

文章编号:0253-4339(2015)01-0045-07

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2015.01.045

大空间竖向热羽流对横向冷射流的干扰作用盐水模拟实验研究

王 昕¹ 梁 云² 叶李飞¹ 马静思¹

(1 上海理工大学环境与建筑学院 上海 200093; 2 上海建科建筑节能评估事务所 上海 200032)

摘 要 以相似理论为依据,设计搭建了用于模拟大空间建筑室内气流组织的液态模型实验台,对大空间建筑中常见的竖向热羽流对横向冷射流的影响规律进行盐水模拟实验研究。借助速度比例尺解决了冷射流与热羽流系统的相似同步性问题。实验结果表明:在竖向热羽流作用下,横向冷射流的运动轨迹将发生向上的偏转。单股竖向热羽流对单股横向冷射流对作用点上游的冷射流轨迹没有明显干扰作用,冷射流轨迹的抬升主要表现在作用点下游的冷射流末段。在两个热源形成的两股竖向热羽流作用下,单股横向冷射流的运动轨迹发生的偏转量增大;竖向热羽流与横向冷射流的作用点不同,冷射流运动轨迹受到的干扰作用大小也不同,在冷射流初段,冷射流的惯性力作用较强,不易受热羽流干扰,而在冷射流末段,冷射流惯性力减弱,易受热羽流干扰;相对于单股冷射流在两股热羽流作用下的运动来说,两股冷射流叠加后,热羽流的干扰作用有所减弱。

关键词 大空间;盐水实验;热羽流;冷射流;射流轴心断面速度分布

中图分类号:TB61⁺1; TU831

文献标识码: A

Analysis of Salt-bath Scaled Model on Horizontal Cold Jet Effected by Vertical Thermal Plume in Large Space

Wang Xin¹ Liang Yun² Ye Lifei¹ Ma Jingsi¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. Shanghai Jianke Building Energy Assessment & Consultancy Co., Ltd., Shanghai, 200032, China)

Abstract Based on the similarity theory, a box containing liquid aimed to model the indoor air distribution in a large space building was constructed, and the liquid experiments were taken to explore the pattern of the effect of the vertical developing plumes on the horizontal jets in large space buildings. The velocity ratio of the model to the prototype was taken to figure out the similarity between the cold jets and the thermal plumes. The results of the experiments show that, under the effect of the vertical developing plumes, the motion curve of the horizontal jets deviated upward. The single plume has little effect on the forepart before the countering point of the plume and jet. The raising of the jet curve is in the terminal of the cold jet. Under the effect of the two plumes, the deviation of a single jet increased. The deviation of the jet curve differs with the countering point of the plumes and the jet changing. In the forepart of the jet, the initial force of the jet predominates, thus the curve is not easy to deviate. However, in the terminal of the jet, the initial force of the jet weakens, and the curve is easy to be disturbed by the plume. Compared with the effect of different plumes, the effect of two plumes on the motion of the single jet weakens after two jets interact.

Keywords large space; salt-bath experiment; thermal plume; cold jet; velocity distribution of the jet axis section

随着城市建设和现代建筑的增加,大空间室内热环境及其舒适性研究逐渐为人们所关注^[1]。目前高大空间建筑分层空调普遍采用喷口侧送的气流组织形式。在实际工程中对于喷口侧送的气流组织形式来说,大多只是简单地套用半经验射流公式进行喷口送风气流组织计算,这种计算方法实际忽略了很多其他因素,如室内热源的性质和位置等^[2]。大空间建

筑内热源形成的热源羽状流是一种不容忽视的气流运动,特别是在人员较多,设备发热量大的场所,简单套用半经验射流公式就无法考察热羽流浮升力对射流轨迹的干扰,因此气流组织计算结果会有偏差。

