

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.03.006

先进供热与智慧发电技术现状及发展趋势

Review and prospect of advanced heat supply and intelligent power
generation technologies

李娜, 易祖耀, 白银雷
LI Na, YI Zuyao, BAI Yinlei

(华电郑州机械设计研究院有限公司, 郑州 450046)
(Huadian Zhengzhou Mechanical Design Institute Company Limited, Zhengzhou 450046, China)

摘要: 随着我国能源结构调整和电力市场的发展, 热电联产行业在不断进行调整和转型升级。先进供热技术与智慧发电技术作为热电联产行业的新兴技术, 可以推动我国能源转型发展。介绍了热电解耦、多热源供热、数字孪生等技术的原理及其在热电联产领域的研究进展, 结合燃煤机组的发展需求进一步评述了其发展潜力。最后指出, 先进供热和智慧发电技术可提高火电机组运行灵活性, 实现火电机组边界频繁扰动的优化控制, 为我国热电联产发展以及火电发电设施、用电设施、电网智能化提供技术支持, 推动我国能源结构向低碳化、清洁化加速转型。

关键词: 热电联产; 热电解耦; 先进供热; 智慧发电; 多热源供热; 数字孪生; 余热回收; 大温差供热; 长输供热

中图分类号: TK 262 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2021)03-0031-09

Abstract: With the energy structure adjustment and power market development in China, cogeneration industry is undergoing a reform and an updating. As emerging technologies in this industry, advanced heat-supply technology and intelligent power generation can promote the energy transition in China. The principles of heat-electricity decoupling, multiple heat sources and digital twin, and their applications in cogeneration are introduced, and their technical potential in facilitating coal-fired units' performance are evaluated. Finally, it is pointed out that these two technologies can realize the optimal control on frequent boundary disturbances of thermal power units by improving units' operational flexibility. The technologies provide technical support for CHP, thermal power generation facilities, electric equipment and power grid, as well as accelerate the transformation of energy structure to a low-carbon and clean one.

Keywords: CHP; heat-electricity decoupling; advanced heating; intelligent power generation; heating by multiple sources; digital twin; waste heat recovery; heating with large temperature difference; long-distance heating

0 引言

电力能源作为支撑工业生产的要素, 与经济发展状况息息相关并紧随经济形势做出相应调整。电力能源以应用广泛、灵活可控、清洁高效的突出优点成为当今最重要的二次能源。

随着经济和电力的快速发展, 我国城镇化高速推进, 我国的供热事业也得到了飞速发展。我国北方地区因地理位置、气候等原因, 供热负荷需求大, 近 10 年, 北方集中供热面积年均增长率达 13%, 北京、哈尔滨、太原、银川、郑州等城市均建成了大规模的城市集中供热设施^[1]。除居民采暖供热外, 我国还存在大量工业供汽需求, 工业生产(包括化工、

造纸、制药、纺织和有色金属冶炼等)过程需要以热为基本的能源^[2]。

目前, 我国用电增长乏力, 部分地区用电量甚至出现了负增长, 使得大型抽凝热电联产发展方式受限。我国热电联产行业在以下方面存在障碍: 体制方面, 能源价格政策有待进一步理顺, 供热体制改革有待进一步深化^[3], 热电冷三联供发电机组并网问题亟待解决; 政策方面, 缺乏针对热电联产集中供热的财税优惠政策, 缺乏对热电联产项目运行的监督, 缺乏对“小火电”与“小热电”的正确理解; 资金方面, 新规划项目缺乏对热网建设的投资, 热网节能改造缺乏足够的资金来源, 有助于推动解决节能融资障碍的新机制较少。

为解决城市用能结构电热失调问题, 同时解决燃煤机组大幅度变负荷运行及超低负荷运行时, 在

收稿日期: 2020-12-14; 修回日期: 2021-02-26

基金项目: 中国华电集团科技项目(CHDKJ18-01-47)

变工况瞬态能够快速升降负荷的问题,国内外学者对燃煤发电机组的发电技术和供热技术开展了相关研究。研究发现:实现高效、灵活协同并满足社会多元化用能需求是燃煤发电技术的发展方向,即先进供热技术和智慧发电技术:先进供热技术满足用户多元化用能需求,节能减排,破解热电联产机组的热电耦合矛盾,实现热电协同;智慧发电技术,即人工智能(AI)+发电,在频繁深度变负荷运行背景下,实现燃煤电站高效、灵活、智能运行^[4-8]。

本文从热电联产发展趋势出发,分别对先进供热技术和智慧发电技术进行评述,着重介绍 2 个技术的原理及近年来的研究进展,结合燃煤机组的发展需求进一步评述其技术发展潜力,为我国燃煤机组先进供热技术和智慧发电技术的研究提供参考。

1 先进供热技术

1.1 发展趋势

1.1.1 国外热电联产发展趋势

国外热电联产发展的主要特点为多类型能源热电联产、燃料清洁化、节能技术系统化、热能消费计量化。其中,多类型能源热电联产应用可再生能源和小型分布式能源发电制热来满足分散的用户需求,同时达到最佳的经济效率和能源效率指标。世界各国热电联产都在努力降低燃料中燃煤的比重,积极开发利用天然气、煤层气、可再生能源等清洁燃料。近年来,国外围绕供热机组开发节能技术,同时也围绕供热管网、采暖系统和住宅采暖开发节能技术。Lund 等^[9]提出了第四代区域供热(4DH)以及智慧热网的概念,智能热网主要在利用低温热源以及与低能耗建筑物相互作用方面面临挑战。基于丹麦的能源系统,Mathiesen 等^[10]对比了将可再生能源集成到电源中的 7 种技术,确定了最省油、最省钱的技术为热泵技术。

