660 MW超超临界双中压缸热电联产机组甩负荷试验转速异常分析及解决措施

章津勖[1],陈国庆[1],于　强[2*],王　晨[2],陈　健[2],胡　耘[1],蒋国安[2],何新荣[2]
(1.低碳智能燃煤发电与超净排放全国重点实验室(国家能源集团科学技术研究院有限公司),江苏 南京 210023;2.国能南京电力试验研究有限公司,江苏 南京 210023)

摘要:【目的】甩负荷试验是火电机组启动验收的核心环节,其本质是验证机组突发负荷丧失工况下的动态调节安全性,直接关乎电网供电可靠性,需严格遵循行业标准。针对国内首台660 MW超超临界双中压缸热电联产机组,为填补其甩负荷过程中转速控制的技术空白,开展50%甩负荷试验及异常机理研究。**【方法】**研究先完成机组甩负荷前置验证与正式试验,基于汽轮机转子动态能量平衡模型与Ebsilon热力系统仿真解析转速飞升异常成因,提出系统性优化方案并通过二次试验完成方案有效性验证。**【结果】**研究表明,前置验证阶段,12个关键汽门关闭时间均满足设计要求,主汽阀门严密性试验及超速保护控制(over-speed protection control,OPC)、电超速试验均合格;但首次正式试验中,机组脱网后高中压调门快速关闭,转速最高飞升至3 183 r/min,超出106%额定转速,试验被迫中止。进一步分析表明,中压缸连通管蝶阀关闭时长为850 ms未达设计要求导致蒸汽持续做功,主汽及再热温度较设计值分别偏低62 ℃、67 ℃,且高压加热器(高加)未投入引发中低压缸做功过量,三者耦合加剧了转速飞升;经优化将蝶阀关闭时间缩短至350~370 ms,同步投入高加系统、控制主再热温度≥590 ℃后,复试50%甩负荷试验机组最高转速3 135 r/min,不超过105%额定转速,60 s内稳定至额定转速,各项参数均符合规程要求。**【结论】**本研究首次揭示了双中压缸机组甩负荷转速飞升的多因素耦合机制,建立的"阀门动态优化-热力参数匹配-系统平衡调控"技术体系对行业有重要参考意义,为同类高参数热电联产机组的安全验收提供了可复制的技术范式,对提升新型煤电机组极端工况适应性、保障能源电力系统稳定运行具有重要学术价值与工程意义。

关键词:甩负荷试验;超超临界机组;DEH控制系统;双中压缸;蝶阀
中图分类号:TK26;TM621　　**文章编号:**1674-8069(2026)04-0517-12
文献标志码:A　　**DOI编号:**10.19944/j.eptep.1674-8069.2026.04.001
[引用本文格式]章津勖,陈国庆,于强,等.660 MW超超临界双中压缸热电联产机组甩负荷试验转速异常分析及解决措施[J].电力科技与环保,2026,42(4):517-528.
ZHANG Jinxu, CHEN Guoqing, YU Qiang, et al. Analysis and solutions for abnormal speed during load rejection test of 660 MW ultra-supercritical dual intermediate pressure cylinder cogeneration unit[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2026, 42(4):517-528.

Analysis and solutions for abnormal speed during load rejection test of 660 MW ultra-supercritical dual intermediate pressure cylinder cogeneration unit

ZHANG Jinxu[1], CHEN Guoqing[1], YU Qiang[2*], WANG Chen[2], CHEN Jian[2], HU Yun[1], JIANG Guoan[2], HE Xinrong[2]
(1. State Key Laboratory of Low-carbon Smart Coal-fired Power Generation and Ultra-clean Emission(China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd.), Nanjing 210023, Jiangsu China; 2.China Energy Nanjing Electric Power Test & Research Co., Ltd., Nanjing 210023, Jiangsu China)

Abstract: [Objective]Load rejection test is a core procedure in the startup and acceptance of coal-fired power units, serving to verify dynamic regulation safety under sudden load loss conditions, which directly impacts grid reliability and must strictly comply with industry standards. To address the technical gap in speed control during load rejection for

收稿日期:2025-12-09　　**录用日期:**2026-04-17
Received: 2025-12-09　　**Accepted:** 2026-04-17
基金项目:国家能源投资集团有限责任公司科技创新项目(GJNY-23-68);国家能源投资集团有限责任公司科技创新项目(GJNY-23-159)

China's first 660 MW ultra-supercritical dual-intermediate-pressure cylinder cogeneration unit, a 50% load rejection test and abnormal mechanism study were conducted.**[Methods]** In this study, the pre-verification and formal tests of the unit load rejection were completed first. Based on the dynamic energy balance model of the steam turbine rotor and Ebsilon thermal system simulation, the causes of the abnormal speed surge were analyzed, a systematic optimization scheme was proposed, and the effectiveness of the scheme was verified through a repeated test.**[Results]** In the pre-verification phase, the closing times of 12 key steam valves all met the design requirements, and the main steam valve tightness test, as well as the over-speed protection control (OPC) and electrical overspeed tests, were all qualified. However, in the first formal test, after the unit was disconnected from the grid, the high-pressure and intermediate-pressure regulating valves closed rapidly, yet the maximum speed surged to 3 183 r/min, exceeding 106% of the rated speed, and the test was terminated. The study revealed that the closing time of the butterfly valve in the intermediate pressure cylinder connecting pipe was 850 ms, which failed to meet the design requirements and resulted in continuous work done by the steam; meanwhile, the main and reheat steam temperatures were 62 ℃ and 67 ℃ lower than the design values, and the high-pressure heater (HP heater) was not put into operation, leading to excessive work done by the intermediate and low-pressure cylinders. The coupling of these three factors intensified the speed surge. After optimization, the closing time of the butterfly valve was shortened to 350~370 ms. Meanwhile, the HP heater system was put into operation, and the main and reheat steam temperatures were controlled to be ≥590 ℃. In the repeated 50% load rejection test, the maximum speed of the unit reached 3 135 r/min, which was no more than 105% of the rated speed, the speed stabilized at the rated value within 60 seconds, and all parameters met the specification requirements. **[Conclusion]** This study reveals for the first time the multi-factor coupling mechanism of speed surge during load rejection of dual intermediate pressure cylinder units. The established technical system of "valve dynamic optimization-thermal parameter matching - system balance regulation" fills the industry gap, provides a replicable scientific paradigm for the safety acceptance of similar high-parameter CHP units, and has important academic value and engineering significance for improving the adaptability of new-type coal-fired power units to extreme working conditions and ensuring the stable operation of the energy and power system.

