

垃圾焚烧电厂复杂风管系统通流特性的多维耦合数值模拟与优化研究

宋鑫¹, 陈卫华², 华银锋³, 王鹏¹

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海黎明资源再利用有限公司, 上海 201209;
3. 上海浦东环保发展有限公司, 上海 201204)

摘要: 为快速、准确地预测垃圾焚烧电厂中复杂风管系统内的全三维流场特征和通流特性, 结合三维剪切应力输运(SST)数值模型、一维阻力模型和多孔介质模型, 建立了复杂通风管路系统的多维耦合数值模拟方法。通过电厂现场测量获取管路流量和压力, 验证了数值模拟的准确性, 分析了系统通风效果不佳的原因, 并对其进行了优化。结果表明: 数值计算得到的出口压力、支管流量与现场测量值的最大相对误差不超过10%; 现有管路系统不合理的管道布局和大量的分支管路结构是造成当前通流能力不足的原因; 优化后管路系统流量分配更为合理, 原本不满足风量要求的3个车间的风量分别从总风量的3.6%、1.3%、6.4%提升至34.9%、4.8%、10.1%, 均达到电厂运行指标。

关键词: 通风管路系统; 流量分配; 数值模拟; 现场测量; 优化布局

中图分类号: TK16 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.10.017

[引用本文格式] 宋鑫, 陈卫华, 华银锋, 等. 垃圾焚烧电厂复杂风管系统通流特性的多维耦合数值模拟与优化研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(10): 137-144. SONG Xin, CHEN Wei-hua, HUA Yin-feng, et al. Multidimensional numerical simulation and optimization of flow performance for complex ventilation piping system in a waste-to-energy power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(10): 137-144.

Multidimensional Numerical Simulation and Optimization of Flow Performance for Complex Ventilation Piping System in a Waste-to-energy Power Plant

SONG Xin¹, CHEN Wei-hua², HUA Yin-feng³, WANG Peng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240;
2. Shanghai Liming Resources Reuse Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 201209; 3. Shanghai Pudong Environmental Protection Development Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 201204)

Abstract: In order to predict the full three-dimensional (3D) flow field characteristics and its flow-resistance features of complex ventilation piping system in a waste-to-energy power plant quickly and accurately, the 3D shear stress transport (SST) turbulence mode, 1D loss coefficient model and the porous media model were combined to establish a new numerical model for multi-dimensional coupling. The accuracy of the numerical simulation was verified by the mass flow rate data and pressure distributions measured at a power plant. The flow characteristics of the system was also analyzed to find out the reason of its poor ventilation, and the whole pipe system was optimized. The validation results demonstrate that our proposed numerical strategy agrees quite well with the measurements and the relative error between outlet pressure, pipe flow rate and measured value is below 10%. Further analysis indicates that the current

收稿日期: 2021-11-22; 修订日期: 2021-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(11802177); 中国博士后科学基金(2018M630439)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(11802177); China Postdoctoral Science Foundation(2018M630439)

作者简介: 宋鑫(1997-), 男, 上海人, 上海交通大学硕士研究生。

通讯作者: 华银锋(1978-), 男, 浙江杭州人, 上海浦东环保发展有限公司工程师。

flow-resistance feature is caused by the unreasonable piping distribution and the abundant non-standard side-branches. After optimization, the flow distributions of piping system are more reasonable, and the ventilation volumes of the three workshops which originally do not meet the requirements increase from 3.6% ,1.3% and 6.4% to 34.9% ,4.8% and 10.1% respectively, which all reach the operation indicators of the power plant.

Key words: ventilation piping system ,flow distribution ,numerical simulation ,field measurement ,optimization layout

引 言

垃圾焚烧发电技术是“减量化、无害化、资源化”处理生活垃圾的最佳方式,已引起国际社会的高度重视与关注^[1]。典型的垃圾焚烧发电厂主要包含焚烧炉、余热锅炉、空气净化系统、汽轮机组以及发电机组等关键设备。其中,空气净化系统作为垃圾焚烧发电的环境保证组件,是后端焚烧品质、发电效率和终端烟气排放的有力保证。然而,在实际运行过中,空气净化系统中的风管布局不合理会严重影响空气净化效率,一方面会导致有害气体进入下游汽轮机组腐蚀关键部件,另一方面会传播至大气环境影响居民生活^[2]。毫无疑问,构建合理的风管系统对垃圾焚烧电厂的设计和运行维护极其重要。风管工程设计人员往往按照经验公式或国标查询的方式推断管路阻力损失情况从而规划整个管路系统布局。但是,由于电厂场地空间、生产安全需求及流量分配需求等因素的限制,使风管系统大量采用非标连接段、旁通管路以及调节阀、滤网等阻力部件,导致管路实际通流能力与设计期望值产生较大偏差,进而引起风量分配不合理问题。因此,构建快速、准确的数值方法预测复杂风管通流特性具有重要的工程应用价值。

