

基于POD方法的圆型喷口射流速度场结构分析

王昕, 马静思, 刘友勤

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 大空间建筑中分层空调系统喷口送风射流运动卷吸会造成热量自上部非空调区向下部空调区转移, 这是导致空调系统负荷增加的原因之一。本文搭建圆型喷口射流运动盐水模型实验台, 利用粒子速度测量系统(PIV)提取喷口卷吸剪切层附近流场速度矢量场信息, 借助特征正交分解方法(POD)剖析剪切层内的相干结构及其能量分布、竖向与横向速度特征值比例, 为后期研究喷口卷吸运动引起的大空间对流转移热量提供实验与理论参考。

关键词: 盐水实验台; 特征正交分解POD; 流场相干结构; 能量分布; 竖向与横向速度特征值

中图分类号: TU83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2015)02-0161-05

Structure analysis in circular jet shear layer velocity field based on POD method

WANG Xin, MA Jingsi, LIU Youqin

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

Abstract: The air jet entrainment of stratified air conditioning system in large space building can cause the transfer of heat from the upper part of conditioned area to the lower part of non air conditioning area, which is one of the reasons leading to the increased load of air conditioning system. The article built the platform of saline model experiment of circular jet movement, and used the particle velocity measurement system (PIV) to extract information of nozzle flow field near the shear layer entrainment velocity vector field. With the help of proper orthogonal decomposition method (POD), it analyzed the coherent structures and energy distribution, vertical and horizontal velocity characteristic value proportion in the shear layer. The system can provide experimental and theoretical reference for the later research of transfer heat in large space caused by jet entrainment.

Key words: saline experimental platform; proper orthogonal decomposition; flow field structure; energy distribution; characteristic value of vertical and horizontal velocity

1 研究背景

在大空间建筑中, 分层空调系统喷口送风射流运动卷吸会造成热量自上部非空调区向下部空调区转移运动^[1], 这将导致空调系统负荷增加, 造成能源浪费^[2]。为确定大空间建筑采用喷口侧送风时由于卷吸造成的额外的热量转移量, 需对射流运动的卷吸特性^[3]进行分析。而射流卷吸的剪切层内含有大量的相干结构^[4-5], 包括大尺度和小尺度的涡结构, 这些相干结构是引起卷吸和流场能量分布与转移的主要因素。国内外在卷吸运动特性方面关

于射流卷吸量的研究在理论方面已经比较成熟^[6-9], 而在射流卷吸流场结构与能量转移方法方面的研究相对较少。特征正交分解POD(Proper Orthogonal Decomposition)方法能够有效地对粒子速度测量系统PIV(Particle Image Velocimetry)得到的速度矢量场进行提取与分析^[10]。POD已经被证明是一种从实验流场数据中识别其主要特征部分的有效方法, 可以直接提取与要分析的物理过程最相关的数据, 可以从某一时间序列的流场空间信号中提取出一定数量的特征模态, 这些模态是在这段时间内出现最多的流场结构集合, 也就是最主要的相

收稿日期: 2014-10-21; 修回日期: 2014-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108263); 沪江基金资助(D14003)

作者简介: 王昕(1980-), 女, 山东济南人, 博士, 副教授, 研究生导师, 主要研究方向: 大空间建筑室内热环境及节能研究。

干结构。通常用来分析的对象是流场信号中的涡量场或速度矢量场。

本文以上海理工大学大空间实验基地及其侧墙圆型喷口送风流为原型,根据相似准则搭建盐水水箱模型实验台,模拟高大空间喷口射流卷吸运动。利用 PIV 速度测试系统提取射流卷吸剪切层附近的信息,用粒子图像测速系统记录水箱中的流体流动。使用特征正交分解 POD 方法对速度场进行分析,得到卷吸剪切层流场结构,将流场中的相干结构与其所包含的能量结合起来,寻找流场中对流动能量贡献最大的流动结构,为进一步分析由射流卷吸引起的大空间内部自上而下的热量转移提供理论基础。

