

非均匀风速下翅片管换热器冷剂流路稳健设计

张春路, 高 洁

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 非均匀风速分布对翅片管换热器的性能影响显著. 采用 EVAP-COND 软件, 针对 R22 和 R410A 两种制冷剂, 在空气进口状态、流量、换热器的几何结构尺寸相同的情况下, 研究了 4 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, 结果表明: 蒸发器性能受不均匀风速分布的影响比冷凝器更显著, 且风速不均匀度越大, 换热器的性能越差; 通过优化换热器的流路布置可以明显提高换热器的性能. 提出一种全交错型流路设计, 显著降低了风速分布变化对换热器性能的影响.

关键词: 换热器; 空气不均匀分布; 流路布置; 仿真

中图分类号: TB65

文献标志码: A

Robust Design of Fin-and-tube Heat Exchanger's Refrigerant Circuitry Subject to Different Air Maldistributions

ZHANG Chunlu, GAO Jie

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Air maldistribution has significant impact on the fin-and-tube heat exchanger performance. In heat pump applications, the influence of four typical air maldistributions on both evaporator and condenser performance was numerically investigated with the simulation software EVAP-COND. For comparison, two refrigerants R22 and R410A, three different refrigerant circuitry designs, and four levels of air maldistributions were taken into account. The results show that air maldistribution has more significant impact on the evaporator performance than the condenser. The heavier the air maldistribution, the worse the heat exchanger performance. Heat exchanger performance can be much improved with well designed refrigerant circuitry. The proposed interlaced refrigerant circuitry design has more robust performance subject to variable air maldistributions.

Key words: heat exchanger; air maldistribution; circuitry design; simulation

翅片管风冷换热器广泛应用于制冷空调装置中. 由于换热器通常安装于受限空间内, 所以迎面风速往往不均匀分布, 造成换热器的制冷剂流路布置对系统性能有显著影响. 在热泵空调中, 室内换热器在制冷运行时为蒸发器, 制热运行时为冷凝器, 而室外换热器则反之. 室内换热器有多档风速变化、甚至变频无级调速. 风速的变化同时会造成风速不均匀分布的变化. 在火车、地铁等空调制冷系统中, 由于运行速度及环境的变化导致风压变化, 换热器迎面风速的大小及不均匀分布会相应变化. 此外, 在换热器的使用过程中, 由于翅片表面氧化或积灰等原因也会造成迎面风速及其分布的改变. 因此, 在翅片管换热器制冷剂流路设计时, 如何降低风速不均匀分布及其变化对换热器性能的影响是一个关键技术问题.

由于翅片管换热器设计涉及的变量多, 且互相影响, 因此难以通过单一的实验手段进行研究. 目前, 国内外越来越多的学者利用计算机仿真技术对翅片管换热器的性能进行模拟与分析^[1-2]. Domanski 等^[3]开发了 EVAP-COND 软件^[4]并使用其对不同制冷剂的蒸发器性能进行了模拟分析. 黄东等^[5-6]也采用该软件对翅片管蒸发器在风速不均匀分布时的性能进行了研究, 换热器流路为常见的平行布置. 柳成文等^[7]针对 50kW 空气源热泵 V 形风侧换热器, 仿真研究了风速分布不均匀对其换热器性能的影响. 而最近 KÆrn 等^[8]通过仿真研究了一个双排、双支路蒸发器在风速不均匀分布下的性能, 研究表明采用 X 型的流路交错布置(一个支路为逆流、另一个支路为顺流)和出口状态控制可以有效降低风速不

收稿日期: 2013-01-22

基金项目: 上海市教育委员会科研创新项目(11ZZ30), 中央高校基本科研业务费专项

第一作者: 张春路(1971—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为制冷空调系统仿真、优化与控制.

E-mail: chunlu.zhang@gmail.com

均匀分布对换热器性能的影响. 综合迄今的相关研究可以发现: 风速不均匀分布对换热器性能的影响多采用仿真手段; 多数研究者指出了风速不均匀分布可能对换热器性能造成显著的负面影响, 但如何通过改进流路设计来降低其影响的深入研究不多; 实践中具体的换热器风速分布往往难以获得, 而且风速分布还会在实际运行中发生变化, 对此研究者未予以足够重视; 热泵型机组在制冷和制热两者模式下制冷剂的流向会反向, 导致风速不均匀分布下的流路布置更为复杂, 相关研究缺乏.

