文章编号:1674-7607(2026)10-0037-07 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.250441

压水堆核能供汽长距离输送参数提升方案及经济性分析

张 晋[1], 周媛媛[2,3], 宋兵兵[2], 武心壮[1], 姜旭东[1], 韩小渠[2]
(1. 上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海 200233;
2. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西西安 710049;
3. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东深圳 518124)

摘 要: 基于压水堆核能供汽长距离输送的需求,本文提出电加热、蒸汽压缩机和混合加热 3 种蒸汽参数提升技术,对 40 km 输汽场景开展热力学设计与经济性对比分析。结果表明:在核电厂内,利用电加热器将蒸汽二次过热至 290 ℃,能维持蒸汽管道末端 12 K 的过热度,每吨蒸汽的成本增量最低,仅 15.19 元;热网处设置两级蒸汽压缩,能保障蒸汽过热运输,但系统设备投资较高,每吨蒸汽成本增加 29.34 元;针对混合加热技术,需要掺混质量分数为 28%的高价火电蒸汽,导致每吨外供蒸汽成本增加 33.96 元,且系统波动显著;综合技术成熟度、经济性与运行稳定性,核电厂内电加热技术是突破核能供汽远距离传输的最优方案。

关键词: 压水堆; 核能长距离供汽; 参数提升; 经济性
中图分类号:TK11 **文献标志码:**A **学科分类号:**490.50

Economic Analysis of Parameter Improvement Schemes for Long-distance Transportation of Nuclear Steam Supply in Pressurized Water Reactors

ZHANG Jin[1], *ZHOU Yuanyuan*[2,3], *SONG Bingbing*[2],
WU Xinzhuang[1], *JIANG Xudong*[1], *HAN Xiaoqu*[2]
(1. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China;
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;
3. China Nuclear Power Engineering Design Co., Ltd., Shenzhen 518124, Guangdong Province, China)

Abstract: To address the requirements for the long-distance transportation of nuclear steam supply from pressurized water reactors, three steam parameter improvement technologies were proposed, including electric heating, steam compression, and hybrid heating. Thermodynamic design and economic analysis were conducted for a 40 km steam transmission scenario. Results show that within the nuclear power plant, using an electric heater to reheat the steam to 290 ℃ can maintain a superheat degree of 12 K at the end of the steam pipeline, with the lowest cost increment per ton of steam at only 15.19 RMB. Installing two-stage steam compression in the heating network ensures superheated steam transportation, but the system equipment investment is high, increasing the cost by 29.34

收稿日期:2025-07-09 **修订日期:**2025-08-20
作者简介:张 晋(1992—),河南南阳人,男,硕士,研究方向为核电站设计及核能综合利用,E-mail: zhangjin2@snerdi.com.cn。

RMB per ton. For the hybrid heating technology, mixing with 28% mass fraction of high-priced thermal power steam leads to a cost increase of 33.96 RMB per ton of externally supplied steam, accompanied by significant system fluctuations. Considering technical maturity, economic efficiency, and operational stability, the in-plant electric heating technology is the optimal solution for breaking through the bottlenecks in the long-distance transmission of nuclear steam supply.

Key words: pressurized water reactor; long-distance nuclear steam supply; parameter improvement; economy

面对能源和气候的双重挑战,低碳能源转型成为全球共识[1]。核能以稳定性和低排放性成为破解科学降碳和用能成本难题的重要选项[2],不仅能提供可靠的低碳电力,还能通过热电联产技术优化热能利用效率至80%以上[3],最终输出清洁热能。

核能热电联产可以追溯至上世纪70年代[4],在运核电厂以蒸汽或热水的形式向不同设施供热[5-6]。国内外已有成熟的核能商业供暖案例以及基于实际进行的研究。Jasserand等[7]研究了Nogent核电站向距离90 km的巴黎区域供暖的潜力,在政策支持下,项目的投资回收期为13 a。Leurent等[8]提出了核能热电联产厂的技术经济模型,计算了欧洲15个核电站进行区域供热的潜力。武心壮等[9-10]、周正道等[11]讨论了AP1000核电机组的供热方案,选取高压缸排汽为最佳抽汽供热位置,并评估了核能热电联产系统的热经济性。丁振宇等[12]研究发现国内某压水堆核电机组蓄热能力完全满足一次调频的需求。Chen等[13]分析了核能热水联产系统在胶东半岛的应用效果。