1.1.2 我国热电联产发展趋势

我国热电联产目前正朝着更加清洁、高效、灵活的方向发展。未来能源消费的增量主要靠清洁能源提供,燃煤发电机组将作为基础能源为可再生能源发电提供调峰服务:主动采取热电解耦的措施,提升热电联产机组运行的灵活性;优化获得可解耦运行的热电联产机组热力系统;对新一代热电联产机组开展调峰调频特性研究,获得其优化运行策略。

1.2 技术特征

先进供热技术具有如下主要特征:灵活性改造和热电解耦、大型化+长距离低能耗热网、分布式热电联产+储能、精细化、智能化。

热源方面,乏汽余热回收和烟气余热回收技术不断完善,实现了高效供热,集成热电解耦技术,提升热电厂的电网调峰能力;热网方面,长途输热技术不断突破,安全性和经济性保障措施日益完善;供热末端方面,降低回水温度技术已经发展成熟,低回水温度也为余热回收和长途输送提供了前提;三级热网架构的提出,为降低回水温度的热力站改造找到了出路。而余热挖潜不足、热负荷供需地理空间分布不匹配、热电供应不协同是集中供热最突出的 3 个问题。

采用热电解耦、多热源高效供热、大温差供热、长输供热、智慧供热等技术,热源实现余热高效回收和热电协同,热网实现安全高效输配,末端实现低回水温度,管理更加智能化^[11-13]。

1.3 热电解耦技术

热电联产机组机组可以通过增加电锅炉、相变蓄热等蓄热装置,削弱用户之间的热负荷关系,打破“以热定电”的模式,实现热电解耦。

1.3.1 典型的热电解耦方式

典型的热电解耦系统包括集成热水储罐、低压转子光轴、低压缸零出力、压缩式热泵、电锅炉,如图 1 所示^[12]。

1.3.2 典型热电解耦系统的解耦性能

为获得典型热电解耦系统对机组最低电负荷、最大热电比的影响,对采用热泵、电锅炉、储热、低压缸零出力的解耦技术进行了最低电负荷和最大热电比对比,如图 2—3 所示。

从图 2 可以看出:供热量为 200 MW 时,原机组的最低电负荷为 181.88 MW,压缩式热泵、电锅炉、储热、低压缸改造后最低电负荷分别降低了 39.37%,68.22%,23.34%,81.86%。

从图 3 可以看出:发电量为 160 MW 时,原机组的最大热电比为 0.992 3,压缩式热泵、电锅炉、储热、低压缸改造后最大热电比分别提高了 0.84,1.46,0.50,2.05。

综上所述:采用热泵、电锅炉、储热等解耦技术均能扩大机组的安全运行区间;几种解耦方式均可提高机组的最大热电比,降低机组的最低电负荷。

1.4 多热源组合高效供热技术

为了提高供热的效率,降低供热能耗,目前由供热机组为热网提供热源的单一模式将发生很大变化,热电联产系统未来将由多种形式的热源组合而成,如图 4 所示。

1.4.1 高背压直接换热供热方式

高背压供热方式是在抽汽工况的基础上提高背压或进行换转子改造,热网回水先和低压缸排汽

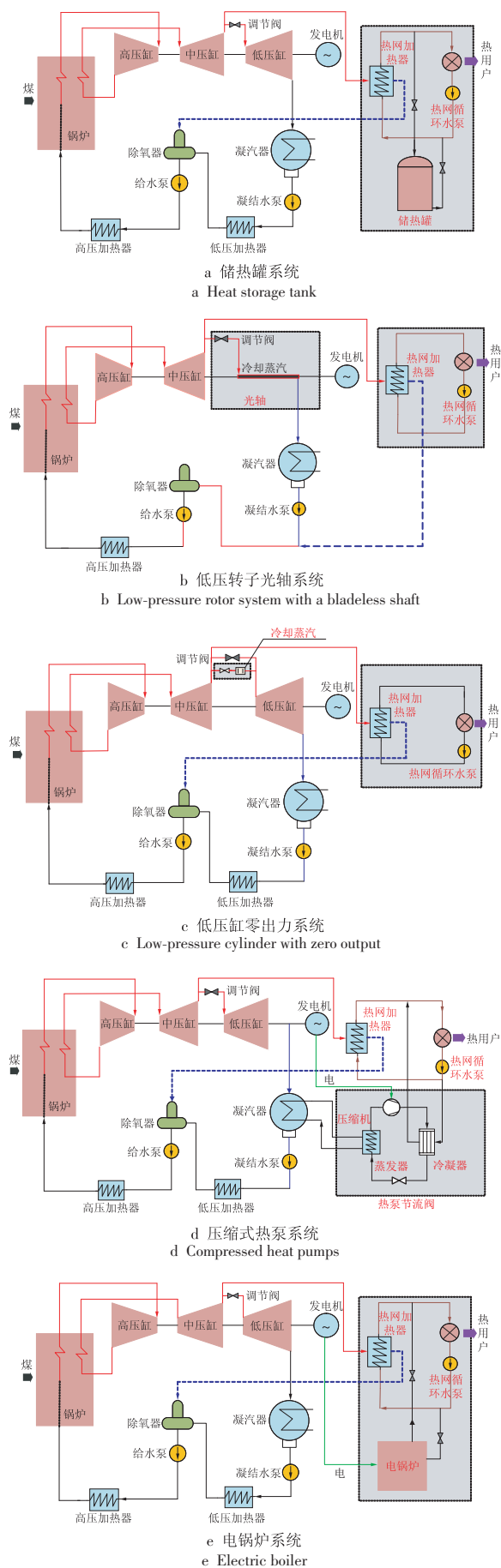


图 1 热电联产机组典型的热电解耦系统
Fig. 1 Heat-electricity decoupling system in a typical CHP unit

