

电站锅炉温室气体排放量的计算

刘焕章, 常太华, 刘吉臻, 刘向杰

(华北电力大学自动化系, 北京 102206)

摘 要: 随着对能源需求的增长, 电力作为重要的二次能源, 不可或缺, 但生产过程中产生了大量的废弃排放物, 特别是燃煤电站。依靠烟气分析和燃料特性系数的研究, 通过对燃烧机理分析和基于统计规律的建模, 得出燃煤电站锅炉温室气体二氧化碳排放量的预测量, 并采用取自盘山电厂的实时历史数据对构造的预测方法进行了仿真研究, 结果表明了该方法的可行性。

关 键 词: 电站锅炉; 温室气体; 烟气分析; 燃料特性系数

中图分类号: TK224 文献标识码: A

引 言

我国的温室气体二氧化碳排放量现居世界第二位, 其中燃煤电厂 CO₂ 排放约占我国能源使用 CO₂ 排放总量的 1/4。随着经济的快速发展, 二氧化碳的排放量必然还将增长。因此, 电力行业污染控制是我国减轻大气污染, 加强污染防治的重要方面。

现阶段, 我国的电站锅炉运行过程中, 实现对二氧化硫、氮氧化物等酸雨气体, 以及衡量燃烧效率的一氧化碳和粉尘监测的不在少数, 但对二氧化碳监测或者预测的则很少。

本文以烟气分析为主变量, 并借助燃料特性系数的研究, 构造一种电站锅炉的二氧化碳排放量的预测方法。

1 原理说明

根据燃烧方程, 得到的燃料特性系数与烟气成分之间的关系^[1~3]:

$$21 = RO_2 + O_2 + 0.605CO + \beta(RO_2 + CO) \quad (1)$$

其中: RO₂—烟气中的三原子的体积分数, 主要包括二氧化碳和二氧化硫; O₂—烟气中的氧气的体积分

数; CO—烟气中的一氧化碳的体积分数; β —燃料的特性系数, 它可以用下式表示:

$$\beta = 2.35 \frac{H_{ar} - O_{qr} / 8 + 0.038N_{ar}}{C_{ar} + 0.375S_{ar}} \quad (2)$$

其中: C_{ar}、H_{ar}、O_{ar}、N_{ar}和 S_{ar}分别为燃料的收到基碳含量、氢含量、氧含量、氮含量和硫含量。

由式(1)得到温室气体二氧化碳的体积分数为:

$$CO_2 = \frac{21 - [O_2 + (0.605 + \beta)CO]}{1 + \beta} - SO_2 \quad (3)$$

这样在已知烟气中氧气、一氧化碳和二氧化硫的条件下, 仅需得到 C_{ar}、H_{ar}、O_{ar}、N_{ar}和 S_{ar}就可得到烟气中的二氧化碳的体积分数。

下面构造一个方程组^[3~4], 求取所需要的 C_{ar}、H_{ar}、O_{ar}、N_{ar}和 S_{ar}:

$$\frac{V_y}{M} \times \frac{21 - [O_2 + (0.605 + \beta)CO]}{1 + \beta} = 0.01866C_{ar} + 0.007S_{ar} \quad (4)$$

$$\frac{V_y}{M} \cdot N_2 = 0.008N_{ar} + 0.79\alpha V_k \quad (5)$$

$$\frac{V_y}{M} \cdot O_2 = 0.21(\alpha - 1)V_k \quad (6)$$

其中: M—燃烧的燃料量; V_k—燃烧所需的空气量, 其计算为:

$$\frac{V_k}{M} = \alpha [0.0889(C_{ar} + 0.375S_{ar}) + 0.265H_{ar} - 0.0333O_{ar}] \quad (7)$$

其中: V_y—燃烧产生的烟气体积, 其计算为:

$$\frac{V_y}{M} = 0.01866(C_{ar} + 0.375S_{ar}) + 0.008N_{ar} + 0.111H_{ar} - 0.0333O_{ar} + (1.0161\alpha - 0.21) \frac{V_k}{\alpha M} \quad (8)$$

其中: α —燃烧的空气过量系数, 其利用烟气分析数据的计算方法^[5]:

$$\alpha = \frac{(O_2 - 0.5CO)(V_y/M) - 0.01866C_{ar}}{[21 - 1.0161(O_2 - 0.5CO)](V_k/M)} \quad (9)$$

