

文章编号：0258-0926(2018)03-0122-06; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0122

# 福清核电厂汽轮发电机组非核蒸汽冲转 可行性研究分析及优化

肖 波, 何 流

福清核电有限公司, 福建福清, 350318

**摘要:** 汽轮发电机组非核蒸汽冲转相较于核蒸汽冲转能够提前验证汽轮发电机组设计、制造、安装质量, 缩短后续机组整组启动调试的工期, 创造经济效益。依据热力学第一定律建立了汽轮发电机组非核蒸汽冲转热平衡计算公式, 并得出汽轮发电机组在  $1500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  平台稳定时间、汽轮发电机组冲转耗能、一、二回路补水等冲转关键参数。福清核电厂 1 号汽轮发电机组非核蒸汽冲转顺利结束后, 结合实际过程对理论计算公式进行了进一步校核, 证明了理论计算方法适用于实际冲转工况, 并对 3 号汽轮发电机组非核冲转步骤进行了优化, 从而减少了汽轮发电机组非核冲转过程中一、二回路关键参数的波动, 降低机组控制的风险, 延长冲转时间, 进一步验证汽轮发电机组的质量。通过对比福清核电厂 1、3 号汽轮发电机组非核冲转参数变化, 进一步证明了优化措施是有效的。

**关键词:** 福清核电厂; 汽轮发电机组非核蒸汽冲转; 热平衡计算; 可行性分析以及优化

**中图分类号:** TK08 **文献标志码:** A

## Feasibility Analysis and Optimization for Turbo-Generator Rushing with Non-Nuclear Steam in Fuqing Nuclear Power Plant

Xiao Bo, He Liu

Fuqing Nuclear Power Co., Ltd., Fuqing, Fujian, 350318, China

**Abstract:** Compared with the rushing with nuclear steam, the turbo-generator rushing with non-nuclear steam can be used to verify the design, manufacture and installation quality of the turbo-generator, and shortens the timescale of the system commissioning of the nuclear power plant to create huge economic benefits. By establishing the thermal equilibrium calculation equation based on the first law of thermodynamics, this paper calculates the time of turbo-generator holding at 1500rpm, the consumed energy of the rushing, the replenishment of loop 1 and loop 2. The theoretical calculation is further checked according to the actual process of Unit 1 in Fuqing No.1 non-nuclear steam rushing. It is proved that the theoretical calculation method agrees well with the actual process of the system. In the process of non-nuclear rushing of Unit 3 in Fuqing Nuclear Power Plant, the non-nuclear rushing step is optimized to reduce the fluctuation of the key parameters of loop 1 and loop 2 during the rushing process for reducing the risk of unit control and extend the non-nuclear rushing time for further verifying the quality of the steam turbine. After the non-nuclear rushing of Unit 3 in Fuqing Nuclear Power Plant, the optimization measures were proved to be effective by comparing the non-nuclear rushing parameters between Unit 1 and Unit 3.

**Key words:** Fuqing Nuclear Power Plant, Non-nuclear steam rushing of turbo-generator, Thermal equilibrium calculation, Feasibility analysis and optimization

