

1000MW电除尘气流均布特性大规模数值模拟研究与工程应用

● 李德波 广东电科院能源技术有限责任公司 广州 510060

摘要：

气流分布是影响电除尘器除尘效率的主要因素之一，采用数值模拟的方法对某电厂1000MW电除尘器气流均布特性进行研究，其中气流分布板利用多孔介质模型，流场的模拟采用k-ε双方程，数值计算采用SIMPLE算法，结果表明，在电除尘器入口喇叭口处设置三层多孔板，且开孔率设置为50%、30%、30%，气流均布性最佳；进口流速为6m/s时，电除尘器气流均布满足合格要求，并对比了有无灰斗挡板对气流均匀性的影响，发现灰斗挡板可以有效减小灰斗内部涡流现象，提高粉尘收集效果。

关键词：气流分布，数值模拟，多孔介质，灰斗挡板

电除尘器因其阻力小、效率高、运行稳定可靠等优点广泛应用于冶金、发电等行业^[1]。随着环保意识的逐渐提高，现阶段对环保的要求也愈发严格，电除尘器内流场是否均匀直接决定着除尘效率的高低，对气流均布特性的研究一直以来是国内外科研界的研究重点之一^[2-3]。2007年党小庆^[4]等用计算流体力学方法对660MW机组电除尘器第一电场进口断面气流速度分布进行了数值计算，根据计算结果在进口管道中加设导流板，达到了较好的气流均匀性。2011年Minghua Bai^[5]等对静电除尘器内有无导流板进行了数值模拟，发现在气流分布板上添加导流板可以改善电除尘器内部流场，有助于提高粉尘脱除效率。黄三明等^[6]对电除尘器中采用的CFD模型的关键参数进行了修正，指出气流分布板的阻力系数不仅与气流分布板的开孔率有关，还与气流分布板的厚度和孔径有关，何剑^[7]等以槽形板间距的影响因子为基准，比较了10个影响气流均布性的因素，认为第二层气流分布板是影响整个流场气流均匀性的关键，其位置和开孔情况对气流分布影响最为明显，叶兴联等^[8]利用CFD数值模拟方法对气流分布进行设计，结果表明，电除尘器入口导流板及灰斗挡板的合理设计可以改善气流分布，赵俊起^[9]等的研究表明，当气流分布板开孔率设置为30%时，气流分布较均匀，且方孔形气流分布板的性能优于花孔型，花孔型优于圆形，气流通过孔的收缩系数一定

程度会影响气流稳定性。杨衡^[10]等通过改变电除尘器第二、第三块气流分布板的局部开孔率对电场内气流流动状态进行数值模拟，验证了在计算模型中调整各气流分布板不同区域的阻力，可以改善电场区内气流分布状况。焦丹等^[11]采用多孔跳跃模型对电除尘器内部气流分布特性进行研究，研究表明，在电除尘器进口端设置三层分布板，气流分布呈均匀状态，若只布置一块气流分布板，其最佳开孔率为30%~40%。

在上述电场气流均布性的研究中，研究学者只改变一层或二层气流分布板的开孔率来研究最佳开孔率，但工程实际中往往采用三层气流分布板才能够达到良好的气流均布效果，故本文对气流分布板的布置方式及三层气流分布板的最佳开孔率进行研究，并对灰斗挡板对气流分布的影响进行分析，以期优化和改善电除尘器气流均布提供理论依据。

1. 数学模型

1.1 连续相模型

连续性方程

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

动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\nabla p + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + \rho g_i + F$$

式中： P 为静压， τ_{ji} 为应力张量； ρg_i 为作用于微元体上的重力； F 为空间电荷引起的体积力。

湍流模型引用的是k- ε 模型

$$\frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] +$$

$$\mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

其中， μ_t 为湍流粘性系数， $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ， $C_\mu = 0.09$ ； σ_k 是普朗特数， $\sigma_k = 1.0$ ， k 为单位质量流体湍动能， C_1 、 C_2 为经验常数， $C_1 = 1.44$ ， $C_2 = 1.92$ ； σ_k 和 σ_ε 分别是与湍动能 k 和耗散率 ε 对应的prandtl数。

