

空气源热泵中光电转换测霜与类复叠循环 除霜相结合新技术

朱冬雪,褚红燕,鹿世化,宁婕妤,高晓蕾

(南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 分析了多种测霜、除霜技术的优缺点,提出将光电转换测霜与类复叠循环除霜相结合可获得更有效的测霜、除霜效果。具体内容包括:把现已成熟的光电原理运用到测霜装置上,用光电转换测霜,当光电信号的电压值达到除霜要求时,通过智能控制系统及时转换到除霜模式,高压压缩机继续制热,低压压缩机进行除霜循环,实现制热和除霜同时运行。实验结果表明,测霜、除霜技术的结合既避免了误除霜事故的发生,也保证了压缩机的稳定运行,且缩短了除霜时间,改善了除霜效果。

[关键词] 光电转换测霜,类复叠循环除霜,智能控制系统,误除霜

[中图分类号] TK519 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2018)04-0027-06

The New Technology of Combination of Photoelectric Conversion and Frost-Like Defrosting in Air Source Heat

Zhu Dongxue, Chu Hongyan, Lu Shihua, Ning Jieyu, Gao Xiaolei

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The advantages and disadvantages of various frosting and defrosting techniques are analyzed. It is proposed to combine the photoelectric conversion frosting with the cascade-like cyclic defrosting to obtain more effective frosting and defrosting effects. The specific contents include: applying the now mature photoelectric principle to the frost measuring device. In using photoelectric conversion to measure frost, when the voltage value of the photoelectric signal reaches the defrosting requirement, the intelligent control system switches to the defrosting mode in time. The high pressure compressor continue to heat. A Low-pressure compressor performs defrost cycle. It realizes heating and defrosting at the same time. The test results show that the combination of frosting and defrosting technology avoids the occurrence of false defrosting accidents and ensures the running stability, a shortening defrosting time and an improved defrosting effect of the compressor.

Key words: photoelectric conversion, frost-like defrosting, intelligent control system, false defrosting

空气源热泵(ASHP)技术作为国际公认的高效建筑节能技术,已在全球范围内得到广泛推广。欧盟、日本及我国已将其列为可再生能源技术范畴。“十三五”之后,国家大力宣传节能减排技术。以北京“煤改电”方面为例,空气源热泵是北京“煤改清洁能源”的重要类型。由于北京地区大量投入空气源热泵,空气中 PM_{2.5} 的浓度由 2015 年的约 112 mg/m³ 降至 2017 年的约 52.55 mg/m³。但在北方一些低温高湿地区,空气源热泵制热效果并不太理想。由于换热器表面易结霜,增加了换热热阻,能耗增加,一定程度上影响了人们对空气源热泵的投入使用。结霜初期,换热器表面少量冰晶体的生成使传热表面积增大,从而增强了换热,当换热器表面结霜严重时,霜层会增加室外侧空气与制冷剂的换热热阻。由于霜层占据了翅片间的局部甚至全部空间,通过换热器的空气流量减少,使室外换热器的换热性能变化,直接影响了换热效率,严重时会导致机组受损甚至停机^[1]。

国内外学者对热泵除霜问题进行了大量的研究。20 世纪 70 年代 Sanders^[2] 和 Niederer^[3] 建立蒸发器

收稿日期:2018-04-12。

基金项目:江苏省高校自然科学基金(16KJB120002)、国家自然科学基金青年基金(61603194)。

通讯联系人:褚红燕,博士,高级实验师,研究方向:非线性系统、网络控制系统。Email:63054@njnu.edu.cn

的除霜模型,在实验的基础上分析了除霜时能耗的分配情况. Hoffenbecker 等^[4]在 2005 年建立蒸发器热气除霜的动态模型,通过研究发现影响热泵室外换热器结霜的主要因素有环境温度、湿度. 除霜技术的关键是除霜进入点的识别方法,基本上可归纳为直接测量霜层厚度^[5]和间接测量霜层厚度^[6]两类方法. 达到除霜要求时,通过一些优化节能的除霜系统进行除霜,为人们提供更加舒适的环境.

