

DOI:10. 3969/j. issn. 1674 - 1951. 2019. 10. 002

火电机组 SCR 脱硝系统精准喷氨优化研究

Research on precise ammonia injection retrofit for SCR denitration systems in thermal powers

郝正,胡小夫,王云,汪洋,沈宪明,李伟,王桦
HAO Zheng, HU Xiaofu, WANG Yun, WANG Yang,
SHEN Xianming, LI Wei, WANG Hua

(中国华电科工集团有限公司,北京 100070)
(China Huadian Engineering Corporation Limited, Beijing 100070, China)

摘 要:全国火电厂机组脱硝系统超低排放标准普及之后,传统的 SCR 脱硝工艺无法精确控制喷氨量,从而导致 NO_x 局部排放超标、氨逃逸率偏高和空气预热器堵塞等问题。以江苏某电厂 #7 机组为例,对该机组进行了分区喷氨改造,增加了多点 NO_x 质量浓度测量系统及智能化喷氨控制逻辑,建立了大数据预测 NO_x 分析站,尝试更加精确地预测烟气中 NO_x 的质量浓度。改造后,该机组氨耗量降低了 8% ~ 10%,出口 NO_x 分布均匀,氨逃逸率降低,解决了空气预热器堵塞问题,实现了 SCR 脱硝系统超低稳定排放。

关键词:NO_x;精准喷氨;大数据分析;实时预测;氨逃逸;脱硝;超低排放

中图分类号:X 701 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 1951(2019)10 - 0008 - 04

Abstract:After the popularization of ultra-low emission standards for denitration systems in domestic thermal power plants, inaccurate ammonia injection of traditional SCR denitration systems has resulted in excessive NO_x emissions, high ammonia escape rate, blockage of air preheaters and so on. Taking No. 7 unit of a power plant in Jiangsu as an example, ammonia injection retrofit for the unit was executed sector by sector, and multi-point measurement system for NO_x mass concentration and intelligent ammonia injection control logic were added. A big data prediction and analysis station for NO_x was established, which can predict the NO_x mass concentration more accurately. After the retrofit, the ammonia consumption of the unit is reduced by 8% ~ 10%, NO_x distribution at the outlet is uniform, the ammonia escape rate is reduced, the air preheater blockage problem is solved. The ultra-low emission of the SCR denitration system is realized.

Keywords:NO_x; precise ammonia injection; big data analysis; real-time prediction; ammonia escape; denitration; ultra-low emission

0 引言

选择性催化还原(SCR)脱硝技术是目前火电机组应用最广、技术最成熟的烟气脱硝技术。由于国家鼓励火电厂进行灵活性改造,机组负荷变动更加频繁,变动幅度也变得更大,而机组负荷的大幅变化会导致 SCR 脱硝系统入口烟气流场发生改变,同时会导致入口 NO_x 质量浓度复杂多变和 NO_x 分析仪响应滞后等问题,使得常规 SCR 脱硝控制系统难以精确控制氨氮摩尔比。运行人员为保证达标排放,只能过量喷氨,而逸出的氨会与烟气中的 SO₃ 和

H₂O 反应生成硫酸氢铵(ABS),烟温降低后 ABS 易附着在空气预热器(以下简称空预器)的表面造成空预器堵塞、系统阻力增大,甚至会导致风机失速,被迫停炉清理空预器,给机组的安全运行带来负面影响^[1-8]。

本文以江苏某电厂 #7 机组 SCR 系统为研究对象,针对该机组运行中存在的反应器出口 NO_x 质量浓度分布偏差大、氨逃逸率偏高以及空预器堵塞等问题,对该机组 SCR 脱硝系统进行精准喷氨优化改造。通过大数据分析站进行 NO_x 大数据预测,结合外挂智能控制器稳定喷氨总量,同时利用分区喷氨控制阀和 NO_x 全断面多点测量系统均衡控制各分区喷氨量,显著降低氨耗量,实现 SCR 系统稳定超低排放,同时大幅减少氨逃逸率,基本解决空预器由于

