

联合循环机组 SSS 离合器定向啮合控制技术研究及应用

赵博¹, 褚伟俊³, 印佳峰³, 崔红宾⁴, 赵伟刚¹, 潘渤^{2,5}

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 西安西热节能技术有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 华能上海燃机发电有限责任公司, 上海 200942; 4. 大唐海口清洁能源发电有限责任公司, 海南 海口 570311;

5. 高效灵活煤电及碳捕集利用封存全国重点实验室, 北京 102209)

摘要:针对配备 SSS 自动同步离合器的发电机组轴系振动故障频发、振动幅值随啮合角度变化的问题,采用主动转子转速调控实现定向啮合以提高轴系稳定性。考虑传输延迟、测量偏差等客观因素,采用 Newmar $k-\beta$ 积分算法进行数值仿真测试,对比分析了零残差多步调整法和固定升速率目标法的精度和稳定性。根据本文提出的控制方法,研制软硬件装置并在电厂应用,应用结果表明:固定升速率目标法表现出更好的抗干扰能力,与零残差多步调整法相比,控制结果标准差降低 30% 以上;定向啮合技术可有效改善自动同步离合器的啮合状态,将示范机组的振动故障概率从 60% 成功降到零,大幅度降低自动同步离合器故障、轴系振动故障发生概率,提升燃蒸联合循环发电机组和热电联产机组运行安全性。

关键词:自动同步离合器;联合循环机组;振动;啮合控制

中图分类号:TM611.31

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.mdjgc.2025.11.016

[引用本文格式]赵博,褚伟俊,印佳峰,等.联合循环机组 SSS 离合器定向啮合控制技术研究及应用[J].热能动力工程,2025,40(11):138-147. ZHAO Bo, CHU Weijun, YIN Jiafeng, et al. Research and application of SSS clutch directional meshing control technology for combined cycle units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(11):138-147.

Research and Application of SSS Clutch Directional Meshing Control Technology for Combined Cycle Units

ZHAO Bo¹, CHU Weijun³, YIN Jiafeng³, CUI Hongbin⁴, ZHAO Weigang¹, PAN Bo^{2,5}

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710054; 2. Xi'an TPRI Energy Conservation

Technology Co., Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710054; 3. Huaneng Shanghai Combined Cycle Power Co., Ltd.,

Shanghai, China, Post Code: 200942; 4. Datang Haikou Clean Energy Power Generation Co., Ltd., Haikou, China,

Post Code: 570311; 5. State Key Laboratory of High-Efficiency Flexible Coal Power Generation and Carbon

Capture Utilization and Storage, Beijing, China, Post Code: 102209)

Abstract: To address the issues of frequent shaft vibration failures and the variation of vibration amplitude with meshing angles in generator sets equipped with synchro-self-shifting (SSS) clutches, active rotor speed control was used to achieve directional meshing to improve shafting stability. Considering objective factors such as transmission delay and measurement deviation, numerical simulations were conducted using the Newmar $k-\beta$ integral algorithm. The accuracy and stability of the zero-residual multi-step adjustment method and the fixed ramp-rate target method were compared and analyzed. Based on the proposed control method, the software and hardware devices were developed and applied in power plants. The re-

收稿日期:2025-04-03; 修订日期:2025-05-20

基金项目:中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ24-H09, HNKJ24-H150)

Fund-supported Project: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ24-H09, HNKJ24-H150)

作者简介:赵博(1989-),男,西安热工研究院有限公司高级工程师。

通信作者:潘渤(1988-),男,西安西热节能技术有限公司高级工程师。

sults show that the fixed ramp-rate target method demonstrates superior interference rejection, reducing the standard deviation of control results by over 30% compared to the zero-residual multi-step adjustment method; directional meshing technology can effectively improve the meshing state of SSS clutch, successfully reducing the vibration failure probability of a demonstration unit from 60% to zero. This significantly reduces the probability of SSS clutch failure and shafting vibration failure, thereby improving the operational safety of gas-steam combined cycle generator set and cogeneration units.

Key words: synchro-self-shifting (SSS) clutch, combined cycle unit, vibration, meshing control

引 言

自动同步离合器技术已广泛应用于单轴布置的燃气蒸汽联合循环发电机组、“凝汽-抽汽-背压”(NCB)汽轮机及船舶燃气轮机。自动同步离合器成为西门子、安萨尔多及国内哈汽、东汽、上汽三大主机厂等联合循环机组常见配置^[1-3]。配备 SSS 离合器的机组可以实现按运行要求控制其啮合和脱开,实现汽轮机或低压缸的“解列”和“并车”,使机组能够进行灵活的运行工况在线切换,提高能源利用效率。但自动同步离合器前的“轻载”轴承和齿轮啮合结构对轴系振动等方面会产生影响,降低机组运行的安全性^[4-7]。

目前针对配备 SSS 离合器的机组由于啮合和脱开导致的振动故障,国内外学者从现场实测、建模分析、故障治理和离合器运行控制等方面开展了许多工作。宋亚军等人^[8]针对某厂带有 SSS 离合器的 300 MW 级 NCB 式汽轮机轴系振动故障,通过振动矢量计算与分析发现,振动故障是由高中压转子残余不平衡量、轴瓦载荷较轻、轴瓦瓦块调节性能差等多因素导致。赵卫正等人^[9]介绍了某电厂西门子 9F 燃气轮机啮合相关的振动突变问题的诊断及处理过程,通过轴承改造提高稳定性的手段减少了故障发生的概率。何国安等人^[10]给出了轴系不对中与轴承载荷变化之间的计算推演关系。Golebiowski 等人^[11]研究了 F 级单轴联合循环机组轴系振动特性,计算发现 SSS 离合器两侧的发电机集电环和高压转子组合模态频率为 57 ~ 64 Hz,与机组的工作转速 50 Hz 接近,导致不平衡响应灵敏度高。赵卫正等人^[9]和曹寒等人^[12]研究表明,SSS 离合器两侧转子较轻,叠加离合器随机啮合导致的轴承载荷变化是故障发生的重要原因。赵博等人^[13-15]研究了轻载轴承对不平衡和不对中故障的响应特性,研究

