



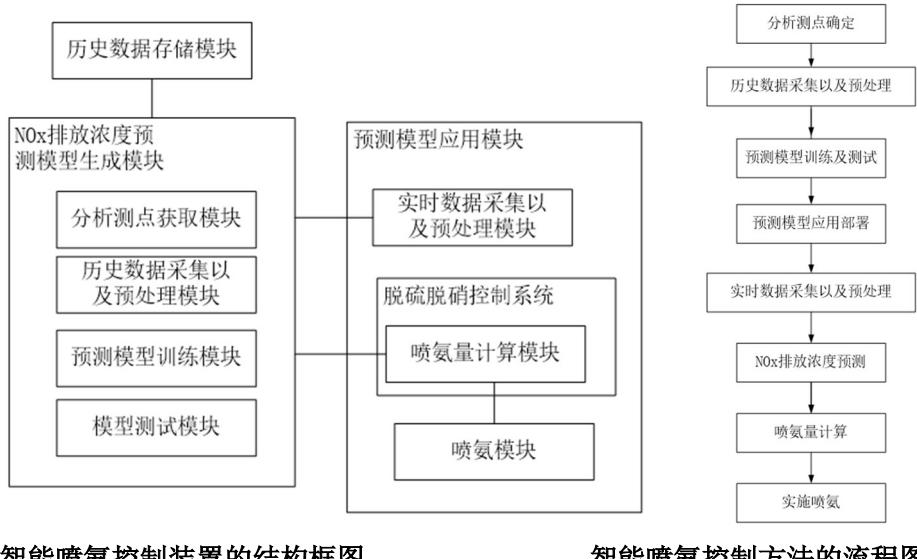
# NO<sub>x</sub> 排放浓度实时精准预测及智能喷氨技术

## 1. 技术背景

NO<sub>x</sub>（氮氧化物）作为火电厂锅炉燃煤燃烧排放的大气污染物之一，其排放量成为衡量锅炉燃烧优劣和是否绿色运行的关键指标。SCR 脱销喷氨系统是一种通过化学反应来降低 NO<sub>x</sub> 排放的有效技术，目前在大型电厂锅炉得到了普遍应用。但是，目前的脱硝喷氨系统采用固定氨气分配，不能适应机组灵活性调峰情况下脱硝入口烟气 NO<sub>x</sub> 的多变性，存在过量喷氨和喷氨量不足等问题。在满足机组出口排放的情况下，过量喷氨会造成消耗品增加以及对锅炉空预器堵塞等问题，喷氨量过少无法满足 NO<sub>x</sub> 出口排放标准。为了实现 SCR 出口 NO<sub>x</sub> 浓度的有效控制，必须准确且及时地预测出口 NO<sub>x</sub> 浓度，控制系统根据预测结果实时控制喷氨量，以实现智能化定量喷氨。但是，现有采用深度学习中的 LSTM 神经网络进行时间序列预测时，需要不断对 LSTM 神经网络的各参数进行调优，才能拥有较高的预测精度，从而计算开销大，调参时间长，无法得到 LSTM 神经网络最优参数组合。

## 2. 技术方案

提出了一种氮氧化物的精准预测方法，支持电厂变工况条件下的实现智能喷氨控制。首先，基于专家知识库，分别建立了 1 个参数、4 个参数和 14 个参数的 LSTM 模型。实验结果表明，三个模型均具有较高的预测性能，其中 4 参数模型具有更高的预测精度和稳定性。然后，在 4 个参数的情况下，分别就采用单步滚动预测和多步预测两种预测方式进行比较，结果表明，多步预测在预测精度和训练时间上均优于单步滚动预测。将模型 NO<sub>x</sub> 预测结果反馈至 DCS 控制的 SCR 喷氨脱硝系统，使脱销率提高了 8.1%，表明 LSTM 模型能够实现变工况等复杂情况下 NO<sub>x</sub> 排放量的精准预测，实现全负荷范围内的精准喷氨。



智能喷氨控制装置的结构框图

智能喷氨控制方法的流程图

## 3. 技术创新点

根据实时采集 NO<sub>x</sub> 排放浓度，对其进行未来一段 (d+n) 时间 NO<sub>x</sub> 排放浓度的精准预测，并将预测结果上传到 DCS 控制系统，控制 SCR 喷氨脱硝系统的喷氨量。将这一系列过程封装成一