Key words: load rejection test; ultra-supercritical unit; DEH control system; dual intermediate pressure cylinder; butterfly valve

0 引言

甩负荷试验是火电厂新建机组启动验收的核心环节，其核心目的是验证机组在突发负荷丧失工况下的安全控制能力，直接关乎电网供电可靠性与机组运行安全性[1-3]。随着煤电向“基础保障性+系统调节性”双重角色转型[4-6]，高参数、大容量热电联产机组成为电网调峰保供的关键装备[7]，而双中压缸结构作为提升机组调峰灵活性的创新设计，其甩负荷过程中的转速控制难度显著增加。依据《火力发电建设工程机组甩负荷试验导则》（DL/T 1270—2023）等现行行业标准，新建机组需通过甩负荷试验验证超速保护、阀门响应、轴系稳定性等核心性能，确保机组在极端工况下的安全可控[8-12]。

660 MW超超临界机组作为当前火电领域的主流机型，主汽压力达25~31 MPa、主汽温度达600~620 ℃，较传统超临界机组在设计参数与系统结构上有显著升级[13-14]。双中压缸热电联产机组在保留高参数优势的基础上，增设中压缸连通管及蝶阀结构，虽提升了抽汽调节灵活性，但也使汽轮机内部蒸汽容积大幅增加，甩负荷时蒸汽持续做功导致风险加剧。已有研究表明，双缸或多缸结构机组的转速飞升受阀门响应特性、蒸汽参数匹配性、热力系统平衡状态等多重因素耦合作用[13-16]，国内首台该类型机组的甩负荷试验尚未形成成熟技术方案，其转速异常飞升问题成为制约机组验收的核心瓶颈。

现有超超临界机组甩负荷试验的研究多集中于常规单中压缸结构，针对双中压缸结构的专项研究较为匮乏[17-20]。例如，李冰天等[16]分析了上汽西门子660 MW机组甩负荷异常的阀门卡涩成因，但其未涉及双中压缸的连通管蝶阀影响；郭萌等[13]优化了超超临界机组快速甩负荷控制策略，但未考虑高加未投入与蒸汽参数偏低的耦合作用。因此，针对国内首台660 MW超超临界双中压缸热电联产机组，开展甩

负荷试验转速飞升异常分析及解决措施研究,不仅可解决该机组的验收难题,还可为同类机型提供技术参考,具有重要的工程价值与行业指导意义。

1　研究方法

1.1　试验对象

本研究以某电厂2×660 MW超超临界热电联产机组中的4号机组为核心试验对象,3号机组为参照机组。两台机组三大主设备均由哈尔滨锅炉厂、哈尔滨汽轮机厂、哈尔滨电机厂配套供货,属于一次再热单元制机组,汽轮机型号均为C660-28/600/620(超超临界、一次中间再热、单轴、四缸两排汽、单背压抽汽凝汽式),额定转速3 000 r/min,额定功率660 MW,关键设计参数一致,如表1所示。

4号机组为国内首台双中压缸结构抽汽机组,蒸汽做功流程为:主蒸汽经主汽阀、高压调节阀进入高压缸做功;再热蒸汽经中压联合汽阀分为两路进入#1中压缸,#1中压缸排汽经连通管及蝶阀进入#2中压缸,最终经低压缸排入凝汽器,其主、再热蒸汽系统图如图1所示。3号机组已完成全部启动验收试验(含50%、100%甩负荷试验),各项运行参数均满足现行规程要求,其试验数据来源于该机组验收试验报告。

表1　机组汽轮机额定功率主要参数

Table 1　Main parameters of rated power of the unit steam turbine

项目	参数
额定功率/MW	660
主汽门前蒸汽温度/℃	600
额定再热汽阀前温度/℃	620
额定主汽门前压力/MPa.a	28
给水温度(夏季工况)/℃	306.1
加热器(包括除氧器)级数	10
工作转速/(r·min^{-1})	3 000

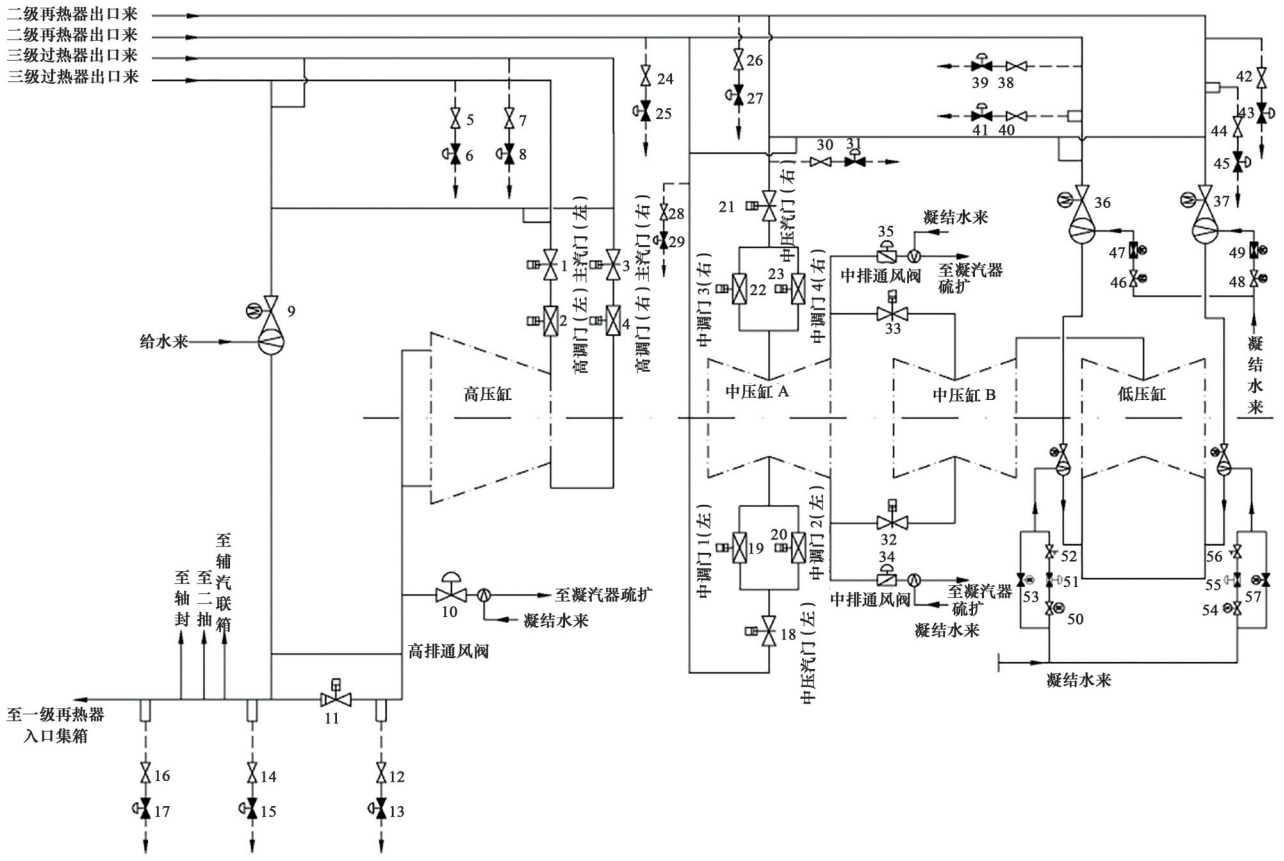

图1　4号机组汽轮机主、再热蒸汽系统图

Figure 1　System diagram of main and reheat steam for Unit 4 turbine

1.2 前置验证试验

甩负荷试验开展前需优先完成汽门关闭时间测试，是保障试验顺利启动的关键前置环节。待汽门关闭时间检测结果合格后，依次开展汽门严密性试验与机组超速试验两项核心验证项目。只有当这两项试验均顺利完成且结果满足规范要求后，才能正式启动机组的甩负荷试验[21]。