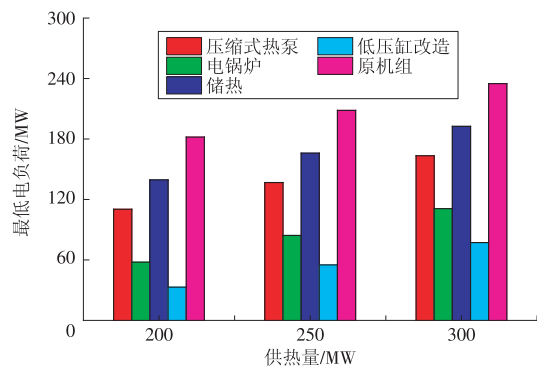


图 2 不同解耦方式最低电负荷对比

Fig. 2 Minimum electric load with different decoupling methods

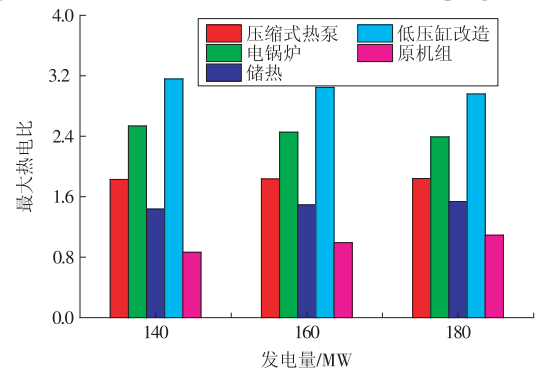


图 3 不同解耦方式最大热电比对比

Fig. 3 Maximum heat-to-electric ratios with different decoupling methods

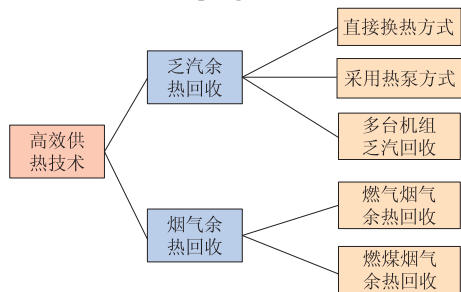


图 4 多热源组合高效供热

Fig. 4 Efficiency heating made by multiple heat sources
直接换热,可减少一部分抽汽尖峰加热量,抽汽流量更少,如图5所示。

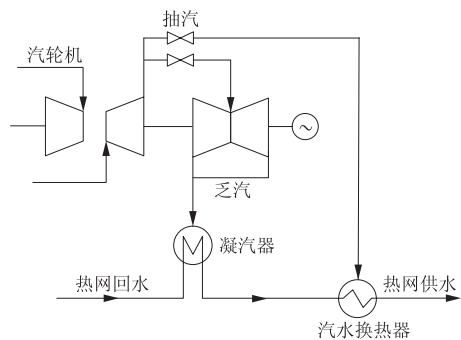


图 5 直接换热供热系统

Fig. 5 Direct heat-exchange system

1. 4. 2 机械压缩式热泵回收余热供热方式

通过热泵采用高品位能量提取乏汽余热,图 6 为电驱动机械压缩式热泵余热回收系统。

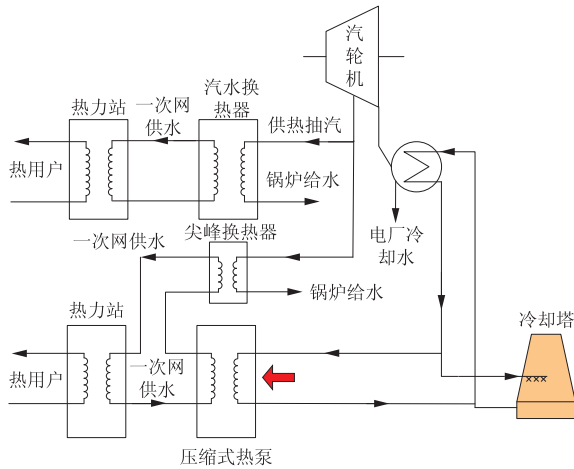


图 6 电驱动机械压缩式热泵回收余热系统

Fig. 6 Heat recovery system with mechanical compressed heat pumps driven by electricity

1. 4. 3 多台机组乏汽回收余热供热方式

按照背压由低到高的顺序将多台机组的凝汽器串联,共同承担供热基本负荷,然后由吸收式热泵回收余热,最后由抽汽直接加热作为调峰,使电厂更加简单高效,如图 7 所示。

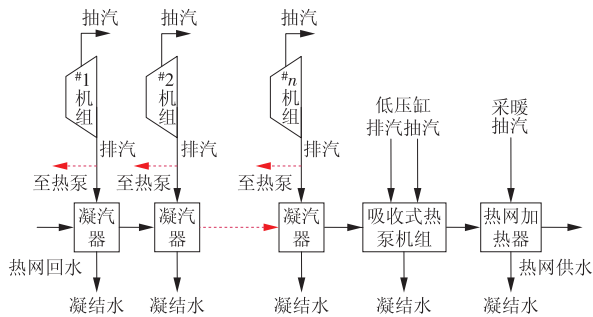


图 7 多台汽轮机吸收式热泵供热系统

Fig. 7 Absorption heat pump for multiple steam turbines

由图 8 可见:回水温度较高时,多台机组串联对降低系统能耗的影响不大;随着回水温度的降低,多台机组“梯级加热”以减小换热损失的优势更加明显;随着串联机组台数的增加,发电煤耗和供热煤耗显著降低。