套控制装置，解决锅炉燃烧 NOx 排放浓度测量的延迟性和准确性问题，实现智能化定量喷氨，一方面降低设备风险，另一方面满足 NOx 出口排放标准。

表 1 两个模型 NOx 排放浓度性能对比

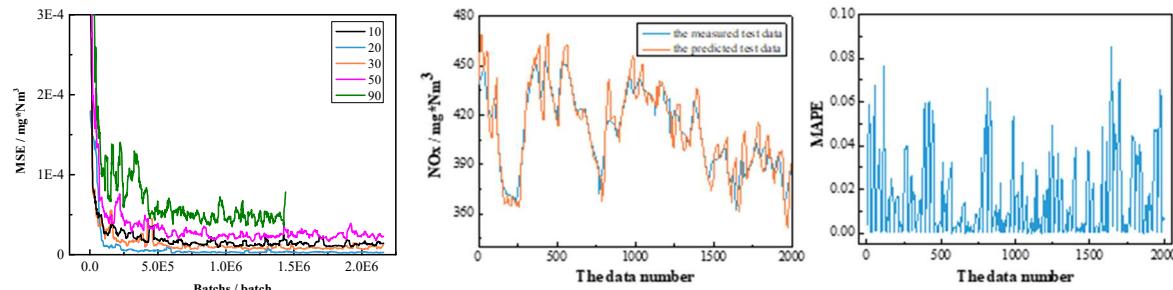
	测试数据集		2 个月后		6 个月后	
	精度 Q	$E_{MAPE}$	精度 Q	$E_{MAPE}$	精度 Q	$E_{MAPE}$
固定测点模型	99.05%	0.0050	99.57%	0.0026	99.58%	0.0027
随机测点模型	99.00%	0.0048	99.59%	0.0021	99.54%	0.0026

表 2 两个模型 NOx 排放浓度测试集性能对比

	现场实时数据 1		现场实时数据 2	
	精度 Q	$E_{MAPE}$	精度 Q	$E_{MAPE}$
固定测点模型	98.80%	0.0070	99.63%	0.0092
随机测点模型	98.91%	0.0059	98.76%	0.0078

#### 4. 应用案例

以江苏省某电厂 7#机组 2019 年 1 月至 2019 年 6 月之间共计 6 个月的数据为例，通过对三组测点进行建模训练和稳定性测试，以平均绝对百分比误差 (MAPE) 为评价标准。每隔 5s 从锅炉机组的 SIS 系统采集 NOx 排放浓度与锅炉各测点数据，训练数据共计 200000 条，覆盖锅炉约 11~12 天的运行历史，涵盖了各种变工况情况。将数据的前 90% 作为训练集，后 10% 作为测试集。由于 NOx 排放受负荷、燃煤量、风量等工况的影响，机组工作状态前后之间具有关联性，因此该数据在时间上具有天然的连续性，timesteps 的大小体现机组运行数据本身在时间上的关联性，由生产过程中的客观因素决定。另一方面，随着 timesteps 的增大，LSTM 在时间维度上的层数增加，网络结构的复杂度和计算开销也同时增大。因此，合适的 timesteps 能提高模型训练的准确度并减小计算开销。



分别取 2019 年 2 月和 6 月的 20000 组数据对三个模型进行稳定性测试，结果如表所示。

表 2 三种模型稳定性对比

模型	准确率/%	MAPE	预测时间	单步
测试集	98.59	0.0076	0:00:27	0:01:45
201802	98.61	0.0068	0:00:32	
201806	98.74	0.0064	0:00:27	

表 1 MAPE 误差统计表

MAPE	测试集	201802	201806
Mean	0.007601679	0.006319811	0.006382955
std	0.011820141	0.012157363	0.010821441
min	3.55E-07	4.64E-08	5.50E-09
25%	0.001348624	0.001361417	0.001306617
50%	0.003254628	0.00301061	0.003025733
75%	0.008654051	0.007464832	0.006958181
Max	0.185456417	0.215374645	0.189644707

项目联系人：唐静博士

17611166198

tangjing@bipt.edu.cn

联系地址：北京市大兴区黄村镇清源北路 19 号北京石油化工学院信息工程学院；邮政编码：102617