

基于在线监测数据的燃煤电厂脱硝装置 性能预测研究

阮存钦¹, 洪志刚², 赖培灿¹, 张建华¹, 林锡昆¹, 周江¹, 冯前伟², 张杨^{2*}

(1. 福建华电可门发电有限公司, 福建省 福州市 350512;

2. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江省 杭州市 310030)

Research on Performance Prediction of Coal-fired Power Plant Denitrification Device Based on Online Monitoring Data

RUAN Cunqin¹, HONG Zhigang², LAI Peican¹, ZHANG Jianhua¹, LIN Xikun¹,
ZHOU Jiang¹, FENG Qianwei², ZHANG Yang^{2*}

(1. Fujian Huadian Kemen Power Generation Co., LTD., Fuzhou 350512, Fujian Province, China;

2. Huadian Electric Power Research Institute Co., LTD., Hangzhou 310030, Zhejiang Province, China)

摘要: 火电厂中污染物脱除的精准调控一直受到广泛关注, 通过将大数据分析技术应用于某600 MW的发电机组脱硝系统, 开展复杂状态下环保在线监测数据的深度挖掘研究, 高效精准地获得影响污染物脱除设备性能的关键因素, 结合污染物脱除原理, 确定了环保污染指数预测模型的输入与输出元素, 并对脱硝系统中资源消耗的指标进行表征, 搭建了机组环保污染指数的大数据预测模型。结果表明: 合理清理工艺流程上的关联参数后, 关键因素分析的结果与影响环保污染物脱除机理定性分析结果一致。训练后的模型不仅能够高精度地重现当前环保性能, 也具备预测环保性能的能力。通过对选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)系统的具体分析, 可为后续火电厂其他环保设备实施进一步的精准调控提供一定的理论依据和数据支撑。

关键词: 火电厂; 大数据; 超低排放; 脱硝系统

ABSTRACT: The precise control of pollutant removal in thermal power plants has always received wide attention. By applying big data analysis technology to the denitration system of a 600 MW generator set, the in-depth mining research on environmental protection online monitoring data under complex conditions was carried out, and the impact of pollution can be obtained efficiently and accurately. By analyzing the key factors of the performance of waste

removal equipment, combined with the principle of pollutant removal, the input and output elements of the environmental pollution index prediction model was determined, the resource consumption indicators in the denitration system were characterized, and the big data of the unit environmental pollution index forecast model was built. The results show that after rationally cleaning the associated parameters in the process, the results of the key factor analysis are consistent with the results of the qualitative analysis of the removal mechanism of environmental pollutants. The trained model can not only reproduce the current environmental performance with high precision, but also has the ability to predict environmental performance. The specific analysis of the selective catalytic reduction (SCR) system can provide a certain theoretical basis and data support for the implementation of further precise control of other environmental protection equipment in thermal power plants.

KEY WORDS: thermal power plant; big data; ultra-low emission; denitration system

0 引言

大数据分析技术正成为推动整个经济社会转型发展新动力的新动力, 同时也是重塑全球各国竞争格局的新机遇和提升各级政府治理能力的新途径^[1]。各国都已经认识到了大数据所蕴含的重要战略意义, 纷纷开始在国家层面进行战略部署。2015年国务院发布《促进大数据发展行动纲

基金项目: 中国华电集团有限公司科技项目(CHDKJ20-02-77)。

Project Supported by Science & Technology Projects of China Huadian Group Co., Ltd. (CHDKJ 20-02-77).