压水堆核电机组受限于蒸汽参数,其供汽难度相对于供暖更具挑战性,适用于向化肥、造纸及石油等工业提供低压蒸汽[3]。Leurent等[14]评估了法国工厂使用核能供应蒸汽的可能性。我国制造行业对蒸汽的需求巨大,且保持着较高的增长态势,其中华东、华北地区的工业蒸汽市场已超过全国的一半[15]。我国也开始逐步推进核能工业供汽的工程建设,近年来已陆续开工或已开展前期准备的项目包括田湾核电、海南昌江核电、中核苏能徐圩项目、中广核烟台招远项目、福清核电供汽项目等[16]。国内学者就供汽方案的可行性和经济性进行了讨论。田里等[17]计算出200 MW核供热堆工业供汽的内部收益率为20.55%。张玉祯等[18]提出了1 000 MW压水堆供汽的技术方案。Song等[19]发现兆瓦级核电机组供热供汽在价格竞争力及政策支持方面具有经济前景。

压水堆核能供汽方的出厂蒸汽参数较低,而蒸汽长距离输送的温降和压降较大[20-22],难以满足用户对蒸汽品质的要求,且国内相关研究较少。为进一步扩大核能供汽的覆盖范围,提升核能在地方工业生产中的服务能力,亟需开展蒸汽参数提升技术的相关研究,有必要进行蒸汽参数提升技术方面的相关研究,通过技术路径优化和技术经济性分析,为工程应用提供更加经济高效的解决方案。

1 系统描述

1.1 火-核双热源长距离传输供汽系统

在压水堆供汽参数受限的背景下,基于区域能源互补构建的核-火耦合协同供汽系统具有高度的工程适配性。以东南沿海的某化工园区为研究对象,其热负荷需求参数如表1所示,化工园区具有多参数层级的蒸汽需求,需要采用分级供汽。11.5 MPa的超高压蒸汽由厂内动力站负责生产。高压及次高压蒸汽由热源参数较高的热电厂供应。而压水堆限制于二回路蒸汽参数,仅提供中压与低压蒸汽。蒸汽经长输管网到达化工园区后,一部分在用户侧过热,满足中压蒸汽需求;剩余蒸汽减温减压到低压蒸汽的参数要求。化工园区对1.3 MPa等级以下的中压与低压蒸汽的负荷需求为1 800 t/h,即压水堆供汽系统的额定流量需求。

表1 化工园区各等级蒸汽参数

Tab.1 Steam parameters at different levels in chemical industrial parks

蒸汽等级	压力/MPa	公称温度/℃
超高压蒸汽	11.5	520
高压蒸汽	4.2	400
次高压蒸汽	2.5	310
中压蒸汽	1.3	290
低压蒸汽	0.5	210

火-核双热源长距离供汽系统如图1所示,2.5 MPa蒸汽从核电厂出发经2根DN1200的管道输送40 km至化工园区。核电厂与火电厂的供汽管道分别输送10 km后在途中交汇,同轴并行延伸至

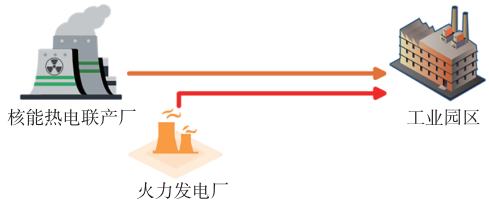


图 1　火-核双热源长距离供汽系统热网图

Fig. 1　Thermal network diagram of a long-distance steam supply system with fossil-nuclear dual heat sources

工业热用户处，保持独立传输路径。

1.2　核电厂供汽系统

基于核电厂供汽系统的设计要求，选取了某百万千瓦级压水堆核电机组为改造对象。其一回路设计为单堆双环路布置，二回路汽轮机采用单轴、四缸、六排汽的两级再热凝汽式汽轮机，其中高压缸与低压缸间配置有 2 列并排布置的汽水分离再热器。回热系统布置采用“两高、四低、一除氧”构型。压水堆机组堆功率为 3 400 MW，汽轮机功率为 1 251 MW，主蒸汽压力为 5.53 MPa，额定蒸发量为 6 667 t/h。

基于压水堆的核能供汽系统设计不采取传统热电厂直接减温减压供汽的常规手段，而是设置蒸汽转换系统为供汽三回路，通过双重隔离设计确保核能供汽系统的技术可行性和安全可靠性。

蒸汽转换系统的热源影响供汽效率和稳定性。核电机组二回路能提供主蒸汽、汽轮机抽汽、再热蒸汽等多种蒸汽来源，具有不同的热力学特性和应用范围。主蒸汽因具有较高的压力与温度，能满足工业蒸汽生产高温要求，而汽轮机抽汽等热源由于参数较低，生产高参数工业蒸汽难度大。因此，基于压水堆的核能供汽系统以主蒸汽为热源，利用多级换热设备生产设定参数的工业蒸汽。核能供汽系统流程图如图 2 所示。