通过式(7)~式(9)对式(4)~(6)的相关参数的说明,得到了关于 C_{ar} 、 H_{ar} 、 O_{ar} 、 N_{ar} 和 S_{ar} 的3个方程,求得这5个量,还需要两个方程,首先根据收到基分析,得到下式:

$$C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + S_{ar} + N_{ar} + M_{ar} + A_{ar} = 100 \quad (10)$$

其中: A_{ar} —燃料的收到基灰分,可以通过烟气分析中的灰尘含量和总燃料量 M 得到; M_{ar} —燃料的收到基水分,可以通过对磨煤机的状态分析得到^[6]。

通过燃料的相关分析说明以及对收集到的170个相关燃料元素分析数据的分析^[7],得到煤的干燥无灰基氧含量和干燥无灰基碳含量之间具有非常强的相关性(相关性系数为-0.9827),得到它们之间的关系如图1所示。采用曲线拟合,得到其数学表达式为:

$$O_{daf} = -0.95042C_{daf} + 89.122 \quad (11)$$

平均方差为: $\sigma = 2.9921$ 。

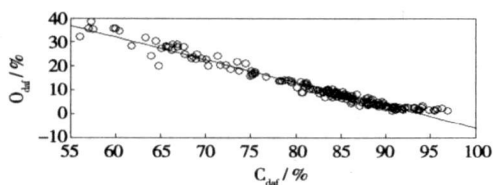


图1 煤的干燥无灰基碳含量和氧含量关系

通过图1以及数学计算的均方差可以看出,干燥无灰基元素的精度关系式(11)有足够的精度。通过燃料的干燥无灰基与收到基之间的转换系数 k 可以得到:

$$kO_{ar} = -0.95042kC_{ar} + 89.122 \quad (12)$$

其中:转换系数 $k = 100 / (100 - M_{ar} - A_{ar})$ 。

这样,就得到了式(4)~式(6)、式(10)以及式(12)5个关于 C_{ar} 、 H_{ar} 、 O_{ar} 、 N_{ar} 和 S_{ar} 的方程,联立求解可得到它们的值。将这些值代入式(2)得到燃料特性系数 β ,将 β 代入式(3)并结合烟气分析的数据,即可得到温室气体二氧化碳的体积分数,然后根据下式计算烟气体积:

$$V_{CO_2} = V_y \cdot CO_2 \quad (13)$$

2 eDNA 数据验证

图2~图7是从盘山电厂3号机组的历史实时数据库中取出的一个月的运行数据,分别为烟气中的

二氧化硫含量曲线、烟气中的一氧化碳含量曲线、烟气中的氧气含量曲线、烟气中的氮气含量曲线、烟气中的灰尘含量曲线和总燃料量曲线(装机容量为600MW)。制粉系统采用北京电力设备总厂生产的ZGM-123中速辊式磨煤机,采用直吹式进粉方式;送风机采用上海鼓风机厂生产的FAF26.6-12.6-1动叶调节轴流式鼓风机,引风机采用HOWDEN生产的ANN-3600/2000B动叶调节轴流式引风机)。

