

工程应用实例

DOI 10.12030/j.cjee.201805011 中图分类号 X701 文献标识码 A

叶兴联, 李立锋, 章华熔, 等. 低低温电除尘器烟风道流线型设计与分析 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(11): 3274-3280.

YE Xinglian, LI Lifeng, ZHANG Huarong, et al. Design and analysis of streamlined shape flue gas duct for low-low temperature electrostatic precipitator [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(11): 3274-3280.

# 低低温电除尘器烟风道流线型设计与分析

叶兴联<sup>1,2</sup>, 李立锋<sup>1,3,\*</sup>, 章华熔<sup>1</sup>, 赖晖才<sup>1</sup>, 刘栋栋<sup>1</sup>, 郭俊<sup>1,3</sup>, 林翔<sup>1</sup>

1. 福建龙净环保股份有限公司, 龙岩 364000

2. 东北大学冶金学院, 沈阳 110819

3. 国家环境保护电力工业烟尘治理工程技术中心, 龙岩 364000

第一作者: 叶兴联 (1984—), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向: 大气污染防治技术。E-mail: yexinglian1228@163.com

\* 通信作者, E-mail: lilifeng116@163.com

**摘要** 燃煤电厂烟风道用于输送烟气、冷风等介质, 其设计优化不仅影响烟风道的流场分布均匀性、流量分配和系统阻力, 而且会影响相关设备的运行状态。为了解决常规布置烟风道存在的流场均匀性较差、流量偏差大、阻力大等问题, 结合某电厂 1 000 MW 机组配套低低温电除尘器进出口烟道, 采用多尺度的研究方法, 对常规烟风道和流线型烟风道进行设计与分析研究, 对不同布置方式烟风道的流场分布均匀性、流量偏差、烟道阻力进行对比分析, 并通过物理模型实验对 CFD 模拟的结果进行验证。CFD 模拟结果与物模实验结果吻合性良好; 流线型烟风道的布置较常规烟风道更简单, 且流场分布均匀性、流量偏差、阻力都比常规烟风道有较大改善。采用流线型烟风道可起到较明显的节能降耗作用, 为燃煤电厂烟风道优化设计提供参考。

**关键词** 流线型; 烟风道; 多尺度; 阻力; 节能降耗; 流场优化

燃煤电厂是我国一次能源消耗及污染物排放大户, 为适应国家环保及节能的要求, 提高燃煤电厂能源利用水平, 减少污染物排放对我国的节能减排工作意义重大。通过采用大容量机组、优化系统设计、提高电站运行水平等方法, 我国燃煤电厂的节能减排工作取得显著成效。然而, 随着节能减排工作的逐步深入, 节能潜力越来越小, 所以燃煤电厂各个系统与环节的优化节能是我国未来节能减排的突破点<sup>[1-2]</sup>。

燃煤电厂烟风道用于输送烟气、冷风等介质, 设计水平不但影响着烟风道系统的阻力<sup>[3]</sup>, 而且影响着与烟风道相连的各设备的运行状态<sup>[4-5]</sup>, 同时会影响各设备的电耗与效率<sup>[6]</sup>。在常规的工程设计中, 烟风道阻力计算主要依据相关的设计规范和手册<sup>[7-8]</sup>, 但是对于烟风道内的一些异形件, 设计手册中并未给出相应的阻力系数或计算方法, 而异型件阻力占系统阻力的很大部分, 甚至是绝大部分<sup>[9]</sup>, 因此, 对烟风道的优化主要是对烟风道中的异型件的优化。对于这个问题, 国内外学者已经进行了很多研究, 但主要针对其中的部件如弯头<sup>[10-12]</sup>、变径管、分叉管等进行, 并未综合考虑烟风道的布置, 从而对此进行深入研究<sup>[13-14]</sup>。流线型烟风道的设计综合考虑了烟风道的总体布置及各种异型件的优化问题, 是一种有效减阻、节能的方法。因为烟气在烟风道内流动时所受的阻力, 是由内摩擦和涡旋 2 个原因所造成的, 而由涡旋导致的局部阻力是主要的阻力来源。为了有效地减小阻力, 就要设法避免涡旋的形成。所以在进行烟风道设计时, 对烟风道布置进行整体考虑, 尽量减少烟风道的内部构件, 在烟风道转弯处进行圆滑过渡, 减少烟风道内涡旋, 这种烟风道设计方式为流线型设计。