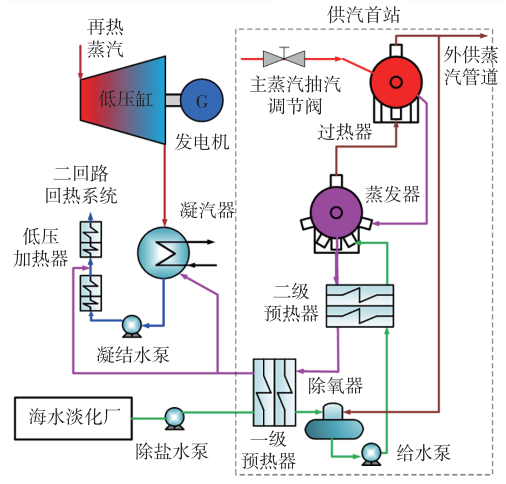


图 2　核能供汽系统流程图

Fig. 2　Flow diagram of the nuclear steam supply system

蒸汽转换系统主要由热源蒸汽供应系统和工业蒸汽生产系统 2 部分组成。热源蒸汽供应部分负责从核电机组二回路抽取主蒸汽，通过过热器前的入口调节阀控制抽汽流量，主蒸汽分流进入过热器与蒸发器中参与换热后进入两级预热器，进而与预热器中给水进行换热，最后返回二回路的低压加热器或凝汽器，换热释放后的热能通过多级换热传递至除盐水系统，实现热能循环。工业蒸汽生产部分则利用经海水淡化生产以及预热和除氧处理后的除盐水，通过除盐水泵升压后，送入蒸汽转换系统，二级预热器二次吸热升温后转变为饱和水。饱和水进入蒸发器后生成饱和蒸汽，最终经过热器加热后形成满足工业需求的蒸汽产品，被送入蒸汽长输管道。

基于仿真软件 Thermoflex 32.0 建立的蒸汽转换系统仿真模型如图 3 所示，基于模型完成了蒸汽转换系统的热力学设计。正常运行工况下，根据工业蒸汽负荷匹配主蒸汽流量，抽汽量与工业蒸汽的转换比约为 1.1∶1。通过两级预热器、蒸发器、过热器四级换热单元，可实现生产 2.5 MPa、250～260 ℃的工业蒸汽。

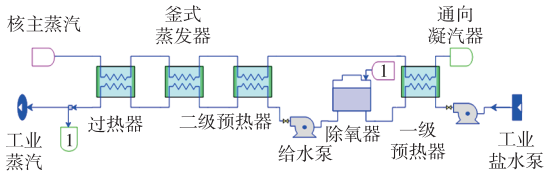


图 3　蒸汽转换系统的仿真模型图

Fig. 3　Simulation model of the steam conversion system

1.3　核能供汽参数长输可行性校核

长距离低参数蒸汽输送过程中，温度衰减快于压力衰减，蒸汽易由过热态转变为饱和湿蒸汽，引发疏水增加、换热效率下降及水击风险，对供汽安全与传输距离造成制约。

多层复合保温技术是通过整合多种低导热系数的超级绝热材料形成梯度保温结构，配合多层特种耐高温防水反射材料与保温施工工艺，可有效抑制热量散失。在管道支撑系统方面，通过使用特种绝热管托与计算机辅助应力分析技术，结合多种降低温降、压降措施，每公里温降可控制在 2～5 K，压力损失稳定在 0.01～0.025 MPa。技术措施的综合应用使相同初始参数的蒸汽传输距离增加，将水击风险与蒸汽损失量降低至可接受范围。

以压水堆供汽系统输出的 2.5 MPa、250 ℃工业蒸汽为例，采用先进的长输热网技术，基于温降为 2 K/km、压降为 0.025 MPa/km 的高效管道热传输

特性，在无补热措施条件下蒸汽参数在传输管道沿程分布如图 4 所示。当输送距离达到 18 km 时，过热蒸汽将完全转化为饱和蒸汽，即该蒸汽出厂参数的热传输管道在常规自然温降下，压水堆供汽存在 18 km 的有效供汽半径限制。分析表明，沿程压降相对较小，制约长距离输送的主要因素在于蒸汽温度快速下降。随着过热度不断减小，蒸汽逐渐趋近饱和状态，从而导致输送距离受限。蒸汽的初始过热度越高，可输送距离也相应越大。因此，过热度成为核能长距离供汽的主要限制性因素。为实现长距离输送，需沿管线维持一定的过热度，目前主要通过补热方式来维持。

