

1 风冷热泵结霜量计算

风冷热泵结霜过多不仅降低制热效率,还可能引发故障。通过计算结霜量,可以更加精确地判断除霜的时机和方式,对于制定有效的除霜控制策略至关重要。

图1为风冷热泵系统示意图。风冷热泵上产生的霜本质上是水的相变^[7],空气中一部分的水蒸汽冷凝成为液体附着在风冷热泵外壁上,并进一步凝固为固态冰霜。

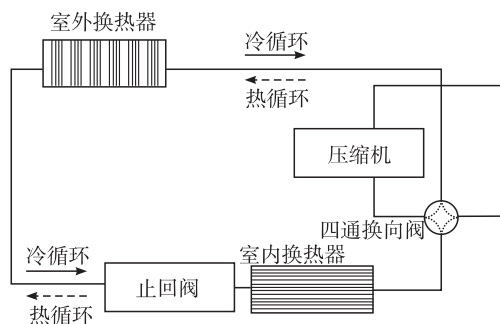


图1 风冷热泵空调系统示意图

为了方便计算,设定风冷热泵在运行过程中一切转换关系都遵守能量守恒定理。即铜管内制冷剂相变吸收的能量与湿空气释放的能量相同,则风冷热泵中蒸发器的任意一根管道都可认定为一个控制体,每两个控制体划分为一个控制单元,前一个控制单元的湿空气出口状态参数,可作为后一个单元的湿空气入口状态参数,由此可以通过调节前一个单元的空气干度或者热度来控制后一个单元的干度或者热度^[8],明确风冷热泵在运行过程中的整个换热过程,辅助后续的精准确除霜控制。即 $T_{in}^m = T_{out}^{m-1}$, $d_{in}^m = d_{out}^{m-1}$ 。 T_{in} 表示湿空气进入控制单元的时刻, T_{out} 表示湿空气离开控制单元的时刻, d_{in} 表示空气进入管道内的湿量, d_{out} 表示空气离开管道内的湿量, m 表示控制单元总数量。

根据质量守恒定理可得出湿空气和风机翅片管换热器之间的换热关系^[9],任一控制单元有:

$$Q = K\Delta t_m = q_{m1}c_1(t_1^1 - t_1^2) = q_{m2}c_2(t_2^1 - t_2^2) \quad (1)$$

式中:传热量由 Q 描述;传热系数 K 和对数平均温差 Δt_m 是其中的关键要素。此外,流体 1 的进口与出口温度分别由 t_1^1 和 t_1^2 表示,流体 2 的相应温度的对应描述为 t_2^1 和 t_2^2 。同时,流体 1 和流体 2 的温度比热容在公式中分别用 $q_{m1}c_1$ 和 $q_{m2}c_2$ 表示。

据此可求出风冷热泵各个控制单元的湿空气进出口参数,设定湿空气的析湿量等于结霜量^[10],计算控制单元进口和出口处的含湿量差值,那么该控制单元的析湿量 Q_z 表示为:

$$Q_z = Q[q_{va}(H_{in} - H_{out})] \quad (2)$$

式中: q_{va} 表示外部空气质量流量; H_{in} 和 H_{out} 表示单元入口与出口处的空气焓量值^[11],计算公式为:

$$H_{in,out} = c_{pa} \cdot t_a + (t_{pv} + c_{pv} \cdot t_a)d \quad (3)$$

式中: c_{pa} , c_{pv} 表示干空气、水蒸气定压比热; t_a 表示来流空气温度; t_{pv} 表示外部空气温度; d 表示含湿量,计算公式为:

$$d = \frac{\zeta p_s}{p - p_s} \quad (4)$$

式中:相对湿度用 ζ 表示;饱和蒸汽压用 p_s 表示; p 描述的是湿空气压力。据此可计算出霜层的生长程度,便于精准进行除霜控制。

2 风冷热泵除霜控制方法设计

考虑到空气侧换热片翅片管道表面的成霜受到多种因素影响,而不同的结霜程度又会对机组运行造成各种影响。每种因素都可能以不同的方式作用于结霜过程,导致结霜速度和程度的差异。BP 神经

