

DOI: 10.19666/j.rlfed.202312180

基于复杂流场的烟气流量测量技术 数值模拟研究

马修元^{1,2}, 韦飞¹, 宣添星¹, 王新培¹

(1. 国电环境保护研究院有限公司, 江苏 南京 210031;

2. 国家能源集团科学技术研究院有限公司, 江苏 南京 210023)

[摘要] 烟气流量是影响碳监测精度的关键因素之一, 而分布不均、随机组负荷变化而改变的复杂流场环境是阻碍烟气流量精准计量的主要因素。以某电厂 660 MW 机组烟囱入口烟道为研究对象, 基于烟气流场数值模拟结果对比分析了 4 种不同测量原理的流量计测量精度随测点数量、工艺布置形式等因素的影响变化规律。结果表明: 与矩阵流量计相比, 多点皮托管流量计对复杂流场环境的适应性更好; 在测点数量同为 28 的情况下, 矩阵流量计偏差是多点皮托管流量计的 1.54 倍; 光闪烁流量计测量精度受安装位置标高影响较大, 最大偏差是最小偏差的 23.3 倍, 表明光闪烁流量计对复杂流场环境的适应性较差; 超声波流量计可倾斜安装和多声道安装, 工艺布置形式灵活多变, 对复杂流场的适应性显著提高, 双声道布置时可将偏差控制在±1.5%以内。研究成果为流量计设备选型及工艺设计提供了重要的理论依据和数据支撑, 具有重要的理论研究及工程应用价值。

[关键词] 碳监测; 复杂流场; 流量计; 数值模拟; 工艺布置

[引用本文格式] 马修元, 韦飞, 宣添星, 等. 基于复杂流场的烟气流量测量技术数值模拟研究[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 102-111. MA Xiuyuan, WEI Fei, XUAN Tianxing, et al. Numerical simulation of flue gas flow measurement technology based on complex flow field[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 102-111.

Numerical simulation of flue gas flow measurement technology based on complex flow field

MA Xiuyuan^{1,2}, WEI Fei¹, XUAN Tianxing¹, WANG Xinpei¹

(1. State Power Environmental Protection Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210031, China;

2. China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210023, China)

Abstract: Flue gas flow is one of the key factors affecting the accuracy of carbon monitoring, and the complex flow field environment with uneven velocity distribution and changing with unit load is the main factor impeding the accurate measurement of flue gas flow. By taking a chimney inlet flue of a 660 MW unit in a power plant as the research object, the influence of the number of points and the layout of the process on measurement accuracy of the flowmeter with four different measurement principles was compared and analyzed based on numerical simulation results of the flue gas flow field. The results show that, the multipoint Pitot tube flowmeter has better adaptability to the complex flow field environment compared with the matrix flowmeter. When the number of measuring points is 28, the deviation of the matrix flowmeter is 1.54 times that of the multipoint Pitot tube flowmeter. The measurement accuracy of the light scintillation flowmeter is greatly affected by the elevation of the installation position, with the maximum deviation being 23.3 times the minimum deviation. This indicates that the light scintillation flowmeter has poor adaptability to complex flow field environments. The ultrasonic flowmeter can be installed obliquely and in multiple channels, with a more flexible and varied process layout,

收稿日期: 2023-12-07 网络首发日期: 2024-02-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3701504); 国家能源集团科学技术研究院有限公司科技项目(HB2023Y05)

Supported by: National Key Research and Development Program (2022YFC3701504); Technology Project of China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd. (HB2023Y05)

第一作者简介: 马修元(1984), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为碳排放连续监测技术, mxy4815@163.com。

significantly improving its adaptability to complex flow fields. The dual-channel arrangement can control the deviation within $\pm 1.5\%$. The research results provide important theoretical basis and data support for the selection of flow meter equipment and process design, and have important theoretical research and engineering application value.

Key words: carbon monitoring; complex flow field; flowmeter; numerical simulation; process layout

2021年,中国启动碳排放交易市场,“碳资产”被正式赋予市场价值和流动性^[1-2]。其中,碳排放量的精准计量是实现“碳资产”公平交易的先决条件^[3-5]。目前,固定污染源碳排放量的计量方法主要包括质量平衡法、排放因子法和连续监测法^[6-8]。美国要求容量超过25 MW的火电机组必须采用连续监测法进行碳排放量计量。截至2015年底,美国安装二氧化碳连续监测系统(CO₂-CEMS)的机组数量占总量的95%以上^[9]。欧盟自2013年开始将CO₂-CEMS应用于不同燃料掺烧企业,并制定法律文件认可连续监测法获取的碳排放量数据^[10-11]。中国从2020年开始探索CO₂排放连续监测试点,2022年开始进一步扩大火电行业碳监测试点范围,旨在逐步将碳排放量计量由核算法向监测法过渡^[12]。

影响火电机组碳排放连续监测精度的因素主要包括CO₂浓度、烟气流量、湿度、温度、压力等^[8]。其中,烟气流量是影响碳排放连续监测精度的核心因素^[13]。一方面,目前火电机组烟气流量计多依据《固定污染源烟气(SO₂、NO_x、颗粒物)排放连续监测技术规范》(HJ 75—2017)进行安装、建设、运维等,在烟气流速高于10 m/s时,相对标准偏差要求不超过 $\pm 10\%$,烟气流速不高于10 m/s时,相对标准偏差要求不超过 $\pm 12\%$ 。2022年颁布的《火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范》(DL/T 2376—2021)根据机组近3年碳排放量划分为A、B、C 3类,现役300 MW及以上机组大多属于B类和C类,烟气流量相对标准偏差分别要求不超过 $\pm 8\%$ 和 $\pm 6\%$,高于HJ 75—2017标准。另一方面,我国火电机组已基本全部完成超低排放改造,烟囱入口烟道普遍比较紧凑,安装在烟囱入口烟道的烟气连续监测系统(CEMS)很难满足DL/T 2376—2021要求的“前4后2”或者气流分布相对标准偏差小于0.15的技术指标。现有火电机组烟气流量计大多存在诸如测点位置代表性不足、测点数量少、工艺布置不合理等问题,导致烟气流量计测量精度低,对机组变工况运行及复杂烟道结构诱发的复杂流场环境的适应性差,恶劣工况下会有烟气流量测量精度不满足DL/T 2376—2021要求的风险^[14-15]。目前,