本文针对热泵型机组, 通过仿真手段研究不同的风速不均匀分布形式和不均匀程度下翅片管换热器(制冷时为蒸发器、制热时为冷凝器)流路的稳健设计, 即通过流路设计降低风速不均匀分布对换热器性能的影响, 特别是提出并研究了全逆流(冷凝器)流路全交错布置对换热器性能的改善.

1 仿真工具与运行条件

1.1 仿真工具介绍

尽管作者所在的团队也开发了翅片管换热器仿真软件, 但是为了方便读者进行对比研究, 本文采用美国国家标准与技术研究院 NIST 开发的、可以免费下载使用的 EVAP-COND 3.0 软件. 该软件适用于 5 排以内的翅片管蒸发器和冷凝器仿真, 可以进行制冷剂流路设计, 且考虑了一维的风速不均匀分布. 该软件也提供了不同的换热与压降关联式供用户选择, 本文计算均采用软件推荐的默认选项.

1.2 仿真的运行条件

本文研究风速分布情况对某一热泵型空调机室内换热器性能的影响, 换热器的结构参数见表 1. 制冷剂选用 R22 和 R410A 两种, 以加强结论的通用性. 在制冷运行时, 室内换热器为蒸发器, 其运行工况参数见表 2. 制热运行时, 室内换热器为冷凝器, 其运行工况参数见表 3. 其中, 进口空气的干球和湿球温度采用了国标工况值, 而制冷剂侧参数采用了实践中的典型值.

对于风速分布的设定, 考虑了各种有代表性的分布. 除了均匀分布以外, 分别考虑上三角、下三角、正三角、倒三角 4 种情况(如图 1 所示, 按 EVAP-COND 3.0, 假设换热器是水平放置, 空气由下朝上流动). 此外, 考虑到风速分布的不均匀程度也会影响换热器的性能, 又将最小风速与最大风速的比值分为 1:2、1:5、1:10 三种情况.

表 1 换热器结构参数

Tab.1 Specifications of heat exchanger

布置	管排数/排	3
	每排管根数/根	12
换热管	管长/mm	580
	管内径/mm	6.8
	管外径/mm	7.3
	管间距/mm	20
	排间距/mm	18
	内表面 换热管材料	内螺纹 铜
翅片	翅片厚度/mm	0.11
	翅片间距/mm	1.4
	翅片类型	波纹片
	翅片材料	铝
风机	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	7
	功率/W	50

表 2 蒸发器的运行工况

Tab.2 Operating conditions of the evaporator

进口干度	制冷剂侧参数		空气侧进口参数		相对湿度
	出口饱和 温度/ $^{\circ}\text{C}$	出口过 热度/ $^{\circ}\text{C}$	干球 温度/ $^{\circ}\text{C}$	湿球 温度/ $^{\circ}\text{C}$	
0.19	7	5	27	19	0.5

表 3 冷凝器的运行工况

Tab.3 Operating conditions of the condenser

进口饱和 温度/ $^{\circ}\text{C}$	制冷剂侧参数		空气侧进口参数		相对湿度
	进口 温度/ $^{\circ}\text{C}$	出口过 冷度/ $^{\circ}\text{C}$	干球 温度/ $^{\circ}\text{C}$	湿球 温度/ $^{\circ}\text{C}$	
50	80	20	20	15	0.5

由于是热泵型空调, 所以室内换热器的流路设计应采用直进直出的设计(中间没有分流或汇流). 同时, 当换热器在制冷工况下按蒸发器运行时, 制冷剂沿管排的流向应该与空气流向一致(即顺流), 这样在制热工况下按冷凝器运行时可以保证制冷剂与空气是逆流换热、有效降低局部换热温差的不均匀性, 从而保证系统有较高的季节能效比. 如图 2 所示, 换热器的制冷剂流路设计为三路, 并给出了三种流路布置方式: 第一种方式是平行布置, 三条支路都只占三分之一的迎风面; 第二种方式是半交错布置, 有两条支路交错布置, 占三分之二的迎风面; 第三种方式是全交错布置, 三条支路都基本布满了整个迎风面. 图 2 中箭头是换热器作为蒸发器时制冷剂的流向, 因此流路的起始节点就是蒸发器的制冷剂入口.