4号机组汽轮机共有12个汽门，将所有汽门全开后，触发汽机手动打闸按钮，迅速关闭各汽门[22]，其关闭时长如表2所示，汽轮机各高中压主汽门和调门关闭时间符合性能要求。

表2 4号机汽轮机汽门关闭时长

Table 2 Valve closing time of turbine for Unit 4

阀门名称	关闭时长/ms
左高压主汽阀	216.3
右高压主汽阀	117.4
左高压调阀	275.0
右高压调阀	224.0
左高压补汽阀	285.2
右高压补汽阀	216.4
左中压主汽阀	223.0
右中压主汽阀	194.0
中压调阀1	354.8
中压调阀2	318.9
中压调阀3	245.6
中压调阀4	336.6

2025年10月28日17:49汽机转速维持在3 000 r/min,进行主汽阀门严密性试验，主蒸汽压力16.2 MPa，再热蒸汽压力3.2 MPa，转速降至574 r/min，符合要求，主汽阀门严密性试验合格。

严密性试验验收合格后，进行汽轮机超速试验，包括超速保护控制(over-speed protection control, OPC)(103%)和电超速(110%)[23]。2025年10月31日11:04开始OPC试验，动作转速3 090 r/min。11:16开始电超速试验，转速3 298 r/min，电超速保护动作；11:22转速降至2 567 r/min，重新挂闸，汽轮机超速试验合格。

1.3 4号机组50%甩负荷试验

2025年11月1日，4号机组进行甩50%负荷试验，试验前机组负荷稳定维持330 MW，机组协调控制系统(coordinated control system，CCS)正常投入运行，主汽压力调整至15 MPa。

为保障甩负荷试验启动时机组工况稳定及系统响应可靠，需于试验前1 h集中完成系列核心预处理操作[24]。将厂用电切换至由启动备用变压器供电，避免外部供电波动干扰辅机运行；辅助蒸汽汽源切换为邻机供给，通过闭环调节维持1.0 MPa压力，再热冷段设为备用汽源并启动管道预热，汽动给水泵汽源切换为辅助蒸汽且退出四段抽汽，保障给水系统稳定。辅汽供除氧器调节阀开至5%预热管道以消除温差应力，辅助蒸汽至轴封的供汽管道充分预热后校验轴封温度调节系统，高低压旁路阀均开至5%预热，结束后保持热备用状态以应对汽压突变。汽水精处理装置切换至旁路运行，核查启动疏水泵确保随时可启动，开启疏扩减温水阀门时重点监控汽泵密封水差压与出水温度，维持凝结水母管压力稳定；通过信号链路测试、回路通断验证等多种手段，校验甩负荷超速保护的控制逻辑与执行回路，保障保护装置可靠动作。

试验进入倒计时阶段后，需按时间节点完成程序化调控以保障启动瞬间工况稳定[25]。试验前5 min退出CCS，切换为数字电液控制系统(digital electro-hydraulic，DEH)本地负荷控制模式，锅炉侧解除燃料主控与给煤机自动控制，校验送风、引风等系统自动调节功能；解除炉跳机、电跳机、机跳炉连锁保护，提前断开5021开关并核查5022开关分闸允许条件。倒计时至6 s时，停运一台磨煤机并手动关闭过热器与再热器减温水隔离阀；倒计时至2 s时，将高压旁路阀开至30%并手动维持主汽压力约15 MPa，低压旁路阀开至80%并切换为自动控制，高低压旁路减温水系统同步投入自动调节；倒计时归零瞬间，电气人员断开5022并网开关，机组正式进入甩负荷工况。

2 结果与讨论

2.1 甩负荷试验异常结果

该4号机组是国内首台“高参数、大容量、可调整”抽汽机组，采用双中压缸结构，中压1#缸到中压2#缸之间用连通管连接，连通管上设有蝶阀来控制两个中压缸之间的气体流动，双中压缸结构布置如图2所示。

相较于常规的超超临界660 MW火电机组，本机组增加了中压1#缸到中压2#缸之间的连通管

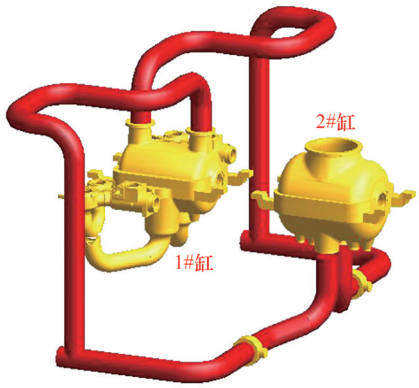

图2　双中压缸结构

Figure 2　Dual intermediate pressure cylinder structure

路,造成汽轮机内部蒸汽容积增大。依据美国机械工程师学会相关理论计算[26-27],50%额定负荷下飞升转速为3 101 r/min,100%额定负荷下飞升转速为3 215 r/min。

机组甩负荷前后主要参数变化如图3所示,试验前主汽压力为14.91 MPa,主汽温度为538 ℃,再热蒸汽压力为2.86 MPa,再热蒸汽温度为553 ℃。在脱网信号发出后0.5 s,高压中压调门迅速关闭,6.49 s后转速达到最大值3 183 r/min,60.53 s后转速逐渐稳定在3 000 r/min。由于机组转速最高飞升至3 183 r/min,超过了106%额定转速,需中止试验,查明原因[28]。

2.2　转速飞升异常成因分析

机组在运行过程中,影响飞升转速的因素主要包括4类,分别是阀门延迟与关闭时间内进入的蒸汽、在管道和汽缸等腔室内积聚的蒸汽进一步膨胀做功、阀门漏汽量以及机组转子的转动惯量[29]。其中,机组转子的转动惯量以及管道、汽缸等腔室容器均为固定值,因此这两类因素并不会造成飞升转速的设计值与实际值出现偏离;而阀门漏汽量经现场试验测量后符合设计标准,其对飞升转速的影响极小,基本可忽略不计,因此,阀门的延迟与关闭时间成为影响此次飞升转速的主要变量。

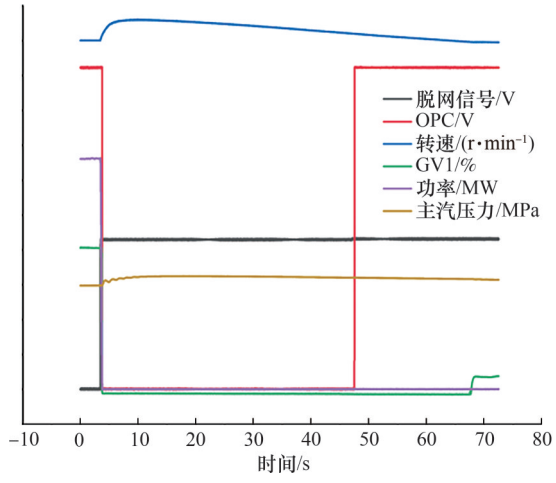

图3　50%甩负荷试验关键参数变化

Figure 3　Changes in key parameters during the 50% load rejection test

本文采用汽轮机转子动态能量平衡模型进行分析,方程如下[30]:

$$\frac{n_{\max}}{n_{\text{rated}}}=\sqrt{\frac{E_1+E_2+E_3+E_4}{E_4}} \tag{1}$$

式中,$n_{\max}$为最高转速,r/min;n_{rated}为额定转速,r/min;E_1为阀门延迟时间内进入蒸汽的能量,KJ;E_2为阀门关闭时间内进入蒸汽的能量,KJ;E_3为管道/气缸内积聚蒸汽的膨胀功,KJ;E_4为转子额定转速下的转动惯性能,KJ。

