

先进超超临界空冷汽轮发电机组高位布置技术及工程应用

王树民¹, 张翼^{1*}, 徐陆², 李延兵³, 顾永正⁴, 卓华⁵, 孙锐⁶, 张满平⁷,
姜士宏⁶, 刘建海⁴, 李红星²

(1. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100011; 2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 西安 710075; 3. 国能锦界能源有限责任公司, 陕西榆林 719000; 4. 国电电力发展股份有限公司, 北京 100101; 5. 国家能源集团新能源技术研究院有限公司, 北京 102209; 6. 电力规划设计总院, 北京 100120; 7. 中国能源建设集团有限公司, 北京 100022)

摘要: 提高燃煤发电机组效率是实现节能降碳的直接手段, 700 °C 超超临界发电的工程应用受制于高温合金材料价格成本阻碍, 有必要探索新布置、新结构、缩短高温蒸汽管道以降低工程造价。本文以锦界电厂三期为例, 介绍了超超临界空冷汽轮发电机组高位布置技术取得的工程化创新实践。该工程实践表明, 锦界电厂三期作为世界首例高位布置示范工程, 主厂房采用钢筋混凝土框架-剪力墙结构, 可有效降低整体重心、提高抗震性能, 通过技术攻关有效保障主厂房结构、高温蒸汽管道和汽轮发电机组的安全性; 与常规布置(运转层 12.6~17 m 标高)相比, 高位布置(运转层 65 m 标高)主蒸汽、再热蒸汽管道分别可节省材料约 34.2%、20.9%, 空冷岛排汽管道可节省的材料达 93%, 还可以较设计值节省供电煤耗 4.5~5.1 g/(kW·h), 整体技术经济性显著提高; 此外, 项目投产后的运行监测数据显示, 主厂房结构实时在线监测系统各参数均在安全阈值范围内, 厂房结构、关键设备均处于安全状态。研究建议, 加快发展清洁高效燃煤发电技术, 统筹协调我国富煤缺水“三北”地区清洁高效先进空冷煤电机组应用高位布置技术, 为未来 700 °C 超超临界煤电机组建设节约高温蒸汽管道提供实践经验。

关键词: 超超临界; 先进煤电; 空冷汽轮发电机组; 高位布置技术; 主厂房结构安全; 经济性; 实时在线监测

中图分类号: TK1 **文献标识码:** A

High-Level Layout Technology and Engineering Application for Advanced Air-Cooled Ultra-Supercritical Steam-Turbine Generator Unit

Wang Shumin¹, Zhang Yi^{1*}, Xu Lu², Li Yanbing³, Gu Yongzheng⁴, Zhuo Hua⁵, Sun Rui⁶,
Zhang Manping⁷, Jiang Shihong⁶, Liu Jianhai⁴, Li Hongxing²

(1. China Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 2. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China; 3. CHN Energy Jinjie Energy Co., Ltd., Yulin 719000, Shaanxi, China; 4. GD Power Development Co., Ltd., Beijing 100101, China; 5. CHN Energy New Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 6. China Electric Power Planning and Engineering Institute, Beijing 100120, China; 7. China Energy Engineering Co., Ltd., Beijing 100022, China)

收稿日期: 2022-11-24; 修回日期: 2023-02-15

通讯作者: *张翼, 国家能源投资集团有限责任公司教授级高级工程师, 研究方向为燃煤清洁高效低碳利用技术及应用;

E-mail: 16800801@chnenergy.com.cn

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

Abstract: Improving the power generation efficiency of coal-fired units is an effective measure to achieve energy conservation and carbon reduction. The engineering application of 700 °C ultra-supercritical coal-fired power generation is hindered by the high price of superalloy materials; therefore, it is necessary to explore new layouts and structures to shorten the high-temperature steam pipelines and reduce the engineering costs. By taking the phase III expansion project—the world’s first demonstration project of high-level layout—of the Jinjie coal-fired power plant as an example, this study introduces the engineering innovation practice of the high-level layout technology for an air-cooled ultra-supercritical steam-turbine generator unit. The results indicate that the reinforced concrete frame and shear wall structure can effectively lower the overall center of gravity and improve the seismic performance of the main power house, thereby ensuring the safety of the main power house structure, high-temperature steam pipelines, and steam turbine generator unit through technological breakthroughs. Compared with those of the conventional layout (its operating floor level being 12.6–17 m), the main steam and reheat steam pipelines of the high-level layout (its operating floor level being 65 m) can save 34.2% and 20.9% of raw materials, respectively; and exhaust steam pipes of the air-cooled island can save 93% of raw materials. Furthermore, the power supply coal consumption can be reduced by 4.5–5.1 g/(kW·h) compared with the design value, and the overall economical efficiency is significantly improved. The monitoring data after operation show that all parameters in the real-time on-line monitoring system of the main power house structure are within the safety threshold, and the plant structure and critical equipment are both in a safe state. Therefore, we propose to promote clean and efficient coal-fired power generation technologies and apply the high-level layout technology to the advanced air-cooled coal-fired power units in northeast, north, and northwest China as these regions are rich in coal but short of water. This can provide practical experience for the construction of economical high-temperature steam pipelines for 700 °C ultra-supercritical coal-fired power units.

Keywords: ultra-supercritical; advanced coal-fired power; air-cooled steam turbine generator unit; high-level layout technology; main power house structure safety; economical efficiency; real-time on-line monitoring

一、前言

富煤、贫油、少气是我国能源领域的基本国情，煤炭是我国的主体能源，是保障我国能源安全的“压舱石”。在我国能源结构中，化石燃料消费占主导地位，火力发电是主要的能源转换方式^[1]。“十三五”以来，随着煤电近零排放技术、超低排放技术的推广和应用^[2-5]，截至2021年年底，我国实现超低排放的煤电机组超过 1×10^{10} kW，已建成全球最大的清洁煤电供应体系^[6]。“十四五”规划提出，全面提高资源利用效率，加快推动绿色低碳发展。为助力实现“双碳”目标，进一步提高火电机组的发电效率，发展先进超超临界发电技术将成为我国燃煤发电机组今后的发展方向^[7-9]。

21世纪以来，600 °C等级超超临界参数燃煤发电机组在全球范围内得到了广泛应用。为了使燃煤机组的发电效率提高至50%以上，欧洲^[10]、美国^[11]和日本^[12]等国家和地区开始发展700 °C超超临界燃煤发电技术，旨在大幅降低机组的耗煤量，同时减少烟尘、SO₂、NO_x等污染物的排放^[13]。我国超临界、超超临界发电技术的发展比发达国家起步晚，但近年来在600 °C超超临界机组设计运行方面积累了丰富的经验，目前在运机组最高主汽温度/再热蒸汽温度为605 °C/623 °C，建设中的大唐郟城电厂主汽温度/再热蒸汽温度为615 °C/630 °C。针对700 °C高效超超临界发电机组，我国在2010年组建了“国家700 °C燃煤发电技术创新联盟”，强调从总体方案设计、耐热

合金研发、关键部件研制、试验验证平台建设和示范工程建设5个方面开展系统研究。已有研究对700 °C超超临界一次再热、二次再热机组热力系统进行了分析优化，供电效率可提高到50%以上^[14,15]。然而，机组参数的升高对锅炉、汽轮机高温部件和高温蒸汽管道等材料的热强度性能、抗腐蚀及氧化能力等提出了更高的要求^[6]，为此，研制高温合金材料成为亟需，如国外的740H、617B、Haynes282、Sanicro25、Nimonic80A等镍基或铁镍基高温合金以及GH984等国产镍基高温合金^[17]。由于高温合金材料价格高昂，大幅提高了电站建设成本，阻碍了700 °C超超临界燃煤发电技术的工程应用步伐。因此，考虑到当前尚无核准700 °C先进超超临界燃煤发电示范工程，在更高参数、更高效率煤电新技术及新材料正在推进的同时，有必要通过探索新的布置技术、结构形式和建设模式，提高效率，节省管材，降低成本，并依托主流620 °C超超临界煤电机组验证世界首例汽轮发电机组高位布置技术工程。