2 实验系统设计

2.1 模型实验台设计与搭建

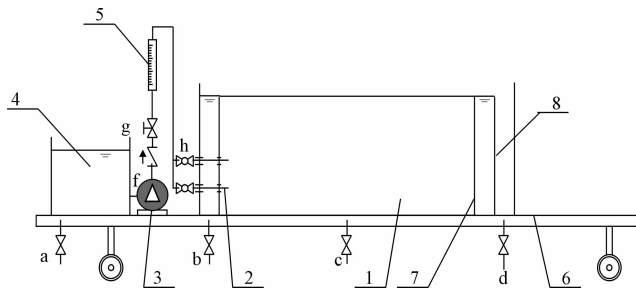
上海理工大学大空间实验基地结构为 20.00 m × 14.80 m × 8.75 m,喷口位于短边侧墙 6.00 m 高的位置,等距离布置 5 个,直径为 87 mm 的喷口。根据相似理论,选取几何比例尺为 1:20 搭建模型实验台。模型实验台同样采取喷口侧送风气流组织,仅模拟其中单个喷口射流运动卷吸运动。由于原型实验和模型实验都属于夏季非等温气流运动过

程,因此二者的控制方程在形式上完全相同。只要使得控制准则数 Re 、 Ar 和 Pr 相等,便可实现模型与原型的相似。在这 3 个准则数中, Ar 数是表征非等温气体流动的主要准则数, Re 数都处于自模区,因此只需要模型与原型的 Ar 数相等,则模型实验与原型相似。利用实验台进行流体倒置试验,分别用盐水和清水模拟冷射流与环境空间,研究在有浓度差工况下不同射流速度的冷射流对其周边环境的卷吸作用。实验台相似比例尺如表 1 所示。

表 1 冷射流系统设计相似比例尺

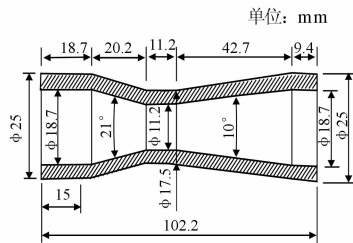
特征量	液态模型	原型	相似比例
几何尺寸	l_m	l_n	C_l 选定
密度(温度)差	$\frac{\Delta\rho_m}{\rho_{m0}}$	$\frac{\Delta T_n}{T_{n0}} \approx \frac{\Delta\rho_n}{\rho_{n0}}$	C_Δ 选定
速度	u_m	u_n	$C_u = (C_\Delta C_g C_l)^{1/2}$ $= (C_\Delta C_l)^{1/2}$
重力加速度	g_m	g_n	$C_g = 1$

注:盐水流动和空气流动的密度与周围环境的密度差分别为 $\Delta\rho_m$ 、 $\Delta\rho_n$,盐水流动和空气流动周围环境的密度分别为 ρ_{m0} 和 ρ_{n0} ,空气流动与周围环境的温度差 ΔT_n ,空气流动周围环境的温度为 T_n 。



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. 实验台底座;7. 整流格栅;8. 溢流板。调节阀;g;止回阀;f;球阀;a、b、c、d

图 1 冷射流液态模型实验台结构示意图与文丘里喷嘴图



冷射流系统提供的流体以一定的初速度从文丘里喷管注入主环境水箱,利用粒子图像测速系统记录水箱中的流体流动。其中液态模型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,实验台和喷嘴结构见图 1,实验台实物图如图 2 所示。

使用 PIV 对盐水水箱实验台的射流卷吸剪切层流场速度矢量场信息进行拍摄提取,成像区域距离喷口 20 cm,是卷吸较强区域,成像范围为 15 cm × 15 cm,且上下边缘与水箱壁平行。取相机拍摄的连续的 20 帧速度矢量场信息作为分析对象。



