



核电机组蒸汽发生器和汽轮机裕度匹配研究

赵清森, 王世勇

Research of Margin Matching between Steam Generator and Steam Turbine in Nuclear Power Plant

Zhao Qingsen and Wang Shiyong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.06.0174>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于蒸汽轮机的非能动IVR策略研究

Study on Passive IVR Strategy Based on Steam Turbine

核动力工程. 2020, 41(4): 41–44

核电厂蒸汽发生器多功能模拟体研制

Development of NPP Steam Generator Multifunctional Simulator

核动力工程. 2020, 41(3): 121–124

某核电厂蒸汽发生器水室内松脱事件诊断

Diagnostic of Loose Parts Event in Water Chamber of Steam Generator

核动力工程. 2021, 42(4): 254–258

海洋条件下自然循环蒸汽发生器U型管内倒流特性研究

Research on Characteristics of U-tube Backflow in Natural Circulation Steam Generator under Ocean Conditions

核动力工程. 2021, 42(4): 6–13

自然循环条件下蒸汽发生器倒U型管流量分配特性研究

Research on Flow Distribution Characteristics of Inverted U-Shaped Tube of Steam Generator under Natural Circulation Condition

核动力工程. 2021, 42(1): 192–197

核电高效紧凑新型蒸汽发生器设计研究

Design Research on Efficient and Compact Steam Generator for Nuclear Power Plants

核动力工程. 2020, 41(1): 189–193



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)06-0174-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.06.0174

核电机组蒸汽发生器和汽轮机裕度匹配研究

赵清森¹, 王世勇²

1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏苏州, 215004; 2. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东深圳, 518000

摘要: 国内新投产的部分压水堆核电机组陆续出现了主蒸汽调节阀急剧晃动、新蒸汽压力缓慢降低等问题, 对机组的安全性和经济性造成一定影响。本研究通过设计参数和试验数据对比, 并利用换热计算模型分析发现, 55/19B 蒸汽发生器设计裕度较同类型的 60F 稍偏低, 低于通常的 1.6×10^5 Pa 的蒸汽压力裕度要求。蒸汽发生器新蒸汽压力、主蒸汽调节阀和汽轮机调节级通流面积在设计之初应进行综合匹配, 尤其是要选用在超过 70% 的开度范围内都具有线性的调节特性的阀门, 才能保证核电机组在整个寿命期内的可靠性和经济性。

关键词: 蒸汽发生器; 汽轮机; 主蒸汽调节阀; 裕度

中图分类号: TL353⁺.13; TK262 **文献标志码:** A

Research of Margin Matching between Steam Generator and Steam Turbine in Nuclear Power Plant

Zhao Qingsen¹, Wang Shiyong²

1. Suzhou Nuclear Power Institute, Suzhou, Jiangsu, 215004, China;
2. China Nuclear Power Engineering Company Ltd.(Shenzhen), Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract: Some of the nuclear power units of PWR newly put into operation in China have suffered from sharp shaking of the main steam control valve, slow pressure drop of new steam and other problems, which have certain impacts on the safety and economy of the unit. Through the comparison of the design parameters and the test data, and using the heat transfer calculation model to analyze, this study found that the design margin of 55/19B steam generator was lower than the similar 60F steam generator, and was also lower than the usual steam pressure margin of 1.6×10^5 Pa. The new steam pressure of the steam generator, the main steam control valve and the flow area of the steam turbine governing stage shall be comprehensively matched at the beginning of the design, especially the valves with linear regulation characteristics in the opening range of more than 70% shall be selected, so as to ensure the reliability and economy of the nuclear power unit throughout its lifetime.

Key words: Steam generator, Steam turbine, Main steam control valve, Margin

0 引言

核电项目的可行性研究阶段应进行堆-机-电容量的匹配^[1], 且应遵循常规岛匹配核岛的原则(机跟堆)。汽轮发电机组的额定工况(铭牌功率)应与核岛的热工设计流量工况相匹配, 也就是说核电厂在设计时堆和机的容量匹配为“零裕

量”, 这与常规火电的炉跟机的设计模式不同, 火电站锅炉常留有一定的裕度。

国内新投产的部分 CPR1000 机组普遍存在蒸汽发生器裕度试验不满足验收准则要求的现象^[2], 商运后机组主蒸汽压力继续缓慢下降, 首循环压力降低 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^5$ Pa。部分电站已影