管系流动特性的研究手段分为实验测量和数值模拟。实验测量手段如压力传感器通常只能获取离散测点处的压强信息,无法获得管内的全部流动特性^[3]。部分学者^[4-5]将激光粒子图像速度场测量技术引入管内流动特性研究,获取局部区域的二维速度场信息。显然,这些方法难以适用于体积庞大且结构复杂的风管系统。相对而言,数值模拟研究在获取管内流场和管路系统优化设计中具有明显优势。风管布局的初步设计常采用假定流速法、静压

复得法、等摩阻法等手段,将通风管道内复杂的三维流动问题进行降维处理。这些方法通常需要根据设计手册中提供的公式和数据,计算不同部件的压力损失,难以适用于非标部件。尤其是对于电厂通风系统,涵盖有大量的面积突变、弯管、旁支管、滤网、格栅和阀门等非标准件,更加难以精确捕捉其通流特性。

由于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)技术可模拟管道内部的三维流动,已成为管系流动的主要研究工具^[6-9]。针对非标连接件、调节阀等复杂部件对风管内部流动的影响,本文在采用全三维数值模拟方法的基础上,有效结合一维阻力系数模型和多孔介质模型,构建多维耦合数值模拟方法,分别模拟调节阀、格栅窗等阻力部件对复杂管路系统通流特性的影响。以上海某垃圾焚烧发电厂内的风管系统为研究对象,开展内部流场仿真预测,并获取现场测量数据进行验证。在分析获取通流能力不佳原因的基础上,给出了管系布局的优化方案。

1 风管系统介绍

图1为上海某垃圾焚烧发电厂内的复杂风管系统示意图。

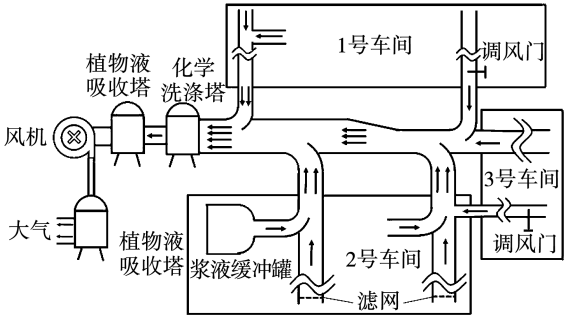


图 1 某垃圾焚烧发电厂复杂通风管路系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of complex ventilation piping system in a waste-to-energy power plant

该管路为多分支管路系统,由一根主管与动力源(风机)直接相连,将各车间内的空气输运至下游植物液吸收塔和化学洗涤塔等设备。主管路下游分别连接至不同的车间之内,由于场地限制,管路内部也存在大量的非标准连接件(调风门、格栅),最终形成了结构复杂且对称性差的管路系统,增加了管路流动损失进而影响了其通流能力。

图 2 为两条通风管路系统对应的三维流体域模型,该电厂管路系统主要包含两条管道系统,横截面为正方形,横截面尺寸变化范围为 320 mm × 320 mm 到 1 800 mm × 1 800 mm,整条管路流道长达 200 m。每条管道末端安装有 1 台最大风量为 48 000 m³/h,功率 90 kW,静压为 3 500 Pa 的变频风机。两条通风管道负责处理厂内 6 个不同车间的通风,每个车间内又包含有数个至数十个吸风口。在初始设计时,两条通风管道可相互联通,但在实际安装过程中,受到安装空间的影响,改为两条相互独立的通风管道,且由于使用和安装了大量非标准件及格栅窗型吸风罩和滤网等阻力部件,导致其实际风量分配效果无法达到设计规划指标。

2 计算模型

在传统数值模拟基础上,构建多维耦合平台,将滤网、阀门及进气格栅等复杂部件进行一维处理,并将对应的阻力系数模型和多孔介质模型植入到三维数值模拟平台中,构建多维耦合数值方法。

