

文章编号:0253-4339(2017)06-0060-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2017.06.060

主动式冷梁诱导特性研究

翁文兵 黄旭 朱佳璐

(上海理工大学环境与建筑学院 上海 200093)

摘 要 针对主动式冷梁诱导性能实验中存在的风量测量问题,设计了一套新型主动式冷梁诱导性能测试实验台,基于此实验台研究不同一次风量对主动式冷梁诱导性能的影响。结果表明:一次风量小于 $80 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,冷梁诱导比随一次风量的增加而增加,当一次风量达到 $80 \text{ m}^3/\text{h}$ 以后,诱导比基本趋于 3.17。冷梁静压箱压力与一次风量之间存在二次方的关系,在冷梁 4 mm 喷嘴下,静压箱压力随一次风变化的拟合曲线为 $y = 0.0225x^2 + 0.0101x$ 。建立主动式冷梁模型,针对一次风量对诱导性能的影响进行数值模拟,并基于设计的实验台对模拟结果进行验证,得到冷梁诱导比、静压箱压力模拟结果和实验结果误差最高分别达 10.5% 和 8.8%,模拟整体结果和趋势与实际测量吻合良好,说明该模型具有较高的可靠性。

关键词 主动式冷梁;风量测量;诱导比;静压箱;数值模拟

中图分类号:TB61⁺1;TU831.4;TK39

文献标识码:A

Research on the Induction Characteristics of Active Chilled Beam

Weng Wenbing Huang Xu Zhu Jialu

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract To solve the problem of air flowrate measurement in an active chilled-beam system, a test rig of active chilled-beam was designed, and the influences of different primary air flowrate on the induced performance of an active chilled beam were investigated. The results show that the induction ratio of the chilled beam increases with the increasing primary air volume when the primary air volume is less than $80 \text{ m}^3/\text{h}$. The induction ratio tended to 3.17 when the primary air volume later reached $80 \text{ m}^3/\text{h}$. There is a quadratic relationship between the pressure of the cold plenum and the primary air flow. Under the 4 mm nozzle of the chilled beam, the fitted curve of the static pressure with the primary air is $y = 0.0225x^2 + 0.0101x$. The active chilled-beam model was then set up, the effect of the primary air volume on the induced performance was simulated numerically, and the simulation results were verified based on the test results. The relative errors between the experimental results and the numerical results reached 10.5% and 8.8% for the induction ratio and the pressure of cold plenum, respectively. The overall results and the trend of the simulation are in good agreement with the measured values, which indicates that the simulation has high reliability.

Keywords active chilled beam; air flow measurement; induction ratio; plenum chamber; numerical simulation

在倡导节约能源的今天,主动式冷梁作为全球 15 个有利于建筑节能的技术之一得到广泛的运用^[1-5]。国内外关于主动式冷梁的研究有许多:同济大学的张智力等^[6]研究了喷射型诱导风口诱导比的影响因素,认为喷嘴几何尺寸对诱导比的影响较大,一次风影响较小。利兹大学的 M. Ruponen 等^[7-8]研究了一种新型冷梁诱导比测量方法,通过实验研究发现送风口形状对诱导比几乎没有影响,对诱导比影响最重要的因素是喷嘴和送风口的面积比率。天津大学的孙斌辉等^[9-10]采用实验测试与计算机数值模拟相结合的方法对主动式冷梁诱导比性能进行研究,对

主动式冷梁结构设计提出了建议。以上对主动式冷梁诱导性能研究中,冷梁二次风量的测量主要采用两种方法:第一种将一组温度探头设置在换热器的进出口位置,记录二次风通过换热器的温差,结合冷梁供冷量求得二次风量大小;第二种通过仪器直接测量。这两种方法存在以下问题:1)冷梁供冷量通过测量冷梁冷水进出温差以及冷水流量来求得,但冷梁在运行过程中存在一定的辐射量,故供冷量测量不精确;2)实验涉及冷梁水系统运行情况的研究,较为复杂;3)直接测量风速得到二次风量,实验仪器须有较高的精确度,且测量结果不稳定。