收稿日期: 2018-05-03; 录用日期: 2018-08-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0203703)

本研究以某电厂 1 000 MW 机组配套低低温电除尘器的进出口烟道为例, 采用 CFD 数值模拟和物理模型相结合的方法, 对比不同烟道布置方式的流场及阻力的变化趋势, 为电厂节能降耗提供参考。

## 1 几何模型和数学模型

某电厂 1 000 MW 机组配套低低温电除尘器进口烟气量为  $5\ 813\ 997\ \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 按照 1:1 的比例建立 CFD 几何模型, 模拟范围从空气预热器出口到引风机入口, 主要包括进出口烟道、低温省煤器和电除尘器, 如图 1 所示。

电除尘器系统的流动为三维湍流问题, 需要采用适当的湍流模型, 本研究采用在工程上广泛应用的标准  $k-\epsilon$  模型, SIMPLE 算法; 基本方程为连续性方程、动量方程和能量方程; 同时采用多尺度方法<sup>[15]</sup>对系统进行模拟分析, 由于低温省煤器内部涉及热交换, 故设置有内热源。



图 1 电除尘系统布置图  
Fig. 1 ESP system layout

模型的网格划分是进行 CFD 计算的基础, 基于模型整体考虑, 本模拟采用结构化网格和非结构化网格相结合的方式对整个模型进行网格划分, 如图 2 所示, 经过网格质量检查, 其质量良好。对不同网格数量, 计算系统阻力, 所得结果如图 3 所示, 可见网格数量在大于 400 万个后, 系统阻力变化幅度很小, 网格独立。为了保证低温省煤器的流场合理性, 对低温省煤器网格进行了局部加密, 本研究计算所采用的网格数量约为 950 万个。



图 2 电除尘系统网格划分  
Fig. 2 Mesh of ESP system

## 2 物理模型

为了对 CFD 模拟结果进行验证, 按照 1:12 的比例建立常规烟风道及流线型烟风道物理模型, 如图 4 所示, 模型主要包括进出口烟道、低温省煤器和低低温电除尘器本体, 并在满足几何相似、运动相似和动力相似的条件, 对物理模型烟风道的气流分布、流量分配及阻力进行测试, 用以验证 CFD 模拟结果的准确性。

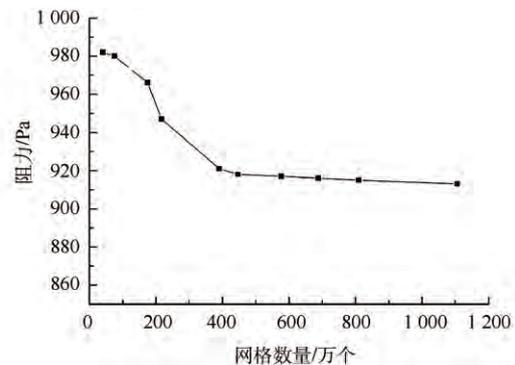


图 3 网格独立性验证  
Fig. 3 Grid independence verification



图4 物理模型系统  
Fig. 4 Physical model system

### 3 结果及分析

#### 3.1 进口烟道流场分布及流量分配

对常规烟风道和流线型烟风道的流场进行了CFD模拟及物模实验。图5为不同布置方式的流线分布,可以看出,优化前的常规烟风道弯头下游存在大范围涡流,会消耗大量能量,使系统阻力变大;通过在烟风道内设置导流板对流场分布进行优化,优化后流场分布有了明显改善,消除了大范围涡流,但烟风道内部分导流板的下游依然存在局部涡流,会产生较大阻力;而流线型烟风道内的流场分布明显优化常规烟风道,同时消除了烟道内的涡流,使气体流动更顺滑。