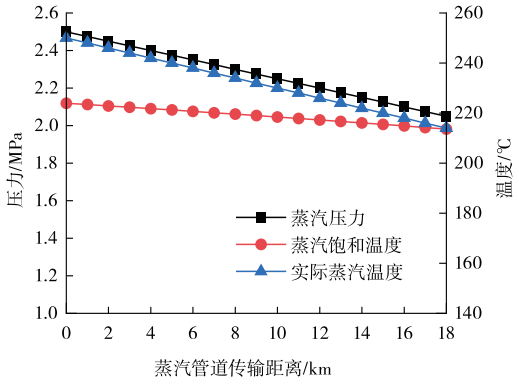


图 4 不补热自然温降下的蒸汽参数沿程分布

Fig. 4 Distribution of steam parameters along the pipeline under natural temperature drop without heat supplementation

2 蒸汽长距离输送的参数提升

通过主蒸汽过热提升蒸汽过热度的方式在远距离供汽中面临双重制约，蒸汽过热度提高将导致供汽平准化成本大幅增加，还受到换热设备传热端差的限制，实际增加的过热度不能满足蒸汽的长距离输送后到达用户的参数。因此，以输汽半径 40 km 为技术验证载体，在蒸汽关键传输位置提出源端优化和途中维持的蒸汽参数提升方法。

2.1 基于电加热的蒸汽参数提升技术

电加热升温技术利用电能提升蒸汽过热度来延长输送距离，存在核电厂内集中加热与热网中途分布式加热 2 种布局方式。核电厂内加热方案的设备集成度高、调控响应快，能利用部分低价的厂用电降低运营成本。在热网中途设置电加热需额外征用土地建设换热点，这增加了设备初投资，且需采用工商业电价推高蒸汽参数提升的运行成本。基于技术可行性与经济性双重因素，选定核电厂内电加热作为源端优化的蒸汽参数提升方案。

基于 Thermoflex 仿真平台的电加热器模块进行建模计算，仿真模型如图 5 所示。

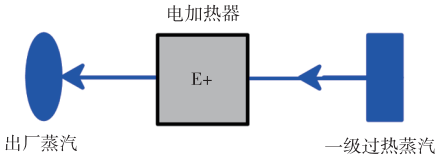


图 5 电加热升温系统模型

Fig. 5 Model of the electric heating system

电加热装置的出力模型为

$$3.6\eta_e P_{EH}=q_{m,s}(h_o-h_i) \tag{1}$$

式中：η_e 为电加热器效率；P_{EH} 为电加热器输入功率，kW；$q_{m,s}$ 为蒸汽质量流量，t/h；h_o、h_i 分别为蒸汽出口与入口焓，kJ/kg。

2.2 基于蒸汽压缩机的蒸汽参数提升技术

基于蒸汽压缩机的热力学特性，在热网设计中引入蒸汽压缩技术，提出两级压缩的中继参数提升方案。利用在高温承压能力、运行可靠性及负荷调节性能方面更具备优势的高速离心式压缩机，在蒸汽长距离输送过程中，设置两级压缩系统优化输汽参数，延长蒸汽有效传输距离。

建立的热网两级升压的热力学模型见图 6。

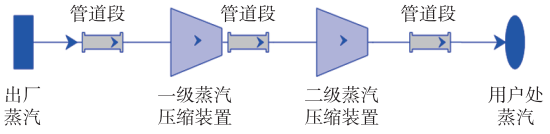


图 6 蒸汽压缩机两级升压系统热力学模型

Fig. 6 Thermodynamic model of the two-stage steam compression system

蒸汽压缩机的数学模型为

$$\frac{n}{n-1}=\eta_n\frac{k}{k-1} \tag{2}$$

$$P_N=\frac{n}{n-1}\frac{p_iV_i}{\eta_m}\left[\left(\frac{p_o}{p_i}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right] \tag{3}$$

式中：n 为多变指数；η_n 为多变效率；k 为绝热系数；P_N 为压缩机轴功率耗功，kW；p_i 与 p_o 分别为压缩机进气与出气压力，MPa；V_i 为吸气量，m^3/h；η_m 为压缩机机械效率。

2.3 蒸汽混合加热的蒸汽参数提升方式

基于区域能源互补构建的核-火耦合协同供汽系统具备分级供汽的特性。蒸汽混合加热技术是利用蒸汽管道的联结点，通过引入少量高参数蒸汽与低参数蒸汽掺混，使得掺混蒸汽到达用户处时能够保持所需的过热度。