燃煤电厂常规布置多采用锅炉房、煤仓间、除氧间和汽机房顺序排列的布置方式，汽机运转层标高一般为12.6~17 m。传统设计理念认为，汽轮发电机组作为高转速重载振动设备，放置在高位存在主厂房结构安全和机组运行安全等问题，同时常规布置更适合湿冷机组，直接空冷机组的排汽管道需从地面连到50 m左右高的空冷凝汽器配汽管。为了提高超超临界燃煤发电机组的利用效率，实现机组良好的经济性与节能环保性能，国内外学者积极

探索机组设备布置优化方式，如在汽轮机布置方面进行优化设计^[18]。

汽轮机高位布置是将高压缸、中压缸和低压缸整体布置在接近于锅炉顶部位置（除氧间和煤仓间的上部）。锦界电厂三期2×660 MW一次再热超超临界机组是世界首例汽轮发电机组整体高位布置示范工程，是典型的单轴机组。汽轮机高低位布置是将高压缸布置于接近于锅炉顶部位置，中压缸和低压缸布置在常规汽轮机房，如平山电厂二期1×1350 MW二次再热超超临界机组为世界首例汽轮发电机组高低位布置示范工程，是典型的双轴机组^[19-22]。这两种布置方式均可以缩短主蒸汽、再热蒸汽管道长度，提高燃煤发电机组效率、减少高温管道用量（整体高位布置理论上具有更大的节省量）、降低工程造价，最终实现节约资源和降碳减污。

本文针对先进超超临界空冷汽轮发电机组高位布置，介绍工程概况，分析高位布置特性及安全性与经济性，构建工程应用的实时在线监测系统，以期700℃超超临界燃煤发电机组的推广和建设积累设计、建设及运行的工程经验，储备工程关键技术。

二、先进超超临界空冷汽轮发电机组高位布置工程概况

锦界电厂地处我国重要的煤炭能源基地——陕北神府煤田，作为国家“西电东送”北通道项目的

重要启动电源点，“十一五”期间建成一、二期4台600 MW亚临界空冷机组，采用了常规布置方案，汽机运转层标高为13.7 m。进入“十二五”后，为加快推进燃煤发电技术向更高参数、更高效率发展，中国神华能源股份有限公司国华电力分公司组建了“产学研用”研究团队，在不改变燃煤发电水蒸气朗肯循环经典理论的前提下，打破传统低位布置的常规设计，创新提出了超超临界汽轮发电机组高位布置的设想^[19]，经过综合比较论证，将汽机房运转层由常规的12.6~17 m移至65 m标高，并于2014年2月正式明确在锦界电厂三期2×660 MW扩建工程中采用超超临界汽轮机高位布置直接空冷技术。通过开展汽轮发电机组高位布置技术开发、装备研制、工程设计、示范建设和运行验证，形成了总体方案（见图1），创立了长度为167.5 m、宽度为26 m、屋顶标高为86.2 m、汽轮发电机组运转层为65 m、煤仓间设备和除氧间设备布置在主厂房下部的全新布置格局^[20,21]，显著缩短了四大管道及排汽管道长度，同时充分考虑了设备隔震支座、设备层、相邻层楼板的振动以及四大管道的位移等问题，形成了适用于我国“富煤缺水”三北地区的主流空冷机组。

锦界电厂三期工程建设的2×660 MW国产高效超超临界、空冷、纯凝式汽轮发电机组，同期建设了烟气脱硫、脱硝装置，预留扩建条件。锅炉选用的是上海锅炉厂的29.40 MPa(a)/605℃/623℃超超



图1 汽轮发电机组高位布置技术总体方案

临界参数、单炉膛、一次再热、四角切圆燃烧、紧身封闭、固态排渣、钢结构、悬吊结构 π 型锅炉，额定蒸发量为2060 t/h；汽轮机选用的是哈尔滨汽轮机厂的28 MPa(a)/600 °C/620 °C超超临界、一次中间再热、三缸二排汽、单轴、直接空冷凝汽式汽轮机；发电机选用的是哈尔滨电机厂有限责任公司的水氢氢、静态励磁发电机。

“十三五”以来，研究团队联合开展了可行性研究、初步设计以及系列专题研究工作，解决了主厂房结构偏摆及抗震设防、主机接口力矩确认等技术难题，同时工程设计坚持以人为本，通过开展生产人员运行/检修通道布置、应急、消防、噪声等方面专题研究，有效保障运维人员的身心健康。2018年5月，锦界电厂三期高位布置示范工程2台机组正式开工建设，并分别于2020年12月23日、12月31日实现投产，取得了一系列重大工程化发明创新成果。

三、先进超超临界空冷汽轮发电机组高位布置的特性分析

(一) 结构特点

锦界电厂三期工程采用锅炉-汽轮机-空冷岛空间协调高位布置技术^[20]，显著区别于常规低位布置技术（见图2）。汽轮发电机组采用高位布置，将汽轮机组布置于煤仓间和除氧间上部，靠近锅炉过热器出口联箱处，与锅炉主再热蒸汽出口管道高度相当，主厂房采用高位竖向框排架方案，煤仓框架与汽机辅机框架合并布置。同时，乏汽从低压缸直排至空冷凝汽器配汽管。

主厂房的建筑物结构分为汽轮机房和煤仓间，平面尺寸为167.5 m×26 m。汽轮机房为钢筋混凝土结构，采用框架-剪力墙和上部排架组成的混合结构体系，其中运转层以下采用了框架-剪力墙结构体系，运转层以上采用了钢筋混凝土排架结构体系，屋面标高为83.8 m。

汽轮机房运转层为大平台结构。汽轮机房分为10层，主要设备布置情况如表1所示。在高位布置方式下，多个设备和系统都进行了空间布局优化，与传统布置方式存在明显区别。汽轮机本体厂房立柱与汽轮机基础下立柱合并共用，成为一个整体结构。汽轮机基础底座位于61 m标高，其上层布置

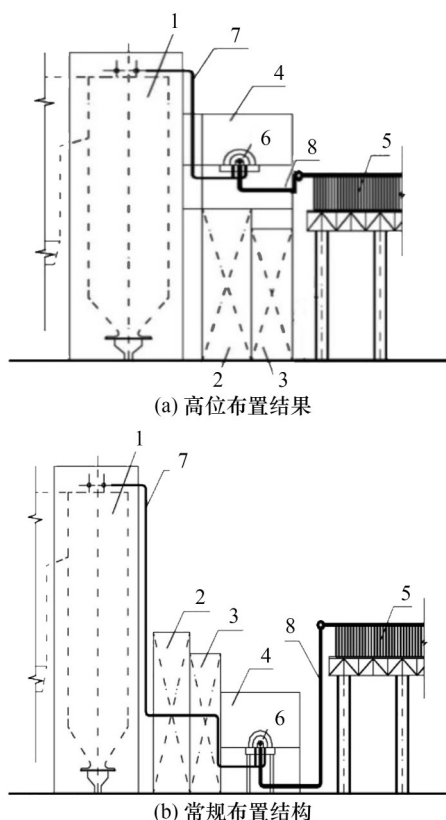


图2 锅炉-汽轮机-空冷岛空间协调高位布置

注：1表示锅炉；2表示煤仓间；3表示除氧间；4表示汽轮机房；5表示空冷凝汽器；6表示汽轮发电机组；7表示高温蒸汽管道；8表示排汽管道。

了弹簧隔振器，随后在弹簧隔振基础上布置了钢筋混凝土台板，汽轮机本体布置在台板上，处于主厂房65 m标高处，可优化基础结构的动力性能，使基础台板的振动与下部结构隔离，有效避免了振动传递，并可在基础结构发生不均匀沉降时快速有效调整。高位布置厂房结构与基础下部支撑梁结构联合为整体，这种结构布置型式为国内首创，具有消除或减少汽轮发电机的真空吸力等优势。值得关注的是，在汽轮机高位布置方式下，汽轮机本体厂房的结构和受力分布发生显著变化，61 m标高处的汽轮机基础台板承受了汽机基座弹簧、汽轮机本体等主要设备的荷载^[23]。