国内外学者对烟气流量精准计量的研究大多集中在仪器设备精度、量值传递、量值溯源等方面。许瑞祥等^[16]依托实验室风洞装置开展了烟气流量计量试验研究,提出了利用S型皮托管测量烟气流量的方法。柳亚贤^[17]针对多点阵列式烟气流量测量及流量标定方法进行了研究,并在实际工程中进行了应用验证。张亮等^[18]采用4种不同积分方法研究了烟气体积流量测量的相对误差,认为等面积法仅适合稳定流场环境的烟气流量测量。黄焰^[19]针对光闪烁法烟气流量测量进行了研究,给出了光闪烁法流量测量的信号及数据处理办法。樊洁云等^[20]针对管径为1 m的小尺寸管道内超声波流量计流量积分误差随烟气流速、声道角度、声道数量、安装角度等因素的变化规律。综上可知,针对大型火电机组复杂流场环境下流量计的工艺布置研究还比较匮乏。因此,有必要针对复杂流场环境下烟气流量精准计量开展相关研究。

本文选取某电厂660 MW机组烟囱入口烟道为研究对象,采用数值模拟手段,对烟道内的流场分布进行了研究分析,并基于数值模拟结果针对多点皮托管流量计、矩阵流量计、光闪烁流量计、单声道超声波流量计、多声道超声波流量计等测量精度随点位数量、工艺布置形式的变化规律进行了详细研究,掌握了不同流量计的最佳点位设置数量、工艺布置形式,获得了不同流量计对复杂流场环境的适应性和测量结果的可靠性。研究成果同样适用于流量计安装于竖直烟道或烟囱的应用场景,为火电机组碳排放连续监测的精准计量及工程设计优化提供了依据与参考。

1 研究方法

1.1 物理模型

以某电厂660 MW火电机组安装CO₂-CEMS系统的烟囱入口烟道为研究对象,其物理模型如图1所示。烟囱入口烟道包含2段竖直烟道和1段水平烟道,竖直烟道在水平烟道入口非对称布置。其中,水平烟道截面尺寸为11.2 m×6.4 m,当量直径为8.15 m。CO₂-CEMS布置在水平烟道,测点所在断面与竖直烟道的水平距离为33 m,大于水平烟道当

量直径的 4 倍；测点下游烟道长度为 9.5 m，小于水平烟道当量直径的 2 倍，测点位置不满足 DL/T 2376—2021 “前 4 后 2” 的烟道长度要求。本文重点研究 CO₂-CEMS 烟气流量计的点位数量、工艺布置形式等对烟气流量测量精度的影响。为反映烟道内烟气的真实流动情况，做如下假设^[21]：1) 烟气为定常、不可压缩流体；2) 烟道入口烟气流速分布均匀一致；3) 不考虑烟道内撑杆、流量计组件、横梁等结构对烟气流场分布的影响。

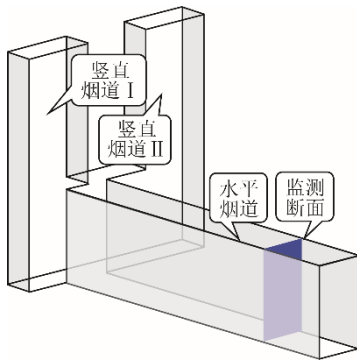


图 1 烟道物理模型

Fig.1 Physical model of flue duct

1.2 数学模型

烟囱入口烟道烟气流动连续性方程、动量方程和能量方程如式(1)所示^[22]。

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}[p u \phi] = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

式中： ρ 为烟气密度，kg/m³； u 为烟气速度，m/s； t 为时间，s； Γ_{ϕ} 为广义扩散系数； ϕ 为通用变量； S_{ϕ} 为广义源项。

烟囱入口烟道烟气流动为湍流流动，本文采用标准 k - ε 湍流模型来模拟。

湍动能方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2)$$

耗散率 ε 方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

式中： G_k 为湍流动能； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为常量； σ_k 和 σ_{ε} 分别为 k 方程和 ε 方程的湍流普朗特数。

1.3 边界条件

烟道入口设为速度入口边界条件，速度数值大小为 15.05 m/s。烟道出口设为压力出口边界条件，压力数值大小为 0 Pa。烟道壁面设为标准无滑移壁面边界条件^[23-25]。

2 结果与讨论

2.1 流场分布特性

烟囱入口烟道内的流场分布特性是影响烟气流量精准计量的主要因素之一。相对均匀一致的烟气流场分布对流量计的设备选型、点位设置数量及位置、工艺布置方案等要求均较低，无论是基于差压测量原理流量计的单点测量、多点测量，或者基于时差测量原理的超声波流量计和光闪烁流量计的单通道测量、多通道测量，均可获得较高的烟气流量测量精度。然而，现役机组 CO₂-CEMS 测点所在烟道上游大多存在变径、弯头、异型管等复杂烟道结构，导致 CO₂-CEMS 测点位置处的流场环境复杂多变，以至于因烟气流量计的测点位置代表性差、点位数量不足、工艺布置设计不合理等导致烟气流量测量精度低，不能满足碳监测对烟气流量测量精度的要求。