网络作为一种强大的机器学习工具,能够从大量的历史样本数据中学习和提取这些复杂的输入与输出关系。通过不断调整网络参数,逐渐逼近真实的除霜控制策略,实现精确的除霜控制^[12-14]。然而,尽管 BP 神经网络具有诸多优点,但它也存在一些固有的局限性。其中最为突出的问题就是收敛速度慢和易陷入局部最优。在训练过程中,BP 神经网络需要不断地调整网络参数以逼近真实的除霜策略,这是一个迭代的过程,通常需要大量的时间和计算资源。此外,由于存在多个局部最优解,BP 神经网络在训练过程中可能会过早地收敛到一个并非全局最优的解,从而导致难以找到最佳的除霜方案。这种局限性不仅会增加训练的耗时和成本,还可能影响到除霜控制策略的准确性和有效性。因此,为了克服这些缺点,需要对 BP 神经网络进行改进和优化。北方苍鹰优化算法,具有强大的全局搜索能力和快速收敛的优势。将其融入 BP 神经网络的优化中,能显著提升网络的性能,实现更实时、准确的除霜控制,提升风冷热泵的运行效率和稳定性。改进主要分为两个阶段。

阶段 1:全局搜索

基于 NGO 算法的生物捕食者特性,全局搜索阶段实际上就是筛选猎物 and 准备攻击阶段,有目的的筛选目标^[15]可以提高 BP 神经网络的全局寻优能力,进而加强对风冷热泵除霜控制。

NGO 算法的筛选猎物目标行为可表示为:

$$\begin{aligned} U_b &= V_e \\ e &= 1, 2, \dots, b-1, b, b+1, \dots, E \end{aligned} \quad (5)$$

式中: V_e 表示 NGO 种群中第 e 只苍鹰的位置; E 表示种群数量; U_b 表示第 b 只苍鹰选中猎物位置。

攻击行为可表示为:

$$v_{b,h}^{new,U_1} = \begin{cases} v_{b,h} + o(q_{b,h} - v_{b,h}) & r_{U_b} < r_b \\ v_{b,h} + o(v_{b,h} - q_{b,h}) & r_{U_b} \geq r_b \end{cases} \quad (6)$$

$$V_b = \begin{cases} v_{b,h}^{new,U_1} & r_b^{new,U_1} < r_b \\ V_b & r_b^{new,U_1} \geq r_b \end{cases} \quad (7)$$

式中: $v_{b,h}$ 表示苍鹰 b 处于的 h 维度位置; $q_{b,h}$ 表示猎物处于的 h 维度位置; r_{U_b} , r_b 表示苍鹰与猎物位置对应的目标函数; V_b 表示更新后苍鹰 b 的新位置; $v_{b,h}^{new,U_1}$ 表示更新后苍鹰 b 的 h 维度位置; r_b^{new,U_1} 表示更新后苍鹰的目标函数; o 用于描述猎物移动随机性,通常是 0-1 间随机数。

阶段 2:跟踪寻优

当猎物察觉到苍鹰的攻击时就会逃跑,为此苍

鹰需要跟踪直至捕捉到猎物——狩猎成功,即找出全局最优解;或者让猎物逃跑——狩猎失败,需要重新回到阶段 1 继续狩猎。但苍鹰在空中捕捉地面上的猎物,跟踪行为非常快,几乎可以实现百分百追踪猎物完成狩猎任务,这种特性可显著提升 BP 神经网络的全局寻优能力。跟踪狩猎行为可表示为:

$$\mathbf{v}_{b,h}^{\text{new},U_2} = \mathbf{v}_{b,h} + O(2o-1)\mathbf{v}_{b,h} \quad (8)$$

$$O = 0.02 \left(1 - \frac{1}{T} \right) \quad (9)$$

$$\mathbf{V}_b = \begin{cases} \mathbf{V}_b^{\text{new},U_2} & r_b^{\text{new},U_2} < r_b \\ \mathbf{V}_b & r_b^{\text{new},U_2} \geq r_b \end{cases} \quad (10)$$