由于空冷机组不需要考虑凝汽器的布置，所以能够将汽轮机整体抬高。同时，排汽管道抬高布置，空冷排汽管道缩短，初投资成本降低，振动减小，对空冷排汽系统非常有利；空冷凝结水回水管道也有缩短，减少了管道冲击振动；真空泵抬高布置还可保证凝结水箱和空冷排汽管道的真空度。在这种立体多层的汽轮机高位布置方式下，主机排汽

系统采用分散布置,可取消排汽装置,减少投资,同时可减少阻力损失和热耗,提高了电厂长期运行的经济性。

因此,汽轮机高位布置可有效适应空冷机组高参数化的需求,对我国富煤缺水的“三北”地区建设先进煤电机组提供了成功的工程案例。

(二) 技术难点

汽轮发电机组高位布置技术工程应用在上世界上无先例可循,需要攻克一系列工程技术瓶颈。600 MW等级汽轮发电机组为大型高转速振动设备,整体重量达1000 t,传统的设计思路是汽机基座尽可能低位布置,且与主厂房结构相互脱开。汽轮发电机组进行高位布置后,主厂房结构变化需要重点考虑抗震设计和设备振动问题,结构安全成为该工程能够成功建成的关键,需要解决的主要技术难点如下。

1. 工艺布置突破传统

由于汽轮发电机组布置在65 m高的运转层上,电厂主厂房和汽轮发电机基座支撑结构联合成为一个整体,工艺设备和管道的布置方式完全不同于常规设计。将汽轮发电机放置在高位,需要考虑结构刚度是否能满足要求、若主厂房结构自身刚度不足是否需要和锅炉钢架连成整体、采用混凝土结构还是钢结构、汽轮发电机组能否正常运行以及在各种极端工况下(地震、大风等)能否保证安全等诸多因素,因此需要全面梳理相关的工程技术难点并进行突破。

2. 高位布置高温蒸汽管道应力计算不同于常规布置

火力发电厂管道应力计算的主要工作是验算管

道在内压、自重和其他外载作用下所产生的一次应力和在热胀、冷缩及位移受约束时所产生的二次应力;判断计算管道的安全性、经济性、合理性,以及管道对设备产生的推力和力矩是否在设备所能安全承受的范围内。高位布置示范工程的汽轮机抬高后,常规布置管道应力计算方法和评价准则将不再适用,需要研究汽轮机接口与锅炉接口位移方向存在多重不利组合复杂条件下的管道应力计算。

3. 对汽轮发电机组本体设计提出了新的要求

汽轮发电机组整体高位布置较常规布置来说,需承受更多、更大的外部冲击,机组安全性及稳定性面临巨大挑战,对机组抗震(振)能力和汽缸稳定性提出更高要求,需解决诸如基础偏摆、弹性基础变形、层间位移等诸多因素对机组安全性的不利影响。排汽装置设计难度增加,影响机组安全运行,需研发新型排汽管道结构和补偿支撑体系,解决排汽管道膨胀受限和失稳的难题。

四、先进超超临界空冷汽轮发电机组高位布置的安全与经济性分析

(一) 安全性分析

锦界电厂三期汽轮发电机组高位布置工程设计和建设本着“更安全、更可靠”的原则,研究团队组织开展了多轮技术论证、方案评审、校核复核,攻克了高位布置主厂房结构抗震(振)设计、厂房/管道/设备间相互影响、汽轮发电机组稳定运行等关键核心问题取得了多个原创性、系统性重大突破。

表1 主厂房主要设备布置

层数	标高/m	主要设备
1	0.0	化学精处理装置、汽泵前置泵、电动给水泵、闭式水泵、凝结水泵
2	6.9	电气中压配电室、启动用真空泵、小容量水环真空泵
3	13.7	凝结水箱
4	20.3	本体疏水扩容器、蒸汽喷射器、电子设备间
5	27.0	除氧器、4号高压加热器
6	35.3	1号、2号、3号高压加热器,4号高压加热器外置蒸汽冷却器,6号、7号低压加热器
7	43.0	排汽管道(含8号、9号低压加热器)、电气出线、给水泵及小机、主油箱
8	50.5	排汽管道(含8号、9号低压加热器)、励磁变压器、定子冷却水装置、密封油装置
9	61.0	汽轮机基础台板、隔振器
10	65.0	汽轮发电机组

1. 主厂房结构安全方面

为解决主厂房抗震、设备振动及其对主厂房振动影响的难题，结合工程结构领域较为成熟的研究方法，采用有限元数值计算、模拟地震振动台模型（1：20物模）试验和动力特性试验等手段^[24,25]，开展了主厂房结构与汽轮发电机组隔振系统耦联抗震（振）性能分析^[20]，研发了主厂房结构抗地震和设备振动的成套设计技术。通过前期研究，应用有限元分析方法^[20]建立了锅炉房与主厂房独立布置、联合布置的计算模型（见图3）。综合考虑楼层高度和柱网对应关系、材料特性差异、结构扭转效应和温度作用效应等因素，确定了高位布置示范工程采用锅炉房与主厂房独立布置方案。汽轮发电机组高位布置后，基座台板及汽机设备的重量近3000t（汽轮发电机组的重量约为1082t），同时在较高位置上

有很多的大荷载（如煤斗等设备），需尽可能降低重心，为此，主厂房宜采用混凝土结构；汽轮发电机组是振动设备，高位布置后采用隔振技术成为必然选择，但不管隔振效率有多高，仍会有少量的振动作用传递至其他楼层，故采用整体质量和刚度较大的混凝土结构是合适的；此外，尽管该工程抗震设防烈度不高，但地震作用的影响和效应仍不能忽视，考虑到管道应力与结构位移有较大的关联，应尽可能减小结构位移（偏摆），所以主厂房在采用混凝土结构的基础上应尽可能增大结构的刚度，因此采用钢筋混凝土框架-剪力墙结构就成为最优的选择。这有效降低主厂房整体重心，提高抗震性能，解决了地震、风载荷引起的设备振动技术难题，结构最大层间位移指标均满足《建筑抗震设计规范》（GB50011—2010）的限值要求，实现了各种不利工况作用下的设备正常运行和结构安全。高位布置示范工程投产运行以来，工程所在地虽已发生地震8次，均为多遇地震，但主厂房结构未受地震影响，抗震性能优越。