来自火电厂的高参数蒸汽到达混汽站后，抽取

部分进入多级减压调质装置，使得调节阀后蒸汽压力降低至接近低参数蒸汽管道的水平，便于低参数蒸汽的顺利混入。到达混汽站的核电厂低参数蒸汽与处理后的高参数蒸汽在蒸汽联箱内混合，混合后的蒸汽则继续沿低参数蒸汽管道输送。

所建立的混热站中蒸汽联箱的热力学模型如图 7 所示。

蒸汽联箱的数学模型为

$$q_{m\mathrm{H}}+q_{m\mathrm{L}}=q_{m\mathrm{M}} \tag{4}$$

$$q_{m\mathrm{H}}h_{\mathrm{H}}+q_{m\mathrm{L}}h_{\mathrm{H}}=q_{m\mathrm{M}}h_{\mathrm{H}} \tag{5}$$

式中：q_m 为质量流量，t/h；h 为蒸汽焓，kJ/kg；下标 H、L、M 分别代表高参数蒸汽、低参数蒸汽、混合后蒸汽。

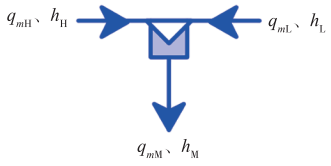


图 7　混热站中蒸汽联箱的热力学模型

Fig. 7　Thermodynamic model of the steam header in the hybrid heating station

3　所提方案的技术可行性与经济性

3.1　蒸汽参数提升技术的设计与验证

结合末端蒸汽需求及热网设计标准对设计蒸汽温度的限制（350 ℃以下），设定电加热器将出厂蒸汽二次过热到 290 ℃。通过在核电厂内实施电加热升温技术，蒸汽出厂后的温度沿程分布特性如图 8 所示。经电加热装置处理后，蒸汽过热度显著提升，到达化工园区的蒸汽参数为 1.5 MPa、210 ℃。在 40 km 长距离输送末端仍能维持 12 K 的有效过热度，满足蒸汽参数的使用要求。

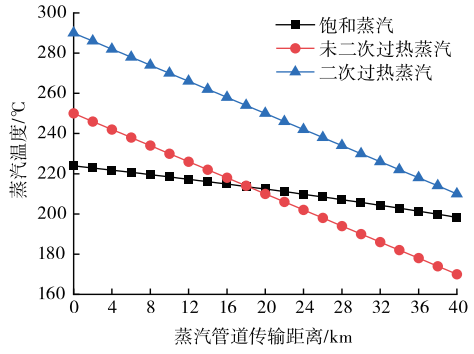


图 8　电加热过热后蒸汽参数沿程分布

Fig. 8　Distribution of steam parameters along the pipeline after electric heating

设定电加热器效率为 97%，设计裕度保留 5%，仿真结果显示电加热器配置 57.18 MW 的功率输入可实现 1 800 t/h 的工业蒸汽质量流量及升温到 290 ℃的要求，其中单位蒸汽加热量为 29.34 kW。

根据两级蒸汽压缩机压比一致的设计原则，将两级蒸汽压缩装置分别设置在输汽管网 16、28 km 处。核算第一级和第二级蒸汽压缩机相关参数，设计结果如表 2 所示。采用多台压缩机并联的方式实现对总流量的参数提升，每级蒸汽压缩系统部署 13 台蒸汽压缩机，正常运行 12 台，1 台备用。单台蒸汽压缩机的设计质量流量为 150 t/h，压比为 1.2，第一、二级蒸汽压缩机的轴功率分别为 2.11、2.04 MW，总轴功率为 4.15 MW。

表 2　蒸汽压缩机设计结果

Tab. 2　Design results of steam compressor

参数	第一级压缩	第二级压缩
多变效率	0.77	0.80
单台功率/MW	2.11	2.04
进口压力/MPa	2.10	2.22
进口温度/℃	218.0	221.7
出口压力/MPa	2.52	2.66
出口温度/℃	245.7	248.6
饱和温升/K	21.4	20.6

根据蒸汽压缩机设计参数，热网蒸汽参数沿程分布如图 9 所示，蒸汽参数在全程能保持较好的过热状态，满足末端热用户使用要求。

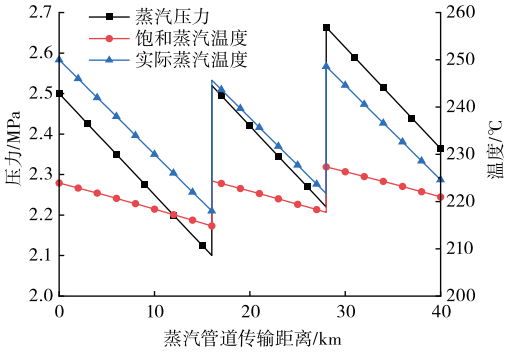


图 9　蒸汽压缩机补热方式下热网蒸汽参数沿程分布

Fig. 9　Distribution of steam parameters along the heating network under the steam compression heat supplementation mode