目前模拟非等温气流运动的液态模型实验多以盐溶液作为实验介质。盐水模型实验在室内气流分布研究领域中的应用始于 20 世纪 90 年代,Linden

等^[3]在 1990 年首次把盐水模型实验研究方法应用于置换式自然通风的研究。Baines^[4-5]提出一种测试羽流的新方法,并利用盐水模型实验对该方法进行了实验验证。南华大学刘迎云等^[6-7]利用盐水溶液在清水中的扩散运动模拟室内冷射流运动。哈尔滨工业大学王磊、高军等^[8-11],利用盐水模型实验方法对热压作用下的自然通风进行了研究。盐水模型实验虽然在室内气流分布领域的研究中展示了其独特的优势,但现有文献中有关利用盐水同时模拟自然对流与机械流动,及其相互作用的研究成果鲜有报道。

本文在国内外相关研究基础上,主要针对竖向自然流动对横向机械流动的干扰问题,利用盐水实验模拟其运动,并对其规律加以分析,为今后大空间风口送风气流组织设计计算提供参考依据。

1 盐水模型实验设计思路

课题以上海理工大学新大空间实验基地为原型,根据相似理论,搭建了几何比例尺为 1:20 的液态模型实验台。实验台可分为冷射流系统、热羽流系统、主环境水箱、流场观测系统、管路及附件等组成部分,如图 1 所示。

利用不同浓度盐水模拟热羽流与环境空间、利用清水模拟冷射流。为能够实现热羽流自然对流运动,本次射流与羽流运动系统为倒置系统。

冷射流注入口是模型空间主要的入口边界条件,不仅体现在其几何尺寸上,也体现在冷射流的出流特征。为此,本实验台专门设计了文丘里喷嘴作为冷射流的注入口,其结构如图 2 所示。

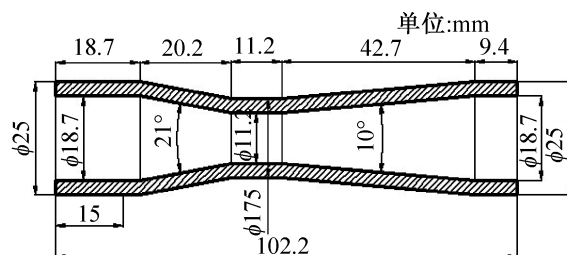


图 2 文丘里喷嘴结构图

Fig. 2 The structure of Venturi nozzle

点热源形成的热羽流是没有初动量的纯羽流。而在液态模型实验中,羽流注入口无法实现零初速和点源,模拟羽流的介质总是从一定尺寸的注入口中以一定的流速流出的,也即虚源点是在热羽流注入口后方某一位置处。目前在液态模型实验模拟热羽流的研究中应用最广泛的羽源注入口装置是由 Paul Cooper 设计的,装置结构如图 3 所示。

该装置使热羽流介质先通过一个细小的开孔进入一个相对较大的圆柱形空腔内,然后再通过设置有致密网格的开口注入主环境水箱,使热羽流盐水通过突扩的开口以紊流状态注入一个相对较大的圆柱形空腔内,进而使热羽流盐水以紊流的流态流出热羽流注入口装置的开口。该热羽流注入口装置不仅补偿了虚拟源的位置还可减小盐水的初始动量。

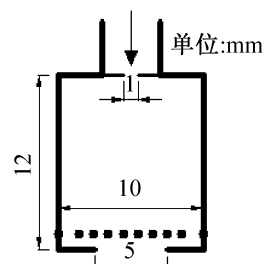


图 3 点羽源注入口装置示意图

Fig. 3 The injection port of plume

通过对气流运动控制方程组和液态流体运动控制方程组的分析,结合相似理论分析了气流运动和液态流体运动的相似性,并推导得到液态模型实验的相似准则数为 Re 、 Ar 和 $Pr(Sc)$,考虑到自模化现象和忽略次要因素,确定以 Ar 作为主要准则数,以此作为设计搭建液态模型实验台的依据。