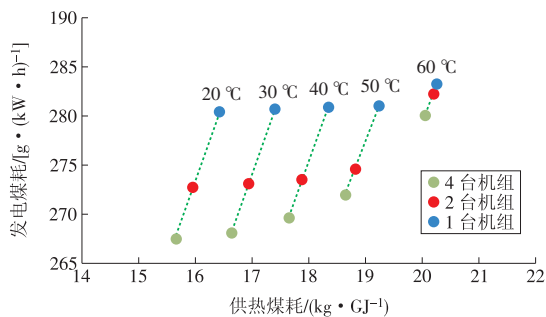


图 8 多台汽轮机吸收式热泵供热系统发电煤耗及供热煤耗

Fig. 8 Coal consumptions of power supply and heat supply made by the absorption heat pump for several units connected in series

1. 4. 4 燃气烟气余热回收供热方式

燃气烟气余热回收供热是在常规的烟气余热回收技术(包括利用热网回水与烟气换热、利用空气与烟气换热或二者结合)的基础上,为了获得低温冷源,在系统中加入吸收式热泵,利用热泵制取低温冷却水,从而达到深度回收余热的目的,如图 9 所示。

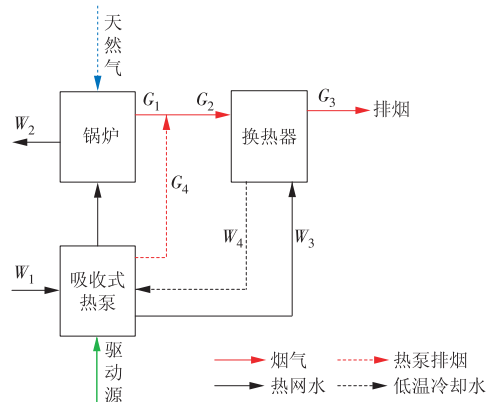


图 9 燃气烟气吸收式热泵原理

Fig. 9 Absorption heat pump applied in flue gas from coal-fired units

在热网回水温度为 50 °C 的情况下,该余热回收方式可以将经济排烟温度降至 20 °C,系统的余热回收率可达 80%。烟气进入深度余热回收阶段时,会出现大量的酸性冷凝水,对设备产生腐蚀;同时,换热量越大,设备造价越高;因此,实际工程中一般使用直接接触式喷淋塔代替间壁式换热器,可有效降低腐蚀带来的影响,同时降低设备成本,减少传热质阻力,提高换热效率。

1. 4. 5 燃煤烟气余热回收供热方式

现阶段较为成熟的燃煤烟气余热回收技术为湿法脱硫的烟气余热回收与减排一体化技术,其原理如图 10 所示。以吸收式热泵制取低温冷源作为喷淋塔的循环冷却水,经过脱硫塔后的烟气在喷淋塔中进一步降温排出,烟气在喷淋塔中进行了二次洗涤,进一步脱除 SO₂、NO_x 等污染物,烟气冷凝水可以作为脱硫塔的补水。

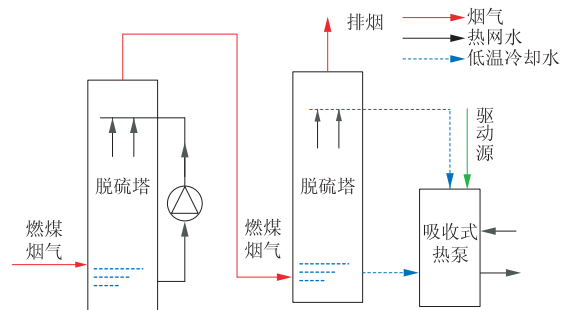


图 10 燃煤烟气余热回收技术原理

Fig. 10 Recovery process of waste heat from coal-fired flue gas

1.5 大温差供热技术

1.5.1 技术原理

大温差供热的核心在于降低热网回水温度,这要依靠位于热网末端的吸收式换热器。这种吸收式换热器之所以能够降低一次水温度,是依赖一次侧供水与二次侧供水之间的温差。两侧流量的差异越大、一次侧供水与二次侧供水温差越大,吸收式换热器对一次侧回水的降温能力就越大。

大温差技术路线包括高效换热器、吸收式换热器、压缩式热泵等。

1.5.2 发展瓶颈

尽管吸收式换热技术已经相当成熟,但目前仍没有一个城市能真正把回水温度降到30℃以下,其主要原因是热力站改造困难:(1)需要对全部热力站进行改造,把原来的板式换热器更换为吸收式换热器;(2)吸收式换热器体积大,设备进入现场困难,有的场合还找不到足够的安装空间。

1.6 长输供热技术

在北欧,长距离集中供热输送管道已经应用了几十年,是实现多重效益的技术解决方案,包括但不限于利用偏远工业企业和发电厂的余热。长距离输送技术通过合并集中供热网络,平衡可用的热能生产能力和热需求,实现更优的整体生产组合。

在中国,集中供热输送管道也已经应用了数十年,通常比北欧的管道管径更大。随着中国集中供热系统的迅速发展,集中供热长输管线的应用逐渐增加。我国兴建的集中供热系统长输管线管径大,管内输送介质温度高、压力大,承担的热负荷大(增加了多级泵站输送、水击防护等安全保障技术);同时,供热系统长输管线工程都是各省市防治大气污染、保障城镇居民供热的重要民生举措,投入了大量的人员和资金进行建设^[14]。

1.6.1 高效输送技术

热电联产长输供热系统输送距离长、流量大,系统的输配能耗很大,因此,如何实现高效输送,降低热网输配能耗成为亟需解决的问题。管壁粗糙度是热水管道水力计算的重要基础参数,它反映了管壁的光滑程度及管道变形状况对流动过程的影响,其取值对热网输配能耗的影响很大^[15]。