假设火电厂供汽的高参数蒸汽参数为 4.2 MPa/450 ℃，蒸汽联箱出口蒸汽参数为 2.3 MPa/270 ℃，混热系统的具体热力学计算结果如图 10 所示，高参数蒸汽质量流量需占低参数蒸汽质量流量的 28%。

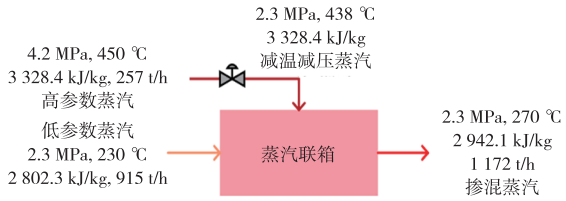


图 10 出口蒸汽参数为 2.3 MPa/270 ℃时的热平衡图

Fig. 10 Heat balance diagram at outlet steam parameters of 2.3 MPa and 270 ℃

热网的管道压降和温降沿程分布计算结果如图 11 所示。结果显示，通过设置中途混热站，运输管道中蒸汽参数能完全满足饱和要求，运输到用户末端后具有足够的过热度，末端蒸汽参数为压力 1.55 MPa，温度 210 ℃，过热度约为 5 K。

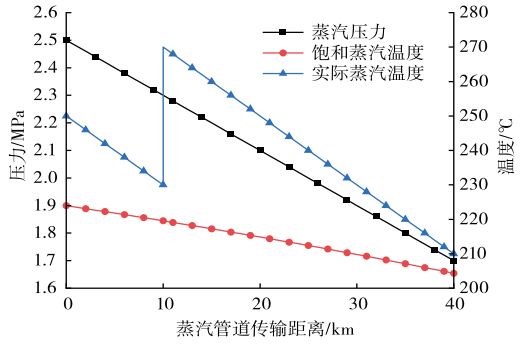


图 11 出口蒸汽参数为 2.3 MPa/270 ℃时热网沿程参数分布

Fig. 11 Distribution of parameters along the heating network at outlet steam parameters of 2.3 MPa and 270 ℃

3.2 蒸汽参数提升技术的经济性对比

电加热升温技术的优势在于能稳定利用核电厂自身的低价电力资源，尤其在夜间低谷时段电价更低。假设核电厂商议电价为 0.5 元/(kW·h)，电加热方式下单位流量耗电为 30.24 kW，电加热方式下每吨蒸汽增加的用电成本为 15.12 元。57.18 MW 电加热装置初始投资估算为 1 247 万元，每吨蒸汽成本增加 0.07 元，每吨蒸汽的总成本提升 15.19 元。

蒸汽压缩机两级升压技术因接入工商业电价，以 1 元/(kW·h)的电价计算，每吨蒸汽的运输成本激增 27.6 元。蒸汽压缩机系统相关设备的采购、施工、运维等费用相对复杂，蒸汽压缩系统的耐高温叶轮等核心部件推高单机成本至 500 万元，设备投资费用达 1.3 亿元，总投资估算为 2.9 亿元。考虑运营等其他费用，每吨蒸汽的成本增加 1.74 元，蒸汽压缩机两级升压技术的成本为 29.34 元/t。

混合加热技术的经济性受能源价格影响显著。低参数核能蒸汽到户价为 190 元/t，与火电 4 MPa 等级蒸汽到户价 300 元/t 形成价格梯度，按 28%掺混比计算，每吨蒸汽成本增加 33.7 元。该方案虽无需大额设备投资，但需建设跨源蒸汽调质站及智能混流控制系统等，管网改造费用约 4 400 万元。每吨蒸汽的成本增量为 0.26 元。混合加热技术下每吨蒸汽参数提升的成本为 33.96 元，且成本受火电蒸汽采购价波动影响。

3 类参数提升技术的经济性对比结果如表 3 所示。电加热方案具有最低平准化供汽成本，主要源于工商业电价差异与蒸汽压缩机设备较高的采购费用。蒸汽混合加热方案的成本增量最高，成本增幅主要来自于高价的火电蒸汽采购，且成本波动与火电煤价强关联。

表 3 蒸汽参数提升技术经济性对比

Tab. 3 Economic comparison of steam parameter improvement technologies

升温方案	电加热	蒸汽压缩机	混合加热
初始投资/万元	1 247.0	29 152.5	4 400.0
年运行费用/万元	22.68	530.80	79.60
成本增量/(元·t^{-1})	15.19	29.34	33.96