2. 高温蒸汽管道应力分析方面

为解决汽轮机接口与锅炉接口位移方向存在多重不利组合复杂条件下管道应力计算和评价的难题，首次建立了以风振、地震及其他水平荷载作用下建（构）筑物偏摆为边界条件的管系应力计算方法和评价准则，填补了建（构）筑物偏摆情况下高温蒸汽管道应力计算规定的空白。通过对管道松冷、排汽反力、叠加不同方向地震、地震与偏摆叠加、安全阀与汽锤叠加等98个不同工况组合进行管道应力计算，即便在考虑主厂房偏摆的情况下，高位布置示范工程的管道应力水平以及主蒸汽、再热蒸汽管道与锅炉、汽轮机接口的推力和推力矩也都能满足安全运行要求，保障了各类型极端工况高温蒸汽管道的运行安全。

3. 汽轮发电机组运行安全方面

为解决高位布置和弹性基础下汽轮机轴系设计、汽缸失稳的难题，创新提出了动刚度耦合、全工况汽缸稳定性、整机抗震性能分析方法，集成了多级小焓降反动式通流、整体铸造360°蜗壳进汽低压缸内缸等多项先进技术，实现了汽轮机薄弱结构优化，整机抗震（振）性能不亚于常规布置机组，保障了各种极端工况下的汽轮发电机组高位布置运行安全性；为解决排汽管道膨胀受限和失稳的难

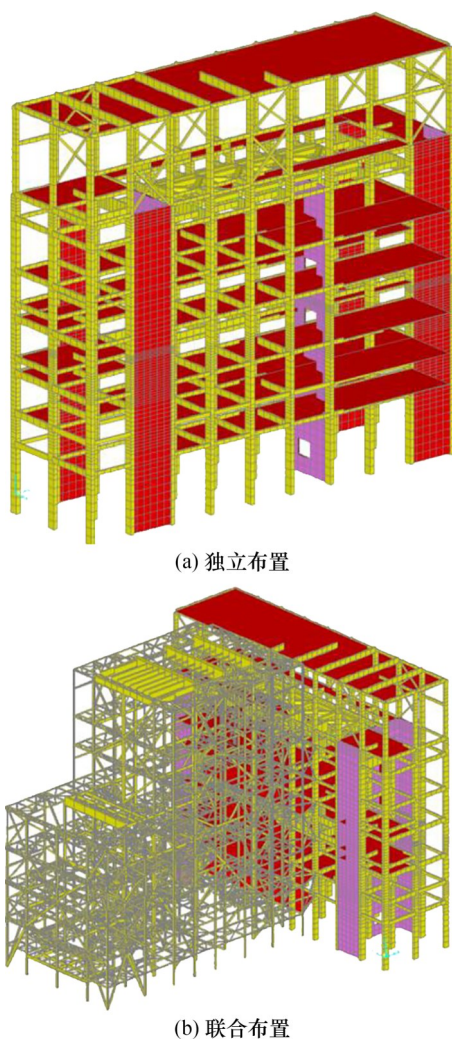


图3 锅炉房与主厂房布置计算模型

题,针对高位布置特点,提出了紧凑型排汽管道新型结构,开发了新型曲管压力平衡补偿器和组合弹性支承布置等技术,创建了紧凑型排汽管道补偿支撑体系,保障了排汽系统的安全高效运行。高位布置示范工程投产后,在第三方性能试验期间,额定负荷下的两台机组各个轴承处的轴振值波动范围分别为23~67 μm 和10~51 μm ,均在优秀值(76 μm)之内。此外,通过采集汽轮机安全监视系统(TSI)输出的实时轴振数据,动态评估了汽轮发电机组#1~#9轴承的轴振、瓦振、油温等状态。通过分析高位布置示范工程额定负荷下的汽机TSI监测数据,发现9个轴承在X和Y方向的轴振数据基本都小于50 μm (运行实际控制限值),瓦振数据绝大多数小于10 μm ,轴承轴颈和推力轴承的金属温度基本小于70 $^{\circ}\text{C}$ (远低于报警温度),由此表明,高位布置汽轮发电机组轴系振动水平整体优良。

4. 网源协调安全方面

汽轮机整体高位布置将高、中、低压汽缸同轴布置,带动一个发电机运行,有效保证了汽轮发电机组运行时的转动惯量,与同容量常规机组相当;对电网系统安全稳定运行冲击小,高负荷运行时电网系统不易发生暂态故障,可避免电网系统震荡交互影响汽轮发电机组转速飞升、失稳等安全问题。此外,针对锦界电厂三期工程投运会导致送出系统出现更为复杂的次同步谐振问题,研制了非同型多机组并联、多模态控制的次同步谐振动态抑制装置(SSR-DSII),有效实现全厂6台机组满负荷运行。

5. 职业卫生与健康方面

针对汽轮发电机组高位布置特点,重点关注噪声、振动等因素对职工在生产中的卫生和健康影响。根据《工业企业设计卫生标准》(GBZ 1—2010)和《工作场所有害因素职业接触限值 物理因素》(GBZ 2.2—2007)有关要求,研发了汽轮机本体及低压缸隔声降噪技术和风机降噪夹克技术,实现汽机平台噪声值低于77 dB(A),风机区域噪声值低于80 dB(A),均低于国家标准中对工作场所每天连续接触噪声8 h所要求的噪声声级卫生限值85 dB(A)。主厂房建筑物内可实现无障碍对话交流,为电厂生产人员的运行和检修创造了较为舒适的环境条件。《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013)中指出,建筑物内人体承受1~80 Hz全身振动的舒适性容许振动加速度为竖向0.126 m/s^2 和水平向0.071 m/s^2 (暴露

时间为8 h);高位布置示范工程按照《作业场所局部振动卫生标准》(GB 10434—1989)和《动力机器基础设计规范》(GB 50040—1996)有关规定,对主厂房设备本体、基础和平台进行防振动设计,并优化了汽水管道布置、各支吊架选型及布置,实现了主厂房区域的振动强度均小于卫生限值,生产人员的工作舒适性得到了有效保障。此外,高位布置示范工程还优化了主厂房的消防设计,通过合理设计防烟楼梯、消防通道等,实现主厂房内最远工作地点到外部出口或楼梯间的距离不超过50 m,满足安全疏散要求;同时,通过优化建筑采光设计、通风系统、煤仓间除尘系统等,为生产人员在建筑物内工作营造了舒适的环境温度和良好的空气质量,进一步改善了劳动条件和工作环境,保障员工身心健康。

为持续提升示范机组的安全运行可靠性,必须重视机组主要结构(特别是61 m标高汽轮机基础台板)的振动、位移等方面的问题,因此需要加强对厂房结构、高温高压蒸汽管道和厂房空间环境等多要素的实时在线监测,包括关键结构上的主要荷载和环境作用以及汽轮机基座弹簧、基座台板、基座大梁、基座大梁下剪力墙、排汽管道支撑梁等关键构件/部位的应变、振动和受力状态。

(二) 经济性分析

采用汽轮发电机组高位布置方式,高温管道材料节省情况如表2所示。与常规(低位)布置相比,高位布置示范工程主蒸汽及高旁阀前管道总质量为156.5 t,减少了81.5 t,节省材料约34.2%;再热热段及低旁阀前管道总质量为167 t,减少了44 t,节省材料约20.9%;再热冷段及高旁阀后管道总质量为67 t,减少了71 t,节省材料约51.4%;主给水

表2 高位布置高温管道材料节省情况

管道	项目	高位布置	常规布置
主蒸汽及高旁阀前管道	质量/t	156.5	238
	节省比例/%	34.2	基准
再热热段及低旁阀前管道	支管质量/t	11.0	35
	主管质量/t	156.0	176
再热冷段及高旁阀后管道	支管质量/t	20.9	基准
	主管质量/t	35.0	53
主给水管	主管质量/t	32.0	85
	节省比例/%	51.4	基准
主给水管	质量/t	189.0	252
	节省比例/%	25.0	基准