收稿日期: 2020-11-09; 修回日期: 2021-04-16

作者简介: 赵清森(1980—), 男, 高级工程师, 现主要从事核电站重大关键设备性能评估方面研究, E-mail: zhaqingzen@cgnpc.com.cn

响到汽轮机出力^[3]。经研判，主要原因是蒸汽发生器二次侧传热管结垢，但蒸汽发生器二次侧积污清洗较为复杂，国内暂时仍没有成熟的化学处理工艺，这一问题可能将长期存在。

此外，ALSTOM的ARABELLE型汽轮机调节阀存在调节阀位频繁波动导致高压调节油泄漏的问题^[4]，问题的直接原因是满功率运行时汽轮机工作在调节阀组态陡峭区域，从而导致调节振荡。经过调节阀控制模块死区补偿重新调整和主调节阀组态曲线局部优化，问题得到缓解。但随着主蒸汽压力的逐渐下降，调节阀在满功率状态下开度将持续增大，阀门调节还是有可能进入频繁波动区，问题仍未得到根本性解决。

本文根据某压水堆堆型机组的设计参数和试验数据，对设计选型进行探讨和分析，以确保电站在整个寿期的整体经济性达到最佳。

1 蒸汽发生器性能分析

新蒸汽压力越高，理想蒸汽循环热效率也越好。对某新堆型研究发现，主蒸汽压力提高 10^5 Pa，机组功率相对提高约2 MW^[5]。对于压水堆核电站，二回路蒸汽压力也经历了提高的过程^[6]。美国早期核电厂二回路新蒸汽压力仅为4.2 MPa，目前世界上压水堆核电厂二回路蒸汽参数已达到5.0~7.5 MPa，蒸汽温度为260~285℃。新蒸汽的压力主要取决于一回路温度，但也与蒸汽发生器密切相关，具体到不同的设计者和堆型，有稍微的偏差。

我国部分商运核电站的蒸汽发生器结构和热力参数信息统计如表1所示。二代堆型中阿海珐公司的55/19B型和西屋公司的60F型蒸汽发生器平均温度为310℃左右，出口新蒸汽压力均为6.71 MPa。但三代机组的EPR和AP1000采用了不同的技术路线。EPR机组相比M310机组一回路平均温度提高了2.4℃，主蒸汽压力提高了0.91 MPa。但AP1000机组相比M310机组平均温度降低了9.2℃，新蒸汽压力降低1.22 MPa，其机组热效率也比M310机组偏低0.82%左右。

具体到蒸汽发生器本身，新蒸汽压力受蒸汽发生器换热管传热性能影响。传热系数越高，传热面积越大，则相同热功率下蒸汽压力越高。蒸汽发生器设计时面积一般可增加计算值的8%~

表1 蒸汽发生器结构和热力设计参数

Tab. 1 Structure and Thermal Design Parameters of Steam Generators

参数名	55/19B	60F	Δ125	EPR
	热工设计 0堵管	热工设计 0堵管	热工设计 10%堵管	热工设计 5%堵管
热功率/MW	968.3	968	1707.5	1154
冷却剂压力/MPa	15.5	15.5	15.5	17.6
冷却剂入口温度/℃	327.6	327.2	322.3	329.9
冷却剂出口温度/℃	292.3	292.6	279.2	294.8
冷却剂平均温度/℃	310.0	309.9	300.8	312.4
冷却剂流量/(m ³ ·h ⁻¹)	22840	23320	33610.8	28455.8
传热管数	4474	4640	10025	5980
给水温度/℃	226	230.5	226.7	230
蒸汽出口压力/MPa	6.71	6.71	5.49	7.62
蒸汽质量流量/(kg·s ⁻¹)	537.8	547.5	941.22	650.4
出口蒸汽湿度/%	0.25	0.1	0.1	0.1
污垢热阻/(10 ⁻⁶ m ² ·K·W ⁻¹)	8.80	13.4	19.4	8.80
U型管外径/mm	19.05	19.05	17.5	19.05
U型管壁厚/mm	1.09	1.09	1	1.09
循环倍率	3.1	3.4	3.73	3.47
传热面积/m ²	5429	5630	10329.35	7960
机组热效率/%	37.51	36.13	36.69	38.02
机组热耗/(kJ·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	9595.00	9967.00	9811.00	9469.10

