

文章编号:0253 - 4339(2016) 06 - 0013 - 07
doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2016. 06. 013

不均匀风速分布下翅片管换热器的优化分析与实验

王 强¹ 刘燕龙² 刘祖一³ 戴希灿⁴

(1 山东建筑大学热能工程学院 济南 250101;2 山东电力工程咨询院有限公司 济南 250013;
3 中国五洲工程设计集团有限公司 北京 100053;4 德州中傲空调设备有限公司 德州 253000)

摘 要 风速分布对翅片管换热器性能影响较大。本文在换热器结构尺寸、空气进口状态一定的条件下,对三种典型风速分布时翅片管换热器的流程布置形式进行了仿真优化与实验研究。结果表明:在上三角和中三角两种风速分布形式下,优化后制冷量分别提高了 10.3%、3%;对于上三角优化形式,高风速区是改善换热效果的重点区域;在制冷量相同的情况下,上三角优化形式使系统 COP 提高 8% 左右。搭建实验台对仿真结果进行了验证,表明模拟值和实验值相对误差均控制在 5% 以内。

关键词 翅片管换热器;不均匀风速;优化分析;实验验证

中图分类号:TB61⁺1; TB657. 5 **文献标识码**: A

An Optimized Design and Experimental Research on Finned-tube Evaporator with Nonuniform Air Distribution

Wang Qiang¹ Liu Yanlong² Liu Zuyi³ Dai Xican⁴

(1. School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, 250101, China; 2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, 250013, China; 3. China Wuzhou Engineering Group Co., Ltd., Beijing, 100053, China; 4. Dezhou Zhongao Air Conditioning Equipment Co., Ltd., Dezhou, 253000, China)

Abstract Airflow distribution has significant impact on the performance of finned-tube evaporator. Simulation optimization and experimental study were carried out of fin-tube heater exchange flow path form with three typical air velocity distributions, when the heat exchanger structure size and inlet air state were under certain conditions. The optimization demonstrates that the capacity is increased by 10.3% ,3% under upper-triangular and middle-triangular air distribution. The analysis on upper-triangular optimized form show that the high air velocity profile is the key of improving heat transfer performance, and the COP is increased about 8% with upper-triangular air distribution. An experimental rig was built and verification was carried out. The results showed that relative error was in 5% , which indicates that the optimized and experimental results are basically consistent.

Keywords finned-tube evaporator; nonuniform air distribution; optimization and analysis; experimental verification

翅片管换热器以其结构简单、适用范围广等特点,被广泛应用于制冷空调装置中。但由于运行环境、表面积灰等原因使得在实际运行中换热器迎面风速分布不均匀,导致性能降低。因此,如何有效减小风速分布不均对换热器性能的影响是现阶段研究的重点。

国内外学者在翅片管换热器的仿真模拟研究方面做了大量的工作。Domanski P A 等^[1-3]开发了 EVAP-COND 软件,并对不同制冷剂的蒸发器性能进行仿真研究。黄东等^[4-7]利用 EVAP-COND 软件对翅片管换热器做了大量的仿真研究,包括 R22 和 R410A 热泵性能随支路数的变化等。李权旭等^[8]研究了风速分布对双排管两流路蒸发器性能的影响。

张春路等^[9]研究了四种典型的不均匀风速分布形式及风速不均匀度对热泵空调中冷凝和蒸发两用换热器性能的影响,并对比了三种不同流路布置的换热器性能。综合相关文献研究可以看出,现阶段对翅片管换热器的仿真模拟,主要研究了支路数、风速分布等对换热器性能的影响。而对翅片管换热器流程形式优化的研究较少,也没有从对系统 COP 影响的角度进行的研究。

本文针对 R22 制冷剂,利用仿真软件对三种典型风速分布条件下翅片管蒸发器流程进行优化,提出了三种对应的优化流程布置形式,对优化后的换热器性能进行了研究,分析了其对系统 COP 的影响,并搭