1.2 多孔介质模型

由于气流分布板孔隙数量多，网格划分复杂，故采用多孔介质模型模拟气流分布板，多孔介质实质上是在原动量方程上添加了一个动量源项，该源项由黏性损失项和内部损失项构成。对于简单的均匀多孔介质：

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha} v_j + C_2 \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j \quad j=1,2,3$$

式中：——渗透性；

C_2 ——内部阻力因子。

由于本文模拟的是气流分布板，粘度阻力影响较小，故可以消除渗透项而只考虑惯性阻力，即在流动方向上设置一个流动内部损失项，其中沿流动方向的阻力损失可通过如下经验公式获得：

$$\Delta p = 0.2739v^2 + 4.68816v$$

又由于：

$$\Delta p = \Delta n$$

式中： n —气流分布板厚度

联立可得：

$$\frac{1}{2} C_2 \rho \Delta n = 0.27394$$

$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

对于多孔板，粘性系数比较小，粘性附加项近似忽略为零，简化为：

$$\Delta P = -\frac{1}{2} C_2 \rho v^2 \Delta n$$

其中 C_2 可根据经验公式来确定：

$$C_2 = \frac{1}{\Delta n} (0.707 \sqrt{1-f} + 1 - f)^2 \frac{1}{f^2}$$

式中， f 为开孔率。

2. 电除尘器模型的建立

2.1 物理模型与网格划分

以某电厂1000MW电除尘器为例，由于整体几何结构较复杂，故本文采取几何模型的一半为计算域，按实际尺寸建模如图1所示。

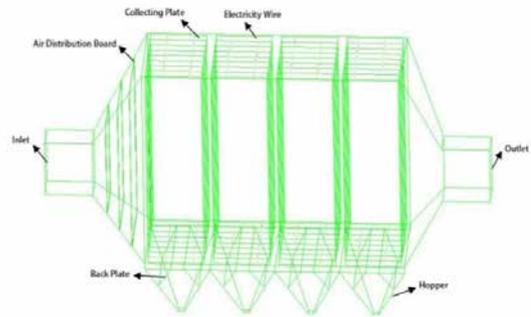
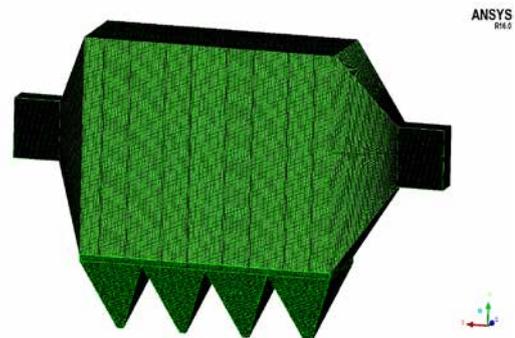


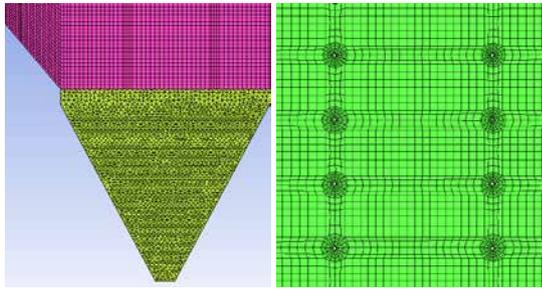
图1 静电除尘器对称模型

模型主要由进出口喇叭、4个电场区、灰斗、气流分布板等组成。其中整个电除尘器尺寸为21721 × 15300 × 16000mm；灰斗尺寸为5430 × 7650 × 5700；每个电场区有36块收尘板，尺寸为4700 × 16000mm，有64根电晕线，直径为20mm，进出口尺寸均为4700 × 4700mm，在距离入口截面1.15m、2.165m和3.18m竖直方向共设置3层气流分布板，孔径均为50mm。

