

文章编号: 1671-6612 (2021) 04-474-09

大万山岛海水抽蓄电站 主厂房气流组织 CFD 数值模拟分析

向正林¹ 沈玉妹² 肖益民²

(1. 南方电网调峰调频发电有限公司 广州 510630; 2. 重庆大学 重庆 400045)

【摘要】 首先阐述了水电站地下厂房气流组织的研究方法, 总结出 CFD 数值模拟研究是一种较为方便、可靠的研究方法。其次, 对 CFD 应用于进行水电站地下厂房气流组织模拟的物理建模、网格划分、湍流模型选择、边界条件设置等方面的关键点进行了讨论。之后, 介绍了不均匀系数、空气分布特性指标和能量利用系数这三项气流组织评价指标的计算方法。最后, 根据大万山岛海水抽水蓄能电站主厂房的布置特点, 利用 CFD 模拟计算了采用直流式方案和小新风方案时主厂房的气流组织, 分析了不同气流组织形式下室内温度和风速的不均匀系数、空气分布特性指标和能量利用系数。

【关键词】 海水抽水蓄能电站地下厂房; 通风空调方案; 气流组织设计; 温度不均匀系数; CFD 数值模拟
中图分类号 TU831/TU923 文献标识码 A

CFD Numerical Simulation of Airflow Distribution in Underground Powerhouse of Dawanshan Island Seawater Pumping and Storage Power Station

Xiang Zhenglin Shen Yumei Xiao Yimin

(1. CSG Power Generation Co., Ltd, Guangzhou, 510630; 2. Chongqing University, Chongqing, 400045)

【Abstract】 This paper expounds the research method of airflow distribution in underground powerhouse of hydropower station, and concludes that CFD numerical simulation is a more convenient and reliable research method. Secondly, the key points of the application of CFD in the simulation of the air distribution in the underground powerhouse of hydropower station, such as physical modeling, meshwork division, turbulence model selection and boundary condition setting, are discussed. Then, the calculation methods of three air distribution evaluation indexes, namely non-uniformity coefficient, air diffusion performance index and energy utilization coefficient, are introduced. Finally, according to the layout characteristics of the main building of Dawanshan Island seawater pumped storage power station, CFD simulation is used to calculate the air distribution of the main building when the direct flow scheme and the small fresh air scheme are adopted. The non-uniformity coefficient, air diffusion performance index and energy utilization coefficient of indoor temperature and wind speed under different air distribution patterns were analyzed.

【Keywords】 Underground building of seawater pumped storage power station; Ventilation and air conditioning scheme; Air distribution design; Temperature nonuniformity coefficient; CFD numerical simulation

基金项目: 国家重点研发计划项目“海水抽水蓄能电站前瞻技术研究”(2017YFB0903700)

作者简介: 向正林(1983-), 男, 硕士, 工程师, E-mail: 254128493@qq.com

通讯作者: 肖益民(1974-), 男, 博士, 教授, E-mail: xiaoyimin1974@126.com

收稿日期: 2021-06-24

0 引言

水电站主厂房通风空调的任务主要是排除发电机、厂内各电气设备以及工作人员的余热余湿, 保持厂房内工作区的温湿度及气流速度在规范规定的允许范围以内。而气流组织设计是通风空调工程中的一个重要环节, 设计合理高效的气流组织对营造舒适的工作环境、保证员工身心健康、提高生产效率等方面具有重要意义^[1,2]。目前, 对于水电站地下厂房气流组织的研究, 国内外采取的研究方法主要有 3 种, 分别是区域模型、相似模型试验和 CFD 数值模拟^[3-6], 表 1 是这 3 种气流组织研究方法的特点。

对于研究水电站地下厂房的气流组织, 采用 CFD 数值模拟方法有如下优点: ①对建筑物的物理模型没有限制条件, 能够模拟房间布局复杂、房间结构不规则等建筑。②水电站地下洞室较多, 区域分布较为复杂, 而且各个区域之间相互关联, 在对其中一个区域模拟时, 能够导入其他相关联区域的模拟结果, 使得模拟结果更接近于实际情况。③ CFD 模拟结果既可以获得准确的数据, 又能采用云图、动画等方式显示, 使仿真结果更加直观、易懂。因此, 本文以大万山岛海水抽蓄电站地下主厂房为研究对象, 采用 CFD 数值模拟的研究方法, 分析布置不同的气流组织形式下主厂房内的温度场和速度场, 为海水抽蓄电站地下厂房的气流组织设计提供参考。

表 1 3 种气流组织研究方法的特点

Table 1 Characteristics of the three airflow distribution research methods

研究方法 比较内容	区域 模型	相似模 型试验	CFD 数值模 拟
可适用房间的 几何结构复杂程度	较复杂	较复杂	基本不限
对经验参数的 依赖性	很依赖	不依赖	某些参数依赖
研究成本	较低	最贵	较贵
研究周期	较短	最长	较长
结果完备性	简略	较详细	最详细
使用是否方便	较方便	不方便	方便

