

文章编号: 0258-0926(2018)03-0114-05; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0114

安全壳冷却机组风机盘管进风均匀性的定量研究

崔国强¹, 张莉^{1*}, 肖伯乐², 刘江¹, 张强²

1. 上海电力学院, 上海, 200090; 2. 上海发电设备成套设计研究院, 上海, 200240

摘要: 分别采用数值模拟和实验测量 2 种方法对安全壳循环冷却机组风机盘管迎风面的进风均匀性进行了研究。数值计算分析了风机盘管的流场分布, 实验测量获得了风机盘管迎风面上 50 个测点的进风速度数据。分别采用“断面风速均匀度”和“相对标准偏差”对测量结果和计算结果进行了数据处理, 定量评定了盘管迎风面的进风均匀性, “断面风速均匀度”的评定结果不满足 GB/T14294—2008 规定的不低于 80% 的均匀性要求; “相对标准偏差”的评定结果超出了相对标准偏差值通常低于 15% 的均匀性要求。

关键词: 安全壳; 风机盘管; 进风均匀性; 定量研究

中图分类号: TL364⁺.3 **文献标志码:** A

Quantitative Analysis on Uniformity of Inflow of Fan Coil Unit in Containment Cooling System

Cui Guoqiang¹, Zhang Li^{1*}, Xiao Bole², Liu Jiang¹, Zhang Qiang²

1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai, 200090, China; 2. Shanghai Power Equipment Research Institute, Shanghai, 200240, China

Abstract: The uniformity of the inflow of the fan coil unit in the containment cooling system was studied quantitatively by numerical simulation and experimental measurement in this paper. The flow field in the fan-coil unit was analyzed by numerical calculation. The inlet velocity data of 50 points on the windward face of the fan-coil unit were obtained by experimental measurement. The data from the measurement and the calculation were processed by using the definition of “Face Velocity Uniformity” and “Relative Standard Deviation”. The processing results quantitatively evaluated the uniformity of the inflow of the fan coil unit. The results of “Face Velocity Uniformity” did not meet the requirements in GB/T 14294—2008 for not less than 80%. The results of “Relative Standard Deviation” exceeded the requirement that the value was usually less than 15%.

Key words: Containment, Fan coil unit, Uniformity of inflow, Quantitative analysis

0 前言

第三代核电系统具有较大的发电容量, 为其安全壳提供冷却风的风机盘管的迎风面积已超过了 2000 mm×1000 mm。大多数含有风机盘管的产品普遍存在迎面风速分布不均匀, 引起换热器效率下降的问题^[1-4]。因此, 用于安全壳冷却机组的大尺寸迎风面积的风机盘管必然也会存在迎风面上各处进风速度大小不同的情况^[5], 这样就与风机盘管设计时进风均匀的假定不相一致, 若盘管的实际进风均匀性较差, 则会使得流入的空气不

能被均匀冷却, 换热盘管的传热效果降低, 影响安全壳冷空气的品质。

某三代非能动核电机组是我国在消化、吸收、全面掌握三代核电技术的基础上, 通过再创新开发出的功率更大的非能动核电机组, 其风机盘管的迎风面积更是大于三代核电^[6]。该风机盘管迎风面的进风均匀程度以及是否达到风机盘管的有关标准是一个值得研究的课题。

本文以某三代非能动核电机组安全壳冷却机组的风机盘管为研究对象, 采用数值模拟和实验测量相结合的方法, 对盘管迎风面上的进风均匀

收稿日期: 2017-04-05; 修回日期: 2017-11-05

基金项目: 国家科技重大专项子课题 (2014ZX06004004-004)

作者简介: 崔国强 (1993—), 男, 在读硕士研究生, 现从事热力设备的流动、传热分析研究

*通讯作者: 张莉, E-mail: mmlzhang@163.com

性进行研究，给出盘管迎风面进风均匀性的定量参考值，为核用电机盘管的研究和设计人员提供改进和完善盘管设计的参考依据。

1 研究对象简介

本文所研究的风机盘管由盘管、轴流风机和安装框架组成。盘管竖直布置在框架的4个侧面上；每个侧面都布置有上、下2个盘管；相对于框架中心，每一侧的盘管均逆时针偏移了一定的位置；轴流风机布置在盘管的下游区域，安装在框架上方的流动通道内。整个风机盘管形成了一个大大迎风面、四面进风、风机将空气抽吸而走的流动格局。图1a给出了盘管和轴流风机的安装示意图。盘管的设计参数见表1。