要》，正式将大数据提升为国家发展战略^[2]。而大数据技术的飞速发展必定带动传统行业进入一个新的阶段^[3-4]。如何合理地将大数据分析技术融入各行各业，已成为信息化时代的新热点。

随着智能化时代的开启，电力能源消耗也大幅度增加，国家能源局的最新数据表明，目前我国的一次能源供应中，燃煤消耗依旧占比极大，其中火电厂是主要燃煤消耗行业^[5-8]。火电厂生产过程中不可避免地会排放 NO_x 、 SO_x 等大气污染物，造成雾霾、酸雨等危害，但是传统的脱除技术经过多年的研究已到达瓶颈期，难以有突破性的进展。帅利、朱法华等^[9-10]在现今超低排放形势下对火电厂进行经济环境效益分析，逐渐将研究重点转向如何实现更为合理地整合调控火电厂环保资源。在我国环保形势越来越严峻的背景下，亟需提高火电厂环保设备管理水平、主要污染物达标排放水平和整体技术经济效益，而创新型技术为电力企业降低成本、合理规避环保风险以及在电力市场中提升综合竞争力带来了转机^[11-12]。基于当前大数据分析领域快速发展形势，将信息分析技术嵌入燃煤电厂大气污染物治理等常规控制技术，势必能够促进燃煤电厂中各环保设备的智能化发展，实现更高效精准的模式化控制。

在上述背景形势下，本文通过将大数据分析技术应用于某600 MW的发电机组脱硝系统，开展复杂状态下环保在线监测数据的深度挖掘研究，研究结果可为后续开展相关技术研究与应用工作提供借鉴与参考。

1 机组概况

本文所研究对象为装机容量660 MW的超临界燃煤发电机组，锅炉为上海锅炉厂有限公司制造的超超临界、单炉膛、四角切圆燃烧、平衡通风、一次中间再热、“Π”型布置、全钢悬吊结构、直流炉，半露天布置，锅炉型号为SG-2024/26.15-M6002，基建同步建设烟气脱硫、脱硝、除尘设施。

烟气脱硝采用高灰型选择性催化还原法(selective catalytic reduction, SCR)脱硝工艺，布置于锅炉省煤器出口至空预器入口之间，设2台

SCR反应器。主体部分布置在原有锅炉尾部的风机区域结构件上方的预留脱硝空间内，SCR辅助设备(稀释风机、混合器、吹灰器等)布置在反应器平台上，不采取紧身封闭布置，采用“2+1”模式布置，初装2层催化剂，预留备用层。烟气脱硝系统主要设计参数如表1所示。

表1 脱硝装置入口烟气参数

Tab. 1 Inlet flue gas parameters of denitrification device

参数	设计值	备注
烟气量/(m ³ /h)	2 285 629	标态、干基、6%O ₂
设计烟气温度/°C	364	—
烟尘质量浓度/(g/m ³)	41	标态、干基、6%O ₂
NO _x 质量浓度/(mg/m ³)	300	标态、干基、6%O ₂
SO ₂ 质量浓度/(mg/m ³)	3 000	标态、干基、6%O ₂
SO ₃ 质量浓度/(mg/m ³)	30	标态、干基、6%O ₂
O ₂ 质量分数/%	3.29	干基
H ₂ O质量分数/%	7.78	—

2 大数据技术嵌入火电厂环保系统

火电厂燃煤烟气在排放过程中，流经各环保脱除设备时会发生一系列复杂的连锁物理化学反应，导致各特性参数间相互耦合，变化幅度增大，从而使得后续实际调控的精准度降低^[13-14]。而利用新型技术手段将蕴藏在燃煤电厂大型环保监测数据进行集中提取分析，是数据挖掘与传统污染物脱除技术建立联合发展的新起点，同时为燃煤电厂环保技术领域智能精准化控制大气污染物排放提供了新思路。

大数据分析技术指的是对海量的信息数据通过特殊技术手段进行分析，旨在数据处理过程中能够分类汇总相关性较强的逻辑数据，同时将输入数据模态化、常态化，剔除异常数据，将合适数据通过相关平台输出，使其可视化、直观化^[15-17]。而在大数据分析领域中，占据核心地位的就是海量数据挖掘。数据挖掘技术是对数据库的巨量数据进行挖掘，将潜在、有关联、有价值的信息进行提取的过程。目前数据挖掘技术应用较广，在高精度计算、人工智能、自动控制、机器学习等信息技术领域均有较好的发展前景^[18-20]。