1 电站基本情况

1.1 工程概况

大万山岛海水抽水蓄能电站是我国修建的第一座海水抽水蓄能电站, 拟建于广东省珠海市大万山岛。该电站的装机容量为 20MW, 厂房深埋于地下约 30m。地下厂房分为主厂房、主变室和副厂房。其中, 主厂房包括发电机层、水轮机层。副厂房设有两层, 第一层有变频器室、35KV 高压开关柜室等有配电设备的房间; 第二层大多是办公室、会议室等员工工作的房间。图 1 为大万山岛海蓄电站地下厂房的平面图。由于本电站整个空间较大, 若将整个电站进行模拟分析, 其物理模型较大且计算复杂, 此外考虑到论文篇幅的限制, 本文仅对主厂房采用不同的气流组织形式进行模拟分析。

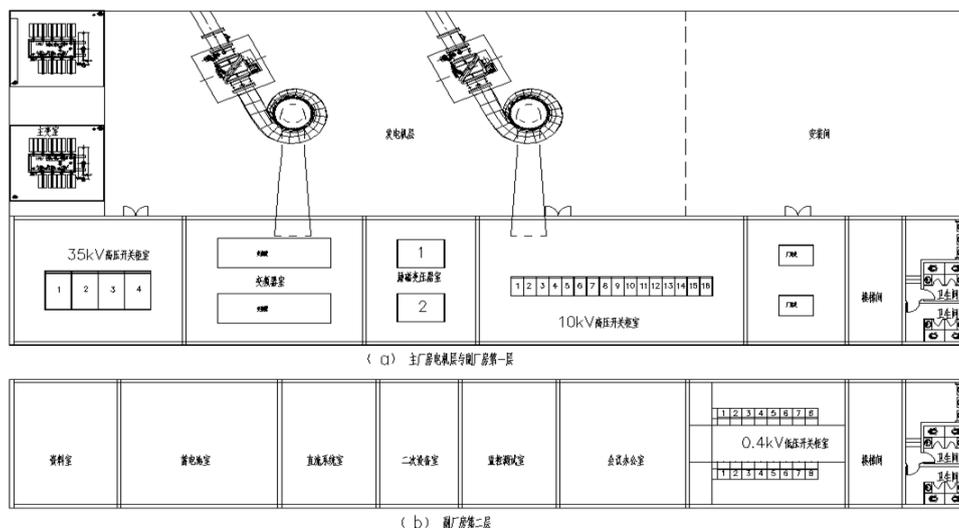


图 1 大万山岛海蓄电站地下厂房的平面图

Fig.1 Layout of underground powerhouse of Dawanshan Island Seawater Pumped Storage Power Station

1.2 通风空调方案

与常规淡水抽蓄电站相比,海水抽水蓄能电站建设在海洋附近,其周围空气中盐分含量较高,需对引入地下厂房的室外空气进行除盐处理。若引入地下厂房的室外新风量越大,所需的除盐雾过滤器就越多,其除盐雾费用及运行维护费用也越高。针对这一工程特点,且结合文献[7]分析,适用于海

水抽水蓄能电站地下厂房的通风空调方案主要有两种,一种是直流式加集中制冷的方案,另一种是小新风加局部制冷的方案,其通风流程图如图 2 所示。需要注意的是,在直流式方案中,主厂房采用的是多层串联的气流组织形式,即发电机层的排风是水轮机层的送风;在小新风方案中,发电机层、水轮机层的排风各自排至室外。

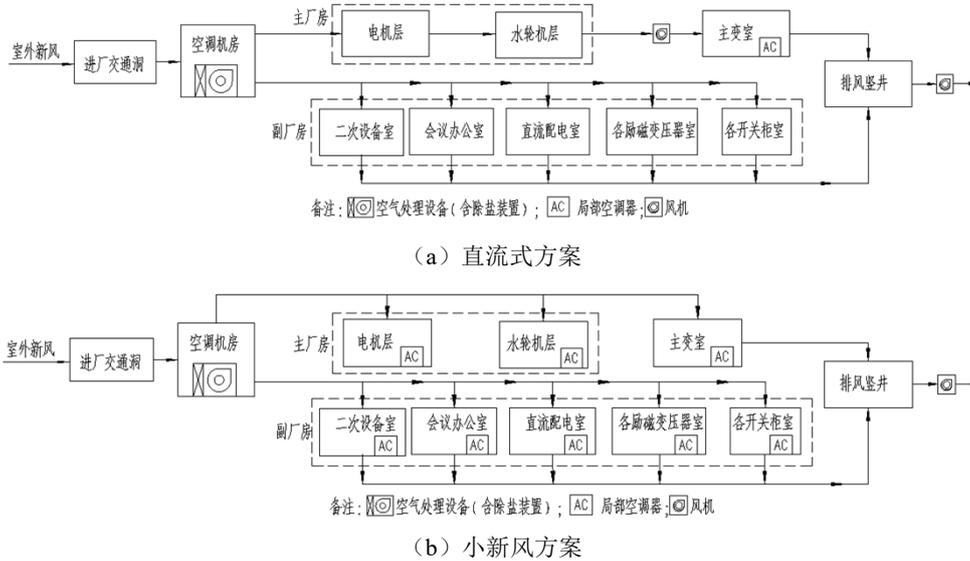


图 2 各方案的通风流程图

Fig.2 Ventilation flow chart of each scheme

1.3 气流组织设计

表 2 模拟工况的参数设置

Table 2 Parameter Settings of simulated working conditions

模拟工况	通风空调方案	送风方式	送风温度 (°C)	送风口尺寸 (mm)	送风速度 (m/s)
1	直流式方案	拱顶送风	20	Φ400	6.63
2	直流式方案	双侧送风	20	Φ400	6.63
3	小新风方案	局部空调单独送风	20	400×400	3.47