表明,轴系两端的端部轻载轴承普遍有不平衡灵敏度高、具有显著的各向异性、容易发生耦合振动故障等特征。潘渤等人^[16]和何国安等人^[17-18]研究了复杂轴系轴承稳定性不足导致的振动故障表现、诱发原因和治理措施。罗世梁等人^[19]通过建立不平衡力与径向瞬态冲击耦合作用下的轴承-转子动力学模型,研究了离合器啮合对轴系振动的影响。贺晨等人^[20]和彭伟超等人^[21]研究表明,啮合过程不理想还会造成离合器快速磨损、润滑油质量劣化加快等严重后果。肖民等人^[22]、李健等人^[23]和陈昊等人^[24]以提高机组振动安全裕度等技术参数指标为目的,在 SSS 离合器的研制和运维控制方面开展工作,探索了 SSS 离合器的实时仿真和试验方法。杨光等人^[25]介绍了西门子新建机组整套启动调试过程中通过定向啮合控制实现振动优化的新型运维技术。

上述文献对 SSS 离合器研发、设计、控制、故障诊断和运维技术方面开展了多角度的研究。目前仅有西门子推出了针对随机啮合诱发故障问题的定向啮合技术,但是相关技术严格保密。本研究针对 SSS 离合器定向啮合控制问题,提出了一种通过控制相对转速实现任意指定角度啮合的控制方法。首先,构建输入轴、输出轴、采集器和控制器的 SSS 离合器定向啮合控制模型,提出了两种预期能够实现定向啮合目标的方法;然后,引入测量偏差、间隔采样、传输延迟等因素的影响,通过数值仿真测试了两种控制策略的有效性和稳定性指标,并完成软硬件开发给出成套设备;最后,将定向啮合控制装置在 460 MW 燃蒸联合循环机组上投入应用,验证了所提出技术的有效性和可靠性。

1 信号采集及控制过程仿真

1.1 转速差和角度差获取

利用 SSS 离合器两侧的转子键相脉冲信号,可

以方便地获得两侧转子的实时相位差、各自转速和转速差。图 1 为 SSS 离合器两侧键相监测示意图。离合器两侧分别为输入轴和输出轴,如图 1(a)所示。输入轴和输出轴分别设有一个键相传感器,转子上键相槽经过传感器时产生键相脉冲,如图 1(b)所示。

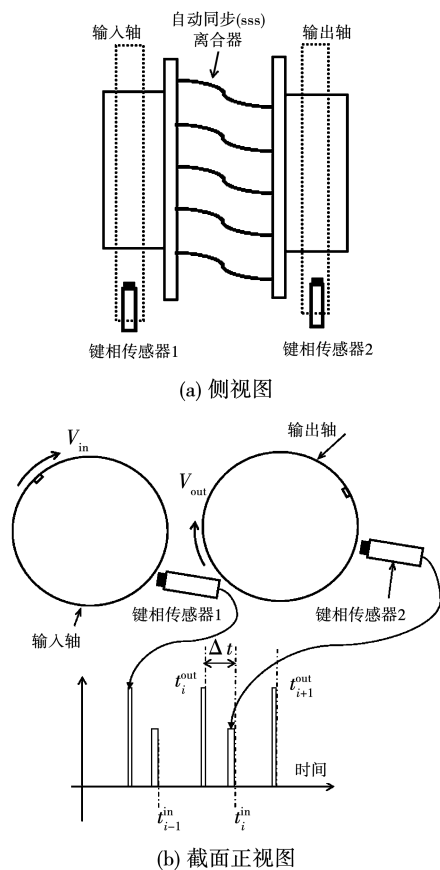


图 1 SSS 离合器两侧键相监测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of key phase monitoring on both sides of SSS clutches

基于转子键相到达时刻,可以分别计算出输入转子和输出转子的实时转速,并进一步得到转速差,计算过程如下:

$$\Delta v(t_{i+1}^{\text{out}}) = v_{\text{in}} - v_{\text{out}} = \frac{60}{t_{i+1}^{\text{out}} - t_i^{\text{out}}} - \frac{60}{t_{i+1}^{\text{in}} - t_i^{\text{in}}} \quad (1)$$

式中: v_{in} —输入转子转速; v_{out} —输出转子转速; Δv —转速差; t_i^{out} —输出转子键相信号的第 i 次到达时刻; t_i^{in} —输入转子键相信号的第 i 次到达时刻。

当输入和输出转子转速均保持稳定时,转速差可由式(1)精确获得;当输入和输出转子转速处于变化过程时,由于转子旋转的周期较短,忽略单个周

期内转速差的变化, t_i 时刻转子转速和转速差由式(1)近似获得。

为了获得角度域的相位信息,需将两侧转子键相槽到达时间差换算成两侧转子的角度差。由于自动同步离合器的结构特性,当输入轴输出轴转速相等时,离合器自动闭合开始传递扭矩,反之自动解列,扭矩传递消失。由于机组启动初始状态下输入转子转速低于输出转子,当两侧转子转速相等后离合器闭合,因此整个过程中 $v_{\text{in}} \leq v_{\text{out}}$ 。由于输入转子转速不会超过输出转子,定义输入转子键相槽滞后于输出转子键相槽的周向角度为离合器两侧转子的角度差 $\Delta\theta$,计算方式为:

$$\Delta\theta(t_{i+1}^{\text{out}}) = \frac{t_i^{\text{in}} - t_i^{\text{out}}}{t_{i+1}^{\text{out}} - t_i^{\text{out}}} \times 360 \quad (2)$$