通过icem对模型进行分区域划分网格，电场除尘器电场、进出口烟道、气流分布板、电晕线及收尘板区域采用结构化网格，六面体网格总数为5810782，灰斗结构空间则采用非结构化网格，四面体网格总数为3439358，在网格交界面建立一对interface，保证流体计算域的连续性，网格划分情况如图2所示。



(a) 整体网格结构



(b) 局部网格结构

图2 静电除尘器网格结构

2.2 数值计算方法与边界条件

采用计算流体力学 (CFD) 方法对上述模型进行数值求解, 其中求解器类型设为Pressure-Based, 时间格式设为Steady, 采用有限容积法离散控制方程, 并采用SIMPLE算法求解压力-速度耦合问题。电除尘器入口设定为velocity-Inlet, 速度为6m/s, 出口设定为pressure-outlet, 压力为-2720pa, 其他均设置为壁面无滑移边界条件。工质为常温空气, 密度为1.225kg/m³, 粘度系数: 1.789 × 10⁻⁵kg/m · s。

2.3 数值模拟结果验证

2.3.1 网格无关性验证

为了验证网格大小对计算精度不够造成影响, 本文划分了3种不同网格数量的模型, 并在相同的边界条件下进行模拟, 选取电除尘区入口截面上的中心线作为测试线, 所得的中心线上速度随z轴位置变化曲线如图3所示。可以发现, 三条曲线基本重合在一起, 故可认为网格数量满足数值模拟网格精度要求。

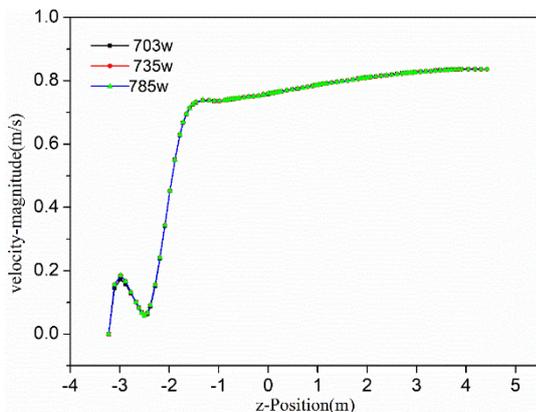


图3 三种网格数量下气流速度随中心线z轴位置变化

2.3.2 计算结果验证

为了对计算结果准确性进行验证, 本节选取了锅炉运行时的三个工况, 并将模拟出的电除尘器入口压力与现场实测数据进行对比。

由表1可知, 各个工况下电除尘器入口压力模拟

值与实验值误差控制在10%以内, 由于现场实际测定压力时常会出现数据波动的情况, 故数值模拟结果存在较小的误差是在计算精度允许范围内, 说明模拟精度可以满足要求, 计算方法可靠。

表1 各工况下的进口压力对比

工况	实验值	模拟值	误差
1000MW	-3202	-3353	4.7%
860MW	-2754	-2967	4.1%
700MW	-2241	-2367	5.6%

3. 计算结果与分析

3.1 评判标准

评价电除尘器气流分布均匀性优劣的均方根公式:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{nv^2}}$$

式中, σ —相对均方根值; n—测量断面上测点数; v_i —测点气流速度, m/s (要求测点不少于100个); \bar{v} —气流平均速度值, m/s。

根据 σ 值的不同气流分布均匀性一般分为三级, 即 $\sigma < 0.10$, 为优; $0.10 < \sigma < 0.15$, 为良; $\sigma > 0.15$, 为合格。为了对电除尘器气流分布做出合理评价, 本文选取距离电除尘器入口X=8.23m处的断面作为测试截面, 并按照《电除尘器气流分布模拟试验方法》中的行业标准将整个截面划分为等面积的小矩形, 取它的中点为代表测点。注: 测点的间距不大于1m, 共划分315个测点, 如图4所示。