从技术成熟度及实现维度综合分析，3 类蒸汽参数提升技术在适用性上存在差异，结果如表 4 所示。电加热技术在可靠性、成熟度、实施简便性等方面表现优异，适合用于基础的蒸汽参数补偿。蒸汽压缩机和混合加热技术虽然在某些特定场景中具有应用潜力，但由于技术成熟度和可靠性等方面不足的原因，暂时不适合在核电厂出口端作为主要解决方案。建议在核电厂出口端优先采用电加热技术进行基础参数补偿，长输蒸汽到达用户侧后，根据具体工艺需求，再选择性部署蒸汽压缩机或混合加热系统，以满足进一步的升温升压需求。

表 4 蒸汽参数提升技术的 SWOT 分析

Tab. 4 SWOT analysis of steam parameter improvement technologies

项目	电加热	蒸汽压缩机	混合加热
优势	技术成熟，应用广泛；无机械部件，可靠性高	高温高压升压潜力大，特定高压场景	灵活性强，基础组件标准化程度高
劣势	温升有限，依赖电力，受电网波动影响	技术壁垒高，定制生产，成本高	动态混流控制困难，调节与控制复杂
机会	核电厂冗余电力支持	高压工业蒸汽需求增多	多能互补需求增加
威胁	电力依赖性高，占地空间大	电网增容成本大、维护难度高，可靠性差	稳定性差，运维成本高

4　结论

（1）与蒸汽压缩机和混合加热 2 种蒸汽参数提升方案相比，电加热方案经济性最优，核电厂电加热将蒸汽温度从 250 ℃提升至 290 ℃，能使蒸汽运输管道末端维持 12 K 的过热度，每吨蒸汽成本增加 15.19 元，技术成熟可靠。

（2）热网中途设置两级蒸汽压缩机进行升温升压，能使 40 km 处末端蒸汽保持过热，单位流量的电耗为 27.6 kW，但设备投资较高，每吨蒸汽成本增加 29.34 元，且技术可靠性较低。

（3）混合加热方案经济性较差，每吨蒸汽因购买高参数蒸汽增加成本达 33.96 元，系统稳定性差。

（4）综合技术成熟度、经济性及运行可靠性，核电厂内电加热是目前实现蒸汽长距离输送参数提升的最优方案。

参考文献：

[1] 李政，张东杰，潘玲颖，等. “双碳”目标下我国能源低碳转型路径及建议[J]. 动力工程学报，2021，41(11)：905-909，971.
LI Zheng，ZHANG Dongjie，PAN Lingying，et al. Low-carbon transition of China's energy sector and suggestions with the 'carbon-peak and carbon-neutrality' target[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2021，41(11)：905-909，971.

[2] 吴青阳，李根，刘明，等. 核能水电联产系统的变负荷动态特性与灵活运行控制策略优化研究[J]. 动力工程学报，2025，45(4)：582-591.
WU Qingyang，LI Gen，LIU Ming，et al. Research on dynamic characteristics and flexible operation control strategy optimization of nuclear power and water cogeneration system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2025，45(4)：582-591.

[3] International Atomic Energy Agency. Guidance on nuclear energy cogeneration[R]. Vienna：IAEA，2019.

[4] JASKÓLSKI M，REŃSKI A，MINKIEWICZ T. Thermodynamic and economic analysis of nuclear power unit operating in partial cogeneration mode to produce electricity and district heat[J]. Energy，2017，141：2470-2483.

[5] International Atomic Energy Agency. Industrial applications of nuclear energy[R]. Vienna：IAEA，2017.

[6] 谢昂均，杨正军，徐钢，等. 我国能源行业实现碳中和的产业链情景分析[J]. 动力工程学报，2024，44(11)：1733-1740，1749.
XIE Angjun，YANG Zhengjun，XU Gang，et al. Scenario analysis of the industrial chain for achieving carbon neutrality in China's energy industry[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2024，44(11)：1733-1740，1749.

[7] JASSERAND F，DE LAVERGNE J G D. Initial economic appraisal of nuclear district heating in France[J]. EPJ Nuclear Sciences & Technologies，2016，2：39.

[8] LEURENT M，DA COSTA P，RÄMÄ M，et al. Cost-benefit analysis of district heating systems using heat from nuclear plants in seven European countries[J]. Energy，2018，149：454-472.

[9] 武心壮，黄晓杰，夏栓. 核电机组废热回收用于供热的发电功率分析[J]. 山东电力技术，2021，48(9)：60-63.
WU Xinzhuang，HUANG Xiaojie，XIA Shuan. Power generation analysis of recovering waste heat for heat supply in nuclear power plant unit[J]. Shandong Electric Power，2021，48(9)：60-63.