建实验台对实验结果进行验证。

1 运行条件

为使研究结果具有参考性、对比性,换热器结构

参数、回路布置形式等与文献[7]相同,分别见表 1 和图 1;将蒸发器制冷剂出口状态作为设定条件,如表 2 所示。空气的进口状态采用 GB/T 7725—2004《房间空气调节器》^[10]规定的数

表 1 蒸发器尺寸参数
Tab.1 Parameters of evaporator

带翅管长/mm	管尺寸/mm	管间距/mm	排间距/mm	管数	翅片厚度/mm	翅片间距/mm	空气流量/(m ² /min)
400	φ9.52×0.35	25.4	22	2×24	0.11	1.5	25

表 2 模拟运行条件
Tab.2 Simulation conditions

进口干度	制冷剂		空气进口	
	出口饱和温度/℃	出口过热度/℃	干球温度/℃	相对湿度/%
0.2	5	5	27	50

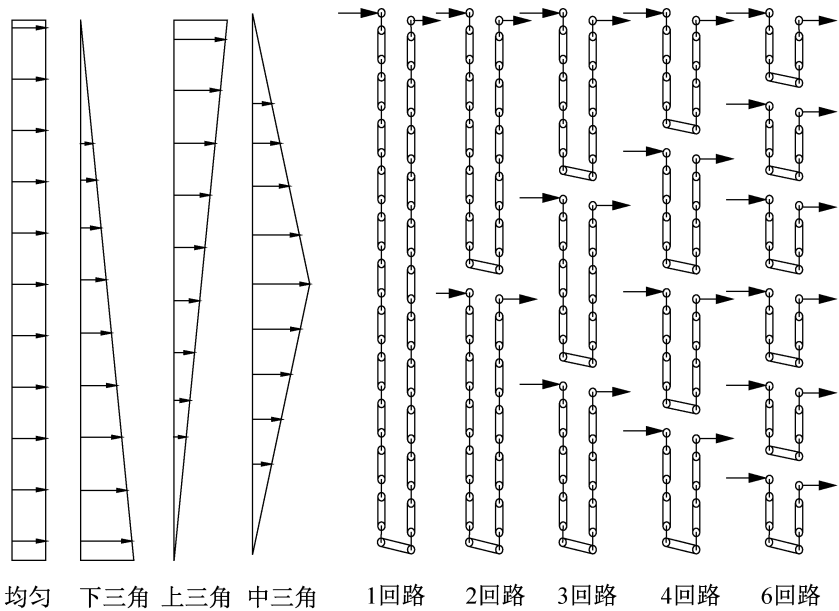


图 1 换热器结构参数及回路布置形式

Fig.1 Parameters of heat exchanger and circuit type

2 模拟结果及分析

对于制冷剂侧,先确定制冷剂侧两相区和过热区临界点,并采用相应的传热和压降公式。单相区的传热关联式采用 McAdams 公式,两相区的沸腾表面换热系数采用 Thom 公式。制冷剂在单相区的压降采用 Blasius 公式,两相区的压降采用 Muller Steinhagen 公式。

2.1 模拟结果

利用软件在设定的优化条件下进行仿真,可得到不同风速分布下,换热器对应的优化布置形式,如图 2 所示。

2.2 结果分析与研究

2.2.1 优化形式性能对比

图 3 为均匀风速优化形式、中三角风速优化形式和上三角优化形式 3 种不同优化形式换热器在图 1 所示 5 种不同回路布置下的换热量、制冷剂流量的比较。

图 3 对比结果表明:在上三角、中三角风速分布下,与图 1 中换热量最大的 3 回路形式相比,优化形式的换热量分别提高了 10.3% 和 3%;制冷剂流量分别增加了 9.3% 和 2.3%。优化形式能够较大幅度地提高蒸发器的换热量;上三角风速优化形式换热量、制冷剂流量提高比例更大,主要是由其风速不均匀性