大数据分析技术嵌入火电厂环保设备运行的

基本流程如图1所示,通过对各污染物脱除设备的设计运行参数、污染物的排放指标等不同类型、格式、载体的复杂数据进行统一汇聚、分类、剔除识别,并进行ETL(提取、转载和加载)数据集成,进而能够基于复杂状态下对海量环保在线监测数据进行深度挖掘研究,找出影响污染物脱除设备性能的关键因素^[21-22]。在此基础上,探索和建立发电机组环保污染指数的大数据预测模型,实现火电机组环保设备进行动态变化下的状态监测、趋势分析以及运行优化调整。该技术不但解决了发电机组在复杂状态下经济运行存在的问题,也为构建火电厂环保系统经济运行诊断分析系统作好准备。

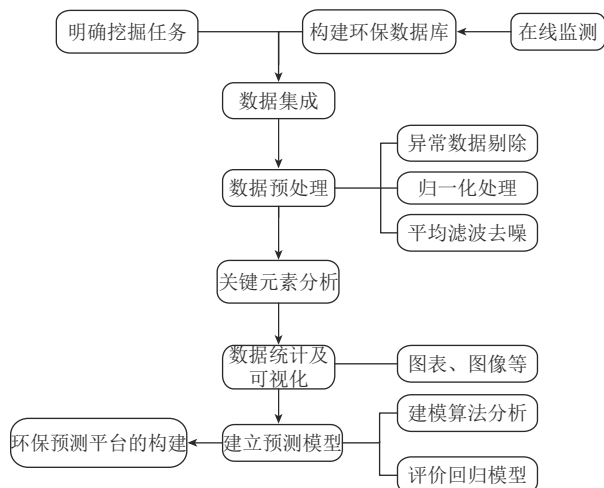


图1 大数据技术嵌入火电厂环保系统流程图

Fig. 1 Flow chart of big data technology embedded into environmental protection system of thermal power plant

3 性能预测结果分析

3.1 数据预处理

针对上述研究目标,本文选取脱硝烟气流量,入口和出口烟气温度、压力、 NO_x 和 O_2 浓度,出口 SO_2 和烟尘浓度,氨逃逸浓度,系统阻力,还原剂耗量,泵与风机的电压、电流等脱硝系统特性指标,收集了2018年4月至6月期间近50天的机组运行数据,共106个参数测点、135个文本数据,得到 $13\ 983 \times 107$ 的数据矩阵。此外,依据分布式控制系统(distributed control system,DCS)物理参数编码规则文件,即可将数据矩阵列的编码名

与其所表征物理量一一对应,完成环保系统工况参数的辨识。在此基础上,利用数据分析软件对原始在线测量数据进行分析,在软件中通过对数据组块进行剔除偏差真数据、噪声平滑滤波处理等预处理,同时将数据矩阵列的编码名与其所表征物理量一一对应,完成整个环保系统工况参数的辨识,集成后的数据矩阵即为研究系统状态的数据描述^[23-24]。

3.2 关键因素分析

脱硝效率是表征SCR系统性能最重要的特性指标,采用了多种关键因素分析识别引擎,分析了SCR系统的相关测点对最终反应器出口 NO_x 浓度的影响大小,最终得到SCR中各动态参数与脱硝效率的相关系数,如图2所示。结果显示,影响SCR系统中脱硝效率的关键因素有反应器入口 NO_x 含量、反应器 NH_3 进给流量、反应器出口 O_2 含量、 NH_3 进给调节阀位置、燃烧的热二次风流量等。