管道总质量为189 t, 减少了63 t, 节省材料约25%; 此外, 直接空冷机组还减少大口径薄壁排汽管道约40 m, 节省材料约93%。经测算, 单台高位布置机组通过节省高温管道可节约材料费约2000万元。700 °C超超临界汽轮发电机组需使用镍基合金材料, 该管材价格是600 °C超超临界发电机组材料的5~6倍, 若采用高位布置, 700 °C等级机组所需管材将大幅减少, 单台机组可节省高温管材费用约1亿元。此外, 即便考虑主厂房土建结构建设工程增加所带来造价的提高(单台机组约1385万元), 600 °C超超临界高位布置示范工程整体投资较常规低位布置仍可节省约1000万元。

汽轮发电机组采用高位布置后, 管道阻力损失显著降低, 其中主蒸汽管道阻力损失减少约0.56 MPa, 再热系统阻力损失减少约0.088 MPa, 综合反映到供电煤耗方面可节省约0.784 g/(kW·h); 排汽管道阻力损失减少约144 Pa, 降低供电标准煤耗约0.22 g/(kW·h), 可节约成本约140万元(2台机组)^[20]。同时, 蒸汽管道缩短后, 还可减少蒸汽在管道中的储存量, 从而提高机组负荷调节性能。第三方性能试验结果表明, 额定负荷下5号机组供电煤耗为282.6 g/(kW·h), 6号机组供电煤耗为283.2 g/(kW·h), 较设计值287.7 g/(kW·h)分别低了5.1 g/(kW·h)和4.5 g/(kW·h), 按照2台机组2021年的发电量为6.013×10⁹ kW·h测算, 预计每年可节约2.7×10⁴ tce, 减少二氧化碳排放超过7×10⁴ t。

示范机组应用锅炉-汽轮机-空冷岛空间协调高温布置技术后, 大幅减小了主厂房占地面积, 如采用高位布置的汽轮机房占地面积为2345 m², 而同等级低位布置机组的汽轮机房占地面积为4785 m²; 空冷汽轮发电机组的乏汽进入空冷岛, 风机抽取空气对乏汽进行冷却, 比湿冷电厂节水70%以上^[27], 节水效果显著; 使汽轮机厂房各层层高设置更为合理, 能适应全厂疏水及凝结水的收集, 同时解决了排汽装置及排汽管道阻力大、汽轮机真空吸力不平衡、低压缸接口推力大、偏摆后位移大的问题。

五、基于实时在线监测系统的高位布置主厂房结构安全评估

锦界电厂三期高位布置示范工程在主厂房结构上创建了全寿命周期实时在线监测系统(ROMS),

对结构外部的风环境、结构位移、结构振动加速度和结构应力应变进行在线监测, 实现了对汽轮发电机基座隔振支座位移监测、基座台板位移监测、设备层楼面板振动响应监测、设备层关键承重构件损伤监测以及风荷载监测和设备层关键承重构件应力与应变监测。根据高位布置的特点, 61 m标高汽轮机基础台板的监测是重中之重, 通过对测点进行布置优化可准确快捷地反映主厂房结构的健康状态。

(一) 传感器优化布置策略

优化实际结构测点的布置, 有利于准确监测主厂房结构的健康状态。采用遗传算法(GA)结合模态重构效果最好的传感器布置准则, 优化传感器布置; 优化后的传感器布置可减少模态信息的冗余, 尽可能多地包含结构的模态信息。可以采用模态置信矩阵(MAC)表示各阶模态的相关性, 如公式(1)所示:

$$MAC_{ij} = \frac{(\Phi_i^T \Phi_j)^2}{(\Phi_i^T \Phi_i)(\Phi_j^T \Phi_j)} \quad (1)$$

式(1)中, MAC_{ij} 对应MAC矩阵的第*i*行、第*j*列的值, $\Phi_i \Phi_j$ 表示传感器位置处模态振型的第*i*列和第*j*列。MAC矩阵对角元为1, 非对角元代表各阶振模态振型向量的相关性, 数值越趋近于1则表示两列型向量的相关性越强。MAC矩阵的非对角元素趋向最小, 则传感器布置位置最优。因此, 基于MAC矩阵非对角元位置最小原则, 可以确定传感器的优化布置位置。

选用GA算法优化结构的MAC矩阵, 将传感器位置坐标作为优化目标, 将MAC矩阵非对角元素的均方根误差作为适应度函数, 最终输出均方根误差最小时对应的传感器位置基于GA算法优化结构的MAC矩阵流程(见图4)。其中, 个体的适应度为结构各测点对应MAC矩阵非对角元素的均方根。优化结束后, 结构的各阶模态尽可能地正交, 能够更好地分辨结构的各阶振型。

(二) 测点监测

锦界电厂三期高位布置示范工程监测内容主要包括设备层性态监测和整体结构性态监测。基于前述测点优化策略, 通过合理布置有限数量的传感器, 可以获得更完备和精确的结构状态信息, 主厂房结构在线监测的测点分布如表3所示。

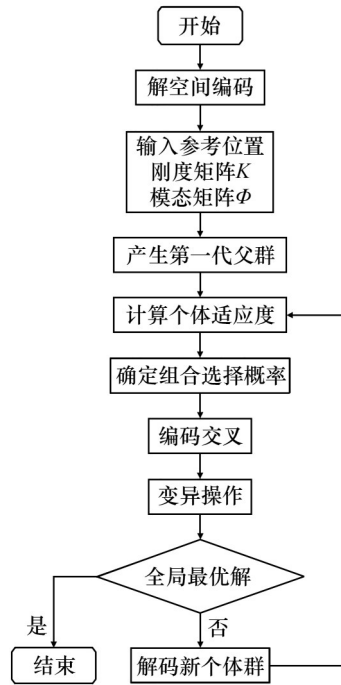


图4 基于GA的传感器优化准则

1. 风荷载监测

风荷载监测是突发偶然大风作用下确保结构整体安全和设备正常运营的基础。运营阶段风荷载监测包含风速监测和风向监测两个部分。将超声式风速仪设置于61 m设备层外立面，监测结构的风速和风向，了解实际风效应。在台风期或其他需要风荷载观测期间，可以打开测风装置进行风荷载观测，测量结束后可以收回测风装置至厂房内。

2. 位移监测

位移监测分为设备层结构位移监测和主厂房整体结构变形检测两部分。通过高精度位移计对汽轮机设备隔振支座上基座台板进行监测，同时对汽轮机下大梁、设备支撑梁实现垂直方向上的位移监测。为防止主厂房在风载荷作用下楼层间和整体位

移偏大所带来的破坏，采用非接触式位移计对主厂房结构层间和总体水平位移进行检测，并采用高精度倾角仪对主厂房结构层间水平位移进行监测。具体测点布置详见表3。

3. 振动监测

振动监测主要关注设备隔震支座振动和设备层及相邻层楼板振动，通过加速度传感器进行实时监测。原始数据采样频率为50 Hz，采样数据量非常大，考虑到ROMS系统的计算能力，实时显示的振动加速度数据是10 min采样时间内的加速度峰值绝对值；振动速度和振动幅值则是通过加速度数据积分换算求得，并非实时监测数据。