原型中的热源与模型中羽流盐水注入的模拟不能简单套用冷射流系统相似比例尺,而应以浮力通量相似作为源相似的重要条件。以速度相似比例尺作为与冷射流系统相联系的条件。

在原型空间中,对于发热量为 W_n 的热源:

$$W_n = (T - T_0) c_p \rho_0 Q_n \quad (1)$$

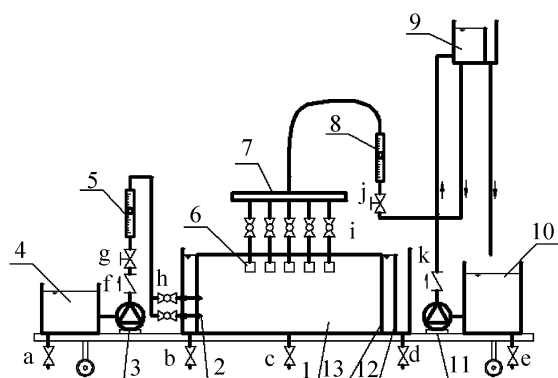


图 1 实验台结构示意图

Fig. 1 The structure of experimental table

- 1 主水箱 2 文丘里喷嘴 3 冷射流系统供水泵 4 冷射流储水箱 5 冷射流浮子流量计 6 羽流注入口 7 羽流分水器 8 羽流浮子流量计 9 羽流定压水箱 10 羽流储水箱 11 羽流供水泵 12 溢流板 13 整流格栅
调节阀:g,j;止回阀:f,k;排气阀:l;球阀:a,b,c,d,e,h,i

$$\frac{T - T_0}{T_0} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (2)$$

式中: W_n 为热源发热量, J/s; c_p 为空气定压比热容, J/(kg·K); Q_n 为热源附近被加热的空气的流量, m^3/s ; ρ 为热源附近空气被加热后的密度, kg/m^3 ; ρ_0 为环境空气密度, kg/m^3 ; T 为热源附近空气被加热后的温度, K; T_0 为环境空气温度, K。

在盐水流动和空气运动中, 羽源体积流量分别为 Q_m 和 Q_n , 密度分别为 ρ_m 和 ρ_n , 周围环境密度分别为 ρ_{m0} 和 ρ_{n0} , 重力加速度分别为 g_m 和 g_n , 则两者的折减重力加速度分别为:

$$g'_m = \frac{(\rho_{m0} - \rho_m)}{\rho_{m0}} g_m \quad (3)$$

$$g'_n = \frac{(\rho_{n0} - \rho_n)}{\rho_{n0}} g_n \quad (4)$$

浮力通量定义为羽流的体积流量 Q 与折减重力

加速度 g' 的乘积。对于模型空间来说, 热羽流盐水的浮力通量为:

$$B_m = \frac{Q_m g_m \Delta \rho_m}{\rho_{m0}} \quad (5)$$

式中: B_m 为盐水浮力通量, m^4/s^3 ; Q_m 为热羽流体积流量, m^3/s 。原型空间中, 热羽流浮力通量为:

$$B_n = \frac{W_n g_n \beta}{c_p \rho_{n0}} \quad (6)$$

式中: B_n 为热羽流浮力通量, m^4/s^3 ; β 为热膨胀系数, K^{-1} 。

通过对浮力通量进行量纲分析可知, $(B/L)^{1/3}$ 具有与速度 u 相同的物理量纲, 由此可以得到:

$$C_B = C_u^3 C_l \quad (7)$$

经推导, 冷射流系统与羽流系统设计相似比例尺分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 冷射流系统设计相似比例尺

Tab. 1 The similarity scale of cold jet system

特征量	液态模型	原型	相似比例
几何尺寸	l_m	l_n	C_l 选定
密度(温度)差	$\frac{\Delta \rho_m}{\rho_{m0}}$	$\frac{\Delta T_n}{T_{n0}} \approx \frac{\Delta \rho_n}{\rho_{n0}}$	C_Δ 选定
速度	u_m	u_n	$C_u = (C_\Delta C_g C_l)^{1/2} = (C_\Delta C_l)^{1/2}$
时间	$\tau_m = \frac{l}{u_m}$	$\tau_n = \frac{L}{u_n}$	$C_\tau = \frac{C_l}{C_u} = \left(\frac{C_l}{C_\Delta}\right)^{1/2}$
重力加速度	g_m	g_n	$C_g = 1$