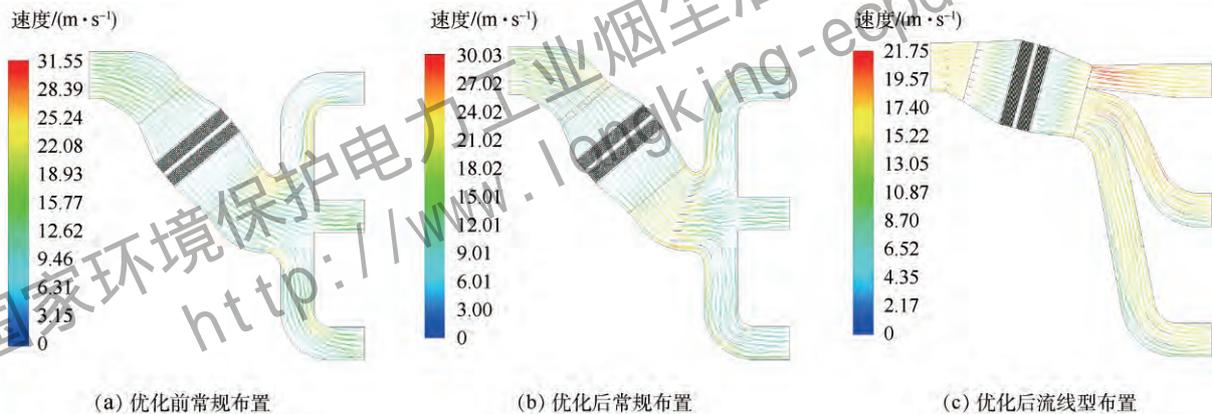


图5 进口烟风道流线图  
Fig. 5 Streamline of inlet duct

表1为不同烟风道布置方式的流量分配对比,可以看出,优化前的常规烟风道和流线型烟风道的流量分配均不能达到相关设计要求,但流线型烟风道的流量分配较常规烟风道有明显改善;优化后CFD模拟和物模实验的流量分配都可以达到相关设计要求,CFD模拟和物模结果有较好的吻合性,且流线型烟风道的流量偏差明显小于常规烟风道。由于流线型烟风道设计时已考虑到烟气的流动状态,并综合考虑了烟风道总体布置和异型件优化,本身就具有良好的均流作用,因此,若达到相同的流场分布效果,流线型烟风道的布置更简单,所需设置的导流板数量更少,有利于保证现场的安装精度,使导流板发挥更好的效果。

表1 流量分配对比  
Table 1 Flow distribution comparison

位置	常规烟风道流量偏差/ %			流线型烟风道流量偏差/ %		
	优化前	优化后		优化前	优化后	
		CFD	物模		CFD	物模
左室	-37.93	+0.82	+1.33	+5.88	-0.20	+0.96
中室	+39.35	-0.50	-0.48	-11.02	-0.12	-0.81
右室	-1.42	-0.32	-0.85	+5.14	+0.32	-0.15

图 6 和图 7 为 2 种布置方式下进口烟风道断面的 CFD 模拟结果, 可以看出, 流线型烟风道断面上高风速区明显减少, 速度分布均匀性有较明显的改善。

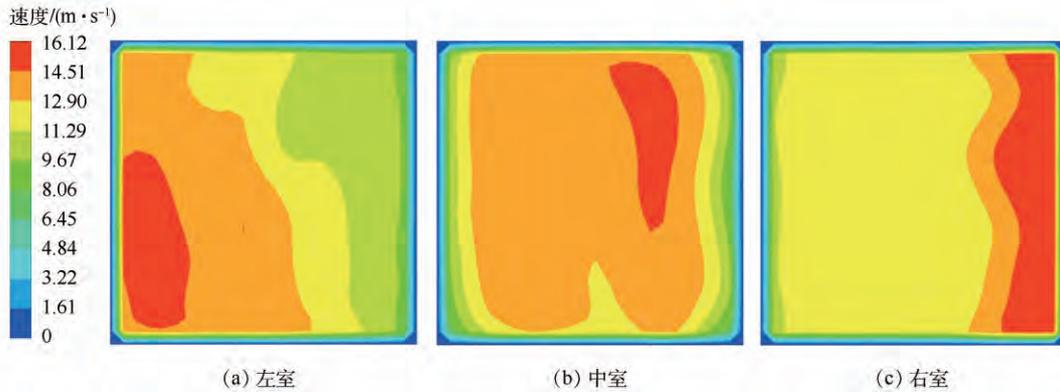


图 6 优化后常规烟风道断面速度分布图  
Fig. 6 Velocity distribution contours in conventional flue gas duct section after optimization