本文采用数值模拟手段对烟囱入口烟道内的流场分布进行了计算，为 CO₂-CEMS 烟气流量计的工艺布置设计提供了数据支撑。图 2、图 3 分别给出了烟囱入口烟道内的烟气流线分布和速度分布情况。由图 2 可知，由于两竖直烟道与水平烟道非对称布置，烟气由竖直烟道汇流进入水平烟道后，烟气呈旋流式运动状态，流线发生明显的偏转，导致烟气速度分布显著不均匀，存在明显的高速区和低速区，不利于流量计安装点位的选取以及烟气流量的精准测量。

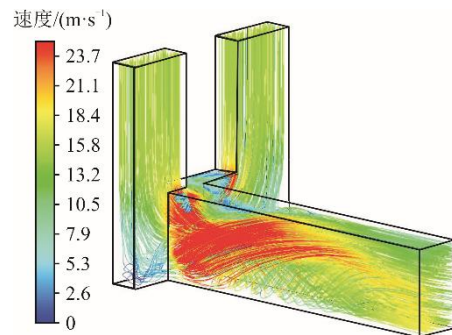


图 2 烟气流线分布

Fig.2 Distribution of the flue gas streamlines

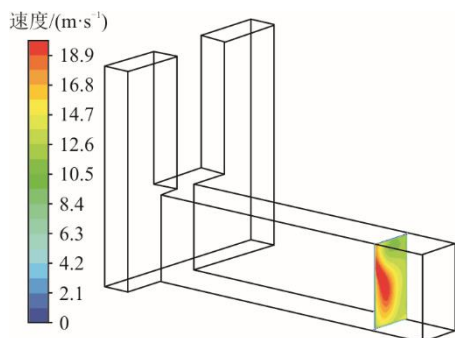


图 3 烟道内烟气速度分布
Fig.3 Distribution of the flue gas velocity in flue duct

由图 3 可知:CO₂-CEMS 测点所在烟道截面的速度分布不均匀,该断面的烟气平均速度为 15.13 m/s,气流分布相对标准偏差为 0.178,大于 DL/T 2376—2021 要求的 0.15;同时,CO₂-CEMS 测点也不满足“前 4 后 2”的烟道长度条件,这大大增加了烟气流量计设备选型、点位设置以及工艺布置的难度。

2.2 流量计对比分析

2.2.1 多点式流量计

由烟囱入口烟道流场分布分析可知,CO₂-CEMS 测点所在烟道截面流场分布严重不均,传统皮托管流量计、热式流量计等单点流量计对点位设置要求较高,代表性点位选取难度大,对机组变负荷运行的适应性差。因此,本文选取多点皮托管流量计、矩阵流量计等作为研究对象,重点分析监测断面位置和点位数量对烟气流量测量精度的影响。多点皮托管流量计和矩阵流量计均为多点测量,但二者的测量原理有所不同。多点皮托管流量计与手工测量原理相似,取多个测点位置的烟气流速进行算术平均;而矩阵流量计则测量整个烟道断面的平均压差,然后根据伯努利方程计算烟气流速。多点皮托管流量计和矩阵流量计的烟气流速计算公式如式(4)和式(5)所示。

$$V = \sum_{i=0}^n V_i / (n+1) \tag{4}$$

$$V = K_v \times K \times \sqrt{2 \times \sum_{i=0}^n \Delta p_i / (n+1) / \rho_s} \tag{5}$$

式中: V 为烟气平均流速, m/s; K_v 为速度场系数; K 为烟气流量测量装置流量系数; Δp_i 为 i 测点压差, Pa; ρ_s 为工况湿烟气密度, kg/m³; V_i 为 i 测点烟气流速, m/s。

图 4 为流量计点位设置示意。CO₂-CEMS 监测断面位置选择是影响流量计测量精度的主要因素之一。本文分别选取距竖直烟道水平距离为 32、

33、34 m 的 3 个烟道截面作为研究对象,考察多点皮托管流量计和矩阵流量计在不同断面安装时的测量精度,结果如图 5 所示。由图 5 可知,当流量计安装在 33 m 烟道断面处时,测量精度最高,前移或后移均因流场分布的变化导致测量精度不同程度的降低。由此可见,CO₂-CEMS 监测断面设置在 33 m 位置处是合理的,在烟道直段长度不能满足“前 4 后 2”的客观条件下,通过模拟计算选取最佳监测断面位置,有利于提升流量计测量精度。

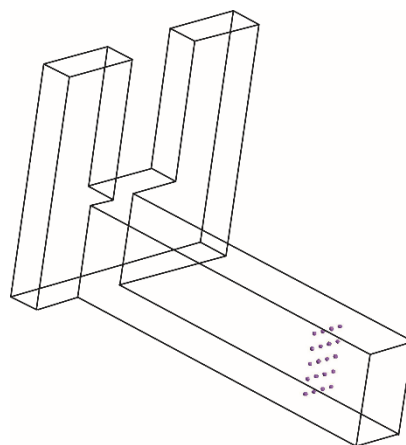


图 4 流量计点位设置示意
Fig.4 Schematic diagram of the flowmeter point setting

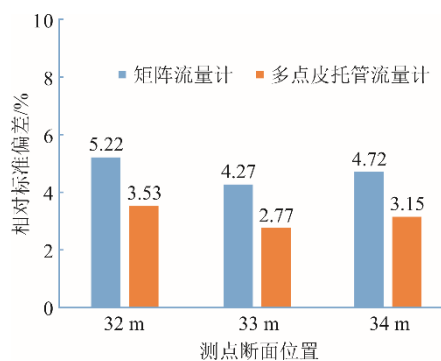


图 5 监测断面位置与速度相对标准偏差的关系
Fig.5 The relationship between the monitoring section position and the relative standard deviation of velocity