表 2 羽流系统设计相似比例尺

Tab. 2 The similarity scale of plume system

特征量	液态模型	原型	相似比例
几何尺寸	l_m	l_n	C_l 选定
速度	u_m	u_n	$C'_u = C_u$
浮力通量	$B_m = \frac{Q_m g_m \Delta \rho_m}{\rho_{m0}}$	$B_n = \frac{W_n g_n \beta}{c_p \rho_{n0}}$	$C_B = C_u^3 C_l$
源强度	$Q_m = \frac{B_m \rho_{m0}}{g_m \Delta \rho_m}$	$W_n = \frac{B_n c_p \rho_{n0}}{g_n \beta}$	$C_s = C_u^3 C_l \frac{\rho_{m0} \beta}{\Delta \rho_m c_p \rho_{n0}}$
时间	$\tau_m = \frac{l}{u_m}$	$\tau_n = \frac{L}{u_n}$	$C_\tau = \frac{C_l}{C_u} = \left(\frac{C_l}{C_\Delta}\right)^{1/2}$
重力加速度	g_m	g_n	$C_g = 1$

2 液态模型实验系统

2.1 实验系统概述

图 4 为实验台实物图。该实验台原型实验基地

设置上下两排各 8 个喷口, 喷口出口尺寸为 373 mm, 每排喷口间距为 1.5 m, 两排喷口高度分别为 8.15 m 和 5.5 m。实验台冷射流系统配备了三种不同尺寸的文丘里喷嘴, 可根据不同实验工况随时

4 实验结果及分析

4.1 单股热羽流对单股冷射流的干扰

图 6、图 8 所示为单股冷射流运动的轴心断面速度分布图,图 7、图 9 和图 10 所示为单股冷射流在单股热羽流作用下的轴心断面速度分布图。热羽流注入的水平位置在 $x = 50$ cm 处,与模型相对应,原型中热源位置位于 $x = 10$ m 处。