1 热泵结霜特性研究

1.1 热泵结霜过程及其特性

在室外温、湿度恒定的条件下热泵定频运行,其结霜过程的特性参数变化如图 1 所示. δ_s 为霜层厚度, T_a 、 T_0 分别为室外环境温度和蒸发温度, ΔT 为 T_a 与 T_0 的差值, Q_k 为制热量. 翅片表面霜层生长大致可分为 3 个阶段:结霜初期,翅片表面温度低于露点温度并低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,翅片表面析出的水生成冰晶体,传热表面增大并变得粗糙,初期有增强换热的效果, ΔT 略有减小, Q_k 相对稳定;霜层扩张段,随着翅片表面霜层生长,空气流动阻力增大,空气流量减少,制冷剂与空气的传热热阻逐渐增大, T_0 、 Q_k 缓慢降低, ΔT 缓慢增大,随着结霜时间的延续, T_0 、 Q_k 的变化速率呈现增大的趋势;性能恶化段,随着 T_0 的加速降低, ΔT 快速增大, Q_k 快速降低,热泵工作性能恶化. 若室外环境温度降低或相对湿度增大,特性参数的变化速率增大,不发生趋势性变化;反之亦然.

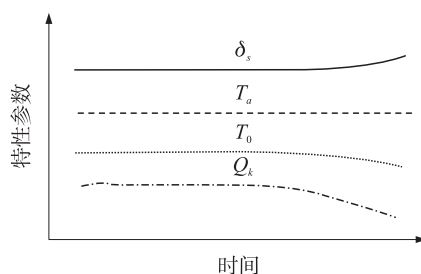


图 1 热泵结霜过程特性参数变化

Fig. 1 Variation of characteristic parameters of heat pump frosting process

1.2 传热分析

当蒸发器翅片表面结霜时,若忽略管壁热阻和管内垢层热阻,蒸发器的传热系数 K 为:

$$K = (1/\alpha_{a,e} + R_s + \tau/\alpha_b)^{-1}, \quad (1)$$

式中, $\alpha_{a,e}$ 为结霜工况下翅片管外表面的当量换热系数; R_s 为外表面积灰尘等所形成的附加热阻; α_b 为管内制冷剂沸腾换热系数; τ 为肋化系数. 结霜工况下的翅片管外表面当量换热系数 $\alpha_{a,e}$ 为:

$$\alpha_{a,e} = \eta [1/(\xi\alpha_a) + \delta_s/\lambda_s]^{-1}, \quad (2)$$

式中, η 为翅片管效率; ξ 为析湿系数; α_a 为空气侧换热系数,对于结构特性参数一定的翅片管而言,空气侧换热系数一般与迎面风速的 n 次方成正比,即 $\alpha_a \propto v^n$ (n 为小于 1 的正数); δ_s 、 λ_s 分别为霜层厚度和导热系数, $\lambda_s = 0.001\ 202\rho_s^{0.963}$, ρ_s 为霜层密度. 由式(1)和(2)可知,当蒸发器翅片表面霜层增厚时,换热热阻和空气流通阻力均增大,蒸发器过流空气量减小,导致空气侧换热系数 α_a 和蒸发器的传热系数 K 减小,使得蒸发温度与室外环境温度的差值 ΔT 逐渐增大,即呈现“霜层增厚→传热系数 K 减小→ ΔT 增大”的变化规律^[7].

2 空气源热泵的测霜、除霜方法

2.1 测霜方法

通过热泵结霜特性分析可知,霜层的加厚对系统的稳定高效运行产生很大影响,在蒸发器结霜达到一定程度时即需除霜. 理论上存在一个开始除霜的最佳时刻,即最佳除霜点. 目前采用的除霜起始控制方法主要有:

(1) 定时除霜法. 这种设定方式虽然能增强对极端天气的应对能力,但常规运行条件下常导致误除霜问题,出现不必要的除霜动作.

(2) 压差控制法. 空气通过蒸发器进出口压差值为主要监测参数,根据运行时间等因素定期调整设定值,但维护难度较大. 当风沙、灰尘等异物在翅片间隙中集聚时同样会使压差变大,会出现“无霜除霜”的误动作.

(3) 温差控制法. 控制蒸发温度与室外环境温度差值进行测霜. 由于全程监控过程中仅以单一的温度参数为控制项,故而判断得出的霜层厚度与实际情况会出现偏差,导致有时出现误除霜.