在常规淡水抽蓄电站地下厂房的气流组织中,通常采用的是厂房拱顶设置风口下送和厂房腰部水平喷射送风这两种送风方式^[8-10],因此本文将采用这两种送风方式作为直流式方案的模拟工况,模拟分析这两种气流组织对大万山岛海蓄电站主厂房的适用性。其中,在研究送风方式对气流组织的影响时,应保证送风量不变,风口均设置圆形风口,

且均匀布置。而对于小新风方案,其气流组织布置为:新风从发电机层拱顶送入;室内设备散热量较大,室内余热余湿由房间的空调来承担,局部空调设备布置在各散热设备的附近。本文对大万山岛海蓄电站主厂房的气流组织模拟工况如表 2 所示。

2 CFD 数值模拟设置要点

利用 CFD 软件对水电站地下厂房气流组织进行研究,对于确保通风空调设计方案的优劣和地下厂房气流分布的合理都具有重要的指导意义。在 CFD 软件使用的过程中,正确、合理地设定参数对保证数值模拟结果的准确性是十分重要的。

2.1 控制方程

CFD 是在控制方程下来模拟流体的流动,其中控制方程主要是指质量守恒方程、动量守恒方程以及能量守恒方程。

(1) 质量守恒方程

质量守恒定律可以描述为:在单位时间内,流体微元体中质量的增加等于相同时间段内流入该

微元体的净质量, 对应的质量守恒方程见公式 (1)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ;

u 、 v 、 w 是 x 、 y 、 z 方向上的速度分量, m/s 。

(2) 动量守恒方程

动量守恒定律可以描述为: 在微元体中, 流体的动量对时间的变化率等于在该微元体上的外力之和, 推导出 x 、 y 、 z 这 3 个方向上的动量守恒方程见公式 (2)。

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (2a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (2b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (2c)$$

式中: $\text{grad}(\) = \partial(\)/\partial x + \partial(\)/\partial y + \partial(\)/\partial z$; \mathbf{v} 为流体的矢量速度, m/s ; S_u 、 S_v 、 S_w 为广义源项。

(3) 能量守恒方程

能量守恒定律可以描述为: 在微元体中, 能量的增加率等于进入微元体的净热量加上体力与面力对微元体所做的功, 所对应的能量守恒方程见公式 (3)。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \mu \text{grad} T\right) + S_T \quad (3)$$

式中: T 为温度, K ; k 为流体的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; S_T 为粘性耗散项。

(4) 通用控制方程

除了上述的 3 个控制方程外, 在研究流体时还可以运用一些通用控制方程, 其核心思想就是在单位时间、单位体积内物理量的守恒性质, 可用公式 (4) 表达。

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) + S_{\phi} \quad (4)$$

式中: ϕ 为通用变量, 可以代表速度、温度等

求解变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。

式中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源

项。对于特定的方程, ϕ 、 Γ 和 S 具有特定的形式,

表 3 给出了三个符号与各个特定方程的对应关系。

表 3 通用控制方程中各符号表示的具体值

Table 3 The value of the signs in the general controlling equations

符号 方程	ϕ	扩散系数 Γ	源项 S
连续方程	1	0	0
动量方程	u_i	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i$
能量方程	T	$\frac{k}{c}$	S_T

2.2 物理建模

采用 CFD 进行数值模拟时, 需要根据水电站地下厂房的实际尺寸进行物理建模。考虑到水电厂地下厂房空间较大、内部设备繁多且复杂的问题, 对其建模需要作一定的简化处理^[11]: ①考虑到发电机层的尺寸较大, 可以将其拱形屋顶设置为平屋顶; ②对于地下厂房内结构尺寸比较复杂的装置或设备, 如发电机组、变压器等等, 按照等外表面积的原理, 将这些外形较为复杂的散热源简化成为长方体或者圆柱体; ③将地下厂房各区域照明设备的散热负荷转化为各区域顶板均匀散热的面热源; ④对厂房内的楼梯处理: 将楼梯口设置为自由开口, 开口尺寸为设计几何尺寸, 不用去考虑实际的楼梯阶数。图 3 为大万山岛海水抽蓄电站主厂房的物理模型。