图4记录了脱网信号发出前后各阀门的响应,无论是高压调门还是中压调门均表现出良好的响应以及关闭时间,这与之前的阀门关闭时间试验是吻合的。值得注意的是,研究发现中压缸连通管的蝶阀在50%甩负荷试验中关闭时间约为850 ms,导致大量高温蒸汽在脱网后仍进入#2中压缸和低压缸,蒸汽在缸内持续做功,E_2和E_3增加,从而致使机组转速飞升,超过额定飞升转速[31]。

此外,鉴于该电厂3号机组与4号机组相同,通过对比两者在甩负荷时的相关数据(表3)可知,4号机组在甩50%负荷试验中主再热蒸汽参数与高加状态异常,造成缸内蒸汽做功失衡,转子驱动力超出正常控制范围,4号机甩50%负荷时,因主再热温度控制偏低、高加系统未投入,引发缸内蒸汽参数与流量分配异常[32]:一方面,主再热温度不足使蒸汽焓值偏离设计值,根据蒸汽焓值与做功量的定量分析,主、再热温度每降低10 ℃,蒸汽焓值约下降42 kJ/kg[33]。实验前主汽温度为538 ℃,再热温度为553 ℃,较设计值(600 ℃/620 ℃)分别偏低62 ℃、67 ℃,为维持基本工况需增加蒸汽流量,这导致#2中压缸和低压缸的蒸汽质量流量较3号机(主再热参数正常、高加投入)同期试验显著偏大,进而使中低压缸做功量超额。另一方面,高加未投入打破了热力系统的正常能量平衡,使得#1中压缸排汽压力升至1.21 MPa.g,较3号机的0.93 MPa.g偏高约27%。依据

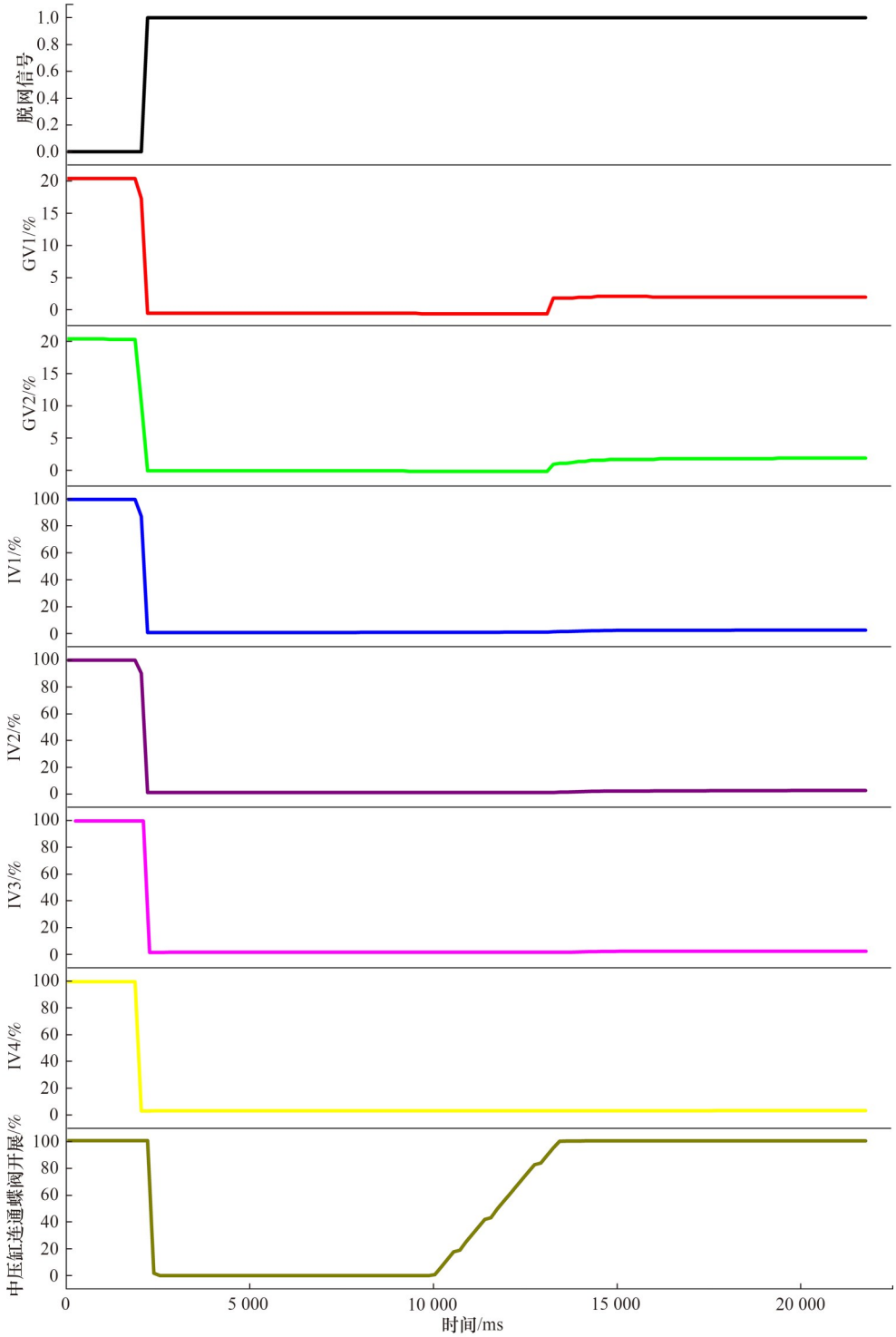

图4　50%甩负荷时各关键阀门响应动作

Figure 4　Response actions of key valves during 50% load shedding

Ebsilon热力系统仿真软件对高加投入与否进行建模，如图5所示，仿真结果表明：未投入高加时，进入2#中压缸的蒸汽流量为264.722 kg/s；投入高加后，系统可有效回收抽汽能量，降低中压缸排汽压力，进入2#中压缸的蒸汽流量为206.775 kg/s，做功量回归到设计区间。