10%，这部分增加的传热面积就是传热面积裕量^[7]。由表1可知，二代堆型的55/19B和60F蒸汽发生器，仅设计了一定的污垢系数，没有设计堵管裕量。在热工设计工况0堵管情况下，西屋公司60F蒸汽发生器污垢系数是阿海珐公司55/19B蒸汽发生器的1.5倍。三代堆型的蒸汽发生器中，两家公司不约而同地增加了堵管面积，阿海珐公司的EPR蒸汽发生器增加了5%，而西屋公司的Δ125蒸汽发生器增加了10%。西屋公司的Δ125蒸汽发生器的污垢系数也是阿海珐公司EPR机组蒸汽发生器的2.2倍。整体而言，西屋公司在设计理念上，蒸汽发生器的整体裕度（堵管裕度叠加污垢裕度）较阿海珐公司大些。

理论上蒸汽发生器在设计定型后，其传热性能应该为一定值。但国内已商运的多台压水堆机组蒸汽发生器的传热性能在寿命周期内呈现规律性变化，PG、PL和AB核电站蒸汽压力变化趋势如图1和图2所示。核电站不同的机组分别以序号标识，如PG核电站1号机组为PG1，PG核电站2号机组为PG2。综合PG、PL和AB等

机组的蒸汽压力趋势变化规律,其大致可以划分为3个阶段:①蒸汽压力快速降低(热阻增加);②蒸汽压力快速上涨(热阻下降);③蒸汽压力持续缓慢降低(热阻缓慢增长),归一化后的蒸汽压力变化趋势如图3所示。这3个阶段的持续时间还不能严格定义,主要取决于给水中颗粒物浓度和溶解性盐类物种的浓度^[8-10]。第1阶段新蒸汽压力降低的范围通常为 $(0\sim 1.6)\times 10^5$ Pa,对应热阻变化为 $(0\sim 10.57)\times 10^{-6}$ ($\text{m}^2\cdot\text{K}$)/W,但也有的机组蒸汽最高降低了 3.4×10^5 Pa,第1个阶段的持续时间约为0.1~5 a。第2阶段蒸汽压力得到恢复,已统计到的热阻值降低的范围为 $(-22.88\sim 5.28)\times 10^{-6}$ ($\text{m}^2\cdot\text{K}$)/W,对应的蒸汽压力升高 $(0.8\sim 3.46)\times 10^5$ Pa,第2个阶段的持续时间约为1~10 a。在蒸汽发生器60 a寿命运行的末期,其传热性能也会逐渐缓慢降低,蒸汽发生器设计的污垢裕度主要就是应对第3阶段的这个情况。

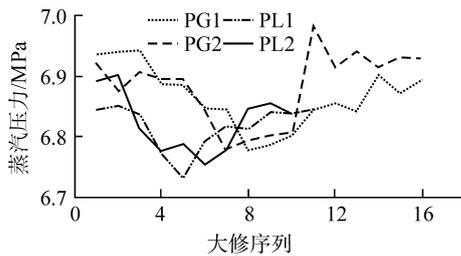


图1 PG和PL机组蒸汽发生器压力变化趋势

Fig. 1 Trends of Steam Generator Pressure Change in PG Units and PL Units

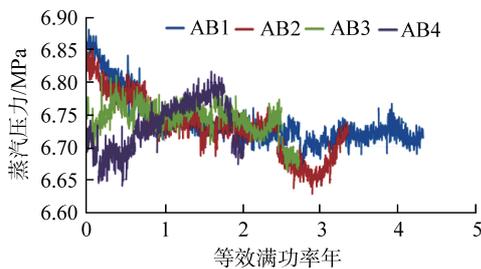


图2 AB机组蒸汽发生器压力变化趋势

Fig. 2 Trends of Steam Generator Pressure Change in AB Units

根据蒸汽发生器面积设计计算模型^[7,11],传热系数 K 如式(1)所示,计算得到55/19B型蒸汽发生器新蒸汽压力裕度仅为 1.33×10^5 Pa左右,60F型蒸汽发生器压力裕度为 2.02×10^5 Pa左右。可见西屋公司的60F蒸汽发生器压力裕度是超过