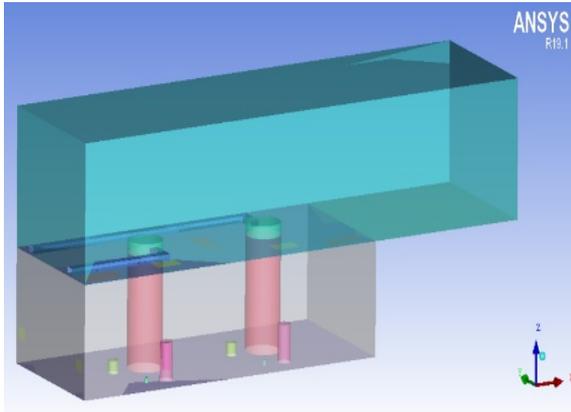


图3 主厂房的物理模型

Fig.3 Physical model of the main plant

2.3 网格划分

CFD 数值模拟是根据有限个离散节点近似形成连续区域来进行计算的,也就是说划分的区域网格越密,就越接近实际情况。但是,由于水电站地下厂房的模型较大,网格数量过多会影响模拟计算的速度,有时甚至会出现无法计算的问题;而如果网格数量太少,就意味着采用的是大网格,这会使得在风口、设备等区域无法真实地反映实际的模型形状,造成计算误差。在本次模拟过程中,由于主厂房规模较大、室内设备较多,并考虑到 UDF 程序占用内存大小等因素,因此主厂房采用非结构性网格。对于大的空间区域采用大网格;在送风口、排风口、发热设备、吊物孔等小尺寸的区域采用小网格,大网格与小网格在整个空间上相互耦合。

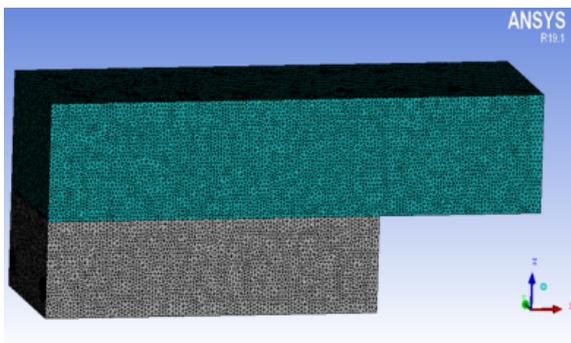


图4 主厂房网格划分

Fig.4 Grid division of main workshop

2.4 数学模型选择

在 CFD 软件中共有 5 种辐射模型可供选择,分别是 DTRM 辐射模型、P-1 辐射模型、Rossland 辐射模型、S2S 辐射模型以及 DO 辐射模型。对于水电站而言,地下厂房中的流体介质是空气,它的

主要成分是对称型的双原子气体,例如氮气和氧气,它们既不吸收辐射能,也不发射辐射能,因此可认为空气的光学厚度为零。而对于光学薄介质,在上述的 5 种辐射模型中,采用 DO 模型和 DTRM 模型取得的效果更好^[12]。但是因为 DTRM 模型不能用于混合格网,所以本次数值模拟中采用的辐射模型是 DO 模型。

对于湍流模型,目前应用最为广泛的是标准 $k-\varepsilon$ 模型。标准 $k-\varepsilon$ 模型不仅计算量比直接模拟方法要小,而且它在工程实践中也得到了良好的应用。文献[12]根据重正化群理论,推导了一种改进的标准 $k-\varepsilon$ 模型,即 RNG $k-\varepsilon$ 模型,该模型考虑了平均流动中的旋转和旋流流动情况,可以在高应变率的情况下自动限制湍流粘性,提高了快应变流动的计算精度。改进后的 RNG $k-\varepsilon$ 模型,相比于标准 $k-\varepsilon$ 模型,RNG $k-\varepsilon$ 模型更适合于高大空间和通风路径较复杂的水电站,故在本次水电站地下厂房 CFD 数值模拟中的湍流模型选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型。

2.5 边界条件设置

文献[12]、文献[13]、文献[14]分别对白鹤滩水电站、西龙池水电站、仙游抽水蓄能电站地下厂房进行了 CFD 数值模拟,并将其结果与相似模型的数据或实测数据进行了比较,都验证了 CFD 数值模拟结果的准确性。分析这些地下厂房气流组织数值模拟的设置,可以发现边界条件的设置大致相同,因此地下厂房气流组织数值模拟中的边界条件的设置为:送风口设置为 velocity-inlet;各区域的循环风口设置为 velocity-inlet,从发电机层排入至其他区域的风口也设置为 velocity-inlet,不过此时需要将速度设置为负值;楼梯通道、吊物孔的边界条件设置为 interior;发电机、变压器、开关柜等散热设备的边界条件设置为无滑移的 wall 边界;墙面、地面、屋顶的边界条件也设置为无滑移的 wall 边界。其中,由于变压器、开关柜等散热设备散热量较为恒定,则设定为第二类边界条件,即定热流密度,按照单位面积散热量确定,而对于墙面、地面、屋顶,本电站属于深埋式建筑,岩体对室内环境的吸热作用是有利因素,并在负荷计算中作为富裕量不计入,故考虑为绝热壁面。

