

文章编号:0253-4339(2016)02-0087-06

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2016.02.087

椭圆管换热器对空调室内机声场影响的数值模拟

周 游 张新强 汪双凤

(华南理工大学传热强化与过程节能教育部重点实验室 广州 510640)

摘 要 椭圆管换热器由于良好的流动和换热特性,在换热设备中有广泛的应用。本文利用计算流体力学方法,对椭圆管翅片换热器应用于空调室内机的流场和声场进行数值模拟,并与圆管作对比。计算结果表明,换热管形状对贯流风机内部偏心涡的形成位置和大小没有影响;与采用相同截面积的圆管翅片换热器的室内机相比,相同条件下,采用椭圆管换热器对于室内机增加风量,改善制冷性能,降低噪声尤其是低频噪声方面有良好的效果。其中,长短轴之比为 2 的椭圆管可以降低室内机噪声 4 dB。

关键词 空调室内机;椭圆管;降噪;数值模拟

中图分类号:TB657.2;TQ051.5;TP391.9

文献标识码:A

Numerical Simulation of the Influence of Elliptical Tube Heat Exchanger in Indoor Unit of Air Conditioner on its Acoustic Field

Zhou You Zhang Xinqiang Wang Shuangfeng

(Key Laboratory of Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation of Education Ministry, South China University of Technology, Guangzhou, 510640, China)

Abstract Elliptical tube heat exchanger has been widely used in heat exchange equipment due to its good flow and heat transfer characteristics. In this paper we use computational fluid dynamics method to simulate the flow field and sound field generated by the indoor unit of air conditioner with elliptical finned tube heat exchanger, and make comparison with circular tube heat exchanger. The results show that for the inside the cross-flow, the structure of tubes in heat exchangers has no effect on the location and size of the eccentric vortex; compared with the circular tube finned heat exchanger with the same cross-sectional area, the air conditioners using elliptical tubes work better on increasing the air volume, improving cooling effect and reducing noise especially low-frequency noise under the same conditions. Above all, the conditioner using elliptical tubes in which the ratio of the long axis and short axis is 2.0 can reduce noise 4 dB.

Keywords air-conditioner indoor unit; elliptical tube; noise reduction; numerical simulation

管翅式换热器作为一种紧凑式换热器,是空调和制冷行业中应用最广泛的换热器^[1]。随着制冷行业的发展,如何提高换热器的换热系数,改善换热器外部空气流动状况,一直以来都是制冷行业研究的重点课题。

另外,随着空调外观、性能等方面的提升,人们不断追求更加安静舒适的环境,空调噪声问题受到业内人士的普遍重视^[2],降低空调运行噪声也成为提高空调竞争力的策略之一。

针对空调室内机内部结构,胡俊伟等^[3-4]针对贯流风机,提出使用不等距叶轮降低室内机噪声,比较不同形状换热器对空调室内机噪声的影响,设计了一种弧形换热器,可以有效减小气流噪声并增大风量;刘丙磊等^[5]提出增加导风板的方案降低室内机噪声。

室内机空气的流动状况对结构的变化非常敏感,任何结构参数的改变都会影响流场分布,导致声场发生变化^[6]。另外在改善空调声学特性的同时,必须保证良好的流动和换热特性,因此有必要对空调室内机风道系统的流场和声场进行综合研究。

室内机的声场分布与压力场和速度场有直接的关系,空调蒸发器作为室内机的重要组成部分,其结构的优化对室内机的流场及声学特性有重要影响。椭圆管由于自身形状接近流线形,气体流动时与壁面接触良好,对改善室内机流动换热和声学特性有重要作用^[7-8]。与目前在空调中常用的圆管翅式换热器相比,椭圆管有以下几个特性:

1) 气体绕流椭圆管外时,管后形成的尾流区域比圆管后的尾流区小很多,气动性能更好,可有效减小空气侧的流动阻力,降低能耗。

2)与相同截面积的圆管相比,入口质量流量相同时,椭圆管内制冷剂的相变传热系数高于圆管。

3)椭圆管翅片换热器采用短轴方向作为迎风面时,数目相同的管束,椭圆管更容易紧凑布置,占据空间更小。

虽然椭圆管相比圆管有很多优势,但制冷行业中椭圆管的应用并不普遍。原因主要是椭圆管的胀接和弯曲工艺与圆管相比更加复杂,且生产制造成本较高,尤其是椭圆管的内螺纹加工尤为困难。这些都对椭圆管翅片换热器在空调中的实验研究和应用带来一定的难度。

目前,工业产品开发设计的趋势是数字化,采用 CFD 软件对空调室内机风道的流场进行模拟的方法已得到广泛的应用,并取得良好的效果^[9]。本文采用 Fluent 软件对空调室内机风道系统流场进行模拟,使用 FW-H 模型分析室内机噪声。本文以目前市场上常见的某品牌一款 1.5 匹家用挂壁式空调为对象建立模型,以在空调中应用最广泛的 7 mm 直径铜管为对比对象,椭圆管的尺寸如表 1 所示。

表 1 椭圆管尺寸
Tab. 1 The size of elliptical tube

长短轴之比	长轴 a/mm	短轴 b/mm
1.5	8.573	5.715
2.0	9.900	4.950

1 数学模型

1.1 网格的划分

由于室内机风道系统内部结构比较复杂,在建模过程中,将简化排水托盘、进风口灰尘滤网和出风口的风向调节装置等^[10]。为尽可能准确模拟室内机风道的实际流动状况,需要对室内机进出口区域进行延伸,进出口外部计算域选取为 10 倍贯流风机外径。由于空调室内机横向结构相同,所以本文的三维模型选取 50 cm 的横向区域作为研究对象。图 1 所示为三维室内机模型计算域的截面示意图(换热管为圆管)。整个计算的流体域可以分为 7 个区域:进风口扩展区域、进风口区域、管翅式换热器区域、贯流风机叶片区域、贯流风机中心区域、出风口区域、出风口扩展区域。由于贯流风机叶片所在流体域是旋转的,因此采用滑移网格法进行处理。风道内部网格采用非结构化网格,外部延伸区域采用结构化网格。

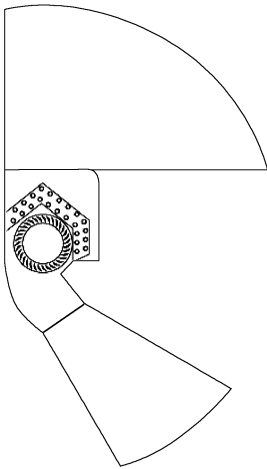


图 1 室内机计算域截面示意图
Fig. 1 Schematic cross section of indoor unit computational domain

1.2 求解器及边界条件的设定

采用 LES(large eddy simulation)大涡模型,不可压缩 Reynolds 时均 Navier-Stokes 方程和标准壁面函数对空调室内机的三维非稳态流场进行求解;计算方法为 Segregated 隐式算法,湍流动能、湍流耗散项、动量方程都采用二阶迎风离散格式;压力速度耦合采用 SIMPLE 算法。时间步长设为 $4 \times 10^{-3} \text{ s}$,模拟风机转动 5 周的过程^[11]。设定入口边界条件为压力入口,出口边界条件为压力出口,压力大小都为标准大气压;管翅式换热器区域为多孔介质。

1.3 模型的验证

为了验证本文 CFD 模型的准确性,首先对 7 mm 圆管翅片换热器在贯流风机转速分别为 800 r/min、900 r/min 和 1000 r/min 的条件下进行计算。邓明义等^[12]用实验的方法测量了 7.2 mm 圆管换热器的空调室内机出风口风量。如图 2 所示,两种结果对比可知,计算结果与文献中实验结果基本一致,误差在 15% 以内。这些误差主要由于室内机数学模型与空调实验样机结构存在一定的差异(如进气格栅,出口导流板,内部电子元件等结构的简化),造成风道流动阻力比实际值小,因此本文的计算模型相对准确。