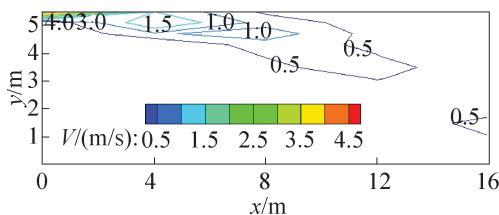


图 6 工况 1 轴心断面速度分布

Fig. 6 Velocity distribution of the jet axis section of case1

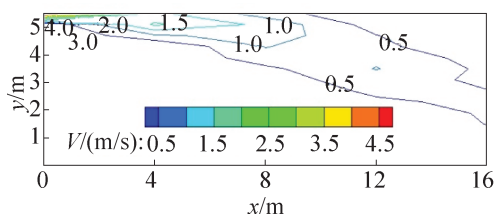


图 7 工况 2 轴心断面速度分布

Fig. 7 Velocity distribution of the jet axis section of case2

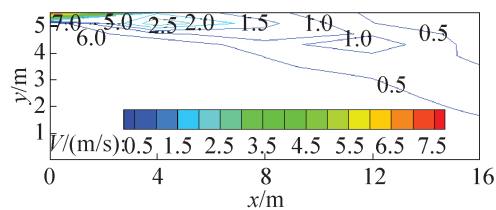


图 8 工况 3 轴心断面速度分布

Fig. 8 Velocity distribution of the jet axis section of case3

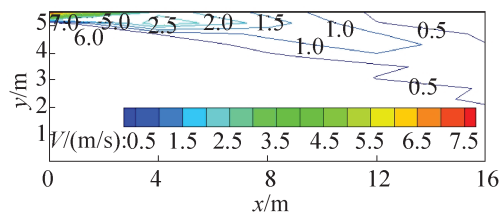


图 9 工况 4 轴心断面速度分布

Fig. 9 Velocity distribution of the jet axis section of case4

对比单股冷射流运动的速度分布图可知,受竖向热羽流的作用,作用点下游附近冷射流的速度扩散范围变小,以初速度为 5 m/s 的冷射流为例,受 500 W

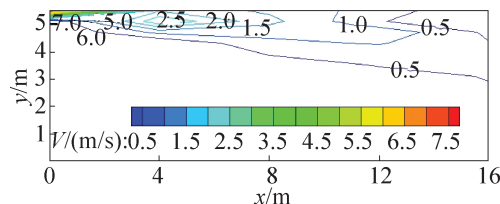


图 10 工况 5 轴心断面速度分布

Fig. 10 Velocity distribution of the jet axis section of case5

热源形成的竖向热羽流作用,在 $x = 12$ m (作用点下游相距 2 m) 处的冷射流速度扩散范围(以 $v = 0.2$ m/s 边界)减小了约 12%;竖向热羽流作用于横向冷射流的中段时,冷射流的速度扩散在二者相互作用点上游保持其基本的结构,但中心区域的速度扩散明显后推,以原型初速为 8 m/s 的单股冷射流为例,其中心区域末端位置为 $x = 9.1$ m,在发热量为 500 W 热源形成的热羽流作用下,其中心区域后推至 $x = 10$ m。

实验结果表明,在热源形成的竖向热羽流作用下,横向冷射流的运动轨迹发生了向上的偏转;在相同发热量热源形成的热羽流作用下,初速为 8 m/s 的冷射流的运动轨迹受到的干扰比初速为 5 m/s 的冷射流小;对于初速为 8 m/s 的水平冷射流来说,发热量大的热源(1000 W)对其运动轨迹的干扰强于发热量小的热源(500 W);单股竖向热羽流对单股横向冷射流对作用点上游的冷射流轨迹没有明显干扰作用,冷射流轨迹的抬升主要表现在作用点下游的冷射流末段。

4.2 两股热羽流对单股冷射流的干扰

图 11、图 12 和图 13 所示为不同工况单股冷射流在两股热羽流作用下的轴心断面速度分布图。羽源注入的水平位置分别在 $x = 30$ cm 和 $x = 70$ cm 处,与模型相对应,原型中热源位置位于 $x = 6$ m 和 14 m 处。

两股相同强度的竖向羽流分别作用于横向射流的初段和末端,由图可以看出:初速为 5 m/s 和 8 m/s 的冷射流初段速度扩散均能保持其基本结构,但中心区域的速度扩散明显后推,以原型初速为 8 m/s 的单股冷射流为例,其中心区域末端位置为 $x = 9.1$ m,在两个发热量为 500 W 热源形成的热羽流作用下,其中心区域后推至 $x = 12.4$ m;两股相同强度的热羽流作用于冷射流的初段和末端,在这两个作用点处对射流运动轨迹的干扰作用大小各不相同,以两个 1000 W 热源形成的两股羽流作用下的 8 m/s 冷射流为例,在 $x = 6$ m 处,冷射流轴心轨迹竖向偏移量基本保持不变,在 $x = 14$ m 处,冷射流轴心轨迹上升了约 0.7 m。