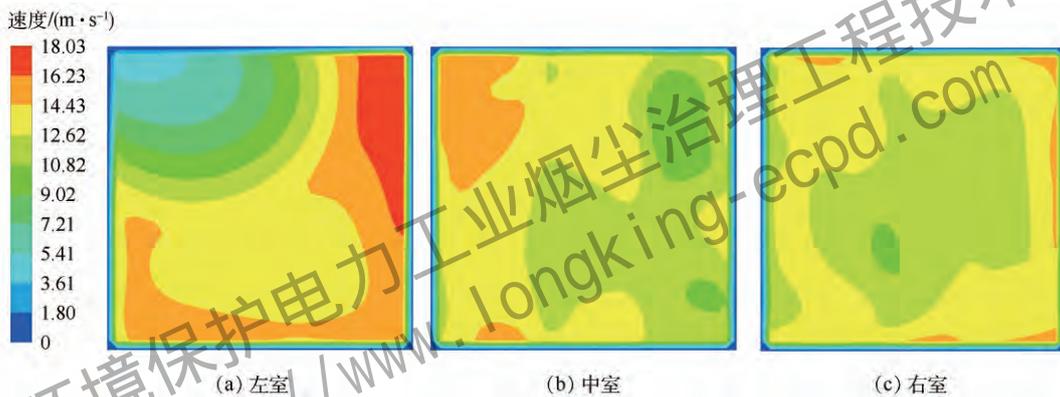


图 7 优化后流线型烟风道断面速度分布图  
Fig. 7 Velocity distribution contours in streamlined shape flue gas duct section after optimization

### 3.2 出口烟风道流场分布

图 8 为 2 种布置方式的出口烟风道流线图, 可以看出, 采用常规烟风道布置, 在急转弯头下游产生大涡流, 会产生较大的能量损失, 主要是因为主流会将能量传递给旋涡, 旋涡将能量消耗在旋转中, 导致产生较大阻力; 而采用流线型布置, 消除了烟道内的大涡流, 也就是消除了大的能量损失, 有利于烟道的降阻。涡流由于会大量消耗主流的能量, 是导致阻力产生的主要因素<sup>[16]</sup>, 消除烟道内的涡流不仅使烟道内气流流动更顺滑, 而且有利于降低烟道的阻力; 同时采用流线型烟风道布置, 其烟道内的局部高风速也明显较常规烟风道低, 这同样有利于降低烟风道的阻力。

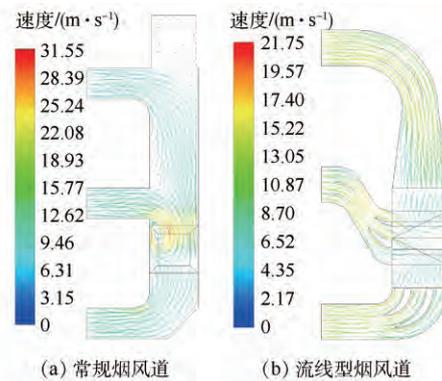


图 8 出口烟风道流线分布图  
Fig. 8 Streamline of outlet duct

### 3.3 系统阻力

沿气流方向压力监测断面如图 9 所示, 压力变化如图 10 所示, 常规烟风道和流线型烟风道阻力对比如表 2 和图 11、图 12 所示。从图 10~图 12 和表 2 可以看出, 2 种布置方式下, 低温省煤器和电除尘器的阻力几乎相同, 说明低温省煤器和电除尘器的阻力受流场分布影响较小, 原因在于低温省

煤器和电除尘器本身具有均流作用，因此，在入口风速相同的情况下，影响低温省煤器和电除尘器阻力的主要因素是设备的结构。从图 10~图 12 和表 2 中可以看出，常规烟风道整体阻力明显高于流线型烟风道，结合章节 3.1 和 3.2 烟风道内的流场分布，可以看到在常规烟风道内存在涡流，而涡流会大量消耗主流的能量，是产生局部阻力的主要因素；涡流除了消耗主流的能量，还减小了烟风道的有效流通面积，相当于增加了烟风道内的风速，使烟风道阻力变大；而流线型烟风道则可有效地消除烟风道内的涡流，相当于增加了烟风道的有效流通面积，降低了烟风道内的风速及能量消耗，可以有效地降低烟风道的阻力。物模测试结果与 CFD 结果吻合性良好，说明 CFD 对模型阻力的预测结果是准确的；CFD 模拟结果显示：流线型进口烟风道比常规烟风道阻力下降 66.2%，出口烟风道下降 47.3%；物模结果显示：流线型进口烟风道阻力比常规烟风道下降 68.9%，出口烟风道下降 55.6%，物模结果与 CFD 模拟结果相吻合，说明流线型烟风道具有明显的降阻、节能降耗作用。