表 1 盘管的设计参数
Table 1 Design Parameters of Coils

参数名	参数值	
设计流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	82400	
单侧迎风面大小/ $mm \times mm$	2492×1000	
盘管厚度/m	0.230	
工作模式	冷却模式	加热模式
进口温度/	49	10
出口温度/	15	32
风侧压降/Pa	139	76

图1b给出了盘管管束的布置方式，管束的叉排布置以及翅片管的使用，一方面使得该区域形成更大的换热面积，让空气能够更充分地冷却或加热，另一方面也对空气在该区域内的分流动形成一定的阻力。

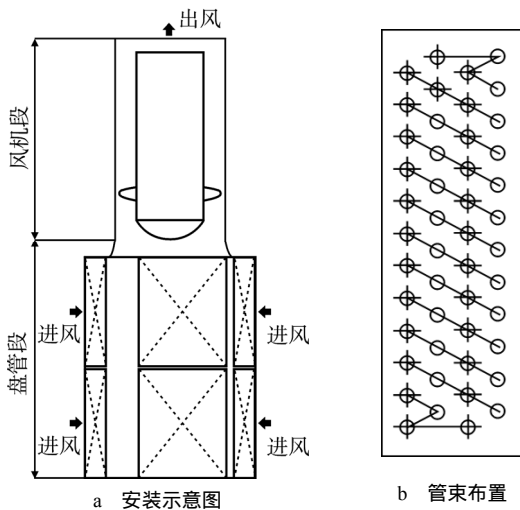


图 1 风机盘管安装及管束布置图

Fig. 1 Installation for Coils of Axial Fan and Arrangement of Coil Tube Bundle

2 数值研究及结果讨论

2.1 控制方程

在本文研究的风机盘管中空气沿水平方向从大气环境流入盘管，经由盘管区域受冷（或受热）后，方向扭转 90° ，最后由布置在盘管上方的轴流风机抽吸而送入非能动安全壳。由于盘管区域内额外流动阻力的存在，空气在整个风机盘管机组内的流动区域分为 2 个不同的区域：盘管区和其他区域。对于盘管区域采用多孔区域进行处理，用动量方程中的阻力源项模拟管束和翅片对空气流动的分布阻力。2 种流动区域内空气的流动可以用下述方程的统一形式加以描述^[7]：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\beta \rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta \rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\beta \rho w \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\beta \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_\phi \quad (1)$$

式中， u 、 v 、 w 分别为空气在 x 、 y 、 z 方向的分速度； ρ 为混合物密度； β 为空气流经区域的多孔率，盘管区的 β 由翅片管束的尺寸计算而得，非盘管区域内 β 为 1；当变量 ϕ 为 1 时，方程 (1) 为连续性方程；当变量 ϕ 为 u 、 v 、 w 时，方程 (1) 分别为 x 、 y 、 z 方向的动量方程；当变量 ϕ 为 k 、 ϵ 时，方程 (1) 为湍流模型方程。 Γ_ϕ 、 S_ϕ 分别为与 ϕ 相对应的广义扩散系数和广义源项。动量方程中广义源项 S_ϕ 的物理意义见表 2。由于盘管区域内管束具有多孔介质特点，动量方程源项 S_ϕ 中的阻力源项 F_i ($i=x,y,z$) 需要用单位长度压力损失加以表示。

表 2 动量方程中的源项 S_ϕ
Table 2 Source Terms in Momentum Equation S_ϕ

ϕ	S_ϕ	
	盘管区	非盘管区
u	$-\beta \frac{\partial p}{\partial x} + F_x$	$-\beta \frac{\partial p}{\partial x}$
v	$-\beta \frac{\partial p}{\partial y} + F_y$	$-\beta \frac{\partial p}{\partial y}$
w	$-\beta \frac{\partial p}{\partial z} + F_z$	$-\beta \frac{\partial p}{\partial z}$

在空气流经盘管的过程中，垂直于盘管厚度方向的压力损失通常用如下形式加以表示^[8]：

$$\Delta p = a v^b \quad (2)$$

式中, Δp 为空气流经盘管压力损失, Pa; v 为盘管迎风流速, m/s ; a 为阻力系数; b 为速度幂指数, 本文取 $b=1.75$ 。而沿着盘管轴向的阻力由于翅片的遮挡阻止了空气的流动, 可视为无穷大。

2.2 计算区域及边界条件设置

由于盘管的迎风面处于大气环境中, 在计算区域选择时, 将风机盘管的外部区域考虑在内, 建好的计算区域的几何模型如图 2 所示。对计算区域分块进行网格划分, 采用质量较高的六面体网格对大部分区域进行划分, 仅在局部不规则的衔接区域采用四面体网格^[9]。经网格无关性验证后, 计算网格数目取为 301 万。