设备隔振支座是维持大型汽轮机等设备正常运营的关键部件，运营阶段会诱发其产生一定的振动。为了解隔振支座工作状态，直观评价其隔振效果，并对振动输入-传递关系进行监控，重点对主汽轮机、小汽轮机隔振支座顶板（即基座台板）的加速度响应进行监测；汽轮机运行过程中易引起本层楼板及相邻上、下层楼板振动，对楼板进行加速度响应监测，可以获取汽轮机运行时对本层和相邻上、下层楼板振动舒适度的影响。具体测点布置情况详见表3。

4. 应力应变监测

结构关键受力部位应力应变监测系统用于监测运营阶段结构典型受力部位的受力变化规律，研究机组结构的内力分布和厂房在各种载荷下的响应。混凝土应力采用振弦式应变计，通过监测测点上的应力变化，检查结构是否发生损坏或存在的损坏趋势，为结构损伤识别和结构状态评估提供依据。通过建立主厂房结构应力应变监测系统，同时实现应力应变监测数据的无线传输，将应力应变监测作为结构健康状态评估的重要依据。

表3 主厂房结构在线监测测点分布

监测项	监测设备	精度	测点位置	测点数量/个
风环境	风速风向仪	0.1 m/s	主厂房屋面	2
位移	高精度位移计	0.005 mm	主汽轮机基座台板、小汽轮机基座台板、基座大梁（竖向、水平）	18
	高精度位移计（非接触式）	0.1 mm	主厂房结构层间和总体水平位移	30
	高精度倾角仪	0.01°	主厂房整体侧移	10
振动	加速度传感器	0.001 m/s ²	主汽轮机基座、小汽轮机基座、基座台板支撑大梁、楼板（竖向、水平）	25
损伤	应力应变传感器（振弦式应变计）	1 με	基座台板、基座大梁、基组大梁下剪力墙，排汽管道支撑梁、煤斗支撑大梁以及剪力墙根部、关键的框架柱柱底、后浇带等	120

(三) 系统集成

锦界电厂三期高位布置示范工程将应力、应变、振动、位移、风速监测集成在同一个信息管理系统中，并对这些参数进行实时监测，实现对异常值的自动预警，完成结构损坏或退化的早期预警，同时实现结构的虚拟可视化，将结构的监测信息与虚拟模型相结合，使监测结果更加直观。主厂房结构实时在线监测系统在极端情况下可以进行预警，如风

速大于 24.5 m/s 的极端天气、隔振支座和基座台板位移监测幅值超过 0.015 mm、应力监测幅值超过混凝土抗拉强度设计值或钢筋抗拉强度设计值的 80%。

高位布置示范工程投产以来，主厂房结构 ROMS 监测了高位布置机组的长周期运行过程。以 5 号机组为例，65 m 标高汽轮机基座和 61 m 标高汽轮机基础台板层楼板的振动加速度、振动速度、振幅典型测点的分布如图 5~7 所示，vib01 和 vib07 分