0 汽轮发电机组非核蒸汽冲转介绍  
汽轮发电机组首次冲转是核电厂整组启动过

程中的一项综合性试验。汽轮机的首次冲转试验  
主要验证汽轮发电机组的设计、制造、安装、调

收稿日期: 2017-07-29; 修回日期: 2018-04-18

作者简介: 肖 波 (1976—), 男, 高级工程师, 现从事核电厂建设项目管理工作, 曾长期从事核电厂、汽轮发电机组的调试管理、技术管理等工作

试质量,确保汽轮发电机组瓦温、瓦振、胀差等本体关键参数满足要求,并验证常规岛其他系统运行的可靠性<sup>[1]</sup>。针对百万千瓦级的核电机组,常规岛具备整组启动条件到实际整组启动往往要间隔几个月,如果常规岛整组启动过程中汽轮发电机组出现若干缺陷需要停机检修,可能造成严重的经济损失。福清核电厂某汽轮发电机组非核冲转过程中发现发电机端部振动高高报警的现象,在机组停运工况下进入发电机内部检查发现测振探头松动,发电机运转情况下一旦探头脱落将会发生定子、转子损伤的严重后果,必须在机组启动前处理完毕。该故障从原因排查到最终处理完成共计耗费约 168 h,如该故障在核蒸汽冲转期间发现并处理,将成为关键路径,并占用机组调试启动主线工期,造成经济损失约 7000 万元。

热态功能试验是核电厂装料前调试的关键路径,为了提前发现并解决汽轮发电机组的相关缺陷,机组的首次冲转可以提前到机组热态功能试验期间执行。汽轮发电机组可以利用机组热停堆工况期间的一、二回路蓄能以及主泵、稳压器电加热器产生的热量将蒸汽发生器给水加热为蒸汽,继而冲转汽轮发电机组<sup>[2]</sup>。由于此次汽轮发电机组冲转并非利用机组临界后核裂变产生的热能进行冲转,故此冲转称为汽轮发电机组非核蒸汽冲转。

由于非核蒸汽冲转所需的能量主要是靠一、二回路的蓄能来提供,不同于核蒸汽冲转期间堆芯能够提供充足的能量,蓄能是相当有限的。故非核蒸汽冲转的难点在于机组热停堆工况下一、二回路蓄能以及主泵、稳压器电加热器产生的能量能否满足汽轮发电机组冲转的能量要求。并且由于冲转期间一、二回路温度、稳压器水位等关键参数会剧烈变化,从机组状态控制角度考虑,上述关键参数也有相应的限值要求,故冲转前需要明确汽轮机在额定转速稳定的时间以及一、二回路补水、耗汽量等,从而在冲转全过程中确保机组安全<sup>[3]</sup>。福清核电厂为国内首台进行 M310 型非核蒸汽冲转的半转速百万千瓦级别的汽轮发电机组,没有成熟的先例可以进行借鉴,为了确保汽轮发电机组非核蒸汽冲转一次性成功,需要对福清核电厂汽轮发电机组非核蒸汽冲转的可行性进行全面分析、研究。

## 1 非核冲转热平衡计算以及可行性分析

### 1.1 非核冲转热平衡计算公式的建立

根据热力学第一定律,可得:

离开系统的能量=系统初态能量-系统末态能量+进入系统能量<sup>[4]</sup>。

对照热力学第一定律的公式,将一回路以及蒸汽发生器二次侧看做一个封闭系统(图 1),公式中的各项可明确为下列能量。

离开系统的能量:汽轮发电机组冲转中需要的能量  $Q_1$ ;一回路正常下泄所带走的能量  $Q_2$ 。系统初态能量:冲转前系统所具有的能量  $Q_3$ 。系统末态能量:冲转后系统所具有的能量  $Q_4$ 。进入系统的能量:一回路上充所带入的能量  $Q_5$ ;一回路主泵轴封水所带入的能量  $Q_6$ ;蒸汽发生器补水所带入的能量  $Q_7$ ;主泵和稳压器加热器投运所带入的能量  $Q_8$ 。

按照上述能量表达式,热力学第一定律可表示为:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 - Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8$$

