

DOI: 10.7667/PSPC151059

基于塔式扩散模型的火电厂污染物监测方法研究

李春海, 陈洪雨, 陈贺, 芦斌

(石家庄科林电气股份有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 环境污染问题日益严重, 雾霾天气不断威胁人类的健康, 需要对污染物排放进行实时监测。为了更加准确地预测火电厂烟气污染物的排放, 实时在电子地图上显示污染物浓度, 提出了一种基于塔式扩散模型的火电厂污染物排放监测显示方法。对传统的污染物扩散模型进行优化处理, 在此基础上提出了一种新型的塔式扩散模型来计算污染物浓度, 利用不同高度扩散系数不同分层计算不同的污染物浓度。经大量实验证明, 塔式扩散模型提高了烟气污染物排放监测的安全性、准确性和高效性。

关键词: 扩散模式; 高斯扩散模型; 塔式扩散模型; 扩散因数; 颗粒属性; 排烟率

Study on the method of pollutant monitoring in thermal power plant based on the tower model

LI Chunhai, CHEN Hongyu, CHEN He, LU Bin

(Shijiazhuang Kelin Electric Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Environmental pollution is becoming increasingly serious, the fog and haze continues to threaten human health, so real-time monitoring of pollutant emissions is needed. In order to more accurately predict the thermal power plant flue gas pollutant emissions and real-time display pollutant concentration on electronic map, this paper proposes a pollutant discharge monitoring display method for thermal power plant based on tower diffusion model. It optimizes the traditional pollutants diffusion model, and on the basis, puts forward a kind of new tower diffusion model to calculate the pollutant concentration, with which different pollutant concentrations are calculated hierarchically by using that the diffusion coefficient are at different heights. A large number of experiments prove that the proposed tower model improves the safety, accuracy and efficiency of the monitoring of flue gas pollutant emissions.

Key words: diffusion model; Gauss diffusion model; tower diffusion model; diffusion coefficient; particle property; smoke extraction rate

0 引言

近年来, 由于环境污染问题日益严重, 雾霾天气不断威胁人类的健康, 国家电网公司积极落实相关政策要求, 大力开展了污染物排放系统功能平台的建设工作, 实现对固定污染源排放的污染物进行连续地、实时地跟踪测定, 连续测定颗粒物、气态污染物浓度和排放率^[1]。大气污染物扩散模式是模拟大气污染物的扩散、迁移过程, 预测在不同污染源条件、气象条件及下垫面条件下某污染物浓度时空分布的数学模型, 是低层大气中污染物迁移和扩散规律的、简单化的数学描述。根据不同的建模理论体系、污染物迁移、扩散过程以及不同的描述对象, 模式的形式也各不相同。基于以上原因, 为了更加准确地预测火电厂烟气污染物的排放, 实时在

电子地图上显示污染物浓度, 提出了基于塔式扩散模型的火电厂污染物排放监测显示方法^[2-4]。

1 基于塔式扩散模型的火电厂污染物监测方法的研发

1.1 背景技术

现在的大气污染物监测与显示技术只是通过表格或曲线、棒图显示当前污染物排放量, 不能直观地反映污染物排放对周边环境的影响。大气污染物扩散模式是模拟大气污染物的扩散、迁移过程, 预测在不同污染源条件、气象条件及下垫面条件下某污染物浓度时空分布的数学模型, 是低层大气中污染物迁移和扩散规律的、简单化的数学描述。

受地形、气象、大气污染物的物理化学特征、污染源特征等多种因素的制约, 不同的扩散模式都

有各自不同的考虑因素和适用范围, 选择恰当的扩散模式能较为准确地模拟污染物的扩散及分布。目前, 已有许多发展成熟的污染物扩散模式应用, 国内的相关研究中尤其以高斯类模式的应用最为广泛。高斯扩散模型是一种经验模型, 大量实验数据表明, 高斯分布是污染物分布的较好的近似形式, 高斯模型数学形式简单, 通过大规模的实验获得模型计算的主要参数, 可以在各种气象条件下选用, 高斯扩散模型有两个特点: 浓度计算在垂直方向和水平方向都采用高斯分布假设, 湍流分类和扩散参数采用离散化的分类方法, 它的优点是仅用常规气象观测资料就可以评估扩散参数。高斯扩散模型基于以下条件。