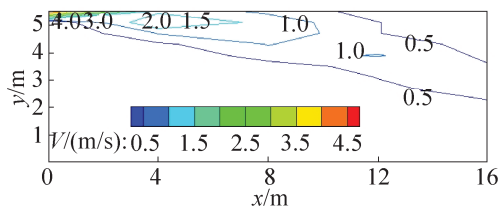


图 11 工况 6 轴心断面速度分布

Fig. 11 Velocity distribution of the jet axis section of case6

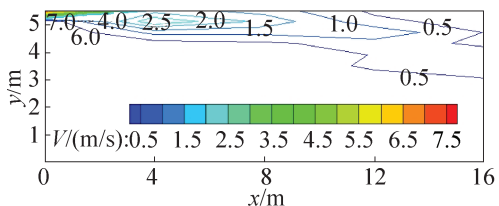


图 12 工况 7 轴心断面速度分布

Fig. 12 Velocity distribution of the jet axis section of case7

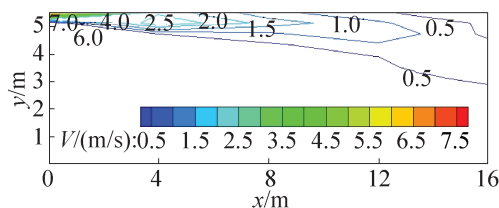


图 13 工况 8 轴心断面速度分布

Fig. 13 Velocity distribution of the jet axis section of case8

实验测试结果表明:在两个热源形成的两股竖向热羽流作用下,单股横向冷射流的运动轨迹发生的偏转量增大;竖向热羽流与横向冷射流的作用点不同,冷射流运动轨迹受到的干扰作用大小也不同;两股相同强度的竖向热羽流分别作用于冷射流的初段和末段,热羽流对冷射流初段的运动轨迹无明显干扰作用,而对冷射流末段的运动轨迹干扰作用明显,说明在冷射流初段,冷射流的惯性力作用较强,不易受热羽流干扰,而在冷射流末段,冷射流惯性力减弱,易受热羽流干扰。

4.3 两股热羽流对两股叠加冷射流的干扰

工况 9 和工况 10 分别测试了两股冷射流叠加和两股叠加冷射流在两股热羽流作用下的运动情况,其轴心断面速度分布分别如图 14 和图 15 所示。两股冷射流的喷口间距为 7.5 cm,与模型相对应,原型中两喷口间距为 1.5 m。羽源注入的水平位置分别在 $x = 30$ cm 和 $x = 70$ cm 处,与模型相对应,原型中热源位置位于 $x = 6$ m 和 14 m 处。

由两股冷射流叠加运动速度分布图对比单股冷射流运动的速度分布图可以看出:在冷射流初段冷射

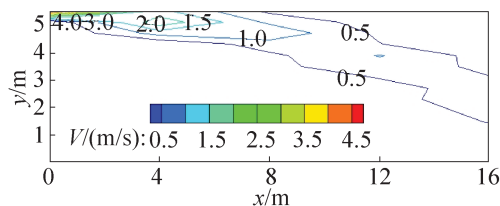


图 14 工况 9 轴心断面速度分布

Fig. 14 Velocity distribution of the jet axis section of case9

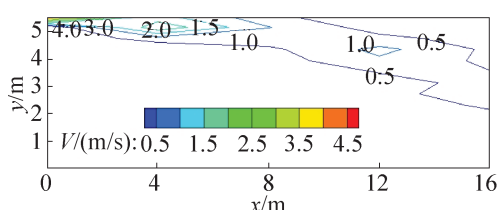


图 15 工况 10 轴心断面速度分布

Fig. 15 Velocity distribution of the jet axis section of case10

流的运动轨迹和速度扩散保持其基本结构,冷射流中段(约 $x = 8$ m 处),冷射流轨迹开始发生偏转,两股冷射流运动的速度叠加后轴心轨迹在 $x = 16$ m 处上升了约 0.91 m;在 $x = 16$ m 处,冷射流的速度扩散范围(以 $v = 0.2$ m/s 边界)增加了约 11%;由于两股冷射流的叠加效应,冷射流的中心区域的速度扩散明显后推,以原型初速为 5 m/s 的单股冷射流为例,中心区域末端位置为 $x = 8.9$ m,两股冷射流叠加后,其中心区域后推至约 $x = 9.5$ m 处。再对比两股横向冷射流在两股竖向热羽流作用下的速度分布图可以看出:在冷射流初段冷射流的运动轨迹和速度扩散保持其基本结构,在末段的作用点($x = 14$ m)处,冷射流的速度扩散范围(以 $v = 0.2$ m/s 边界)减小了约 13%;在冷射流中段前端(约 $x = 6$ m 处),冷射流轨迹开始发生偏转,在两股 500 W 热源形成的热羽流作用下,初速为 5 m/s 的两股冷射流叠加后在 $x = 16$ m 处轴心轨迹上升了约 0.40 m。实验结果表明,相对于单股冷射流在两股热羽流作用下的运动来说,两股冷射流叠加后受热羽流的影响相对较小。