1.2 啮合角度实时预测

以单轴联合循环发电机组为例,输入转子的转速通过汽轮机进汽阀门开度调节控制,燃气轮机在电网频率下以工作转速运行。分别以 $v_{\text{in}}(t)$ 和 $v_{\text{out}}(t)$ 表示输入和输出转子转速在未来时刻 t 的设定值,可由控制参数和时间 t 组成的表达式表示。根据自动同步离合器的特点,两侧转子转速相同时自动闭合,转子转速表达式已知的情况下,可以求解出啮合时间 t_{end} 。根据预测啮合时间,啮合时刻之前的转子转速设定值 $v_{\text{in}}(t)$ 和 $v_{\text{out}}(t)$,结合当前 t_0 时刻实测获得的角度差 $\theta(t_0)$,可以预测出最终啮合角度 $\theta(t_{\text{end}})$,最终啮合角度 $\theta(t_{\text{end}})$ 的计算公式如下:

$$\begin{cases} \theta(t_{\text{end}}) = \theta(t_0) + \int_{t_0}^{t_{\text{end}}} (v_{\text{out}}(\tau) - v_{\text{in}}(\tau)) d\tau \\ v_{\text{in}}(t_{\text{end}}) = v_{\text{out}}(t_{\text{end}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: τ — $t_0 \sim t_{\text{end}}$ 之间的时间变量。

1.3 啮合角度控制方法

由于机组运行灵活性的要求,应尽量减少定向啮合系统投入对整体启动时间的影响。另外,靠近工作转速时离合器接近啮合状态,应保持升速过程的连续性,否则可能因啮合时间过长导致离合器加速磨损。

基于上述要求,制定定向啮合策略如下:将理想啮合角度与实时预测啮合角度相减,获得预期啮合角度偏差。当预期角度偏差超限时,调整设定升速曲线参数,增大或减小升速率,使预计角度偏差处于

设定的范围内。图 2 为定向啮合的控制流程图。鉴于角度是模 360° 的周期量,应通过模 360 运算确保结果落在 $[0^\circ, 360^\circ)$ 的主值区间内。

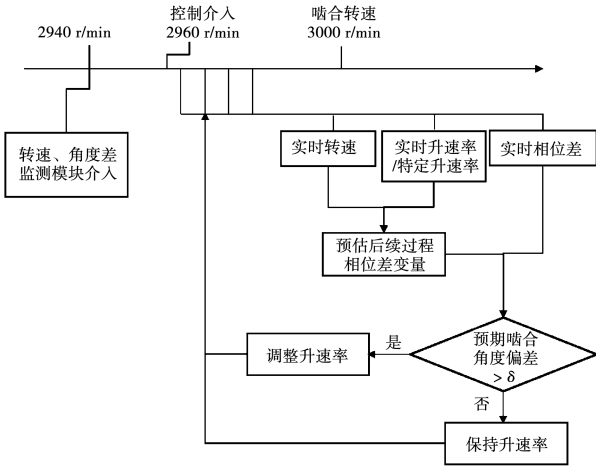


图 2 定向啮合控制策略

Fig. 2 Directional meshing control strategy

啮合角度控制的核心在于输入轴转速调整的方式。按照图 2 中的策略,假设后续升速过程中升速率不变的情况下,根据式(3)可以得到预期的啮合角度:

$$\theta(t_{\text{end}}) = \theta(t_0) + \frac{3 \times \Delta v^2(t_0)}{a} \quad (4)$$

式中: a —自 t_0 到啮合过程的预期指定升速率。

得到预期啮合角度后,令升速率保持为 a_{i+1} 的情况下预期啮合角度与目标角度相等,即:

$$\theta(t_0) + \frac{3 \times \Delta v^2(t_0)}{a_{i+1}} = \theta_{\text{tar}} + n \times 360 \quad (5)$$

式中: n —任意自然数; θ_{tar} —主动设定的目标啮合角度。

由于圈数 n 的不确定性,无法直接通过式(5)求解出后续的升速率 a_{i+1} 。汽轮机转子冲转过程的升速率通过改变进汽阀门开度实现,较小范围内变化的升速率更容易精确执行。由于升速率的调整范围应尽量小,要求 a_{i+1} 和 a_i 两种升速率下剩余相对旋转圈数不变,即有:

$$n = \left\{ \frac{3 \times \Delta v^2(t_0)}{a_i} - \left[\frac{3 \times \Delta v^2(t_0)}{a_i} \right] \text{mod} 360 \right\} / 360 \quad (6)$$

联立式(5)和式(6),即可计算出调整后的升

速率:

$$a_{i+1} = \frac{3 \times \Delta v^2(t_0)}{\theta_{\text{tar}} - \theta(t_0) + \frac{3 \times \Delta v^2(t_0)}{a_i} - \left[\frac{3 \times \Delta v^2(t_0)}{a_i} \right] \text{mod} 360} \quad (7)$$

式中: θ_{tar} —目标角度;mod—取余数。

采用式(7)的调整方法,可以通过最少的调整步骤将预期啮合角度偏差降低至零,但是在采样、传输等存在误差的情况下需要多步实时调整,有可能出现啮合角度收敛速度慢的情况。式(7)对应的方法以零残差为目标,升速率多步调整,在文中使用“方法一”代指,对应实时调整升速率策略。

作为对比,提出另一种控制方法,即将式(7)中的 a_i 由固定升速率代替,并给出升速率限幅,比如将固定升速率定为 120 r/min^2 ,调整后的升速率为:

$$a_{i+1} = \frac{3 \times \Delta v^2(t_0)}{\theta_{\text{tar}} - \theta(t_0) + \frac{3 \times \Delta v^2(t_0)}{120} - \left[\frac{3 \times \Delta v^2(t_0)}{120} \right] \text{mod} 360} \quad (8)$$

利用式(8)中的方法,最终能够将升速率收敛到固定的升速率 120 r/min^2 。这种方法可能需要多步调整,但是最终升速时间更为稳定。式(8)对应的方法在文中使用“方法二”代指,对应固定目标升速率策略。

2 仿真测试结果分析

使用 MATLAB 软件对方法一和方法二进行仿真计算,在角度差计算时采用 Newmar $k-\beta$ 积分算法,模拟单轴联合循环机组离合器两侧转子存在差速到 SSS 离合器啮合的整个过程。

2.1 理想情况下仿真测试

仿真理想情况下定向啮合控制的效果是使 SSS 离合器的啮合角度精准可控。目标角度和实际啮合角度偏差是评价方法优劣的关键。仿真测试中,除分析角度偏差结果外,还可结合升速率、转速差及预期啮合角度偏差等中间参数的变化过程,对比其连续性、波动范围,从而从控制机构执行难度与对原升速过程的影响等多个维度,评估不同控制方法的