在管道内壁涂刷防腐减阻涂层,既可以防止管内腐蚀,还可以降低管道的摩擦阻力,减少长输供热管网的输配能耗。

1.6.2 水热同输技术

为缓解水资源危机,我国在提倡大力节水的同时,积极开发利用海水等非常规水资源。海水淡化作为有效的淡水补充途径,已逐步成为水资源的重

要补充和战略储备。海水淡化主要分为反渗透法(膜法)和蒸馏法(热法)2大类。其中蒸馏法利用电厂余热,通过多次梯状的蒸发和冷凝实现淡水分离。常规的蒸馏法分离出30℃左右的淡水及蒸汽,冷却后作为产品输出。冬季时不冷却产品淡水,而是进一步加热升温后输送出去,可实现淡水和热量的同时输送,即“水热同输”。该技术主要应用于沿海热电厂。

沿海热电厂的水热同输系统将海水淡化技术和余热利用技术结合在一起。淡水(海水淡化产品)作为热载体,将热量从热电厂输送到城市集中供热系统中。水热同输系统分为高温淡水制备、长距离输送和末端热量析出3个部分,如图11所示。

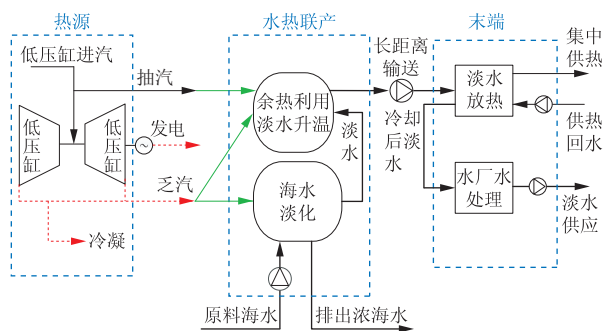


图11 沿海电厂水热同输系统

Fig. 11 Transmission system for water and heat from coastal power plants

1.6.3 高性能管道保温技术

针对如何减少长输管道沿途散热损失的问题,高性能纳米气凝胶管道保温技术是一种比较有效的措施。

导热系数低于无对流空气的绝热材料称为超级绝热材料^[16],气凝胶就是一种超级绝热材料。气凝胶的孔径尺寸低于常压下空气分子平均自由程,在气凝胶孔隙中,空气分子近似静止,几乎避免了空气对流传热;同时,气凝胶极低的体积密度及纳米网络结构的弯曲路径,阻止了气态和固态热传导;另外,气凝胶趋于无穷多的孔壁,可以使热辐射降至最低^[17];在这3方面的共同作用下,热传递的所有途径几乎全被阻断。

以某工业园区集中供热蒸汽管道工程(DN 600管道,蒸汽流量为100 t/h,压力为1 MPa,温度为270℃)为例,与传统保温结构相比较,采用气凝胶或气凝胶复合保温结构,每1 km管线每年可分别节能3 001,2 047 GJ,以热价55元/GJ进行计算,折合人民币16.5万,11.2万元。

某工业园DN 600地埋蒸汽管道长6.2 km,对传统保温方案和纳米气凝胶毡方案进行对比。气凝胶保温材料费用高于传统保温材料,但由于气凝

胶优异的绝热性能,达到同等效果所用保温材料厚度为传统材料的 1/4,因而外套钢管用量仅为前者的 1/2,总费用低于传统保温方案。

1.7 智慧供热技术

当前,我国供热行业正处在产业升级转型、新旧动能转换的关键期,传统的增长方式难以为继,亟需通过创新培育形成发展新动能^[18]。为实现绿色生产、智能生产以及资源高效循环利用,我国供热行业迫切需要按照技术和产业变革趋势采取产业升级行动,掌握发展主动权,其中一个重要途径是结合“互联网+”智慧能源技术,实现以供热系统为代表的能源板块的精细化运行调度。

1.7.1 智慧热网(智慧供热)原理

“互联网+”智慧能源是一种互联网与能源生产、传输、存储、消费以及能源市场深度融合的能源产业发展新形态,具有设备智能、多能协同、信息对称、供需分散、系统扁平、交易开放等特征,通过推进信息系统与物理系统在量测、计算、控制等多功能环节上的高效集成,实现能源互联网的实时感知和信息反馈,建设信息系统与物理系统相融合的智能化调控体系^[19-22]。伴随新一代信息技术的飞速发展,互联网、大数据和云计算等技术与各行业加速融合,“互联网+”智慧能源这一理念正呈现从第三产业向第二产业渗透、融合的趋势。

1.7.2 智慧热网关键技术

智慧热网必需的组成部分是二次网及末端用户的精细调控^[23],为了实现这一目标,需要以现有热网数据采集与监控系统(SCADA)、分散控制系统(DCS)以及计量系统等为基础,以物联感知技术为支撑,对热网关键位置的热工水力参数测量进行完善,形成供热系统感知测量手段,以实现按需精准供热调控。智慧热网硬件感知设备框架如图 12 所示。

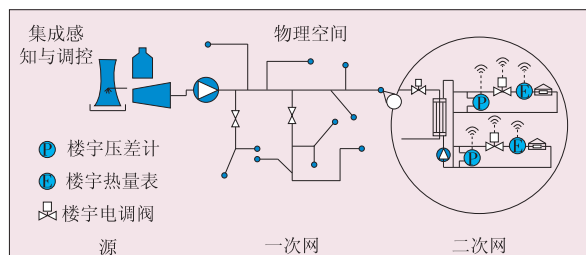


图 12 智慧热网硬件感知设备框架

Fig. 12 Framework of measurement apparatus in intelligent heating network

1.7.3 基于机理与辨识相结合的建模仿真

智慧热网系统中对供热管网的建模主要采用机理建模方法,这种结构机理模型能够细化到管

径、管材、管长、弯头、保温层厚度、阀门特性等参数。单纯依靠机理建模获得的仿真结果与实际运行状态之间必然存在一定偏差,热网投产运行一段时间后,系统能够通过基于测量数据的辨识建模方法对机理模型进行自适应修正,以提高仿真的精度。供热系统建模与仿真技术路线如图 13 所示。

