

某水电站主变室通风的二维粒子图像测速技术热态模型试验研究^{*}

西安建筑科技大学 李安桂[★] 包 欣 秦二伟 王国栋

摘要 在试验研究中考察了送风速度和热源发热量对工作区气流组织的影响。试验结果显示,主变室的热源发热量从 107 kW 增大到 178 kW 时,气流流场变化不大;送风速度从 1.8 m/s 增大到 3.3 m/s 时,气流流场存在较大变化。表明对于有集中热源且采用下送上回气流组织的房间,机械力较热浮升力对气流流场有更大的主导作用。

关键词 二维粒子图像测速技术 模型试验 送风速度 热源发热量

Thermal scale model experiment of main transformer room ventilation in a hydropower station with two dimensional particle image velocimetry

By Li Angui[★], Bao Xin, Qin Erwei and Wang Guodong

Abstract Investigates the influence of supply air velocity and heat release rate on air distribution in working area. The results show that the heat release rate exerts a little influence on indoor air distribution and working-area air velocity when it increases from 107 kW to 178 kW, and that the supply air velocity has a remarkable effect on the air distribution when it increases from 1.8 m/s to 3.3 m/s. It indicates that mechanical force has larger effect than thermal buoyancy force in a plant with centralized heat source and down-supply and up-return air distribution.

Keywords 2DPIV, model test, supply air velocity, heat release rate

[★] Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China

①

0 引言

目前研究室内空气的流动状态主要有理论分析、试验研究及数值模拟等 3 种方法^[1]。其中理论分析方法的关键环节在于提出理论模型,并运用数学方法求出理论结果,但由于工程实践的复杂性,许多实际流动问题还难以精确求解。数值模拟方法是一种近似解方法,适用范围受数学模型的正确性和计算机的性能所限制^[2]。试验研究又分为原型实测和模型试验两种方法。显然原型实测方法是相当受限的,即一般无法在设计之前对原型给予科学评价。相对于原型实测,模型试验由于较高的精度和较少的费用,在气流组织测试中得到了广泛应用。实验测试表明,模型试验中常用的气流流速测量方法经

常由于测头或传感器的存在容易对气流流场造成一定程度的干扰,而粒子图像测速技术(particle image velocimetry, PIV)作为近 20 年来迅速发展起来的瞬态流场测试技术,能够在不干扰流场的情况下对气流流场进行测量并且精度较高(总误差小于 1%)^[3],尤其适合研究室内低速气流流动^[4-5]。目前 PIV 技术已经逐渐成为流场测量的主要方法之一。笔者针对 HHHT 水电站主变室厂房下送上回的气流组织形式,利用二维粒子成像速度测量技术(2DPIV)对其室内气流组织状况进行了研究,考察送风量和热

①[☆] 李安桂,男,1963 年 9 月生,工学博士,教授,博士生导师
710055 西安建筑科技大学环境与市政工程学院
(029) 82202507
E-mail: liag@xauat.edu.cn

收稿日期:2009-01-22

一次修回:2009-05-21

二次修回:2009-11-08

^{*} 国家自然科学基金资助项目(编号:50778145/E080304),教育部高校博士点基金资助项目(编号:20040703008)

源发热量发生变化的情况下,送风速度和热源发热量对工作区气流组织的影响。

1 模型建立及 PIV 系统

1.1 模化设计

在用模型对原型的某种物理现象进行研究时,模型与原型必须具有相似性。相似理论作为模型试验的理论基础,规定两物理现象相似必须满足单值性条件(几何、物理、边界、时间)相似和同名已定特征数相等这两个基本条件^[6]。由于是非等温射流,所以主要应考虑弗劳德数 Fr (重力与惯性力比值)和雷诺数 Re (惯性力与黏滞力比值)。同时满足两个定性特征数相等在理论上是可行的,但实际试验中很难做到,必须割舍次要的特征数,以达到近似模化的要求。引入量纲一密度差 $(\rho - \rho_0)/\rho$ (ρ 为室内空气密度, ρ_0 为送风空气密度),将 Fr 转化为阿基米德数 Ar ($Ar = (\rho - \rho_0)/\rho \times Fr$)。因此,只要模型与原型的 Ar 相等,模型中空气的运动就体现了实型的流动与换热^[7]。可以利用模型与原型相似,其 Ar 必须相等的原理得出模拟参数比例关系,如下:

速度比例尺 $C_v = C_1^{1/2}$ (C_1 为几何比例尺)

空气流量比例尺 $C_G = C_v C_1^2 = C_1^{5/2}$

K 热量比例尺 $C_Q = C_G C_{\Delta T} = C_1^{5/2}$ ($C_{\Delta T}$ 为温差比例尺,取 1:1)

显然,几何比例尺 C_1 越大,模型中的气流流动越能真实、准确地模拟原型中的气流流动。国内的水电站通风模型试验通常都将比例取为 1:10~1:25^[8],但考虑到 2DPIV 最大拍摄断面有限而该主变室原型尺寸较大,模型几何比例尺 C_1 取作 1:50,但最终结果应由试验验证。李现河依据相似理论对同一厂房原型分别建立比例尺为 1:20 与 1:50 两种缩尺比例通风模型,在原型工程设计送风参数下,进行对比模型试验,结果显示两种比例模型的试验结果基本趋于一致^[9]。本文的比例尺参数如表 1 所示。

表 1 模化比例尺

几何比例尺 C_1	速度比例尺 C_v	流量比例尺 C_G	热量比例尺 C_Q
$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{7.071}$	$\frac{1}{17\ 677}$	$\frac{1}{17\ 677}$

根据原型的基本参数和表 1 中的模化比例尺得出模型试验的基本参数(见表 2)。

模型全部用 5 mm 厚的有机玻璃制作,以便于激光透过和相机的拍摄。模型共有 6 个回风口和 2 个送风口(见图 1,2)。

表 2 模型与原型的参数值

	原型	模型
长度 L/m	44	0.875
宽度 W/m	12	0.188
高度 H/m	9.4	0.235
送风口尺寸/m	2×0.8	0.040×0.016
排风口尺寸/m	1×0.6	0.020×0.012
送风温度 $t_s/^\circ\text{C}$	22	22
设计送风速度 $v_0/(m/s)$	2.4	0.34
设计送风量 $G_0/(m^3/h)$	5.5	0.78
热源发热量 Q_0/W	142\ 000	8.06

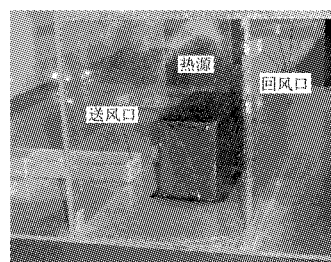


图 1 模型实物照片

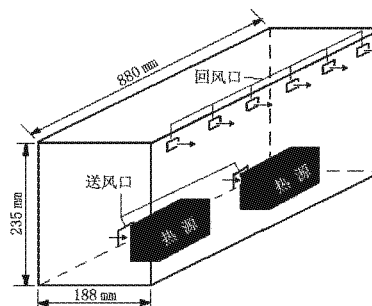


图 2 主变室通风模型

1.2 PIV 系统

2DPIV 技术的原理是预先在需研究的流体内添加示踪粒子,用脉冲激光片状光源照射所测流体,形成二维流场,同时在垂直流场方向上通过成像记录系统摄取两次曝光(间隔 Δt)的示踪粒子图像,形成 PIV 底片,再经过复杂的光学分析技术处理确定所判读区域内的平均位移,由此确定流场切面上多点的二维速度。本次试验所采用系统的配置如下。

1) 光路系统:采用双脉冲 Nd:YAG 激光仪,激光能量 200 mJ,光源为波长 532 nm 的可见光。激光仪发出的片光源厚度可调,可拍摄最大断面为 500 mm×500 mm。根据本试验经验,可能由于光源更加集中,较薄的片光源所拍摄的粒子图像更加清晰。本试验使用 3~10 mm 厚度片光源,测量断面尺寸为 200 mm×240 mm。