式中: O 表示苍鹰攻击行为半径; T 表示最大迭代次数, $\mathbf{V}_b^{\text{new},U_2}$, $\mathbf{v}_{b,h}^{\text{new},U_2}$, r_b^{new,U_2} 表示跟踪狩猎阶段更新后苍鹰位置、维度位置、以及对目标函数值。

在此基础上使用改进 BP 神经网络对风冷热泵除霜,网络可并行处理多个除霜判别依据。改进 BP 神经网络除霜控制输入层分为两组参数,分别是:外界温度、外界相对湿度、风冷热泵制热运行时间——空气侧换热器结霜相关参数;风机接入电流、外界温度与蒸发温度差值、蒸发温度变化率——机组系统对结霜的影响参数。将全部参数输入到优化的 BP 神经网络中,通过误差反向传播机制驱动多层前馈网络进行训练。在此过程中,输入参数经过隐藏层处理后产生输出,并与期望值进行比较。随后,利用梯度下降法将二者的差值反向传播,以调整网络参数。基于公式(4)得出霜层的生长程度,动态求出除霜开始时间和加热结束时间,除霜时间控制决策由 D/A 接收,再传输给除霜执行机构,通过换热泵从霜层内部加热,去除霜层^[16]。基于不断修正的阈值和迭代优化的权重训练,直至加热时间结束,停止加热,完成除霜控制。输入和输出关系表达式为:

$$Y_k(t) = d \sum_{j=1}^J v_{jk} \cdot f \left[\sum_{i=1}^z w_{ij} \cdot x_i + \psi_j \right] + R_k \quad (11)$$

式中:网络输出表示为 Y_k ,网络层数用 $k=1,2,\dots,l$ 表示。网络输入由 x_i 描述,其中输入层节点为 $i=1,2,\dots,z$,隐藏层节点为 $j=1,2,\dots,J$ 。激活函数用 $f = \frac{1}{1+e^{-x}}$ 表示,节点 j,k 间的权值和节点 i,j 的权值分别由 v_{jk} 和 w_{ij} 描述。此外,隐藏层节点 j 的阈值表示为 ψ_j ,输出层节点 k 的阈值则通过 R_k 进行描述。

