

应用粒子图像测速技术 研究散流器的气流流场

军事医学科学院卫生装备研究所 韩 浩[☆] 徐新喜 谭树林
国家生物防护装备工程技术研究中心

摘要 为了得到舱体内气流组织数值模拟所需的边界条件,采用粒子图像测速(PIV)技术对某型散流器的气流流场进行了测定,得到了 10 个断面上的时均速度场,使用速度矢量合成得到了相交点上的 25 个三维速度矢量,并对流场的特点进行了分析。结果表明,轴流风机形成的流场经过散流器后向四周分散的趋势更加明显,并且出现了气流的分叉,这些特点在以散流器为边界进行数值模拟时尤其值得注意。

关键词 PIV 散流器 流场测量 气流速度

Investigation on characteristics and structures of flow field near a diffuser with PIV

By Han Hao[★], Xu Xinxi and Tan Shulin

Abstract Experimentally investigates the characteristics and structures of flow field near the diffuser with particle image velocimetry (PIV) measurement technique in order to obtain the boundary condition for numerical simulation on air distribution in cabins. Obtains the time averaged velocity fields on ten sections and 25 three-dimensional velocity vectors of intersections. Discusses the properties of the flow field. The results show that airflow diffusion becomes wider and divarication turns up when the airflow generated by axial flow fan passes through the diffuser, which should be paid more attention while the diffuser is used as boundary condition for numerical simulation.

Keywords particle image velocimetry (PIV), diffuser, flow field measurement, airflow velocity

[★] Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin, China

①

0 引言

送风口出流特性是影响室内气流组织的重要因素。在用数值模拟方法预测通风空调房间气流组织时,通常将送风口处的气流速度简化为均匀分布,而实际上送风口出流可能存在不均匀性^[1]。

房间通风一般都是通过送风口的空气射流来实现送风和室内空气的混合,送风口空气入流条件对空调房间的空气流动情况影响很大。为了正确预测室内的空气温湿度和风速分布情况,需要知道送风参数以正确描述入流边界条件,而实际的送风口几何形状很复杂,种类也较多,比如条缝风口、方型散流器、盘型散流器、百叶风口等^[2]。目前的研

究主要使用风口模型或简化为均匀送风^[3-4]。

在某些情况下,由于空间限制,常常将轴流风机与散流器直接相连组成通风系统,送风口处的流场更加复杂。有必要对单一旋转射流经过散流器后的流场形态和参数进行研究。除了使用 CFD 方法对局部详细结构直接进行数值模拟外,最直观可靠的方法就是使用流场可视化法(flow

①[☆] 韩浩,男,1979 年 1 月生,在读博士研究生
300161 天津市河东区万东路 106 号
(022) 84656826
E-mail: thinkinghh@163.com
收稿日期:2005-11-11

visualization), 直接观察和了解流场结构, 进而得到流场的感性认识和定量数据, 最终得到的测量结果不仅可以作为数值模拟的边界条件, 也可作为对数值模拟结果准确性的验证依据。

粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术是近年发展的一种流场可视化技术, 它是一种非侵入的、间接的、对整个流场剖面的测量技术, 具有较高的空间分辨率和在线及时处理影像的能力; 它能应用于多数的内外流场, 且除了流场观测外, 还能从其影像计算出流场速度。因此已被广泛应用于流场测试上^[5-9]。

1 散流器速度场的 PIV 测试

1.1 PIV 测试技术的原理

PIV 技术的基本原理就是在流场中加入跟随性、反光性良好且密度与流体相当的示踪粒子, 以粒子速度代表其所在流场内相应位置处流体的运动速度^[7]。使用片形强光照射流场中的一个测试平面, 用成像的方法记录下两次或多次曝光的粒子位置, 用图像分析技术得到各粒子的位移, 由此位移和曝光的时间间隔便可计算得到流场中各点的流速矢量, 并计算出其他运动参量 (包括流场速度矢量、速度分量、流线、旋度等)。