对于模型材料边界条件的设置按照设计院给的参数进行设计。其中,需要注意的是:在 CFD 软件设置中,可以将空气设置为实际气体。但是,

如果将空气设置为实际气体, 那么控制方程中的密度就成了未知量, 这增加了计算时间和收敛的难度。根据以前实际工程的经验, 高大空间中的空气温度变化较小, 即密度变化较小。因此, 可以认为高大空间内的空气流动符合 Boussinesq 假设。设置为 Boussinesq 假设, 不仅降低了收敛的难度、缩短了计算的时间, 而且保持了空气的流动特性。所以, 在本次模拟过程中, 将空气都设置为符合 Boussinesq 假设。

灰体的辐射能力与固体材料的属性密切相关, 不同固体材料具有不同吸收率和表面粗糙度; 表面粗糙度决定了物体在辐射过程中漫反射和镜面反射所占的比例。因此, 设置地下厂房围护结构内壁面为拉毛水泥墙面, 吸收率为 0.65; 发热设备表面为镀锌薄钢板, 吸收率为 0.89; 而且, 所有参加辐射换热的物体表面都足够粗糙 (都为漫射表面), 所有入射的辐射射线没有固定的反射角, 而是均匀地发射到各个方向。

3 气流组织评价指标

CFD 模拟结果不仅能直观地显示出各截面的温度、速度云图, 而且还能在不同位置得到较为精确的温度、速度。在气流组织设计过程中, 温度和速度是两个比较重要的参数, 想要明确地下厂房内工作区域温度场、速度场的分布情况, 需对厂房内工作区域进行合理的布置测点, 以便于评价厂房内的气流组织。在布置测点时, 尽量将同侧同层测点布置在同一轴线上, 测点位置尽量避开热源的影响, 将工作区的测点布置在离地面 1.5m 处。从 CFD 模拟结果中导出各布置测点的温度、速度, 并采用相关的评价指标对气流组织性能进行评价。目前, 评价空调系统气流组织的性能指标主要有: 不均匀系数、空气分布特性指标和能量利用系数^[11,13]。

3.1 不均匀系数

不均匀系数是用来描述工作区的温度、速度的均匀程度。不均匀系数越小, 表示室内的气流分布越均匀。其计算方法是在工作区取 n 个测点, 求出温度均值 \bar{t} 、速度均值 \bar{u} , 再根据式 (5)、式 (6) 分别求其均方根偏差 σ_t 、 σ_u , 然后利用式 (7)、式 (8) 计算得到温度不均匀系数 k_t 、速度不均匀系数 k_u 。

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum(\bar{t} - t_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum(\bar{u} - u_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$k_t = \frac{\sigma_t}{\bar{t}} \quad (7)$$

$$k_u = \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \quad (8)$$

3.2 空气分布特性指标

空气分布特性指标 ADPI 是用来评价室内气流组织性能的, 它综合考虑了温度、气流速度对人体舒适度的影响。空气分布特性指标 ADPI 是基于有效温差来定义的, 有效温差 ΔET 与室内气流速度的关系可通过公式 (9) 表达。ADPI 值越大, 工作区感到舒适的人员就越多, 通常 ADPI 大于 80%, 可认为室内的气流组织是较好的^[15]。

$$\Delta ET = (t_i - t_n) - 7.66(v_i - 0.15) \quad (9)$$

式中: ΔET 为有效温差, $^{\circ}\text{C}$; t_i 为室内工作区某测点的温度, $^{\circ}\text{C}$; t_n 为设计的室内温度, $^{\circ}\text{C}$; v_i 为室内工作区某测点的气流速度, m/s 。

当有效温差 ΔET 在 $-1.7 \sim 1.1^{\circ}\text{C}$ 范围内时, 多数人是感觉到舒适的。所以, 将 ADPI 定义为:

$$ADPI = \frac{\text{满足}(-1.7 < \Delta ET < 1.1)\text{的测点数}}{\text{总测点数}} \times 100\% \quad (10)$$

3.3 能量利用系数

能量利用系数 η 是用来评价通风空调系统能量利用效率的一个指标, 其计算方法见公式 (11)。由公式 (11) 可知: 当能量利用系数 η 大于 1 时, 表明房间的排风温度大于送风温度, 说明送入房间的气流吸收了室内的余热, 其系统能量被有效利用, 经济性较好; 当能量利用系数 η 小于 1 时, 表明排风温度小于送风温度, 说明送入房间的冷量并没有被充分利用, 这可能是因为气流组织设计不合理, 造成室内气流出现短路, 无法充分发挥送入空气的除热作用, 其系统经济性较差。

$$\eta = \frac{t_e - t_0}{t_n - t_0} \quad (11)$$

式中: t_e 为排风温度, $^{\circ}\text{C}$; t_n 为工作区空气平均温度, $^{\circ}\text{C}$; t_0 为送风温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