(4) 电流控制法. 当电流变化值达到预先设定值时,即发出除霜指令,但由于外部一些因素也会导致

误除霜现象产生。

(5) 自适应模糊控制除霜法. 根据热泵机组运行参数对结霜的响应, 结合热泵机组的工作环境条件, 通过对除霜过程中热泵机组状态的监测, 对上一次的控制量进行校正, 这样可使除霜控制自动适应环境参数的变化, 提高除霜控制水平. 该方法成本较高, 未被大量推广。

(6) 时间-温度控制除霜法. 温控器把盘管温度的变化信号输入时间继电器并开始对随后的除霜动作进行计时, 机组进入除霜模式. 除霜过程中, 盘管温度会逐渐上升, 当该值增至温度上限设定值或达到设定的最长除霜时间即视为霜已除尽. 该方法在时间量的基础上考虑了温度量, 部分地考虑了机组工作环境的影响, 但仍未能正确反映结霜对机组性能的影响, 同时也可能出现不必要的除霜运作或在需要除霜时不发出除霜信号^[8]。

(7) TEPS 测霜法. 该方法是一种新型的直接测量控制方法, 传感器原理如图 2 所示. 光电测霜传感器的光电信号具有良好的二值、线性、随动特性, 控制系统通过监测基于霜层厚度-光电信号转换数学模型的光电信号, 可直接测量霜层厚度. 测霜控制逻辑为: 无霜时, 传感器光通道的红外线透光率为 100%, 光电信号为 0 V; 结霜时, 红外线透光率由于霜层厚度升高而降低, 同时光电信号值升高; 当光电信号到达或超过设定值时 (如电压值 ≥ 10 V), 表明霜层厚度已到达除霜阈值, 机组进入除霜模式; 除霜过程中, 当光电信号恢复为 0 V 时, 机组除霜模式结束. TEPS 除霜控制方法可直接感知霜层存在和监测霜层生长, 可有效避免误除霜事故的发生^[9]。

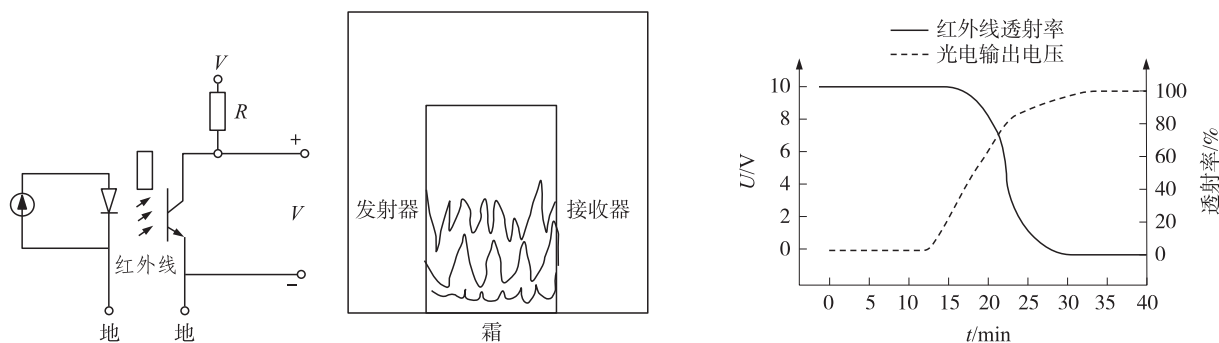


图 2 TEPS 除霜控制方法

Fig. 2 TEPS defrosting control method

2.2 除霜方法

为了达到节能除霜的目的, 除了通过以上测霜技术有效地测量出除霜起点, 还需找到一种更有效的除霜方法以达到节能舒适的要求. 在日常生活中, 常用的除霜方式有自然除霜、电加热除霜、水力除霜、逆循环除霜、热气旁通除霜. 工程实际运用中, 自然除霜、水力除霜、电加热除霜受到很大的限制, 而逆循环除霜和热气旁通除霜则很受青睐。