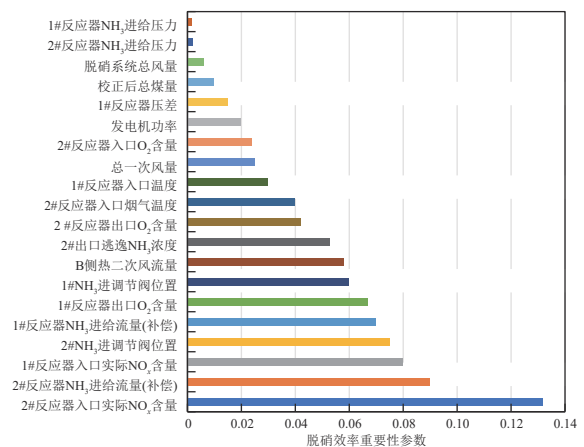


图2 SCR脱硝系统关键因素重要性排序

Fig. 2 Ranking of the importance of key factors in SCR denitration system

3.3 预测模型建立

图3为SCR脱硝系统污染指数预测模型,基于上述脱硝系统关键因素分析结果,合理地是关键因素进行分析和识别研究,得到影响SCR系统的主要物理参数,即明确了环保污染指数预测模型的输入参数,再通过回归分析算法构建的环保设备性能预测模型,同时完成参数调优和模型测试,得到相应的输出参数(出口 NO_x 浓度、氨逃逸

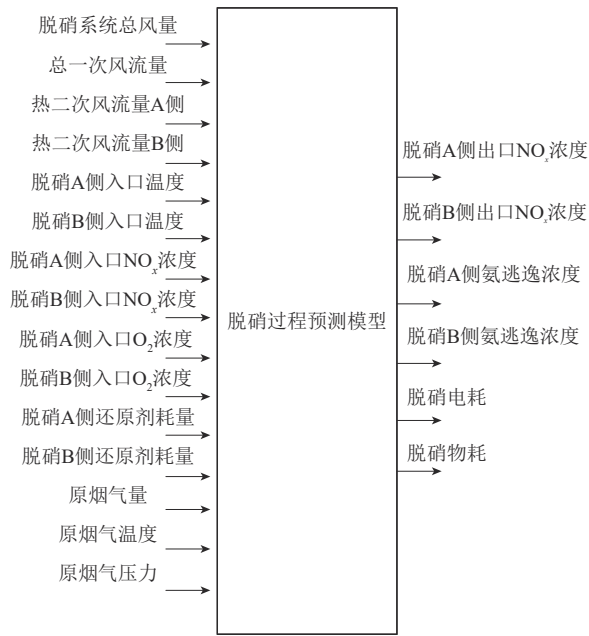


图3 SCR脱硝系统污染指数预测模型

Fig. 3 Prediction model of pollution index of SCR denitration system

浓度与脱硝电耗等)即为预测结果,用以表征相应的环保系统性能。

3.4 预测模型评价

SCR系统环保性能预测模型确立之后,需对其回归模型进行准确性评价,基于导出数据量大、同时影响参数多等因素考虑,选用平均百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE) E_{MAPE} 、均方根误差(root mean square error, RMSE) E_{RMSE} 、相关系数 R^2 、平均绝对误差(mean absolute error, MAE) E_{MAE} 4种评价指标同时对该数据模型进行准确性、有效性评估^[25-27],如表2所示。评价结果表明模型具有良好的预测精度,MAPE最小值为0.03,最大值为0.15,且其他评价指标都在可接受范围内,预测值能真实反映环保系统运行现状,表明该模型的算法能很好地应用于火电厂环保设

表2 SCR预测数据模型的主要评价指标

Tab. 2 Main evaluation indicators of SCR forecast data model

序号	评价指标	A侧出口NO _x 浓度	B侧出口NO _x 浓度	A侧氨逃逸浓度	B侧氨逃逸浓度	脱硝电耗
1	R^2	0.93	0.87	0.86	0.96	0.91
2	E_{RMSE}	7.8	4.36	0.05	0.2	7.75
3	E_{MAE}	5.2	3.03	0.04	0.09	5.7
4	E_{MAPE}	0.128	0.07	0.15	0.13	0.03