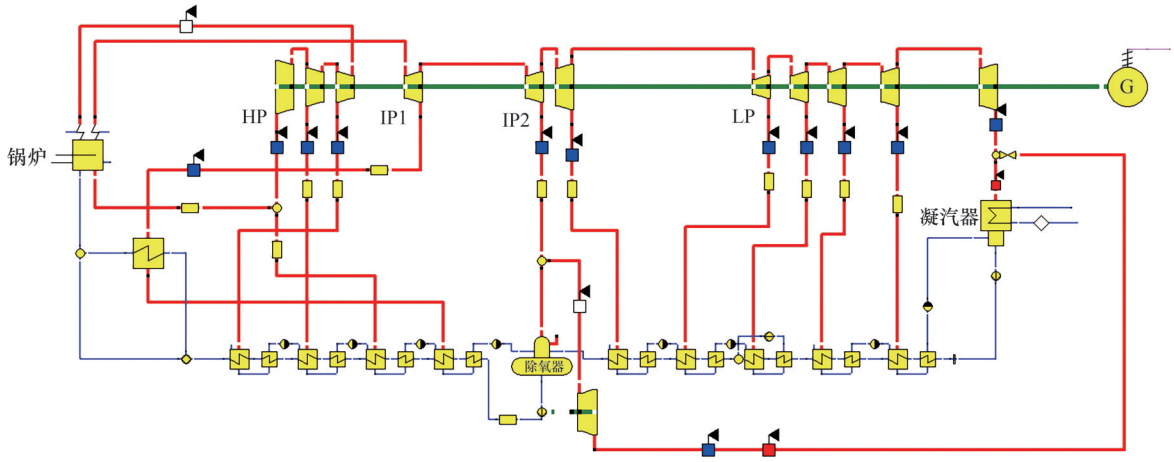

图5　汽轮机热力系统Ebsilon模型

Figure 5　Ebsilon model of steam turbine thermodynamic system

在其他试验条件(如阀门状态、保护逻辑)相同的情况下,#2中压缸和低压缸因蒸汽流量与压力偏高,做功量较3号机增加27%。过量的做功直接造成汽轮机转子获得超出设计预期的驱动力,转子加速力矩增大,进而引发转速快速飞升,超出额定转速范围[34]。

表3　4号机组与3号机组甩负荷试验相关参数对比

Table 3　Comparison of relevant parameters for load rejection test between Unit 4 and Unit 3

相关参数	3号机组50%甩负荷	3号机组100%甩负荷	4号机组50%甩负荷
负荷/MW	330	660	330
主蒸汽温度/℃	578.80	598.44	538.00
主蒸汽压力/MPa	16.25	27.99	14.91
再热蒸汽温度/℃	575.26	592.12	553.00
再热蒸汽压力/MPa	2.81	5.37	2.86
主机真空/kPa	−90.33	−89.22	−95.12
中排压力/MPa	0.93	2.15	1.21
中排温度/℃	427.11	444.00	429.55
飞升转速/(r·min^{-1})	3 103	3 285	3 183

2.3　改进措施及效果验证

基于上述原因,后续试验需通过投入高加、将主再热温度控制在590 ℃及以上,平衡缸内做功与阻力,同时通过增设机组解列信号至中压缸连通管蝶阀关闭指令的硬接线,尽可能缩短中压缸连通管蝶阀的延迟和关闭时间,避免转速异常飞升。如图6所示,在增加硬接线和调整油动机插装阀螺栓圈数的情况下均可有效降低中压缸连通管左右阀门的关闭时间。其中由于硬接线存在的原因,OPC指令到阀门关闭指令的延迟时间被消除,阀门关闭指令到阀门动作的时间也由原先的50 ms缩短至30 ms。在调整阀门圈数后阀门的动作时间也大幅度降低,调整3圈后,左侧阀门动作时间缩短280 ms,右侧阀门动作时间缩短140 ms;调整2圈后左侧阀门动作时间缩短140 ms,右侧阀门动作时间缩短120 ms。过度旋出插装阀螺栓可能导致密封性下降、插装阀漏油的现象,因此在保证阀门密封性的情况下尽可能缩短阀门关闭时间,最终将阀门调整3圈,左侧及右侧阀门的关闭时间分别为350 ms和370 ms,相比调整之前分别降低了480 ms和490 ms,符合设计要求。

在提出上述改进方案后,通过ASME标准《汽轮机超速保护系统设计与试验导则》,量化蒸汽输入能量与转子惯性能的平衡关系,计算飞升转速。飞升转速的推导公式如式(1)所示。其中E_4为转子的初始惯性能:

$$E_4 = \frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi n_{\text{rated}}}{60} \right)^2 \tag{2}$$

式中,J为转子的转动惯量,59 451 kg·m^2。

E_1为蝶阀延迟开启期间,通过阀门的蒸汽所做

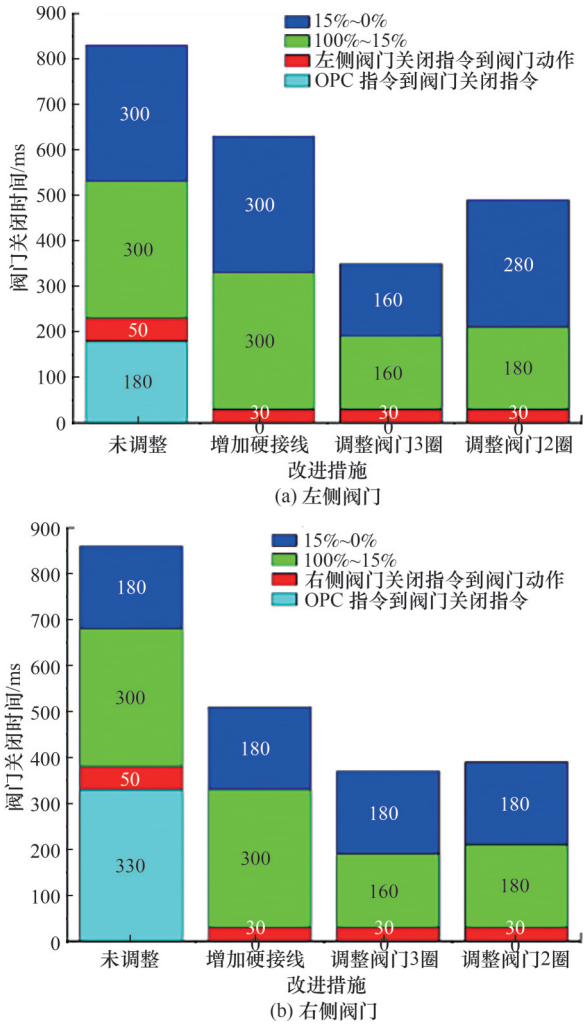

图6　改进前后中压缸连通管阀门关闭时间

Figure 6　Closing time of the connecting pipe valve of the intermediate pressure cylinder before and after improvement

的功：

$$E_1 = q_m \times T_1 \times \Delta h \tag{3}$$

式中，T_1为蝶阀延迟时间，s；Δh为蒸汽的有效焓降，kJ/kg；q_m为蒸汽的质量流量，kg/s。

$$q_m = \frac{Q}{\Delta h} \tag{4}$$

式中，Q为总蒸汽能耗，kJ/s。

$$Q = P \times q_{hr} \tag{5}$$

式中，q_{hr}为机组热耗率设计值7 679 kJ/(kW·h)，P为机组功率330×10³ kW。

蝶阀关闭过程为线性关断，蒸汽流量从q_m线性降至0，取平均流量计算，则阀门关闭能量E_2为：

$$E_2 = \frac{1}{2} q_m \times \Delta h \times T_2 \tag{6}$$

式中，T_2为蝶阀关闭时间，s。

管道及汽缸内残留蒸汽按绝热膨胀计算做功：

$$E_3 = \frac{p_1 V \kappa}{\kappa - 1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] \tag{7}$$

式中，p_1为中排压力，MPa；p_2为背压，0.005 MPa；V为双中压缸连通管+中压缸容积，18.6 m³；κ为绝热指数，取1.3。

根据式(1)~式(7)，计算得到优化前n_{max}为3 181 r/min，与实测3 183 r/min偏差0.06%，表明计算的可靠性。通过修正后阀门关闭时间，以及优化目标蒸汽参数，预测修正后n_{max}为3 134 r/min，小于105%额定转速。各部分计算结果如表4所示。