在考察点位数量对流量计测量精度影响变化规律时,监测点位均采用等距方式布置。图 6 给出了多点式流量计点位数量与烟气流速测量精度的变化规律曲线。由图 6 可知,随着点位数量的增大,多点式流量计测得的烟气流速与烟道内真实烟气流速的偏差逐渐降低。其中,多点皮托管流量计在点位数量大于 8 的情况下,烟气流速的相对标准偏差已经小于 6%,达到 DL/T 2376—2021 的最高技术标准要求。矩阵流量计在点位数量大于 16 的情

况下,烟气流速的相对标准偏差也降低至 6% 以下,但仍高于 8 点多点皮托管流量计测量的烟气流速相对标准偏差。在点位数量同为 28 的情况下,矩阵流量计烟气流速相对标准偏差为 4.27%,多点皮托管流量计烟气流速相对标准偏差为 2.77%,矩阵流量计烟气流速相对标准偏差是多点皮托管流量计的 1.54 倍。结果表明,多点皮托管流量计比矩阵流量计对复杂流场环境的适应性更好,测量精度更高,点位数量要求更少,设计和工程应用施工难度较小。其原因在于,多点皮托管流量计与矩阵流量计均采用差压原理,二者区别在于多点皮托管流量计首先根据伯努利方程将各测点压力换算成流速,然后根据式(4)获取平均流速,而矩阵流量计则先对测点压力取平均,依据式(5)换算成流速。从数学推导的角度分析,二者不能直接划等号,导致二者测量结果存在偏差,尤其是在流场环境复杂,各测点压力变化较大的情况下,偏差将增大,以至于在测点数量相等的情况下,矩阵流量计测量精度低于多点皮托管流量计。

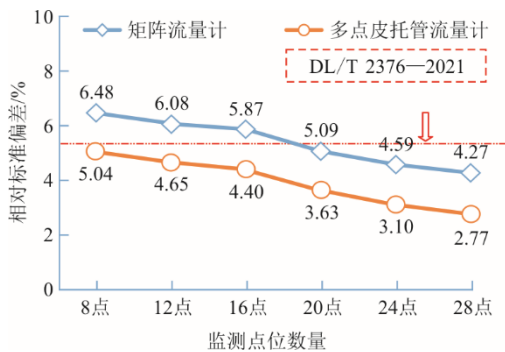


图 6 点位数量与速度相对标准偏差的关系
Fig.6 The relationship between the number of points and the relative standard deviation of velocity

2.2.2 光闪烁流量计

光闪烁流量计基于时差法测量原理,其通过记录烟气内流动标识点经过气流方向上 2 个固定点距离所用的时间计算烟气流速。光闪烁流量计的工艺布置形式为水平布置,测量的是收发探头之间的线平均速度。图 7 给出了 5 种不同烟道标高位置的光闪烁流量计的工艺布置方案。其中, H3 方案布置在水平烟道的中心标高处, H1—H5 的标高间距为 1 m。图 8 给出了光闪烁流量计不同工艺布置方案的烟气流速相对标准偏差。由图 8 可知, H1 方案线平均速度与真实烟气平均速度的相对标准偏差小于 1%,在 5 种工艺布置方案中最小,烟气流量测量精度最高,为最佳方案。在实际工程应用中,可将光闪烁流量计

布置在烟道中心标高上方 2 m 位置处。同时由 5 种方案的结果对比分析可知,安装位置标高对光闪烁流量计的测量精度影响较大,5 种方案最大相对标准偏差为 7.45%,最小相对标准偏差为 0.32%,最大偏差是最小偏差的 23.3 倍。并且 H3 方案和 H4 方案的相对标准偏差超过了 DL/T 2376—2021 要求的 6%,表明光闪烁流量计的工艺布置方案受烟道测点位置标高影响较大,对复杂流场环境的适应性较差,在机组变工况运行流场分布不断发生变化的情况下,烟气流量测量精度会跟随发生变化,存在测量精度不满足 DL/T 2376—2021 要求的风险。因此,单通道光闪烁流量计不适宜在烟道条件不满足“前 4 后 2”的环境使用,建议将光闪烁流量计应用于烟道长度满足“前 4 后 2”或气流分布相对标准偏差小于 0.15 的环境。

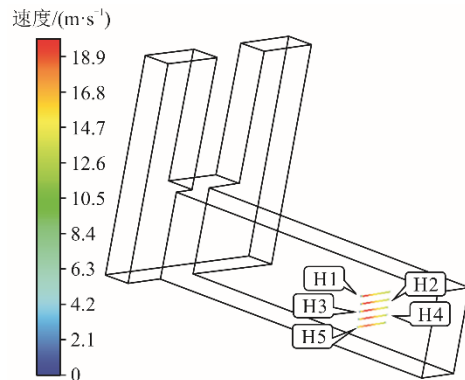


图 7 光闪烁流量计安装方案
Fig.7 Installation scheme of light scintillation flowmeter

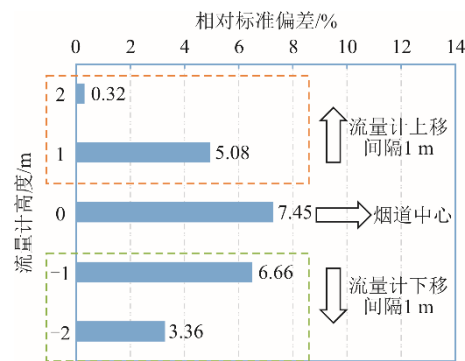


图 8 光闪烁流量计不同工艺布置方案对比
Fig.8 Comparison between and among different process layout schemes for light scintillation flowmeter