2.1 网格划分

对计算区域进行网格划分,网格划分结果如图 3(a)所示。以主管中心线上的流向速度分布为标准进行网格无关性测试,测试网格参数及测试结果如表 1 及图 3(b)所示。网格划分时,采用六面体网格对管道主流区域进行空间离散、采用三棱柱网格对管道壁面边界层区域进行离散,中间采用四面体网格来过渡边界层三棱柱网格和主流流体网格。此外,对于管道而言,弯管、三通管所在区域一般会有较大的速度、压力变化^[10],对此类区域的网格都进行了加密,如图 3(a)所示。利用软件 ANSYS ICEM,根据表 1 中的数据,对测试模型划分了 4 套不同网格数的网格。管系复杂流场的数值计算采用

ANSYS CFX 软件完成。从图 3(b)所示中心线流向速度分布曲线可知,3,4 号网格的计算结果基本一致,而 1,2 号网格则存在较大误差。因此,后续计算将都选取 3 号网格的布局方式,最终两条管道系统的总网格量达到了 800 万网格单元,对应的壁面无量纲距离 y^+ 低于 100,后续的流场计算则采用标准壁面函数公式来处理管道边界层流动。

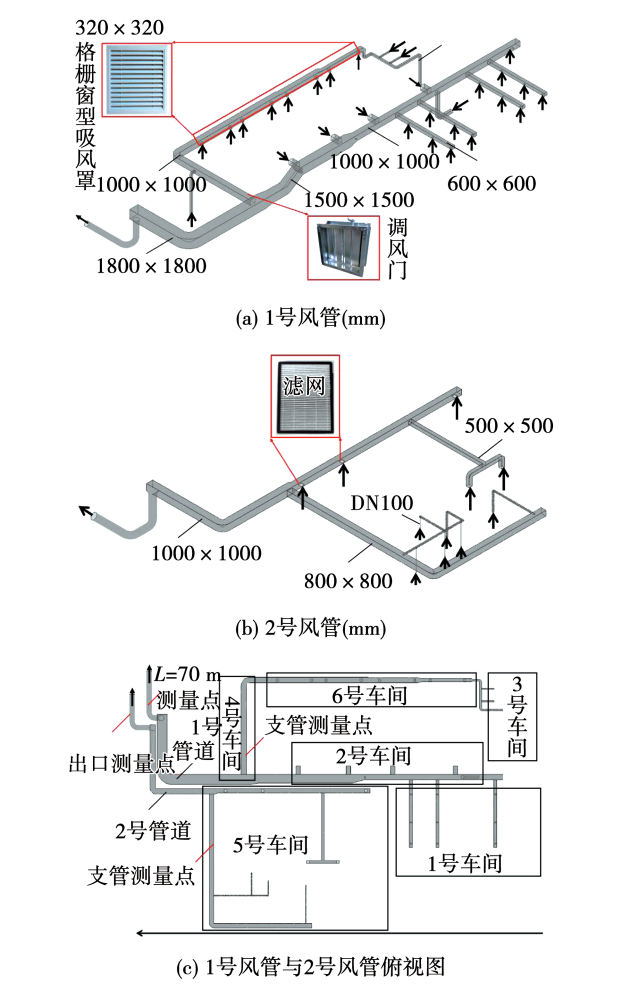


图 2 通风管路系统三维流体分布图
Fig. 2 Schematic diagram of 3D fluid domains in the complex ventilation piping system

表 1 网格划分结果

Tab. 1 Results of mesh generations

网格 序号	单元数/10 ⁶	节点数/10 ⁶	最大尺 寸/mm	近壁厚 度/mm	边界层 伸展比
1	6.46	2.45	200	0.1	1.2
2	7.18	3.15	150	0.1	1.2
3	8.03	3.97	100	0.1	1.2
4	9.93	5.83	50	0.1	1.2