2 流场计算

2.1 风道流量

如图 3 所示,同种结构的室内机出风口风量随贯流风机转速增大而增加,这符合贯流风机的基本规律^[13]。相同转速下,随着椭圆管长短轴之比的增加,出风口风量增加。换热管数量相同的情况下,相同截面积的换热管,随着长短轴之比增大,短轴的长度减

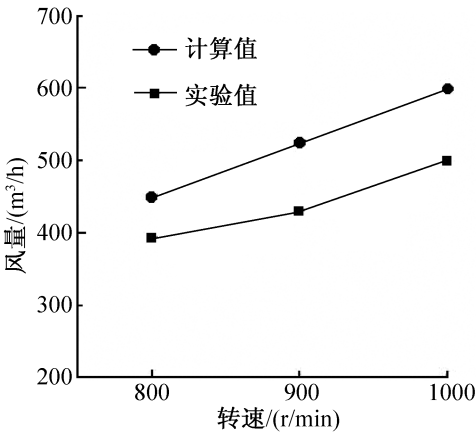


图 2 转速与风量计算值和实验值对比曲线
Fig. 2 Contrast of the numerical simulation values with the experiments

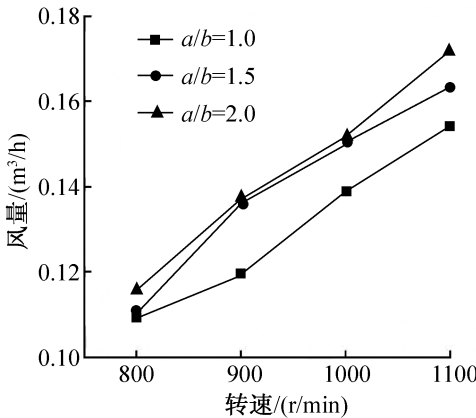


图 3 风量随贯流风机转速的变化曲线
Fig. 3 Changes of flow rate with rotational speed

小。在模型中,短轴作为迎风面,换热管之间的间距增大,空气在换热管之间的流动阻力减小,风道系统内空气流量增大。

2.2 压力分布

游斌等^[14]通过数值模拟研究贯流风机内部偏心涡的演化规律发现,改变贯流风机的转速,偏心涡的涡核位置几乎不发生改变,改变的只是空气初次进入贯流风机的位置。

本文主要研究换热器形状对于室内机流场的影响。图 4 所示为三种结构的室内机在转速为 1100 r/min 时的压力云图,由图可知,贯流风机内部形成一个影响整个流场的偏心涡,偏心涡的方向与贯流风机的转向一致。这是由于空气两次流经叶片,从贯流风机上部叶片进入,从下部叶片流出,造成空气在风机内部形成流动漩涡。但是对比文中三种结构,换热管形状对于空调室内机偏心涡的形成位置和大小几乎没有影响。换热管形状的改变主要影响了空气在换热管间的湍流状况,椭圆管之间的压力波动更小。而空气流过管翅式换热器之后,二次流过贯流风机,流向出风口,室内机压力分布的出口部分变化也不大,出风口蜗舌处压力最大。

3 噪声分析

气动声学是研究流体自身以及流体域固体边界相互作用发生机理的一门科学。空调室内机噪声包括机械噪声和气动噪声。根据风扇声源辐射频率特性的不同,气动噪声又可以分为宽频噪声和离散噪声