4 模拟结果分析

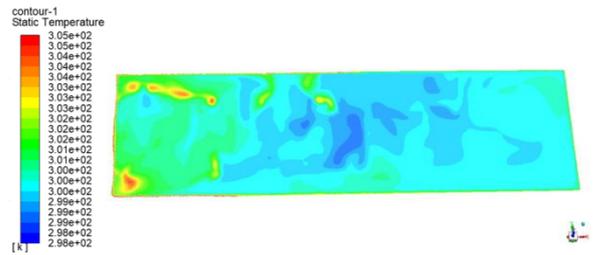
在对大万山岛海水抽水蓄能电站地下厂房进行建立物理模型、划分网格、设置边界条件后，模拟计算了电站主厂房采用不同的气流组织时室内工作区域的温度、气流速度，并采用温度不均匀系数、速度不均匀系数、能量利用系数等评价指标对主厂房的气流组织进行评价。

4.1 模拟结果

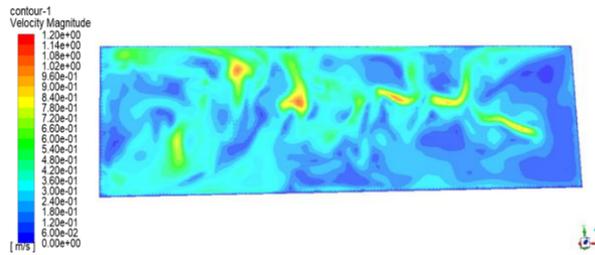
采用 CFD 对上述的 3 种模拟工况进行了计算，并采用云图显示了发电机层和水轮机层工作区域截面的温度云图、气流速度云图，如图 5~图 7 所示。

图 5 工况 1 主厂房工作区温度和速度分布

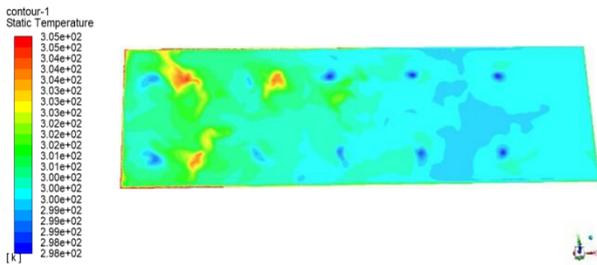
Fig.5 Temperature and velocity distribution in working area of main workshop under working condition 1