$$Q_1 = (Q_3 - Q_4) + (Q_5 + Q_6 - Q_2) + (Q_7 + Q_8) \quad (1)$$

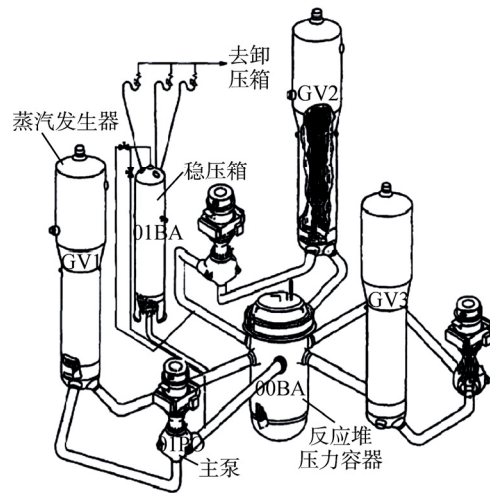


图1 一回路结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Loop 1

### 1.2 汽轮发电机组冲转所需能量

根据厂家提供资料,冲转期间各转速平台消耗新蒸汽的量见图 2。

由于首次机组启动为冷启动,升速率为  $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-2}$  汽轮机转速从  $0 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  上升至  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  耗时 30 min,假设其在  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  维持  $x$  分钟,故汽轮机冲转所需能量为(新蒸汽的焓值为

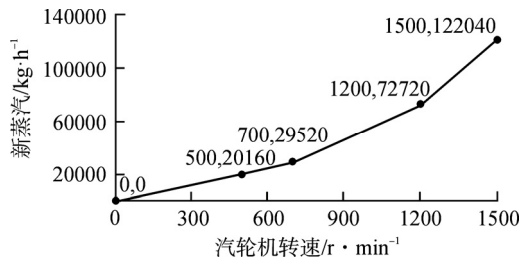


图2 各平台转速新蒸汽消耗量

Fig. 2 Consume of Steam in Every Speed Steps

2763 kJ/kg) :

$$Q_1 = (21595 + 122040 \cdot x / 60) \times 2763 \quad (2)$$

考虑到在机组非核冲转升速初期, 此主泵和稳压器电加热器所带入的能量大于升速所需的能量, 多余能量通过 GCT-a 排出, 此时并未消耗机组的蓄能, 故热平衡计算的系统初始状态从平衡转速 (即核岛产生的总热量与汽轮机消耗能量相等时对应的转速) 开始计算。3 台主泵以及稳压器电加热器全部投运的情况下, 给一回路带入的热量为 18642 kW, 可以产生饱和蒸汽 20.24 t/h, 根据各转速平台蒸汽消耗量曲线, 与 20.24 t/h 对应的汽轮机转速为 502 r·min<sup>-1</sup>, 即非核冲转的平衡转速为 502 r·min<sup>-1</sup>。当汽轮机的转速超过 502 r·min<sup>-1</sup> 后, 汽轮机才开始消耗反应堆的蓄能, 即汽轮机非核冲转至 1500 r·min<sup>-1</sup> 消耗核岛蓄能为汽机从 502 r·min<sup>-1</sup> 冲转至 1500 r·min<sup>-1</sup> 所消耗能量。故修正为:

$$Q_1 = (19900 + 122040 \cdot x / 60) \times 2763 \quad (3)$$

式中, 19900 为平衡转速 502 r·min<sup>-1</sup> 升速至 1500 r·min<sup>-1</sup> 所消耗的蒸汽质量, kg。

### 1.3 系统释放能量

汽轮机非核蒸汽冲转前, 尽量保证稳压器液位、蒸汽发生器液位、除氧器液位足够高, 确保有足够的蓄能保证汽轮机冲转到 1500 r·min<sup>-1</sup>。在汽轮机冲转过程中, 从考虑保护设备的角度出发, 设定了相应的限值条件。

稳压器液位不允许达到低 2 液位 (-4.63 m), 冲转期间控制水位在 21% (-3.94 m) 以上, 避免电加热器裸露; 一回路压力不能低于安注系统投入的压力值 11.9 MPa; SG 最低液位 -1.8 m, 防止蒸汽发生器烧干, 冲转期间控制在 29% (-0.76 m) 以上; 蒸汽发生器内一、二次侧的最大差压不能高于 11 MPa, 考虑到一回路初始压力为 15.5 MPa, 冲转过程中压力会下降, 从保守角度考虑,