3 仿真结果与分析

仿真结果如图 3~图 8 所示. 为了凸显出风速不均匀分布与风速均匀分布时的差别, 在绘制仿真结果图时, 纵坐标为不同风速分布下的换热量除以风

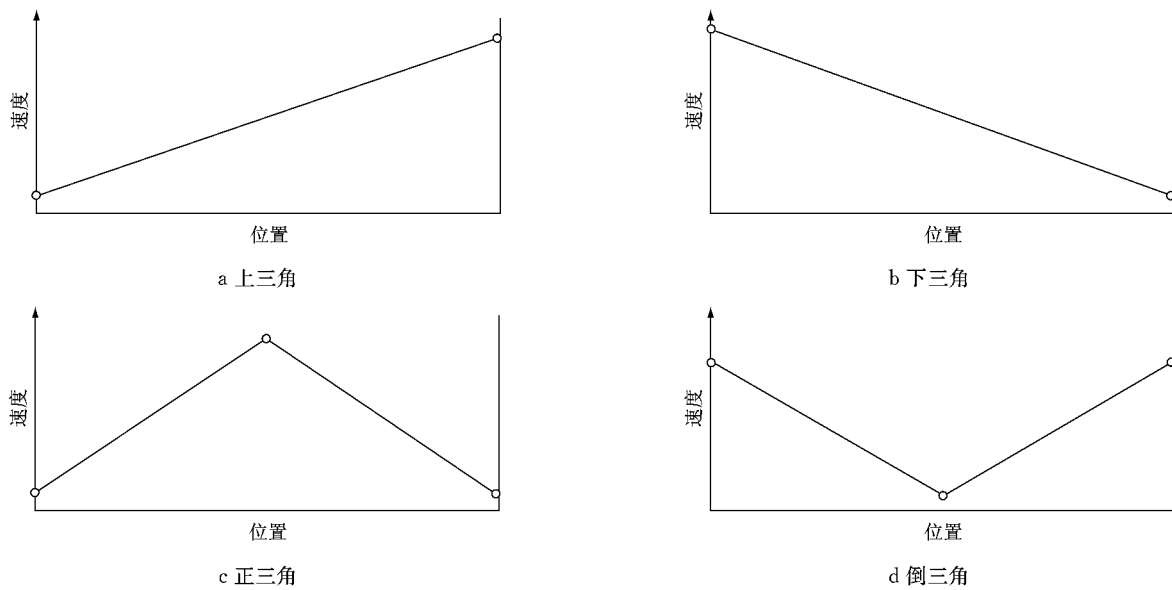


图1 风速分布4种情况图

Fig.1 Four typical air velocity maldistributions

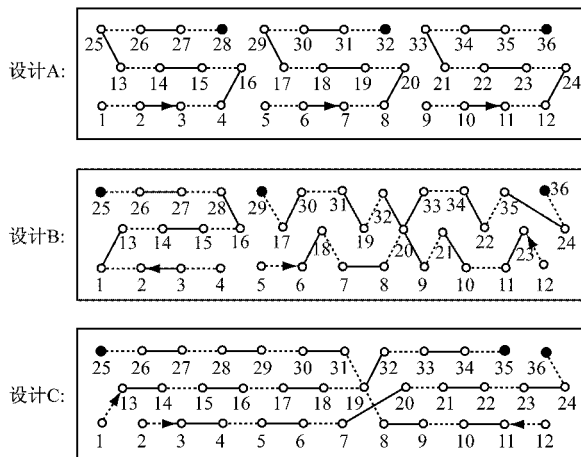


图2 换热器制冷剂流路的不同设计

Fig.2 Different refrigerant circuitry designs of heat exchanger

速均匀分布时的换热量. 因此, 数值越接近 1 就表示换热量越接近风速均匀分布时的值. 此外, 为了便于

比较, 图 3~图 8 的纵坐标刻度采用了相同设置.

流路设计 A 的仿真结果如图 3 和图 4 所示. 由于每条支路都只占三分之一迎风面, 风速低、风量小的一侧支路换热能力不足, 而风速高、风量大的一侧支路换热能力过剩, 导致换热器平均换热能力下降. 风速上三角分布时, 蒸发器的换热效果最差, 正三角分布时, 换热效果最好.

流路设计 B 的仿真结果如图 5 和图 6 所示. 由于有两条支路交错布置, 通过这两个支路的平均风速或风量是相近的, 这一改变使得风速倒三角分布时, 蒸发器换热效果有了明显提高. 但是在上三角风速下, 蒸发器换热效果反而恶化.

流路设计 C 的仿真结果如图 7 和图 8 所示. 由于全交错流路设计, 每条支路都遍历整个风速分布, 所以三条支路的换热能力比较相近, 不同风速分布下换热器性能更为稳定.