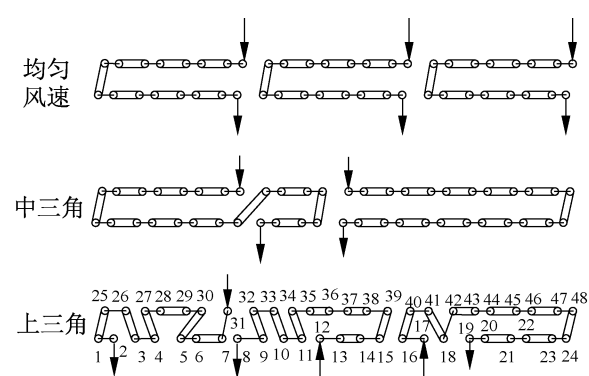
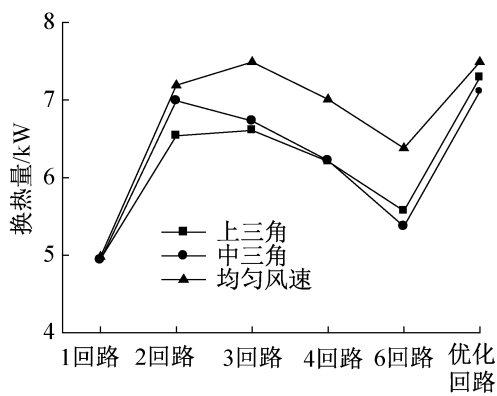
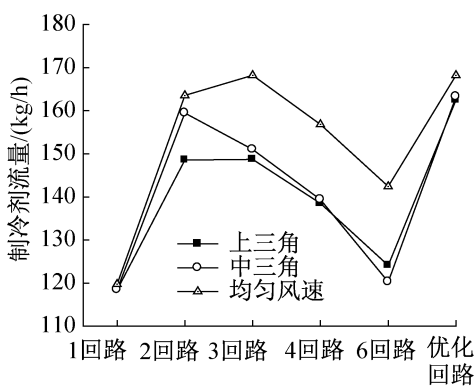


图 2 各风速分布下优化形式

Fig. 2 Optimization type with different air velocity distribution



(a) 制热量



(b) 制冷剂流量

图 3 优化形式对比

Fig. 3 Comparison of optimization type

大于中三角形式造成的,风速不均匀性越大,优化提高的空间也越大。

在制冷空调设备的实际运行过程中,风速分布受换热器外形尺寸、安装空间、风机等影响,往往是不确定的。为研究各优化形式在不同风速条件下的适用性,对各优化形式在 3 种不同风速分布条件下的换热量进行分析,如图 4 所示。

由图 4 可以看出,上三角优化形式换热器除在上三角风速分布条件下的换热量为最大之外,在均匀风

速和中三角风速两种风速分布条件下的换热量均为最小值;而中三角优化形式换热器除了在中三角风速分布条件下的换热量较大,在上三角及均匀风速条件下的换热量也较大,即对不同风速分布条件适应性较强。均匀风速优化形式换热器适应性也较强。若从换热器换热量平均值来反映 3 种优化形式换热器对不同风速分布条件的适应性,则均匀风速优化形式换热器换热量最大,而上三角优化形式换热器换热量最小;即在 3 种不同送风条件下,均匀风速优化形式换热器的适应性最强,上三角优化形式换热器的适应性最弱。

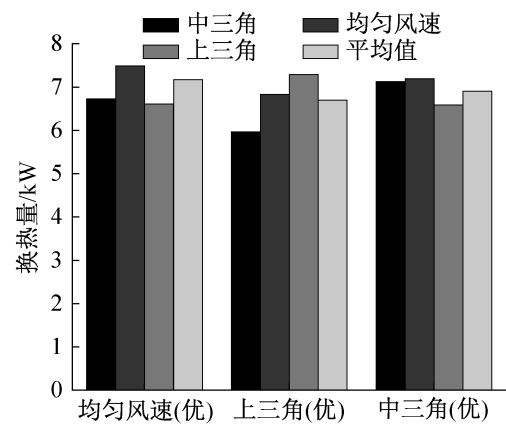


图 4 各优化形式在不同风速分布下的换热量

Fig. 4 Heating capacity of optimization type with different air velocity distribution