表4　优化前后各部分能量对比

Table 4　Comparison of energy in various parts before and after optimization

参数	优化前	优化后
E_1/kJ	35 104	21 130
E_2/kJ	299 237	126 778
E_3/kJ	96 872	74 286
E_4/kJ	2.92×10⁶	2.92×10⁶
n_{max}/(r·min⁻¹)	3 181	3 134

当蝶阀关闭时间从850 ms缩短至350~370 ms时，E_2从299 237 kJ降至126 778 kJ，降幅达57.6%，这是导致总输入能量降低的核心因素；主再热温度提升至590 ℃后，蒸汽焓降增加11.8%，流量减少了10.5%，间接降低E_1和E_2，确保转速满足≤105%额定转速要求。

在完成上述改进措施及理论计算后，于2025年11月7日重新进行了50%甩负荷试验，试验结果如图7所示，机组最高转速为3 135 r/min，小于105%额定转速，符合甩负荷标准，试验成功。

值得注意的是，蝶阀关闭时间优化可能对阀门冲击、密封等产生不利影响。为此，本文对阀门动态性能及系统稳定性进行了相应的测试，结果如表5所示。结果表明蝶阀关闭时间的优化对阀门的影响均在阀门厂家规定允许范围，对系统动态稳定性无不良影响。

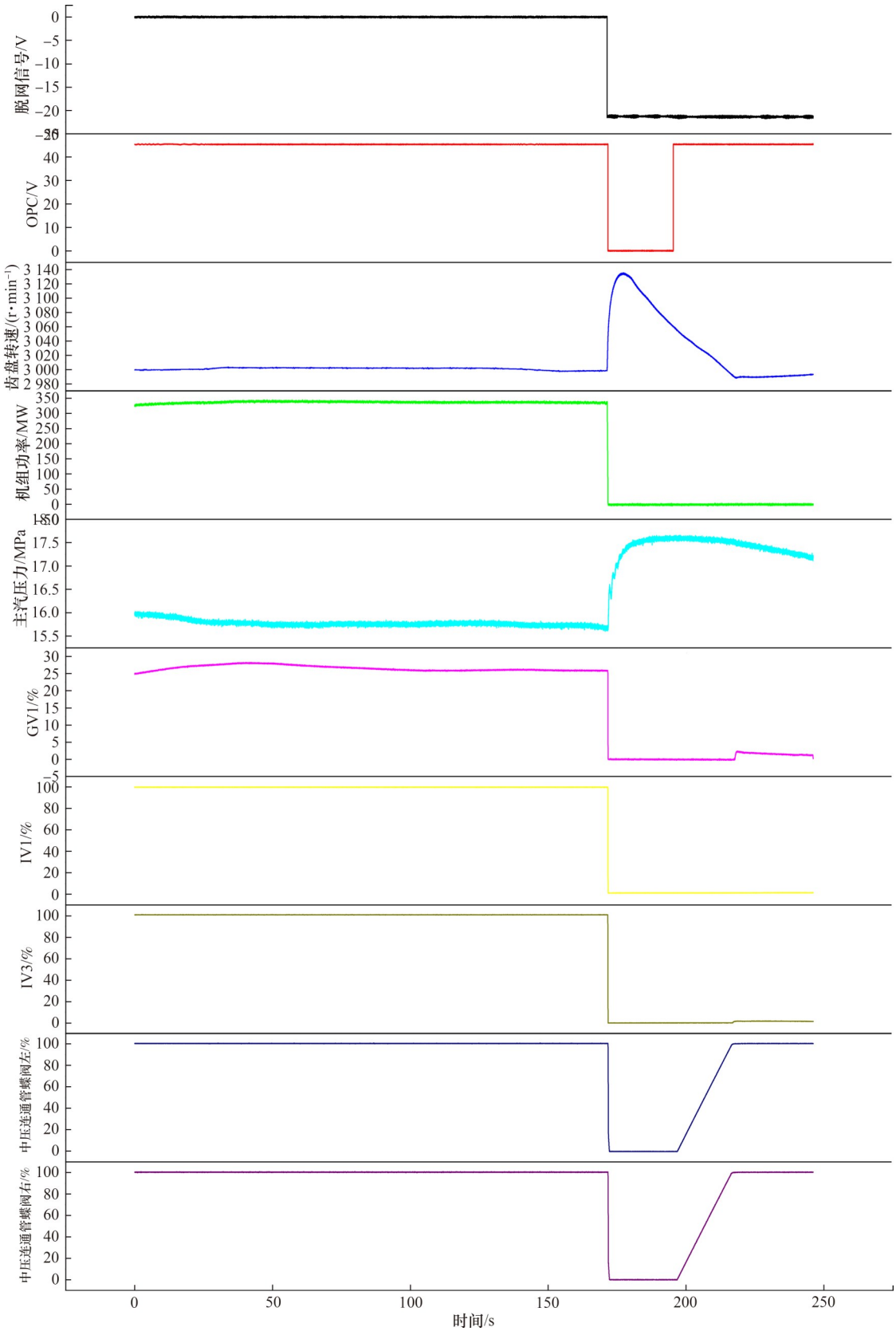

图7　改进后50%甩负荷试验结果

Figure 7　Results of 50% load rejection test after improvement

表5 阀门动态性能及系统稳定性试验数据

Table 5 Test data of valve dynamic performance and system stability

测试项目	设计允许值	350 ms实测值
阀门冲击压力/MPa	≤1.5	1.2
密封泄漏量/%	≤0.1	0.03
阀门振动/(m·s^{-2})	≤3	2.2

3 结论

汽轮机甩负荷特性是其调节系统动态性能的核心衡量指标，而优良的动态调节品质，是防止机组发生超速事故的基础前提[35-36]。通过本文的研究得出以下结论：

1）国内首台660 MW超超临界双中压缸热电联产机组首次50%甩负荷试验出现转速异常飞升（3 183 r/min，超过106%额定转速），其核心问题是多因素耦合导致的蒸汽做功失衡。具体表现为：中压缸连通管蝶阀关闭延迟（850 ms）造成蒸汽持续输入，主再热温度偏低与高压加热器未投入引发中低压缸做功超额（较正常工况增加27%），三者协同打破转子能量平衡，导致转速失控。

2）基于能量平衡理论与热力仿真分析，本文提出的系统性优化方案具有明确的科学依据与工程可行性：通过硬接线改造与阀门结构调整，将蝶阀关闭时间缩短至350~370 ms，削减蒸汽持续做功能量占比57.6%；投入高压加热器并控制主再热温度≥590 ℃，重构热力系统平衡，使中压缸排汽压力降低27%。改进后试验验证，机组最高转速控制在3 135 r/min（不超过105%额定转速），60 s内稳定至额定值，完全满足行业标准要求。

3）本研究突破了双中压缸结构机组甩负荷转速控制的行业技术瓶颈，其创新点在于：首次建立了双中压缸机组甩负荷转速飞升的“阀门动态特性-热力参数匹配-转子能量平衡”耦合分析模型，明确了蝶阀关闭时长作为核心控制变量的量化影响规律；形成的技术方案不仅适用于本机型，更可为同类高参数双中压缸热电联产机组提供科学参考。未来研究可进一步开展全负荷区间（尤其是100%负荷）甩负荷试验验证，结合数值模拟方法优化蝶阀控制逻辑与蒸汽参数动态匹配策略，为机组全工况安全运行提供更全面的理论支撑与技术保障。

参考文献：

[1] 黄伟，李文军，向勇林，等.600 MW超临界燃煤机组甩负荷试验锅炉侧的措施[J].电力建设，2008，29(8)：74-76.
HUANG Wei, LI Wenjun, XIANG Yonglin, et al. Boiler side measures in load-shedding test of 600 MW coal-fired SC units[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(8): 74-76.