图 2 冷射流液态模型实验台实物图

2.2 实验工况

PIV 提取流场信息的模型实验共有 6 个工况,6 个工况的原型送风速度分别为 2.00 ~ 7.00 m/s,工

况的射流清水与环境盐水密度差都为 5.28 kg/m^3 , 对应于原型中射流与环境温差为 6°C , 工况表如表 2 所示。

表 2 实验工况表

序号	原型喷口		m/s, kg/m^3	
	送风速度	模型喷口水射流速	射流水密度	环境盐水密度
工况 1	2.00	0.25		
工况 2	3.00	0.37		
工况 3	4.00	0.58	998.30	1003.59
工况 4	5.00	0.66		
工况 5	6.00	0.79		
工况 6	7.00	0.87		

3 POD 方法在射流卷吸领域内的应用及物理意义

特征正交分解 (Proper Orthogonal Decomposition) 是一种将复杂流场分解为若干基本特征模态的方法, 然后逐个分析这些基本模态得到原始复杂流场的主要及次要结构。从能量角度分析, POD 是将流场中的相干结构与其所包含的能量结合起来, 一次识别流场中能量较大结构。从数学过程上分析, POD 则是通过计算找到流场函数空间中的一组最优正交坐标系, 使流场元素集合在这组正交坐标系的各坐标轴上投影最大^[11]。

采用二维 POD 对射流卷吸喷口轴心所在垂直平面内的速度矢量场和涡流场进行分析。其中流场动能与拟能分别相关联于速度矢量与涡量。假设有 X 个瞬时速度矢量场或涡量场, 每个速度矢量场或涡量场都可以用一个 $x_1 \times x_2$ 的二维矩阵 V 来表示, 矩阵中的元素值 v_{mn} 代表着具体位置的流场参数。则表示这 X 个瞬时信息场元素间相关性的协方差矩阵 $A^{X \times X}$ 表示为:

$$A_{ij} = \frac{1}{x_1 x_2} \sum_{m=1}^{x_1} \sum_{n=1}^{x_2} V(v_{mn}, t_i) V(v_{mn}, t_j) \quad (1)$$

式中: v_{mn} 代表着具体位置的流场参数, 是速度或涡量, m/s 或 s^{-1} 。 t_i, t_j 表示流场信息所在的时间节点。对所得的协方差矩阵进行正交分解, 得到矩阵特征值 $\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^X$ 和对应的特征向量 $\{a^X\}$, 于是便可以求出每个 POD 模态:

$$\varphi^i = \sum_{j=1}^k a_j^i V^j \quad (2)$$

式中: a_j^i 为特征值 α^i 对应的特征向量 $\{a^i\}$ 的第 j 个元素值; V^j 为原流场参数。

其中特征值的大小表征了各自对应的 POD 基所包含的向量集合 $\{U^i\}$ 的特征的多少。定义公式为:

$$E = \sum_{i=1}^n \alpha^i / \sum_{j=1}^k \alpha^j \quad (3)$$

式中: E 为前 n 个 POD 基所包含的向量集合 $\{U^i\}$ 的特征在总特征中的比重, 即所谓的“广义能”的定义。一般情况下, 从大到小排列的特征值序列 $C^i = c_1^i, c_2^i, c_3^i, \dots, c_k^i$ 衰减很快, 往往前几个 POD 基就能包含了绝大部分的“广义能”, 所以对于复杂系统, 只需要分析前几阶 POD 基就能得到系统的主导特征。

使用正交分解方法将全序列的 POD 模态进行组合, 可以实现对原流场的重新构建:

$$V_t^i = \sum_{n=1}^X \alpha_n^i \varphi^n \quad (4)$$

4 基于 POD 方法的射流卷吸流场结构分析

POD 主要分析对象为喷口射流空气与周围环境空气卷吸作用较强的剪切层附近的流场区域, 以工况 2 和工况 6 的成像区域为例, 提取该区域流场的主要流动结构和能量。其剪切层附近的速度矢量场如图 3(a)、(b) 所示:

4.1 模态重构流场分析

图 4 为工况 2 的前 3 阶 POD 模态重构流场, 图中 1 阶模态反映的是整个流场中能量比重最大的部分即射流主体流动情况。说明在整个射流流场中, 射流沿轨迹向前喷射的主体部分是流场中最主要的运动结构, 反映了整个流场中的绝大部分动能分布。2 阶模态和 3 阶模态则为流场中小尺度的流动结构, 随机分布在了整个流场区域中。

图 5 为工况 6 的前 3 阶 POD 模态重构流场, 图中 1 阶模态反应的主要流动结构是射流沿轨迹的主体部分运动, 但该工况下射流主体运动区域相对于工况 1 的 1 阶模态要小, 且同时 1 阶模态的下部流动结构更加的紊乱; 2 阶和 3 阶模态为流场中小尺度的流动结构, 随机分布在了整个流场区域中。

由此可见, 喷口射流速度由 2.00 m/s 提高到 7.00 m/s 后, 对周围环境流体的卷吸扰动明显增加。

4.2 积累能量比重分布分析

图 6 为工况 2 和工况 6 中 POD 模态的累积能量比重分布图, 两个工况的 1 阶模态都占据了流场

中的大部分能量。图中数据显示,工况2的1阶模态能量占总能量的37%左右,而工况6的1阶模态能量则占了总能量的29%,但是高阶模态所包含的能量在总能量中的比例工况6要大于工况2。这就说明了随着射流初始速度的增大,大尺度的流动结构包含能量的比例减少,即随着射流初始动能的增加,能量向小尺度流动结构转移的比例越大。

4.3 竖向与横向速度特征值比例分析

射流流场卷吸强度与剪切层附近竖向流速与水平流速之比密切相关。利用POD方法可以得到不

同阶数的POD模态、不同尺度的流动结构中的竖向流动能量和水平流动能量之比而流动能量和流动的速度是直接关联的。根据实验工况分析,竖向速度的POD模态表征竖向流动结构,其对应的特征值则表征竖向流动所包含的能量;横向速度的POD模态表征横向流动结构,其对应的特征值则表征横向流动所包含的能量。二者比值则反映了射流运动中,由于卷吸造成的竖向流动结构所包含的能量与射流自身横向流动结构所包含的能量的比值,间接反映了卷吸在整个射流流场中所占的比重。

