

DOI: 10.19666/j.rlfed.202306083

负压进汽凝汽式汽轮机紧急停机设备 设计及研究

柏燕, 卢红远, 张军辉, 马利江, 杨帅
(杭州汽轮机集团股份有限公司工业透平研究院, 浙江 杭州 310022)

[摘要] 常规工业汽轮机通常配置快速关闭进汽阀, 以实现汽轮机紧急停机。某负压进汽凝汽式汽轮机进汽参数低, 进汽蒸汽容积流量大, 且汽轮机进汽端和排汽端的压差小。为减小进汽压力损失, 不设置新汽速关阀, 而是在汽轮机排汽端采用冗余的大口径快速真空破坏阀。当汽轮机需要紧急停机时, 打开快速真空破坏阀, 使大气快速进入汽轮机排汽端, 汽轮机排汽端的压力迅速上升。针对所研究的进排汽压差为 40 kPa 的汽轮机组, 最短可在 4 s 内实现汽轮机进汽端和排汽端压差为 0, 使汽轮机刹停, 达到汽轮机紧急停机的目的。

[关键词] 凝汽式汽轮机; 负压进汽; 紧急停机

[引用本文格式] 柏燕, 卢红远, 张军辉, 等. 负压进汽凝汽式汽轮机紧急停机设备设计及研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 87-91. BAI Yan, LU Hongyuan, ZHANG Junhui, et al. Design and research of emergency shutdown equipment for negative pressure inlet condensing turbine[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 87-91.

Design and research of emergency shutdown equipment for negative pressure inlet condensing turbine

BAI Yan, LU Hongyuan, ZHANG Junhui, MA Lijiang, YANG Shuai
(Hangzhou Steam Turbine Power Group Co., Ltd. Industrial Turbine Research Institute, Hangzhou 310022, China)

Abstract: Conventional industrial steam turbines are usually equipped with quick-closing inlet valves to realize emergency shutdown of the turbine. In this paper, a negative pressure inlet condensing steam turbine was studied has low inlet parameters, large inlet steam volume flow and small pressure difference between inlet and exhaust steam ends. In order to reduce the intake pressure loss, the quick-closing inlet valves are not employed, but a redundant large-diameter rapid vacuum breaker valve is used at the exhaust end of the turbine. When the turbine needs emergency shutdown, open the quick vacuum breaker valve, so that the atmosphere quickly enters the exhaust end of the turbine, the pressure of the exhaust end of the turbine rapidly rises, In this paper, the steam turbine whose inlet and exhaust steam pressure difference is 40 kPa is studied, and the pressure difference between the inlet end and the exhaust end of the turbine could reach 0 within 4 seconds, so that the turbine is closed, and the purpose of emergency shutdown of the turbine is achieved.

Key words: condensing turbine; negative pressure admission; emergency shutdown

我国的年能源消费总量随着经济的发展越来越多, 2021 年能源消费量为 1 57.65 EJ, 同比增长 7.1%, 占全球能源总消费量的 26.5%^[1]。其中工业能耗约占我国总能耗的 65%, 工业余热资源约占燃料消耗总量的 17%~67%, 可回收率达 60%, 余热利用率提升空间大, 节能潜力巨大^[2]。《“十二五”节能环保产业发展规划》中将余热余压利用设备归纳

为节能产业重点领域^[3]。工业余热主要来源为工业窑炉、热动力和装置以及余热利用装置和各种有反应热产生的化学过程^[4]。工业余热按照温度高低可以简单分为高温余热、中温余热以及低温余热。其中低温余热回收温差小、换热设备庞大、技术复杂、经济效益不明显、投资回收期长, 企业对其不予重视。但低温工业余热数量巨大, 约占工业余热资源

收稿日期: 2023-06-13

第一作者简介: 柏燕 (1974), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为汽轮机热力设计及振动等, baiy@htc.cn.