2) 图像拍摄系统:采用 200 万像素互相关

CCD 照相机,型号为 PowerView™ Plus 2MP,可以感应示踪粒子产生的散射光,并记录粒子位移场的瞬时信息。通过对光脉冲时间延时(Δt)的调整,可以测量不同的气流速度。本试验根据 0.26~0.43 m/s 的送风速度, Δt 取 200~500 μ s。 Δt 取值问题是 PIV 拍摄技术的关键技术之一,按照文献[10], $\Delta t v_{\max}=250 \mu\text{m}$ ($v_{\max}$ 是拍摄区域中的最大风速)。

3) 同步控制系统:同步控制器型号为 TSI610034,是 PIV 测量系统的控制核心,精确控制着激光脉冲和图像采集的工作顺序及时间间隔。

4) 示踪粒子:采用 TSI 烟雾发生器,型号为 roscos 1700,可产生平均粒径为 1~5 μm 的球形液滴,本次试验采用的示踪粒子的粒径为 1~2 μm ,这样粒子就会有良好的跟随性和散光性,能够使 PIV 系统更加真实地表现和测量流场。

PIV 拍摄流程图见图 3。

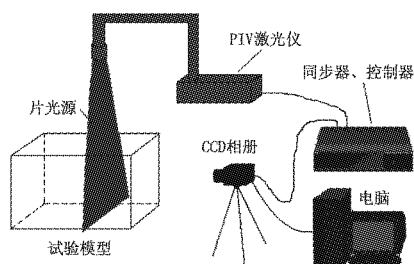


图 3 PIV 拍摄流程图

1.3 热源制作

热源为模拟主变室中的变压器,采用手工制作

镀锌铁盒 2 个(长×宽×高=190 mm×70 mm×100 mm),此长方体热源模型是按 1:50 的比例由实际设备缩尺而来。铁盒内部均匀缠绕电热丝并且为防止激光反射影响拍摄质量,用黑漆将其外部涂黑(见图 4)。热源的发热量变化通过调压变压器控制电热丝两端电压而实现。

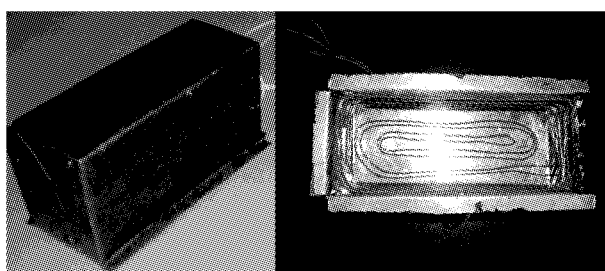


图 4 模型热源照片

2 试验过程

2.1 试验方案设计

考虑到原型厂房内热源发热量的可变动性和风量的可调节性,根据所提供的单个主变室热源总发热量 142 kW、总风量 13 800 m³/h 以及前文提到的该模型的热量比例尺和风量比例尺,可定出模型的热源发热量约为 8.06 W,总通风量为 0.78 m³/h。设 $Q_0=8.06 \text{ W}$, $v_0=0.34 \text{ m/s}$ 。设计了 3 种热源发热量、3 种风量,共 9 种工况,如表 3 所示,以分析模型的热源发热量和风量变化时主变室的工作区温度分布并验证排风温度能否不高于规定的 35℃。各种工况下的送风温度均为设计值 22℃。

表 3 试验工况

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8	工况 9
热源发热量/W	6.05(0.75 Q_0)	6.05(0.75 Q_0)	6.05(0.75 Q_0)	8.06(Q_0)	8.06(Q_0)	8.06(Q_0)	10.08(1.25 Q_0)	10.08(1.25 Q_0)	10.08(1.25 Q_0)
主变室送风速度/(m/s)	0.26(0.75 v_0)	0.34(v_0)	0.43(1.25 v_0)	0.26(0.75 v_0)	0.34(v_0)	0.43(1.25 v_0)	0.26(0.75 v_0)	0.34(v_0)	0.43(1.25 v_0)