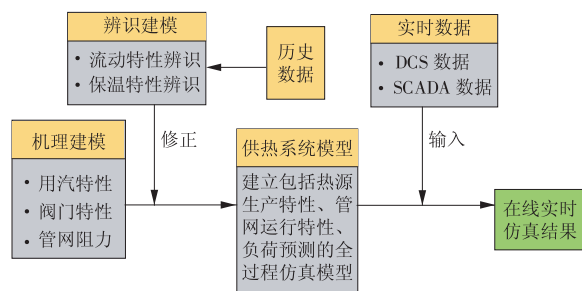


图 13 供热系统建模与仿真技术路线

Fig. 13 Modeling and simulation technology roadmap of the heating system

1.7.4 基于大数据的分析与诊断

智能热网系统基于供热系统海量历史数据,依据热用户自身用汽性质分析负荷影响因素,结合季节、节假日、日夜峰谷、天气等因素,采用与数据匹配度高的回归分析法、神经网络法或模糊预测法等大数据分析法建立热用户的负荷预测模型,对未来的负荷发展趋势进行预测,进而获取未来一段时期内各热用户及整个供热系统的负荷发展趋势,为供热系统的预测性调节控制提供基础数据,实现系统的供需动态平衡匹配^[24-26]。此外,基于运行数据的分析处理,还可建立热网蒸汽品质及管网设备诊断模型,以支持供热系统的故障诊断及状态维修。

1.7.5 基于智能算法的决策优化

以供热系统建模与仿真为基础,智慧供热平台能够支持供热系统运行调度决策的在线优化,实现供热系统的智慧化运行。其核心方法是,以仿真计算为“内核”,以并行智能优化算法为“外壳”,对特定运行条件下的多样化生产调度决策方案进行对比择优。基于仿真模型预测的运行决策优化框架如图 14 所示。

根据上述技术路线,构建图 15 所示的智慧城市供热系统技术构架,主要包含数据采集、仿真运行、数据分析、决策优化 4 个层次。

2 智慧发电技术

智慧发电技术是以动力过程的数字化、自动化、信息化、标准化为基础,以管控一体化、大数据、云计算、物联网为平台,集成智能传感与执行、智能控制与优化、智能管理与决策等技术,形成一种具

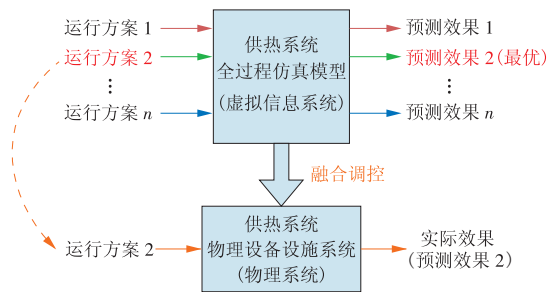


图 14 基于仿真模型预测的运行决策优化框架

Fig. 14 Optimized operational decision-making process based on simulation model prediction

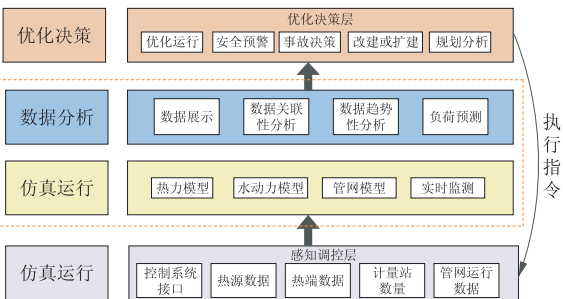


图 15 智慧城市供热系统技术框架

Fig. 15 Technical structure of the intelligent municipal heat-supply system

备自学习、自适应、自趋优、自恢复、自组织的智能发电运行控制管理模式,实现更加清洁低碳、高效安全、灵活的生产目标。智慧发电技术是从智能感知到闭环控制的全链条技术方案,如图 16 所示。

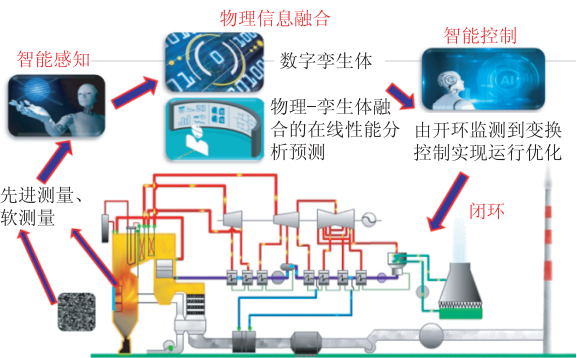


图 16 智慧发电技术框架

Fig. 16 Technical structure of intelligent power generation technology

2.1 智能感知技术

2.1.1 智能感知技术背景

目前,电站锅炉需要监测上千组运行参数,这些数据是进行系统分析、性能检测、模型优化的前提,也是控制系统负反馈的重要组成部分,因此,实时、准确的数据测量技术是电厂高效运行的必要保证。测量参数可分为模拟量及数字量2大类:数字量主要表征辅机与快关阀等设备与元件的运行状态;模拟量则包含温度、压力、流量、料位、组分、电

流及设备状态。电厂很多关键参数测量不准确或难以实时测量,如煤质在线测量、燃烧测量、飞灰含碳量在线测量、主蒸汽流量测量、排汽焓值测量等,这些都影响了数字化电厂的发展。

2.1.2 智能感知技术分类

智能感知技术包括先进检测技术和软测量技术。先进检测技术采用激光诱导击穿光谱(LIBS)煤质分析技术、计算机断层扫描-可调谐二极管激光吸收光谱(CT-TDLAS)煤粉炉炉膛温度/浓度分布测试技术,实现在线煤质分析、在线锅炉燃烧监测等。软测量技术依据易测过程变量与难以直接测量待测过程变量之间的数学关系,通过各种数学计算和估计方法,实现对待测过程变量的测量^[27]。