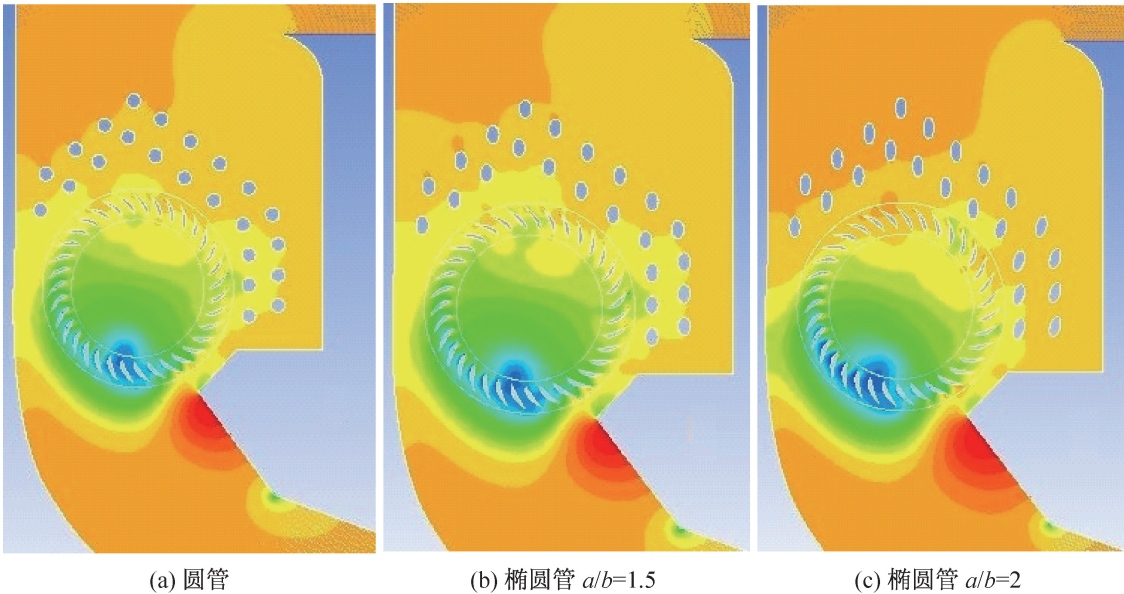


图 4 压力云图
Fig. 4 Contour of total pressure

(或旋转噪声)^[15-16],其中宽频噪声是由叶片表面附面层以及尾缘漩涡脱落、空气湍流干扰等因素引起,离散噪声是由叶片与来流周期性相互作用等因素引起,通常与叶片通过频率及其谐波有关。

由于空气流经密集的翅片管换热器后立即进入贯流风机叶轮,两次流过贯流风机叶轮,使得风机内部存在非定常偏心涡,气体的涡流扰动是引起空调室内机气流噪声的重要原因之一。空气进入贯流风机的方向受到换热器结构的约束,因此空气流过换热器后的尾迹,即贯流风机气流的进入状态对于空气在贯流风机内部的流动状况有重要影响。

室内机噪声与贯流风机的转速有直接关联,转速越大,旋转噪声越强烈。对室内机噪声进行计算时,三种模型都在最大转速 1100 r/min 时进行研究。

噪声的数值模拟将声音的产生和传播两个过程分开。首先通过 LES 大涡模型计算得到压力脉动数据,即声源信号,然后通过 FW-H 方法计算声音的传播过程。由于噪声的计算需要在监测点处获得更加精确的压力脉动数据,因此时间步长减小为 4×10^{-4} s。本文出风口处的声音监测点坐标为 (0.25 m, -0.25 m, 0.025 m)。

计算得到监测点的压力随时间脉动曲线,然后通过 Cruel 方程和快速傅里叶变化得到旋转噪声的频谱。

计算得到监测点处声压随时间的变化曲线,将获得的时域谱进行 FFT 分析,又可得到各种声压的频谱,由此可以计算各个频率对声压的贡献情况。由于每一个频率都对应一定的声压值,造成频谱分析的复杂性。但文中并不需要对每一个频率成分进行分析,为了分析的方便性,通常把宽广的声音频率变化范围划分为若干较小的段落,叫频带或频段。声压级频带图就是把在该频带内,不同频率对应的声压取几何平均值。通过对声压频带图的分析,可在室内机结构设计时指导声学方。

图 5 所示为声压频带图,空调室内机噪声以低频噪声(低于 200 Hz)为主,且波形图与其它文章中相一致^[17-18]。与高频噪音相比,低频噪音随着距离越远或遭遇障碍物时,衰减较慢。韩文等^[19]采用多通道分析仪测量室内机在超高转速 1290 r/min 时,50 s 内的平均声压级为 45 dB,与本文转速为 1200 r/min 换热管为圆管的结果基本一致。因此本文计算得到的波形图和计算值基本准确。