2.2 试验过程

由于试验过程中各送风管道都没有保温,为保持送风温度恒定在 22℃,采用实验室空调送风,同时使环境温度和模型送风温度保持一致,并且用 T 形热电偶监测控制环境温度和送风温度。用 TSI 风速仪在送风口处进行监测控制送风速度。厂房内、外存在温差,为了减少热量损失,除了拍摄断面外,模型都加了保温材料。将空调送出的冷空气引入混合箱,与烟雾发生器喷入的高浓度示踪粒子充分混合均匀,得到示踪粒子浓度适中的空气,经风机送入模型的静压箱,由风口均匀地将空气送入厂

房内,等气流状态稳定后,由 2DPIV 系统对流场进行测量。

由于考虑到模型的对称性和 PIV 拍摄断面大小的限制,本次试验的拍摄断面主要选在较有代表性的模型回风口轴心 A-A、B-B、C-C 三处(见图 5)。

3 试验结果及分析

拍摄了大量试验照片,仅就部分典型断面的典型图片作一分析。图 6 是热源发热量一定(设计发热量)、送风速度变化时 B-B 断面的速度矢量图,图 7 是送风速度一定(设计风速)、发热量变化时

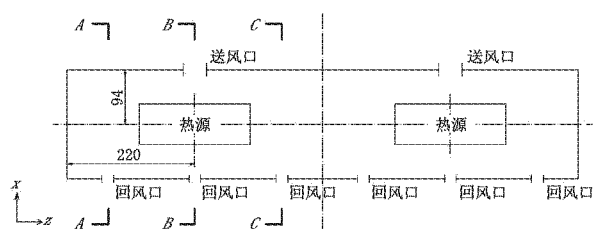


图5 主变室平面示意图

B-B 断面的速度矢量图。从图 6,7 可以看出,气流从送风口进入工作区(根据甲方要求,将厂房 2 m 高度定为工作区高度,在模型中工作区高度为

40 mm)后由于遇到热源阻挡,气流会急剧拐弯沿热源壁面向上,当气流上升高度超过热源高度时,气流会形成一个旋涡。由于送风口离地面较近,气流从风口流出后类似于一股贴附射流,当气流沿热源壁面向上流动时也相当于一股贴附射流,这股贴附射流不断卷吸周围气体,所以图 6,7 中左下角有大量速度矢量指向右下方。同时,气流在此又有向上运动的趋势,这样在图像的左端出现了一个明显的气流旋涡。