逆循环除霜是在需要除霜时通过四通换向阀的切换改变制冷剂的流向, 使蒸发器和冷凝器的作用交换, 同时风机停转, 利用管内制冷剂的热量除去霜层. 这是目前应用较为广泛的一种除霜方法, 该方法的优点是加热从霜层根部开始, 霜层容易脱落. 但也存在以下不足: 除霜时从室内吸取热量, 且在除霜完毕切换回制热模式时长时间吹不出热风, 造成室内环境温度波动较大, 舒适性较差, 同时四通换向阀切换时毛细管噪音较大, 对系统存在一定冲击. 为了使系统在逆循环除霜时具有较好的性能, 许多学者研究了系统的优化改进. 董云达等^[10]对采用不同节流装置 (热力膨胀阀、电子膨胀阀) 对空气源热泵机组除霜性能的影响进行了对比实验, 实验表明, 采用电子膨胀阀的除霜时间比采用热力膨胀阀的除霜时间缩短 11%. 王志毅等^[11]分析了热泵机组化霜差的主要原因是压缩机吸、排气压力较低导致制冷剂流量减小, 提出用制冷剂补偿器代替气液分离器的方法来提高机组的除霜性能, 得到了较为理想的结果, 但压缩机耗电量增大。

针对逆循环除霜存在的问题, 一些专业人士又提出了另外一种除霜方法——热气旁通除霜法. 热气旁通除霜时四通换向阀不需要切换动作, 开启热气旁通电磁阀, 关闭风机, 压缩机的排气从旁通电磁阀直接到达分液器, 然后进入室外换热器除霜. 石文星等^[12]在采用热气旁通除霜时, 通过对不同阻力的旁通电

电磁阀除霜进行了实验研究,实验显示,热气旁通法除霜可较大幅度地改善室内舒适性,旁通电磁阀的阻力大小影响着换热器除霜时间和除霜效果. Byun 等^[13]研究发现热气旁通法可以延缓霜层的形成,且当旁通流量为整个系统制冷剂流量的 20% 时效果最佳,但融霜的热量主要来源于压缩机的耗功和压缩机壳体蓄热. 黄东等^[14]分别采用逆循环除霜和热气旁通除霜法对一台空气源热泵冷/热水机组的运行特性进行了研究,实验表明,虽然热气旁通除霜法克服了逆循环除霜的许多缺点,但相对除霜时间较长. 孙福涛等^[15]提出了一种基于改变系统流程的新型除霜技术,在传统的二级压缩系统中增加了除霜支路和补热支路,在制热的同时可以进行除霜,系统热量不足时还可对系统进行补热,但除霜的切入点不好控制,过早过晚除霜都会对系统造成一定的影响.