坐标系: 原点为地面源的排放点或高架源排放点在地面上的投影, 右手坐标系, x 轴为主风向, y 轴为横风向, z 轴为垂直向。几点假设: 1) 污染物浓度在 y 、 z 方向为正态分布; 2) 全部高度风速均匀稳定; 3) 源强连续均匀; 4) 扩散中不考虑转化, 污染物是守恒的; 5) x 向上, 平流作用远大于扩散作用; 6) 地面足够平坦。

无界空间连续点源扩散模式为

$$c(x, y, z) = \frac{q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad (1)$$

高架连续点源扩散模式为

$$c(x, y, z, H) = \frac{q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (2)$$

式中: μ 为平均风速; q 为源强; σ_y 、 σ_z 为侧向和竖向扩散参数; H 为有效烟囱高度。

具体到火电厂烟气污染物排放, 由于火电厂的特殊性, 如污染物在出口的温度较高、污染物的组成比较复杂以及气压等因素, 上述扩散模式预测此类污染物的扩散会产生较大的偏差^[5]。

1.2 技术方案

为了更加准确地预测火电厂烟气污染物的排放, 实时在电子地图上显示污染物浓度, 提出了基于塔式扩散模型的火电厂污染物排放监测显示方法^[6-8]。基于塔式扩散模型的火电厂污染物排放监测显示方法和火电厂污染物排放检测系统实现, 系统中包括主机、GIS 服务器和数据采集系统, 数据采集系统连接 CEMS 系统, 关键在于: 主机中存储当地全年的气象资料、每个烟囱的位置和高度信息; 在每个烟囱内部出口位置设置温度传感器, 在室外设置温度传感器, 在每个烟囱顶端外侧设置风向风速传感器,

所有传感器编号并连接到数据采集系统, 主机采用塔式扩散模型计算污染物的扩散^[9], 塔式扩散模型的数学表达式为

$$f(x, y, z, H) = \frac{2(1+a)}{\sqrt{3\pi}\varphi} \exp\left(-\frac{2(x-\mu t)^2}{3\varphi}\right) \exp\left(-\left(\frac{2y^3}{3\varphi^2} + \frac{z^3}{2\varphi^2}\right)\right) \theta \quad (3)$$

式中: x 、 y 、 z 为空间坐标; H 是烟囱口距地面的高度; φ 为扩散因数; μ 为风速; t 为扩散时间; λ 为源强; a 为颗粒属性系数; θ 为高度系数; 空间坐标系是右手坐标系, 原点是烟囱在地面上的投影, x 轴为主风向, y 轴为横风向, z 轴为垂直向。

主机计算各时间点不同位置的污染物浓度, 并根据污染物浓度等级, 以不同颜色显示在电子地图上。颗粒大小单位为 μm , 颗粒属性系数 α 如表 1 所示。

表 1 颗粒属性系数表

大小	0~14	15~30	31~47	48~75	>76
α	0	0.3	0.5	0.8	1

根据高度得到的高度系数 θ 如表 2 所示。

表 2 高度系数表

高度	高度系数 θ
$H-(H+\Delta H)$	1
$0.75H-H$	0.75
$0.5H-0.75H$	0.5
$0.25H-0.5H$	0.25
$0-0.25H$	0.1

扩散因数 φ 根据温度、气压、风速等多方面因素影响来确定, 本算法按照高度系数 θ 来划分不同高度时的扩散因数如表 3 所示。

表 3 扩散因数表

高度	$H-(H+\Delta H)$	$0.75H-H$	$0.5H\sim$ $0.75H$	$0.25H\sim$ $0.5H$	$0\sim0.25H$
φ	$(3\theta/2)\mu^{0.87}$	$(\theta/2)\mu^{0.84}$	$(\theta/2)\mu^{0.82}$	$(\theta/5)\mu^{0.8}$	$(\theta/6)\mu^{0.78}$

1.3 推导过程

假定由污染源排放出的大气污染物全都由单位面元 $dydz$ 中通过, 根据质量守恒定律和连续性原理, 单位时间内通过单位面源的污染物就等于污染源单位时间内排放出的污染物质量, 故可用公式表示如式(4)。

$$\iint_{-\infty}^{+\infty} C_0 \mu dydz = Q \quad (4)$$

式中: C_0 为污染源排放的污染物浓度; Q 为污染源单位时间内排放的污染物质量。

将高斯曲线的参数代入得到

$$\iint_{-\infty}^{+\infty} \mu C_0 \exp\left[-\left(\frac{2y^3}{3\varphi^2} + \frac{z^3}{2\varphi^2}\right)\right] dy dz = Q \quad (5)$$