二回路压力不能低于 4.3 MPa, 从而确定一、二回路温度不能低于该压力对应的饱和温度 255。

非核冲转期间, 一回路介质温度迅速下降, 由于水的比容随着温度的降低而升高, 导致一回路水装料体积变小, 虽然可以通过上充对一回路进行补水, 并且稳压器自身体积也可缓冲一回路系统水容积的迅速变化, 但是稳压器内水位在升转速期间也会急剧下降。根据一回路温度限值、稳压器水位控制限制以及稳压器尺寸, 查询水的热力性能参数表, 确定非核冲转前后的一回路参数 (表 1)。

表 1 一回路始末态参数

Table 1 Parameters of Loop 1 in Beginning and Finishing

状态参数	始态	末态
稳压器水位/m	0.96	-3.94
压力/MPa	15.5	15.3
温度/	291.4	255
水的单位焓值/kJ·kg <sup>-1</sup>	1291	1110
水装量体积/m <sup>3</sup>	302	284
密度/kg·m <sup>-3</sup>	743.8	804.4
水装量质量/kg	224627	228336

根据上述数据, 可得知冲转前后一回路水装量质量增加 3709 kg, 根据水的单位焓值以及质量, 可得出一回路始末态能量变化值  $Q_a$  为:

$$Q_a = m_{\text{一回路初态}} \cdot h_{\text{一回路初态}} - m_{\text{一回路末态}} \cdot h_{\text{一回路末态}}$$

$$= 3.65 \times 10^7 \text{ kJ} \quad (4)$$

非核冲转期间, 二回路介质温度迅速下降, 由于水的密度随着温度的降低而升高, 导致二回路水装量体积变小, 并且蒸汽发生器二次侧饱和水不断加热成为饱和蒸汽进入汽轮机做功, 导致蒸汽发生器水位不断下降。根据二回路温度限值、蒸汽发生器水位控制限制以及蒸汽发生器尺寸, 并查询水的热力性能参数表, 确定非核冲转前后的二回路参数见表 2。

根据上述数据, 可得知冲转前后二回路水装量质量减少 2330 kg, 根据水的单位焓值以及质量, 可得出二回路始末态能量变化值  $Q_b$  为:

$$Q_b = m_{\text{二回路初态}} \times h_{\text{二回路初态}} - m_{\text{二回路末态}} \times h_{\text{二回路末态}}$$

$$= 3.77 \times 10^7 \text{ kJ} \quad (5)$$

根据一、二回路能量变化, 非核冲转前后系

表 2 二回路始末态参数

Table 2 Parameters of Loop 2 in Beginning and Finishing

状态参数	始态	末态
蒸汽发生器水位/m	0.18	-0.76
压力/MPa	7.6	4.3
温度/	291.4	255
水的单位焓值/kJ·kg <sup>-1</sup>	1298	1110
水装量体积/m <sup>3</sup>	257	233
密度/kg·m <sup>-3</sup>	726.2	791.6
水装量质量/kg	186633	184303

统始末态释放的能量为：

$$Q_a+Q_b=Q_3-Q_4=7.42\times 10^7 \text{ kJ} \quad (6)$$

#### 1.4 系统上充下泄带入的能量

机组在热态功能试验期间，从容积控制、化学控制角度需要对于一回路介质进行置换，需要对一回路进行补水和排水，称为上充下泄。上充水所有的能量为进入系统的能量，下泄流所有的能量为离开系统的能量。考虑到轴封水与上充水来源一致，焓值相同，故将其合并为一项计算，故系统上充下泄、轴封所带入的能量为  $Q_9=Q_5+Q_6-Q_2$ ，上充下泄、轴封水参数详见表 3。

$$Q_9=(240-1291)\times 13600\times (19.96+x)/60+3709\times 240 \quad (7)$$

式中， $(19.96+x)$  为汽轮机从平衡转速至冲转结束所耗费的时间，min。

表 3 上充下泄、轴封水参数

Table 3 Parameters of Filling and Draining Water

名称	数值
冲转前后一回路水装量增加质量/kg	3709
下泄流量/kg·h <sup>-1</sup>	13600
下泄水单位焓值/kJ·kg <sup>-1</sup>	1291
上充水单位焓值/kJ·kg <sup>-1</sup>	240