流程如图 2 所示。

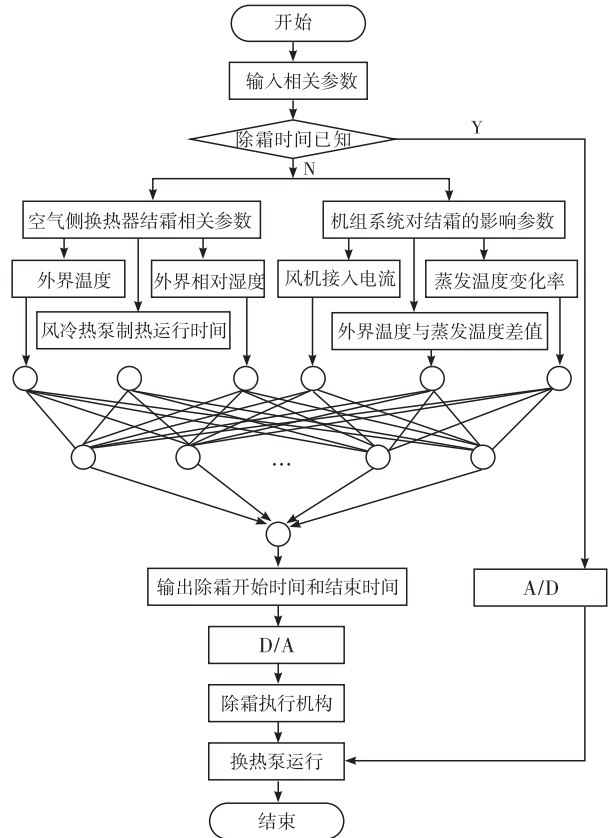


图 2 改进 BP 神经网络的除霜控制流程图

3 除霜控制实验

3.1 实验参数设置

实验中使用分体式壁挂空调作为风冷热泵实验样本,应用场景为图 3,机组各参数如表 1 所示。

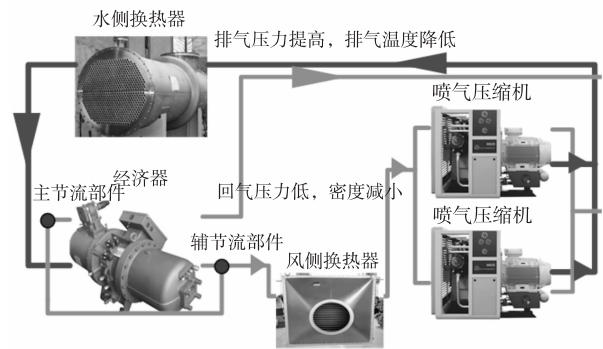


图 3 风冷热泵机组实际应用

表 1 风冷热泵机组实验参数

参数	数值
机组型号	KFR-23GW/DY GA (ES)
制冷剂代号	R22
室内机型号	KFR-23G/DY-GA (ES)
室内机输入功率最大值	1750 W
室内机输入电流最大值	8.4 A

续表 1

参数	数值
室外机型号	KFR-23W-040
室外机输入功率最大值	1150 W
室外机输入电流最大值	5.6 A
压缩机型号	44R243J
压缩机型式	立式全封闭
制热:额定功率	850+660 W
制热:额定电流	3.6+3.0 A
额定制热量	2700+660(PTC) W
制冷:额定功率	843 W
制冷:额定电流	3.7 A
额定制冷量	2350 W
电源	220 V/50 Hz
循环风量	500 m ³ /h

将神经网络学习速率设置为 0.95,误差系数设置为 0.1,基于 KFR-23GW/DY GA (ES) 机组性能,最大训练次数为 500,输出阈值 R_k 为 0.98,当 $Y_k > 0.98$ 时,表示存在冻霜,控制换热器进行加热,当 $Y_k < 0.98$ 时,表示不存在冻霜,换热器停止加热。

考虑到冬夏时节空调会长期且频繁使用,面对的冻霜数量较大,为此通过对比改进前后 BP 神经网络迭代速率验证除霜控制的准确性和实时性。结果如图 4 所示。

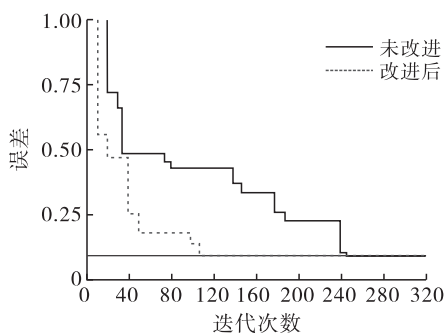


图4 改进前后 BP 神经网络训练迭代效率分析

通过图 4 收敛曲线可看出,改进后网络经过 102 次迭代后,误差值达到 0.095 8,符合预设误差需要;而改进前网络经过 253 次迭代后才将误差降为 0.1。训练结果表明,使用 NGO 算法改进后,BP 神经网络的全局寻优速度得到大幅度提升,不会过度拟合,网络性能可应对大量需实时处理除霜控制数据。