将其进行转换可得

$$\mu \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{2y^3}{3\varphi^2}} dy \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{z^3}{2\varphi^2}} dz = Q \quad (6)$$

对 $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{2y^3}{3\varphi^2}} dy$ 来说, 由于 $\varphi^2 > 0$, 令 $t = \frac{\sqrt{3}y^2}{\sqrt{2}\varphi}$,

则

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{2y^3}{3\varphi^2}} dy = \sqrt{\frac{2}{3}}\varphi \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-t^2} dt \quad (7)$$

根据普哇松积分公式得到 $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-t^2} \cdot dt = \sqrt{\pi}$, 有

$$\sqrt{\frac{2}{3}}\varphi \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-t^2} dz = \sqrt{\frac{2\pi}{3}}\varphi。$$

同理 $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{z^3}{2\varphi^2}} dz = \sqrt{2\pi}\varphi$ 。故

$$\iint_{-\infty}^{+\infty} \mu C_0 \exp\left[-\left(\frac{2y^3}{3\varphi^2} + \frac{z^3}{2\varphi^2}\right)\right] dy dz = \frac{2}{\sqrt{3}}\pi\varphi^2 \mu C \quad (8)$$

将该值代回得

$$\frac{2}{\sqrt{3}}\pi\varphi^2 \mu C_0 = Q, \text{ 故}$$

$$C_0 = \frac{\sqrt{3}Q}{2\pi\varphi^2 \mu} \exp\left[-\left(\frac{2y^3}{3\varphi^2} + \frac{z^3}{2\varphi^2}\right)\right] \quad (9)$$

考虑到高度以及风速的影响, 最终可得到任一点的污染物浓度公式为

$$f(x, y, z, H) = \frac{2(1+\alpha)}{\sqrt{3}\pi\varphi} \exp\left(-\frac{2(x-\mu t)^2}{3\varphi}\right) \exp\left(-\left(\frac{2y^3}{3\varphi^2} + \frac{z^3}{2\varphi^2}\right)\right) \theta \quad (10)$$

式中: φ 为扩散因数; μ 为风速; t 为扩散时间; λ 为源强; α 为颗粒属性系数; θ 为高度系数。

上升高度 ΔH 应用国家标准, 定义: 烟囱的高度为实际测量值, 当 $Q_H \geq 2100 \text{ kW}$ 和 $(T_s - T_a) \geq 35 \text{ K}$ 时, $Q_H = 0.35 P Q_V \Delta T / T_s$, $\Delta T = T_s - T_a$, $\Delta H = n_0 Q_H^n \cdot H_s^{n_2} \cdot (\mu - 1)$ 。

Q_H 为烟囱的热排放率, 这是一个固定参数, 存储在主机中, Q_V 是实际排烟率, 由 CEMS 系统中的烟气流量计量仪器获得, 单位是 m^3/s 。 μ 为烟囱出口处的平均风速, T_s 和 T_a 分别为烟气出口温度和环境大气温度, n_0 为烟气热机地表状况系数, n_1 为

烟气热释放率指数, n_2 为烟囱高度指数, P 为大气压力, 大气压力根据烟囱出口处的高度确定。烟囱环境系数的选取如表 4 所示。

表 4 烟囱环境系数表

Table 4 Chimney environmental coefficient table

地表状况	n_0	n_1	n_2
农村或郊区	1.427	1/3	2/3
城区及近郊	1.303	1/3	2/3

2 基于火电厂污染物排放监测系统的方法实现

2.1 基于塔式扩散模型的火电厂污染物排放监测显示方法的应用

基于塔式扩散模型的火电厂污染物排放监测显示方法和火电厂污染物排放检测系统实现, 系统中包括主机、GIS 服务器和数据采集系统, 数据采集系统连接 CEMS 系统。GIS 服务器用来存储和显示电子地图、数据采集系统采集算法需要的各种参数。算法中, μ 的取值是平均风速。一般的, 是按照统计规律, 从气象资料中取得当前日期的平均风速, 主机中存储当地全年的气象资料就是为了取得上述数值; 在每个烟囱内部出口位置设置温度传感器测量烟囱出口温度, 在室外设置温度传感器测量室外温度, 在每个烟囱顶端外侧设置风向风速传感器测量实时风向风速^[10-13]。