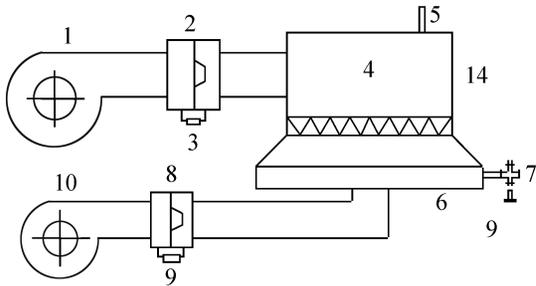
收稿日期:2016 年 12 月 20 日

针对以上主动式冷梁二次风量测量存在的问题, 本文设计一套主动式冷梁诱导性能测试实验台, 并基于此实验台研究了不同一次风量对主动式冷梁诱导性能的影响, 同时基于此实验台对 Fluent 数值模拟结果进行验证。

1 主动式冷梁实验系统

1.1 实验原理

实验系统分为三个部分: 一次风侧风量测量装置、主动式冷梁主体、二次风侧风量测量装置。通过一次风侧风量测量装置向主动式冷梁主体内送风, 一次风进入冷梁静压箱内, 测量一次风量大小与静压箱内压力大小。静压箱内一次风通过冷梁喷嘴流出, 并诱导二次风进入冷梁, 使回风面板处呈负压。通过二次风侧风量测量装置向冷梁送风, 平衡回风面板处负压, 测量此时二次风量的大小。实验系统原理如图 1 所示。



1 送风机; 2、8 喷嘴; 3、9 压差传感器; 4 主动式冷梁; 5 静压箱压力传感器; 6 风罩; 7 发烟装置; 10 变频风机。

图 1 主动式冷梁诱导性能测试实验系统

Fig. 1 The active chilled beam induced performance test experiment system

诱导比是评价主动式冷梁诱导性能的一个重要指标, 诱导比的大小决定了主动式冷梁送风系统中一次风能否与室内二次风进行充分混合, 以满足空调系统的设计送风温差及送风量要求, 主动式冷梁诱导比的计算公式为:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

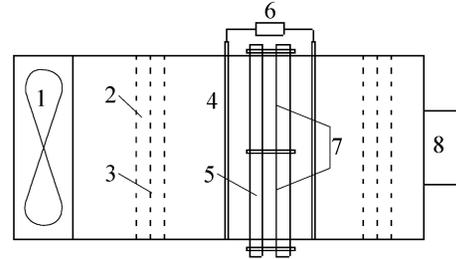
$$n = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2)$$

式中: Q 为冷梁送风量, m^3/h ; Q_1 为冷梁一次风侧风量, m^3/h ; Q_2 为冷梁二次风侧风量, m^3/h 。

要得到主动式冷梁的诱导比, 需要得到一次风量、二次风量和送风量中的两个参数值。对于冷梁送风量, 为保证送风能贴附天花板流动, 达到贴附射流的效果, 冷梁一般会采用有一定角度的出风口, 不规则角度的送风风量很难测得, 因此本文选择测量冷梁

一次风量与二次风量。

1) 一次风侧风量测量。在主动式冷梁的一次风侧设计一套送风系统, 由送风机将新风送入冷梁静压箱内, 送风机为变频离心风机, 可以调节风机的风量大小。在风管设置喷嘴, 喷嘴的前后设有取压口, 在实验过程中测量喷嘴前后压差, 即可知通过的一次风量。为了使进入喷嘴的风量均匀, 在喷嘴入口段设有整流段, 装置结构如图 2 所示。



1 送风机; 2 均流板; 3 整流栅; 4 取压口; 5 喷嘴夹板; 6 压差计; 7 喷嘴; 8 软管接口。

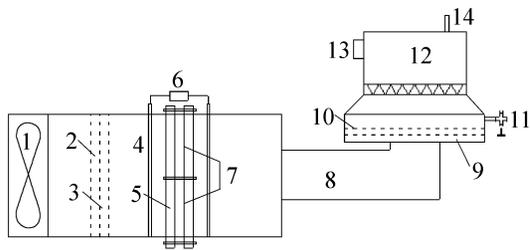
图 2 一次风侧风量测量装置

Fig. 2 The primary air flow measuring device

2) 二次风侧风量测量。主动式冷梁二次风量的测量主要有温度探头结合冷梁供冷量测量和仪器直接测量两种方法, 这两种方法均存在测量不精确, 结果不稳定的问题, 因此本文提出一种新型风量测试方法, 适用于低风速下通过不规则面板的风量测量。该方法基于烟雾流向对压力变化的反应相对于仪器更为敏感的原理进行设计。