1.2 测试系统

本研究使用的是二维 PIV 测试系统 (如图 1 所示), 包括光路系统、采集系统/图像处理系统及控制系统。

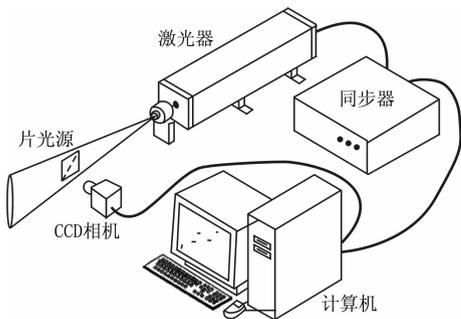


图 1 PIV 系统组成示意图

1.2.1 激光片光源系统

以双谐振脉冲式 Solo PIV Nd:YAG 激光器为光源。激光器内部包括两台独立的发生器, 工作频率为 15 Hz, 每个脉冲能量为 120 mJ。脉冲激光采用 Qswitch 触发方式获得, 脉宽 6 ns, 输出激光波长为 532 nm (绿光)。激光器发出的光束经过光学部件后转化成厚约 1 mm 的片光源。

1.2.2 图像拍摄系统

采用 TSI PowerView™ 2M 互相关 CCD 相机, 分辨率为 1 600×1 200 像素, 以 1 024 级灰度方式识别示踪粒子。CCD 相机垂直放置于测试区域前, 通过图像采集卡从 CCD 中直接读取数字化的粒子图像并将信息传送到计算机。利用同步器控制激光脉冲发出和图像采集的时序, 图像采集速度最大可达 30 帧/s, 两帧最小时间间隔为 200 ns。

1.2.3 同步器

型号为 TSI 610034。由计算机控制的同步器控制双脉冲激光和 CCD 工作时序。当使用互相关跨帧 (frames traddling) 技术^[6]时, 同步器可以使双脉冲激光分别工作在 CCD 相机第一帧脉冲的最后以及第二帧脉冲的开始, 这样可以大大缩短两帧之间的时间间隔, 增加测速范围。

1.2.4 软件

PIV 系统的控制和数据分析软件为 TSI Insight6.0, 通过它实时控制 PIV 系统的数据采集、处理和图像显示, 并完成相关的后期分析。流场显示采用 Tecplot9.0 软件。

1.2.5 示踪粒子

实验中采用的是 Rosco1700 烟雾发生器产生的示踪粒子, 发烟浓度可调。在稳定的工作状态下, 产生的球形液滴平均粒径为 1~2 μm, 分布范围集中, 能够满足 PIV 测试的要求。

1.3 测试对象及实验方案

轴流风机及散流器均安装在实验平板上, 保持两者中心在同一轴线上, 如图 2 所示。

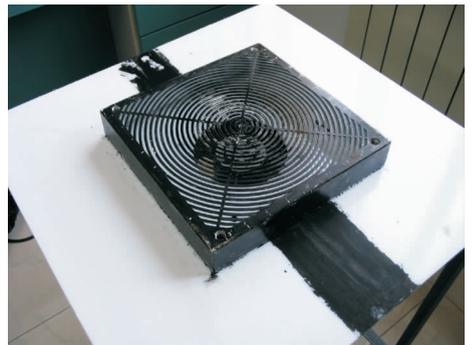


图 2 轴流风机及散流器装配示意图

轴流风机型号为 SUNON DP201A-2123HBL, 额定转速为 $2\ 750 \times (1 \pm 7\%)$ r/min, 风量为 150 m³/h, 静压为 65 Pa。

散流器的尺寸为 245 mm×245 mm×42.5

mm(长×宽×高),有效面积比为 0.47。

由于风机与散流器均为几何对称结构,因此只测量其断面的四分之一。共测量 10 个断面,具体位置如图 3 所示,其中①~⑤号断面与⑥~⑩号断面垂直。图中箭头方向表示激光入射方向,激光平面垂直于散流器平面,实验仪器布置如图 4 所示。先测量①~⑤号断面,然后水平顺时针旋转实验平板 90°,测量⑥~⑩号断面。测量面的交界线分别加以编号 1~25。最后测量距散流器表面 25 mm 处的平行断面的速度矢量,仪器布置如图 5 所示。