参看图 1, 主机与显示器、GIS 服务器、数据采集系统连接, 数据采集系统连接 CEMS 系统, 数据采集系统通过网络连接烟囱 5 内部设置的烟囱内部出口位置的温度传感器 2、测量室外温度的温度传感器 1、设置在烟囱 5 顶端外侧的风向风速传感器 3。所有传感器都有编号。主机采用塔式扩散模型计算污染物扩散, 塔式扩散模型数学表达式为

$$f(x, y, z, H) = \frac{2(1+\alpha)\lambda}{\sqrt{3}\pi\varphi} \exp\left(-\frac{2(x-\mu t)^2}{3\varphi}\right) \exp\left(-\left(\frac{2y^3}{3\varphi^2} + \frac{z^3}{2\varphi^2}\right)\right) \theta \quad (11)$$

式中: x, y, z 为空间坐标; H 是烟囱口距地面的高度; φ 为扩散因数; μ 为风速; t 为扩散时间; λ 为源强; α 为颗粒属性系数; θ 为高度系数; 空间坐标系是右手坐标系, 原点是烟囱在地面上的投影, x 轴为主风向, y 轴为横风向, z 轴为垂直向。

数据采集系统通过风向风速传感器 3 取得当前风向, 待其稳定后选取主风向作为 x 轴, 同时定义 y 轴和 z 轴。风速 μ 为平均风速, 初始值从气象数据中取得, 经过一定时间后通过实测的平均风速进

行修正。

烟囱内部出口位置的温度传感器 2 和测量室外温度的温度传感器 1 分别测量烟气出口温度 T_s 和环境大气温度 T_a ，这两个参数在计算上升高度 ΔH 时使用。

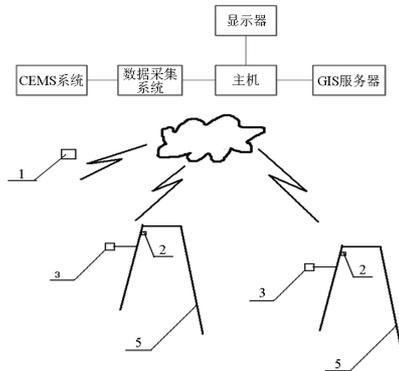


图 1 数据采集系统连接 CEMS 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CEMS system for data acquisition system

下面的表 5 是实验参数。

表 5 实验数据

Table 5 Experimental data table

输入参数					实测值			塔式扩散算法			普通高斯算法		
风速/ (ms^{-1})	距离/m	SO ₂	NO _x	烟尘源强	SO ₂	NO _x	烟尘浓度	SO ₂	NO _x	烟尘浓度	SO ₂	NO _x	烟尘浓度
		源强(污染物 排放量/ (kNm^3/h))	源强(污染物 排放量/ (kNm^3/h))	(污染物排 放量/ (kNm^3/h))	实测值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	实测值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	实测值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	气体计 算值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	气体计 算值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	计算值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	气体计 算值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	气体计 算值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	计算值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
0.7	1 500	1 025	1 040	1 421	0.076	0.078	0.093	0.072	0.075	0.09	0.061	0.070	0.077
1.8	1 500	1 140	1 160	1 304	0.057	0.055	0.069	0.05	0.052	0.061	0.07	0.065	0.088
0.8	1 500	1 256	1 250	1 750	0.064	0.069	0.095	0.071	0.070	0.099	0.055	0.060	0.086
1.3	1 500	1 058	1 200	1 498	0.06	0.063	0.08	0.057	0.061	0.071	0.049	0.052	0.099
0.3	1 500	1 069	1 123	1 597	0.08	0.084	0.114	0.078	0.080	0.095	0.064	0.069	0.086
0.9	1 500	1 078	1 246	1 603	0.069	0.068	0.099	0.061	0.066	0.089	0.052	0.059	0.077
2.3	1 500	1 259	1 184	1 322	0.049	0.048	0.058	0.052	0.050	0.065	0.06	0.064	0.042
0.9	1 500	1 154	1 154	1 542	0.062	0.067	0.092	0.064	0.064	0.087	0.047	0.052	0.074
1	1 500	1 029	1 010	1 423	0.055	0.064	0.085	0.06	0.059	0.081	0.078	0.082	0.095