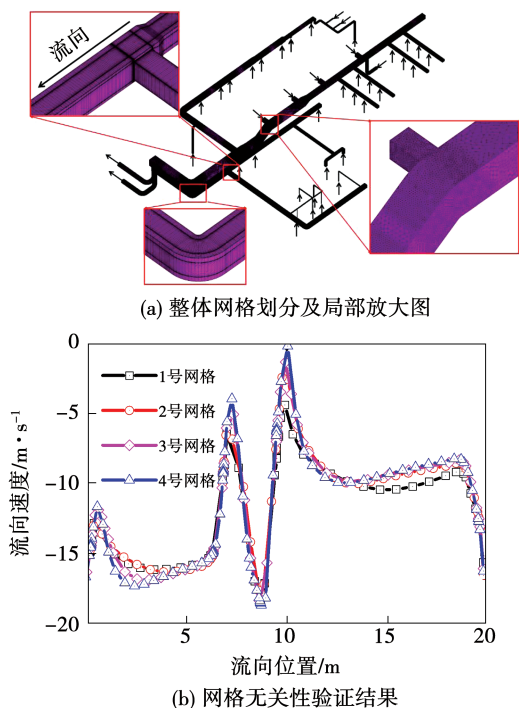


图3 通风管路流体域网格无关性测试

Fig.3 Mesh independence test of fluid domain of ventilation piping system

2.2 湍流模型

由于氨气(NH_3)、硫化氢(H_2S)等有害物质在空气中的浓度远低于 1×10^{-6} ,故计算工质采用理想空气。管内流动雷诺数范围为 $1 \times 10^6 \sim 2.6 \times 10^6$,表明管内流动状态为湍流。计算中,采用剪切应力输运模型^[11](Shear Stress Transport, SST)作为湍流模型,求解管内稳态流场。该湍流模型通过求解有关湍动能 k 、湍动能耗散率 ω 和湍流粘度 μ_t 来封闭整个方程组:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k_3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega_3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega_2} \omega} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2 \quad (2)$$

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (3)$$

式中: ρ —流体密度; μ —流体粘度; $\bar{u}_j$ ($j=1, 2,$

3)—速度分量; $\beta', \sigma_{\omega_2}, a_1$ —模型常数; $\sigma_{k_3}, \sigma_{\omega_3}, \alpha_3, P_k, S$ —湍流变量; F_1, F_2 —选择函数。

模型常数、湍流变量及选择函数的具体数值和表达式可参考文献^[11]。通过选择函数 F_1, F_2 ,该湍流模型在近壁区域使用 $k-\omega$ 模型,而在主流区域切换成 $k-\varepsilon$ 模型。

流场数值计算中,管系固体边界都处理为无滑移粗糙壁面(粗糙度为 0.18 mm)^[12]。对于大部分吸风口(流体域进口),按照压力进口,设定其总压为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。对于出风口,按照风机不同频率下的风量,给定不同的质量流量($4 \sim 16 \text{ kg/s}$)出口。

2.3 多维耦合数值模型

该风管系统中的部分区域安装有阻力部件,如格栅窗型吸风罩,来防止异物吸入风管内,部分管路还安装了风量调节阀来控制风量。安装这些部件会对管道流量分配造成影响,如空气在经过格栅窗型吸风罩后会局部产生回流,减小管道有效流通面积,从而造成较大压力损失。因此,计算中必须将该类结构造成的影响考虑在内,否则将影响计算所得的流量分配特性。然而,这些结构几何特征往往非常精细,无法用网格处理这些细节,对此采用阻力系数模型与多孔介质模型进行降维度处理。

2.3.1 阻力系数模型

阻力系数模型通常设置在边界(进口)区域,用来反映阻力部件(如吸风罩,进气格栅)对流动内部流动所造成的压力损失。阻力系数 ξ ^[10]定义为流经某处后,流体的压力损失 Δp 与流体动压头 $\rho u^2/2$ 之比,即:

$$\xi = \Delta p / \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (4)$$

对于阻力系数 ξ ,既可以通过实验测量来获取,也可通过CFD对该部件进行细致建模和数值计算来获取。图4为针对实际通风管道,忽略入口处吸风罩所得的计算结果与测量值的对比。可以发现,该类结构的尺寸虽然比管道系统小很多,但忽略该类结构会对流量分配的计算结果造成巨大的偏差,而采用阻力系数模型可以很好地解决这一问题。