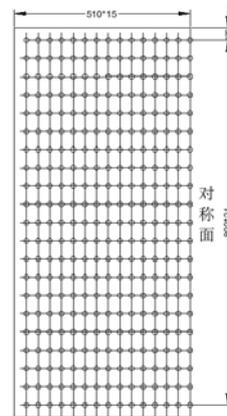


图4 测试截面测点布置图

3.2 气流分布板布置形式对气流均布的影响

静电除尘器气流均布状态一定程度决定着电除尘效率的高低, 为了减小涡流, 保证气流均匀, 需

在除尘器的入口喇叭口装设气流分布板。

保持边界条件不变,仅改变气流分布板的层数,所得不同截面处的气流相对均方根(RMS)值如图5所示,不难发现,随着气流分布板层数的增加,三个截面处的气流相对均方根值均减小,且只有布置三层气流分布板的情况下,气流相对均方根值小于0.25,达到合格标准,说明增加气流分布板的层数可以使气流重新分布,达到改善气流均布的效果。当保持气流分布板布置层数不变时,可以发现,中间截面的气流相对均方根值均小于入口截面,表明电除尘器入口截面气流分布相比于其他电场截面更加均匀,这和梁振山^[12]等人做的测试结果相一致,故实际操作中只要保证第一电场入口断面气流分布达到均匀即认为达到合格标准。

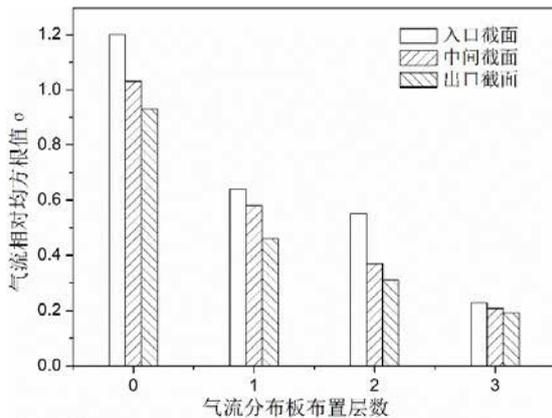


图5 不同气流分布板布置层数对应的 (RMS) 值

3.3 气流分布板开孔率对气流均布的影响

气流分布板的开孔率因气体速度而异,靠近电除尘电场区的第二层气流分布板的开孔率应小于第一层,即第二层气流分布板的阻力系数大于第一层,这就能改善气体分布均匀性。为了得到最佳的气流分布板结构,设计时有必要在不同的操作条件下进行数值模拟实验,根据模拟结果进行气流分布板设计。

一般参考书上都论述气流分布板开孔率取在25%-50%范围内,使得厂家难以选择最佳的数值^[13],为此本文考虑了7种气流分布板多孔率设置方式,如下表所示:

表2 不同开孔率布置方式

方式	开孔率		
	第一层	第二层	第三层
1	0.6	0.4	0.3
2	0.5	0.4	0.3
3	0.4	0.4	0.3
4	0.5	0.5	0.3
5	0.5	0.3	0.3

6	0.5	0.4	0.4
7	0.5	0.4	0.2

图6为不同开孔率布置方式下对应的气流均方根(RMS)值,由图可知,在第一层和第三层或第一层和第二层气流分布板开孔率不变的情况下,减小第二层或第三层气流分布板开孔率,气流均方根值呈现下降的趋势,气流分布更加均匀,这主要是因为随着开孔率的下降,气流分布板阻力系数变大,压力损失变大,但当保持第二层和第三层分布板开孔率不变的情况下,减少第一层气流分布板开孔率,气流均方根值却未呈现出相同的变化趋势,而是先减小后增加,这是因为方式3中的第一层和第二层气流分布板开孔率一致,气流分布板阻力系数维持在同一数值水平,压降较小,故气流均匀性变差,为了进一步观察这两种布置方式对电场区内部气流分布的影响,选取开孔率为0.4/0.4/0.3及0.5/0.3/0.3对应的电场区入口截面速度分布云图,如图7所示,可以发现两图中心区域速度分布并无明显变化,速度沿径向均呈现中心向四周递减的趋势,但采用开孔率为0.4/0.4/0.3布置时,靠近壁面的区域速度梯度变化较大,且存在较多的涡流区域,因此气流均布性较差,实际对气流分布板开孔率的设置过程中,应避免这一布置方式的出现。