二次风侧风量测量装置主要由风罩、发烟装置、压差传感器、喷嘴、变频引风机组成。在冷梁的二次风侧, 用风罩将整个回风面板罩住, 在风罩的内部设置用于均流的孔板, 在孔板上开一个直径为 5 mm 的小孔。发烟装置由四通管、气管、熏香组成, 四通管通过气管与风罩小孔相连, 熏香放置在四通管中心。变频引风机通过喷嘴连接风罩, 通过变频引风机将室内回风引进并送入风罩中, 压差传感器安置在喷嘴的两侧, 可测量通过喷嘴的风量。通过发烟装置发烟, 观察四通管内烟雾的流向。当烟雾的流向为竖直上升时, 视为风罩内外压差为零, 此时通过喷嘴的风量即为二次风侧风量。二次风侧风量测量装置结构如图 3 所示。

实验过程中, 使四通管内烟雾流向竖直向上, 控制回风罩内的风压与外界气压保持一致, 则通过二次风侧变频风机的风量即为二次风量, 可通过喷嘴前后压差传感器测量得出。喷嘴的直径有 25 mm、40 mm、50 mm、70 mm 4 种规格, 可以根据二次风量的大小来决定使用喷嘴直径的大小。



1 变频风机;2、10 均流板;3 整流栅;4 取压口;
5 喷嘴夹板;6 压差计;7 喷嘴;8 软风管;9 风罩;
11 发烟装置;12 主动式冷梁;13 一次风进口;
14 静压箱压力传感器。

图 3 二次风侧风量测量装置

Fig. 3 The secondary air volume measuring device

3) 静压箱压力测量。为研究主动式冷梁诱导性能,还需对冷梁静压箱内压力变化进行研究。对于静压箱内压力的测量,可直接在静压箱上布置测点,通过压力测量仪进行测量。在冷梁的静压箱上,距离静压箱一侧 100 mm 处开个孔,将压力传感器通过小孔布置在静压箱内,同时密封小孔,通过压力测量仪读取静压箱内压力。

1.2 实验测量装置

1) 主动式冷梁主体。主动式冷梁主体选用双出风型主动式冷梁,冷梁规格为 1 800 mm × 590 mm × 250 mm,冷梁静压箱喷嘴大小固定。一次风管直径 120 mm。内翅片换热器规格为 1 630 mm × 350 mm × 45 mm,翅片之间的间距为 4 mm,在翅片的一侧有进回水管。在冷梁静压箱的两侧都有喷嘴,且喷嘴的数量为 81 × 2 个,喷嘴直径为 4 mm。

2) 测量工具。在本实验系统中,压力测量利用 Testo 512 压力测量仪进行测量,该仪器是一款带有温度补偿功能的精密型压力测量仪,测试范围为 0 ~ 2 kPa,利用该仪器可测量流动流体的正压、负压和差压。实验过程中,可以同时显示出压力值和风速,读取方便。

1.3 实验过程

主动式冷梁诱导性能测试步骤如下:1) 检查实验电源及实验仪器,包括一次侧调速风机、电位器、二次侧变频风机、冷梁样机以及测试仪器能否正常使用。2) 打开一次侧调速风机,通过调节电位器电阻至最小值,待运行一段时间稳定后,用压差计测量一次风侧喷嘴的前后压差并记录。3) 通过观察烟雾流动状态,调节二次侧变频风机的频率至烟雾呈竖直向上升起的状态。记录此时的二次风侧喷嘴的前后压差以及静压箱压力。4) 调大电位器的电阻,重复步骤 2 和步骤 3,进行多组数据的测量记录。5) 实验测

量结束后及时切断电源,熄灭发烟装置,整理实验测试装置及实验仪器。

2 主动式冷梁诱导性能数值模拟

为研究一次风量对主动式冷梁诱导性能的影响,本文根据主动式冷梁实际结构尺寸,利用 Gambit 建模软件建立主动式冷梁模型,用数值模拟软件 Fluent 对其进行数值模拟分析^[11-13],并基于设计的主动式冷梁诱导性能测试系统对数值模拟结果进行验证。

由于主动式冷梁的几何结构比较复杂,在不影响研究主动式冷梁诱导性能以及精确性前提下,对模型作如下假设和简化:

1) 送、回风不等温,但是温度对射流形态及射流发展的影响程度不大,故模型中忽略温度的影响。

2) 在冷梁内部,由于换热器内翅片对二次风量大小影响可以忽略,且翅片数目较多,对其进行网格划分会影响模型整体网格的质量,同时,回风面板亦有众多小孔结构,不利于网格的划分,因此实际建立模型时,将换热器和回风面板均省略,只将其简化为二次风压力入口。

对主动式冷梁几何模型进行非结构性网格划分,喷嘴采用 Hex/Wedge 单元与 Cooper 相结合的方式进进行体网格划分,采用适应性较强的 TGrid 网格对其他部分进行整体划分。模型采用不可压缩流体的稳态模型,湍流计算采用 $K-\epsilon$ 模型,一次风入口设置为速度进口,按照给定的一次风风量设置入口截面上的平均风速 v 。二次风入口设置为压力入口,其值为 2 Pa。出风口定义为压力出口,出口静压为 0 Pa。采用 SIMPLE 算法对压力和速度进行耦合,离散格式为二阶迎风格式。

3 结果与分析

3.1 一次、二次风量实验测量结果

实验采集了一次风量在 60 ~ 120 m³/h 变化时的 12 组数据,如图 4 所示。根据测试的结果计算不同一次风量条件下对应的诱导比,如图 5 所示。

由图 4 及图 5 可以看出,当一次风量在 70 ~ 80 m³/h 变化时,二次风量随一次风量的增加而增加,冷梁诱导比随一次风量的增加而增加。当一次风量大 于 80 m³/h 时,二次风量随一次风量增加而增加,但此时冷梁诱导比不再随一次风量增加而增加,基本趋 于一定值,在 3.17 附近上下浮动。由此可得:主动式 冷梁的诱导比与一次风量并无关系,当一次风量较小 时,冷梁诱导比随着一次风量的增加有所增加,当一 次风量增加到一定值以后,诱导比维持在一定区间

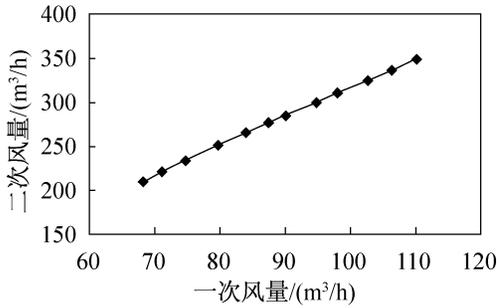


图 4 二次风量随一次风量变化

Fig. 4 The secondary air curve with the primary air volume

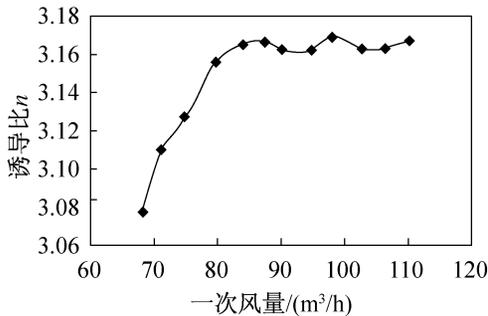


图 5 诱导比随一次风量变化

Fig. 5 The induction ratio curve with the primary air volume

内,基本趋于一定值。

3.2 静压箱压力实验测量结果

主动式冷梁内部的风速较大,射流处于阻力平方区,从静压箱至送风出口管段的管网特性是恒定的,其阻抗为定值。因此,冷梁静压箱内一次风的静压 p_s 与一次风量 Q_1 应该符合以下关系式^[14]:

$$p_s = S_1 \cdot Q_1^2 \quad (3)$$

式中: S_1 为冷梁静压箱至送风口的管路阻抗, kg/m^7 。

实验测试中,控制一次风侧变频风机送风量在 $60 \sim 120 \text{ m}^3/\text{h}$ 变化,测量对应一次风量时静压箱内压力大小,共计采集 12 组数据,将静压箱内压力测量结果与一次风量测量结果绘制在二维折线图中,并选用二次曲线对结果进行曲线拟合,如图 6 所示。

由图可知,静压箱压力随一次风量的增加而增加,与一次风量之间存在二次方的关系,拟合曲线为 $y = 0.0225x^2 + 0.0101x$,拟合曲线的可决系数为 0.9995,说明回归曲线的拟合程度良好。