#### 1.5 蒸汽发生器补水所带入的能量计算

非核冲转期间由启动给水系统 (APD) 向蒸汽发生器二次侧供水，确保蒸汽发生器水位维持在正常范围内。非核冲转末态较始态二回路水装量的增加，并且汽轮机冲转也消耗了大量的蒸汽，这两部分均由蒸汽发生器补水提供，补水的同时也给系统带入了能量，根据表 4 蒸汽发生器补水参数，得出补水所带入的能量  $Q_7$  为：

$$Q_7=(19900+122040x/60-2330)\times 439 \quad (8)$$

表 4 蒸汽发生器补水参数

Table 4 Parameters of Filling Water to SG

名称	数值
冲转前后二回路水装量减少质量/kg	2330
冲转期间消耗蒸汽质量/kg	19900+122040x/60
二回路补水单位焓值/kJ·kg <sup>-1</sup>	439

#### 1.6 主泵和稳压器加热器投运带入的能量

热态功能期间，主泵以及稳压器电加热器均处于投运状态，从而确保核岛维持在热停堆状态，此时主泵以及稳压器电加热器所带入的能量一方面维持核岛温度、压力，另一方面通过 GCT-a 排出，主泵和稳压器加热器参数见表 5。在非核冲转期间，在汽轮发电机组达到平衡转速后，该部分进入系统的能量  $Q_8$  完全用于冲转。

$$Q_8=(1440+5734\times 3)\times (19.96+x)\times 60 \quad (9)$$

表 5 主泵和稳压器加热器参数

Table 5 Parameters of Main Pump and Electric Heater

名称	数值
稳压器功率/kW	1440
主泵功率/kW	5734×3

#### 1.7 非核冲转热平衡计算结果以及可行性结论

由上述计算可知汽轮发电机组冲转中需要的能量  $Q_1$ ，系统始末态释放的能量  $Q_3-Q_4$ ，一回路正常上充下泄、轴封水进入系统的能量  $Q_5+Q_6-Q_2$ ，即为  $Q_9$ ；蒸汽发生器补水所带入的能量  $Q_7$ ，主泵和稳压器加热器投运所带入的能量  $Q_8$ ，将上述能量带入热平衡计算公式：

$$Q_1=(Q_3-Q_4)+Q_9+Q_7+Q_8 \quad (10)$$

计算出  $x=11.8$ ，即汽轮机发电机能够冲转到  $1500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  并能够在该平台保持 11.8 min，算出整个非核冲转期间系统主要参数 (表 6)。

根据计算结果，在保证机组、设备安全稳定运行的前提条件下，热态功能试验期间一回路产生的热量理论上能够满足非核冲转试验要求。在一回路、蒸汽发生器二次侧充分蓄能的情况下，汽轮发电机组能够顺利冲转到  $1500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，并在该平台保持 11.8 min，冲转时一回路温度变化率、一回路压力、稳压器水位、蒸汽发生器水位等重要设备参数均满足要求。

表6 非核冲转热平衡计算结果  
Table 6 Result of Thermal Equilibrium Calculation

参数	数值
1500 r·min <sup>-1</sup> 保持时间/min	11.8
汽轮机冲转消耗新蒸汽质量 $M_1$ /kg	43901.2
汽轮机冲转消耗的能量 $Q$ /kJ	$1.21 \times 10^8$
冲转期间一回路上充补水质量 $M_3$ /kg	10907.9
冲转期间二回路补水质量 $M_2$ /kg	41571.2