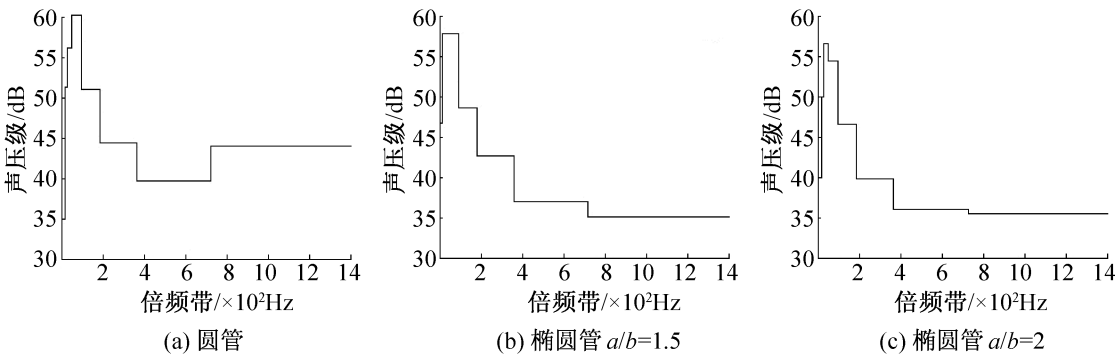


图 5 不同频带下的声压级变化曲线

Fig. 5 Changes of sound pressure level with frequency

整理声压级在不同频带下的计算数据得到圆管和椭圆管的最大、最小声压级和低频率内的声压级,如表 2 所示。可知采用椭圆管可降低空调室内机最大声压级 3~4 dB,降低最小声压级 4.5 dB。对比长短轴之比为 1.5 和 2.0 的两个椭圆管,最大声压级后者比前者小 1 dB;频率为 100~200 Hz 时,前者的声压级为 48.5 dB,后者为 46 dB;频率为 200~350 Hz 时,前者为 42.5 dB,后者为 40 dB,后者在低频率噪声(0~350 Hz)内声压级可以减小 2.5 dB。因此,长短轴之比为 2 的椭圆管可以降低噪声 4 dB,并且在降低低频噪声有更好的效果。

表 2 不同频率下的声压级			
Tab. 2 Different frequencies of sound pressure level			
频率	圆管声压级/dB	椭圆管 1.5 声压级/dB	椭圆管 2.0 声压级/dB
最大声压级	60.5	57.5	56.5
100~200 Hz	51.5	48.5	46
200~350 Hz	44	42.5	40
最小声压级	40	35.5	35.5

4 结论

管翅式换热器的结构对空调室内机风道系统的流动换热和声场有重要的影响。本文使用计算流体

力学的 Fluent 软件,对挂壁式空调室内机风道系统进行模拟,模拟的结果能基本反映室内机的真实流动状况。通过分析椭圆管对室内机空气侧各种参数的影响,得到以下结论:

1)与圆管相比,计算频率为 0~1400 Hz 时,采用椭圆管可以降低最大声压级 3~4 dB,降低最小声压级 4.5 dB,且在降低低频噪声方面有更好的效果;两种椭圆管中,长短轴之比为 2 的椭圆管降噪效果更好,可降低 4 dB 左右。

2)不同结构换热器对于贯流风机内部的非定常偏心涡的大小和形成位置影响不大,出风口蜗舌处压力最大,换热器结构的改变主要影响空气在换热器内部的紊流状况和初次流入贯流风机的状态。

3)同一种换热器,随着贯流风机转速的增大,空调室内机风道系统的空气流量增加,室内机可实现更好的制冷效果。蒸发器的圆管替换为椭圆管可显著增加出风量,长短轴之比为 2 的椭圆管效果最好。

因此,与圆管相比,椭圆管对于增加空调室内机风量,降低噪声方面有良好效果。本文的研究对椭圆管在空调和制冷设备中的应用有一定的指导意义。

参考文献

[1] 陈颖,邓先和,王杨君,等. 房间空调器中换热器的研究概况及进展[J]. 制冷学报, 2002, 23(4): 34-39. (CHEN Ying, DENG Xianhe, WANG Yangjun, et al. Progress on heat exchanger of room air-conditioner[J]. Journal of Refrigeration, 2002, 23(4): 34-39.)