ABS 引起的结垢堵塞问题。

1 机组概况

江苏某电厂 330 MW 机组锅炉为四角切圆燃烧方式、自然循环汽包炉,优化改造前在 SCR 脱硝装置反应器出、入口进行了网格法测试,测试结果显示,反应器入口烟气中 NO_x 质量浓度最高约为 400 mg/m^3 ,烟气速度场分布较好,无需进行流场改造,反应器出口 NO_x 质量浓度场分布较差,不均匀度(用相对标准偏差来衡量)约为 40%。该脱硝装置反应器采用液氨作为脱硝还原剂,按 3 层催化剂布置设计,设置 1 层预留层,采用蜂窝式催化剂,催化剂主要参数见表 1,脱硝系统入口烟气设计值见表 2 ($6\%\text{ O}_2$ 、标态、干基)。在烟气出口处 A 侧和 B 侧分别加装 1 套 NO_x 检测仪,各设 8 个采样点,各采样点处于同一平面上。

表 1 催化剂主要参数
Tab.1 Main parameters of the catalyst

项目		参数
使用温度/ $^{\circ}\text{C}$	设计值	320
	允许最高值	420
	允许最低值	300
脱硝效率/%		>80
氨逃逸率/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$		<2.3
SO_2/SO_3 转化率/%		<1.0

表 2 脱硝系统入口烟气设计值
Tab.2 Design value of the flue gas at denitration system inlet

项目		质量浓度	
		mg/m^3	
飞灰	35 000	SO_2	1 500
NO_x	400	SO_3	18

2 SCR 脱硝精准喷氨优化系统

该机组改造前, NO_x 质量浓度高的区域由于喷氨不足易造成脱硝效率低, NO_x 质量浓度低的区域由于喷氨过量易造成氨逃逸率高。SCR 脱硝精准喷

氨优化系统对入口 NO_x 质量浓度进行高精度实时预测,结合外挂智能控制器稳定喷氨总量,在反应器喷氨格栅之前对喷氨管道进行分区,均衡控制各分区喷氨量,最终实现 SCR 系统稳定超低排放。控制系统主要由喷氨总量控制单元和分区喷氨控制单元构成。

2.1 喷氨总量控制单元

喷氨总量控制单元主要由外挂智能控制器和大数据分析站组成。外挂智能控制器是 SCR 脱硝精准喷氨优化系统的核心,大数据分析站是喷氨总量控制单元强有力的支撑。大数据分析站可与外挂智能控制器协同共存,亦可单独为分散控制系统(DCS)提供预测结果。

外挂智能控制器可以在复杂多变的运行工况下实现喷氨系统的完全自我控制,核心是通过在线神经网络实时训练模型,实时辨识系统参数并进行滚动预测,然后根据预测结果寻找最优控制指令。该控制器的具体功能如下。

(1)内置燃烧 NO_x 质量浓度预测模块,根据燃烧机理,采用基于改进径向基函数(RBF)的神经网络对入口 NO_x 质量浓度进行高精度实时预测,解决常规仪表测量延迟的问题。

(2)内置自适应内模控制及超前相位补偿模块,针对控制对象的迟延惯性及非线性等控制难点,实现脱硝的快速稳定控制。

(3)内置吹扫自闭环模块,完成吹扫工况下各参数的无扰预测,实现脱硝全程无盲区控制。

大数据分析站的预测结果将辅助喷氨控制系统进行喷氨量调节,随着技术手段的调整及实际运行数据的积累,其预测精度会越来越高。图 1 为大数据分析站的工作原理示意图。该分析站根据采集到的相关数据,利用基于长短期记忆网络(LSTM)的大数据分析算法建立炉膛燃烧 NO_x 生成量预测模型^[9],实现全负荷范围内 NO_x 生成量的实时预测,为精准喷氨提供准确的前馈数据,从而解决复杂燃烧系统无法快速、准确预测 NO_x 的问题,大幅度降