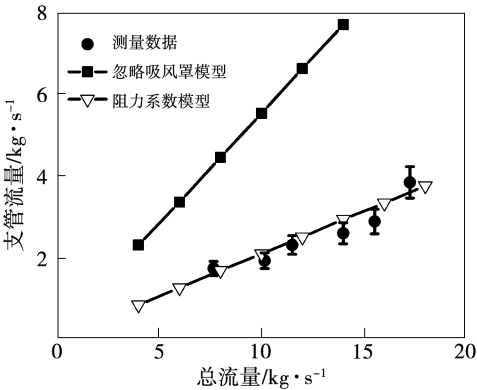


图 4 吸风罩对管道系统流量分配特性的影响

Fig.4 Influence of the suction covers on the flow capacity of the piping system

2.3.2 一维多孔介质模型

在管道系统中部安装的滤网、调风门等部件采用多孔介质模型来简化^[13-14],以降低计算总网格数。当流体流经多孔介质时,其压降 Δp 满足:

$$\Delta p = \left(\frac{\mu}{K_{perm}} U_i + K_{Loss} \rho |U| U_i / 2 \right) \Delta L \tag{5}$$

式中: K_{perm} —粘性损失系数; U_i —流向速度分量; K_{Loss} —惯性损失系数; $|U|$ —速度幅值; ΔL —多孔介质区域长度。

速度线性项 $\mu U_i / K_{perm}$ 和二次项 $K_{Loss} \rho |U| U_i / 2$ 分别代表了流体在流经单位长度多孔介质区域内的粘性损失和惯性损失。计算中,分别对调风门和滤网进行建模,计算获取不同来流下的压损 - 流速关系曲线,然后经拟合获得系数 K_{perm} 和 K_{Loss} 。

3 多维耦合数值模型精度验证

为验证数值模型的准确性,在两条管道独立运行时,测量了变频风机前化学洗涤塔入口处(对应计算区域的出口处)不同工况下的压力与流量关系。对于每条管道,各选取一条支管,测量不同工况下的流量。测量值与计算值对比如图 5 所示。结果表明,使用数值模型计算所得的复杂管路系统出口处压力 - 流量关系以及支管在不同工况下的流量特性曲线与实际测量值都吻合良好,最大相对误差在 10% 以内。

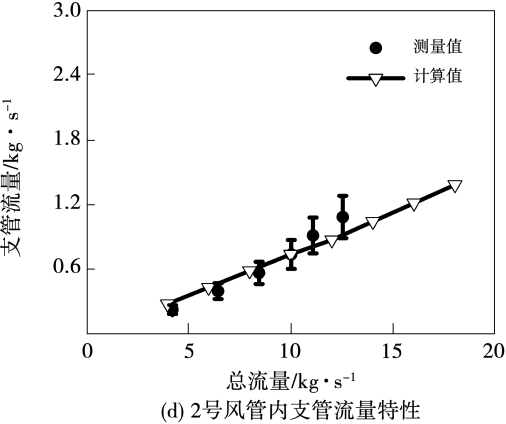
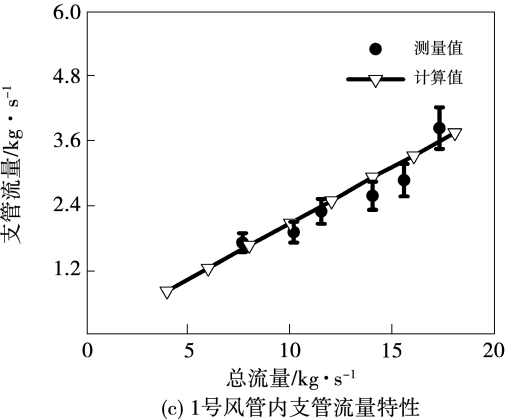
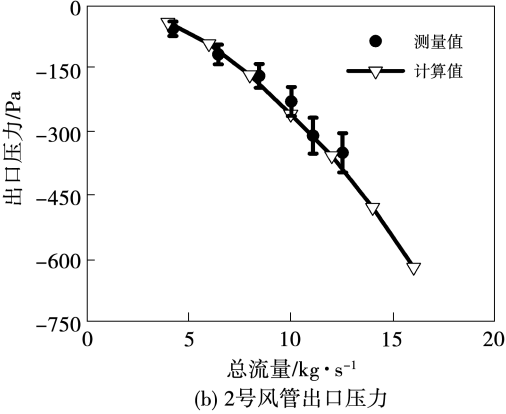
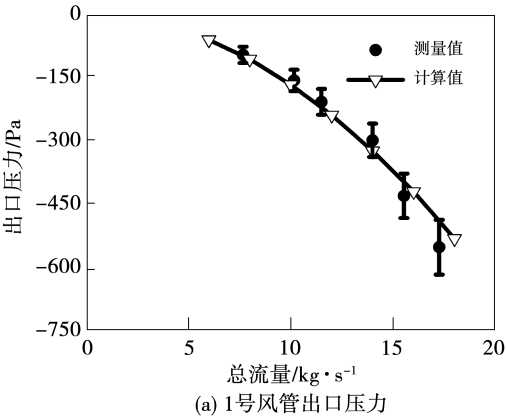