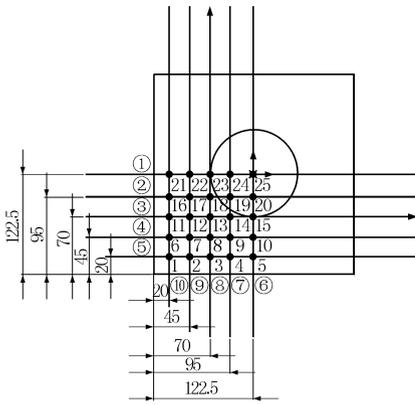


图 3 测量断面示意图



图 4 测量①~⑩号断面时的仪器布置



图 5 测量平行断面时的仪器布置

PIV 测量中,设置两束激光脉冲时间间隔为 50 μs,分析时,查问域大小为 32 pixel×32 pixel,

空间分辨率随断面的不同而不同,大约为每 pixel 163 μm。由于激光照射在实验装置表面上会引起壁面反光,减小了图像的信噪比,在空气中进行实验时尤为显著^[8]。为了减小壁面反光对近壁面区域数据的影响,对散流罩表面作涂黑处理。

2 实验结果与分析

2.1 二维速度矢量的测量

在实测时,对每一断面均拍摄了 60 对曝光图片,并对其进行了时均化处理,得到全场时均速度云图,从中可以清楚直观地看到整个流场的结构和流场细节。图 6 为测得的①~⑩号断面二维速度矢量图。图 7 为距散流器 25 mm 处平行断面的二维速度矢量图。

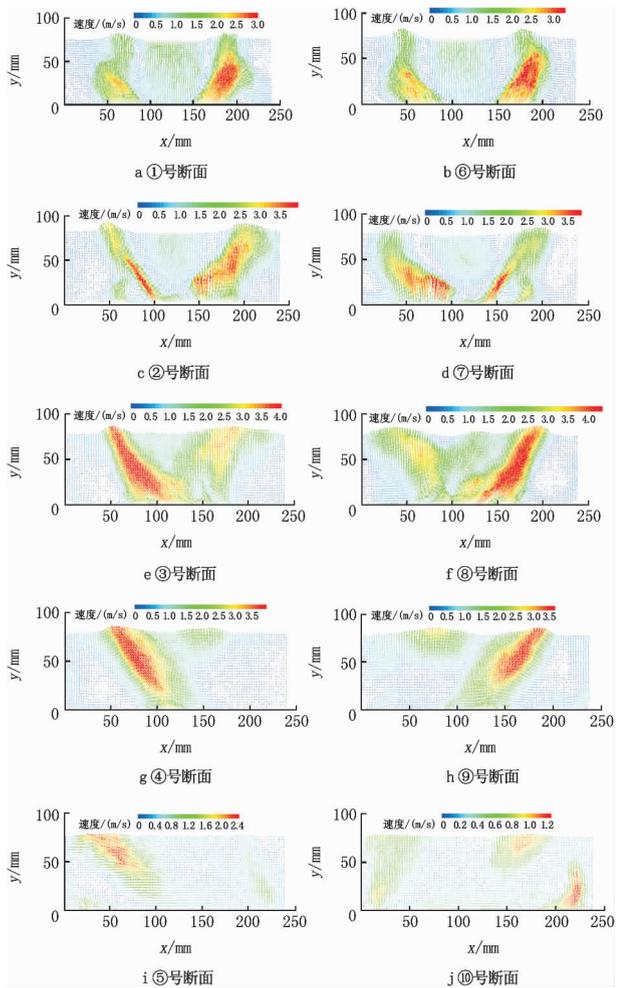


图 6 ①~⑩号断面速度分布图

2.2 三维速度矢量的合成

为了得到散流器附近的三维速度矢量,需要对通过 PIV 测量得到的二维速度矢量进行合成。

①~⑤号断面上测量得到的二维速度矢量在

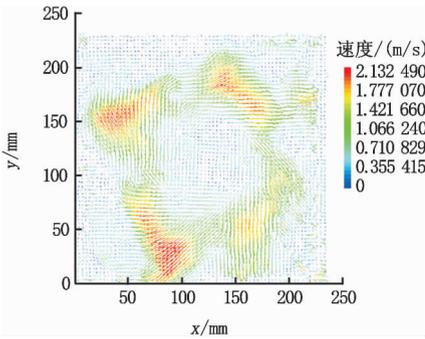


图7 平行断面二维速度矢量图(距散流器 25 mm 处)

水平面和垂直面上的分量 U_{x1} 和 U_{y1} 对应到三维坐标系上时为 U_x 和 U_z , ⑥~⑩号断面上测量得到的二维速度矢量在水平面和垂直面上的分量 U_{x2} 和 U_{y2} 对应到三维坐标系上时为 U_y 和 U_z 。