2.2.3 超声波流量计

超声波流量计也是时差法测量原理流量计,其是基于超声波脉冲延迟时间差原理进行烟气流速测量。与光闪烁流量计相比,超声波流量计可倾斜安

装和多声道安装，工艺布置形式更灵活多变。图 9 给出了不同形式的超声波流量计水平工艺布置方案，主要包括 5 种烟道标高的左声道工艺布置方案（单声道）、右声道工艺布置方案（单声道）和左右交叉双声道工艺布置方案。不同工艺布置方案在 H1—H5 5 种烟道标高对比如图 10 所示。其中，H3 方案布置在水平烟道的中心标高处，H1—H5 的标高间距为 1 m。由图 10a)、图 10b)可知，单声道布置时左声道工艺布置方案与右声道工艺布置方案测量结果相差较大。左声道工艺布置方案最小偏差位置在烟道中心标高下方 2 m 处，烟气流速相对标准偏差为-0.15%；右声道工艺布置方案最小偏差位置在烟道中心标高上方 2 m 处，烟气流速相对标准偏差为 4.35%。结果表明，在流场分布不均匀的复杂流场环境下，超声波流量计的工艺布置方向及烟道标高对测量结果影响较大，单一声道的测点代表性不足以反映出整个烟道断面的平均流速。

多声道烟气流速计算公式如式(6)所示。

$$V_{ultrasonic} = \sum_{j=0}^m V_j / (m+1) \quad (6)$$

式中： $V_{ultrasonic}$ 为超声波流量计平均流速，m/s； V_j 为j声道烟气平均流速，m/s。

双声道超声波流量计工艺布置方案为左右声道同标高水平交叉布置。与单声道超声波流量计工艺布置方案相比，双声道超声波流量计测量偏差大于左声道工艺布置方案，小于右声道工艺布置方案（图 10c)）。双声道工艺布置方案弥补了单声道工艺布置方案烟气流速水平分布不均导致测量不准的缺陷，测点可以具有更好的代表性，提高了流量计对复杂流场环境的适应性，但测点标高依然是影响双声道工艺布置方案测量精度的主要因素。

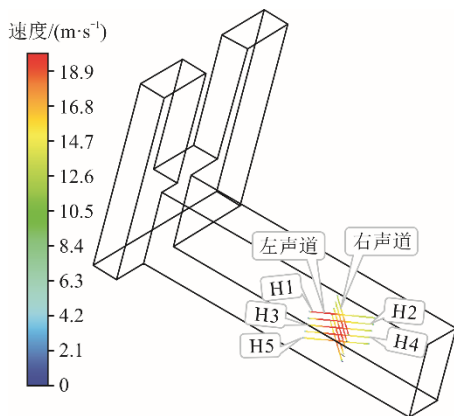
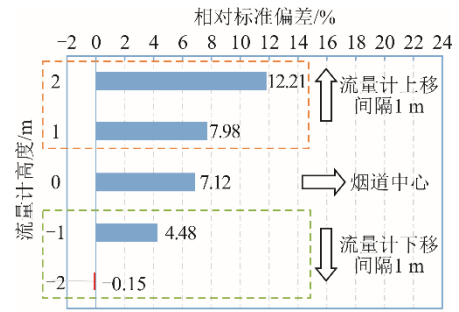
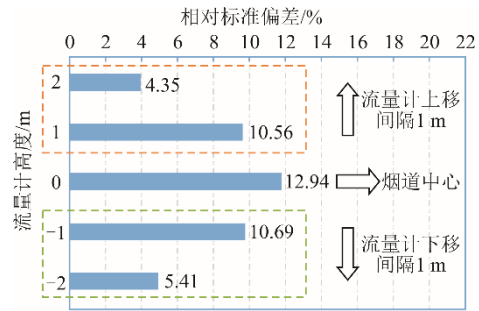


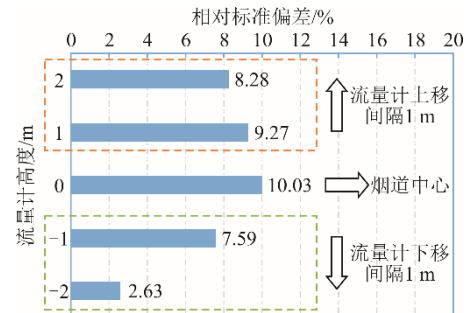
图 9 超声波流量计工艺布置方案
Fig.9 Process layout scheme of ultrasonic flowmeter



a) 左声道工艺布置方案



b) 右声道工艺布置方案



c) 双声道工艺布置方案

图 10 超声流量计不同工艺布置方案对比
Fig.10 Comparison between and among different process layout schemes for ultrasonic flowmeter

为进一步考察超声波流量计工艺布置形式对烟气流量测量精度的影响，弥补安装位置标高影响烟气流量测量精度的不足，本文设计 5 种超声波流量计倾斜安装工艺布置方案，具体工艺布置方案见表 1 和图 11。

表 1 倾斜安装工艺布置方案
Tab.1 Layout scheme of inclined installation process

序号	方案	工艺布置方案	声道数
1	方案 1	左上右下	1
2	方案 2	左下右上	1
3	方案 3	左上右+左下右上	2
4	方案 4	水平左声道 H3+左下右上	2
5	方案 5	左上右下+水平右声道 H3	2