图 5 数值计算结果的现场测量验证

Fig.5 Validation of numerical results by field measurements

4 通风管路系统优化方案验证

根据计算结果,统计了各车间的现有风量,但与各风管的期望值对比后发现差异很大,如表 2 所示。这里的风量期望值按照文献[15-17]确定。从表 2 中可以发现,原有的通风系统在风量分配上存在以下不合理情况:1 号车间的实际风量为 3.6%,远小于期望风量 35.0%±2%;2 号车间的实际风量为 36.8%,远大于期望风量 25.0%±2%;3 号和 6 号车间实际风量为 1.3%和 6.4%,小于期望风量 2.5%±0.5%和 10%±1%;5 号车间的实际风量为 42.6%,远大于期望风量 25.0%±2%;按照原有的分配方案,独立运行时,1 号管道负责 5 号车间的通风,期望风量为总风量的 25.0%,2 号管道负责其余车间的通风,期望风量为总风量的 75.0%,两者间并不均衡。

表 2 优化前后各车间风量分配情况

Tab.2 Ventilation volume in each workshop

before and after optimization

车间	优化前所 在管道	优化前 风量/%	优化后所 在管道	优化后 风量/%	期望风 量/%
1	1 号管	3.6	1 号管	34.9	35.0±2.0
2	1 号管	36.8	2 号管	23.0	25.0±2.0
3	1 号管	1.3	1 号管	4.8	2.5±0.5
4	1 号管	2.0	1 号管	3.2	2.5±0.5
5	2 号管	42.6	2 号管	24.0	25.0±2.0
6	1 号管	6.4	1 号管	10.1	10.0±1.0

图 6 为优化前后各管道中心截面的速度分布云图。从图 6(a)中可以发现,优化前 2 号车间的 4 个吸风口占据了 1 号管道的大部分风量,导致管道末端 1 号车间的实际风量远低于期望风量,而 3,6 号车间所在的另一支管也因此导致风量较低。这表明,不合理的管道布局是导致原风管通流能力严重不达期望的主要原因。优化后各管道中心截面的速度分布如图 6(b)所示。可以发现,与优化前相比,通过调整风管布局,原本风量不足的 1,3,6 号车间的风量均得到了有效提升。在支管管径不变及部分

增大的前提下,3 个车间所在支管的平均流速均从原来的 2.5 m/s 以下提升至 5.0 m/s 以上。

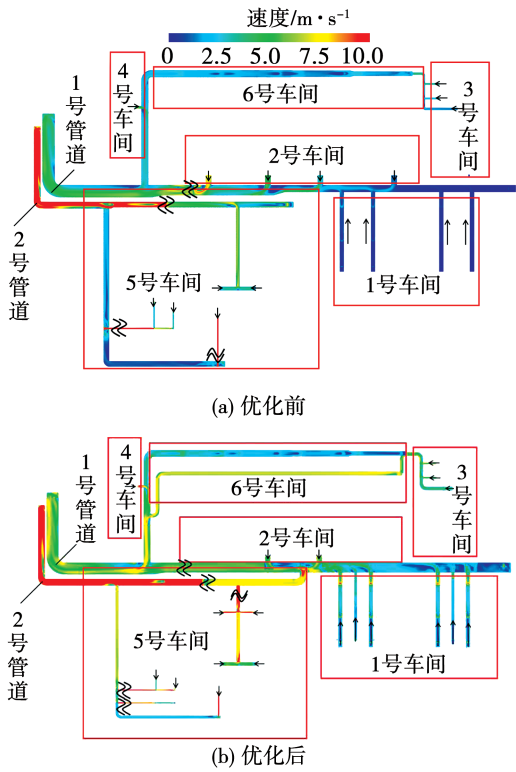


图 6 优化前后管道中心截面速度分布云图

Fig.6 Contour plot of velocity at the central section of pipes before and after optimization