1~25 号交界线上的速度分量应满足: $U_z = U_{y1} = U_{y2}$, 则交界线上的三维速度矢量可由①~⑤号断面和⑥~⑩号断面上对应的二维速度矢量进行合成, 即

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} = \sqrt{U_{x1}^2 + U_{x2}^2 + U_z^2} \quad (1)$$

分别在①~⑩号断面上提取 1~25 号交界线上距离散流器 2.6 mm 处的二维速度矢量 U_{x1} , U_{y1} , U_{x2} 和 U_{y2} , 按照式(1)进行合成, 得到 25 个点上的三维速度矢量, 如图 8 所示。

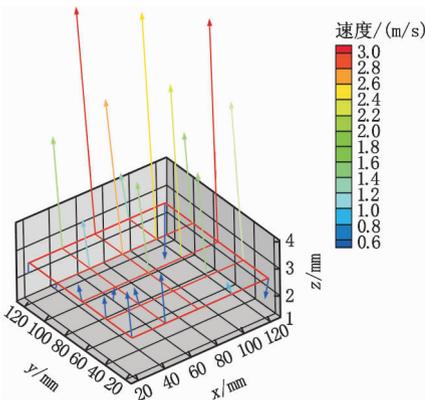


图8 三维速度矢量图

3 结果与讨论

3.1 由图 6 可以看出, ②~④号断面分别与⑦~⑨号断面上的速度分布具有较好的对称性, ①号断面与⑥号断面上的速度分布基本相同。这与实验装置的物理对称符合较好。

3.2 ①号断面和⑥号断面上的速度分布呈较明显的中心对称, 在与轴流风机扇叶位置对称的位置风速较高, 且呈射流方式向 45° 方向辐射, 散流器中

心位置气流速度基本向下, 射流附近存在较明显的卷吸效应。对于这两个断面上左右两股射流之间存在的差异, 经分析认为, 主要是因为散流器并非绝对物理对称, 对角线上存在比较大的翘曲。这一点, 图 7 也有所体现, 即速度场的轴对称性较差。

3.3 由图 8 可以看出, 由散流器的边角向散流罩的中心, 速度呈波浪型分布。边角处速度斜向上, 距中心 47.5 mm 处速度值最大, 此处对应着轴流风机扇叶的中心位置。由此位置分别向中心和向边角, 速度均出现下降。

3.4 图 6 中速度的分布呈围绕中心的顺时针旋转流动。初步分析气流大概分化成四个部分的原因是轴流风机或者散流器的 X 型支架对气流产生了干扰, 至于两者之中哪个作用更加明显, 还需要进一步的研究。

3.5 散流器外部形成的流场总体来说还是比较符合人们的直观认识的。至于出现的比较特殊的现象, 比如气流分叉和斜向射流, 可以通过散流器罩内部和风机内部流场的特征和参数加以分析研究。

4 结论

4.1 通过对散流器散流问题的 PIV 实验研究及对散流器外部时均速度场的分析可以看出, PIV 测量可以完整地描述出散流器和轴流风机组合在一起时形成的外部流场以及各种细节, 显示了 PIV 在研究复杂流动时具有其他测量手段无法比拟的全局性和把握细节的能力, 得到的速度场可为数值模拟提供足够的信息。

4.2 轴流风机形成的旋转射流在散流器的作用下, 出现了明显的偏离中心轴线的趋势。因此, 在对装备有这种“轴流风机+散流器”的各类装置进行气流组织分析尤其是数值模拟分析时, 必须精确测量所选装置的速度分布或使用更为贴切的风口模型。

4.3 利用二维 PIV 系统测量的数据合成三维速度矢量是可行的。但需要注意的是, 由于 PIV 技术是基于统计分析的一种技术, 由二维 PIV 系统进行两次测量得到的互相垂直的二维速度场, 其交界线上的气流速度很有可能会存在较大的差异。因此必须对交叉面上重叠速度矢量进行比较, 只有当重叠的速度矢量没有显著差异时, 二维 PIV 系统测得的数据才是可取的, 最终得到的三维数据才

4 经济性分析

4.1 降低工程造价

因取消了原来送风系统的送风井道,从而节约了这部分的工料及工时费用。

以防烟楼梯间加压送风(前室不送风)为例,加压送风量为 25 000~30 000 m³/h,假定层数为 19 层,裙房 3 层。裙房层高均为 4.5 m,4~19 层层高均为 3.5 m。风道竖井断面净面积为 0.7 m²。取黏土实心砖墙和轻质隔墙两种风道材料进行比较,结果见表 11。