优劣。控制过程和效果,此时不考虑信号传输的偏差和滞后,并且汽轮机数字电液控制系统(DEH)对转子转速控制不存在时滞和抖动。初始条件设定如下:输入端转子即燃气轮机转速恒定为 3 000 r/min;理想啮合角度设定为 180°,模型积分和控制计算步长 0.05 s,总计算时长 50 s;控制系统介入转速 2 960 r/min,初始升速率设定为 120 r/min²。

图 3 反映了理想情况下升速率实时调整策略下的相位曲线,啮合后相位角度不再变化,经过调速控制后最终啮合角度达到理想角度。图 4 为升速率随时间的变化曲线,理想情况下,升速率仅需一次调整后保持此升速率,即能够完成定向啮合控制。

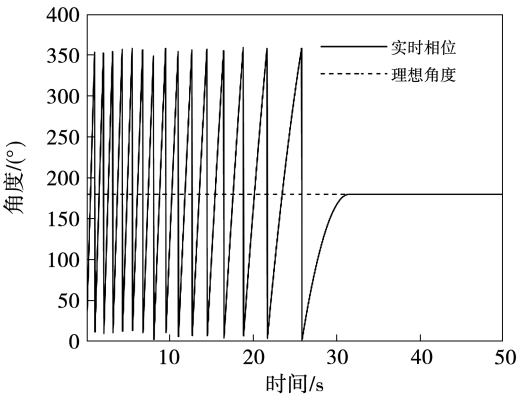


图 3 理想情况下实时调整升速率下啮合前、后角度变化趋势曲线

Fig. 3 Angle change trend curve under ideal conditions in real-time ramp-rate adjustment strategy before and after meshing

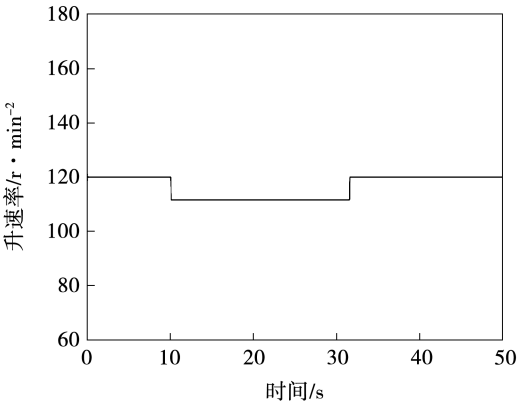


图 4 理想情况下啮合前、后升速率随时间变化曲线

Fig. 4 Time varying curve of ramp-rate under ideal conditions before and after meshing

以方法二执行控制策略时,先在 120 r/min²附近寻优计算得到固定目标升速率 112 r/min²,随后以保持此固定升速率为目标调整转速,由于不存在偏差,整个过程同样如图 3 和图 4 所示。由于升速率调整一次后保持恒定,由式(7)和式(8)中升速率和角度偏差之间的关系可知,角度偏差同样为经过一次调整即变化到零。在理想情况下,两种方法均只需调整一次升速率,就能实现啮合角度的精确控制,且过程相同。

2.2 非理想情况下仿真测试

实际情况下监控装置信号传输及机组对升速率指令的执行等过程均存在偏差、滞后等不利因素,需要验证控制方法在上述问题存在时的表现。非理想情况下,离合器输出端(即燃机)转速为 3 000 r/min,并随电网频率在 ±3 r/min 范围内波动,升降速率限幅为 ±10 r/min²;升速率指令由控制模块发出,滞后 0.1 s 时间后汽轮机转子开始执行,即汽轮机转子实际升速率与 0.1 s 前由控制模块发出的升速率指令吻合;升速率、监测角度和转速差等需要在仪器装置之间传递的信号均会有 ±0.5% 以内的传输偏差。

2.2.1 实时调整升速率策略下瞬态测试

图 5 为存在滞后和传输偏差时实时调整升速率策略下一次升速到啮合过程中的相位角度变化曲线,与图 3 相比转速角度曲线光滑度降低,表示转速稳定性变差,但是啮合角度仍达到了预设值。

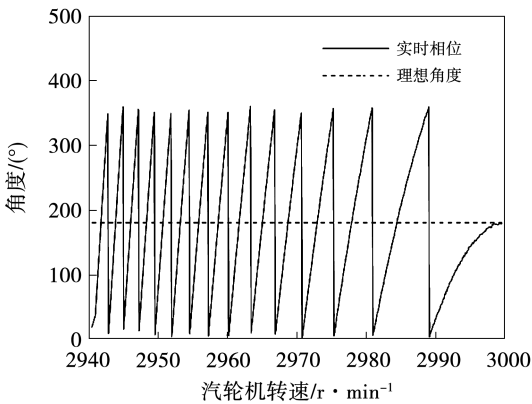


图 5 非理想情况时升速率实时调整策略下的角度曲线

Fig. 5 Angle curve in real-time ramp-rate adjustment strategy under non-ideal conditions

图 6 为非理想情况下升速率变化曲线。由图可知,非理想的条件下升速率大范围内频繁调整,加速度稳定性欠佳,且在输入轴靠近 3 000 r/min 时升速率的跳变范围增大。

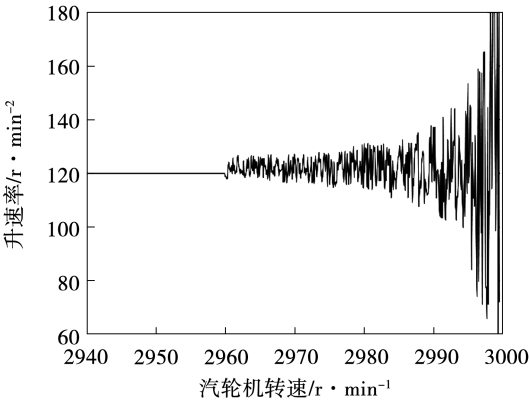


图 6 非理想情况时升速率实时调整策略的升速率曲线

Fig. 6 Ramp-rate change curve in real-time ramp-rate adjustment strategy under non-ideal conditions