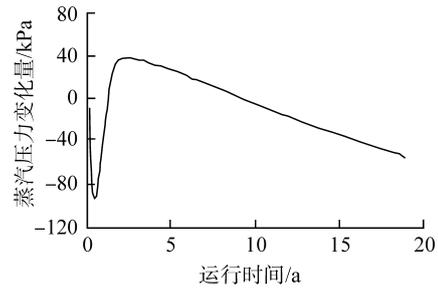


图3 蒸汽发生器蒸汽压力变化趋势统计

Fig. 3 Trend Statistics of Steam Pressure Change in Steam Generator

第1阶段的压力变化统计范围的 $[(0\sim 1.6)\times 10^5$ Pa],而阿海珐公司的55/19B裕度偏低。到了三代的ERP机组后,新蒸汽压力裕度提高到了 2.66×10^5 Pa,也是高于统计蒸汽压力变化范围的。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_c}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{d_c}{d_o} + R_w + R_f} \quad (1)$$

式中, α_1 为管内对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; α_2 为管外对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; R_w 为管壁导热热阻, $(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$; R_f 为管外污垢热阻, $(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$; d_i 、 d_o 和 d_c 分别为传热管内径、外径和当量直径,m。

2 主蒸汽调节阀性能分析

中国广核集团有限公司的核电机组多采用欧洲流派的汽轮机技术,以ALSTOM和SIMENS为代表,目前已商运了24台。国内的东方电气集团和上海电气集团分别做了引消吸相关工作。如AB项目是东方以ALSTOM的ARABELLE机型^[12]进行生产的,PY项目中上海电气采用的是SIMENS技术^[13]。在EPR机组的TS核电项目中,虽然机组电功率为全世界最大,但基本结构仍然采用ALSTOM的成熟的ARABELLE机型,低压缸由2个扩展为3个,末级叶片仍采用成熟的1450 mm长叶片。

几种代表机型电站的实际性能考核试验结果如表2所示。欧洲流派的ALSTOM和SIMENS有3个汽轮机组,各性能指标均能达到设计保证值。但ALSTOM机型主蒸汽调节阀开度明显偏大。PY核电汽轮机设计参考德国Neckarwestheim 2号机组1400 MW级汽轮机,调阀选型无变化。虽然调节阀开度偏小,但满功率条件下调节阀压

表2 几种代表机型的电站性能考核试验结果

Tab. 2 Test Results of Power Plant Performance of Several Representative Models

参数	AB1	PY1	TS1
生产厂商	ALSTOM	SIMENS	GE-ALSTOM
额定工况设计保证值/MW	1089	1086	1754.8
额定工况修正出力/MW	1099.3	1103.4	1779.6
主汽门前蒸汽压力/MPa	6.68	6.56	7.36
主汽门前蒸汽湿度/%	0.26	0.29	0.3
主汽调节阀1开度/%	53	33	84.7
主汽调节阀2开度/%	54	39	84.6
主汽调节阀3开度/%	54	33	84.7
主汽调节阀4开度/%	54	33	84.9
高压缸第I级前压力设计保证值/ 10^5 Pa	60.76	59.70	69.10
高压缸第I级前压力试验值/ 10^5 Pa	60.45	60.60	69.18
调节阀压损/%	9.6	7.6	6.0
高压缸第I级通流面积设计值/ m^2	1.235	1.291	1.725
高压缸第I级通流面积试验值/ m^2	1.215	1.259	1.676
高压缸第I级通流面积偏差/%	1.62	2.48	2.84