[2] 刘晓红,吴利平,张枫,等. 2011 年国内外制冷空调行业市场分析[J]. 制冷与空调(北京), 2012, 12(3): 1-8. (LIU Xiaohong, WU Liping, ZHANG Feng, et al. 2011 market analysis of refrigeration and air-conditioning industry at home and abroad[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2012, 12(3): 1-8.)

[3] 胡俊伟,丁国良,张春路. 空调器室内机气动噪声模拟[J]. 机械工程学报, 2004, 40(11): 188-192. (HU Junwei, DING Guoliang, ZHANG Chunlu. Simulation of aeroacoustic on air-conditioner[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(11): 188-192.)

[4] 胡俊伟,丁国良,张春路. 热交换器形状对空调室内机性能的影响[J]. 制冷学报, 2004, 25(2): 50-53. (HU Junwei, DING Guoliang, ZHANG Chunlu. Influence of heat exchanger on performance of air-conditioner[J]. Journal of Refrigeration, 2004, 25(2): 50-53.)

[5] 刘丙磊,关婷婷,王健. 挂壁式空调器导风板的优化设计[J]. 制冷与空调(北京), 2015, 15(2): 25-27, 43. (LIU Binglei, GUAN Tingting, WANG Jian. Optial-design of air deflector of wall-mounted air-conditioner[J]. Refrig-

eration and Air-conditioning, 2015, 15(2): 25-27, 43.)

[6] 刘起,陈焕新,陶红歌,等. 房间空调换热器阻力对室内机风道系统的影响[J]. 暖通空调, 2011, 41(11): 82-85. (LIU Qi, CHEN Huanxin, TAO Hongge, et al. Influence of resistance of heat exchangers on air duct system of indoor air conditioners[J]. Journal of HV&AC, 2011, 41(11): 82-85.)

[7] 冯丽丽,杜小泽,杨勇平,等. 椭圆管矩形翅片间空气流动的扰流特征[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(1): 119-122. (FENG Lili, DU Xiaoze, YANG Yongping, et al. Characteristics of air flow around elliptical tubes with rectangular fins[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(1): 119-122.)

[8] 孔晓鸣,李昊,周到,等. 小管径椭圆管开缝翅片换热器的数值模拟[J]. 制冷与空调(北京), 2014, 14(4): 27-32. (KONG Xiaoming, LI Jiong, ZHOU Dao, et al. Numerical simulation of slotted fin heat exchanger using small diameter elliptical tube[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2014, 14(4): 27-32.)

[9] 谷现良,赵加宁,高军,等. CFD 商业软件与制冷空调[J]. 制冷学报, 2003, 24(4): 45-49. (GU Xianliang, ZHAO Jianing, GAO Jun, et al. CFD commercial software and air conditioning & refrigeration[J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(4): 45-49.)

[10] 薛永飞,任绍民,车福亮. 空调室内机换热器的整体数值模拟[J]. 制冷, 2009, 28(2): 5-9. (XUE Yongfei, REN Shaomin, CHE Fuliang. Whole numerical simulation on heat-exchanger of the indoor air-conditioner[J]. Refrigeration, 2009, 28(2): 5-9.)

[11] 杜冬菊,刘爱华. 基于 Fluent 的空调室内机风道结构噪声研究[J]. 机械设计, 2012, 29(7): 77-80. (DU Dongju, LIU Aihua. Noise study of indoor unit air duct structure base on Fluent[J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(7): 77-80.)

[12] 邓明义,孟鸣,王军,等. 多折热交换器及其局部倒片降低空调室内机气动噪声的研究[J]. 流体机械, 2001, 29(10): 58-60. (DENG Mingyi, MENG Ming, WANG Jun, et al. Fold the heat exchanger and its local rewinds to reduce air conditioning indoor machine[J]. Fluid Machinery, 2001, 29(10): 58-60.)