总量的 15%~23%^[5-6]。由于目前闪蒸余热发电系统能更大程度地吸收和利用低温余热,从而在一定程度上提高余热发电量^[7],因此得到越来越多的学者和业主的认可。赵子豪等介绍了闪蒸基本原理并综述了国内外学者对闪蒸特性的研究现状,分析影响闪蒸效率的因素和闪蒸技术在海水淡化、余热发电领域的应用情况^[8]。虞煜磊等介绍了应用于水泥窑余热发电项目的纯低温余热锅炉和热水闪蒸技术,该技术节能、环保,并取得了显著的经济效益^[9]。严伯刚等设计了某 18 MW (2×9 MW) 纯低温余热发电机组,阐述了技术方案、主机设备及参数、节能分析,探讨了该项目的节能和环保意义^[10]。胡滨海等研究了适用于中低温烟气余热发电的新技术,即蒸汽/热水闪蒸复合发电技术。该技术将低品位热源充分用于发电,具有节能、环保、低成本和便于运行维护等特点,可以广泛应用于联合循环和水泥窑等行业的余热利用^[11]。

大型炼油装置工艺流程中产生大量工业废水,将工业废水闪蒸为负压蒸汽,再将负压蒸汽引入专用闪蒸汽轮机中,即可将负压蒸汽中所蕴含的热能转换为机械能^[12]。现有的常规工业汽轮机进汽压力均被设置为高于大气压,且汽轮机与冷凝器为分层布置。此时汽轮机产生的乏汽经水平轴向排出后,再垂直向下进入冷凝器。该乏汽克服换向的流动阻力会造成能量损失(通常在 10 kJ/kg 之内)。对于正常进汽参数汽轮机,该能量损失相较于汽轮机额定输出功率较小^[13]。但对于进汽端到排汽端其绝热焓降仅为 230 kJ/kg 左右的负压进汽闪蒸汽轮机而言,排缸气动损失 10 kJ/kg 显然是不能接受的。与同功率的中温中压等高参数机组相比,低参数汽轮机主蒸汽进汽参数较低,相对内效率也比较低^[14]。此外,当汽轮机采用负压进汽时,该汽轮机的进排汽压差极小,最大只有 40 kPa。若采用常规汽轮机的速关阀控制,压损相对较大,调节性能差。故对于闪蒸汽轮机组,为减小进汽压力损失,不设置新汽速关阀,而是在汽轮机排汽端采用冗余的大口径快速真空破坏阀来控制机组的启停。余热发电机组紧急停机一般是在电站用电中断、汽轮机水击、真空急剧下降、汽轮机超速等情况下进行,这时应立即破坏真空,触发紧急故障停机^[15]。此时,打开快速真空破坏阀,使大气快速进入汽轮机排汽端,汽轮机排汽端的压力迅速上升,最短时间内实现汽轮机进汽端和排汽端压差为 0,使汽轮机刹停,达到汽轮机

紧急停机的目的。

1 真空破坏阀结构及工作原理

某汽轮机真空破坏阀结构如图 1 所示,包括大通径真空破坏阀体、行程开关接线口、开盖空间、气源接口、附件安装区等。

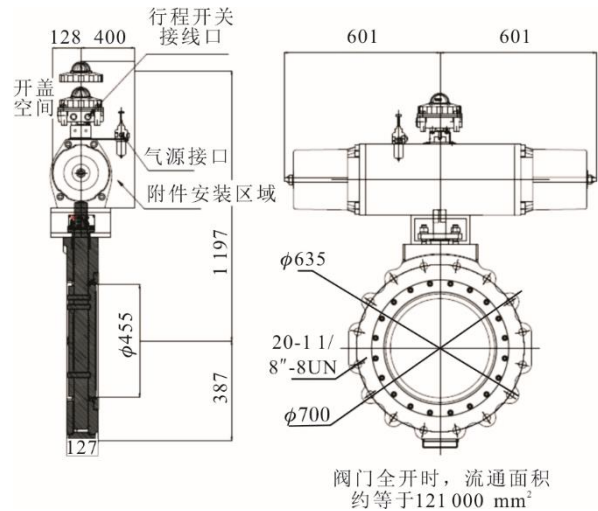


图 1 真空破坏阀结构 (mm)
Fig.1 Structure of vacuum breaker valve(mm)