在优化过程中,对每条管道负责的通风区域都进行了相应的调整,以使其风量达到期望值,优化前后风管对比如图 7 所示。在优化方案中,按照期望风量和空间位置,由 2 号管道负责 2,5 号车间的通风,1 号管道负责 1,3,4,6 号车间的通风,具体的优化方案如下:由于 1 号车间的实际风量过小,将其所在的支管管径从 1 000 mm×1 000 mm 增大至 1 500 mm×1 500 mm,并增加 2 根 400 mm×400 mm 的次级支管;2 号车间由 1 号管挪至 2 号管,由于其实际风量大于期望风量,将吸风口数量由 4 个减少至 2 个;3 号车间的实际风量过小,故将其支管的介入位置由 6 号车间后提前至 4 号车间及 6 号车间之前,并将管径从 320 mm×320 mm 增大至 500 mm×500 mm;为平衡组里,5 号车间部分次级支管从 800 mm×800 mm 缩小至 400 mm×400 mm。

按照该优化方案,1,2 号管道的期望风量分别为最大风量的 50.0%。进行优化布局后,重新计算所得的结果如表 2 所示。各车间的实际风量基本都达到了期望风量。其中 1 号车间总风量显著提升,满足了风量需求($35\% \pm 2\%$),3,6 号车间的风量也提升至 4.8% 和 10.1%,达到了电厂的工程需求。

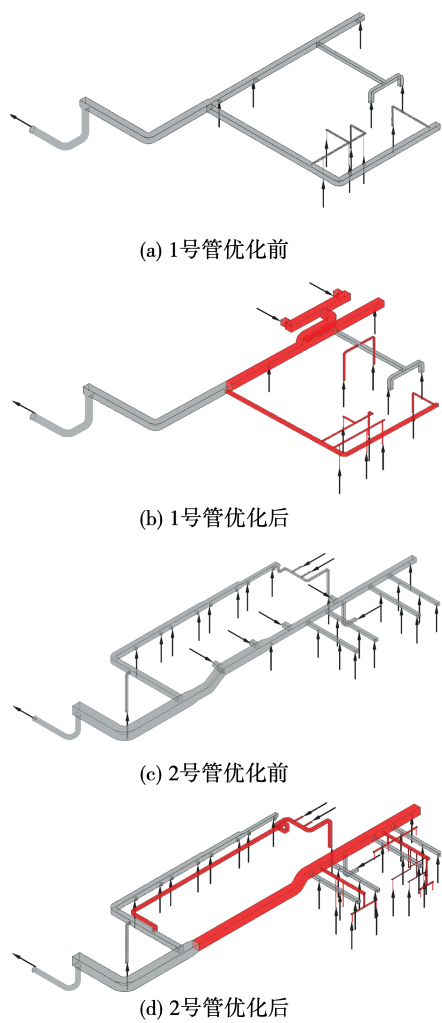


图 7 原始通风管道模型与优化后通风管道模型

Fig.7 The original ventilation piping system and the optimized one

5 结 论

针对某垃圾焚烧电厂复杂风管系统的通流特性进行了系统的数值计算和优化布局。考虑到这一风管系统中安装有非标准件如吸风罩、滤网和调风门等部件,计算采用阻力系数模型和多孔介质模型进

行针对性的处理,建立了适用于该类管道的数值计算模型,将全三维数值模拟与一维理论模型有效结合,构建多维耦合数值模拟方法,以快速准确地获得其内部的流体动力学特性。随后,对现有管路系统开展了全三维数值模拟并得到了现场测量数据的准确性;给出了合理的管路优化方案,并采用多维耦合数值模型进行了进一步的模拟计算验证,结论如下:

- (1) 从计算结果来看,采用新建立的多维耦合数值模型得到的出口压力特性曲线、支管流量分配特性与现场实际测量值的最大相对误差在 10% 以内,表明其能准确地反映管路系统的特性。
- (2) 通过多维耦合数值模拟计算发现,原有风管系统通流能力不足的主要原因是管道布局不合理和管道面积突变,进而导致一半车间内的送风量达不到运行指标。
- (3) 通过多维耦合数值模拟对管路优化方案进行进一步计算发现,优化后的管路流量分配较为合理,所有车间的送风量均满足运行指标。

参考文献:

[1] 李 骞,黄 维. 浅谈不同有机固废厌氧处理项目的技术经济分析[C]//中国硅酸盐学会环境保护分会,2019.