2. 2. 2 优化形式的研究

由以上分析可知,上三角优化形式换热器从换热量大小及对 3 种不同送风形式条件下的适应性两个方面都有较大的优化空间。因此本节将针对上三角风速分布下的优化形式,通过与图 1 给出的 3 回路形式进行对比,研究其换热规律。分析换热器换热系数、换热温差随风速变化规律,管段各排从左到右进行编号,如图 2 所示。

1) 管段进出口温差

由于压降的存在,制冷剂气液共存状态下,温度会下降或者保持不变。因此,从各管段制冷剂进出口温差变化情况(见图 5)可以看出:原 3 回路形式过热管段数分别为 6 段、3 段和 0 段,在高速区过热段较多,低速区回路的制冷剂没有达到过热状态;优化形式 3 个回路过热管段数分别为 1 段、2 段和 2 段,能较好地适应风速的变化,使各回路出口状态分布较为均衡,避免了风速大的区域过热管段较多,风速小的区域过热管段较少甚至没有达到过热的情况。

2) 换热规律分析

对上三角风速下优化形式的换热规律进行分析,

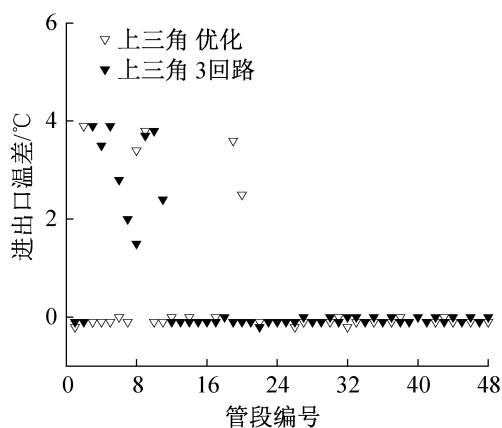


图5 各管段制冷剂进出口温差

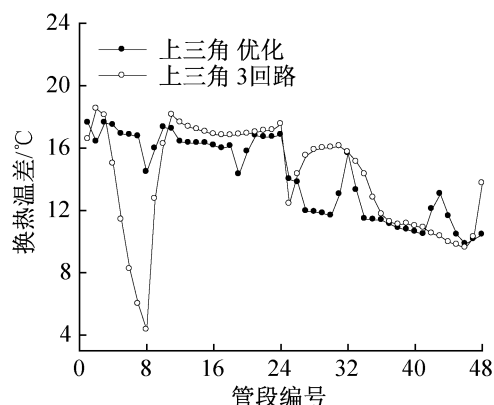
Fig. 5 Temperature differences of inlet and outlet in different tubes

研究优化形式的改进关键。已知各管段面积相同,可将换热系数 K 转换成面积与换热系数的乘积(KA)进行研究;图6给出了各管段面积换热系数(KA)、换热温差、换热量的变化情况。

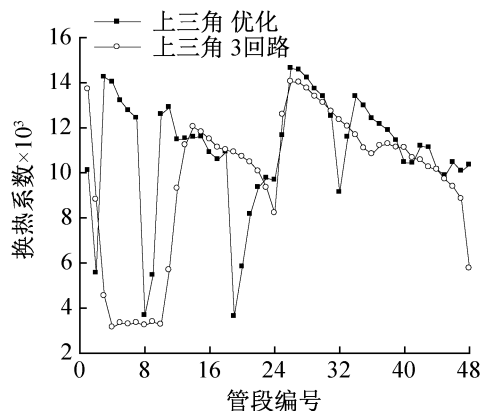
换热温差的大小能够反映换热器性能的差异。从图6(a)可以看出,上三角的风速分布对两种布置形式的换热温差都有影响。两排管的换热温差都随着风速的减小而逐渐减小,且第二排管温差减小的幅度大于第一排管。由于处于迎风侧,第一排管换热温差总体上大于第二排管。优化形式换热温差随风速分布的变化更为平稳。在高速区,原3回路形式出现了多个管段换热温差急剧下降的情况,而优化形式换热温差变化波动不大。