[2] 薛青鸿. 660 MW超临界机组甩负荷试验分析[J]. 热力透平，2010，39(4)：278-281.
XUE Qinghong. Load rejection test analysis of 660 MW SC unit[J]. Thermal Turbine, 2010, 39(4): 278-281.

[3] 田丰. 我国600 MW等级汽轮机甩负荷试验现状分析[J]. 汽轮机技术，2010，52(3)：221-225.
TIAN Feng. Load-rejection Test of 600 MW capacity class turbine-generator in China[J]. Turbine Technology, 2010, 52(3): 221-225.

[4] 谢吉东. 发挥好煤电基础保障性和系统调节性作用[N]. 中国煤炭报，2022-03-26(003).
XIE Jidong. Give full play to the basic guarantee and system regulation role of coal-fired power[N]. China Coal News, 2022-03-26(003).

[5] 徐天敬，黄威，欧珂洁，等.“双碳”目标背景下我国现役煤电机组低碳转型发展路径研究[J].电力与能源，2026，47(1)：6-11.
XU Tianjing, HUANG Wei, OU Kejie, et al. Low-carbon transformation pathways for China's in-service coal-fired power units under the “dual carbon” goals[J]. Power & Energy, 2026, 47(1): 6-11.

[6] 陈昕奕，柳璐，张啸虎，等. 典型与极端场景下考虑煤电机组转型的灵活性资源协同规划[J]. 中国电机工程学报，2025，45(23)：9099-9112.
CHEN Xinyi, LIU Lu, ZHANG Xiaohu, et al. Collaborative planning of flexible resources considering the transformation of coal-fired units in typical and extreme scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(23): 9099-9112.

[7] 朱朱，张家杭，黄思嘉，等.“双碳”背景下工业供热热电产机组发展分析与思考[J].能源与环境，2026，(1)：69-72.
ZHU Zhu, ZHANG Jiahang, HUANG Sijia, et al. Analysis and thinking on the development of industrial heating cogeneration units under the background of “double carbon”[J]. Energy and Environment, 2026(1): 69-72.

[8] 凌学武. 超超临界660 MW机组深度调峰试验分析[J]. 电子技术，2021，50(2)：68-73.
LING Xuewu. Analysis of deep peak shaving test for 660 MW ultra-supercritical units[J]. Electronic Technology, 2021, 50(2): 68-73.

[9] 霍东方，王军，何维. 超临界变压直流锅炉的启动和主汽超温的处理[J]. 电力建设，2006，27(4)：11-13+17.
HUO Dongfang, WANG Jun, HE Wei, et al. Start up of super-critical direct-through boiler and disposal of excessive temperature of its

main steam[J].Electric Power Construction, 2006, 27(4):11–13+17.

[10] 郭洪义, 郭建平, 武帅, 等. 超超临界机组甩负荷试验[C]//第三十三届京津冀晋鲁华北六省市(区)电机工程(电力)学会论文集.内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司 2023:77–80. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.040771.
GUO Hongyi,GUO Jianping,WU Shuai, et al.Load rejection test of ultra supercritical units[C]//Proceedings of the 33rd Symposium of the Electric Engineering (Electric Power) Societies of the Six Provinces (Regions) of Beijing, Tianjin, Hebei, Shanxi, Shandong, and North China, Inner Mongolia Datang International Togtoh Power Generation Co., Ltd., 2023: 77–80.DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.040771.

[11] 朱良君, 傅旭峰, 王勇, 等. 超临界双抽背压式汽轮机甩50%负荷试验及分析[J]. 东北电力技术, 2022,43(12):38–41.
ZHU Liangjun,FU Xufeng,WANG Yong, et al.Test and analysis of 50% load rejection of supercritical double extraction back pressure turbine unit[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022,43(12):38–41.

[12] 谢昌亚, 陈凯亮, 杨赵辉, 等. 某630 MW通流改造机组甩负荷试验超速原因分析及处理[J]. 化工机械, 2022,49(3):544–550.
XIE Changya, CHEN Kailiang, YANG Zhaohui, et al. Cause analysis and treatment of overspeed during load rejection test on a certain 630 MW turbine flow passage modification unit[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2022,49(3):544–550.

[13] 郭萌, 何亚刚, 顾玉春, 等. 660 MW超超临界机组快速甩负荷控制策略及试验[J]. 电力建设, 2014,35(9):97–102.
GUO Meng, HE Yagang, GU Yuchun, et al.Control strategy and experimental study of FCB in 660 MW ultra–supercritical units[J]. Electric Power Construction, 2014,35(9):97–102.

[14] 王骏, 江峰. 关于哈汽660 MW一级大旁路超超临界机组甩负荷试验的分析[J]. 热力透平, 2010,39(3):198–201.
WANG Jun,JIANG Feng.Analysis of load rejection test on Harbin Turbine Company's 660 MW USC unit with whole–bypass[J]. Thermal Turbine, 2010,39(3):198–201.

[15] 唐家毅, 李立威, 潘登洪, 等. 低压透平油调节系统汽轮发电机组甩负荷试验异常分析与建议[J]. 冶金动力, 2021(2):46–48+52.
TANG Jiayi, LI Liwei, PAN Denghong, et al. Analysis and suggestion on abnormal load rejection test of low pressure turbine oil regulating system turbine generator unit[J]. Metallurgical Power, 2021(2):46–48+52.

[16] 李冰天, 张顺利, 周志平. 上汽西门子超超临界660 MW机组甩负荷试验异常分析及处理[J]. 电力与能源, 2020,41(1):104–108.
LI Bingtian,ZHANG Shunli,ZHOU Zhiping, et al.Anomaly analysis and treatment for load shedding test of SAIC Siemens ultra–supercritical 660 MW unit[J].Power & Energy, 2020,41(1):104–108.

[17] 何晓迪,于沛东,庞海宇.发电机组甩负荷试验二次超速异常分析及解决措施[J].电站系统工程,2022,38(6):52–54.
HE Xiaodi, YU Peidong, PANG Haiyu. Abnormal analysis and solution of secondary overspeed in load rejection test of generator set[J].Power System Engineering,2022,38(6):52–54.

[18] 张新胜,宋佳辉,丁宁,等.660 MW机组甩负荷试验转速二次飞升原因分析及处理[J].浙江电力,2021,40(7):96–102.
ZHANG Xinsheng,SONG Jiahui,DING Ning, et al.Cause analysis and treatment for secondary speed rise in load rejection test of a 660MW unit [J].Zhejiang Electric Power,2021,40(7):96–102.

[19] 李琳,吴丽丽,高岩,等.1 000 MW火电机组快速甩负荷系统设计与性能分析[J].山东工业技术,2021,(1):45–50.
LI Lin,WU Lili,GAO Yan, et al.Design and performance analysis of fast cut back system for 1 000 MW thermal power unit[J]. Journal of Shandong Industrial Technology,2021,(1):45–50.