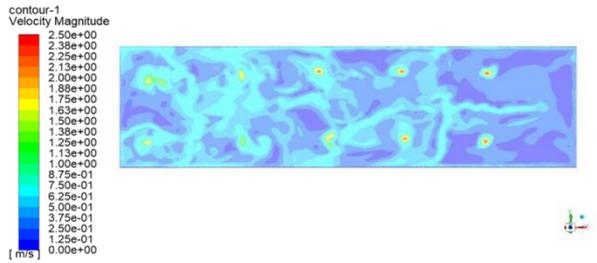
(a) 各工况发电机层工作区的温度场



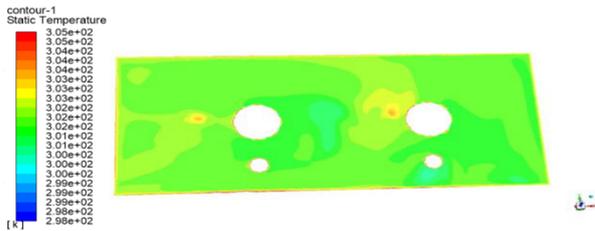
(b) 各工况发电机层工作区的速度场



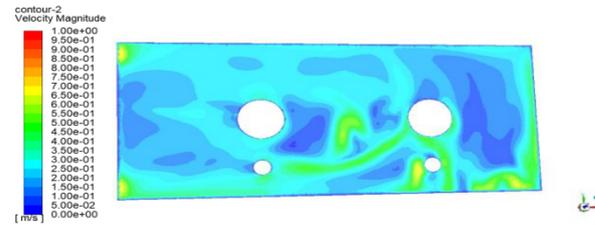
(a) 各工况发电机层工作区的温度场



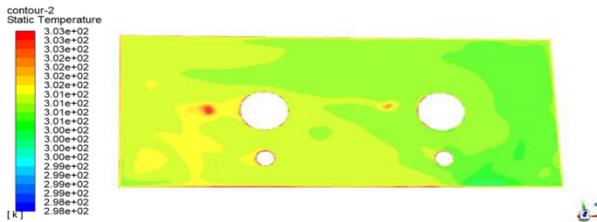
(b) 各工况发电机层工作区的速度场



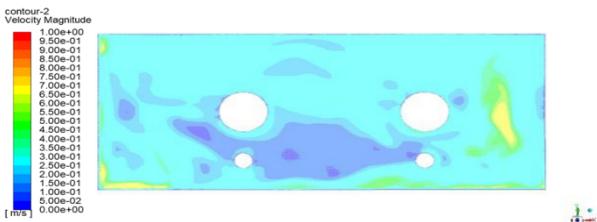
(c) 各工况水轮机层工作区的温度场



(d) 各工况水轮机层工作区的速度场



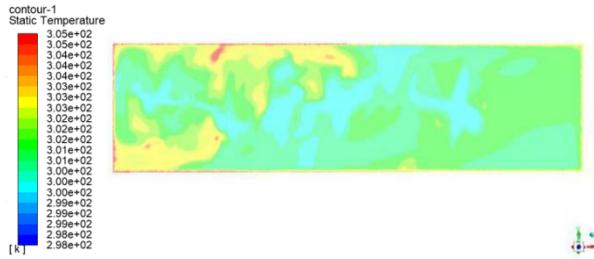
(c) 各工况水轮机层工作区的温度场



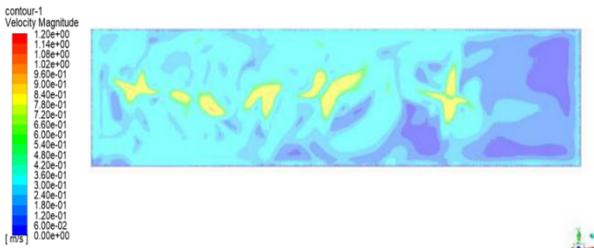
(d) 各工况水轮机层工作区的速度场

图 6 工况 2 主厂房工作区温度和速度分布

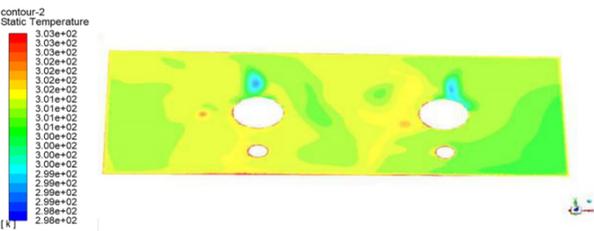
Fig.6 Temperature and velocity distribution in working area of main workshop under working condition 2



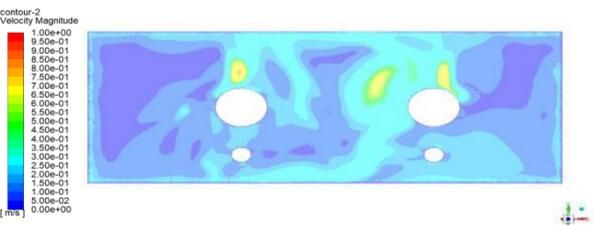
(a) 各工况发电机层工作区的温度场



(b) 各工况发电机层工作区的速度场



(c) 各工况水轮机层工作区的温度场



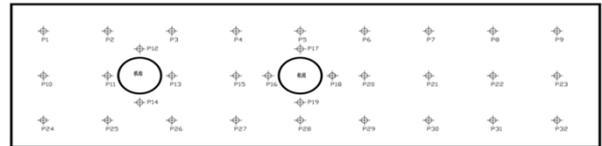
(d) 各工况水轮机层工作区的速度场

图 7 工况 3 主厂房工作区温度和速度分布

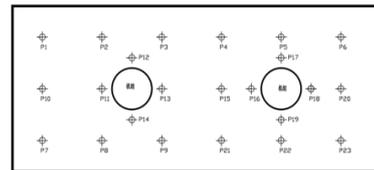
Fig.7 Temperature and velocity distribution in working area of main workshop under working condition 3

4.2 结果分析

为了更准确地分析大万山岛海水抽水蓄电站主厂房工作区的温度场、速度场, 对厂房内的气流组织进行评价, 需对各区域工作区进行合理地布置测点。在布置测点的过程中, 应注意测点不能布置在散热设备上, 工作区的测点布置在距离地面 1.5m 处的断面。主厂房内各测点的具体布置如图 8 所示。



(a) 发电机层



(b) 水轮机层

图 8 主厂房工作区域测点布置图

Fig.8 Layout of measuring points in the working area of the main workshop

根据 CFD 数值模拟的结果, 采用不均匀系数、能量利用系数以及 ADPI 对大万山岛海水抽水蓄电站主厂房不同工况下的气流组织进行了评价, 其结果如表 4 所示。

表 4 不同气流组织下主厂房室内的气流参数

Table 4 Air flow parameters in the main workshop with different air distribution

模拟 工况	发电机层				水轮机层				ADPI (%)	能量利 用系数
	平均温度 (°C)	平均速度 (m/s)	温度不均 匀系数	速度不均 匀系数	平均温度 (°C)	平均速度 (m/s)	温度不均 匀系数	速度不均 匀系数		
1	27.1	0.35	0.0018	0.4506	27.4	0.26	0.0006	0.2864	73.5	1.08
2	26.9	0.27	0.0024	0.6744	27.4	0.23	0.0006	0.4032	84.7	1.14
3	27.8	0.24	0.0023	0.7014	28.0	0.13	0.0014	0.9118	90.0	1.20

由图 5~图 7、表 4 可知, 3 种模拟工况下发电机层工作区的平均温度和平均速度能够满足房间设计要求 (室内温度 < 30 °C、气流速度在

0.2~0.8m/s 之间)。但是主厂房发电机层工作区温度场分布并不严格均匀, 这是因为房间右边部分为安装间区域, 散热设备少, 温度相对偏低, 而靠近

发电机组的左边部分温度相对偏高。此外,在双侧送风的模拟工况中,主厂房发电机层工作区截面各处的温度基本在 27℃,满足 $\leq 30^\circ\text{C}$ 的设计要求;但采用顶部送风时,发电机层风口正下方出现局部过冷的现象,这是因为夏季冷空气沉降,顶部风口速度衰减过慢而风口送风风速过大引起的。相较于双侧送风,采用顶部送风发电机层的温度不均匀系数和速度不均匀系数更小,而送风方式对水轮机层的温度场和速度场影响都不大,这是因为水轮机层的送风来自于发电机层的排风,通过楼梯口和吊物孔送入的,其位置和尺寸是固定的。