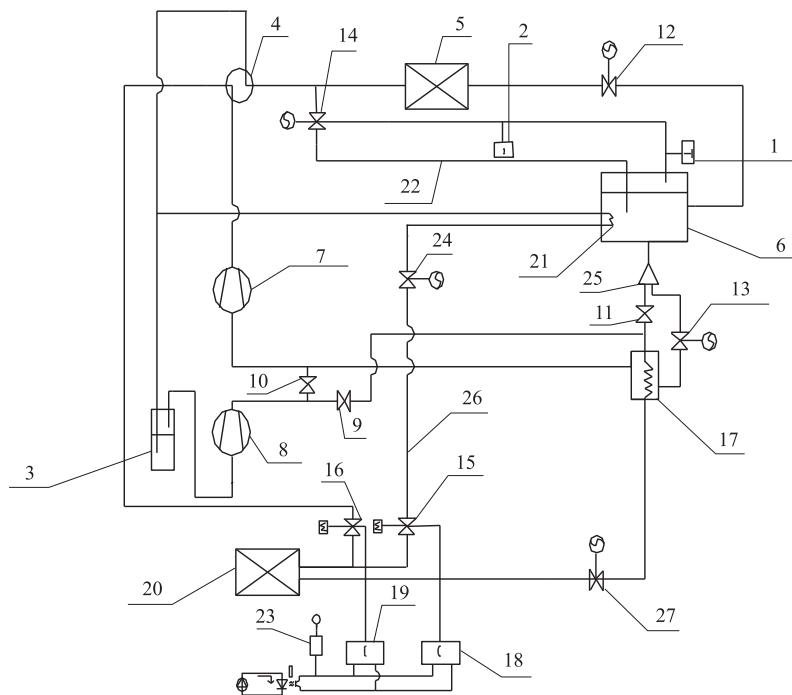
3 光电测霜与类复叠循环除霜系统的设计

针对上述测霜、除霜技术的不足,本文设计了一套光电测霜与类复叠循环除霜技术相结合的系统. 系统如图 3 所示. 系统在正常制热的情况下,当温度传感器 1 检测到高压储液器 6 内的温度降到设定值不足以提供正常制热循环所需的热量时,通过控制系统 2 打开补热支路 22 上的电动阀 14,调节开度,将高温蒸汽旁通 1 路到高压储液器 6 进行混合换热,使储液器内温度上升到一定的数值,关闭阀门. 当光电转换器 23 测到光电电压达到设定值时,表明霜层达到一定厚度,需进行除霜. 光电电压反馈到控制器 18,控制器自动打开除霜支路中 26 的电磁阀 15,同时关闭原来制热回路中的电磁阀 16,由低压压缩制热循环转换为除霜循环.

控制系统通过在翅片表面上的霜层测点将数据反馈到显示屏上,显示屏显示系统电压的变化,再通过系统来控制阀门的开度,来实现制热、除霜的切换.

低压除霜回路制冷剂流向为:低压压缩机 8(出口为中压过热气态制冷剂)→截止阀 9→经济器 17→电动阀 27→室外换热器 20(中压液态制冷剂)→电磁阀 15→电动阀 24→蒸发盘管 21(出口为低压气态制冷剂)→气液分离器 3→低压压缩机 8,从而完成除霜循环. 除霜的同时高压压缩机进行制热循环.

高压制热回路制冷剂流向为:高压压缩机 7(出口为高压过热气态制冷剂)→四通换向阀 4→室内换热器 5(高压饱和液态制冷剂)→电动阀 12→高压储液器 6→液体分流器 25→电动阀 13(中压液态制冷剂)→



1.温度传感器;2、18~19.控制器;3.气液分离器;4.四通换向阀;5.室内换热器;6.高压贮液器;7.高压压缩机;8.低压压缩机;
9~11.截止阀;12~14、24、27.电动阀;15~16.电磁阀;17.经济器;20.室外换热器;21.蒸发盘管;23.光电转换器;25.液体分流器

图3 新型除霜系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the new defrost system

剂)→经济器 17(出口为中压饱和和气态制冷剂)→高压压缩机 7,从而完成制热循环.除霜结束后,低级压缩循环又进行制热循环^[14].

4 计算分析

选取工质 R22,在冷凝温度 45 ℃、热负荷为 25 kW 下,分别对蒸发温度为-10、-20、-30 和-35 ℃ 进行热力计算,得到工况参数如表 1 所示.

表 1 工况参数

Table 1 Working condition parameters

蒸发温度 $T_o/^\circ\text{K}$	冷凝温度 $T_k/^\circ\text{K}$	中间温度 $T_m/^\circ\text{K}$
263.15	318.15	291.06
253.15	318.15	283.78
243.15	318.15	276.86
238.15	318.15	273.46

经过制热和除霜模式下系统的热力计算,对逆循环除霜技术和类复叠循环除霜技术进行比较,得到在一个除霜周期内制热 COP 的对比结果,如图 4 所示.

由表 1 及图 4 可知,类复叠循环 COP 比同一蒸发温度下逆循环 COP 高.由图 4 还可以看出,随着蒸发温度的升高,类复叠循环系统和逆循环系统的 COP 都升高,但在类复叠循环系统运行中,系统的 COP 增长速率较快,趋势较稳定.

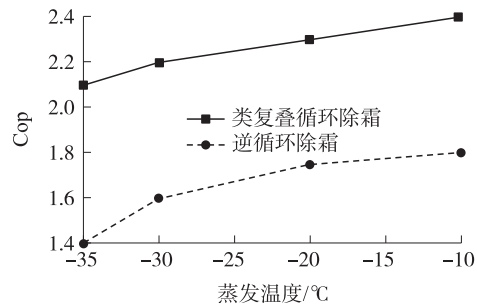


图 4 系统 COP 的比较结果

Fig. 4 Comparison of system COP results

5 结论

低温高湿地区空气源热泵结霜问题未得到很好解决.本文提出了一种新型的测霜、除霜技术,通过光电转换来直接测量霜层的厚度,当光电信号达到一定值时,类复叠循环系统打开除霜回路中的电磁阀进行除霜,实现制热和除霜同时进行.该系统在制热和除霜同时进行的情况下,系统 COP 比逆循环除霜系统 COP 高.同时,当高级压缩制热循环热量不足时可打开补热支路的电动阀,将高温蒸汽旁通一路到高压储液器进行混合换热,完成复温,可保证制热循环正常运行.