图 7 为非理想情况时升速率实时调整策略下预期角度残差曲线啮合前角度残差的变化趋势,有随转速差减小收敛的趋势,在啮合时收敛到零附近。

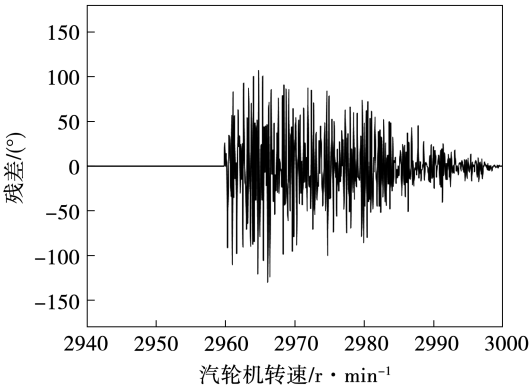


图 7 非理想情况时升速率实时调整策略下预期角度残差曲线

Fig. 7 Expected angle deviation curve in real-time ramp-rate adjustment strategy under non-ideal conditions

2.2.2 固定目标升速率策略下瞬态测试

图 8 为非理想情况下使用固定目标升速率策略下的相位角度变化曲线,同样的,输入轴转速达到 3 000 r/min 时的啮合角度达到了预设值。对比图 5 和图 8 可知,由于平均升速率不同,啮合过程相对角度变化量的差别较大。使用方法二后角度变化的周期数多一个,对应到实际啮合过程中时间变长。

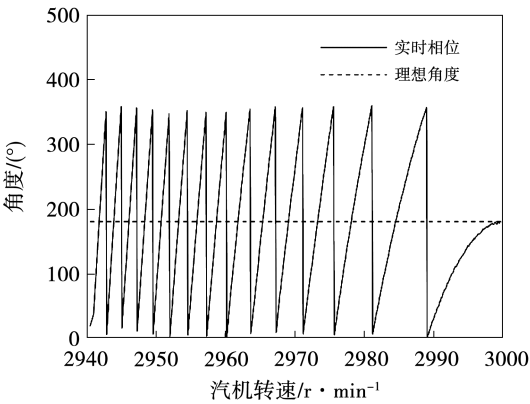


图 8 非理想情况时固定目标升速率策略的角度相位曲线

Fig. 8 Phase angle curve in fixed target ramp-rate strategy under non-ideal conditions

图 9 为非理想情况时固定目标升速率策略下升速率变化曲线,可以看出非理想的条件下升速率大范围内频繁调整,与方法一不同的是,转速靠近 3 000 r/min 时升速率的跳变范围逐渐缩小。

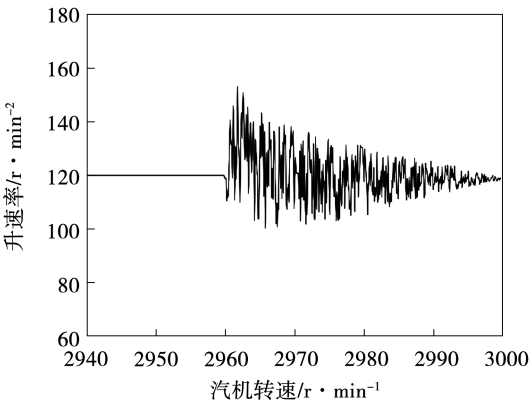


图 9 非理想情况时固定目标升速率策略的升速率曲线

Fig. 9 Ramp-rate curve in fixed target ramp-rate strategy under non-ideal conditions

图 10 中的啮合前实时角度残差同样有随汽轮机转速升高而收敛的趋势。对比图 7 和图 10,同样在 2 980 /min 转速时,方法一和方法二的残差分别为 90°和 50°。整个控制过程中,方法二较方法一的残差有效值降低 30% 以上,收敛速度更快。考虑到方法二中升速率和角度残差两个变量都能够同步收敛,更稳定的升速率更容易由汽轮机的调速系统准确执行,此方法的稳定性更具优势。

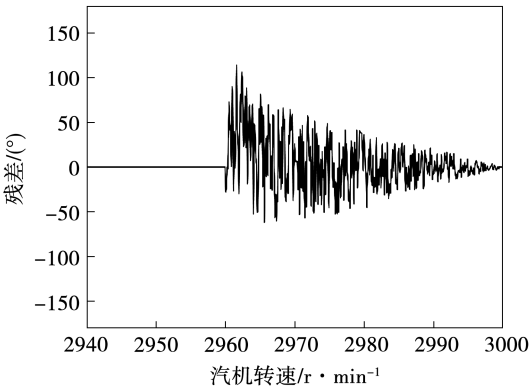


图 10 非理想情况时固定目标升速率策略的
预期残差曲线

Fig. 10 Expected deviation curve in fixed target ramp-rate
strategy under non-ideal conditions

2.2.3 多组随机重复测试结果

由于各类偏差因素的随机性,每次仿真结果均不相同,通过多次仿真测试,统计最终啮合角度与预设值之间的偏差。表 1 列出了使用两种控制方法进行 1 000 次仿真的统计结果,结果表明,方法二在平均值偏差和标准方差两个关键参数更小,控制性能更好。

表 1 两种方法多次控制最终结果偏差对比

Tab. 1 Comparison of final result deviations of two
methods after multiple control

参数指标	方法 1	方法 2
设定啮合角度目标值	180.00	180.00
实际啮合角度平均值	177.34	179.37
实际啮合角度最大值	185.34	186.90
实际啮合角度最小值	165.63	171.66
实际啮合角度标准差	2.98	2.07
偏差在 ±5° 以内的概率	71.50	98.02
偏差在 ±10° 以内的概率	99.87	100.00
偏差在 ±15° 以内的概率	100.00	100.00

3 现场案例

基于 SSS 离合器定向啮合的监测方法和控制算法,本研究开发了相应的硬件装置和配套软件。软硬件系统经过测试后在某电厂 1 号机投入使用,并对使用前后的定向啮合控制系统角度控制效果和机组的振动情况进行对比。

3.1 定向啮合系统部署及监测

某清洁能源电厂 1 号机为上海电气与安萨尔多联合生产的 F 级燃气 – 蒸汽联合循环机组,于 2022 年投入商业化运行。图 11 为机组轴系示意图。图中 3 号和 4 号为 SSS 离合器两侧的轴承。