7种方式中只有3种方式满足电除尘器入口截面气流分布均匀性相对均方根值小于0.25,其中按均方根值从大到小排列,三层气流分布板开孔率布置分别为0.5/0.4/0.3、0.5/0.3/0.3及0.5/0.4/0.2,由于实际工程中,开孔率太小,气流分布板阻力增大的同时,电除尘器需要消耗大量的能量来克服阻力,能耗变高,进口喇叭口内的负荷会增加,选择太小的气流分布板开孔率是不合适的,故综合考虑气流分布均匀性、进口喇叭内的负荷、电除尘器能耗等因素,建议三层气流分布板的开孔率选择为0.5/0.3/0.3。

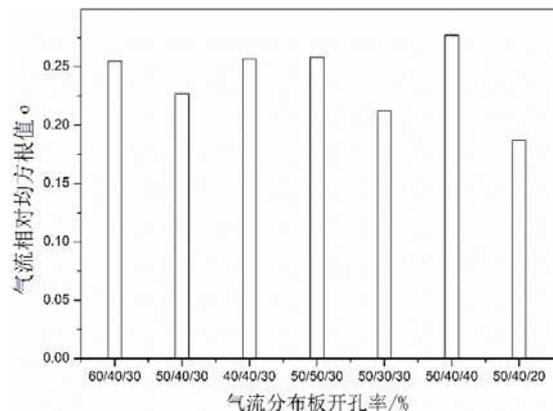


图6 不同气流分布板开孔率对应的 (RMS) 值

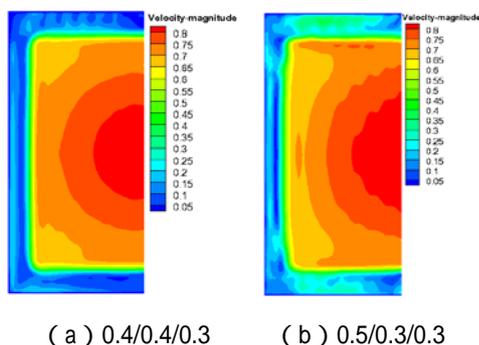


图7 两种布置方式对应的入口截面速度分布云图

3.4 入口流速对气流均布的影响

在入口喇叭口布置三层气流分布板，开孔率分别为50%、40%和30%，保持其他边界条件不变，仅改变入口流速，在入口截面处所得的气流相对均方根（RMS）值随入口流速的变化如图8所示，可以发现，气流相对均方根值随入口流速呈现上下起伏的变化趋势，说明烟气流速对气流相对均方根值有着较大的影响，当烟气流速增大到一定程度时，会造成电场区气流分布紊乱，气流均布性变差，当烟气流速太低的话，也会对气流均布产生不利影响，本文所涉及到电除尘器最佳入口流速为6m/s，因此，在实际电除尘器运行过程中烟气流速应保持在这一工况下。