[参考文献] (References)

- [1] 曹小林,曹双俊,段飞,等.空气源热泵除霜问题研究现状与展望[J].流体机械,2011,39(4):75-77.
CAO X L, CAO S J, DUAN F, et al. Current situation and development prospect of air source heat pump defrosting research[J]. Fluid machinery, 2011, 39(4): 75-77. (in Chinese)
- [2] SANDERS C T. Frost formation; the influence of frost formation and defrosting on the performance of air coolers[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 1974.
- [3] NIEDERER D H. Frost and defrosting effects on coil heat transfer[C]//ASHRAE, 1976 Winter Conference. Texas: ASHRAE Transaction, 1976.
- [4] HOFFENBAKER N, KLEIN S A, RENDL D T. Hot gas defrost model development and validation[J]. International journal of refrigeration, 2005, 28(1): 605-615.
- [5] XIAO J, WANG W, ZHAO Y H, et al. An analysis of the feasibility and characteristics of photoelectric technique applied in defrost-control[J]. International journal of refrigeration, 2009, 32: 1350-1357.
- [6] 许东晟,陈汝东.除霜和除霜控制研究[J].流体机械,2006,34(1):69-73.
XU D S, CHEN R D. Study on defrost and defrosting control[J]. Fluid machinery, 2006, 34(1): 69-73. (in Chinese)
- [7] 曾晓程,王俊,王铁军,等.空气能热泵智能除霜技术研究[J].低温与超导,2017,45(12):91-94.
ZENG X C, WANG J, WANG T J, et al. Research on intelligent defrosting technique of air energy heat pump[J]. Cryogenics and superconductivity, 2015, 45(12): 91-94. (in Chinese)
- [8] 郑福珍,刘健,王全福.蒸发器除霜起点确定的理论与实验研究[J].应用能源技术,2013,12(12):45-48.
ZHENG F Z, LIU J, WANG Q F. In addition to theoretical and experimental study of frost point determined evaporator[J].

- Applied energy technology, 2013, 12(12):45-48. (in Chinese)
- [9] 王伟,刘景东,孙育英,等. 空气源热泵两种新型高效除霜控制方法的实测研究[J]. 制冷与空调, 2017, 17(3):67-76.
WANG W, LIU J D, SUN Y Y, et al. Field test study of two types of the novel efficient defrosting control methods for air source heat pumps[J]. Refrigeration and air-conditioning, 2017, 17(3):67-76. (in Chinese)
- [10] 董云达,付兰. 空气源热泵机组除霜性能实验研究[J]. 制冷与空调, 2007, 7(2):68-71.
DONG Y D, FU L. Experiment on defrosting performance of air source heat pump units[J]. Refrigeration and air-conditioning, 2007, 7(2):68-71. (in Chinese)
- [11] WANG Z Y, WANG X M, DONG Z M. Defrost improvement by heat pump refrigerant charge compen sating [J]. Applied energy, 2008, 85(11):1050-1059.
- [12] 石文星,李先庭,邵双全. 房间空调器热气旁通法除霜分析及实验研究[J]. 制冷学报, 2000(2):29-35.
SHI W X, LI X T, SHAO S Q. Experimental research on hot vapor bypass defrosting method[J]. Journal of refrigeration, 2000(2):29-35. (in Chinese)
- [13] BYUN J S, LEE J H, JEON C D. Frost retardation of an air-source heat pump by the hot gas by pass method[J]. Int J refrige-ration, 2008, 31(2):328-334.
- [14] 黄东,袁秀玲. 风冷热泵冷热水机组热气旁通除霜与逆循环除霜性能对比[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(5):539-543.
HUANG D, YUAN X L. Comparison of dynamic characteristics between the hot gas bypass defrosting method and reverse cycle defrosting method on an air to water heat pump[J]. Journal of Xi'an jiaotong university, 2006, 40(5):539-543. (in Chinese)
- [15] 孙福涛,蒲亮. 一种空气源热泵除霜新技术研究[J]. 制冷与空调, 2017, 17(4):7-10.
SUN F T, PU L. Research on a new defrosting technology applied to air-source heat pump[J]. Refrigeration and air conditioning, 2017, 17(4):7-10. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]