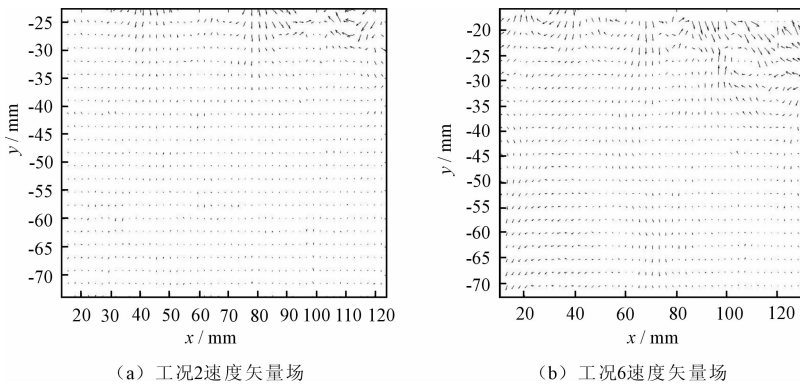


图3 射流卷吸剪切层附近典型速度矢量场

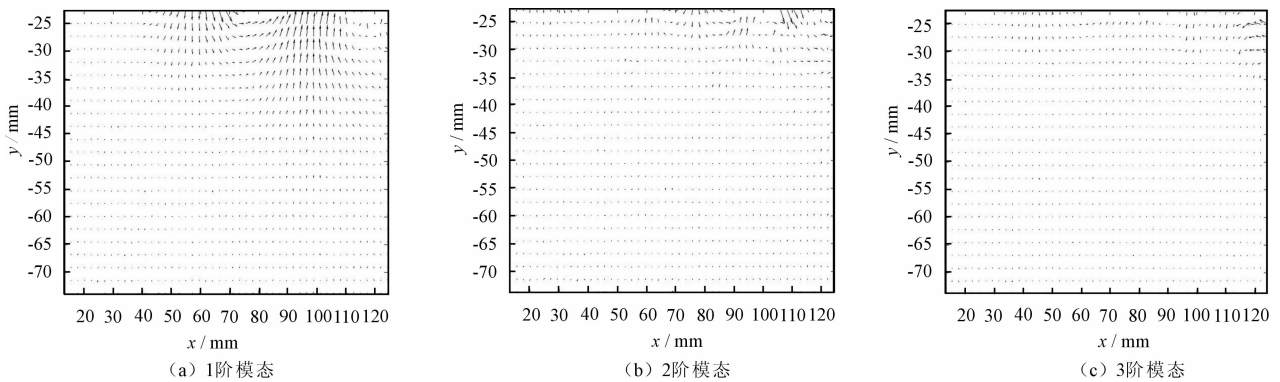


图4 工况2剪切层附近POD模态

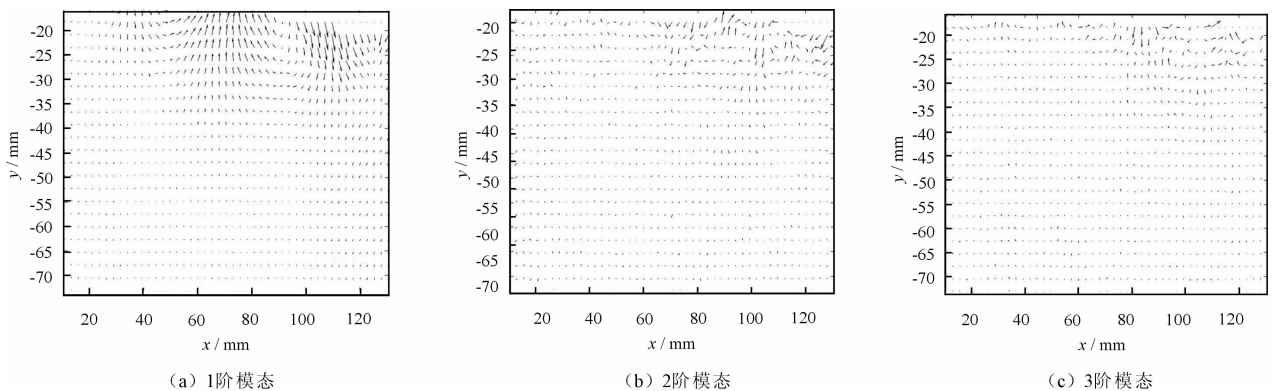


图5 工况6剪切层附近POD模态

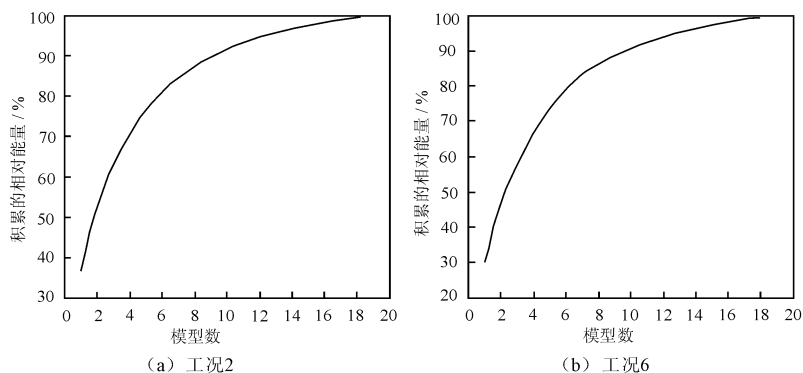


图6 POD模态累积能量分布

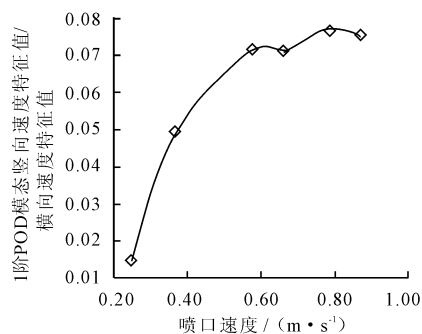


图7 竖向与横向速度特征值之比

图7为6个实验工况不同喷嘴射流速度下,各流场信息中1阶POD模态竖向速度特征值与横向速度特征值的比值。随着喷嘴射流初速度的增大,竖向特征值与横向特征值的比值总体呈现增大的趋势,但增大的趋势逐渐变得不明显。图中显示出在低阶POD模态中,射流自身的流动仍然是流场结构中最主要的流动结构,由卷吸造成的竖向流动很不明显,但这种情况会随着POD模态阶数的增大而减弱,即高阶POD模态下,竖向特征值与横向特征值之比会变大。

5 结 语

本文使用特征正交分解法对温度均匀环境下射流卷吸剪切层速度场进行了分析。剪切层附近的速度矢量场为使用PIV对盐水模型实验台内水射流进行拍摄提取得到的。通过分析后可以得到:

(1)通过使用POD方法对流场中不同尺度的、包含能量不同的相干结构进行分析后,得到流场结构和能量分布,表明能量大的结构为剪切层附近的涡结构,能量较小的流动结构则随机的分布在整个流场空间内。

(2)流体射出喷嘴的初始速度对流场中的相干结构和能量分布有较大的影响,随着流出速度的增大,能量逐渐向小尺度的相干结构转移,剪切层附近的竖向流动能量变得显著。

(3)分析了不同POD模态下纵向速度与横向速度之比,得出射流卷吸量在总射流量中所占的比例。通过改变不同射流初始速度值,可以得出随着初始