从图6(b)可以看出两种回路形式在换热系数上的差异:第一排管主要体现在高速区,在高速区优化形式的换热系数明显大于原3回路形式,但由于回路布置形式的原因,各管段干度不同使沿风速方向换热系数变化较大;对于第二排管,优化形式的换热系数总体上是大于原3回路形式的;优化形式换热系数小于原3回路形式的管段,主要是集中在第一排(迎风管)低速区。

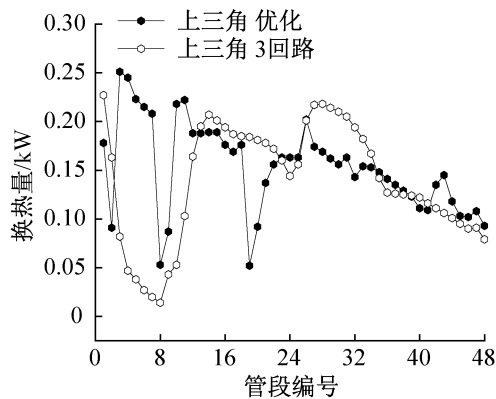
通过对换热温差、换热系数的分析及图6(c)可知:除第一排管高速区管段外,原3回路形式换热温差都大于优化形式,且在第一排管低速区部分管段的换热系数也是大于优化形式的。由此可知优化形式换热量高于原3回路形式的原因有:第二排管和第一排管低速区的换热系数;第一排管是换热系数和换热温差共同作用。优化形式在换热量上的优势主要体现在高速区,这一区域也是换热器换热最为剧烈的区域。从图7也可以看出,两种形式各回路换热量的差值在高速区最大。因此对高速区的优



(a) 换热温差



(b) 换热系数



(c) 换热量

图6 两种流程形式中各管段参数变化

Fig. 6 Parameters of different tubes in two flow paths

化是翅片管换热器设计改进的重点。

3) 系统性能分析

上文分析可知,原来3回路形式在蒸发温度为 5°C 时,制冷量为 6.61 kW 。用EVAP-COND软件计算出优化回路在相同制冷量(6.61 kW)的情况下,蒸发温度为 6.7°C ,对采用两种回路形式蒸发器的制冷系统COP进行计算。

为了进行对比分析,控制系统中蒸发器、吸气管、排气管、压缩机等其他设备参数不变,利用制冷循环计算软件Solkane进行计算。输入参数如表3所示。

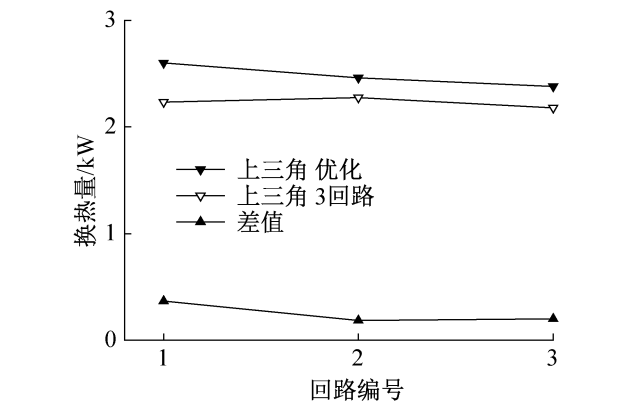


图 7 各回路换热量

Fig. 7 Heating capacity of different circuits

表 3 Solkane 输入参数		
Tab.3 Inlet parameters in Solkane		
冷凝器	冷凝温度/ ℃	40
	过冷度/ ℃	5
	压降/ kPa	50
压缩机	等熵效率	0.8
吸气管	压降/ kPa	10
	过热/ ℃	5
排气管	压降/ kPa	10
	温度损失/ ℃	5