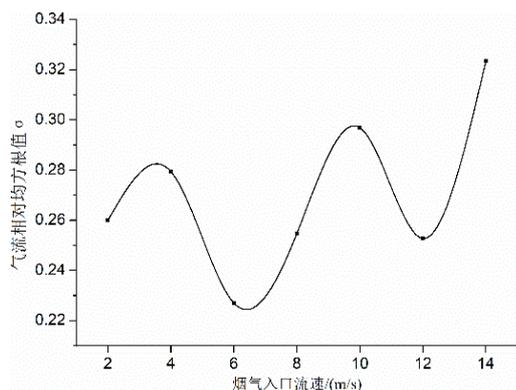


图8 不同入口流速下对应的（RMS）值

3.5 灰斗挡板对气流均布的影响

电除尘器内的气流短路通常指的是烟气绕过电场区，而从灰斗、顶梁等区域通过，导致这部分烟气携带的粉尘颗粒很难被收集，还可能将已收集的粉尘带走，所以要想提高电除尘效率，实现超低排放，电除尘器的气流短路问题必须要重视。烟气在经过电除尘器入口喇叭口的扩散后，会有一部分气流进入灰斗形成短路，会使沉积于灰斗中的粉尘发生二次飞扬，使之重新回到气流中，甚至直接带出电除尘器，使电除尘器效率降低。为得到有无灰斗挡板时对气流均布的影响，图9分别给出了无挡

板及有挡板下的气流速度分布云图与流线图，可以发现，在电除尘器内部无灰斗挡板的情况下，灰斗下部流速较高，约1m/s，且第一灰斗区域存在较大涡流，这样就极易将沉积到灰斗内部的灰灰卷起，形成二次扬尘，影响除尘效率，而在添加了开度为60°的灰斗挡板后，可以发现，挡板对电除尘器电场区的气流分布并无太大影响，主要影响集中在灰斗下部，由于灰斗挡板的阻流作用，形成了较多的低风速区域，且第一灰斗区域涡流现象大大减小，减轻了收尘区下沿的高速区与灰斗的强回流现象，有助于粉尘收集。

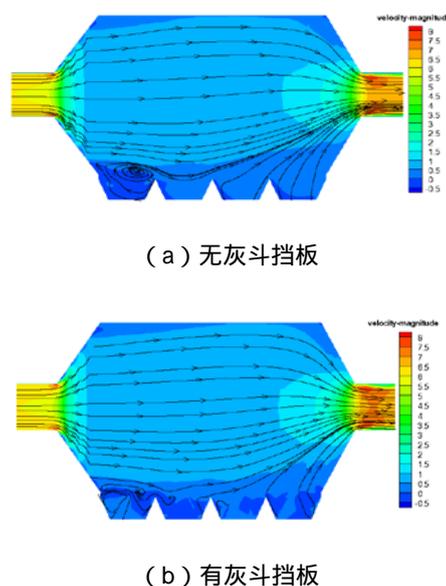


图9 有无灰斗挡板时对应的气流速度分布云图与流线图

4. 结论

(1) 对比4种不同气流分布板布置方式对电除尘区气流均布的影响，数值模拟结果表明：随着气流分布板层数的增加，气流相对均方根值减小，且只有布置三层气流分布板的情况下，气流相对均方根值小于0.25，达到气流均匀性合格标准。

(2) 对比三层气流分布板7种不同开孔率设置方式对电除尘区气流均布的影响，发现只有开孔率为0.5/0.4/0.3、0.5/0.3/0.3及0.5/0.4/0.2可以满足气流均匀性合格要求，考虑实际因素，优先选择开孔率为0.5/0.3/0.3的布置方式。