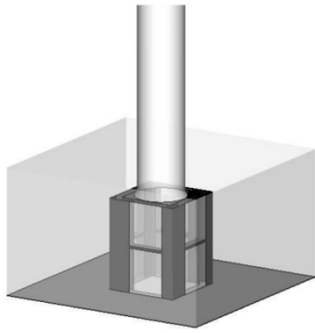


图 2 风机盘管的几何模型图

Fig. 2 Geometric Model Diagram of Fan Coil unit

忽略空气在盘管内换热后的物性变化, 取空气在冷却模式下的平均温度 32 作为定性温度, 此时密度为 1.158 kg/m^3 , 动力粘度为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ 。风机盘管外部区域的 4 个边界为入口界面, 根据流动的实际情况, 入口边界设为压力边界条件, 压力设定值为大气压。为便于给定出口边界条件, 将风机管道进行延长, 取管道延长段的出口为出口边界, 出口边界设为压力边界条件, 通过出口压力的调整, 使得通过盘管的总流量为设计工况流量值: 27.47 kg/s 。对于风机盘管中所有固体边界, 在数值计算中均设为无滑移的固体边界。

由表 1 可知, 空气侧设计压降为 139 Pa, 根据式(2)的压力损失公式可反算出空气流过盘管时的阻力系数, 由此, 盘管厚度方向的压力损失公式具体为: $\Delta p = 17.196v^{1.75}$ 。

2.3 模拟结果

对风机盘管在设计流量工况下进行了数值计算, 获得了风机盘管整场的流动分布。图 3 为风

机盘管机组中心截面上的速度矢量图, 图 3 中示出空气在外部区域几乎静止, 而在临近盘管区速度有所提高, 经由盘管汇聚至框架内后, 由于流动空间的缩小, 速度提升明显, 而且显示出上部区域流速快、下部区域流速慢的分布特点, 这与风机置于上盘管顶端, 盘管距离风机越近, 阻力越小, 流速就越大的物理现象相吻合。图 3 的流动分布显示出一定的合理性, 在一定程度上表明了数值计算的准确性。

在盘管厚度方向的中心位置处截取了截面上的速度等值线图(图 4a)。

从图 4a 中可以看出, 在上盘管的右上方存在一个高速区, 高速区之所以偏移几何对称中心,

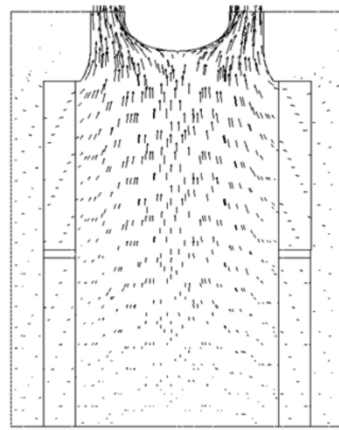


图 3 盘管中心截面速度矢量局部放大图

Fig. 3 Velocity Vector Enlarged Locally at Center Location of Coil

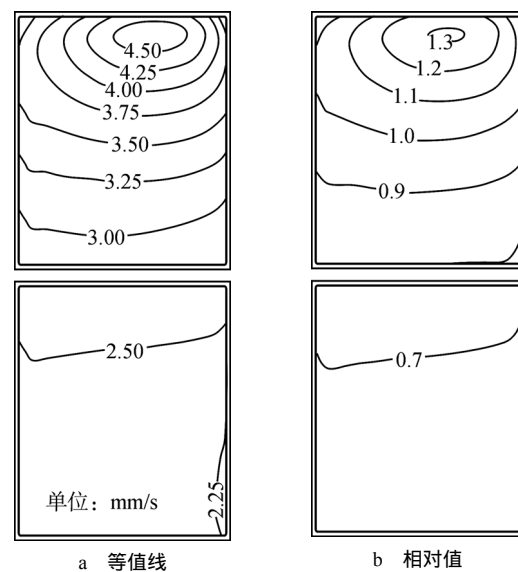


图 4 盘管中心截面处速度及速度相对值

Fig. 4 Velocity and Relative Velocity at Center Location of Coil

这是由盘管布置的偏移所导致的。上盘管高速区内速度接近 5 m/s，上盘管下部的逐渐减至 3 m/s 左右，随着几何位置的下降，到下盘管区域速度分布在 2.75~2.25 m/s 范围内。从图 4a 中整体的速度分布来看，下盘管内速度分布相对均匀，上盘管的速度变化较为明显。图 4b 进一步给出了盘管内当地速度与平均速度相对值^[10]的分布图。高速区相对值大于 1.2，上盘管内速度相对于平均速度的偏差在 -0.2~0.2 内，下盘管的偏差主要集中在 -0.3 附近。图 4b 定性表明了风机盘管的进风存在一定的不均匀性。关于盘管迎风面进风均匀性的定量计算结果在后续与实验测量结果的对比中再详细给出。