3.2 除霜控制效果分析

实验室外的环境温度为 -4°C ,相对湿度 70% RH,文献[3]方法、文献[4]方法与所提方法进行除

霜时风冷热泵排气、进口温度对比,记录结果如图 5、图 6 所示。

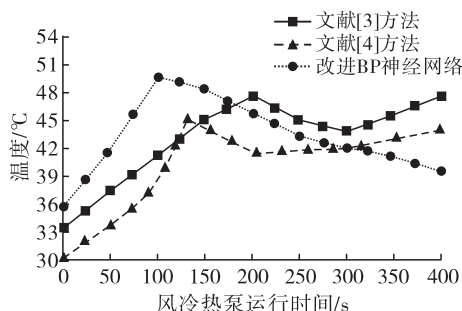


图5 除霜时风冷热泵排气温度对比图

由图 5 能够看出,在风冷热泵运行的前 170 s 内,使用改进后的 BP 神经网络进行除霜时,排气温度显著高于文献[3]和文献[4]所描述的方法。当运行时间超过 170 s 后,所提出的方法有效地解除了冻霜,排气温度出现了明显的下降,并稳定保持在大约 40°C 。这样的变化不仅加快了除霜的速度,提高了除霜效果,还有助于维持风冷热泵的稳定性和性能。综合分析,压缩机温度升温快是因为所提方法使用北方苍鹰优化算法对 BP 神经网络进行改进,使得网络能够更好地处理复杂的输入参数(包括空气侧换热器结霜相关参数和机组系统对结霜的影响参数),并基于这些参数智能地输出除霜开始时间和加热结束时间。这样,当风冷热泵运行时间达到 170 s 时,由于所提方法有效地识别了结霜状态并精准地控制了除霜过程,使得排气温度明显下降,从而实现了更快更好的除霜效果,并保证了风冷热泵的性能。

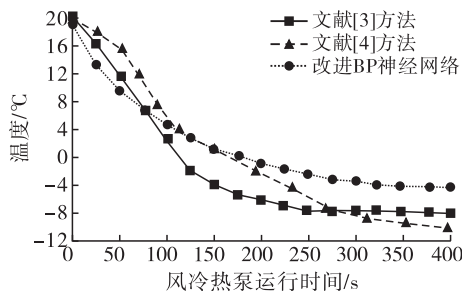


图6 除霜时风冷热泵进口温度对比图

由图 6 可以看出,相比排气温度,所提方法风冷热泵进行除霜时的 80 s 内,风冷热泵进口温度低于文献[3]方法和文献[4]方法,且整体的温度下降幅度慢。这主要是因为改进 BP 神经网络准确预测出了当前冰霜厚度,从而给出换热片的加热时间指令,恰好足够完全融化冰层,避免了反复加热情况的发生。这样做既保证了除霜效果,又尽可能节约了能源。

空调结霜到一定程度,将会出现堵塞空气通道,进而降低换热效率,为此将结霜时和除霜后的空气通道压力作为指标进行实验测试,结霜时的空气通道压力结果如图7所示,除霜后的空气通道压力结果如图8所示。

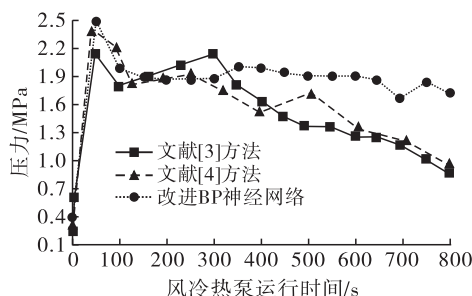


图7 结霜时风冷热泵压缩机排气压力图

通过图7可知,当机组运行到100 s时,空气管道出现了巨大压力,表明机器出现了冻霜。此时,所提方法通过智能控制,将运行压力波动维持在0.3 MPa,确保了压缩机压力的稳定,从而保障了机组的正常运行。相比之下,文献[3]方法和文献[4]方法虽然也能够维持压力在安全区间,但由于它们是通过不断开启和关闭换热器来实现的,这种方式不仅造成了大量能源浪费,还可能对机组造成不必要的损害。具体分析可知,所提方法的优势在于使用北方苍鹰优化算法改进BP神经网络,能够有效处理复杂的输入参数,智能地判断何时开始除霜以及何时结束加热,从而确保除霜过程的高效性和准确性。