3.3 实验装置测量误差分析

1) 一次风侧测量误差

一次风侧风量的测量由式(4)计算:

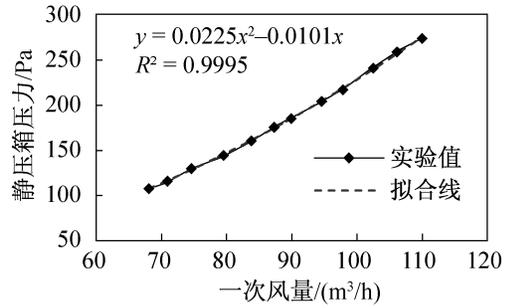


图 6 静压箱压力随一次风量变化

Fig. 6 The pressure curve of the cold box with the primary air volume

$$q_v = C \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

式中: C 为喷嘴的流量系数; d 为喷嘴直径, m ; Δp 为喷嘴两侧压差, Pa ; ρ 为空气密度, kg/m^3 。

由式(4)可知一次侧风量测量误差主要由喷嘴两侧压差测量决定^[15],本文选用 Testo 512 压力测量仪测量一次风侧喷嘴两侧压差,该压力测量仪测量精度为 0.5 级,量程为 $0 \sim 2 \text{ kPa}$,则由最大相对误差公式^[16]:

$$\delta_{\max} = \delta \frac{A_0}{A} \times 100\% \quad (5)$$

式中: δ 为仪表的精确度等级; A_0 为仪表量程; A 为实测时仪表读数。

一次风侧喷嘴直径为 40 mm ,取测量最大压差为 500 Pa ,则喷嘴两侧压差测量最大相对误差为 2%。

由间接测量误差传递公式可知:

$$\frac{y_{q_v}}{q_v} = \frac{\partial q_v}{\partial \Delta p} \frac{x_{\Delta p}}{q_v} \quad (6)$$

式中: y_{q_v} 为风量测量随机误差, m^3/h ; q_v 为风量测量值, m^3/h ; $x_{\Delta p}$ 为压差测量随机误差, Pa 。

则一次风侧风量测量最大相对误差为 1%,满足设计要求。

2) 二次风侧测量误差

二次风侧风量测量误差主要由喷嘴两侧压差测量不准以及烟雾装置观测不准引起。

二次风侧喷嘴两侧压差测量与一次风侧喷嘴两侧压差测量一致,喷嘴直径为 70 mm ,取测量最大压差为 400 Pa ,由式(5)可知二次风侧喷嘴压差最大相对误差为 2.5%,最大绝对误差为 10 Pa ,则由式(6)可求得二次风侧喷嘴测量最大绝对误差 $e_1 = 4.451 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

为使回风面板处为零压,需要使发烟装置烟雾流向竖直向上,而实验测试过程中,烟雾流向有些许飘动,导致测量误差。对于这一部分误差,由式(7)计算:

$$e_2 = vA \quad (7)$$

式中： v 为连通管内风速，m/s； A 为连通管截面积， m^2 。

取连通管内风速为 0.02 m/s，连通管直径为 2 cm，则可求得烟雾飘动误差 $e_2 = 0.023 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

随机误差的合成公式为^[17]：

$$e = \sqrt{\sum_{i=1}^k e_i^2} \quad (8)$$

式中： e_i 为各项独立的随机误差。

对 e_1 和 e_2 两部分误差进行合成，因 e_2 较 e_1 数值非常小，最终取值可忽略 e_2 影响，则二次风侧风量测量最大相对误差为 1.25%，满足设计要求。

3.4 数值模拟结果与实验验证结果对比

数值模拟过程中，控制一次风量在 60 ~ 120 m^3/h 变化，模拟一定一次风量条件下二次风量值、诱导比值、静压箱压力值，共计 11 组数据。同时实验测试对应一次风量条件下二次风量值、诱导比值、静压箱压力值，将数值模拟结果与实验测试结果列于下表 1。

表 1 主动式冷梁测试模拟结果与实验验证结果

Tab. 1 The simulation results and experimental verification results of active chilled beam