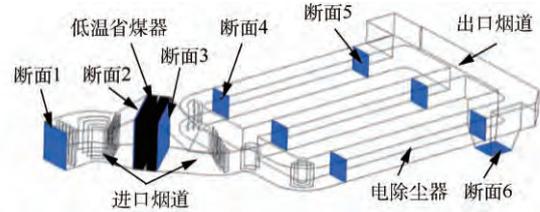


图 9 沿气流方向监测断面  
Fig. 9 Monitoring section along airflow direction

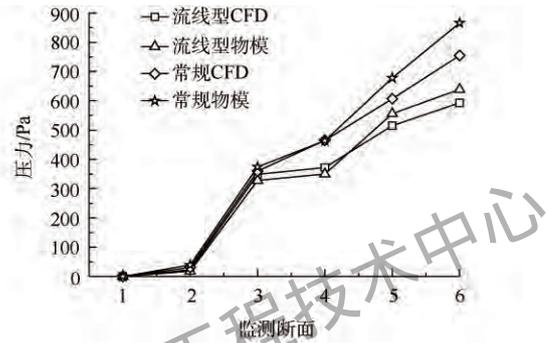


图 10 沿气流方向压力变化曲线 ( $P_{断面1}=0 Pa$ )  
Fig. 10 Curve of pressure variation along airflow direction ( $P_{section 1}=0 Pa$ )

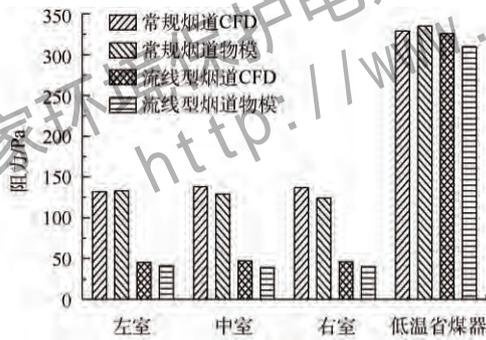


图 11 进口烟道阻力对比  
Fig. 11 Resistance comparison along inlet duct

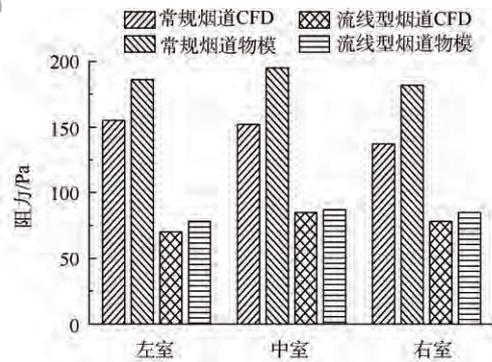


图 12 出口烟道阻力对比  
Fig. 12 Resistance comparison along outlet duct

表 2 不同布置方式阻力对比  
Table 2 Resistance comparison among different layout methods

位置	常规烟风道阻力/ Pa		流线型烟风道阻力/ Pa		
	CFD	物模	CFD	物模	
进口烟风道	左室	132	133	45	41
	中室	138	129	47	39
	右室	137	124	46	40
低温省煤器	329	335	326	310	
出口烟风道	左室	155	186	70	78
	中室	152	195	85	87
	右室	137	182	78	85

## 4 结论

1) 优化前, 2 种布置方式的流量分配均不能达到相关的设计要求。经过优化后, 2 种烟道布置形式的流量分配都能达到设计要求, 流线型烟风道略好于常规烟风道; 而达到同样的流场优化要求, 流线型烟风道设置的导流板数量明显少于常规烟风道。

2) 流线型烟风道的阻力明显低于常规烟风道, CFD 模拟显示: 进口烟道下降 66.2%, 出口烟道下降 47.3%; 物模结果显示, 进口烟道下降 68.9%, 出口烟道下降 55.6%。

3) 从对比结果来看, 无论是流场分布, 还是烟风道阻力, CFD 模拟结果与物模测试结果吻合性良好, 流线型烟风道均优于常规烟风道; 并且流线型烟风道布置更简单, 有利于系统的节能降耗。