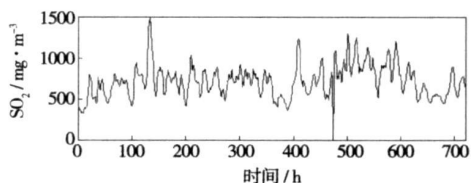


图2 烟气二氧化硫含量曲线

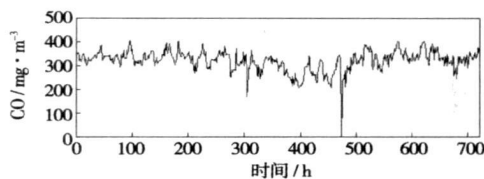


图3 烟气一氧化碳含量曲线

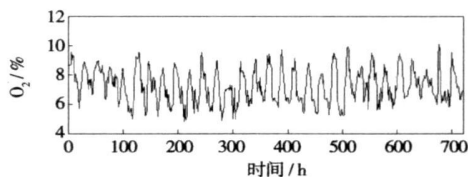


图4 烟气氧气含量曲线

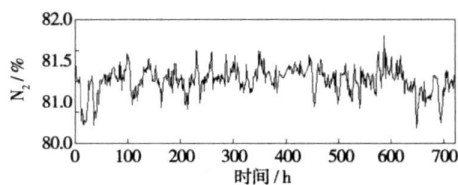


图5 烟气氮气含量曲线

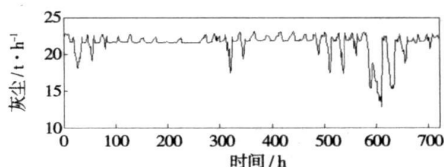


图6 烟气灰尘含量曲线

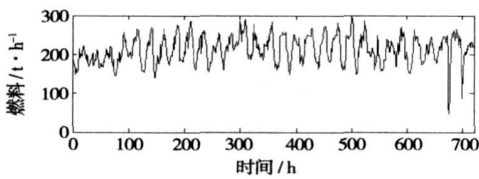


图 7 锅炉燃料量曲线

将图 2~图 7 中的数据作为输入, 利用式(4)~式(6)、式(10)以及式(12)得到 C_{ar} 、 H_{ar} 、 O_{ar} 、 N_{ar} 和 S_{ar} , 其中燃烧所需的空气量、产生的烟气量以及空气过量系数分别由式(7)~式(9)得到。然后将得到的收到基数数据代入式(2)得到燃料特性系数, 最后代入式(3)得到烟气中的二氧化碳含量曲线, 如图 8 所示, 图 9 为总烟气量曲线。

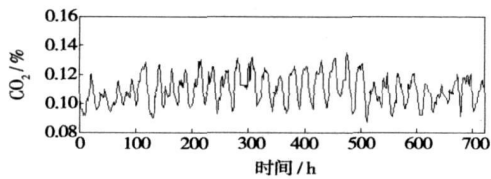


图 8 烟气中二氧化碳含量曲线

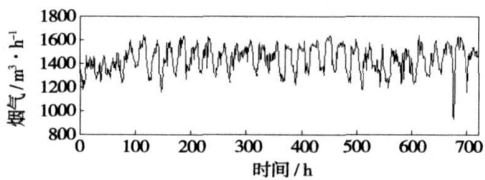


图 9 总烟气量曲线

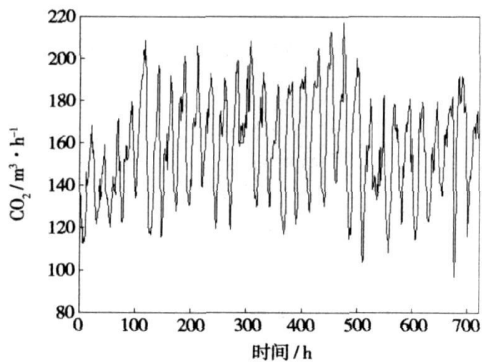
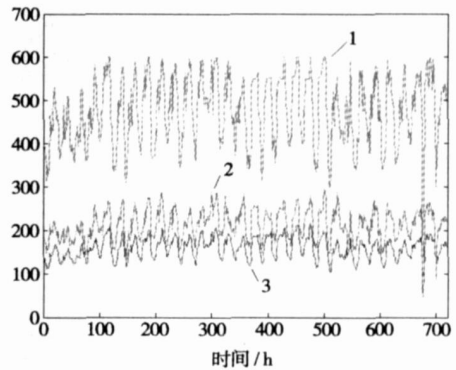


图 10 二氧化碳排放量预测曲线

将图(8)和图(9)的数据作为式(13)的左端输入, 得到的二氧化碳排放量如图 10 所示。

3 分析说明

前面已经构造一个二氧化碳的排放量计算方法, 并通过取自盘山电厂的数据对方法进行了实验说明。下面在分析二氧化碳和机组的燃料量和负荷的关系, 其对比如图 11 所示。



1—是机组负荷, MW; 2—机组燃料量, t/h; 3—二氧化碳排放量, m³/h

图 11 相关性比较

对比图 11 可以看出, 三者变化趋势上有一致性, 运用相关分析的方法, 确定二氧化碳和负荷的相关性系数为 0.933 2, 而与燃料量的相关性系数为 0.878 2。

因此, 当图 2~图 7 的 6 个参数无法完全获得, 并造成二氧化碳排放量的计算方法不能实现时, 可以用机组的负荷来估计二氧化碳的排放量。方法就是利用它们之间的强相关, 进行曲线拟合, 这里不再赘述。