在显示一定范围内污染物分布的同时，可以在地图上选取一个点，计算该点不同高度的各种污染物浓度，使用柱状图显示，高度间隔及高度范围人为设定。显示时，使用二维坐标系，X 轴为高度，Y 轴为污染物浓度。污染物从烟囱口排出后，上升一定高度后开始下降，因此，这里只考虑从地面开

始到 $H+\Delta H$ ，再高的地方不会有该烟囱排放的污染物出现。

表中，距离为主风向方向距烟囱的距离，因此，具体到公式中，距离是 x 值， $y=0$ ， $z=2\text{ m}$ ；风速为平均风速。

2.2 火电厂污染物排放监测系统的显示

可以看出，采用塔式扩散模型得出的结果比采用普通高斯算法得出的结果更接近实测值。作为显示的依据，最终在显示器上模拟显示的污染物扩散过程更接近实际情况。

火电厂烟囱排放的污染物是气体和颗粒的混合物，如气体的二氧化硫、氮氧化物，固体颗粒的烟尘等。在计算各时空点的污染物浓度时，不能只计算单一的污染物浓度，要按照不同尺寸的污染物分别计算。由数据采集系统连接 CEMS 系统获得排放污染物中不同尺寸的污染物和各自的源强 λ ，将探测到的参数代入扩散模型分别计算。目前只是计算 SO_2 、 NO_x 和平均粉尘尺寸的污染物浓度，当检测技术可以实时得到排放的污染物中其他气体和粉尘中各种尺寸污染物的源强时，本算法会得到更精确的结果^[14-16]。

主机根据上述参数实时计算各成分的污染物浓度，并以不同颜色显示在电子地图上。当在电子地图上选取一点时，使用柱状图显示该点不同高度的污染物浓度，如图 2 所示^[17-19]。

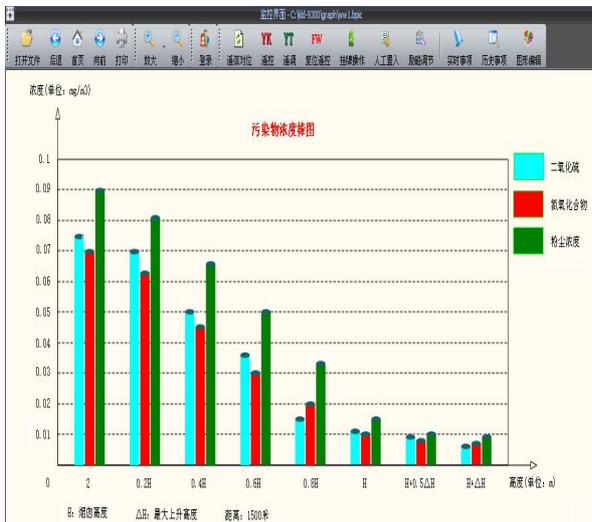


图2 污染物浓度棒图

Fig. 2 Pollutant concentration bar chart

3 总结

基于塔式扩散模型的火电厂污染物排放监测显示方法, 涉及污染物在大气中的排放监测, 用于在电子地图上显示火电厂排放的烟气污染物在各区域的浓度。此方法是基于火电厂污染物排放检测系统而实现, 系统中包括主机、GIS 服务器和数据采集系统, 数据采集系统连接 CEMS 系统, 采用塔式扩散模型计算污染物的扩散, 能够更精确地监测及预测污染物的排放情况。经过试验数据的验证, 证明了塔式扩散模型算法比传统的高斯算法更加精确地计算出各种污染物的浓度, 保证了污染物浓度预测的精确性、高效性和经济性。