## 2 非核蒸汽冲转实际数据与理论计算公式的拟合

### 2.1 福清核电站 1 号机组非核冲转实际过程

2013 年 12 月 20 日,福清核电站 1 号汽轮发电机组顺利完成非核冲转,整个非核冲转期间,一回路温度、压力、稳压器水位、蒸汽发生器水位均处于可控状态,具体参数详见表 7。

表7 福清核电站 1 号汽轮发电机组非核冲转始末态参数  
Table 7 Parameters of Beginning and Finishing in Unit NO.1 Rushing

状态参数	冲转前	冲转后
一回路压力/MPa	15.4	13
一回路温度/	291.4	255
稳压器水位/m	1.1	-1.59
二回路压力/MPa	7.6	4.3
二回路温度/	291.4	255
蒸汽发生器水位/m	0.252	0.18

### 2.2 非核冲转实际能量变化数据计算

从重要设备保护以及机组安全的角度出发,福清核电站 1 号机组非核冲转期间实际稳压器水位、蒸汽发生器水位较理论计算值留有较大裕量,汽轮机发电机组在 1500 r·min<sup>-1</sup> 平台维持了 8 min 后打闸停机。

通过一、二回路温度、压力、水位实际变化值,参照式(10),等式左边计算结果为  $9.99 \times 10^7$  kJ,等式右边计算结果为  $9.69 \times 10^7$  kJ。比较等式左右计算结果,汽轮机实际冲转消耗能量较系统实际能量输出多出  $3.02 \times 10^6$  kJ,汽轮机实际冲转消耗能量和系统实际能量输出偏差率为 3%。

由于设备制造、装配存在一定差异性,汽轮机冲转蒸汽实际消耗量与蒸汽消耗理论曲线存在一定偏差,并且由于一、二回路设备金属降温所产生的热量以及冲转过程中各种测量仪表带来的影响,热平衡等式左右两边的计算值会存在一定差异,考虑到上述影响,3%的偏差率是可以接受

的。通过对福清核电站 1 号汽轮发电机组实际冲转过程数据进行热平衡计算,证明该热平衡计算方法切实有效的。

## 3 非核蒸汽冲转的优化措施以及效果

### 3.1 非核冲转优化

福清核电站 1 号汽轮发电机组首次冲转过程中,汽轮机发电机在 1500 r·min<sup>-1</sup> 维持了 8 min,虽然远未达到稳压器、蒸汽发生器的参数限制,但是一回路温度、稳压器水位等关键参数发生了较大变化。为了尽量减少对核岛的关键参数的影响,并尽量维持长冲转时间,验证汽轮发电机组供货、安装质量,有必要对非核冲转的方案进行优化改进。

根据运行技术规范中(NS/SG)模式中要求当下泄管线不可用时,在 3 d 内一回路降温降压到 RRA 运行条件的 NS/SG 模式,而非核冲转耗时在 1 h 内,故可以在冲转过程中转速达到平衡转速后将下泄管线隔离,即上充下泄、轴封水进入一回路所带入的能量  $Q_9$  可以由  $Q_5+Q_6-Q_2$  优化为  $Q_5+Q_6$ ;  $Q_7$  代表蒸汽发生器补水所带入的能量,根据补水量以及补水单位焓值所确定,在补水量一定的情况下,可以通过提升补水单位焓值来增加  $Q_7$ 。综上所述,为了延长汽机冲转时间,可以通过隔离下泄以及提升二回路给水单位焓值 2 方面进行优化。

根据冲转前后一回路水装量增加质量为 3709 kg,上充水的单位焓值为 240 kJ/kg,由此可以得出:  $Q_9=Q_5+Q_6=8.9 \times 10^5$  kJ。将蒸汽发生器给水加热至 120℃,其单位焓值为 546 kJ/kg,由此可以得出:  $Q_7=(19900+122040x/60-2330) \times 546$ 。将上述代表式带入式(10):计算出  $x=15.3$  min,可知完成冲转优化措施后,汽轮机发电机能够冲转到 1500 r·min<sup>-1</sup> 并能够在该平台保持 15.3 min,较之前 1500 r·min<sup>-1</sup> 稳定时间延长 3.5 min,时间增长约 30%。