LI Qian,HUANG Wei. Technical and economic analysis of anaerobic treatment projects of different organic solid wastes[C]//Environmental Protection Subcommittee of the Chinese Ceramic Society,2019.

[2] 邹世春,李攻科,张淑娟,等. 广州大田山垃圾填埋场空气中微量挥发有机污染物组成[J]. 环境科学学报,2000(6): 804-806.

ZOU Shi-chun,LI Gong-ke,ZHANG Shu-juan,et al. Composition of volatile organic compounds in Guangzhou Datianshan landfill air [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2000(6):804-806.

[3] 陈江林,吕宏兴,石 喜. T 型三通管水力特性的数值模拟与试验研究[J]. 农业工程学报,2012,28(5):73-77.

CHEN Jiang-lin,LYU Hong-xing,SHI Xi. Numerical simulation and experimental study on hydrodynamic characteristics of T-type pipes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(5):73-77.

[4] 金 兴,邓阳琴,刘 阁,等. 基于 PIV 技术的管道流动特性研究[J]. 应用化工,2020,49(2):430-434,438.

JIN Xing,DENG Yang-qin,LIU Ge,et al. Progress of PIV technology on flow characteristics of pipeline flow field[J]. Applied Chemical Industry,2020,49(2):430-434,438.

[5] RYAN D J,SIMMONS M,BAKER M R. Determination of the flow field inside a sonolator liquid whistle using PIV and CFD[J]. Chemical Engineering Science,2017,163(5):123-136.

[6] 邵 福. 悬挂式采茶机通风管道内部流场分析及其结构优化研究[D]. 南昌:华东交通大学,2019.

SHAO Fu. Flow field analysis and structure optimization of ventilation pipe of suspension tea picker[D]. Nanchang:East China Jiaotong University,2019.

[7] 郭 昂,封海宝,王驰明. 某海监船机舱通风系统的设计和优化方案[J]. 江苏船舶,2014,31(3):19-21.

GUO Ang,FENG Hai-bao,WANG Chi-ming. Design and optimization scheme of marine surveillance ship's ventilation system[J]. Jiangsu Ship,2014,31(3):19-21.

[8] 姚正钢,倪崇本,姚 雯. 结构风管通风分析与优化研究[J]. 造船技术,2016,44(5):82-88,91.

YAO Zheng-gang,NI Chong-ben,YAO Wen. Research on air distribution and optimization of structural air duct[J]. Marine Technology,2016,44(5):82-88,91.

[9] CHANG J D. A study of ventilation performance of an underfloor and overhead air distribution system[C]//The First International Conference on Building Energy and Environment. Dalian,2008.

[10] 赵 月. 基于 CFD 的管道局部阻力的数值模拟[D]. 大庆:东北石油大学,2011.

ZHAO Yue. Numerical simulation on local resistance based on CFD[D]. Daqing:Northeast Petroleum University,2011.

[11] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32 (8): 1598-1605.

[12] 姚雪蕾,袁成清,付宜风,等. 管道内壁粗糙度对沿程阻力影响的 FLUENT 数值模拟分析[J]. 船海工程,2015,44(6):101-106,110.

YAO Xue-lei,YUAN Cheng-qing,FU Yi-feng,et al. Numerical simulation of effect of wall roughness on the on-way resistance based on FLUENT[J]. Ship & Ocean Engineering,2015,44(6):101-106,110.

[13] ZANAZZI G,BAUMGARTNER F,RICE T,et al. Experimental and numerical investigation into the aerodynamics of a novel steam turbine valve and its field application[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2012,136(9):653-664.

[14] 巴海涛,金 玲. 基于 CFD 方法的机舱风管风量分配设计研究[J]. 江苏船舶,2021,38(1):9-11,18.

BA Hai-tao,JIN Ling. Research on air volume distribution design of engine room air duct based on CFD method[J]. Jiangsu Ship, 2021,38(1):9-11,18.

[15] CJJ 184-2012,餐厨垃圾处理技术规范[S].

CJJ 184-2012,Technical code for food waste treatment[S].

[16] GB50019-2015,工业建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].

GB50019-2015,Design code for heating ventilation and air conditioning of industrial buildings[S].

[17] GB14554-1993,恶臭污染物排放标准[S].

GB14554-1993,Emission standards for odor pollutants[S].

(刘 颖 编辑)