水轮机层工作区的温度基本在 28℃,满足室内温度小于 30℃的设计要求;水轮机层工作区截面处的风速均在 0.8m/s 以下,满足《规范》的 0.8m/s 的风速上限要求。在采用小新风方案下的气流组织时,发电机层工作区的平均速度也满足设计要求,但水轮机层工作区的平均速度没有达到规定的下限值 0.2m/s,这是因为水轮机层的负荷较小,局部空调布置发热设备附近,而发热设备布置集中,且水轮机层的空间较大,这就造成了除设备附近外的其他区域气流未受到扰动,使得室内空气速度较小。

从表 4 还可以看出,3 种模拟工况下主厂房气流组织的能量利用系数均大于 1,说明其系统经济性较好。而小新风方案对应的 ADPI 值是最大的,说明采用小新风方案对应的气流组织形式使得室内工作区感到舒适的人员最多。

5 结语

(1) 大万山岛海水抽蓄电站主厂房采用直流式加集中制冷的通风空调方案时,发电机层的送风为拱顶送风或双侧送风,其室内工作区域的温度和气流速度都能满足相应的设计要求。相较于双侧送风,采用顶部送风发电机层的温度、速度不均匀系数更小,水轮机层的不均匀系数相差不大。当采用顶部送风时,发电机层风口正下方出现局部过冷的现象,这是因为其风口是圆形喷口,夏季冷空气沉降,喷口往下直吹、气流速度衰减过慢引起的,在今后的设计中可以考虑将其风口设置为可调型旋流风口,根据送风角度进行调节,以得到更均匀的气流组织。

(2) 大万山岛海水抽蓄电站主厂房采用小新

风方案下的气流组织,发电机层和水轮机层工作区的平均温度均满足设计要求。但水轮机层工作区的平均速度小于 0.2m/s,其原因在于水轮机层的空间较大且发热设备布置较集中,而局部空调仅设在发热设备附近,因此除发热设备附近外的其他区域气流未受到扰动,因而室内空气的平均速度较小,此时可考虑在室内增设风机来加强室内气流的循环。

(3) 在 3 种模拟工况下,主厂房气流组织的能量利用系数均大于 1,说明其系统具有良好的经济性。其中,小新风方案对应的空气分布特性指标值最大,说明该方案对应的气流组织形式使室内工作区感到舒适的人员最多。

参考文献:

- [1] 龙天渝,蔡增基,董宏明.水电站地下主厂房通风气流组织的数值模拟[J].建筑热能通风空调,2000,(4):15-18.
- [2] 王勇,龙恩深.地下水电站通风空调气流组织研究[C].全国暖通空调制冷2004年学术年会,2004.
- [3] LIU Y, XIAO Y, CHEN J, et al. A network model for natural ventilation simulation in deep buried underground structures[J]. Build and Environment, 2019, 153:288-301.
- [4] REN T, LI A, LUO N, et al. 1:50 scale modeling study on airflow effectiveness of large spaces mutually connected for underground workshops[J]. Building Simulation, 2016,9(2):201-212.
- [5] TAO P, LI A, ZHANG J, et al. Scaling model study of the air distribution in a powerhouse under different ventilation conditions[J]. Building Simulation, 2014,7(4): 389-400.
- [6] 李安桂,李光华.水电工程地下高大厂房通风空调气流组织及缩尺模型试验进展[J].暖通空调,2015,45(2):1-9.
- [7] 向正林,沈玉妹,龚芳,等.海水抽蓄电站地下厂房通风空调方案分析[J].水利水电技术,2020,51(S2):168-176.
- [8] 陈露,郝学军,任毅.高大空间建筑不同送风形式气流组织研究[J].北京建筑工程学院学报,2010,26(4):25-28.
- [9] 龚胜强,刘勇,谢东,等.某大型地下水电站厂房通风空调系统气流组织数值模拟分析[J].暖通空调,2017, 47(11):112-117.
- [10] 陈言桂.琅琊山水电站地下厂房发电机层拱顶送风气流组织试验与研究[D].重庆:重庆大学,2005.
- [11] 董蕾.厄瓜多尔CCS水电站发电机层气流组织及特殊运行工况模拟[D].西安:西安建筑科技大学,2014.

-
- [12] 谢东. 地下水电站厂房气流组织CFD 数值模拟方法研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [13] 阳琴. 西龙池水电站地下主厂房通风模型试验与数值模拟研究[D].重庆:重庆大学,2006.
- [14] 杨晓峰. 仙游抽水蓄能电站地下厂房空调通风模型试验[D].西安:西安建筑科技大学,2014.
- [15] 任新. 空调房间流场和温度场的数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005.