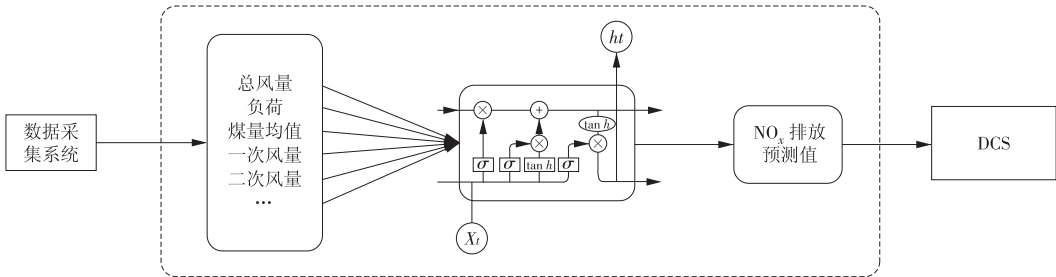


图 1 大数据分析站工作原理示意

Fig.1 Working principle of the big data analysis station

低喷氨量,减少氨逃逸。图 2 为大数据分析站对反应器入口 NO_x 质量浓度预测的结果,由图 2 可知,预测结果与真实值相比,准确率高达 98.9%。

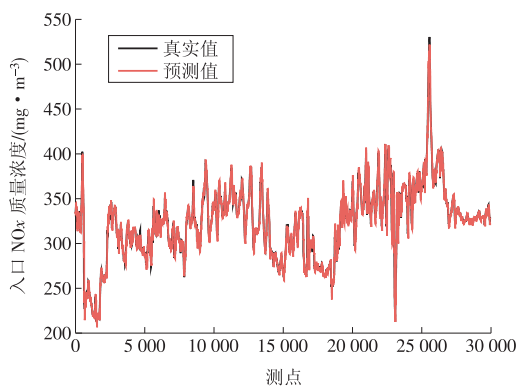


图 2 大数据分析站预测结果

Fig. 2 Prediction results of big data analysis station

2.2 分区喷氨控制单元

喷氨格栅分区技术已逐渐在火电厂脱硝领域推广应用,其控制目标是使同一截面上出口 NO_x 质量浓度分布均衡。在反应器喷氨格栅之前对喷氨管道进行分区,各分区增加调节阀门和测量仪表,同时在反应器出口安装 NO_x 多点测量系统,测量结果反馈至 DCS 中的分区喷氨控制系统,控制系统依据反应器出口 NO_x 的分布情况,调整各喷氨分区调节阀开度,其优化目标为控制反应器出口 NO_x 质量浓度相对标准偏差在 10% 以内,同时可显著降低氨逃逸率^[10]。

根据喷氨总量控制单元的特性,将其与分区喷氨控制单元进行一体化设计,以喷氨总量控制为主,分区喷氨控制为辅,优化分区喷氨调节的速度及幅度,并设置联锁条件,使两者互相包容,互不干扰。经收集运行数据得知,精准喷氨优化改造系统正式投运半年后,耗氨量可降低 8% ~ 10%,且空预器差压平稳,未发现增大现象。

3 测试结果及分析

3.1 精准喷氨优化前、后系统运行参数测试结果及分析

图 3 为优化前的 A 侧脱硝系统运行参数趋势图。由图 3 可知,入口和出口 NO_x 质量浓度变化趋势基本一致,出口 NO_x 质量浓度随负荷变化而波动。在 2.5—8.0 min 这段时间,机组负荷由 242 MW 降至 212 MW,入口 NO_x 质量浓度由 250 mg/m^3 升至 395 mg/m^3 ,之后的几分钟出口 NO_x 质量浓度波动较大,最高为 60 mg/m^3 ,最低为 20 mg/m^3 ,并且稳定时间较长,易造成 NO_x 局部超标排放。

图 4 为优化后的 A 侧脱硝系统运行参数趋势

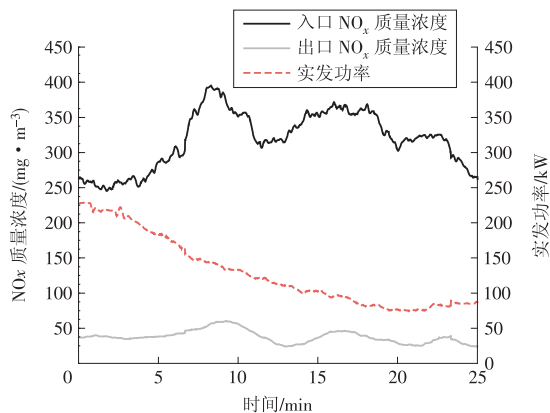


图 3 改造前入口、出口 NO_x 质量浓度和机组负荷变化趋势

Fig. 3 Changes of NO_x mass concentrations at inlet/outlet and actual power before the retrofit