从图 6 可以看出,在 B-B 断面处,在设计热

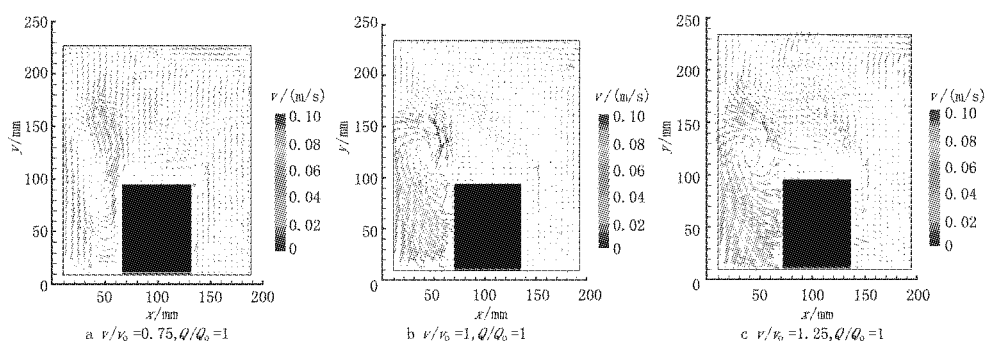


图6 热源发热量一定(设计发热量)、送风速度变化时 B-B 断面的速度矢量图

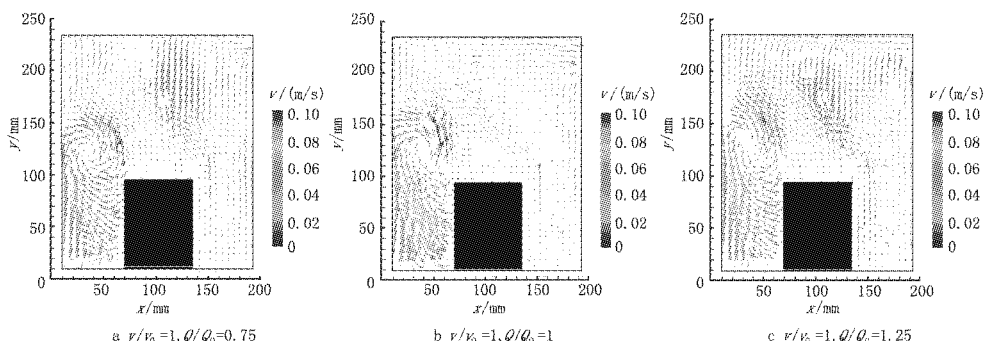


图7 送风速度一定(设计送风速度)、发热量变化时 B-B 断面的速度矢量图

源发热量下,随送风速度的变化整个气流的速度分布变化较大。随送风速度增大,气流速度明显增大,且气流旋涡强度明显增大,这也必然导致热源靠近送风口的这一边上部空气和下部空气掺混更加强烈。同时也可以看出,在热源靠近回风侧的一边,气流速度较小且气流速度分布较为均匀。此外,从图 7 可以看出,在设计风速下,随热源发热量的变化,整个气流的速度分布变化不是很明显,只是随热源发热量增大,整个流场的速度分布更加凌乱。

另外由于模型的进风口和回风口分别与模型上下壁面的距离较近,且 PIV 拍摄在模型近壁区

一般较难获得真实准确的图像(一般文献中认为这种近壁区范围是 8~10 mm)^[11]。所以速度矢量图中风口处和热源近壁区的速度矢量箭头不是很明显。

图 8,9 为 A-A 断面工作区(高度为 40 mm 处)各点的气流速度值。从图 8,9 可以看出,热源靠近送风口一边的空气流速明显高于回风口;在热源发热量不变的情况下,送风速度从 0.26 m/s 增大到 0.43 m/s,工作区风速明显增大;在送风速度不变的情况下,热源发热量从 6.05 W 增大到 10.08 W,工作区风速变化不大;工作区最大风速出现于送风侧靠近热源的地方。