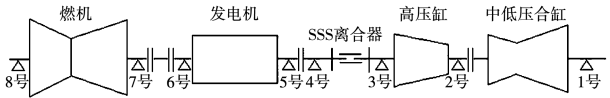


图 11 某电厂 1 号机组轴系图

Fig. 11 Shafting diagram of unit I of a power plant

机组投产一段时间后 SSS 联轴器两侧轴承处频繁出现轴振超标问题,其中 4 号轴承处轴振动最高超过 300 μm,超过制造厂和国标给出的停机值,影响到机组安全稳定运行。图 12 为出现故障时 4Y 轴振测点振动波形频谱图,由机组配备的振动测试诊断系统记录。

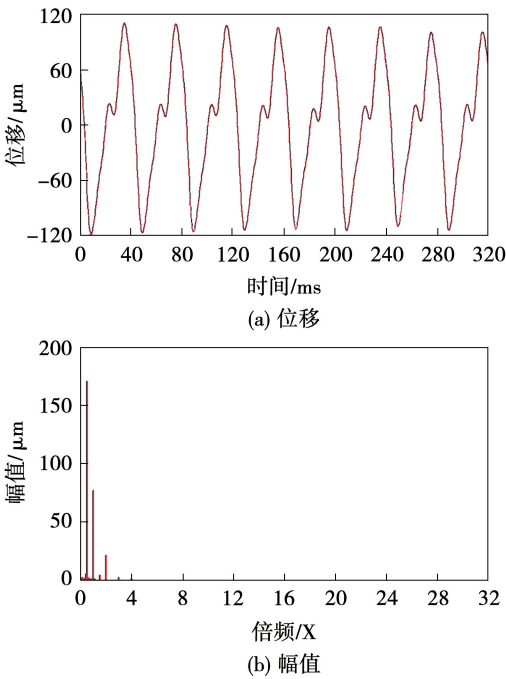


图 12 出现故障时 4Y 轴振测点振动波形频谱图

Fig. 12 Spectrum diagrams of vibration waveform at 4Y
shaft vibration measuring point when a fault occurs

由图 12(a) 可以看出,振动主周期为 40 ms 左右,超过旋转周期 20 ms,振动偏大,为低频振动故障。图 12(b) 频谱图显示振动以 0.5 倍频为主,故障为汽流激振或者油膜涡动导致的自激振动。考虑到 4 号测点位于励磁转子轴承处,可以排除汽流激振故障,故障应为轴系稳定性裕度不足导致的油膜

涡动。考虑到 SSS 离合器啮合角度对轴系稳定性影响,为了改善轴系振动表现,提高机组运行安全性,2024 年初在 1 号机部署了定向啮合监测控制系统。

布置在电子间的 SSS 离合器控制系统设备,包含高精度角度监测控制装置、上位机服务器及分析诊断程序组成。并使用硬接线与数字电液控制系统 (DEH) 系统连接,通过部署定向啮合控制逻辑实现定向啮合控制的目标。

3.2 定向啮合投入及效果

经过现场增加监控硬件,新增 DEH 接口,并完成部分逻辑调整和部署,1 号机定向啮合系统自 2024 年 2 月 26 日投入使用。选取 2 月 26 日前、后各 10 天范围内 1 号机组的啮合角度、轴系 4 号轴振数据,如表 2 所示。

表 2 定向啮合投入前后 1 号机组振动表现
Tab.2 Vibration performance of unit 1 before and after directional meshing

定向啮合投入前			
日期	目标角度/(°)	啮合角度/(°)	4 号轴振/ μm
2. 16	-	186	107
2. 17	-	303	101
2. 18	-	252	111
2. 19	-	351	42
2. 20	-	148	42
2. 21	-	233	138
2. 22	-	144	38
2. 23	-	87	23
2. 24	-	247	215
2. 25	-	196	144
定向啮合投入后			
日期	目标角度/(°)	啮合角度/(°)	4 号轴振/ μm
3. 16	40	21	20
3. 17	40	35	19
3. 18	40	35	17
3. 19	40	49	18
3. 20	40	41	19
3. 21	40	30	22
3. 22	40	41	21
3. 23	40	22	19
3. 24	40	36	16
3. 25	40	21	21

从表中数据可以看出,定向啮合系统投入前的 2 月 16 日至 25 日期间机组啮合共 10 次,其中有 6

次状态不理想,表现为 4 号轴振合成值稳定后仍超过 100 μm (合成值为同一轴承处 X 和 Y 方向轴振位移单峰值的均方根值,85 μm 以上报警,130 μm 以上建议打闸停机),统计出现严重振动故障的概率高达 60%。

SSS 离合器两侧轴承处出现振动故障时,频谱分析显示大多数情况下为低频振动主导,少部分情况下为一倍频振动主导。一倍频振动与轴系的平衡状态、对中情况、转子弯曲和支撑刚度有关。两侧转子在不同角度啮合时,离合器两侧轴系不平衡矢量在不同角度下叠加,会导致一倍频振动不同。低频振动对应的油膜涡动故障和转子-轴承组成的系统稳定性相关。由于啮合角度对稳定性裕度、轴瓦载荷、对中情况都有或多或少的影响,是造成油膜涡动故障的显著影响因素。同时,啮合角度也通过啮合后的不平衡响应间接影响到油膜稳定性。

图 13 为 2024 年 2 月 16 日至 3 月 6 日期间啮合角度与振动值之间的对应关系。由图可知,在 150°~330°的范围内,轴振为报警或更高振动水平,在其余的 180°范围内轴振为处于合格范围,啮合角度与振动值表现出了很强的相关性。

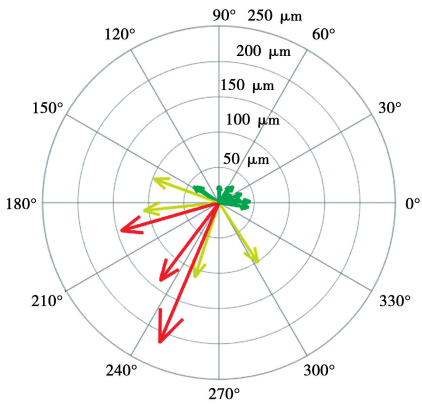


图 13 在 2024 年 2 月 16 日至 3 月 6 日期间啮合角度与振动值之间的对应关系
Fig. 13 Correspondence between meshing angle and vibration value from Feb. 16 to Mar. 6 in 2024