2.2 数字孪生技术

2.2.1 定义与作用

2012年美国航空航天局(NASA)给出了比较系统、完整的数字孪生定义:充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据,集成多学科、多尺度的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应物理实体产品的全生命周期过程^[28]。数字孪生技术可实现超时计算、故障预测、提前预警;反映设备的性能,调整运行方式,进行智能决策;获取全厂运行数据,进行全局变量的优化。

2.2.2 模型分类

数字孪生技术模型分为机理模型、数据驱动模型和混合驱动模型。其中机理模型需要了解明确的机理,遵循质量、动量、能量等守恒定律,为了建立模型需要进行合理假设。数据驱动模型需要输入、输出数据,不需要了解机理和模型情况,模型在数据覆盖的范围内有效。混合模型将机理模型和数据驱动模型进行组合,充分利用机理模型和数据驱动模型的优势。

2.2.3 机理模型特点

由于数字孪生和控制系统的目的不同,应用于数字孪生系统的机理模型与应用于控制系统的机理模型也不相同。

在模型形式方面,为了简化计算,应用于控制系统的机理模型多采用零维模型,而应用于数字孪生系统的机理模型形式相对灵活,可以根据需要建立一维模型、分布参数模型、神经网络模型等模型进行综合建模;在计算参数方面,应用于控制系统的模型要建立输入与输出函数,忽略与控制系统无关的因素,而应用于数字孪生系统的模型不仅要计算设备热力参数,还要对设备的性能参数、系统效率进行计算,因此机理模型更全面;在数据处理方面,应用于控制系统的机理模型对数据多为参数辨

识,而数字孪生系统要求模型不仅能够对参数进行辨识,还能对历史数据进行有效的挖掘和利用,充分发挥机理模型作为先验知识的作用。

2.2.4 数据驱动模型特点

(1)模型计算成本低,可以在线计算;(2)利用现场数据建立的模型计算精度高;(3)模型的解释性差且难以利用先验知识;(4)计算的准确度有限。

2.2.5 混合模型特点

混合模型也称为灰箱模型,最早在 20 世纪 90 年代被提出。其优势是比机理模型更容易建立,对于非线性和动态系统而言性能更高,模型的结构和参数具有一定的物理意义,比数据驱动模型具有更好的泛化能力。不足之处是模型的性能受限于机理模型的性能,建模方式虽灵活,但依赖于使用者的决策,在优化问题中,模型的参数可能无法收敛到全局最优^[29]。

2.3 闭环控制技术

随着人工智能、数据处理以及计算机硬件平台的发展,将先进优化控制算法应用于热力系统成为可能,传统比例-积分-微分(PID)控制系统在稳定、低扰动工况附近控制效果稳定,因此得到广泛应用。随着电厂调峰任务的增加,负荷变化速率和范围都在增加,控制系统的非线性问题使线性控制系统的控制效果不断降低,启停工况和事故工况下控制效果有限。

闭环控制技术采用模型驱动的先进控制算法,主要有预测控制、前馈控制等。使用机理模型可以提高控制系统的准确度,减少系统非线性的影响。结合热网供热负荷实时预测,利用全网仿真模型进行实时运行工况的在线寻优,通过智能优化算法对热网运行调度的控制策略及控制变量进行优化,为热网的预调节及实时调节提供决策方案;同时,支持事故状态、热用户快速启停等突发情况下热网运行方式的快速寻优,科学指导突发事件发生时的运行调节。

3 先进供热与智慧发电技术展望

通过先进供热技术,加快燃煤发电升级与改造,加大既有热电联产机组、燃煤发电机组调峰灵活性改造力度,改善电力系统调峰性能,提高火电机组灵活运行模式和运行效率。通过智慧发电技术,开发在线诊断技术,实现火电机组边界频繁扰动的优化控制。先进供热与智慧发电技术还有待完善,但这 2 种技术可为我国热电联产行业的发展以及火电发电设施、用电设施以及电网智能化提供技术支持,全面提升供热系统管控能力,同时推动

我国能源结构向低碳化、清洁化加速转型。

参考文献:

- [1]王瑞琪.直埋预制保温管生产技术讨论[J].科技信息, 2012(15): 161.
- [2]张化.火力发电企业工业供汽市场分析[J].中国市场, 2012(6): 56-57.
- [3]康艳兵, 张建国, 张扬.我国热电联产集中供热的发展现状、问题与建议[J].中国能源, 2008(10): 8-13.
- [4]孙哲, 刘振波.基于智慧模型的脱硝控制系统优化[J].华电技术, 2020, 42(9): 37-44.
SUN Zhe, LIU Zhenbo. Application of intelligent model in denitration control system optimization [J]. Huadian Technology, 2020, 42(9): 37-44.
- [5]徐君.智慧化供热的发展[C]//中国市政工程华北设计研究总院有限公司.2019 供热工程建设与高效运行研讨会论文集(下), 2019: 191-192.
- [6]郭秀峰.基于信息化的智慧热网系统应用分析[J].智能建筑与智慧城市, 2018(11): 119-120.
GUO Xiufeng. Application analysis of smart heat network system based on information [J]. Intelligent Building & Smart City, 2018(11): 119-120.
- [7]马超.智能化供热网络构建与应用分析[J].数字通信世界, 2019(7): 98.
MA Chao. Construction and application analysis of intelligent heating network [J]. Digital Communication World, 2019(7): 98.
- [8]张尹路, 李文甲, 康利改.智慧供热在分布式燃气供热中的应用与优化提升[J].华电技术, 2020, 42(11): 14-20.
ZHANG Yinlu, LI Wenjia, KANG Ligai. Application and optimization of intelligent heating in distribute gas heating systems [J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 14-20.
- [9]LUND H, WERNER S, WILTSHIRE R, et al. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems [J]. Energy Oxford, 2014, 68(4): 1-11.
- [10]MATHIESEN B V, LUND H. Comparative analyses of seven technologies to facilitate the integration of fluctuating renewable energy sources [J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(2): 190-204.
- [11]魏海蛟, 鹿院卫, 张灿灿, 等.燃煤机组灵活性调节技术研究现状及展望[J].华电技术, 2020, 42(4): 57-63.
WEI Haijiao, LU Yuanwei, ZHANG Cancan, et al. Status and prospect of flexibility regulation technology for coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 57-63.
- [12]LIU M, WANG S, ZHAO Y, et al. Heat-power decoupling technologies for coal-fired CHP plants: Operation flexibility and thermodynamic performance [J]. Energy,