备的性能预测研究中。

3.5 模型预测结果与变负荷实测结果的对比

为更加直观的对该数据模型进行检验,同时验证模型的预测精度,选定3种工况(高、中、低负荷)数据进行测试,预测结果和实测结果分别如表3、4所示。

表3 SCR系统烟气脱硝测试结果

Tab. 3 Test results of SCR system flue gas denitration

参数	满负荷	中负荷	低负荷
	工况	工况	工况
原烟气体积/(km ³ /h)	3 540.7	3 787.8	3 307.5
原烟气温度/°C	114.9	110.3	101.5
原烟气压力/kPa	2.46	1.76	1.28
脱硝系统总风量/(km ³ /h)	2 094.6	1 843.8	1 346.5
总一次风流量/(km ³ /h)	468.2	392.3	304.8
A侧热二次风流量/(km ³ /h)	796.0	684.4	449.0
B侧热二次风流量/(km ³ /h)	835.9	757.9	594.2
脱硝A侧入口温度/°C	342.0	336.7	303.8
脱硝B侧入口温度/°C	344.2	329.4	296.3
脱硝A侧入口NO _x 质量浓度/(mg/m ³)(折算值)	246.90	149.23	243.58
脱硝B侧入口NO _x 质量浓度/(mg/m ³)(折算值)	270.54	251.64	305.71
脱硝A侧入口O ₂ 质量分数/%	2.3	2.6	6.2
脱硝B侧入口O ₂ 质量分数/%	4.6	3.0	5.0
脱硝A侧还原剂耗量/(kg/h)	83.80	45.74	43.21
脱硝B侧还原剂耗量/(kg/h)	86.26	33.96	34.27

表4 变负荷下SCR系统预测模型输出数据和实测数据

Tab. 4 Output data and measured data of the forecast model of SCR system under variable load

参数	满负荷工况		中负荷工况		低负荷工况	
	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值
脱硝A侧出口NO _x 质量浓度/(mg/m ³)	27.10	29.02	47.14	57.55	38.91	40.03
脱硝B侧出口NO _x 质量浓度/(mg/m ³)	26.98	26.68	52.76	56.26	37.55	36.52
脱硝A侧氨逃逸质量浓度/(mg/m ³)	0.10	0.10	0.17	0.13	0.09	0.07
脱硝B侧氨逃逸质量浓度/(mg/m ³)	2.05	2.10	0.14	0.13	2.05	2.25
脱硝电耗/kW	236.29	238.05	186.14	213.68	151.60	145.84

由表3和表4可知,不同负荷条件下SCR系统的关键参数变化较大,绝大多数关键元素的数值随着负荷的降低而有所下降,而脱硝出口NO_x浓度变化不一。依据表4对主要参数的变化进行分析,绘制成图4,将预测值与实际测量值进行

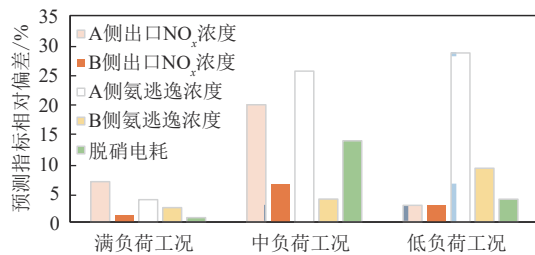


图4 变负荷下预测指标和实测结果相对偏差图

Fig. 4 Relative deviation diagram of predicted index and measured result under variable load

比较分析,可以看出,除了脱硝A侧的出口NO_x浓度和氨逃逸浓度预测相对偏差大于20%外,其他指标预测的相对偏差都在15%以内;机组正常运行时氨逃逸浓度绝对数值较小,略微波动就会产生大的相对偏差,因此,对于绝对数值小的物理量,可以通过检核绝对偏差来评定模型的准确性;此外,根据脱硝装备运行效果评价相关标准内容,烟气成分分布均匀性小于15%即为A级,因此脱硝系统指标预测模型是有效的,其准确度在可接受范围内,具有较好的参考性。