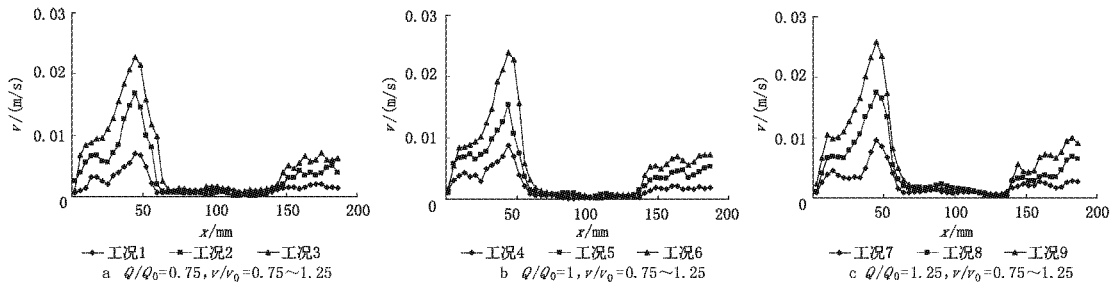


图 8 送风速度一定、热源发热量变化时工作区平均风速变化趋势

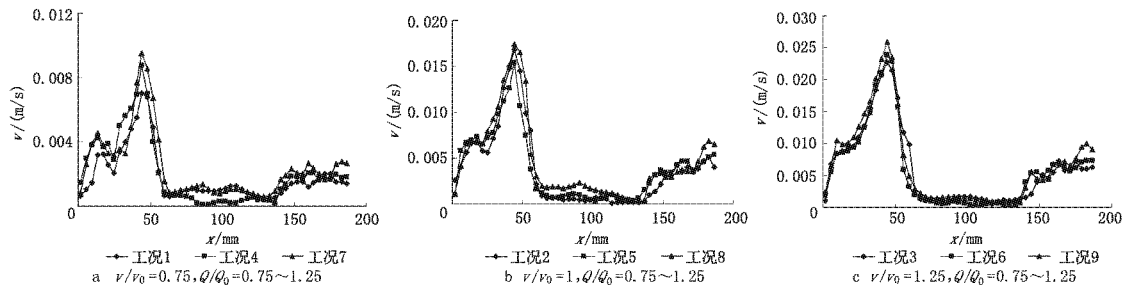


图 9 热源发热量一定、送风速度变化时工作区平均风速变化趋势

4 结论

4.1 通过对 HHHT 水电站主变室的通风模型试验研究表明,PIV 技术在研究室内气流流场方面,比其他测量手段能更好地表现流场的整体状况,也能对流场的细节有更精确的捕捉。

4.2 基于 2DPIV 详细试验,获得了水电站主变室的风速矢量图和工作区平均风速图。研究表明,当送风速度和热源发热量变化时,原型的热源发热量从 107 kW 增大到 178 kW(对应模型的热源发热量从 6.05 W 增大到 10.08 W),主变室内的气流流场变化并不显著;与此相比,原型送风速度从 1.8 m/s 增加到 3.3 m/s(对应模型的送风速度从 0.26 m/s 增加到 0.43 m/s),整个气流流场变化非常显著,回流区旋涡明显增大。测试结果表明,在有变压器等较大集中热源的水电站主变室中,对于下送上回式通风气流组织,机械力较热浮升力对主变室内气流流场有更大的主导作用。

4.3 通过该试验研究发现,热源发热量的变化对于整个气流流场的影响较小,所以 HHHT 水电站主变室在实际运行时,由于变压器等较大集中热源部分设备间歇式运行所造成的室内产热变化,对室内气流流场的影响程度不大。通过对送风速度或送风量的调节,可以保证主变室内的气流流场满足规范要求。

参考文献:

- [1] 周光炯,严宗毅,许世雄. 流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,2000
- [2] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2001
- [3] Funes-Gallanzi M. High accuracy measurement of unsteady flows using digital particle image velocimetry [J]. Optics&Laser Technology, 1999, 30(6/7)
- [4] Posner J D, Buchanan C R, Dunn-Rankin D. Measurement and prediction of indoor air flow in a model room[J]. Energy and Buildings, 2003, 35(5): 515-526
- [5] Raffel M, Willert C E, Kompenhans J. Particle image velocimetry [M]. Heidelberg: Springer-Verlay, 1998
- [6] 李之光. 相似与模化(理论及应用)[M]. 北京:国防工业出版社,1982
- [7] 伍国有. 百色水利枢纽水电站地下厂房通风模型试验及数值计算[J]. 广西水利水电, 2002(增刊): 55-59
- [8] 李晓. 龙滩地下水电站全厂通风模型试验与气流流动特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2004
- [9] 李现河. 呼和浩特水电站地下厂房通风模型 2DPIV 试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008
- [10] 秦二伟,刘伟,包欣. PIV 实验两个重要问题的讨论[J]. 建筑热能通风空调, 2009, 28(2): 83-85
- [11] Somandepalli V S R, Mungal M G. A novel technique to improve near wall resolution in PIV using cylindrical lenses: DMPIV [C]// 57th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics. Stanford University, 2004