## 参考文献

- [1] 刘明, 孟桂祥, 严俊杰, 等. 火电厂除尘器前烟道流场性能诊断与优化 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(11): 1-6.
- [2] 叶兴联. CFD 在电除尘器超低排放设计中的应用 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 743-750.
- [3] 车得福, 庄正宁. 锅炉 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008: 65-66.
- [4] 李战国, 刘志成, 贺军, 等. 旋风分离器的入口烟道布置对性能的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(17): 1-7.
- [5] 唐永恒. 锅炉尾部烟道改造前后结果分析 [J]. 广东电力, 2001, 14(3): 74-76.
- [6] 仇中柱, 潘卫国, 李芄, 等. 数值模拟与模化在电除尘器改造中的应用 [J]. 华东电力, 2010, 38(6): 927-930.
- [7] 林宗虎, 徐通模. 实用锅炉手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1999: 653-683.
- [8] 电力行业规划设计标准化技术委员会. 火力发电厂烟风煤粉管道设计技术规程: DL/T 5121-2000 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [9] 王有锋, 姜武, 张辉, 等. 电厂烟风道异型件阻力系数的数值计算方法 [J]. 电力科学与工程, 2006(3): 47-49.
- [10] MEES P A J, NANDAKUMAR K, MASLIYAH J H. Instability and transitions of flow in a curved square duct: The developed of two pairs of dean vortices [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 314: 227-246. DOI: 10.1017/S0022112096000298.
- [11] SUDO K, SUMIDA M, HIBARA H. Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend [J]. Experiments in Fluids, 1998, 25: 42-49. DOI: 10.1007/s003480050206.
- [12] SUDO K, SUMIDA M, HIBARA H. Experimental investigation on turbulent flow in a square-sectioned 90-degree bend [J]. Experiments in Fluids, 2001, 30: 246-252. DOI: 10.1007/s003480000157.
- [13] 李伟科. 华能海门电厂 1 000 MW 机组电除尘器进、出口烟道的优化设计 [J]. 电力建设, 2009, 30(7): 55-57.
- [14] 陶克轩, 常毅君, 张波, 等. 电厂除尘器入口烟道数值模拟及改造 [J]. 热力发电, 2011, 40(1): 52-54.
- [15] YE X L, SU Y B, GUO B Y, et al. Multi-scale simulation of the gas flow through electrostatic precipitators [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(21/22): 9514-9526. DOI: 10.1016/j.apm.2016.06.023.
- [16] GUO B Y, HOU Q F, YU A B, et al. Numerical modelling of the gas flow through perforated plates [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91: 403-408. DOI: 10.1016/j.cherd.2012.10.004.

(本文责任编辑: 郑晓梅, 金曙光)

## Design and analysis of streamlined shape flue gas duct for low-low temperature electrostatic precipitator

YE Xinglian<sup>1,2</sup>, LI Lifeng<sup>1,3,\*</sup>, ZHANG Huarong<sup>1</sup>, LAI Huicai<sup>1</sup>, LIU Dongdong<sup>1</sup>, GUO Jun<sup>1,3</sup>, LIN Xiang<sup>1</sup>

1. Fujian Longking Co. Ltd., Longyan 364000, China

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China

3. State Environmental Protection Engineering and Technology Center for Power Industrial Dust Control, Longyan 364000, China

\* Corresponding author, E-mail: lilifeng116@163.com

**Abstract** The flue gas duct in a coal-fired power plant is used to convey the flue gas, cold air and other media. Its design optimization not only affects the uniformity of flow field distribution, the flow allocation and the system resistance, but also affects the operation state of the related devices. In order to solve the problem of poor uniformity of flow field, large flow deviation and resistance in the conventional flue gas duct, a multi-scale numerical method, with combination of the inlet and outlet duct of a low-low temperature electrostatic precipitator for 1 000 MW unit in a power plant, was used to design and analyze the conventional flue gas duct and streamlined shape flue gas duct, respectively. A comparative analysis on the uniformity of flow field distribution, flow deviation and resistance in flue gas duct with different layouts was made, and the physical model tests were conducted to verify the CFD simulation results. And a good fitting was observed between the CFD simulation results and the physical model test ones. Compared with the conventional flue gas duct, the streamlined shape duct presents a simpler layout, and an improved flow field distribution uniformity, flow deviation and resistance. This implied that the streamlined shape duct usage could lead to a remarkable energy saving, which will provide a reference for optimization design of flue gas duct in the coal-fired power plants.

**Keywords** streamlined shape; flue gas duct; multi-scale; resistance; energy conservation; flow optimization