注：表中压力为绝对压力

损与 ALSTOM 的 1000 MW 机组阀门压损值相比仍偏低。AB1、PY1 和 TS1 三台机组设计调节阀特性曲线对比如图 4 所示。

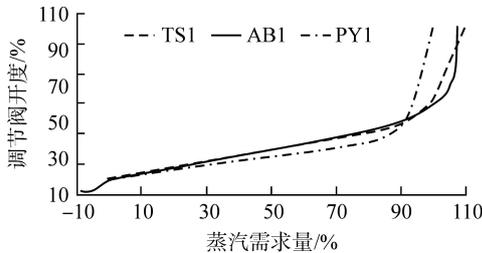


图4 机组设计调节阀特性曲线

Fig. 4 Characteristic Curve of Control Valve of Unit Design

由图 4 可知，AB1 项目设计调节阀特性曲线在过了临界点后，较为陡峭，意味着在这个范围内流量控制特性不好，在负荷变动情况下，阀门开度波动较大^[4]。某 ALSTOM 机组在商运后，随着主蒸汽压力的降低，在调节阀开度大于 64% 左右后，出现了高压调节阀开度大幅频繁波动问题。有的机组出现了多次汽轮机调节油系统供油软管断裂事故；有的机组则出于保护，对热功率进行限制。TS1 机组在开度 80% 左右，调节阀开度仍能保持稳定，在于其在高负荷时，调

节阀仍有一定的流量调节特性。同样，采用 SIMENS 技术的 PY1 机组，由于其调节阀选型较大，新蒸汽压力虽然比 ALSTOM 机组低，但调节阀开度较小，处于在线性调节区域，没有发生类似调节阀阀门晃动问题。

核电主调节阀不同于常规火电，具有蒸汽参数低流量大的特点，往往会引起共振损坏情况^[14]。此外核电站主蒸汽参数低，有效焓降也只有常规电站再热机组的一半，阀门的压损对经济性有着更大的影响，格外重视气动性能的改善^[15]。核电机组通常带基本负荷，采用节流调节，所以也一定程度上促使设计者加大阀门开度，以降低蒸汽压力损失。但对于机组实际运行而言，考虑到蒸汽发生器新蒸汽压力在寿命期内存在规律变化的客观现实，在调节阀的选型上，除了考虑流阻特性、振动特性、噪声特性和提升力特性外，对调节特性也应引起足够重视。建议设计并选用在超过 70% 的开度范围内仍具有良好调节特性的阀门。

3 汽轮机调节级性能分析

严格意义而言，核电机组通常采用节流配汽方式，是没有调节级的，这里借用常规电站机组调节级的概念，实际是指高压缸进汽的第一级。调节级压力是做功膨胀线的起始点。核电机组设计中通过调节级面积和调节阀通流能力的匹配，以降低调节阀压损，获得较高的汽轮机入口压力，提高汽轮机做功能力。

3 种堆型对应的汽轮机额定工况设计参数如表 3 所示。

根据设计规范，阀门全开工况 (VWO) 主蒸汽流量应为额定工况主蒸汽流量的 1.03~1.05 倍^[1]；由表 3 可知，几种机组的 VWO 工况实际设计面积裕度均为 3% 左右，较小的面积裕度有利于提高汽轮机入口蒸汽压力。不同机组的考核试验结果如表 2 所示。由表 2 可知，3 种机型的调节级压力均与设计值接近，说明高压缸通流能力与设计相符。调节级特征通流面积^[16]结果显示试验值均低于设计值，其中 AB1 项目偏低 1.62%，TS1 项目偏低 2.84%。实际通流面积偏小，也有利于提高汽轮机入口压力，以获得较高的膨胀线初始点。调节级段通流面积实际偏小，又进一步

表3 3种堆型对应的汽轮机 TMCR 工况的主要参数
Tab.3 Main Parameters of TMCR Case of Steam Turbine Corresponding to Three Types of Reactors

反应堆型号	CRP1000	AP1000	EPR
主蒸汽压力/MPa	6.43	5.565	74.3
主蒸汽湿度/%	0.47	0.45	0.51
进入高压缸流量/(kg·s ⁻¹)	1534.20	1835.08	2466.80
调节阀全开时进入高压缸流量/(kg·s ⁻¹)	1582.60	1893.08	2544.60
第一级进汽压力/10 ⁵ Pa	60.76	50.10	69.10
额定热功率/MW	2903.8	3415.0	4615.6
最大堆功率/MW	2983.2	3513.0	4737.0
电功率/MW	1086.0	1253.0	1754.8
循环效率/%	37.40	36.69	38.02
阀门全开工况(VWO)面积裕度/%	3.15	3.16	3.15

促使了调节阀的开度偏大,对于 ALSTOM 机组 AB1 项目而言,叠加调节阀调节特性后,就变得不可接受了。调节阀和调节级通流面积的选取应在核电站整个寿期内统筹兼顾考虑。