一次风量/ (m^3/h)	二次风量/(m^3/h)		诱导比			静压箱压力/Pa		
	实验值	模拟值	实验值	模拟值	偏差/%	实验值	模拟值	偏差/%
106.34	336.35	304.34	3.16	2.86	9.58	258	237.37	8.00
102.68	324.75	298.92	3.16	2.91	7.99	240	218.89	8.80
98.04	310.67	279.71	3.17	2.85	10.06	216	202.09	6.44
94.77	299.67	268.66	3.16	2.83	10.50	203	185.40	8.67
90.09	284.91	259.71	3.16	2.88	8.93	184	168.37	8.49
87.47	276.95	257.34	3.17	2.94	7.15	174	159.16	8.53
83.97	265.76	252.32	3.16	3.00	5.21	159	147.32	7.35
79.71	251.55	239.36	3.16	3.00	4.94	143	135.38	5.33
74.75	233.77	228.38	3.13	3.06	2.15	128	120.24	6.06
71.10	221.13	217.82	3.11	3.06	1.61	114	107.54	5.67
68.24	210.01	206.36	3.08	3.14	-2.03	106	99.37	6.25

由表 1 可知，对于同一主动式冷梁，其诱导比模拟计算值与实验测试值最小相对误差为 1.61%，最大相对误差为 10.5%。静压箱压力模拟计算值与实验测试值最小相对误差为 5.33%，最大相对误差为 8.8%，误差均在可接受范围之内。

将实验结果与 Fluent 数值模拟结果绘制在二维折线图中，图 7 为主动式冷梁二次风量随一次风量变化的实验值与模拟值对比，图 8 所示为主动式冷梁诱导比随一次风量变化的实验值与模拟值对比。图 9 为主动式冷梁静压箱压力随一次风量变化的实验值与模拟值对比。

从图 7 ~ 图 9 中可以看出，主动式冷梁二次风量、诱导比和静压箱压力的实验测试结果与数值模拟计算结果基本一致，且模拟结果与实验结果的诱导比均在理论计算范围内。从图中可看出，数值模拟结果相对实验测试结果较小，这是因为在建立模型时，冷梁盘管和回风面板两者阻力值在低风速下均很小，总

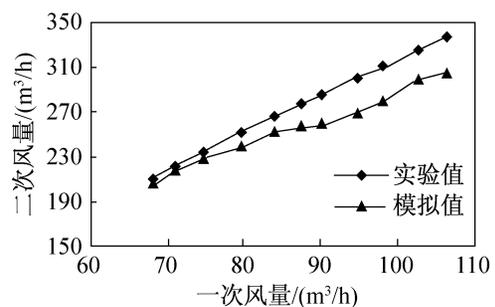


图 7 二次风量实测结果与模拟结果对比

Fig. 7 The comparison between experimental results and simulation results for the secondary air

阻力低于 2 Pa，故将两者阻力影响简化为冷梁二次风进口处的固定阻力值，模拟中设置固定阻力值为 2 Pa，因而导致模拟计算结果相对比实测值较小。

4 结论

本文针对主动式冷梁诱导性能实验中存在的风

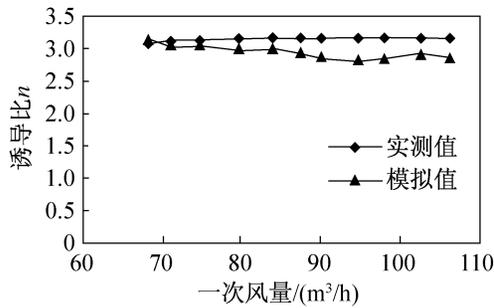


图 8 诱导比模拟结果与实测结果对比

Fig. 8 The comparison between experimental results and simulation results for the induction ratio

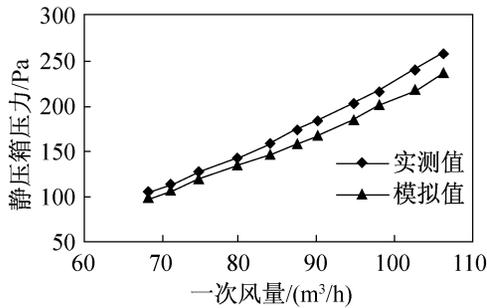


图 9 静压箱压力实测结果与模拟结果对比

Fig. 9 The comparison between experimental results and simulation results for the pressure of cold box

量测量问题,设计一套主动式冷梁诱导性能测试实验台,研究了不同一次风量对主动式冷梁诱导性能的影响,并基于实验台验证了主动式冷梁数值模拟结果,得出以下结论:

1)当一次风量在 70 ~ 80 m³/h 区间内变化时,主动式冷梁二次风量、诱导比随一次风量的增加而增加。当一次风量大于 80 m³/h 时,冷梁诱导比不再随一次风量增加而增加,基本趋于一定值,在 3.17 附近上下浮动。

2)冷梁静压箱压力与一次风量之间存在二次方的关系,在冷梁 4 mm 喷嘴下,静压箱压力随一次风变化的拟合曲线为 $y = 0.0225x^2 + 0.0101x$ 。

3)数值模拟结果与实验测试结果整体趋势吻合良好,冷梁诱导比数值模拟结果和实验测试值的误差最高在 10.5%,冷梁静压箱压力实验测试结果与数值模拟结果最大误差为 8.8%,说明建立的主动式冷梁模型具有较高的可靠性。

参考文献

[1] MENDELL M J, SMITH A H. Consistent pattern of elevated symptoms in air-conditioned office buildings: A reanalysis of epidemiologic studies[J]. Public Health, 1980, 80

(10): 125-138.

[2] 李志鹏. 冷梁送风系统应用于热湿气候环境之空气分布性能与节能效益研究 [C]//第九届海峡两岸制冷空调技术交流会论文集. 杭州, 2009:235-242. (LI Zhipeng. The study of air distribution performance and energy saving effectiveness of chilled beam system in hot and humid climates [C]//Proceedings of the 9th Cross-strait Refrigeration and Air-conditioning Technology Symposium. Hangzhou, 2009; 235-242.)

[3] 刘万龙,刘健. 某高层写字楼冷梁空调系统的设计与分析[J]. 工程建设与设计, 2014 (5): 84-87. (LIU Wanlong, LIU Jian. Chilled beam air conditioning system design and analysis of a high-rise office[J]. Construction and Design for Project, 2014(5): 84-87.)

[4] 张向前,李洋,全征. 主动式冷梁在绿色办公室建筑中的应用[J]. 建筑技术, 2012, 43 (6): 544-546. (ZHANG Xiangqian, LI Yang, TONG Zheng. Application of active chilled beam in green office building [J]. Architecture Technology, 2012, 43 (6): 544-546.)

[5] 曹灿峰. 主动式冷梁在办公建筑中的应用研究[D]. 南京:南京师范大学, 2014. (CAO Canfeng. Research on the application of active chilled beam in office building [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2014.)

[6] 张智力,张旭,张恩泽. 喷射型诱导风口诱导比的实验研究[J]. 暖通空调, 2008, 38 (2): 62-64. (ZHANG Zhili, ZHANG Xu, ZHANG Enze. Experiment of induction ratio of the diffuser with nozzles [J]. Journal of HV & AC, 2008, 38(2): 62-64.)

[7] RUPONEN M, TINKER J A. Novel method for measuring induction rates [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms. Roomvent 2007, Helsinki, 2007.

[8] RUPONEN M, TINKER J A. A novel method to measure the air entrainment ratio of an active chilled beam [J]. International Journal of Ventilation, 2008, 7(4): 299-308.

[9] 孙斌辉. 等温工况下主动式冷梁风侧诱导规律研究 [D]. 天津:天津大学, 2012. (SUN Binhui. Research on the air induction law of active chilled beams in isothermal condition [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.)

[10] 段宝东. 主动式冷梁性能研究 [D]. 天津:天津大学, 2014. (DUAN Baodong. Research on the performance of active chilled beams [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.)

[11] 苏飞,魏兵. 诱导式风管内流体特性的数值模拟研究 [J]. 电力科学与工程, 2015, 31 (8): 55-59. (SU Fei, WEI Bing. Numerical simulation study on internal fluid properties in induction duct [J]. Electric Power Science And Engineering, 2015, 31(8): 55-59.)