下面分析二氧化硫等输入对温室气体二氧化碳计算量的影响。首先根据式(3)可以得到:

$$\frac{\partial(CO_2)}{\partial(SO_2)} = -1 + \frac{CO}{(1+\beta)^2} \frac{\partial\beta}{\partial(SO_2)} \quad (14)$$

$$\frac{\partial(CO_2)}{\partial(CO)} = -\frac{0.605+2\beta}{1+\beta} + \frac{CO}{(1+\beta)^2} \frac{\partial\beta}{\partial(CO)} \quad (15)$$

$$\frac{\partial(CO_2)}{\partial(O_2)} = -\frac{1}{1+\beta} + \frac{CO}{(1+\beta)^2} \frac{\partial\beta}{\partial(O_2)} \quad (16)$$

$$\frac{\partial(CO_2)}{\partial(N_2)} = \frac{CO}{(1+\beta)^2} \frac{\partial\beta}{\partial(N_2)} \quad (17)$$

$$\frac{\partial(CO_2)}{\partial(M)} = \frac{CO}{(1+\beta)^2} \frac{\partial\beta}{\partial(M)} \quad (18)$$

$$\frac{\partial(CO_2)}{\partial(A_{ar})} = \frac{CO}{(1+\beta)^2} \frac{\partial\beta}{\partial(A_{ar})} \quad (19)$$

$$\frac{\partial(\text{CO}_2)}{\partial(\text{N}_2)} = \frac{\text{CO}}{(1+\beta)^2} \frac{\partial\beta}{\partial(\text{N}_2)} \quad (20)$$

观察燃料特性系数 β 的表达式(2)可知, 由于煤中碳元素占多数, 因此估算 $0 < \beta < 1$ 。则可据式(14)~式(20)估算:

$$\frac{\partial(\text{CO}_2)}{\partial(\text{SO}_2)} = -1; \quad \frac{\partial(\text{CO}_2)}{\partial(\text{CO})} = -0.605; \quad \frac{\partial(\text{CO}_2)}{\partial(\text{O}_2)} = -1;$$

$$\frac{\partial(\text{CO}_2)}{\partial(\text{N}_2)} \approx 0; \quad \frac{\partial(\text{CO}_2)}{\partial(M)} \approx 0; \quad \frac{\partial(\text{CO}_2)}{\partial(A_{\text{ar}})} \approx 0; \quad \frac{\partial(\text{CO}_2)}{\partial(\text{N}_2)} \approx 0$$

由误差的相关理论可知, 这些输入引起的温室气体计算量误差为:

$$\Delta(\text{CO}_2) = -\Delta(\text{SO}_2); \quad \Delta(\text{CO}_2) = -0.605\Delta(\text{CO});$$

$$\Delta(\text{CO}_2) = -\Delta(\text{O}_2)$$

4 结 论

通过对燃烧过程的分析, 并借助燃料特性系数建立了二氧化碳排放量的计算方法, 用取自盘山电厂的数据对方法进行了实验说明。为适应环境要求, 对实现温室气体二氧化碳排放量的在线监测提

供了指导。

另外, 对计算得到的二氧化碳排放量的数据和机组的燃料量和负荷数据进行了数据分析, 得到了二氧化碳排放量与负荷具有极强相关性的结论, 为烟气信息不完备, 无法实施计算的情况下, 估算二氧化碳排放量, 提供了依据。

参考文献:

- [1] 姚文达. 锅炉燃烧设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [2] 姜锡伦, 屈卫东. 锅炉设备及运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 刘福国. 电站锅炉入炉煤元素分析和发热量的软测量实时监测技术[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 139-145.
- [4] 刘福国, 郝卫东, 韩小岗, 等. 基于烟气成分分析的电站锅炉入炉煤质监测模型[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(5): 441-445.
- [5] 李建刚, 杨宏民, 杨义波, 等. 电站锅炉实际运行状态下过量空气系数的研究[J]. 锅炉技术, 1999, 30(5): 16-18.
- [6] 刘福国. 电站锅炉入炉煤水分实时监测的研究[J]. 锅炉技术, 2003, 34(6): 12-14.
- [7] 方文沐, 杜惠敏, 李天荣. 燃料分析技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

(编辑 柴 舒)

运行技术

蒸燃联合循环装置的运行

据《Электрические станции》2006年2月号报道, 全俄热工研究所和西北热电厂的专家论述了在具有二台燃气轮机和一台汽轮机的蒸燃联合装置热力系统条件下把第二台余热锅炉接入工作的第一台余热锅炉的问题。该热电厂的 ПГУ-450T 型蒸燃联合循环装置是由两台具有自己余热锅炉的燃气轮机和一台汽轮机组成的。