4 结论

通过导出火电厂在线监测数据,利用数据预处理与数据挖掘技术对其进行选择性分析,挖掘出了影响环保设备性能的关键因素,利用回归分析算法进行相应的数学建模,并对数据模型进行指标评价,提出一种适宜于火电厂运行数据的数据处理方法。在此基础上依托某600 MW燃煤发电机组SCR脱硝系统运行数据,建立了数据模型和指标评价,并进行验证。结果表明,模型的预测数据与实测数据较吻合,烟气主要成分预测的相对偏差都在15%以内,可信度较高,可为后续其他环保设备的预测研究提供借鉴与参考。

参考文献

- [1] 赵国栋, 易欢欢, 糜万军. 大数据时代的历史机遇[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
ZHAO G D, YI H H, MI W J. Historical opportunities in the era of big data[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [2] 王建民. 《生态环境大数据建设总体方案》政策解读[J]. 环境保护, 2016, 44(14): 12-14.

- WANG J M. Interpretation to the Master Plan of Ecological Environment Big Data[J]. Environmental Protection, 2016, 44(14): 12-14.
- [3] 白浩, 袁智勇, 梁朔, 等. 基于大数据处理的配网运行效率关联性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 61-67.
BAI H, YUAN Z Y, LIANG S, et al. Correlation analysis of distribution network operation efficiency based on big data processing[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 61-67.
- [4] 陈人杰, 李华取, 彭晓涛, 等. 基于改进TOPSIS的新能源大数据服务项目评价研究[J]. 电力建设, 2021, 42(3): 126-134.
CHEN R J, LI H Q, PENG X T, et al. Study on evaluation method for new energy big data service project applying improved TOPSIS[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(3): 126-134.
- [5] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社. 2018.
Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press. 2018.
- [6] 郑婷婷, 周月桂, 金圻焯. 燃煤电厂多种烟气污染物协同脱除超低排放分析[J]. 热力发电, 2017, 46(4): 10-15.
ZHENG T T, ZHOU Y G, JIN Q Y. Integrated removal and ultra-low emission of multiple pollutants for coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(4): 10-15.
- [7] 赵春生, 杨君君, 王婧, 等. 燃煤发电行业低碳发展路径研究[J]. 发电技术, 2021, 42(5): 547-553.
CHUANG C S, YANG J J, QANG J, et al. Research on low-carbon development path of coal-fired power industry[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 547-553.
- [8] 杨勇平. 燃煤发电系统能源高效清洁利用的基础研究综述[J]. 发电技术, 2019, 40(4): 308-315.
YANG Y P. Review of basic research on energy clean and efficient utilization in coal-fired power systems[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(4): 308-315.
- [9] 帅伟, 李立, 崔志敏, 等. 基于实测的超低排放燃煤电厂主要大气污染物排放特征与减排效益分析[J]. 中国电力, 2015, 11(3): 131-137.
SHUAI W, LI L, CUI Z M, et al. Analysis of primary air pollutant emission characteristics and reduction efficiency for ultra-Low emission coal-fired power plants based on actual measurement[J]. Electric Power, 2015, 11(3): 131-137.