流量的增加,竖向流动结构所包含的能量随之增加,卷吸在整个流场中所占的比例也随之增加。

参考文献:

- [1] 贾磊,王磊,张秀平,等. 夏热冬冷地区大型公共建筑能耗现状及改进分析[J]. 安徽建筑,2012(4):35-36+40.
- [2] 董小超. 大空间分层空调热环境设计、实验研究及综合评价[D]. 上海:上理工大学,2012.
- [3] 高军,李晓冬,高甫生. 大空间分层空调射流气流重合与卷吸特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,36(6):815-818.
- [4] 何江,符松. 竖直平板间自然对流大尺度相干结构的POD分析[J]. 力学学报,2003,35(4):385-392.
- [5] 邱翔,刘宇陆. 湍流的相干结构[J]. 自然杂志,2004,26(4):187-193.
- [6] 王金枝,肖明,吴晓武. 射流卷吸作用影响射流偏转的理论分析[J]. 山东电力技术,2000(3):4-6.
- [7] Strang E J, Fernando H J S. Entrainment and mixing in stratified shear flows [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001,428:349-386.
- [8] 董志勇. 射流力学[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [9] 吴照,黄晨,王丽慧. 大空间分层空调热转移负荷特性分析[J]. 制冷空调与电力机械,2008,29(5):5-8+32.
- [10] 阳东,祝实,霍然,等. 受限空间内水平风作用下热分层流流场结构的POD分析[J]. 重庆大学学报,2013,36(1):121-126.
- [11] 邱亚松,白俊强,华俊. 基于本征正交分解和代理模型的流场预测方法[J]. 航空学报,2013,34(6):1249-1260.