表 11 送风井道造价

	每层风道断面净面积/m ²	每层风道建筑面积/m ²	19 层风道总建筑面积/m ²	单位表面积直接费用/(元/m ²)	风道总表面积/m ²	直接费用/元
材料 1	0.70	1.105	21.00	30	176	5 280
材料 2	0.70	0.932	17.71	60.1	172	10 337

注:材料 1 为 120 mm 厚黏土实心砖墙(包括 1.5 cm 厚双面抹灰);材料 2 为 90 mm 厚 GRC 轻质隔墙。

从表 11 可以看出,取消材料 1 风道后,可降低造价 10 560 元(按两部疏散楼梯计算),取消材料 2 风道后可降低造价 20 674 元。

每个加压送风口的造价为 260 元,按两部疏散楼梯、每部楼梯间有 7 个风口计算,风口总造价为 3 640 元。

若按材料 2 风道算,该楼的总造价节约了 24 314 元。这只是我国一幢建筑中的行政办公楼,按此推算,全国节约的总费用可想而知。

4.2 增加建筑物的使用面积及投资方销售利润

在上例中,取消由材料 1 制作的风道,建筑物每层的建筑面积可增加 1.105 m²,按两部防烟楼

梯计算,每层可增加 2.21 m²。假定高层建筑平均市场价格为 4 000 元/m²,如总毛利为 25%,那么投资方销售利润及社会税利可增加 4.20 万元(按 19 层计)。取消由材料 2 制作的风道后,每层可增加建筑面积 1.864 m²,投资方销售利润及社会税利可增加 3.54 万元。

采用新的送风加压方式,不仅可节省投资,而且还会增加投资效益。这只是对一幢 19 层高层建筑按设有两部防烟楼梯间计算的结果,如果把全国各地高层建筑物加在一起,将是多么可观的数字。

总之,采用直灌式送风加压方式,消除了长期以来存在的各种隐患,明显提高了高层建筑的送风效率,确保了楼梯间疏散的可靠性和人员生命安全,降低了建筑工程成本,减少了能源消耗,有着显著的经济效益和社会效益,也有利于送风设备的技术更新改造,因而是值得推广的。

5 结论

5.1 多次试验证明,直灌式送风加压方式能够满足《高规》要求的压力值,这种方式是可行的,可代替传统的竖井送风加压方式。

5.2 专用送风井道的取消,节约了用地,降低了工程造价,所以社会效益、经济效益十分突出。

参考文献

- [1] 中华人民共和国公安部. GB 50045—95 高层民用建筑设计防火规范[S]. 北京:中国计划出版社,2005
- [2] 中华人民共和国公安部. GBJ 16—87 建筑设计防火规范[S]. 北京:中国计划出版社,2001
- [3] 杨冠雄. 建筑物防火之烟控设计分析[M]. 高雄:高雄覆文图书出版社,1996

(上接第 25 页)

是可信的。条件允许的情况下,最好使用三维 PIV 系统进行直接测量。

参考文献

- [1] 任鸿泽,赵彬,李先庭,等. 实际连接条件下送风口出流特性对室内空气分布的影响[C]//全国暖通空调制冷 2002 年学术年会论文集,2002:300-304
- [2] 赵彬,李先庭,彦启森. 室内空气流动数值模拟的风口模型综述[J]. 暖通空调,2000,30(5):33-38
- [3] Nielsen P V. Description of supply openings in numerical models for room air distribution [G]//ASHRAE Trans, 1992,98(1):963-971
- [4] 杜国付,端木琳,舒海文. 工位空调送风气流数值模拟风口模型比较[J]. 热科学与技术,2003,2(2):162-

167

- [5] 谢东,王汉青. 粒子图像速度场仪在室内空气流场测试中的应用[J]. 建筑热能通风空调,2004,23(1):104-106
- [6] 周静瑜,王德忠. 暖通流场测试技术的发展与展望[J]. 暖通空调,2005,35(5):41-45
- [7] Adrian R J. Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991,23:261-304
- [8] 张鸿雁,王丽,王元. 二维温室绕流流场的 PIV 实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2005,37(2):160-163
- [9] 顾蕴松,明晓. 应用 PIV 技术研究“零质量”射流的非定常流场特性[J]. 实验流体力学,2005,19(1):83-86