[13] 王厚华,罗庆,苏华,等. 大直径圆孔翅片管的传热与流阻性能实验研究[J]. 制冷学报, 2002, 23(2): 25-29. (WANG Houhua, LUO Qing, Su Hua, et al. Experimental study on the heat transfer and friction characteristic of big diameter circular-hole fin tube[J]. Journal of Refrigeration, 2002, 23(2): 25-29.)

[14] 游斌,周拔,吴文新,等. 贯流风机内部偏心涡演化规律的数值分析[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(Suppl.): 93-96. (YOU Bin, ZHOU Bo, WU Wenxin, et al. Numeri-

- cal analysis of the evolvement rules of the eccentric vortex in the cross flow fan[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(Suppl.):93-96.)
- [15] 王伟戈. 基于计算流体力学分析的空调气流噪音控制[C]//第九届全国空调器、电冰箱(柜)及压缩机学术交流会论文集. 顺德:中国制冷学会, 2008.
- [16] 邵双全, 卢大为, Jeon Wonho. 空调室内机贯流风扇流动噪音的仿真研究[J]. *制冷学报*, 2012, 33(3):9-13. (SHAO Shuangquan, LU Dawei, Jeon Wonho. Numerical analysis on the flow noise in the indoor unit and cross flow fan of air-conditioner[J]. *Journal of Refrigeration*, 2012, 33(3):9-13.)
- [17] 禹旭光, 余南阳, 都剑. 空调系统中的低频噪声[J]. *制冷与空调(四川)*, 2006(1):97-100. (YU Xuguang, YU Nanyang, DU Jian. Low-frequency noise generated by HVAC systems[J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2006(1):97-100.)
- [18] 刘桥梁, 冯成戈, 王晓东, 等. 空调风机噪声的产生机理及控制途径[J]. *风机技术*, 2004(4):56-60. (LIU Qiaoliang, FENG Chengge, WANG Xiaodong, et al. Mechanism and control method of noise generation of fan for air conditioner[J]. *Compressor Blower & Fan Technology*, 2004(4):56-60.)

- [19] 韩文, 赵向阳. 挂壁式空调噪声源研究[J]. *科学技术与工程*, 2009(22):6811-6813. (HAN Wen, ZHAO Xiangyang. Study on noise source of wall mounted air-conditioning[J]. *Science Technology and Engineering*, 2009(22):6811-6813.)

通信作者简介

汪双凤, 女, 教授, 博士生导师, 华南理工大学传热强化与过程节能教育部重点实验室, (020) 22236929, E-mail: sfwang@scut.edu.cn。研究方向: 清洁能源利用及节能减排技术, 航空、电子及光电领域(LED) 散热技术, 微纳传热与流动基础, 相变储能材料与技术等。

About the corresponding author

Wang Shuangfeng, female, professor, Ph. D. adviser, Key Laboratory of Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation of Education Ministry, South China University of Technology, +86 20-22236929, E-mail: sfwang@scut.edu.cn. Research fields: clean energy utilization and energy conservation and emissions reduction technology; aviation, electronics and optoelectronics(LED) in the field of heat dissipation technology; micro flow, heat transfer and basic research; phase change energy storage material and technology, etc.

(上接第 37 页)

- [19] 徐涛, 王祁. 基于模式识别的传感器故障诊断[J]. *控制与决策*, 2007, 22(7):783-786. (XU Tao, WANG Qi. Sensor fault diagnosis based on pattern recognition[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(7):783-786.)
- [20] Dou Z, Xu X C, Lin Y, et al. Application of D-S evidence fusion method in the fault detection of temperature sensor[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014(11):1-6.

通信作者简介

姜子炎, 男, 副教授, 清华大学建筑节能研究中心, (010) 62770544, E-mail: jiangzy@tsinghua.edu.cn。研究方向: 建筑无中心智能控制系统。

About the corresponding author

Jiang Ziyang, male, associate professor, Building Energy Research Center, Tsinghua University, +86 10-62770544, E-mail: jiangzy@tsinghua.edu.cn. Research fields: building decentralized control system.