图。由图 4 可知,优化后出口 NO_x 质量浓度随入口 NO_x 质量浓度变化波动较小,控制精度明显优于改造前。1.0—3.5 min 这段时间,机组负荷由 249 MW 降至 233 MW;2.5—6.0 min,入口 NO_x 质量浓度由 246 mg/m^3 升至 429 mg/m^3 ,之后出口 NO_x 质量浓度在 35 ~ 49 mg/m^3 的区间内波动,并且在入口 NO_x 质量浓度波动结束后迅速进入稳定状态。精准喷氨优化后出口 NO_x 质量浓度波动小、稳定快的原因是:在入口 NO_x 质量浓度未反馈测量值之前,精准喷氨系统利用预测模型超前调整喷氨调节阀的开度,控制喷氨量匹配预测 NO_x 质量浓度变化量,在得到出、入口 NO_x 质量浓度测量值后,又利用神经网络的特性快速进行精确调整,使得目标值在极小的范围内波动,显著降低了耗氨量。

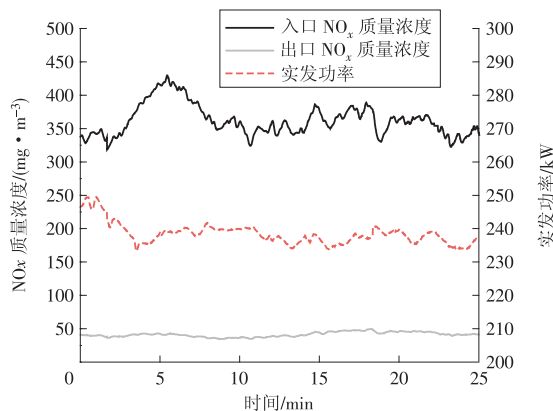


图 4 改造后入口、出口 NO_x 质量浓度和机组负荷变化趋势

Fig. 4 Changes of NO_x mass concentrations at inlet/outlet and actual power after the retrofit

3.2 精准喷氨优化前、后出口 NO_x 测试结果及分析

在 330 MW 工况下对 SCR 装置优化改造前、后的运行情况进行了测试。反应器 A、B 出口 8 个测

点的标准 NO_x 测量结果分别如图 5、图 6 所示。改造前反应器 A 出口 NO_x 排放不均匀度高达 37%,改造后降至 8%,比改造前降低了 29 个百分点;反应器 B 出口 NO_x 排放不均匀度由改造前的 47% 降至改造后的 8%,比改造前降低了 39 个百分点;反应器 A、B 出口 NO_x 质量浓度分布不均匀度由改造前的 37% 和 47% 降至 10% 以内。

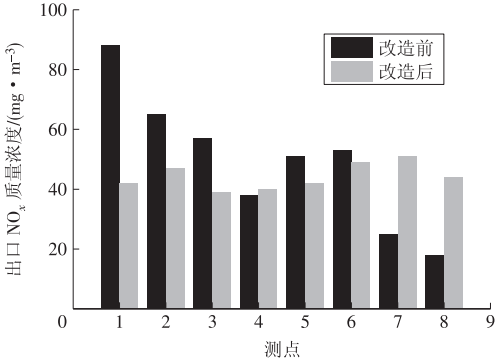


图 5 A 侧精准喷氨优化前、后出口 NO_x 质量浓度对比

Fig. 5 Comparison of NO_x mass concentrations before and after the precise ammonia injection retrofit on side A

3.3 精准喷氨优化前、后氨逃逸率测试结果及分析

SCR 脱硝反应器在保持高脱硝效率的同时, NH₃/NO_x 分布偏差越大氨逃逸率越高^[4]。在 330

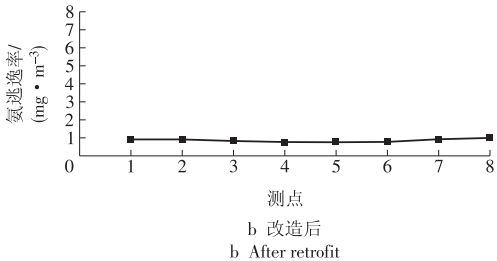
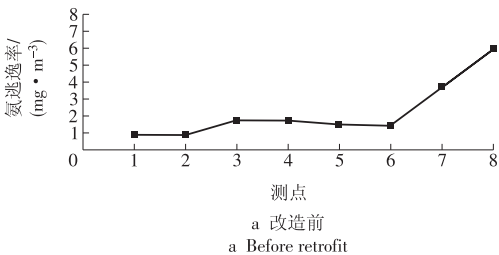