- [10] 朱法华, 王临清. 煤电超低排放的技术经济与环境效益分析[J]. 环境保护, 2014, 21(11): 28-33.
ZHU F H, WANG L Q. Analysis on technology-economy and environment benefit of ultra-low emission from coal-fired power units[J]. Environmental Protection, 2014, 21(11): 28-33.
- [11] 徐振, 莫华, 杨光俊, 等. 火电厂大气污染物自动监测达标判定现状与国际经验借鉴[J]. 环境影响评价, 2018, 40(1): 38-41.
XU Z, MO H, YANG G J, et al. Present situation and international experience of using continuous emissions monitoring to assess the compliance with emission limit values of air pollutants for thermal power plants[J]. Environmental Impact Assessment, 2018, 40(1): 38-41.
- [12] 朱法华, 王圣. 煤电大气污染物超低排放技术集成与建议[J]. 环境影响评价, 2014(5): 25-29.
ZHU F H, WANG S. Coal power generation technology integration and recommendations for ultra-low emission of air pollutants[J]. Environmental Impact Assessment, 2014(5): 25-29.
- [13] 史文峥, 杨萌萌, 张绪辉, 等. 燃煤电厂超低排放技术路线与协同脱除[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4308-4318.
SHI W Z, YANG M M, ZHANG X H, et al. Coal-fired power plant ultra-low emission technology route and coordinated removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(16): 4308-4318.
- [14] 中国环境保护产业协会. 燃煤电厂烟气超低排放技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
China Environmental Protection Industry Association. Ultra-low emission technology of coal-fired power plant flue gas[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [15] 张东霞, 苗新, 刘丽平. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12.
ZHANG D X, MIAO X, LIU L P. Research on development strategy for smart grid big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-12.
- [16] 杨新民, 曾卫东, 肖勇. 火电站智能化现状及展望[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 1-8.
YANG X M, ZENG W D, XIAO Y. Present situation and prospect of thermal power plant intelligentization[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 1-8.
- [17] 曾德良, 杨婷婷, 程晓, 等. 数据挖掘方法在实时厂级负荷优化分配中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(11): 109-114.
ZENG D L, YANG T T, CHENG X, et al. Application of data mining method in real-time optimal load dispatching of power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(11): 109-114.
- [18] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 503-511.
PENG X S, DENG D Y, CHENG S J, et al. Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 503-511.
- [19] 张磊. 大规模互联网图像检索与模式挖掘[J]. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 1641-1653.
ZHANG L. Large-scale web image search and pattern mining[J]. Scientia Sinica Informationis, 2013, 43: 1641-1653.
- [20] 刘炳含, 付忠广, 王鹏凯, 等. 大数据挖掘技术在燃煤电站机组能耗分析中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3578-3587.
LIU B H, FU Z G, WANG P K, et al. Big data mining technology application in energy consumption analysis of coal-fired power plant units[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3578-3587.
- [21] 胡水星. 大数据及其关键技术的教育应用实证分析[J]. 远程教育杂志, 2015, 33(5): 46-53.
HU S X. An empirical analysis of big data and its key technology in educational practice[J]. Journal of Distance Education, 2015, 33(5): 46-53.
- [22] 刘吉臻, 胡勇, 曾德良, 等. 智能发电厂的架构及特征[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6463-6473.
LIU J Z, HU Y, ZENG D L, et al. Architecture and feature of smart power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6463-6473.
- [23] 刘云霞. 数据预处理[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2011.
LIU Y X. Data preprocessing[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2011.
- [24] 陈宝树, 党齐民. Web数据挖掘中的数据预处理[J]. 计算机工程, 2002, 28(7): 125-127.
CHEN B S, DANG Q M. Data preprocess in Web data mining[J]. Computer Engineering, 2002, 28(7): 125-127.
- [25] 刘炳含, 付忠广, 王永智, 等. 基于并行计算的大数据挖掘技术及其在电站锅炉性能优化中的应用[J]. 动力工程学报, 2018, 38(6): 431-439.
LIU B H, FU Z G, WANG Y Z, et al. Big data mining technology based on parallel algorithm and its application in power plant boiler performance optimization[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(6): 431-439.
- [26] 王大荣, 张忠占. 线性回归模型中变量选择方法

综述[J]. 数理统计与管理, 2010, 29(4): 615-627.

WANG D R, ZHANG Z Z. Variable selection for linear regression models: a survey[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2010, 29(4): 615-627.

- [27] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 2-10.
DING S F, QI B J, TAN H Y. An overview on theory and algorithm of support vector machines[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(1): 2-10.

收稿日期: 2022-06-13。

作者简介:



阮存钦

阮存钦(1969), 男, 高级工程师, 主要从事电厂控制系统研究和技术服务工作, 492432415@qq.com;



洪志刚

洪志刚(1997), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为火电厂节能环保、大气污染物治理, 1753990151@qq.com;



张杨

张杨(1985), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事火电厂环境保护方面的技术研究和技术服务工作, 本文通信作者, yang-zhang@chder.com。

(责任编辑 辛培裕)