由计算结果可知,原 3 回路形式系统 COP 为 4.8,优化形式系统 COP 为 5.2,提高了 8%。可见对换热器回路形式的优化不仅提高了换热器换热效果,而且有效改善了制冷系统的性能。

3 仿真结果实验验证

3.1 实验装置

为验证仿真结果的准确性,利用焓差实验室搭建实验台。实验装置流程如图 8 所示,利用焓差室分别模拟室内外环境,通过计算孔板尺寸大小(见图 9)对风速分布进行调节,电子膨胀阀调节制冷剂流量。

蒸发器进出风温度可自动测定并记录;蒸发器各回路制冷剂进出口温度及流量通过布置测点测得;各种温度和模拟信号的数据采集均采用 Agilent 34970A 型采集器完成,数据采集时间为 6 s,每 30 个一组数据,取平均值,实验室软件 testar 对换热量等自动计算。

3.2 实验结果及验证

实验过程主要测得参数为蒸发器换热量(进出

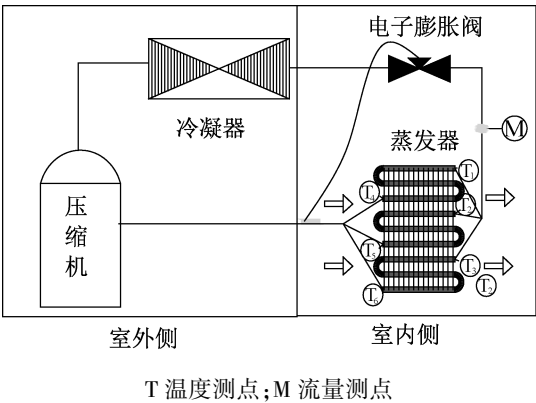


图 8 实验原理图

Fig. 8 Experiment schematic

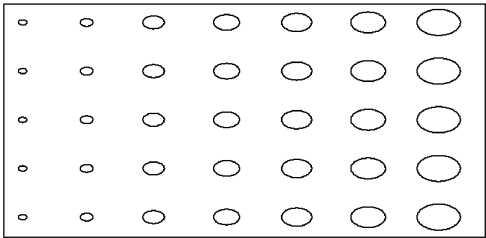


图 9 风速调节孔板示意图

Fig. 9 The orifice plate for velocity modulation

风状态)、制冷剂流量、制冷剂进出口温差,将实验测得数据与模拟结果进行对比,控制相对误差在 5% 内为可接受范围。

图 10 所示为换热量模拟结果与实验结果分析。三种优化形式在对应风速分布下模拟值均高于实验值;模拟结果最大误差为 4.85%,出现在上三角优化形式。

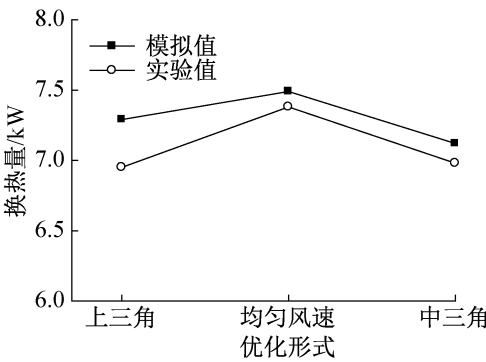


图 10 换热量及各测点制冷剂温度相对误差

Fig. 10 Relative error of the capacity and temperature of refrigerant

各优化形式在对应风速分布下对各温度测点制冷剂温度实验值与模拟值分析见表 4。可知,温度模拟相对误差略大于换热量相对误差,上三角形式的模

拟结果误差最大,最大值为 4.57%。

表 4 各温度测点相对误差
Tab. 4 Relative error of temperature measuring points

测点	中三角			上三角			均匀风速		
	模拟值/℃	实验值/℃	相对误差/%	模拟值/℃	实验值/℃	相对误差/%	模拟值/℃	实验值/℃	相对误差/%
1	8.8	9.2	4.3	6.4	6.7	4.5	6.5	6.7	3.0
2	8.8	9.1	3.3	6.4	6.6	3.0	6.5	6.7	3.0
3	—	—	—	6.4	6.7	4.5	6.5	6.8	4.4
4	9.7	10.2	4.9	9.0	9.3	3.2	10.0	10.5	4.8
5	8.5	8.95	5.0	12.4	12.9	3.9	8.5	8.9	4.5
6	—	—	—	11.3	11.7	3.4	11.4	11.7	2.6

表 5 所示为各优化形式在对应风速分布下制冷剂流量模拟与实验结果。可以看出,制冷剂流量模拟相对误差较小,最大值为 3.83%;与换热量及各测点温度相对误差结果类似,上三角形式的相对误差最大,均匀风速时最小。

表 5 制冷剂流量模拟值相对误差
Tab. 5 Relative error of refrigerant mass flow

项目	上三角	均匀风速	中三角
模拟值/(kg/h)	162.49	168.22	163.23
实验值/(kg/h)	156.5	164.8	158.75