该汽轮机的具体运行参数如下:某 2 000 万 t/a 炼油装置每小时会产生 3 800 t 96 °C 热水;将其通过闪蒸装置进行负压闪蒸产生汽轮机进汽 100 t/h,进汽压力 50 kPa,汽轮机背压为 11 kPa,汽轮机额定功率 4 000 kW,转速 3 000 r/min;通过冗余设置在排汽接管上的大通径真空破坏阀实现汽轮机的紧急停机功能。当汽轮机需要紧急停机时,打开快速真空破坏阀,使大气迅速进入汽轮机排汽端,汽轮机排汽端的压力显著升高,最短时间内实现汽轮机进汽端和排汽端压差为 0,迫使汽轮机刹停,达到汽轮机紧急停机的目的。同时在汽轮机进汽端设置辅助真空破坏阀,在汽轮机紧急停机时一并开启,使汽轮机的进汽端和排汽端都与大气联通,以确保汽轮机转子状态的稳定。

图 2 为大通径真空破坏阀打开后汽轮机排汽压力变化和时间的关系曲线。由图 2 可知,真空破坏阀开启后,汽轮机排汽压力在 4 s 左右可达到 50 kPa,与进汽压力持平。表 1 定量给出大通径真空破坏阀打开后排汽压力、汽轮机功率、飞升转速与时间的对应关系,其中真空破坏阀动作时间按 1 s 考虑。从表 1 可以看出:机组在初始输出功率 4 000 kW 情况下,阀打开后背压升高,功率下降,

转速最高不超过 3 178 r/min；在阀开始动作 2.7 s 后，汽轮机转速从最高转速 3 178 r/min 开始下降，最终实现紧急停机功能。

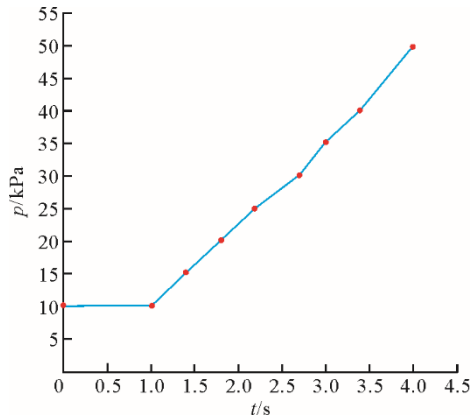


图2 汽轮机排汽压力-时间曲线

Fig.2 Steam turbine exhaust pressure-time curve

表1 真空破坏阀开启-汽轮机参数变化
Tab.1 Opening of vacuum breaker valve-variation of turbine parameters

时间/s	汽轮机排汽压力/kPa	汽轮机内功率/kW	飞升转速/(r·min ⁻¹)
0 (阀动作)	10	4 000.0	3 000.0
1.0 (阀完全开启)	10	4 000.0	3 099.2
1.4	15	3 742.0	3 135.3
1.8	20	2 728.0	3 160.6
2.2	25	1 697.0	3 175.1
2.7	30	491.7	3 177.7
3.0	35	-116.7	3 174.6

图3 为现场实际紧急停机时间背压曲线。其中红色线为汽轮机排汽压力，蓝色线为进汽压力。

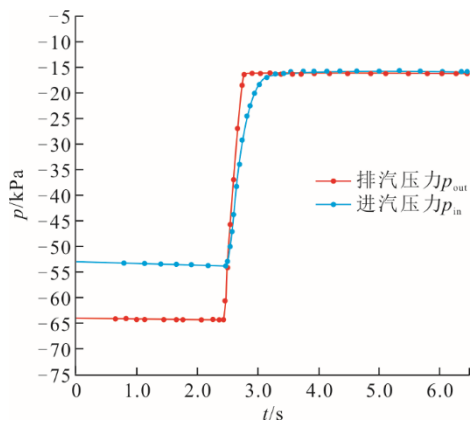


图3 现场汽轮机紧急停机进排汽压力变化曲线

Fig.3 Variation curve of inlet and exhaust pressure of emergency stop of field steam turbine