根据经济器集箱的循环次数得到的数据表明, 在由两台燃气轮机、两台余热锅炉和一台汽轮机组成的蒸燃联合循环装置热力系统中, 可以在接到汽轮机的高压蒸汽管路内的蒸汽温度差为 $40 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下把第二台启动的余热锅炉接到正在工作的第一台余热锅炉, 不会降低装置设备工作的可靠性。

应该依次地先打开高压主蒸汽阀的旁通管, 然后打开高压主蒸汽阀本身把第二台启动的余热锅炉接到工作的第一台余热锅炉。

有关循环次数的主要限制是在双锅炉装置从热态启动时发生的, 那时水经济器集箱金属的温度大地大于在充满启动的锅炉时供入集箱中的水的温度。在从热态启动开放式布置的锅炉时出现类似的限制。

(吉桂明 供稿)

certainty range of the output of an on-line performance calculation model for plants under different outside boundary conditions, different operating parameters as well as identical operating conditions, thus providing useful reference data for optimization decision-making adjustment and diagnosis both based on the model in question. The coal consumption characteristic curves of the plant obtained through statistical calculations reflect the actual characteristics of the plant under real operating conditions. With the in-plant load distribution version serving as an example, the effectiveness of the measures taken for economic operation has been verified. **Key words:** thermal power plant, on-line performance calculation, statistical characteristics, uncertainty, load distribution

电站锅炉温室气体排放量的计算 = **Calculation of Greenhouse Gas Emissions from Utility Boilers** [刊, 汉] / LIU Huan-zhang, CHANG Tai-hua, LIU Ji-zhen, et al (Automation Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 665 ~ 668

As an important secondary energy source, electric power is indispensable. However, a large quantity of waste emissions is produced during power generation, especially by coal-fired power plants. On the basis of flue gas analysis, a study of fuel characteristic coefficients and by analyzing combustion mechanism as well as through a modeling based on statistical laws, a forecast was given of the greenhouse gas carbon-dioxide emissions from coal-fired utility boilers. Finally, a simulation study was conducted of the forecasting method by making use of the real-time historic data from Panshan Power Plant. The simulation indicates the feasibility of the method under discussion. **Key words:** flue gas analysis, fuel characteristic coefficient, utility boiler, greenhouse gas

石灰石脱硫反应对喷氨脱硝反应影响的实验研究 = **An Experimental Study of the Effect of Limestone Desulfurization Reaction on Ammonia-injected Denitrification Reaction** [刊, 汉] / HOU Xiang-song, WANG Jin-wei, ZHANG Hai, et al (Education Ministry Key Laboratory on Thermal Science and Power Engineering, Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 669 ~ 672

To inject ammonia into a CFB (circulating fluidized bed) boiler at its furnace tail portion or at the inlet of a cyclone separator can reduce the NO_x content in flue gases. In a CFB boiler, the injection of limestone for the purpose of desulfuration may influence the ammonia-injected denitrification reaction. An experimental study was conducted of the impact of pyrolytic and desulfuration products of the limestone on ammonia-injected denitrification reaction. It has been found that the pyrolytic reaction products of limestone prior to desulfuration have a relatively big specific surface area and CaO exhibits a definite catalytic activity, which can promote the ammonia-injected denitrification reaction. The desulfuration products of the limestone exercise a relatively small influence on the ammonia-injected denitrification reaction. When the temperature is above 1 200 K, however, the products in question can promote the oxidation of NH_3 and reduce the escape of NH_3 , both aspects being considered as favorable to the ammonia-injected denitrification reaction. **Key words:** circulating fluidized bed, ammonia-sprayed denitrification, limestone, catalysis

喷淋脱硫塔喷嘴外流动数值模拟与实验研究 = **Numerical Simulation and Experimental Study of Flows Outside the Nozzles of a Spray-type Desulfuration Tower** [刊, 汉] / ZHOU Shan-ming, JIN Bao-sheng, SUN Zhi-ao (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 673 ~ 676

Established was a numerical simulation model for nozzles of a spray-type desulfuration tower and studied was the relationship among the following items, which can influence the gas-liquid mass transfer inside a spray type desulfuration tower: spray liquid flow rate, average rupture length of the liquid film, initial jet flow angle of the nozzle and average liquid drop diameter. A special test platform and single-turn spiral nozzle were designed and the liquid film and liquid-drop movement were tested and analyzed by using a quick-speed CCD (Charge Coupled Device) with a digital camera being used to take pictures. Both the model calculations and experimental results show that the average liquid film rupture-length and the average liquid drop diameter will decrease with an increase of spray liquid flow rate. When the clearance height at the nozzle