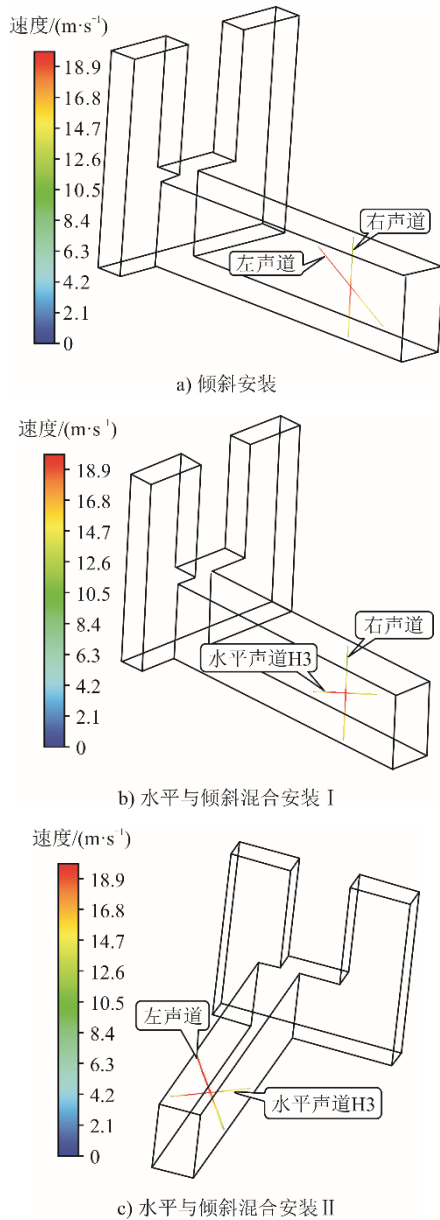


图 11 超声波流量计倾斜安装工艺布置方案
Fig.11 Layout schemes for inclined installation process of ultrasonic flowmeter

图 12 给出了超声波流量计不同倾斜工艺布置方案的烟气流量测量偏差。由图 12 可知, 5 种倾斜工艺布置方案的测量偏差差距较大。方案 2 的偏差最小, 为 -1.27% , 成功将偏差控制在 $\pm 1.5\%$ 以内; 方案 1 的偏差最大, 为 13.4% , 是方案 2 的 10.6 倍, 小于光闪烁流量计 23.3 倍的偏差值。综合对比分析图 10、图 12 可知, 在所有超声波流量计工艺布置方案里, 左上右下的单声道倾斜工艺布置方案偏差最大, 表明倾斜工艺布置方案代表的烟气流速区域更多, 不同工艺布置方案间的结果差异更大, 代表性测点选取更复杂。主要原因包括: 1) 超声波流量计倾斜安装既可以穿过烟气上下不同流速层, 同

时可以穿过烟气左右不同流速层; 2) 超声波流量计收发探头不在同一竖直截面, 探头安装位置点选取更复杂, 收发探头的标高、前后距离、上下距离、声道数量、倾斜角度、收发探头斜线距离等均会对测量结果产生较大影响。此外, 由于超声波流量计倾斜工艺布置方案可以穿插更多的流速层, 流场代表性更好, 因而该工艺布置方案对复杂流场的适应性显著提高, 大大降低现场安装位置与设计不一致带来的偏差, 尤其适用于变径、弯头等烟道异型件下游容易产生烟气流速上下分层、左右分层的复杂流场环境的烟气流量精准测量。

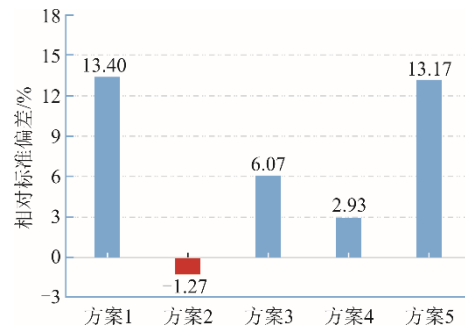


图 12 倾斜安装工艺布置方案对比
Fig.12 Comparison between and among the layout schemes for inclined installation process

2.2.4 流量计综合对比分析

图 13 给出了多点皮托管流量计、矩阵流量计、光闪烁流量计、单声道超声波流量计、双声道超声波流量计等不同流量计最优工艺布置方案结果的综合对比分析。

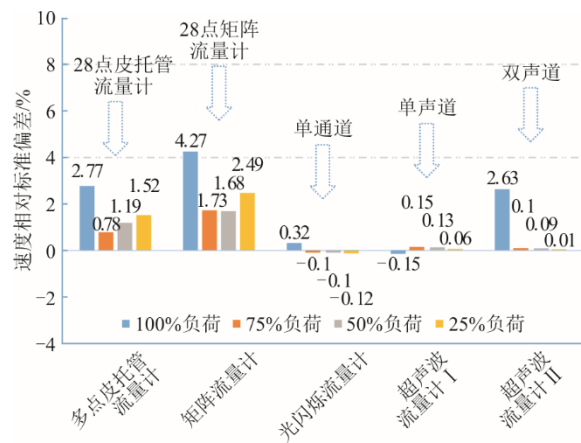


图 13 流量计综合对比分析
Fig.13 Comprehensive comparative analysis of flowmeters

由图 13 可知, 多点式流量计的测量精度低于光闪烁流量计和超声波流量计。一方面, 这主要是由于多点式流量计采用的是有限数量点位置处的

速度或压力代表整个烟道截面的测量结果,点的数量及位置对测量结果影响较大,非均匀布点可以提升测量精度,但选点难度和工程应用施工难度增大;另一方面,多点皮托管流量计与矩阵流量计均采用差压原理测流速,不适用于流速低于 5 m/s 的低负荷工况。光闪烁流量计与超声波流量计测量的是线平均流速,测点覆盖面更广、代表性更好。但光闪烁流量计与超声波流量计受安装位置标高、通道数量、工艺布置形式等因素影响较大,工艺布置方案设计难度大。2 种线平均流量计均可用于流速大于 0.1 m/s 的低负荷工况和高负荷工况,适用范围更广。

同时由图 13 可以看出,随着机组负荷降低,不同类型流量计的测量精度均得到提升。这主要是因为,机组负荷降低,流场分布变化趋缓,无论是压力平均还是速度平均,亦或是多点平均和线平均,都会因流场变化的平缓而减小烟气扰动导致的烟气流量测量数据偏差,从而提高流量计测量精度。其中,多点皮托管流量计与矩阵流量计在 25% 负荷时测量精度较 75% 负荷和 50% 负荷有所降低,这也证明了多点皮托管流量计与矩阵流量计对低负荷适用性较差,线平均流量计更适用于深度调峰机组,较精准地测量低负荷工况下的烟气流量。