根据数据统计和机理分析,SSS 离合器的啮合角度与振动表现的相关性较强,通过定向啮合控制改善轴系振动是合理的。定向啮合系统投入后,经参数调整实现控制指标逐步优化,在 2024 年 3 月 16 日至 3 月 25 日期间,啮合角度均在设定的 40°附近,4 号轴振合成值均低于 50 μm ,机组轴系振动稳定。

3.3 长周期应用结果统计

机组在 2024 年 12 月进入检修,调取 24 年 3 月后 SSS 离合器定向啮合系统投入后的啮合角度、轴系振动等数据,显示 1 号机组 3 月至 12 月初共有 191 次启动,再未出现一次因为振动大而停机重新冲转啮合的情况。具体分析来看,191 次啮合后的运行过程中最易出现故障的 4 号轴振幅值均低于 $60\text{ }\mu\text{m}$,再未出现高于报警值 $85\text{ }\mu\text{m}$ 的情况,如图 14 所示。

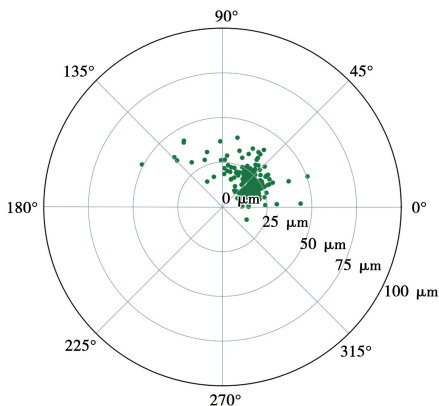


图 14 在 2024 年 3 至 12 月期间 1 号机离合器啮合角度与振动值

Fig. 14 Meshing angle and vibration value of clutch of unit I from March to December in 2024

从啮合角度来看,所有的啮合角度均分布在 $0^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 范围内,在目标角度 $10^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 范围内啮合的概率达到 90%,在 $\pm 10^{\circ}$ 范围内啮合的概率超过 50%。啮合控制圆满达到了控制啮合后轴系振动的效果,啮合角度的精确控制还有进一步提升的空间。此外,也验证了加装定向啮合控制系统对数字电液控制系统不会有任何安全和效能方面的不利影响。

从定向啮合系统投入前后机组振动表现来看,定向啮合控制系统通过合理设置目标角度和定向啮合控制,显著改善了轴系稳定性。从有限的数据来看,可以将轴系故障出现的概率从 60% 降至零。机组的 SSS 离合器定向啮合系统为控制轴系振动、保障轴系振动安全提供了有效手段。

4 结 论

(1) 提出了定向啮合监测和控制方法,经过仿真计算分析,认为固定目标升速率策略可以实现定向啮合控制,与零残差多步调整法相比角度分布标准差降低 30% 以上,对于信号传输和执行机构的滞

后、偏差等负面影响的抗干扰能力更强。

(2) 使用开发的定向啮合系统已经完成较长周期的现场验证,投入前后对比来看,将振动故障发生的概率从 60% 成功降到零,定向啮合系统的投入使用显著改善了轴系稳定性,可以有效避免示范机组轴系出现 SSS 啮合不理想导致的油膜涡动故障。

(3) 通过控制啮合角度可有效改善自动同步离合器的啮合状态,大幅度降低自动同步离合器故障、转子振动故障发生概率,提升燃蒸联合循环发电机组/热电联产机组运行安全性。

参考文献:

- [1] 张立建,沈国平,罗 萌. 国产首台 165 MW 机组自动同步离合器的研制与应用[J]. 热力透平,2020,49(2):111-114,142. ZHANG Lijian, SHEN Guoping, LUO Meng. Development and application of synchro-self-shifting clutch first used in 165 MW unit in China[J]. Thermal Turbine, 2020, 49(2): 111-114, 142.
- [2] 曹志刚,吴鲁纪,杨林杰,等. 自动同步离合器基本原理和研究发展概况[J]. 机械传动,2010,34(8):92-94,98. CAO Zhigang, WU Luji, YANG Linjie, et al. Summary on basic mechanism and development status of SSS clutch[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(8): 92-94, 98.
- [3] HENDRY M L. Application and experience of the SSS (synchro-self-shifting) clutch for high speed gas turbine marine propulsion systems[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2018, 50985: V001T25A004.
- [4] 鲍大虎,何成君,王文斌,等. 带 SSS 离合器 NCB 式汽轮机工况切换的研究[J]. 汽轮机技术,2015,57(4):295-296,301. BAO Dahu, HE Chengjun, WANG Wenbin, et al. Research on operating mode switch of NCB type steam turbine with SSS clutch[J]. Turbine Technology, 2015, 57(4): 295-296, 301.
- [5] 黄葆华,宋亚军,孙燕平,等. 燃气—蒸汽联合循环机组轴系振动问题综述[J]. 热能动力工程,2017,32(5):1-7. HUANG Baohua, SONG Yajun, SUN Yanping, et al. An overview on the shaft vibration problems of gas-steam combined cycle unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(5): 1-7.
- [6] 孙明举,冯志顺,李凯同. 燃气蒸汽联合循环机组 SSS 离合器故障处理实例[J]. 吉林电力,2024,52(4):40-42. SUN Mingju, FENG Zhishun, LI Kaitong. Example of synchro self shifting clutch fault handing in gas steam combined cycle unit[J]. Jilin Electric Power, 2024, 52(4): 40-42.
- [7] 张学延,张卫军,何国安. 火电厂旋转机械振动诊断及治理技术[M]. 北京:中国电力出版社,2019. ZHANG Xueyan, ZHANG Weijun, HE Guoan. Diagnosis and treatment technology of rotary mechanical vibration in thermal power plant[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.
- [8] 宋亚军,司派友,郝向中,等. 带有 SSS 离合器汽轮发电机组轴系振动分析与处理[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7):