[10] 武心壮，夏栓. AP1000 核电机组抽汽供热经济性分析[J]. 汽轮机技术，2020，62(6)：475-477.
WU Xinzhuang，XIA Shuan. Thermo-economics analysis for extraction heat supply of AP1000 nuclear power plant unit[J]. Turbine Technology，2020，62(6)：475-477.

[11] 周正道，华志刚，包伟伟，等. AP1000 核电机组供热方案研究及分析[J]. 热力发电，2019，48(12)：92-97.
ZHOU Zhengdao，HUA Zhigang，BAO Weiwei，et al. Study on heat supply scheme for AP1000 nuclear steam turbine[J]. Thermal Power Generation，2019，48(12)：92-97.

[12] 丁振宇，于大海，余秀月，等. 核岛蓄热能力及对一次调频的影响[J]. 动力工程学报，2019，39(7)：598-604.
DING Zhenyu，YU Dahai，YU Xiuyue，et al. Effects of thermal storage capacity on the primary frequency regulation of a nuclear island[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2019，39(7)：598-604.

[13] CHEN Jiayang，ZHENG Wen，KONG Ying，et al. Case study on combined heat and water system for nuclear district heating in Jiaodong Peninsula[J]. Energy，2021，218：119546.

[14] LEURENT M，DA COSTA P，SYLVESTRE S，et al. Feasibility assessment of the use of steam sourced from nuclear plants for French factories considering spatial configuration[J]. Journal of Cleaner Production，2018，189：529-538.

（下转第 73 页）

for cooling plates of PEM fuel cells[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2018, 74(1): 917-930.

[21] GONG Fan, YANG Xiaolong, ZHANG Xun, et al. The study of Tesla valve flow field on the net power of proton exchange membrane fuel cell[J]. Applied Energy, 2023, 329: 120276.

[22] PERNG S W, WU H W. A three-dimensional numerical investigation of trapezoid baffles effect on non-isothermal reactant transport and cell net power in a PEMFC[J]. Applied Energy, 2015, 143: 81-95.

[23] ZHANG G, FAN L, SUN J, et al. A 3D model of PEMFC considering detailed multiphase flow and anisotropic transport properties [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 714-724.

[24] NAJMI A U H, ANYANWU I S, XIE X, et al. Experimental investigation and optimization of proton exchange membrane fuel cell using different flow fields [J]. Energy, 2021, 217: 119313.

(上接第 43 页)

[15] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2023.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.

[16] ZHUANG Yaping, WU Fang, MIAO Zhengqiang, et al. Research on radiation monitoring schemes for industrial steam supply from the secondary loop of PWR[J]. Progress in Nuclear Energy, 2025, 188: 105887.

[17] 田里，王永庆. 200 MW 核供热堆汽电联供的经济分析[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2000，40(6)：95-98.
TIAN Li, WANG Yongqing. Economic analysis of process steam and electricity generation by a 200 MW NHR[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2000, 40(6): 95-98.

[18] 张玉祯，廖佰凤，汪静，等. 压水堆核电站工业供汽系统技术可行性研究[J]. 南方能源建设，2022，9(2)：120-124.
ZHANG Yuzhen, LIAO Baifeng, WANG Jing, et al. Feasibility research in the technology for industrial steam supply by PWR nuclear power plant[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(2): 120-124.

[19] SONG Xiaolei, LI Xin, JIAO Songkun. Analysis of the economic prospect of nuclear heat supply by megawatt-class nuclear power units from the perspective of carbon peaking and carbon neutrality[C]//Proceedings of the 23rd Pacific Basin Nuclear Conference. Beijing & Chengdu: Springer, 2023: 589-595.

[20] 周传锦. 长距离蒸汽管道供热技术及其应用实践探微[J]. 中国电业(技术版)，2016(1)：42-44.
ZHOU Chuanjin. Explore of technology and application of heat supply system with long distance steam pipe[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2016(1): 42-44.

[21] 张伟. 一种长输大直径蒸汽管道温降、压降计算方法[J]. 区域供热，2018(2)：110-113，123.
ZHANG Wei. A method for calculating temperature drop and pressure drop of long-distance large-diameter steam pipeline[J]. District Heating, 2018(2): 110-113, 123.

[22] 薛永明，朱九喜，付小平. 长输蒸汽管道的温降和压降的计算方法研究[J]. 节能，2018，37(8)：40-43.
XUE Yongming, ZHU Jiuxi, FU Xiaoping. Study on the calculation method for the temperature drop and pressure drop of the long-distance steam pipeline[J]. Energy Conservation, 2018, 37(8): 40-43.