相对误差/%	3.83	2.08	2.82

从上文分析可知,换热量、各测点温度、制冷剂流量模拟相对误差最大值分别为 4.85%、4.57% 和 3.83%,均在 5% 可接受范围之内。

4 结论

本文对三种常见风速分布形式下翅片管换热器性能进行仿真优化分析,并利用焓差室搭建实验台对仿真结果进行了实验验证,得到如下结论:

- 1)提出了翅片管蒸发器在三种风速分布下的优化形式,其中上三角、中三角两种风速分布下,换热量分别比文献[7]中最高制冷量提高了 10.3% 和 3%;
- 2)对三种风速分布下的换热器优化形式进行比较。中三角优化形式换热器除了在中三角风速分布条件下的换热量较大,在上三角及均匀风速条件下的换热量也较大,即对不同风速分布条件适应性最强,均匀风速优化形式换热器对不同风速分布条件适应性次之,而上三角风速分布下换热器优化形式的适应性较弱。
- 3)高风速区是换热器优化的重点,上三角优化形式有效改善了高风速区换热效果,使得各回路换热

更加均衡;上三角风速下优化形式可以有效改善制冷系统性能,在相同制冷量条件下,上三角优化形式比原 3 回路形式 COP 提高 8%。

4)搭建实验台对模拟结果进行验证,结果表明,模拟值相对误差均在 5% 范围内,模拟结果与实验结果较为吻合。

本文受住房和城乡建设部科技计划(2013-K1-40)项目资助。(The project was supported by Program for Science and Technology of Ministry of Housing and Urban-Rural Development (No. 2013-K1-40).)

参考文献

[1] Domanski P A. Simulation models for finned tube heat exchangers, EVAP-COND [CP/DK]. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology [2006-08-12]. <http://www.nist.gov/software/EVAP-COND>.

[2] Domanski P A, Yashar D, Kaufman K A, et al. An optimized design of finned-tube evaporators using the learnable evolution model[J]. HVAC & R Research, 2004, 10(2): 201-211.

[3] Domanski P A, Yashar D, Kim M. Performance of a finned-tube evaporator optimized for different refrigerants and its effect on system efficiency[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(6): 820-827.

[4] 黄东, 吴蓓. 风速非均匀分布对蒸发器性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(9): 6-10. (HUANG Dong, WU Bei. Effect of non-uniform air velocity distribution on evaporator performance [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(9): 6-10.)