3 实验测量及结果讨论

3.1 测量方法

本文采用实验测量的方式对风机盘管的进风均匀性进行了研究。测试方法依照国家标准——GB/T14294-2008 《组合式空调机组》^[11]的相关规定进行。按照标准规定，将距离盘管外侧 200 mm 处确定为迎风面，并作为进风速度实验测量的截面。由于本文所研究的风机盘管的迎风面的长宽比超过 1.5，故按照标准规定在选定的测量截面上布置了 50 个测点（标准规定不少于 30 个测点），测点布置如图 5 所示。测量使用热线风速仪，其测定风速范围为 0.01~20.0 m/s，测定风速精度为读数的±5% m/s。测量时，首先调整探头至合适的迎风角度并加以固定，然后探头稳定 10 s 后读取进风速度。

3.2 测量结果

本文采用了 GB/T14294—2008 中给出的关于“断面风速均匀度”的规定对风机盘迎风面上的进风均匀性进行定量评定。“断面风速均匀度”的定义为：断面上任一点的风速与平均风速之差的绝对值不超过平均风速 20% 的点数占总测点数的百分比。

图 6 表示了对盘管进风速度实测数据进行处理后的风速阈值分布图。图中有 4 个测点数据出现了异常，分析发现这 4 个测点分别位于编号为 15、20、21、25 位置处，均处于盘管的边缘处，经分析，是由于外界干扰导致的测量数据失真，因此在定量计算进风不均匀性时将这 4 点的数据不计入其中。分析图 6 中的数据，首先图中散点

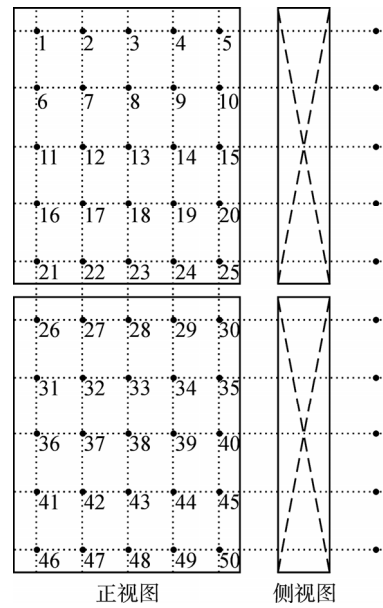


图 5 测点位置布置图

Fig. 5 Distribution of Measuring Points

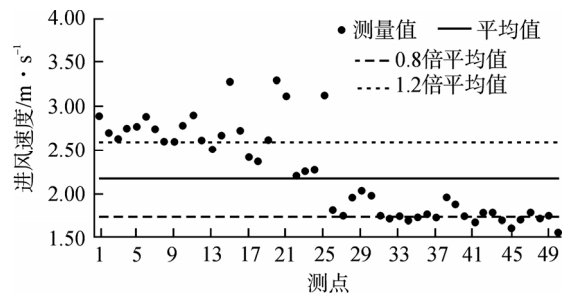


图 6 盘管迎风面进风速度分布图（测量结果）

Fig. 6 Threshold Graph of Inflow of One Side Coil (Measurement Results)

数据的分布明显地显示出盘管迎风面上从上到下进风速度不断减小的特点，定性地显示出盘管的进风不均匀性；其次，进一步按照“断面风速均匀度”的定义来分析数据发现 46 个数据测量点中，有 23 个测点位置处的风速超出 0.8~1.2 倍平均风速的风速阈值范围，其中高于该阈值的风速点为 15 个，低于该阈值的风速点为 8 个，风速阈值范围内点的数目占比为 50%，未能达到 GB/T 14294—2008 规定的不低于 80% 的均匀性要求。

3.3 实验测量及数值计算的比较

为了进行实验测量和数值计算的比较，在相同的位置上使用同样的均匀性评定方法，对盘管迎风面上的数值计算结果进行提取和处理。图 7 给出了对盘管进风速度计算数据处理后的风速阈值分布图。比较图 6 和图 7 发现，两幅图中散点的分布趋势具有一定的相似性，都表现出速度自