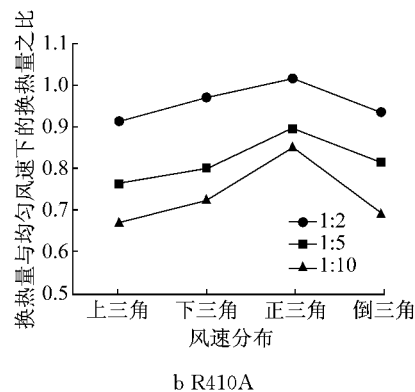
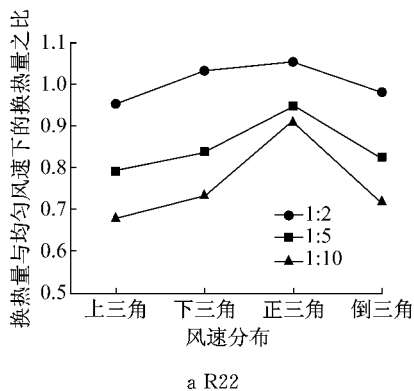


图3 蒸发器换热量随风速分布的变化(设计 A)

Fig.3 Variation in evaporator capacity with air velocity distribution (Design A)

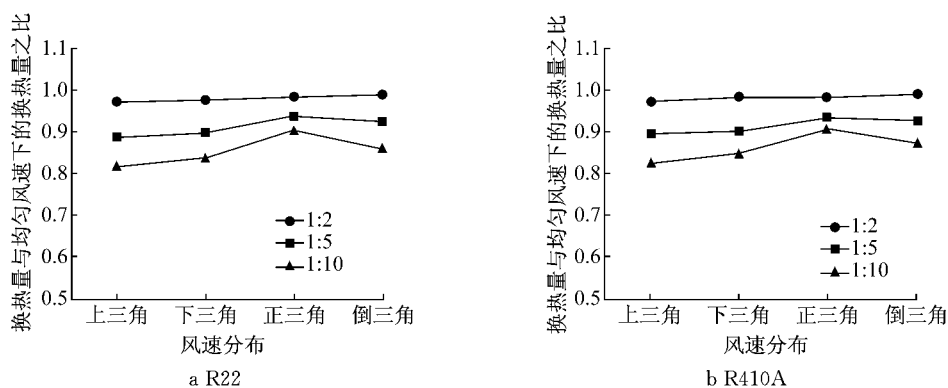


图 4 冷凝器换热量随风速分布的变化(设计 A)

Fig.4 Variation in condenser capacity with air velocity distribution (Design A)

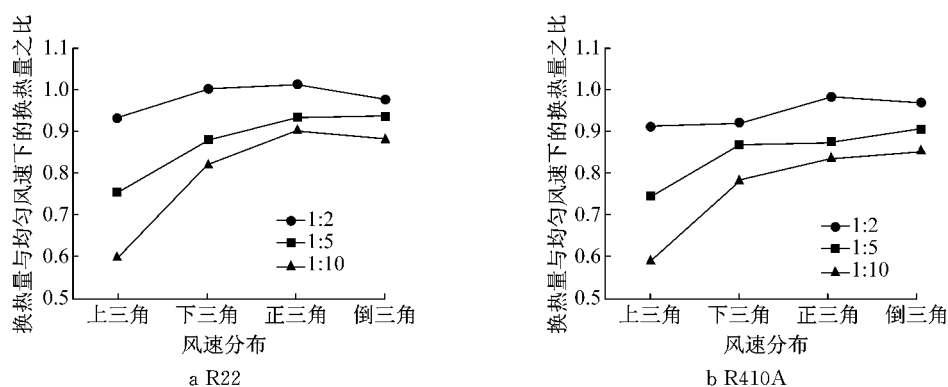


图 5 蒸发器换热量随风速分布的变化(设计 B)

Fig.5 Variation in evaporator capacity with air velocity distribution (Design B)