[5] 黄东, 孙敏超, 贾杰楠, 等. 风速分布对单流路双排管蒸发器性能影响的模拟研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(5): 36-39, 65. (HUANG Dong, SUN Minchao, JIA Jienan, et al. Simulation of effect of air velocity distribution on performance of two-row finned tube evaporator

- with one flow path[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(5): 36-39, 65.)
- [6] 黄东, 李权旭. R22 与 R410A 热泵中蒸发器性能随支路数变化的比较[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 58-62. (HUANG Dong, LI Quanxu. Performance comparison of evaporator with circuit number change in heat pump using R22 and R410A [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(7): 58-62.)
- [7] 黄东, 陈群, 袁秀玲. 支路数对热泵空调中冷凝和蒸发两用换热器性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5): 543-548. (HUANG Dong, CHEN Qun, YUAN Xiuling. Effect of circuit number on the indoor coil serving as both condenser and evaporator in heat pump [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(5): 543-548.)
- [8] 李权旭, 孙敏超, 黄东. 风速分布对双排管两流路蒸发器性能影响的模拟研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(5): 50-55. (LI Quanxu, SUN Minchao, HUANG Dong. Simulation of effect of air velocity distribution on performance of two-row finned tube evaporator with two circuits [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(5): 50-55.)
- [9] 张春路, 高洁. 非均匀风速下翅片管换热器制冷剂流路稳健设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 103-108. (ZHANG Chunlu, GAO Jie. Robust design of fin-and-tube heat exchanger's refrigerant circuitry subject to different air maldistributions [J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 2014, 42(1): 103-108.)
- [10] 中国家用电器研究院. GB/T 7725—2004 房间空气调节器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [11] 金听祥, 曹玉龙, 罗志明, 等. 采用铜铝复合管的翅片管换热器换热性能数值模拟与实验研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(1): 82-87. (JIN Tingxiang, CAO Yulong, LUO Zhiming, et al. Numerical simulation and experimental research on substitute aluminum clad copper tube in finned tube exchanger[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(1): 82-87.)
- [12] 刘建, 魏文建, 丁国良, 等. 翅片管式换热器换热与压降特性的实验研究进展——实验研究[J]. 制冷学报, 2003, 24(3): 25-30. (LIU Jian, WEI Wenjian, DING Guoliang, et al. Development of study on heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchanger—experimental study [J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(3): 25-30.)
- [13] 张杰, 谷波, 方继华. 受限空间中翅片管换热器的性能分析[J]. 制冷学报, 2014, 35(2): 36-43. (ZHANG Jie, GU Bo, FANG Jihua. Performance analysis on the fin-tube heater exchanger in limited space [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(2): 36-43.)
- [14] 张圆明, 丁国良, 马小魁. 带亲水层波纹翅片管换热器空气侧特性的参数影响分析[J]. 制冷学报, 2007, 28(2): 13-18. (ZHANG Yuanming, DING Guoliang, MA Xiaokui. Influence of parameters on airside performance of wavy fin-and-tube heat exchanger with hydrophilic coating under dehumidifying conditions [J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(2): 13-18.)
- [15] 詹飞龙, 唐家俊, 丁国良, 等. 波纹翅片管换热器表面粉尘沉积特性的实验研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(2): 16-21, 45. (ZHAN Feilong, TANG Jiajun, DING Guoliang, et al. Experimental study of particle deposition characteristics on wavy finned-tube heat exchanger [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(2): 16-21, 45.)
- [16] 王婷, 谷波, 韩华. 水-空气翅片管换热器变工况、变结构特性模型分析[J]. 制冷学报, 2011, 32(3): 29-37. (WANG Ting, GU Bo, HAN Hua. Model analysis on the performance of fin-tube heat exchanger with variable condition/structure [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(3): 29-37.)

通信作者简介

王强,男,教授,山东建筑大学热能工程学院,13964173540, E-mail: xjdwq@163.com。研究方向: 制冷空调系统优化和低温冷藏链。

About the corresponding author

Wang Qiang, male, professor, School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, +86 13964173540, E-mail: xjdwq@163.com. Research fields: refrigeration & air-conditioning system optimization and low temperature cold chain.