4 结论

核岛在设计时候是零裕量配置,但蒸汽发生器出口的新蒸汽压力随着运行时间变化会逐渐变化。商运初期会降低 0~1.6×10⁵ Pa。在机组寿期末蒸汽压力也会降低。虽然 CRP1000 和 EPR 机组都设计了一定的裕度,但 CPR1000 机组蒸汽发生器裕度稍显不足;叠加调节阀选型不合适、调节级通流面积偏小,综合导致了 AB 项目中调节阀在陡峭区域振荡运行。

压水堆核电机组的设计中通常采用常规岛匹配核岛的原则,但应考虑蒸汽发生器、主蒸汽调节阀和汽轮机高压缸通流面积在全寿期内的整体匹配性。在核岛参数已确定的情况下,常规岛在进行接口参数优化时应了解到这一工况,而不能以提升最大机组出力为唯一目标,应兼顾寿期内运行的各种工况。在调节阀的选取上,应设计并选用在超过 70% 的开度范围内都具有良好调节特性的阀门。

通常核岛设计由核电设计院负责,如深圳中广核工程设计有限公司和中国核动力研究设计院等。常规岛设计由常规电站设计院负责,如广东省电力设计研究院有限公司和华东电力设计院有限公司等。而核电设备的实际运行状况试验单位

最清楚,这需要上下游单位的密切配合,做好接口和反馈工作,最终才能建造出整个寿期内安全经济性均优的核电机组,从而逐渐提升我国核电机组实际设计匹配能力。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 核电厂常规岛设计规范: GB/T 50958—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014:10-12.
- [2] 柴伟东, 赵清森. CPR1000机组蒸汽发生器裕度问题分析[J]. 热力发电, 2019, 48(3): 126-131.
- [3] 赵清森. 核电机组蒸汽发生器沉积物及其管理[C]//中国电机工程学会. 中国电机工程学会专题技术报告 2018(上卷). 北京: 中国电力出版社, 2018:149-156.
- [4] 董威, 黄美华, 曾彬. 核电厂汽机主调节阀阀位波动问题研究[J]. 自动化仪表, 2015, 36(11): 50-52+56.
- [5] 王世勇, 张卫东, 石英, 等. 核电厂堆机匹配主要接口参数优化[J]. 核电, 2019(5): 43-47.
- [6] 王为民, 李银凤, 刘万琨. 核能发电与核电厂水电热联产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 112-121.
- [7] 《蒸汽发生器》编写组. 蒸汽发生器[M]. 北京: 中国原子能出版社, 1982: 65-129.
- [8] HU M H. A strategic thinking to draw benefit from tube scale for boiling enhancement[C]//Proceedings of EPRI 2003 Steam Generator Secondary Side Management Conference. Savannah, Georgia: 2003:727-763.
- [9] KREIDER M A, MORONEY V D, WHITE G A, et al. Industry SG heat-transfer fouling trends and probabilistic fouling predictions[C]//Proceedings of the 6th CNS International Steam Generator Conference Held in Toronto. Ontario, Canada: 2009.
- [10] 程振华, 王国良. 核电厂凝结水精处理系统导致二回路水质钠离子浓度升高的原因分析与改进[J]. 核动力工程, 2020, 41(6): 182-186.
- [11] 李磊, 张富源, 何戈宁, 等. 核电高效紧凑新型蒸汽发生器设计研究[J]. 核动力工程, 2020, 41(1): 189-193.
- [12] 卫栋梁, 李曦滨, 张小波, 等. 东方1000 MW~1800 MW半转速核电汽轮机的热力设计特点[J]. 东方汽轮机, 2009(S1): 15-19.
- [13] 余炎. 西门子百万核电汽轮机通流部分设计特点[J]. 热力透平, 2006, 35(1): 37-40.
- [14] 朱丹书. 核电汽轮机的调节阀设计[J]. 汽轮机技术, 1995, 37(5): 271-276+270.
- [15] 徐嗣华. 1000 MW等级核电汽轮机高压阀门的设计特点[J]. 热力透平, 2015, 44(4): 263-266.
- [16] 徐大懋, 邓德兵, 王世勇, 等. 汽轮机的特征通流面积及弗留格尔公式改进[J]. 动力工程学报, 2010, 30(7): 473-477.

(责任编辑: 张祚豪)