- 171 – 176.
- SONG Yajun, SI Paiyou, HAO Xiangzhong, et al. Analysis and treatment of the shafting vibration of steam turbine generator set with SSS clutch[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 171 – 176.
- [9] 赵卫正,童小忠,王小荣,等. 西门子 9F 燃气轴系异常振动分析与处理[J]. 燃气轮机技术, 2018, 31(3): 53 – 58.
- ZHAO Weizheng, TONG Xiaozhong, WANG Xiaorong, et al. Analysis and treatment of abnormal vibration of a Siemens 9F gas turbine generator unit [J]. Gas Turbine Technology, 2018, 31(3): 53 – 58.
- [10] 何国安,郑永强,田满金,等. 汽轮发电机组轴系不对中的反演计算分析方法[J]. 热力发电, 2010, 39(9): 35 – 38, 80.
- HE Guoan, ZHENG Yongqiang, TIAN Manjin, et al. Analysis method of shaft misalignment for turbo-generator set based on inverse mathematical computation[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(9): 35 – 38, 80.
- [11] GOLEBIEWSKI M, NORDMANN R, KNOPE E. Rotordynamic investigation of spiral vibrations: thermal mode equation development and implementation to combined-cycle power train [C] // ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, Dusseldorf, Germany, 2014.
- [12] 曹 寒,于光辉,杨 灵,等. 带自同步离合器联合循环机组振动问题分析与处理[J]. 东方汽轮机, 2022(3): 80 – 83.
- CAO Han, YU Guanghui, YANG Ling, et al. Analysis and treatment of vibration on combined cycle unit with synchro-self-shifting[J]. Dongfang Turbine, 2022(3): 80 – 83.
- [13] 赵 博,潘 渤,王 玮,等. 转子质量不平衡及气流扰动耦合振动典型案例[J]. 热力发电, 2022, 51(12): 93 – 98.
- ZHAO Bo, PAN Bo, WANG Wei, et al. Typical case analysis of rotor mass imbalance and steam flow disturbance coupling vibration[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(12): 93 – 98.
- [14] 赵 博,谷伟伟,潘 渤,等. 柔性联轴器平行不对中轴系振动特性分析[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(11): 1693 – 1697.
- ZHAO Bo, GU Weiwei, PAN Bo, et al. Vibration characteristics analysis of rotor system with flexible coupling parallel misalignment [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, 41(11): 1693 – 1697.
- [15] 赵 博,何国安,阚选恩,等. 不平衡导致的发电机组转子反向涡动分析[J]. 动力工程学报, 2022, 42(3): 235 – 241, 262.
- ZHAO Bo, HE Guoan, KAN Xuanen, et al. Analysis of backward whirl of generator set rotor induced by unbalance[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(3): 235 – 241, 262.
- [16] 潘 渤,张 恒,赵 博,等. 汽轮机高压/超高压转子-轴承系统若干油膜稳定性问题的分析[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(2): 143 – 145, 126.
- PAN Bo, ZHANG Heng, ZHAO Bo, et al. Analysis on oil film stability of some high-pressure/ultra-high-pressure rotor-bearing systems in steam turbine [J]. Turbine Technology, 2019, 61(2): 143 – 145, 126.
- [17] 何国安,胡相余,杨 铖,等. 轴承振动对油膜涡动的影响分析与试验[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 211 – 216.
- HE Guoan, HU Xiangyu, YANG Cheng, et al. Analysis and test on the effect of bearing vibration on oil film whirl[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 211 – 216.
- [18] 何国安,常 屹,张学延,等. 预负荷调整在可倾瓦轴承不稳定振动处理中的应用[J]. 中国电力, 2012, 45(11): 36 – 40.
- HE Guoan, CHANG Yi, ZHANG Xueyan, et al. Application of preload factor to eliminating unstable vibration of tilting pad bearings[J]. Electric Power, 2012, 45(11): 36 – 40.
- [19] 罗世梁,江栋军,沈德明,等. 燃机离合器啮合冲击引发不稳定振动研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(6): 147 – 155.
- LUO Shiliang, JIANG Dongjun, SHEN Deming, et al. Research on unstable vibration triggered by impact load during clutch engaging process of gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(6): 147 – 155.
- [20] 贺 晨,谢明江. 大功率 SSS 离合器故障分析及其静态调试的方法和意义[J]. 东方汽轮机, 2021(2): 74 – 77.
- HE Chen, XIE Mingjiang. Fault analysis of high power SSS clutch and its static debugging method and significance [J]. Dongfang Turbine, 2021(2): 74 – 77.
- [21] 彭伟超,刘俊峰. SSS 离合器介绍及其故障诊断[J]. 热力透平, 2016, 45(4): 327 – 329.
- PENG Weichao, LIU Junfeng. SSS clutch and its fault diagnosis [J]. Thermal Turbine, 2016, 45(4): 327 – 329.
- [22] 肖 民,吴启泉. 基于 AMESim 的 SSS 离合器的建模与仿真[J]. 机电工程, 2013, 30(3): 288 – 291.
- XIAO Min, WU Qiquan. Modeling and simulation of SSS clutch based on AMESim [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(3): 288 – 291.
- [23] 李 健,王志涛,李铁磊,等. 燃-燃联合动力系统并车控制方法优化 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(8): 1345 – 1353.
- LI Jiang, WANG Zhitao, LI Tielei, et al. Control method optimization for the paralleling operation of a combined gas turbine and gas turbine system [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(8): 1345 – 1353.
- [24] 陈 昊,周瑞平,雷俊松,等. 燃气轮机快速并车过程冲击及响应特性试验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(10): 474 – 481.
- CHEN Hao, ZHOU Ruiping, LEI Junsong, et al. Experimental research on impact and response characteristics in rapid engaging process of gas turbine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(10): 474 – 481.
- [25] 杨 光,刘 洋,姚正林,等. 燃气蒸汽联合循环机组 SSS 离合器啮合相位角控制技术[J]. 发电设备, 2022, 36(3): 214 – 218.
- YANG Guang, LIU Yang, YAO Zhenglin, et al. Meshing phase angle control technology of the SSS clutch in a gas-steam combined cycle unit [J]. Power Equipment, 2022, 36(3): 214 – 218.