图 7 A 侧精准喷氨优化前、后出口氨逃逸率对比

Fig. 7 Comparison of ammonia escape rates before and after the precise ammonia injection retrofit on side A

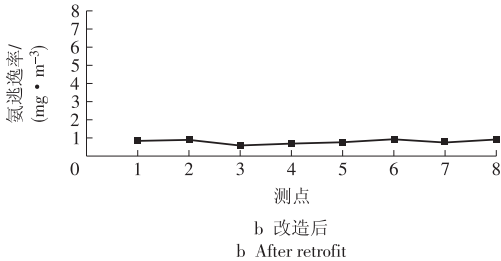
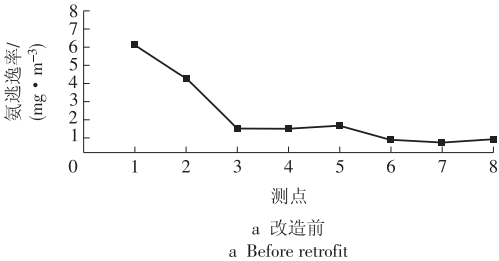


图 8 B 侧精准喷氨优化前、后出口氨逃逸率对比

Fig. 8 Comparison of ammonia escape rates before and after the precise ammonia injection retrofit on side B

4 结论

本文采用由喷氨总量控制单元和分区喷氨控制单元构成的 SCR 脱硝精准喷氨优化系统,解决了因

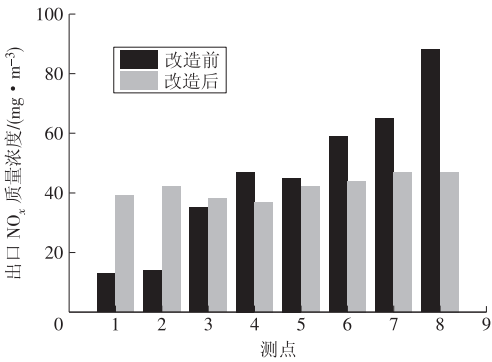


图 6 B 侧精准喷氨优化前、后出口 NO_x 质量浓度对比

Fig. 6 Comparison of NO_x mass concentrations before and after the precise ammonia injection retrofit on side B

MW 工况下对 SCR 装置优化调整前、后的氨逃逸情况进行了测试。反应器 A、B 的 8 个测点氨逃逸率测试结果分别如图 7、图 8 所示。改造前反应器 A、B 均存在较严重的氨逃逸情况,最高可达 6.1 mg/m³,改造后两侧反应器出口氨逃逸率分布均匀,均维持在 1.0 mg/m³ 以下。通过精准喷氨优化系统降低了顶层催化剂入口 NH₃/NO_x 分布偏差,从而消除了 SCR 脱硝反应器局部过高的氨逃逸率,并减轻了空预器 ABS 堵塞风险。

脱硝系统首层催化剂入口处 NH₃/NO_x 分布偏差较大和控制精度差而引起的 NO_x 局部排放超标、氨逃逸率偏高和空预器堵塞等问题,使得该系统可降低 8% ~ 10% 耗氨量,具有出口 NO_x 排(下转第 43 页)

汽压力的调节精度满足 DL/T 657—2015《火力发电厂模拟量控制系统验收测试规程》,本控制策略可保证机组快速、准确达到目标负荷,并在目标负荷安全运行。

5.3 辅机 RB 工况下的给水控制

机组负荷稳定在 900 MW,2 台给水泵运行,运行人员手动打闸 1 台小汽轮机,触发给水泵 RB 动作。分析整个过程,由于 RB 动作开始时快速切除磨组,炉膛压力有一定波动,但能快速恢复,说明锅炉烟风系统工况基本稳定;高加出口给水流量初期偏差大,但随着另一台给水泵转速增大,出力增加后逐渐恢复正常,给水指令按着预设的降速率下降,给水流量能快速调整到目标流量,各金属受热面无超温现象,其他各主要参数均可在安全范围内自动调节,给水控制满足要求,机组运行平稳。

6 结束语

根据现场实际情况,本工程选择高加出口给水流量作为机组给水控制的过程值,同时给水控制策略考虑机组减温水流量对过热器蒸汽温度影响,通过修正高加出口给水实际流量值,实时修正给水流量与减温水流量的比值,在机组主汽压力及主汽温
.....
(上接第 11 页)放均匀、氨逃逸率较低且空预器差压平稳等优点。

参考文献:

[1] 罗志,牛国平,王晓冰,等. 分区混合动态喷氨技术工程应用[J]. 热力发电,2018,47(8):125-131.