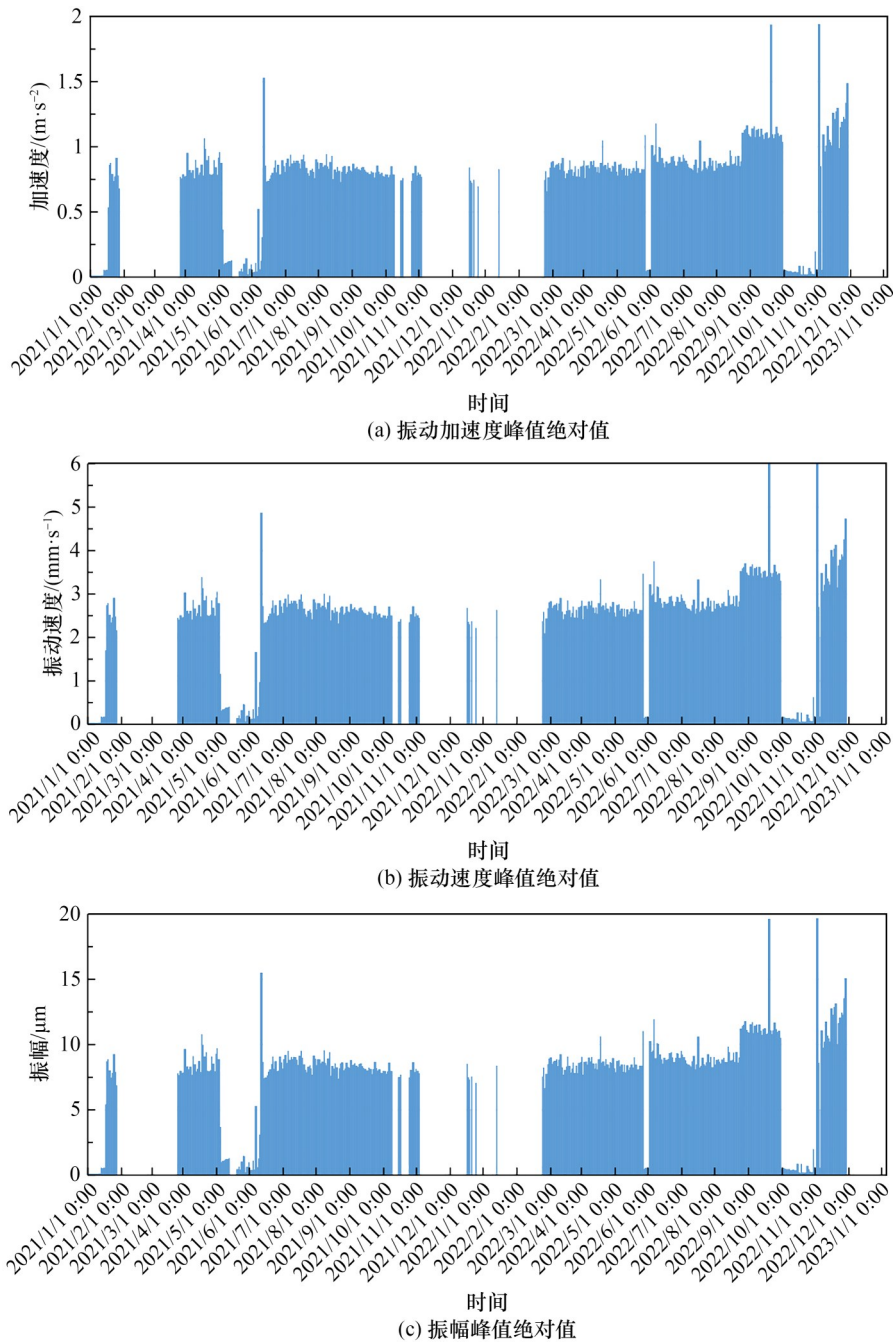


图5 5号机组汽轮机基座振动状态监测（竖直方向，vib01测点）

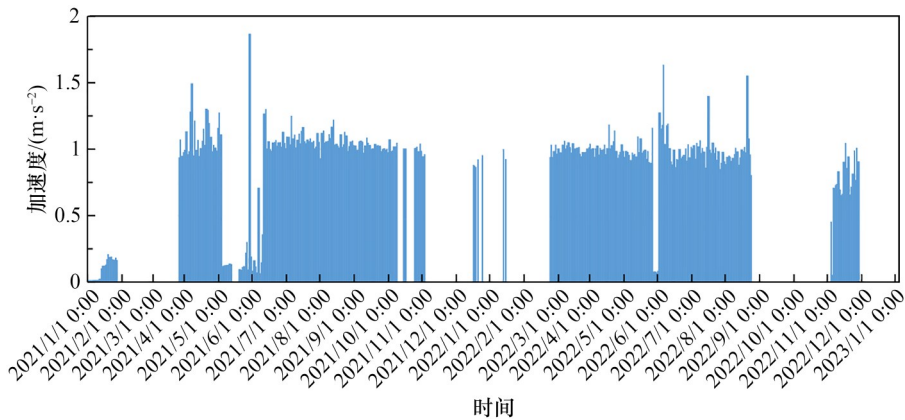


图6 5号机组汽轮机基座振动状态监测（水平方向振动加速度，vib07测点）

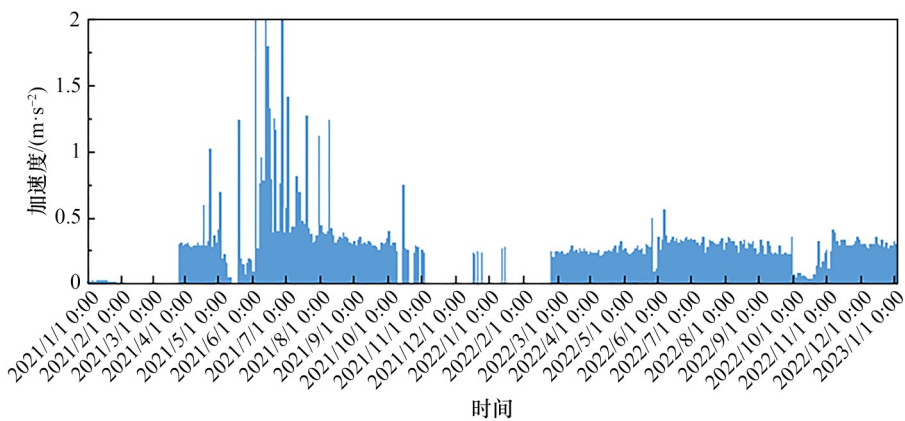


图7 5号机组楼板（标高61 m）振动状态监测（竖直方向振动加速度，vib16测点）

别对应汽轮机竖向和水平方向振动测点，是汽轮机本体振动的重点关注点。根据《火力发电厂土建结构设计技术规程》（DL 5022—2012）有关要求，基座台板、主厂房结构楼板的振动速度应不超过 3.8 mm/s ，振幅应不超过 $20 \mu\text{m}$ ，系统设计时将该参数作为阈值；而主机基座台板振动加速度无规范限值，主厂房结构楼板振动加速度则参考民用高层建筑相关规范对楼板舒适度的规定（应满足 $0.022 \text{ g} \approx 0.22 \text{ m/s}^2$ ），并作适当放宽，但可不作为阈值。由图5和图6可知，汽轮机基座台板的竖向和水平振动加速度监测结果大致在 $0 \sim 1 \text{ m/s}^2$ 范围内波动，加速度峰值均不超过 2 m/s^2 ；此外，竖向和水平振动速度峰值基本稳定在 3.5 mm/s 以内，绝大多数时间段峰值可低于 3 mm/s ；竖向和水平振幅峰值分别稳定在 $10 \mu\text{m}$ 和 $12 \mu\text{m}$ 以内。vib16是汽轮机基础台板层楼板竖向振动测点，反映了弹簧下结构的隔振效果。由图8可知，61 m标高楼板竖向振动加速度

监测结果基本在 $0 \sim 0.5 \text{ m/s}^2$ 范围内波动，绝大多数时间段峰值可低于 0.3 m/s^2 ，同时，振动速度峰值基本稳定在 1.5 mm/s 以内，振幅峰值基本稳定 $5 \mu\text{m}$ 以内，说明隔振器起到了良好的效果。由此可见，高位布置机组汽轮机基座台板和主厂房结构楼板的振动数据长期处于安全阈值范围以内，少数振动数据较大的时间段出现在机组启停机阶段，表明主厂房结构处于安全状态。

此外，高位布置机组投产后主厂房结构ROMS长期监测数据显示，各层侧移均未超出设计值及规范限值；混凝土梁和剪力墙应变的最大值均小于一级阈值 $1340 \mu\text{e}$ ；基座台板最大位移为 3.66 mm ，小于一级阈值。由此可见，基于主厂房全寿命周期安全保障的数字化在线监测系统解决了高大空间厂房结构偏摆、核心设备振动数字化精准监测和主动预警难题，能够有效确保汽轮发电机组高位布置的结构安全。

六、结论

(1) 通过超超临界空冷汽轮发电机组高位布置技术装备研发和工程创新实践,可进一步提高燃煤发电效率、节省高温蒸汽管道材料、降低工程造价,有效改善系统运行安全性和灵活性,实现绿色低碳可持续发展,为未来700℃超超临界煤电机组建设节约高温蒸汽管道提供实践经验。

(2) 高位布置示范工程采用锅炉房与主厂房独立布置,主厂房采用钢筋混凝土框架-剪力墙结构,有效降低整体重心,提高抗震性能。该工程研发了高位布置汽轮发电机组主厂房结构与设备抗震(振)技术体系,开发了高位布置的汽轮发电机组及空冷新型排汽管道,创建了高位布置高温蒸汽管道应力计算方法和评价准则,有效保障了主厂房结构、高温蒸汽管道和汽轮发电机组的运行安全性。

(3) 与常规(低位)布置相比,高位布置主蒸汽、再热蒸汽管道分别节省了34.2%和20.9%,空冷排汽管道节省了93%,单台机组可节约高温管道材料费约2000万元,汽机房主厂房减少占地面积约50%,机组初投资明显降低,且通过系统优化可较设计值节省供电煤耗4.5~5.1 g(kW·h),技术经济性显著。

(4) 开发了基于主厂房全寿命周期安全保障的实时在线监测系统,采用GA算法结合传感器布置准则进行测点优化布置,实现主厂房关键结构加速度、应力应变、位移等参数的实时监测。投产后的运行监测数据显示,各参数均处在安全阈值范围内,主厂房结构维持在安全运行状态。

(5) 发展清洁高效燃煤发电技术是持续推动能源生产和消费革命、建设美丽中国的重大需求,也是构建现代化能源体系的重要组成部分。通过高位布置示范工程的创新实践,形成了技术可行、安全稳定、经济合理的汽轮发电机组整体高位布置技术体系,为700℃先进超超临界燃煤发电技术的发展奠定了工程应用基础,起到先导示范作用,形成引领我国富煤缺水“三北”地区建设清洁高效先进空冷煤电机组的新模式。

(6) 先进煤电对于确保能源电力供应不出现硬缺口具有重要支撑作用。建议优先支持煤电联营项目发展,积极推进“坑口煤电一体化”项目核准,根据所属区域环境特点统筹协调650℃、700℃等

高参数超超临界空冷煤电机组应用高位布置技术。这符合国家能源战略和产业发展政策,是有效促进煤基能源资源富集地区实现清洁利用、高品质发展、绿色低碳转型升级的重要实践,加快构建新型电力系统过程中突出“能源保供、助力电网安全”的内在要求。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: November 24, 2022; **Revised date:** February 15, 2023

Corresponding author: Zhang Yi is a professor-level senior engineer from the China Energy Investment Group Co., Ltd. His major research field is technology and application of clean, efficient and low-carbon utilization for coal combustion. E-mail: 16800801@chnenergy.com.cn