由图3可知：破坏阀未开启时，汽轮机进排汽端压力均为负压，且存在一定压差，保证输出功率；

打开破坏阀，排汽压力迅速上升，由于进汽端设有辅助真空破坏阀，开启时压力一同升高。该例中排汽端大口径真空破坏阀口径（公称直径，下同）为 500 mm，进汽端辅助真空破坏阀直径略小，故进汽端压力升高相对较慢，致使出现排汽压力略高于进汽压力情况。小负压差的存在迫使汽轮机紧急停机，同时避免转子失稳。随着压力逐渐升高，进排汽压力趋于一致，汽轮机完全停机。

2 真空容器进汽监测及计算方法

汽轮机排汽缸内为负压真空，当打开真空破坏阀时，对于该处压力随时间变化的动态监测尤为重要。本节结合实例问题，给出真空容器内进汽压力与时间对应关系的数学推导和计算公式，为汽轮机中采用的真空破坏阀监测程序提供理论基础。

某 200 m³ 的密闭凝汽器，绝对压力为 10 kPa。为了使汽轮机快速停机，需要装破真空装置。假设选择口径 500 mm 的阀门，计算打开阀门后，真空压力到 50 kPa 的时间，及压力 and 时间的曲线。其中假设水蒸气和空气为理想气体（25 ℃），参数见表 2，大气及凝汽器内饱和蒸汽初始参数见表 3^[16]。表中，空气取双原子分子。

表2 气体参数

Tab.2 Gas parameter

项目	数值
空气定容比热容 $c_{v0,air}/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	718.0
空气定压比热容 $c_{p0,air}/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	1 005.0
空气气体常数 $R_{g,air}/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	287.1
定熵指数 κ	1.4
水蒸气比热容 $v_0/(m^3 \cdot kg^{-1})$	1/1.293
水蒸气定容比热容 $c_{v0,H_2O}/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	1 402.0
水蒸气定压比热容 $c_{p0,H_2O}/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	1 863.0
水蒸气气体常数 $R_{g,H_2O}/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	461.5

表3 大气及饱和水蒸气初始参数

Tab.3 Initial parameters of atmosphere and saturated water vapour

项目	数值
水蒸气压力 p_1/kPa	10.000
水蒸气温度 $T_1/^\circ C$	45.83
凝汽器体积 V_0/m^3	200
真空破坏阀直径 d_N/mm	500
大气压力 p_0/kPa	101.325
大气温度 $T_0/^\circ C$	25.00
临界压力 p_c/kPa	53.500

计算凝汽器内达到临界压力之前冲入的气量。对于理想气体有^[16]：

$$\begin{aligned} u(T) &= c_v T \\ h(T) &= c_p T \end{aligned} \quad (1)$$

由理想气体状态方程^[16], 凝汽器内原水蒸气质量 m_0 为:

$$m_0 = \frac{p_1 V_0}{R_{g-H_2O} T_1} = 13.59 \text{ kg} \quad (2)$$

凝汽器内达到临界压力前的流量 $q_{m,max}$ ^[17]:

$$\begin{aligned} q_{m,max} &= \frac{\pi d_N^2}{4} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{2}{\kappa-1}} \frac{p_0}{v_0}} \\ &= 48.66 \text{ kg/s} \end{aligned} \quad (3)$$

凝汽器内过临界压力前的流量 $q_{m(pin)}$ ^[17]:

$$q_{m(pin)} = \frac{\pi d_N^2}{4} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{p_0}{v_0} \left[\left(\frac{p_{in}}{p_0}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_{in}}{p_0}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (4)$$

凝汽器内气体流量函数 $q(p)$ 为:

$$q(p) = \begin{cases} q_{m,max} & (p_1 < p \leq p_{cr}) \\ q_{m(p)} & (p > p_{cr}) \end{cases} \quad (5)$$

图4给出凝汽器内流量函数-压力变化曲线。

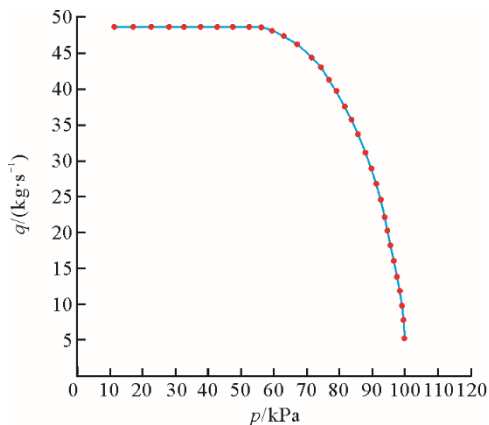


图4 流量-压力变化曲线
Fig.4 Mass flow-pressure curve

对于凝汽器内空气水蒸气混合物, 能量方程以及状态方程有^[17]:

$$\begin{aligned} (m_0 R_{g-H_2O} + m_{in} R_{g-air}) T_2 &= p V_0 \\ (m_0 c_{p0-H_2O} + m_{in} c_{p0-air}) T_2 &= \\ m_0 c_{p0-H_2O} T_1 + m_{in} c_{p0-air} T_0 \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中, 未知数为最终进入凝汽器内的大气流量 m_{in} 以及水汽混合物的最终温度 T_2 , 联立求解可得 m_{in} 及 T_2 。则凝汽器内时间与压力函数关系可表达为:

$$t(p) = \int_{p_1}^p \frac{m_{in}'(p)}{q(p)} dp \quad (7)$$

图5给出该函数关系式曲线。该曲线为理论计算结果, 应用到工程中, 需乘以修正系数。修正系数建议值为1.15~2.00。常规机组, 修正系数取1.15已足够^[18]; 本文中因真空破坏是停机的唯一手段, 故为安全起见, 修正系数取为2.00。

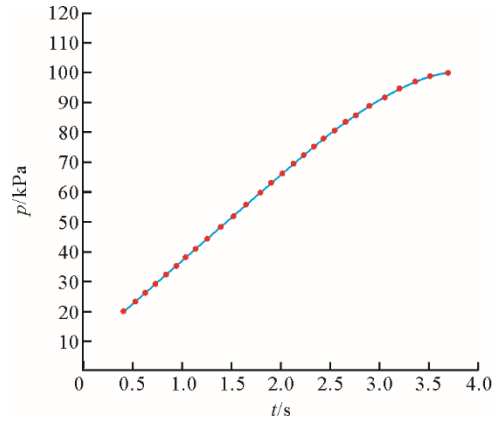


图5 凝汽器内压力-进汽时间曲线
Fig.5 Pressure-admission time curve in condenser

3 结 论

本文针对负压进汽凝汽式汽轮机紧急停机的需求, 设计了真空破坏阀装置, 在保证较低的气动损失条件下, 以实现机组紧急停机。得到结论如下:

1) 不同于常规汽轮机, 闪蒸汽轮机组为负压进汽, 进汽蒸汽容积流量大, 且汽轮机进汽端和排汽端的压差小, 采用速关阀控制机组启停损失过大, 故选择采用在排汽端设置真空破坏阀。

2) 开启真空破坏阀, 可使大气迅速进入汽轮机排汽端, 使其压力升高, 最短时间内缩小汽轮机进排汽端压差, 迫使汽轮机刹停, 达到汽轮机紧急停机的目的。

3) 真空破坏阀开启时, 凝汽器内压力变化的监测十分重要, 本文采用理论推导的方式, 计算了真空容器内进汽压力-时间相对变化关系, 为参数的监测提供一定的理论基础。

[参 考 文 献]

- [1] BP世界能源统计年鉴(2022年)(中文版)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022: 1.
BP statistical yearbook of world energy (2022)(Chinese version)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022: 1.
- [2] 华经情报网. 余热资源行业发展现状分析[R/OL]. (2022-03-04)[2023-06-26]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/475652641>.
China Economic Information Network. Analysis of the development status of waste heat resource industry. [R/OL]. (2022-03-04)[2023-06-26]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/475652641>.