(3) 入口流速对电除尘器气流均布影响很大，通过几组不同的进口流速，认为本文电除尘器最佳入口流速为6m/s。

(4) 对比电除尘器内有无灰斗挡板对气流均布的影响，发现挡板对电场区的气流分布并无太大影响，但是可以使灰斗涡流区域减小，避免回流，有助于粉尘收集。

参考文献：

- [1] S.小奥格尔斯比, G.B.尼克尔斯, 谭天祐(译).电除尘器[M].水利电力出版社.1983
- [2] 刘练波, 许世森. 静电布袋复合除尘器的试验研究[J]. 动力工程学报, 2007, 27(1):103-106.
- [3] 孙超凡, 邬思柯, 钱炜,等. 大型电袋复合除尘器除尘效率的实验研究与优化[J]. 动力工程学报, 2014, 34(7):534-540.
- [4] 党小庆, 闫东杰, 马广大,等. 大型电除尘器气流分布数值计算的研究和应用[J]. 重型机械, 2007(1):26-29.
- [5] Bai M H, Liu Z Q, Zhang Z M, et al. Numerical Simulation of Airflow in Wet Rotating Reticular Plate Electrostatic Precipitator[J]. Advanced Materials Research, 2012, 361-363:619-622.
- [6] 黄三明, 李立锋, 叶兴联,等. 电除尘器CFD模型验证实验研究[C].中国电除尘学术会议. 2011.
- [7] 何剑, 徐国胜, 李丽梅.电除尘器气流分布模型实验研究[J].电力环境保护, 2006,22(3):40-42.
- [8] 叶兴联, 郭宝玉, 杨丁,等. 电除尘器气流分布多尺度数值模拟方法应用[C].2014ANSYS中国技术大会.2014.
- [9] 赵俊起, 刘同欣, 张津.电除尘器气流均布装置最佳开孔率和孔形的实验研究[J].电力情报, 2001,17(1):39-41.
- [10] 杨衡. 提高电收尘器效率的气流流型优化与数值模拟[D]. 西安建筑科技大学, 2004.
- [11] 焦丹, 谢安国. 气流分布对电除尘器影响的数值模拟[J]. 冶金能源, 2011, 30(3):58-61.
- [12] 梁振山, 隋秀兰, 朱有产,等. 关于电除尘器空气动力场的研究[J]. 水利电力劳动保护, 1994(3):24-26.
- [13] 何剑, 徐国胜. 电除尘器气流分布技术研究进展[J]. 重型机械, 2004(1):5-9.
- [14] 赵海波, 郑楚光. 静电增强湿式除尘器的优化运行[J]. 动力工程学报, 2007, 27(6):954-959.
- [15] 任成武. 新型横向极板电除尘器研究[D]. 江苏大学, 2010.

要闻集锦

通用电气计划利用世界上第二快的超级计算机来推动美国海上风电开发

IBM位于美国能源部橡树岭国家实验室的Summit超级计算机将使GE能够以该公司以前从未有过的方式模拟气流。最终, 这项研究可以影响未来风力涡轮机的设计、控制和运行。它还旨在通过让研究人员更好地掌握大西洋的可用风力资源, 推动美国东海岸的风力发电发展。据GE称, Summit将运行的模拟可以填补一些历史数据的空白。

根据美国风能协会的数据, 海上风电有可能提供的电力几乎是美国目前用电量的两倍。但要想制造出更坚固、更高效的海上风机, 研究人员需要更多的信息。这就是Summit的作用。根据Top500超级计算机速度排名, Summit超级计算机目前被列为全球第二快的超级计算机, 仅次于日本的Fugaku。

GE的研究, 将在未来一年内与能源部的Exascale计算项目合作进行, 如果没有Summit, 几乎是不可能完成的。这是因为他们的研究通常要在分辨率和规模之间进行权衡。他们通常可以用高分辨率研究空气如何在单个

转子叶片上移动, 或者他们可以研究一个大规模的风力发电场, 在这种情况下, 超大规模计算应该允许他们以足够高的分辨率来模拟整个风力发电场的流动物理学, 以研究单个涡轮叶片旋转时的情况。

团队将专注于研究沿海低空喷流。这些气流与传统风力涡轮机设计中通常考虑的风的模式不同, 它们的速度会随着高度的增加而逐渐增加。沿海低空喷流是“非典型的”, 因为风速可以迅速上升到一定高度, 然后突然下降。这些风的模式通常不太常见, 但它们在东海岸出现的频率更高, 这就是为什么研究人员想要更好地了解它们如何影响涡轮机的性能。

在美国东海岸, 人们对海上风能的需求越来越大。美国第一个海上风电场于2016年在罗德岛海岸建成。未来几年, 东海岸的一系列风电场准备上线, 其中最大的一个项目预计将于2024年在新泽西州沿海建设, 其中投资16亿美元。

(卢永捷)