在实际工程应用中,为了解决因复杂流场而导致流量计测量结果偏差大的问题,通常会赋予流量计一个合理的速度场系数,以提高流量测量的精度。图 14 给出了不同类型流量计的速度场系数。

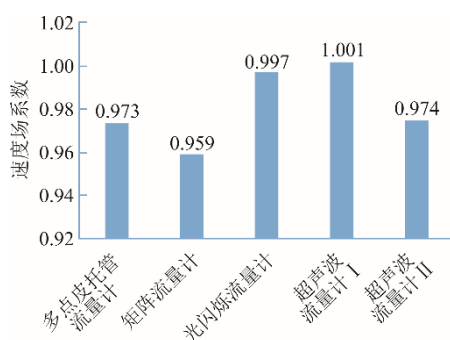


图 14 流量计速度场系数

Fig.14 The velocity field coefficients of flow meters

由图 14 可以看出:线平均流量计的速度场系数更接近于 1,表明线平均流量计测量结果更趋于真实值,相对于点测量线测量穿过的速度层更多,代表性更强,在工艺布置方面更简单;而点测量则需要通过提高测点数量或精准找寻代表性点位来

提高测量精度和可靠性。

3 结 论

本文采用数值模拟手段对某电厂 660 MW 机组烟囱入口烟道进行了数值模拟,并基于数值模拟结果对比分析了多点皮托管流量计、矩阵流量计、光闪烁流量计、单声道超声波流量计、多声道超声波流量计等不同类型流量计测量精度随点位数量、工艺布置形式等因素的影响变化规律。结论如下:

1) 矩阵流量计是基于多点压力平均测烟气流速;多点皮托管流量计是多点流速算术平均,与手工测量一致,对复杂流场环境的适应性更好,测量精度更高。在测点数量同为 28 的情况下,矩阵流量计烟气流速相对标准偏差是多点皮托管流量计的 1.54 倍。

2) 光闪烁流量计测量精度受安装位置标高影响较大,5 种工艺布置方案的最大相对标准偏差是最小偏差的 23.3 倍。因此,单通道光闪烁流量计不适宜在烟道条件不满足“前 4 后 2”或气流分布相对标准偏差大于 0.15 的环境使用。

3) 与光闪烁流量计相比,超声波流量计可倾斜安装和多声道安装,工艺布置形式更灵活多变,对复杂流场的适应性显著提高,大大降低现场安装位置与设计不一致带来的偏差,尤其适用于变径、弯头等烟道异型件下游容易产生烟气流速上下分层、左右分层的复杂流场环境的烟气流量精准测量。超声波流量计双声道布置可将偏差控制在 $\pm 1.5\%$ 以内,若继续增加声道数量,将大幅提升测量精度,是未来发展趋势之一。

[参 考 文 献]

- [1] 胡珺,方祺,龙文滨.碳排放规制、企业减排激励与全要素生产率—基于中国碳排放权交易机制的自然实验[J].经济研究,2023,58(4):77-94.
HU Jun, FANG Qi, LONG Wenbin. Carbon emission regulation, corporate emission reduction incentive and total factor productivity: a natural experiment based on China's carbon emission trading system[J]. Economic Research Journal, 2023, 58(4): 77-94.
- [2] 郭卫香,孙慧.碳排放权交易、损益偏离与绿色经济效率关系研究[J].生态经济,2022,38(1):13-20.
GUO Weixiang, SUN Hui. Research on the relationship between carbon emission trading, profit and loss deviation and green economy efficiency[J]. Ecological Economy, 2022, 38(1): 13-20.
- [3] 朱振兴.燃煤电厂碳排放的核算方法对比分析[J].中国资源综合利用,2023,41(4):165-167.
ZHU Zhenxing. Comparative analysis of accounting