- 2019, 188: 116074.
- [13] 王金星, 张少强, 张瀚文, 等. 燃煤电厂调峰调频储能技术的研究进展[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 64-71.
WANG Jinxing, ZHANG Shaoqiang, ZHANG Hanwen, et al. Progress on the peak load regulation, frequency regulation and energy storage technologies for coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2020, 42 (4) : 64-71.
- [14] 付林, 李永红. 利用电厂余热的大温差长输供热模式[J]. 华电技术, 2020, 42(11): 56-61.
FU lin, LI Yonghong. Long-distance heat-supply mode with large temperature difference using waste heat of power plants[J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 56-61.
- [15] 陈文华. 管壁当量粗糙度对集中供热管网设计的影响[J]. 科技信息, 2009 (5): 644-645.
- [16] 朱英娣. 纳米气凝胶绝热毡的应用及性能分析[J]. 石油石化绿色低碳, 2017, 2(6): 53-56.
ZHU Yingdi. The application of nano-aerogel insulation blanket and performance analysis [J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2017, 2(6): 53-56.
- [17] 孙宗宇, 乔鏢, 曹勇. 智慧能源建筑应用技术的发展与展望[J]. 建筑科学, 2018, 34(9): 143-147.
SUN Zongyu, QIAO Biao, CAO Yong. Development and prospect of smart energy technology applied in buildings [J]. Building Science, 2018, 34(9): 143-147.
- [18] 焦永花. 基于软测量的染纱能耗问题研究和系统设计[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- [19] 杨瑞. 智能化、数字化、网络化供热系统的构建与实施[J]. 华电技术, 2020, 42(6): 83-86.
YANG Rui. Construction and implementation of intelligent, digital and networked heat-supply system [J]. Huadian Technology, 2020, 42(6): 83-86.
- [20] 咸孟雄. 以数据为导向的关于智慧供热发展的研究[J]. 现代信息科技, 2020, 4(6): 135-137.
XIAN Mengxiong. A data-oriented research on the development of intelligent-heating [J]. Modern Information Technology, 2020, 4(6): 135-137.
- [21] 方修睦, 杨大易, 周志刚, 等. 供热自动化、信息化及智能化的差异探讨[J]. 华电技术, 2020, 42(11): 34-38.
FANG Xiumu, YANG Dayi, ZHOU Zhigang, et al. Discussion on automation, informatization and intellectualization of heating [J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 34-38.
- [22] 任新生. 火电企业供热生产集中化、智能化的改造实践[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 70-75.
REN Xinsheng. Practice of centralizing and intelligent transformation on heating supply of thermal power enterprises [J]. Huadian Technology, 2019, 41 (11) : 70-75.
- [23] 韩钊, 袁建娟, 孙春华, 等. 基于信息化的智慧热网系统应用分析[J]. 区域供热, 2018(2): 24-30.
HAN Zhao, YUAN Jianjuan, SUN Chunhua, et al. Application analysis of intelligent heating network system based on information technology [J]. District Heating, 2018 (2): 24-30.
- [24] 钟巍, 陆烁玮, 刘荣. 智慧供热的理念、技术与价值[J]. 区域供热, 2018(2): 1-5.
ZHONG Wei, LU Shuowei, LIU Rong. Concept, technology and value of intelligent heating [J]. District Heating, 2018 (2): 1-5.
- [25] 顾志祥, 孙思宇, 孔飞, 等. 燃气冷热电分布式能源系统设计优化综述[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 8-13.
GU Zhixiang, SUN Siyu, KONG Fei, et al. Design optimization summary of CCHP distributed energy system driven by gas [J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 8-13.
- [26] 石光辉, 申鹏飞. 基于太古热网智慧供热信息服务平台搭建基础数据体系的探讨[J]. 区域供热, 2019(6): 48-53.
SHI Penghui, SHEN Pengfei. Discussion on intelligent heating information service platform of swire heating network [J]. District Heating, 2019(6): 48-53.
- [27] 张新生. 基于数字孪生的车间管控系统的设计与实现[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [28] 陶飞, 戚庆林, 王力羣, 等. 数字孪生与信息物理系统——比较与联系[J]. Engineering, 2019, 5(4): 132-149.
TAO Fei, QI Qinglin, WANG Lihui, et al. Digital twins and cyber physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and compation [J]. Engineering, 2019, 5(4): 132-149.
- [29] 钟巍, 郑立军, 俞自涛, 等. 基于“数字孪生”的智慧供热技术路线[J]. 华电技术, 2020, 42(11): 1-5.
ZHONG Wei, ZHENG Lijun, YU Zitao, et al. Smart heat-supply roadmap based on digital twin [J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 1-5.

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

李娜(1982—), 女, 河南濮阳人, 高级工程师, 工学硕士, 从事火力发电厂设计与研究方面的工作(E-mail: lina@chec.com.cn)。