[20] 张鹏,吕蒙,李永康.660 MW汽轮机甩负荷试验转速二次飞升原因分析[J].电站系统工程,2020,36(4):52–54.
ZHANG Peng, LYU Meng, LI Yongkang. Cause analysis for secondary speed rise of 660 MW steam turbine in load rejection test[J].Power System Engineering,2020,36(4):52–54.

[21] 薛青鸿. 660 MW超超临界机组启动调试中主要试验分析[J]. 电力科学与工程, 2012,28(5):70–75.
XUE Qinghong. Main Test Analysis of start debugging in ultra–supercritical 660 MW unit[J]. Electric Power Science and Engineering,2012,28(5):70–75.

[22] 李松波,胡红生,王标,等.660 MW汽轮机汽门关闭时间测试及静态甩负荷特性研究[J].山东工业技术,2015,(13):257.
LI Songbo,HU Hongsheng, WANG Biao, et al.Test of steam valve closing time and study on static load rejection characteristics of a 660 MW steam turbine[J]. Journal of Shandong Industrial Technology,2015,(13):257.

[23] 葛朋.高压缸启动机组甩负荷工况下OPC功能研究[J].东北电力技术,2020,41(2):10–12.
GE Peng. Research on OPC function of unit with high pressure cylinder start–up mode under load rejection condition[J]. Northeast Electric Power Technology,2020,41(2):10–12.

[24] 耿学军,张承宗,梁海龙,等.火电机组甩50%负荷试验操作浅析[J].能源与节能,2021,(3):176–177.
GENG Xuejun, ZHANG Chengzong, LIANG Hailong, et al. Analysis on operation of 50% load rejection test of thermal power unit[J].Energy and Energy Conservation,2021,(3):176–177.

[25] 黄辉,刘刚,杨杰.350 MW超临界机组甩负荷试验锅炉侧参数控制[J]. 湖北电力, 2013, 37(2):52–54.
HUANG Hui,LIU Gang,YANG Jie. Parameters control of boiler in load rejection test of supercritical 350 MW coal–fired unit[J]. Hubei Electric Power,2013,37(2):52–54.

[26] 赵志勇.汽轮发电机组甩负荷转速飞升特性的理论与实验研究[D].北京:华北电力大学,2011.
ZHAO Zhiyong.Theoretical and experimental research on speed rise of turbine units load rejection[D].Beijing:North China Electric Power University,2011.

[27] 赵志勇,谷军生,王立杰.汽轮机甩负荷转速飞升的两种计算方法及VB编程[J].华北电力技术,2014,(8):42–46+55.
ZHAO Zhiyong, GU Junsheng, WANG Lijie. Two kinds of

calculation methods of load rejection speed rise and VB programming of steam turbine[J].North China Electric Power,2014,(8):42–46+55.

[28] 阚伟民,蔡笋,谢诞梅,等.超超临界1 000 MW机组甩负荷试验研究[J].热力发电,2011,40(5):73–76+80.
KAN Weimin, CAI Sun, XIE Danmei, et al. Study on load rejection test of ultra–supercritical 1 000 MW unit[J].Thermal Power Generation, 2011, 40(5):73–76+80.

[29] 韩中合,赵志勇,吴瑞涛.机组甩负荷中调节阀的动作过程对转速飞升的影响[J].汽轮机技术,2011,53(1):63–65+58.
HAN Zhonghe,ZHAO Zhiyong,WU Ruitao, et al.The influence of control valve action process on speed rise in turbine units load rejection tests[J].Turbine Technology,2011,53(1):63–65+58.

[30] 杜连秀.超超临界600 MW汽轮发电机组超速特性分析[J].机械工程师,2012,(2):41–42.
DU Lianxiu. Analysis of overspeed characteristics of ultra–supercritical 600 MW turbine generator set[J]. Mechanical Engineer, 2012,(2):41–42.

[31] 万大伟,杨志行,张乃文.超超临界1 050 MW机组甩负荷试验及过程逻辑优化[J].电站系统工程,2021,37(3):62–64+66.
WAN Dawei,YANG Zhihang,ZHANG Naiwen.Load rejection test and process logic optimization of ultra–supercritical 1 050 MW unit[J]. Power System Engineering,2021,37(3):62–64+66.

[32] 陈禄,王波,王登亮,等.燃煤发电机组瞬态变负荷过程性能优化研究[J].发电技术,2026, 47(1): 157–167.
CHEN Lu, WANG Bo, WANG Dengliang, et al. Research on performance optimization of transient load change process in coal–fired power units[J].Power Generation Technology,2026, 47(1): 157–167.

[33] 张向业.基于焓值模型的火电厂汽轮机热耗率计算[D].秦皇岛:燕山大学, 2014.
ZHANG Xiangye.The calculation model based on enthalpy for the heat rate of steam turbines[D].Qinhuangdao: Yanshan University,2014.

[34] 石睿.变工况运行下核电汽轮机转动部件安全性研究[D].武汉:武汉大学,2023.
SHI Rui.Research on the safety of steam turbine's rotating parts in NPP under off–design operating conditions[D].Wuhan: Wuhan University,2023.

[35] 张波.国产600 MW超临界汽轮发电机甩负荷试验[C]//全国发电机组技术协作会.全国火电大机组(600 MW级)竞赛第十二届年会论文集(上册).江苏利港电力有限公司,2008:295–298.
ZHANG B. Load rejection test of domestic 600 MW supercritical turbine–generator[C]//Proceedings of the 12th Annual Competition Conference of Large Thermal Power Units (600 MW Class), Jiangsu Ligang Electric Power Co., Ltd., 2008: 295–298.

[36] 闵渊,张亚平,金旭明,等.1 520 MW核电汽轮机甩负荷动态特性研究[J].东方汽轮机,2017,(4):72–76+80.
MIN Yuan,ZHANG Yaping,JIN Xuming, et al.Study on dynamic characteristics of load rejection of nuclear steam turbine[J]. Dongfang Turbine,2017,(4):72–76+80.

第一作者简介:章津勛(1998—),男,工程师,主要从事宽负荷汽轮机运行,燃煤机组灵活调峰等方面的研究,jinxu_zhang@qq.com;

陈国庆(1982—),男,正高级工程师,主要从事燃煤清洁高效灵活发电技术及其耦合储能技术等方面的研究,chengqhit@163.com;

通信作者简介:于 强(1985—),男,高级工程师,主要从事汽轮机专业调试、调试项目管理等方面的研究,yuqiang818@126.com;

王 晨(1992—),男,助理工程师,主要从事汽轮机调试方面的研究,12034599@ceic.com;

陈 健(1984—),男,工程师,主要从事火电机组汽轮机调试以及节能降耗等方面的研究,89638771@qq.com;

胡 耘(1983—),女,正高级工程师,主要从事电力节能减排与污染控制技术及政策等方面的研究,12069991@ceic.com;

蒋国安(1992—),男,高级工程师,主要从事汽轮机热力系统优化及供热改造等方面的研究,12044829@ceic.com;

何新荣(1988—),男,高级工程师,主要从事旋转机械振动故障治理及火电机组安全经济运行技术等方面的研究,12011470@ceic.com。

(**编辑** 俞 颖)