### 3.2 福清核电站 3 号机非核冲转优化效果以及结论

2016 年 1 月 16 日,福清核电站 3 号汽轮发电机组完成非核冲转。在蒸汽发生器给水制水过程中,通过加大辅助蒸汽的量,将除氧水的温度由 1 号机组的 104℃ 提升至 120℃,实现了提升给水单位焓值的目的。在冲转过程中,当汽轮机冲

转至平衡转速  $502 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  后，隔离一回路下泄回路，将下泄流带走的能量所造成的影响将至最低，冲转结束后立即恢复下泄回路。3 号机组非核冲转期间参数变化详见表 8。

表 8 3 号汽轮发电机组非核冲转始末态参数表  
Table 8 Parameters of Beginning and Finishing in Unit NO.3 Rushing

状态参数	冲转前	冲转后
一回路压力/MPa	15.4	15.05
一回路温度/	294.3	261.2
稳压器水位/m	2.06	-2.32
二回路压力/MPa	7.6	4.8
二回路温度/	291.4	261.2
蒸发器水位/m	0.78	0.75

与 1 号机组非核冲转系统始末态参数相比，1 号机组在  $1500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  维持时间为 8 min，3 号机组在  $1500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  维持时间为 11 min；1 号机组末态一、二回路温度为 255，3 号机组末态一、二回路温度为 261.2。两相比较，3 号机组在  $1500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  维持时间较 1 号机组多出了 3 min，说明 3 号机组汽轮发电机消耗能量较 1 号机组消耗的多；冲转末态时的一、二回路温度 3 号机组较 1 号机组反而高出了 6.2，说明 3 号机组一、二回路蓄能消耗较 1 号机组消耗的少。

通过上述比较，说明提升二回路补水单位焓值以及隔离一回路下泄回路这 2 项改进优化措施是切实有效的，在延长冲转时间的基础上，还能减少一、二回路的蓄能消耗，减小一、二回路关键参数的变化，降低非核冲转对核岛的冲击和影响。

## 4 总 结

从热力学第一定律入手，建立非核冲转平衡计算公式，明确汽轮发电机组非核蒸汽冲转的可行性，并在福清核电厂 1 号机组成功实施。根据 1 号机组的成功经验，对于冲转方案进行了相应的优化，通过福清核电厂 3 号机组非核冲转的结果证明了优化措施是切实有效的。

福清核电厂半速汽轮发电机组非核蒸汽冲转为在国内百万千瓦级核电机组首次实施，为其他同类核电项目提供了良好实践。非核蒸汽冲转的成功，提前发现并处理了机组运行中的质量缺陷问题，为后续的并网发电赢得了宝贵时间，有效缩短了机组工程建设进度，创造了良好的社会、经济效益。非核蒸汽冲转热平衡计算为福清核电厂非核蒸汽冲转奠定了坚实的理论基础，保障了非核冲转安全和稳定，同时也为后续核电机组进行非核冲转提供了有效的计算方法。

### 参考文献：

- [1] 唐美玉,何朝辉. 650 MW 核电机组的非核蒸汽冲转[J]. 汽轮机技术, 2005, 47(2): 142-146.
- [2] 王文华,王云崎. 非核蒸汽冲转可行性分析[J]. 中国新技术新产品, 2014, 5(1):107.
- [3] 沈维道,童钧耕. 工程热力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2016.
- [4] 高志清,朱风耀. AP1000 核电机组非核蒸汽冲转可行性分析及计算[J]. 动力工程学报, 2014, 34(11): 915-920.

(责任编辑：张祚豪)