5 结论

1) 借助相同速度比例尺,可实现冷射流系统与热羽流系统的相似同步性,模拟二者相互运动规律。

2) 在单个热源形成的单股竖向热羽流作用下,单股横向冷射流的运动轨迹发生了向上的偏转。受竖向热羽流的作用,作用点下游附近冷射流的速度扩散范围变小。

3) 在两个热源形成的两股竖向热羽流作用下,

单股横向冷射流的运动轨迹发生的偏转量增大。竖向热羽流与横向冷射流的作用点不同,冷射流运动轨迹受到的干扰程度也不同:在冷射流初段,冷射流的惯性力作用较强,不易受热羽流干扰,而在冷射流末段,冷射流惯性力减弱,易受热羽流干扰。

4)相对于单股冷射流在两股热羽流作用下的运动来说,两股冷射流叠加后,热羽流的干扰作用有所减弱。

参考文献

- [1] 黄晨,李美玲,左涛,等.采用第一类边界条件数值模拟具有开口的大空间建筑室内速度场与温度场[J].制冷学报,2002,23(2):20-24. (Huang Chen, Li Meiling, Zuo Tao, et al. Airflow and temperature fields in a large space with openings by CFD using the first kind boundary condition[J]. Journal of Refrigeration, 2002, 23(2): 20-24.)
- [2] 王昕.大空间建筑复合通风运动机理与理论模型研究[D].上海:上海理工大学,2008.
- [3] Linden P F, Lane-Serff G F, Smeed D A. Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 212: 309-335.
- [4] Baines W D, Turner J S. Turbulent buoyant convection from a source in a confined region[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 37(1): 51-80.
- [5] Baines W D. A technique for the direct measurement of volume flux of a plume[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 132(1): 247-256.
- [6] 刘迎云,王汉青,高建民.盐水溶液模拟非等温室内空气组织的试验研究[J].流体机械,2005,33(11):77-

80. (Liu Yingyun, Wang Hanqing, Gao Jianming. Test of salt liquor simulating non-isothermal indoor air-flow [J]. Fluid Machinery, 2005, 33(11): 77-80.)

- [7] 高建民. PIV 在室内空气组织模型实验中的应用研究[D]. 湖南:南华大学,2004.
- [8] 王磊.热压驱动下的置换式自然通风实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [9] 王磊,高军,赵加宁.采用盐水模型实验法研究自然通风[J].建筑热能通风空调,2007,26(5):20-24. (Wang Lei, Gao Jun, Zhao Jianing. Analysis of natural ventilation using salt-bath scaled model[J]. Building Energy & Environment, 2007, 26(5):20-24.)
- [10] 高军.建筑空间热分层理论及应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [11] 董志勇.射流力学[M].北京:科学出版社,2005:11-32.
- [12] Hunt G R, Kaya N G. Virtual origin correction for lazy turbulent plumes [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 435: 377-396.

作者简介

王昕,女,副教授,上海理工大学环境与建筑学院,(021)55271045,E-mail:wangxinshiyun@126.com。研究方向:大空间建筑室内热环境及节能研究。

About the author

Wang Xin, female, associate professor, School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, + 86 21-55271045, E-mail:wangxinshiyun@126.com. Research fields: thermal environment in large space buildings and building energy conservation.