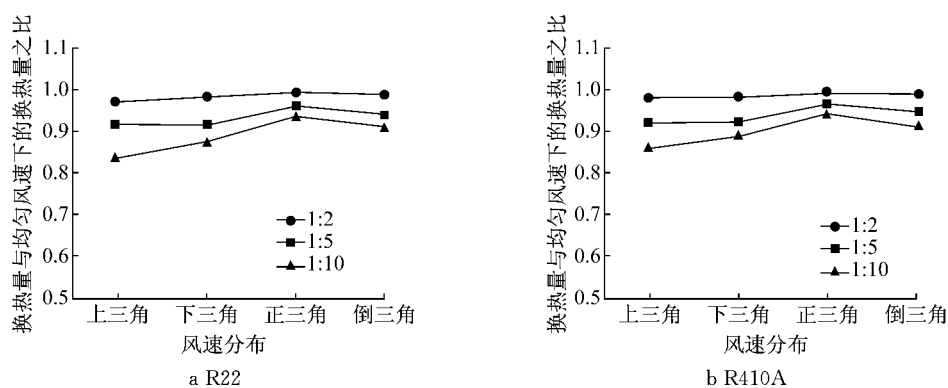


图 6 冷凝器换热量随风速分布的变化(设计 B)

Fig.6 Variation in condenser capacity with air velocity distribution (Design B)

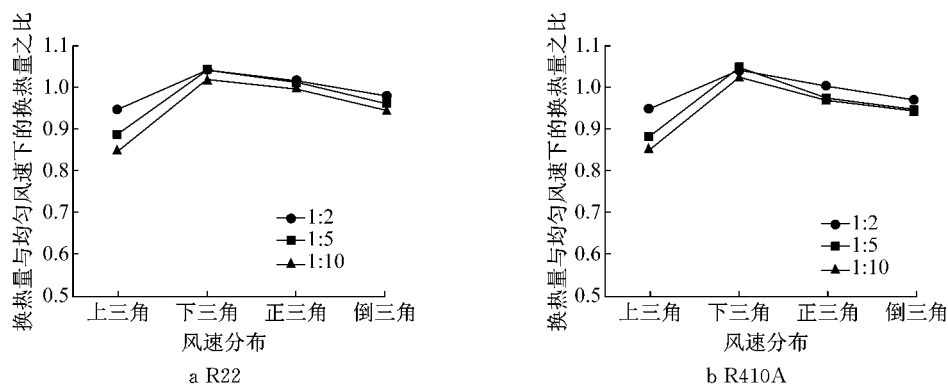


图 7 蒸发器换热量随风速分布的变化(设计 C)

Fig.7 Variation in evaporator capacity with air velocity distribution (Design C)

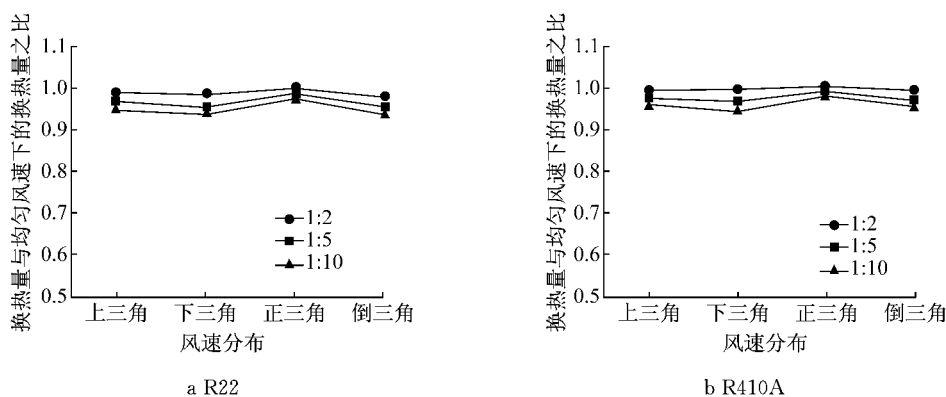


图 8 冷凝器换热量随风速分布的变化(设计 C)

Fig.8 Variation in condenser capacity with air velocity distribution (Design C)

此外,图 3 至图 8 仿真结果体现出的共性结论还包括:无论是使用 R22 还是 R410A,风速分布不均匀对蒸发器和冷凝器性能的影响均较大.风速分布形式不同,对不同流路设计的换热器性能的影响程度也不同.4 种风速分布形式对蒸发器的影响差异较大,但对冷凝器的影响差异较小.