- methods for carbon emissions from coal-fired power plants[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2023, 41(4): 165-167.
- [4] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-16[2023-07-12]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223452>.
LIU Yuliang, LI Yaowang, ZHOU Chunlei, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*: 1-16[2023-07-12].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223452>.
- [5] 张宁, 李姚旺, 黄俊辉, 等. 电力系统全环节碳计量方法与碳表系统[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(9): 2-12.
ZHANG Ning, LI Yaowang, HUANG Junhui, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(9): 2-12.
- [6] 陈公达, 邹祥波, 卢锐, 等. 中外火电企业碳排放统计方法与质量控制现状分析[J]. *热力发电*, 2022, 51(10): 54-60.
CHEN Gongda, ZOU Xiangbo, LU Rui, et al. Domestic and international statistical methods and quality control status for carbon emission from fossil-fired power plants[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(10): 54-60.
- [7] 陈剑, 马大卫, 王正风, 等. 煤电机组 CO₂ 排放原位在线监测系统研发与应用[J]. *电力科技与环保*, 2022, 38(5): 423-431.
CHEN Jian, MA Dawei, WANG Zhengfeng, et al. Development and application of on-line CO₂ emission monitoring system in coal-fired power plant[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2022, 38(5): 423-431.
- [8] 郭振, 王小龙, 任健, 等. 二氧化碳排放连续在线监测过程的模拟与不确定度评定[J]. *计量学报*, 2022, 43(1): 120-126.
GUO Zhen, WANG Xiaolong, REN Jian, et al. Simulation and uncertainty evaluation of continuous on-line monitoring process of carbon dioxide emission[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2022, 43(1): 120-126.
- [9] 吴昊, 任鑫, 朱俊杰. 发电行业二氧化碳排放监测技术现状与综述[J]. *热力发电*, 2023, 52(7): 1-13.
WU Hao, REN Xin, ZHU Junjie. Current situation and review of carbon dioxide emission monitoring technology in power generation industry[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(7): 1-13.
- [10] 王萍萍, 赵永椿, 张军营, 等. 双碳目标下燃煤电厂碳计量方法研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(10): 170-183.
WANG Pingping, ZHAO Yongchun, ZHANG Junying, et al. Research progress on carbon measurement methods of coal-fired power plants under the background of carbon neutrality[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(10): 170-183.
- [11] 王霖晗, 朱林, 张晶杰, 等. 欧盟火电厂二氧化碳排放在线监测系统质量保证体系对中国的启示[J]. *中国电力*, 2020, 53(3): 154-158.
WANG Muhan, ZHU Lin, ZHANG Jingjie, et al. Practice of quality assurance system of carbon dioxide emission on-line monitoring system in the European union[J]. *Electric Power*, 2020, 53(3): 154-158.
- [12] 姚顺春, 支嘉琦, 付金杯, 等. 火电企业碳排放在线监测技术研究进展[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(6): 97-108.
YAO Shunchun, ZHI Jiaqi, FU Jinbei, et al. Research progress of online carbon emission monitoring technology for thermal power enterprises[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 51(6): 97-108.
- [13] 李海洋, 葛志松, 宋进. 固定污染源温室气体排放量直接监测方法综述[J]. *中国测试*, 2022, 48(10): 181-188.
LI Haiyang, GE Zhisong, SONG Jin. Review on the direct monitoring method of greenhouse gas emissions from stationary pollution sources[J]. *China Measurement & Test*, 2022, 48(10): 181-188.
- [14] 董鸿霖, 朱小良. 基于自模化理论的烟气流速测点布置方式研究[J]. *发电设备*, 2021, 35(5): 319-324.
DONG Honglin, ZHU Xiaoliang. Study on arrangement of flue gas velocity measuring points based on self-modeling theory[J]. *Power Equipment*, 2021, 35(5): 319-324.
- [15] 李海洋, 张亮, 刘幸, 等. 固定排放源烟气流速在线监测技术[J]. *上海计量测试*, 2018, 45(5): 6-11.
LI Haiyang, ZHANG Liang, LIU Xing, et al. Research on on-line monitoring technology of flue gas flow in fixed emission source[J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2018, 45(5): 6-11.
- [16] 许瑞祥, 翟恒涛, 王煦, 等. 基于 S 型皮托管的烟气流量计量方法研究[J]. *计量科学与技术*, 2023, 67(1): 39-44.
XU Ruixiang, ZHAI Hengtao, WANG Xu, et al. Study on flue gas flow measurement method based on S-type pitot tube[J]. *Metrology Science and Technology*, 2023, 67(1): 39-44.
- [17] 柳亚贤. 多点阵列式烟气流量测量及流量标定方法的应用[J]. *化工管理*, 2022(26): 22-25.
LIU Yaxian. Application of multi-point array flue gas flow measurement and flow calibration method[J]. *Chemical Engineering Management*, 2022(26): 22-25.
- [18] 郭虎林, 张亮. 基于 CFD 的矩形烟道速度面积法中不同积分方法的对比[J]. *中国测试*, 2023, 49(6): 22-29.
GUO Hulin, ZHANG Liang. Comparison of different integral methods in area velocity method for rectangular stack based on CFD[J]. *China Measurement & Test*, 2023, 49(6): 22-29.
- [19] 黄焰. 光闪烁法在火电厂烟气测量中的应用[J]. *工业控制计算机*, 2020, 33(1): 31-34.
HUANG Yan. Boiler exhaust gas measurement by optical scintillation[J]. *Industrial Control Computer*, 2020, 33(1): 31-34.
- [20] 樊洁云, 张亮, 方立德, 等. 烟气超声流量计时间测量准确度校准方法研究[J]. *中国测试*, 2020, 46(2): 28-33.
FAN Jieyun, ZHANG Liang, FANG Lide, et al. Study on calibration method of time measurement accuracy of flue gas ultrasonic flowmeter[J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(2): 28-33.
- [21] 莫逊, 朱冬生, 叶周, 等. 电厂燃煤锅炉局部烟道导流装置设计优化[J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(5): 180-188.
MO Xun, ZHU Dongsheng, YE Zhou, et al. Design and optimization of local flue guide plate of coal-fired boiler in power plant[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(5): 180-188.
- [22] 马鹏飞, 张选, 贾瑞龙, 等. 电厂烟道烟气流动计算仿

- 真及流量均衡研究[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(3): 83-86.
- MA Pengfei, ZHANG Xuan, JIA Ruilong, et al. The research of numerical simulation and flowrate balance of flue gas flow in flue ducts of power plant[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, 47(3): 83-86.
- [23] 王珍, 曹文广, 彭维明. 电除尘器上下游烟道流场分析及优化设计[J]. 环境工程学报, 2016, 10(12): 7183-7187.
- WANG Zhen, CAO Wenguang, PENG Weiming. Numerical simulation and optimizing design of gas-flow distribution of electrostatic precipitator[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(12): 7183-7187.
- [24] 蒋华, 蒲万里, 陈欣. 燃煤电站锅炉尾部烟道阻力特性数值模拟和优化研究[J]. 锅炉技术, 2021, 52(4): 16-19.
- JIANG Hua, PU Wanli, CHEN Xin. Numerical simulation and optimization on resistance characteristics of boiler flue gas ducts in coal fired power plant[J]. Boiler Technology, 2021, 52(4): 16-19.
- [25] 张媛媛, 曲江源, 张锴. 燃煤机组 SCR 烟气脱硝系统流场均布一体化建模与性能优化[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 146-155.
- ZHANG Yuanyuan, QU Jiangyuan, ZHANG Kai. Integrated modeling and performance optimization of flow field homogenization in SCR denitrification system of coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 146-155.

(责任编辑 刘永强)