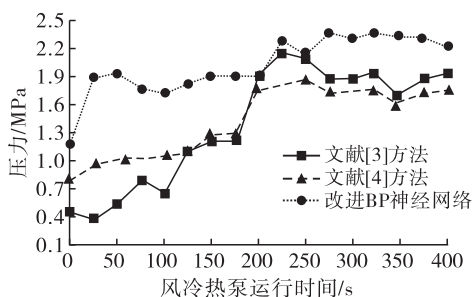


图8 除霜时风冷热泵压缩机排气压力图

通过图8可知,所提方法的排气压力是较稳定于文献[3]方法和文献[4]方法。这是因为改进BP网络是通过北方苍鹰优化算法对BP神经网络进行改进,网络能够更准确地预测霜层厚度,并根据预测结果智能地控制除霜开始时间和加热结束时间。这种精准的控制使得能量能够迅速且有效地在翅片上汇聚,从而在不需要太大运行压力的情况下达到融化霜雪的温度。相比之下,文献[3]方法和文献[4]方法采用的是反复加热的方式,这种方式不仅导致管道内压力不断跳跃波动,而且效率低下,浪费了大

量能源。而所提方法通过智能控制,实现了能量的高效利用和压力的稳定控制,从而显著提高了除霜效果和机组运行的稳定性。

4 结论

在空调运行过程中,换热片上的冰霜累积是一个不可避免的问题。初期少量的霜层对机组运行影响有限,然而随着霜层的不断加厚,它不仅会阻碍管道内的气体流动,还会堵塞空气通道,导致空间压力显著上升,进而严重影响机组的性能。针对这一问题,该文提出了通过北方苍鹰优化算法(NGO)对BP神经网络进行改进,以增强其全局寻优能力,从而实现风冷热泵的智能除霜控制。该方法结合质量守恒定理,通过计算控制单元进出口的含湿量差值来确定结霜量,并基于这一信息制定除霜策略。实验结果显示,改进后的方法显著提升了网络的收敛速度,能够迅速分析结霜过程中的各参数变化,并精准地控制除霜的开始和结束时间,降低了能源消耗,减少了排气压力,确保空调设备运行的高性能和平稳性。

参考文献:

- [1] 马龙霞,刘孜璇,王泮浩,等.带储液气液分离器的空气源热泵除霜系统研究[J].制冷学报,2022,43(02): 23-32.
- [2] 汪峰,汤锐,周玉玲,等. Cassie 润湿模式下竖直超疏水翅片的除霜特性[J].工程热物理学报,2022,43(06): 1460-1466.
- [3] 魏文哲,张佳明,孙育英,等.空气源热泵热水机除霜控制性能评价研究[J].暖通空调,2023,53(11): 1-6+149.
- [4] 任岩超,孙育英,王伟,等.基于不同本构配置的空气源热泵机组最佳除霜控制点实验研究[J].建筑科学,2022,38(04): 115-120.
- [5] MA G, LU T, LIU F, et al. Experimental study on hot liquid subcooling defrosting of an air source heat pump with multi-connected outdoor units[J]. Energy and buildings, 2023, 291 (Jul.): 113104. 1-113104. 9.
- [6] FENG H, WANG Z, WEI P. A novel index model for defrosting initiating time point of air source heat pump based on the cusp catastrophe theory[J]. Energy and buildings, 2022, 263 (May): 112016. 1-112016. 12.
- [7] 刘西安,陈海,冯荣杰,等.分段除霜持续供热空气源热泵系统除霜性能研究[J].太阳能学报,2023,44(11): 1-8.
- [8] 徐林彤,林木森,倪龙,等.闪发器型准二级压缩空气源热泵加速除霜实验[J].暖通空调,2023,53(11): 43-48.