从图 3~图 8 还可以看到,当最小风速与最大风速的比值越小,即风速不均匀度越大时,换热器性能就越差.当该比值从 1:2 变成 1:5 时,是换热器性能变化最大的一段,可以用此时换热器的性能差来定量表征风速不均匀度对换热器性能的影响,换热器性能差 δ 定义如下:

$$\delta = \left(\frac{Q_{1:2} - Q_{1:5}}{Q_{1:1}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

表 4 风速比从 1:2 变化到 1:5 时的蒸发器性能差

Tab.4 Performance difference of evaporator with air velocity ratio change from 1:2 to 1:5 %

	R22				R410A			
	上三角	下三角	正三角	倒三角	上三角	下三角	正三角	倒三角
设计 A	15.99	19.39	10.54	15.99	14.78	16.98	11.64	11.64
设计 B	17.76	12.46	8.41	4.36	17.19	5.16	11.17	6.02
设计 C	6.17	0.32	0.65	2.27	6.50	1.24	2.79	2.48

表 5 风速比从 1:2 变化到 1:5 时的冷凝器性能差

Tab.5 Performance difference of condenser with air velocity ratio change from 1:2 to 1:5 %

	R22				R410A			
	上三角	下三角	正三角	倒三角	上三角	下三角	正三角	倒三角
设计 A	8.79	7.49	5.17	6.20	8.14	7.38	4.83	6.11
设计 B	5.71	6.49	3.12	4.68	6.19	6.19	2.58	4.38
设计 C	2.32	2.84	1.55	2.06	2.05	2.82	1.03	2.31

3 结论

本文研究了风速不均匀分布下热泵型空调中翅片管换热器的制冷剂流路设计问题.通过大量仿真

式中, $Q_{1:1}$ 、 $Q_{1:2}$ 和 $Q_{1:5}$ 分别表示风速比 1:1(即均匀风速)、1:2 和 1:5 时的换热器换热量.

表 4 为蒸发器性能差.设计 A 的蒸发器最大性能差最大,下三角分布对 R22 蒸发器的影响达到 20%,对 R410A 蒸发器的影响也达 17%.设计 C 的蒸发器性能差最小,除上三角分布的影响有 6%,其余三种分布的影响都在 2% 左右.

表 5 为冷凝器性能差.相比之下,冷凝器受风速不均匀分布的影响要比蒸发器小,三种设计的最大性能差都在 10% 以内.设计 C 的最大性能差仍是最小.这从另一个角度说明了制冷剂流路交错设计可以减弱风速不均匀分布对换热器性能的影响,而且无需知道具体的风速分布,便于实际应用.

计算与分析,获得以下主要结论:

(1) 风速不均匀分布时会对换热器性能产生不同程度的影响,对蒸发器性能的影响比对冷凝器性能的影响更显著.风速不均匀程度越大,蒸发器和冷凝器的换热性能都越差,蒸发器性能下降幅度较冷

凝器更大。

(2) 不同流路设计的换热器受风速不均匀分布的影响不同。全交错型流路设计可以显著降低风速不均匀分布对换热器性能的影响,且无需知道具体的风速分布,有很高的实用性。

最后需要指出的是,全交错型流路设计适用于支路数与管排数相近的翅片管换热器,即中小型制冷空调机组(例如家用空调器、车辆空调等),对于支路数远大于管排数的中大型风冷制冷空调机组并不合适,因为无法使得一个支路可以遍历整个风速分布。

参考文献:

- [1] 张春路. 制冷空调系统仿真原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
ZHANG Chunlu. Fundamentals of vapor-compression refrigeration and air-conditioning system modeling [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [2] Liu J, Wei W J, Ding G L, et al. A general steady state mathematical model for fin-and-tube heat exchanger based on graph theory [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27: 965.
- [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.
- [4] EVAP-COND (version 3.0) Simulation models for finned-tube heat exchangers [EB/OL]. [2013-05-17]. http://www.nist.gov/el/building_environment/evapcond_software.cfm
- [5] 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.
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.
- [6] 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.
LI Quanyu, 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.
- [7] 柳成文, 王冬青, 龚建英. 风速分布不均匀性对空气源热泵风侧换热器性能的影响 [J]. 制冷与空调, 2008, 8(3): 87.
LIU Chengwen, WANG Dongqing, GONG Jianying. Effect of airflow maldistribution on the performance of air side heat exchanger of air source heat pump [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2008, 8(3): 87.
- [8] KÆrn M R, Elmegaard B, Larsen L F S. Comparison of fin-and-tube interlaced and face split evaporators with flow maldistribution and compensation [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(1): 203.
- [13] 中华人民共和国行业标准. JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Standard of People's Republic of China. JTG D60—2004 General code for design of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [14] Nowark A S, Lutomirska M, Sheikh Ibrahim F I. The development of live load for long span bridges [J]. Bridge Structures, 2010, 6(1/2): 73.
- [15] Caprani C C. Calibration of a congestion load model for highway bridges using traffic micro simulation [J]. Structural Engineering International, 2012, 22(3): 342.

(上接第30页)