(下转第 79 页)

- tary compressor performances[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(6): 25-29.)
- [11] 杨丽辉,陶乐仁,李芳芹,等. 压缩机少量吸气带液对制冷系统性能的影响[J]. 制冷学报, 2014, 35(5): 83-87. (YANG Lihui, TAO Leren, LI Fangqin, et al. Influence of a little liquid entrainment into compressors on refrigerating system performance [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(5): 83-87.)
- [12] 杨亮. 以压缩机排气温度为控制参数的电子膨胀阀流量控制系统的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2000. (YANG Liang. Research on electronic expansion valve flow control system with control parameter of compressor exhaust temperature[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2000.)
- [13] 韩磊,陶乐仁,郑志皋,等. 回气带液对滚动转子压缩制冷系统性能影响实验研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(4): 22-34. (HAN Lei, TAO Leren, ZHENG Zhigao, et al. Experiment on effect of liquid-refrigerant return on performance of refrigerant system with rolling rotor compressor[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(4): 22-34.)
- [14] 陶宏. 变制冷剂流量制冷循环“0 过热度”问题的实验研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2008. (TAO Hong. Experimental researches on “zero superheat degree” in variable refrigerant flow refrigeration cycle[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2008.)
- [15] 陈振豪,吴静怡,陆平,等. 空气源热泵热水器季节性实验及优化运行研究[J]. 能源技术, 2005, 26(3): 117-119. (CHEN Zhenhao, WU Jingyi, LU Ping, et al. Optimization of air-source heat pump water heater system based on seasonal performance experiment [J]. Energy Technology, 2005, 26(3): 117-119.)
- [16] 江斌,陈则韶,陈建新. 空气源热泵热水器变工况特性分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(4): 70-73. (JIANG Bin, CHEN Zeshao, CHEN Jianxin. Performance analysis of an air-source heat pump water heater under variable conditions[J]. Journal of HV&AC, 2007, 37(4): 70-73.)
- [17] 董振宇,陆春林,金苏敏. 空气源热泵热水器的实验研究[J]. 流体机械, 2008, 36(8): 54-57. (DONG Zhenyu, LU Chunlin, JIN Sumin. Experimental study on air source heat pump water heater [J]. Fluid Machinery, 2008, 36(8): 54-57.)
- [18] 杨萍,王铁,纪志坚,等. R134a 充注量对内藏式冷柜系统影响的试验研究[J]. 流体机械, 2014, 42(2): 1-4. (YANG Ping, WANG Tie, JI Zhijian, et al. Experimental study on the effect of R134a charge quantity on the built-in refrigerator system[J]. Fluid Machinery, 2014, 42(2): 1-4.)
- 通信作者简介**
陶乐仁,男,教授,上海理工大学能源与动力工程学院制冷与低温工程研究所,13916356948, E-mail: cryo307@usst.edu.cn. 研究方向:低温制冷系统,低温生物医学技术.
- About the corresponding author**
Tao Leren, male, professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, + 86 13916356948, E-mail: cryo307@usst.edu.cn. Research fields: low temperature refrigeration system, cryobio-medical technology.
-
- (上接第 65 页)
- [12] 云楠. ACB 式 HVAC 空调系统建模[D]. 上海: 上海交通大学, 2014. (YUN Nan. Modelling of HVAC system with active chilled beams [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.)
- [13] CAMMARATA G I M, CAMMARATA L, PETRONE G. A CFD study on active chilled beams for indoor air conditioning[C]//Proceedings of the COMSOL Users Conference. 2007.
- [14] 付祥钊,王岳人,王元,等. 流体输配管网[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001; 51-53. (FU Xiangzhao, WANG Yueren, WANG Yuan, et al. Fluid distribution network [M]. Beijing: China architecture and Building Press, 2001; 51-53.)
- [15] 王天富. 风量喷嘴及其在实验室风量测量中的应用[J]. 西北建筑工程学院学报, 1993(1): 34-36. (WANG Tianfu. Air volume nozzle and its application in laboratory air volume measurement [J]. Journal of Northwestern Institute of Architectural Engineering, 1993(1): 34-36.)
- [16] 万金庆. 热工测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 9-13. (WAN Jinqing. Thermal measurement [M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 9-13.)
- [17] 曹小林,李雄林,喻首贤,等. 空调器性能测试平台测量不准确度的研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(5): 58-62. (CAO Xiaolin, LI Xionglin, YU Shouxian, et al. Investigation on measurement uncertainty in air conditioner performance-testing bench [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(5): 58-62.)
- 通信作者简介**
黄旭,男,硕士研究生,上海理工大学环境与建筑学院,15800906189, E-mail: 1803230227@qq.com. 研究方向:暖通空调自动控制技术,空调系统节能技术.
- About the corresponding author**
Huang Xu, male, master degree candidate, School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, + 86 15800906189, E-mail: 1803230227@qq.com. Research fields: HV&AC control technology, air-conditioning system energy-saving technology.