(下转第128页)

- 性试验与结果分析[J]. 电子质量, 2020(05): 41 - 43 + 47.
- [7] 谷祖康, 卜占成, 金志军, 等. 热量表耐久性试验结果与问题分析[J]. 建设科技, 2015(02): 37 - 38.
- [8] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(08): 2041 - 2046.
- [9] 杨萌, 邓振立, 李虎军, 等. 基于分类 - 关联 - 修正的电力需求预测方法研究[J]. 自动化仪表, 2024, 45(04): 101 - 105.
- [10] 魏泽辉. 基于多元非线性回归分析的光伏发电系统经济模型预测研究[J]. 电站系统工程, 2024, 40(03): 1 - 5.

(上接第 93 页)

- [9] 张伟阳, 程树森. 浸入式水口吸入空气机理及吹氩量控制模型[J]. 钢铁, 2022, 57(10): 110 - 119.
- [10] 魏文哲, 徐林彤, 刘旭晨, 等. 准二级压缩空气源热泵补气加速除霜实验[J]. 制冷学报, 2023, 44(02): 47 - 53 + 60.
- [11] 宋帆, 马小晶, 王宏伟, 等. 基于分数阶的神经网络解耦控制优化方法[J]. 控制工程, 2022, 29(04): 692 - 698.
- [12] 蒋利炜, 何可人, 陈航. 基于 PSO 改进 BP 算法的直流电子负载 PID 控制仿真[J]. 计算机仿真, 2024, 41(1): 306 - 310.
- [13] 平旭, 杨富斌, 张红光, 等. 基于肖维勒准则与主元分析的有机朗肯循环神经网络建模方法[J]. 大电机技术, 2023(6): 70 - 76.
- [14] 李振宏. 大数据背景下基于 BP 神经网络的跨境电商皮革服装销量预测[J]. 中国皮革, 2023, 52(6): 104 - 109.
- [15] 许学彬, 陈博恒, 赵楠楠, 等. 基于 GA - BP 的改进高斯均值区域去噪技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(02): 107 - 113.
- [16] 江乐新, 余星, 王从权, 等. 基于 BP 神经网络的空调热水一体机除霜控制器模型的研究[J]. 制冷与空调, 2011, 11(4): 32 - 35.

(上接第 112 页)

- [8] 张文杰, 徐红梅, 李航, 等. 基于声阵列测试和声学边界元计算的粉碎机噪声源识别[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(2): 486 - 494.
- [9] 张威, 景国玺, 杨征睿, 等. 基于 RVMD - RobustICA - ST 联合相干性分析的电驱动总成噪声源识别[Z]. 汽车技术, 2023(5): 15 - 24.
- [10] 苏皓, 刘冬冬, 董太极, 等. 基于法布里 - 珀罗干涉的双电机转速测量[J]. 激光与红外, 2021, 51(12): 1649 - 1653.
- [11] 韩涛翼, 李纪永, 赵彧, 等. 高转速涡轮发动机转子临界转速计算[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(S01): 47 - 53.
- [12] 王爱辉, 王选择, 张瑜灿, 等. 基于振动信号精确主频求解实现发动机转速测量的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2023(6): 115 - 120.
- [13] 吕收, 李居伟, 郭昕钰. 基于 FXLMS 算法的直升机旋翼主动噪声控制的研究[Z]. 电子技术应用, 2023, 49(5): 99 - 104.
- [14] 卢炽华, 吴方博, 刘志恩, 等. 液压挖掘机驾驶舱窄带主动噪声控制研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(11): 167 - 175.
- [15] 鹿澳沅, 董宁娟, 陈逸笑, 等. 面向工程应用的在线建模主动噪声控制方法改进[J]. 振动与冲击, 2023, 42(20): 253 - 262.

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号: 52 - 49 国际发行代号: BM529 定价: 18.00 元/期 108.00 元/年
地址: 西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编: 710075 电话: 029 - 81871277
网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱: gyybbjb@126.com