参考文献

- [1] 谢克昌. 推动能源生产和消费革命战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Xie K C. Strategic research on promoting energy production and consumption revolution [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] 王树民, 宋畅, 陈寅彪, 等. 燃煤电厂大气污染物“近零排放”技术研究及工程应用 [J]. 环境科学研究, 2015, 28(4): 487-494.
Wang S M, Song C, Chen Y B, et al. Technology research and engineering applications of near-zero air pollutant emission coal-fired power plants [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(4): 487-494.
- [3] 王树民, 张翼, 刘吉臻. 燃煤电厂细颗粒物控制技术集成应用及“近零排放”特性 [J]. 环境科学研究, 2016, 29(9): 1256-1263.
Wang S M, Zhang Y, Liu J Z. Integrated application of fine particulate matter control technologies and their “near-zero emission” characteristics in coal-fired power plants [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(9): 1256-1263.
- [4] 王树民, 余学海, 顾永正, 等. 基于燃煤电厂“近零排放”的大气污染物排放限值探讨 [J]. 环境科学研究, 2018, 31(6): 975-984.
Wang S M, Yu X H, Gu Y Z, et al. Discussion of emission limits of air pollutants for “near-zero emission” coal-fired power plants [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(6): 975-984.
- [5] Wang S M. Near-zero air pollutant emission technologies and applications for clean coal-fired power [J]. Engineering, 2020, 6(12): 1408-1422.
- [6] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2022 [R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2022.
China Electricity Council. China power industry annual development report 2022 [R]. Beijing: China Electricity Council, 2022.
- [7] 张玉卓. 中国清洁能源的战略研究及发展对策 [J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(4): 429-436.
Zhang Y Z. Study on strategy and development countermeasure of China clean energy [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2014, 29(4): 429-436.
- [8] 舒印彪, 谢典, 赵良, 等. 碳中和目标下我国再电气化研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 195-204.

- Shu Y B, Xie D, Zhao L, et al. Re-electrification in China under the carbon neutrality goal [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(3): 195–204.
- [9] 黄其励, 袁晴棠, 韩涛. 能源生产革命的若干问题研究 [J]. *中国工程科学*, 2015, 17(9): 105–110.
Huang Q L, Yuan Q T, Han T. Study on several issues of energy production revolution [J]. *Strategic Study of CAE*, 2015, 17(9): 105–110.
- [10] Bugge J, Kjaer S, Blum R. High-efficiency coal-fired power plants development and perspectives [J]. *Energy*, 2006, 31(10–11): 1437–1445.
- [11] Beér J M. High efficiency electric power generation: The environmental role [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, 33(2): 107–134.
- [12] 杨华春, 林富生, 谢锡善, 等. 欧洲 700 °C 发电机组研发及 617 合金研究进展 [J]. *发电设备*, 2012, 26(5): 355–359.
Yang H C, Lin F S, Xie X S, et al. R & D progress of 700 °C power generation technology and alloy 617 in Europe [J]. *Power Equipment*, 2012, 26(5): 355–359.
- [13] 刘入维, 肖平, 钟犁, 等. 700 °C 超超临界燃煤发电技术研究现状 [J]. *热力发电*, 2017, 46(9): 1–7.
Liu R W, Xiao P, Zhong L, et al. Research progress of advanced 700 °C ultra-supercritical coal-fired power generation technology [J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(9): 1–7.
- [14] 王旭阳, 吴玉华, 侯栋楠, 等. 700 °C 超超临界二次再热机组抽汽参数计算及分析 [J]. *汽轮机技术*, 2018, 60(5): 368–370.
Wang X Y, Wu Y H, Hou D N, et al. Calculation and analysis of extraction steam parameters of the 700 °C ultra-supercritical units with double-reheat cycle [J]. *Turbine Technology*, 2018, 60(5): 368–370.
- [15] 杨美, 周云龙, 杨金福, 等. 700 °C 超超临界一次再热发电系统优化 [J]. *发电技术*, 2021, 42(4): 509–516.
Yang M, Zhou Y L, Yang J F, et al. Optimization of 700 °C ultra-supercritical single reheat power generation system [J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(4): 509–516.
- [16] 徐炯, 周一工. 700 °C 高效超超临界火力发电技术发展的概述 [J]. *上海电气技术*, 2012, 5(2): 50–54.
Xu J, Zhou Y G. Overview of the development of 700 °C USC technique [J]. *Journal of Shanghai Electric Technology*, 2012, 5(2): 50–54.
- [17] 赵子龙, 李生志, 马翔, 等. 700 °C 超超临界机组主蒸汽管道候选材料特性与服役性能研究现状 [J]. *热力发电*, 2021, 50(11): 1–12.
Zhao Z L, Li S Z, Ma X, et al. Research status of main steam pipe candidate material characteristics and service performance for 700 °C ultra supercritical unit [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(11): 1–12.
- [18] Kloss-Grote B, Wechsung M, Quinkertz R, et al. Advanced steam turbine technology for unique double reheat steam power plant layout [C]. New York: ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2019.
- [19] 王树民, 宋畅, 张满平, 等. 汽轮发电机组高位布置技术研究与工程设计 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(23): 7643–7652.
Wang S M, Song C, Zhang M P, et al. Research and engineering design of high level layout of turbine generator unit [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(23): 7643–7652.
- [20] 孙锐, 柴靖宇, 王盾. 一种直接空冷汽轮发电机组系统: CN201120170471.9 [P]. 2012-01-04.
Sun R, Chai J Y, Wang D. A direct air-cooled steam turbine unit system: CN201120170471.9 [P]. 2012-01-04.
- [21] 王树民, 吕智强, 宋畅, 等. 汽轮发电机组高位布置基础振动试验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4217–4226.
Wang S M, Lyu Z Q, Song C, et al. Vibration test research of steam turbine generator foundation jointly configured on higher floor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(12): 4217–4226.
- [22] 冯伟忠. 一种高低位布置的高温亚临界机组: CN201320548936.9 [P]. 2014-04-16.
Feng W Z. A high temperature subcritical unit with high and low position arrangement CN201320548936.9 [P]. 2014-04-16.
- [23] 张伟江, 焦林生, 薛应科, 等. 高位布置汽轮发电机组试运中的稳定性测试与分析 [J]. *汽轮机技术*, 2022, 64(1): 46–48.
Zhang W J, Jiao L S, Xue Y K, et al. Test and analysis of stability for high level layout of 660 MW turbine generator unit during trial operation period [J]. *Turbine Technology*, 2022, 64(1): 46–48.
- [24] 刘彦辉, 谭平, 周福霖, 等. 高层框架-剪力墙隔震结构地震响应研究 [J]. *工程力学*, 2015, 32(3): 134–139.
Liu Y H, Tang P, Zhou F L, et al. Study of seismic response in isolated high-rise frame-shear wall structures during earthquakes [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(3): 134–139.
- [25] 白国良, 秦朝刚, 徐亚洲, 等. 装配整体式剪力墙模型结构振动台试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(2): 17–27.
Bai G L, Qin C G, Xu Y Z, et al. Shaking table test on monolithic precast concrete shear wall model structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(2): 17–27.
- [26] 辛世岗. 火力发电机组直接空冷系统研究 [J]. *能源与节能*, 2012 (8): 119–120.
Xin S G. Research on the direct air-cooled condenser system of power plants [J]. *Energy and Energy Conservation*, 2012 (8): 119–120.
- [27] 张伟江, 李宁, 李辉, 等. 高位布置汽轮发电机组基础台板动力学特性研究 [J/OL]. *中国测试*: 1–5(2022-03-20)[2022-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20220318.1236.004.html>.
Zhang W J, Li N, Li H, et al. Dynamic characteristics of steam turbine generator unit foundation with high level layout [J/OL]. *China Measurement & Test*: 1–5(2022-03-20)[2022-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20220318.1236.004.html>.