[2] 方明成,刘玉强,王润明,等. SCR 脱硝系统喷氨优化调整试验研究[J]. 华电技术,2018,40(9):61-65.

[3] 梁俊杰,张战锋,周健,等. SCR 烟气脱硝系统运行全过程数据分析[J]. 热力发电,2018,47(12):93-99.

[4] 周健,梁俊杰,黄飞,等. 应用 SCR 氨喷射技术解决空预器硫酸氢铵堵塞问题[J]. 电站系统工程,2018,34(3):46-48.

[5] 黄德保,马大卫,何军,等. 超低改造后 SCR 脱硝氨逃逸表问题分析及处理措施[J]. 电力科技与环保,2019,35(1):25-27.

[6] 何金亮,金理鹏,卢承政,等. 燃煤电站 SCR 烟气脱硝系统运行典型故障诊断[J]. 中国电力,2016,49(8):148-153.

[7] 赵利,李志峰,万季霖,等. SCR 脱硝系统中存在的问题分析[J]. 华电技术,2016,38(6):71-72.

[8] 曹玮. 热电厂 SCR 系统反应器流场均匀性数值模拟研究[J]. 华电技术,2015,37(4):64-66.

[9] 隋秀坤. 330 MW 机组 SCR 脱硝系统运行特性分析[J].

度控制中取得了良好的控制效果;此外,为防止水冷壁超温锅炉 MFT 动作,设计给水焓值超驰调节回路;RB 动作时,改变给水设定滞后时间,防止水冷壁超温或主汽温度下降过快。该给水控制策略可满足机组在动态及稳态时的给水流量,能够保证机组正常、安全、稳定运行,并可为其他同类型机组的给水控制策略提供借鉴。

参考文献:

[1] 樊泉桂,闫维平,闫顺林,等. 锅炉原理[M]. 北京:中国电力出版社,2008.

[2] 张雨飞. 超超临界火电机组热工控制技术[M]. 北京:中国电力出版社,2013.

[3] 赵志丹,高奎,陈志刚,等. 超超临界机组模拟量控制系统的调试及优化[M]. 北京:中国电力出版社,2016.

[4] 李俊娇,赵伟华. 超临界 600 MW 机组给水控制策略[J]. 自动化应用,2015(4):67-68.

(本文责编:陆华)

作者简介:

辛志波(1989—),男,陕西西安人,工程师,工学硕士,从事新建火电机组分系统及整套启动调试方面的工作(E-mail:xinzhibo@tpri.com.cn)。

华电技术,2015,37(6):5-6.

[10] 方明成,刘玉强,王润明,等. SCR 脱硝系统喷氨优化调整试验研究[J]. 华电技术,2018,40(9):61-65.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

郝正(1981—),男,河北石家庄人,工程师,从事环保技术和热工控制技术研究(E-mail:haoz@chec.com.cn)。

胡小夫(1985—),女,山东乳山人,高级工程师,工学博士,从事火电厂节能环保方面的工作(E-mail:huxf@chec.com.cn)。

王云(1973—),男,贵州兴义人,工程师,工学硕士,从事电厂热工自动化及数字化技术的研究(E-mail:wangyun@chec.com.cn)。

汪洋(1980—),男,河北保定人,高级工程师,工学硕士,从事烟气余热利用及流场模拟方面的研究(E-mail:wangyang@chec.com.cn)。

沈宪明(1972—),男,湖北广水人,高级经济师,从事环保技术研究及工程管理方面的工作。

李伟(1971—),男,安徽全椒人,高级工程师,从事环保技术研究及工程管理方面的工作。

王桦(1977—),男,山东莱阳人,工程师,从事环保技术研究及工程管理方面的工作。