- [3] 国务院“十二五”节能环保产业发展规划[Z]. 国发(2012)19号.
State Council “12th Five-Year” energy conservation and Environmental protection industry development plan[Z]. Guofa (2012)19.
- [4] 刘国超, 王汀. 石油化工企业工业余热利用发展前景[J]. 石化技术, 2017, 24(8): 244.
LIU Guochao, WANG Ting. Development prospect of industrial waste heat utilization in petrochemical enterprises[J]. Petrochemical Technology, 2017, 24(8): 244.
- [5] 余龙清, 马锋, 胡学伟. 低温工业余热综合利用[J]. 资源节约与环保, 2018(4): 13-17.
YU Longqing, MA Feng, HU Xuwei. Comprehensive utilization of industrial waste heat at low temperature[J]. Journal of resource saving and environmental protection, 2018(4): 13-17.
- [6] 路哲. 我国工业余热回收利用技术现状分析[J]. 装备制造技术, 2019(12): 204-206.
LU Zhe. Analysis of the status quo of industrial waste heat recovery and utilization technology in China[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(12): 204-206.
- [7] 张福滨. 纯低温余热发电强制闪蒸技术的应用分析[J]. 水泥, 2006(11): 29-31.
ZHANG Fubin. Discussion on application of flash evaporation process for waste heat utilization system without additional fuel in cement plant[J]. Cement, 2006(11): 29-31.
- [8] 赵子豪, 袁益超, 陈昱, 等. 闪蒸特性的研究现状与闪蒸技术的应用[J]. 能源与环境, 2018(3): 25-27.
ZHAO Zihao, YUAN Yichao, CHEN Yu, et al. Research status of flash characteristics and application of flash technology[J]. Energy and Environment, 2018(3): 25-27.
- [9] 虞煜磊, 罗莎, 任强. 纯低温余热锅炉和热水闪蒸技术在余热发电中的应用[J]. 节能与环保, 2007(11): 32-34.
YU Yulei, LUO Sha, REN Qiang. Application of pure low-temperature waste heat boiler and hot-water flash technology in waste heat power generation[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2007(11): 32-34.
- [10] 严伯刚, 刘峰. 闪蒸技术纯低温余热发电的应用[J]. 江西科技, 2012, 30(6): 802-805.
YAN Bogang, LIU Feng. Flash technology of pure low temperature waste heat power generation applications[J]. Journal of Jiangxi Science, 2012, 30(6): 802-805.
- [11] 胡滨海. 闪蒸技术在余热发电中的应用[J]. 电站系统工程, 2004(5): 53-54.
HU Binhai. Application of flash technology in waste heat power generation[J]. Power Station System Engineering, 2004(5): 53-54.
- [12] 连红奎, 李艳, 顾春伟, 等. 我国工业余热回收利用技术综述[J]. 节能技术, 2011, 29(2): 123-128.
LIAN Hongkui, LI Yan, GU Chunwei, et al. Technology review of industrial waste heat recovery and utilization in China[J]. Energy Conservation Technology, 2011, 29(2): 123-128.
- [13] 安平纪雄, 佐藤武, 植西晃, 等. 汽轮机排汽室损失特性的试验研究[J]. 吉林电力技术, 1978(1): 14-22.
ANPING Jixiong, ZUOTENG Wu, ZHIXI Huang, et al. Test research the characteristic of steam turbine exhaust steam chamber loss[J]. Journal of Jilin Electric Power Technology, 1978(1): 14-22.
- [14] 张晗, 吴梦, 时小宝, 等. 余热发电用低参数大功率汽轮机设计分析[J]. 机械工程师, 2014(6): 7-9.
ZHANG Han, WU Meng, SHI Xiaobao, et al. Design and analysis of low parameter high power turbine for waste heat power generation[J]. Mechanical Engineer, 2014(6): 7-9.
- [15] 闫青, 罗霄, 徐朝林, 等. 汽轮机停机过程中的注意事项[J]. 水泥工程, 2013(5): 77.
YAN Qing, LUO Xiao, XU Chaolin, et al. Matters needing attention in the process of aeration-cooling[J]. Journal of Cement Engineering, 2013(5): 77.
- [16] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 1.
SHEN Weidao, TONG Jungeng. Engineering thermodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016: 1.
- [17] 潘锦珊. 气体动力学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 1.
PAN Jinshan. Fundamentals of gas dynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 1.
- [18] 晁红伟, 李子钧. 利用 MathCAD Prime 计算冷凝器真空破坏速度[J]. 电站辅机, 2020(2): 6-8.
CHAO Hongwei, LI Zijun. Calculation of vacuum failure velocity of condenser using MathCAD Prime[J]. Power Station Auxiliary, 2020(2): 6-8.

(责任编辑 刘永强)