上而下的减小趋势。对 50 个提取点的数据进行统计发现,有 23 个位置风速超出 0.8~1.2 倍平均风速的风速阈值范围,其中高于该阈值的风速点为 10 个,低于该阈值的风速点为 13 个,风速阈值范围内点的数目占比为 54%,表明盘管的进风均匀性未能达到 GB/T 14294—2008 规定的不低于 80%的要求。同时,该数值与实测结果比较接近,满足工程应用要求,数值计算与实验测量相互得到了印证。

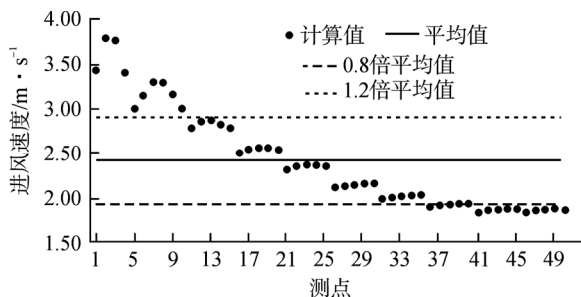


图 7 盘管迎风面进风速度分布图(计算结果)
Fig. 7 Threshold Graph of Inflow of One Side Coil
(Calculation Results)

4 盘管进风均匀性的其他评定结果

本文还采用了另一种评定截面速度分布均匀性的方法——相对标准偏差^[12]法分别对盘管迎风面的测量结果和计算结果进行定量分析。相对标准偏差的计算式如下:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (V_j - V_a)^2} \quad (3)$$

$$C = S/V_a \times 100\% \quad (4)$$

式中, S 为标准偏差; V_j 为第 j 个采样点的速度值; V_a 为所有采样点的平均速度; n 为采样点个数; C 为相对标准偏差,数值越小,流场的均匀度越高。

根据式(4),由实测数据与数值计算数据计算所得的 C 分别为 21.1%和 23.2%,均超出了相对标准偏差通常低于 15%的均匀性要求,盘管迎风面上速度的相对标准偏差值再一次说明了盘管迎风面进风不均匀性的存在。

5 结论

(1) 对大型风机盘管迎风面的进风均匀性分别进行了数值模拟研究和实验研究,2 种方法的研究结果较为接近,表明数值方法可以较好地模

拟风机盘管内的流动。

(2) 对于本文研究的风机盘管,采用“断面风速均匀度”定量评定其进风均匀性时,实验测量的结果为 50%,数值计算的结果为 54%,均不满足 GB/T 14294—2008 规定的不低于 80%的均匀性要求。

(3) 对于本文研究的风机盘管,采用“相对标准偏差”定量评定其进风均匀性时,实验测量的结果为 21.1%,数值计算的结果为 23.2%,超出了盘管迎风面上速度的相对标准偏差值通常低于 15%的均匀性要求。

(4) 迎风面较大的大型盘管存在较大的进风不均匀性,建议采取一定的措施改善大型盘管的进风均匀性问题。

参考文献:

- [1] Fangan T J. The effects of air flow maldistribution on air-to-refrigerant the at exchanger performance[J]. ASHRAE Transaction.1980, 86(2): 699-713.
- [2] Domanski P A. Simulation of an evaporator with nonuniform one dimensional air distribution[J]. ASHRAE Transactions, 1991, 97(1): 793-802.
- [3] Bensafi A, Borg S, Parent D. A computational model for the detailed design of plate-fine-and-tube heat exchangers using pure and mixed refrigerants[J]. International Journal of Refrigeration, 1997, 20 (3): 218-228.
- [4] 邓斌,陶文铨,余汪洋. 来流不均匀性对冷凝器性能影响的数值研究[J]. 制冷与空调(四川), 2007, 21(3): 1-6.
- [5] 柳成文,王冬青,龚建英. 风速分布不均匀性对空气源热泵风侧换热器性能的影响[J]. 制冷与空调, 2008, 8(3): 87-90.
- [6] 张栋. 世界核电发展及对我国的启示[J]. 能源技术经济, 2010, 22(12): 5-10.
- [7] 张明远,景思睿,李国军. 高等工程流体力学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2006: 312-316.
- [8] 幡野佐一. 换热器[M]. 李云倩译,北京:化学工业出版社, 1987: 13-14.
- [9] 于勇,张俊明,姜连田. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2008.
- [10] 陶红歌,陈焕新,谢军龙,等. 基于面积加权平均速度和质量加权平均速度的流体流动均匀性指标探讨[J]. 化工学报, 2010(S2): 116-120.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 组合式空调机组: GB/T 14294—2008 [S]. 北京:中国标准出版社.
- [12] 刘德志. 统计学[M]. 北京:清华大学出版社, 2007: 136-154.

(责任编辑:马蓉)