参考文献

- [1] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [2] 缙新科, 崔乐乐, 巨圆圆, 等. 火电厂机组煤耗特性曲线拟合算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 84-89.
GOU Xinke, CUI Lele, JU Yuanyuan, et al. Study on curve fitting algorithm for thermal power plant units coal consumption[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 84-89.
- [3] 陆佳政, 吴传平, 杨莉, 等. 输电线路山火监测预警系统的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 89-95.
- [4] LU Jiazheng, WU Chuanping, YANG Li, et al. Research and application of forest fire monitor and early-warning system for transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 89-95.
- [4] 黄曙, 马文霜, 陈炯聪, 等. 智能变电站网络风暴的监测和过滤算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 68-72.
HUANG Shu, MA Wenshuang, CHEN Jiongcong, et al. Research on the network storm monitoring and filtering algorithm in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 68-72.
- [5] 胡文平, 于腾凯, 巫伟南. 一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 35-42.
HU Wenping, YU Teng kai, WU Weinan. A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 35-42.
- [6] 赵乐强. 火电厂机组优化组合的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
ZHAO Leqiang. Research on the plant's optimal unit commitment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [7] 卢颖. 火电厂污染物扩散模型研究[J]. 山东工业技术, 2014(9): 147, 70.
LU Ying. Study on pollutant dispersion model of thermal power plant[J]. Shandong Industrial Technology, 2014(9): 147, 70.
- [8] 江自生, 黄湘. 火电厂污染物全排放分析及综合治理[J]. 华电科技, 2009, 31(1): 1-7.
JIANG Zisheng, HUANG Xiang. Analysis on pollutants discharge of coal-fired plant and the comprehensive treatments[J]. Huadian Technology, 2009, 31(1): 1-7.
- [9] 李勇, 王建君, 曹丽华. 火电厂负荷优化分配的模拟退火粒子群算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 40-44.
LI Yong, WANG Jianjun, CAO Lihua. Simulated annealing particle swarm optimization algorithm for load distribution of power plant[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2011, 23(3): 40-44.
- [10] 李自怡. 基于目标成本管理的火电厂成本控制体系[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(4): 36-39.
LI Ziyi. Cost control system of thermal power plant based on target cost management[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(4): 36-39.

- [11] 顾乐, 陈隽, 刘文浩, 等. GIS 局部放电圆板型内置传感器性能影响因素的研究[J]. 高压电器, 2012, 48(2): 55-59.
GU Le, CHEN Jun, LIU Wenhao, et al. Impact factors of disc sensor for partial discharge in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 55-59.
- [12] 王卫东, 赵现平, 王达达, 等. GIS 局部放电检测方法的分析研究[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 13-19.
WANG Weidong, ZHAO Xianping, WANG Dada, et al. Analysis on the method of GIS partial discharge detection[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 13-19.
- [13] 詹世平, 周集体. 利用 GIS 进行海水污染物浓度分布的可视化研究[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(4): 506-509.
ZHAN Shiping, ZHOU Jiti. Research on visualization of pollution concentration distribution in sea water using GIS[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(4): 506-509.
- [14] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [15] 郭振华. 对熏烟扩散模式应用的探讨[J]. 环境工程, 2003, 21(4): 63-65.
GUO Zhenhua. Research on the application of smoke dispersion model[J]. Environmental Engineering, 2003, 21(4): 63-65.
- [16] 田超, 范相阁, 张文利, 等. 大气污染物 SO₂ 扩散模式的建立及应用[J]. 河南农业大学学报, 2001, 35(3): 234-238.
TIAN Chao, FAN Xiangge, ZHANG Wenli, et al. Establishment of the diffusing model of atmospheric infectant SO₂ and its application[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2001, 35(3): 234-238.
- [17] 迟妍妍, 张惠远. 大气污染物扩散模式的应用研究综述[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(5): 376-381.
CHI Yanyan, ZHANG Huiyuan. A review of the development and application of air pollutant dispersion models[J]. Environmental Pollution & Control, 2007, 29(5): 376-381.
- [18] 裴冰, 万方. CEMS 比对监测相关问题探讨[J]. 环境监测管理与技术, 2010, 22(2): 8-10.
PEI Bing, WAN Fang. Discussions on relative issues of comparative monitoring for CEMS[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2010, 22(2): 8-10.
- [19] 史会轩, 钱进, 熊志东, 等. SF₆ 电气设备分解产物在线监测方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 58-60.
SHI Huixuan, QIAN Jin, XIONG Zhidong, et al. Research on on line monitoring method of decomposition products of SF₆ electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 56-60.

收稿日期: 2015-06-25; 修回日期: 2015-08-22

作者简介:

李春海(1979-), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统自动化研究; E-mail: 85231100@163.com

陈洪雨(1975-), 男, 本科, 工程师, 从事电力系统自动化研究; E-mail: chy_1234@163.com

陈贺(1976-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事电力系统自动化研究. E-mail: chen_he@163.com

(编辑 魏小丽)