

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.04.008

湿空气透平循环饱和器水温控制建模分析

黄地^{1,2} 韦婷婷² 周登极² 张会生² 苏明²

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院,南京,211103;2. 上海交通大学机械与动力工程学院,上海,200240)

摘要:湿空气透平(Humid air turbine, HAT)循环是当今最先进的燃气轮机循环之一,饱和器水温控制是 HAT 循环一种通过改变饱和器给水量维持进口水温的控制逻辑。基于上海交通大学 HAT 循环实验台建立 HAT 循环模型,分析饱和器水温控制对 HAT 循环系统稳态和动态性能的影响。仿真结果表明,饱和器水温控制可以提高系统变工况运行的效率。对于研究对象,系统效率在 75% 工况条件下提高 0.071%。此外饱和器水温控制可以使得饱和器更快达到稳定,但对 HAT 循环系统功率调节特性的影响较小。

关键词:燃气轮机;湿空气透平;饱和器;动态建模;控制逻辑

中图分类号:TK14 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2018)04-0477-07

Modeling and Analysis of Water Temperature Control of Saturator of Humid Air Turbine Cycle

HUANG Di^{1,2}, WEI Tingting², ZHOU Dengji², ZHANG Huisheng², SU Ming²

(1. State Grid Jiangsu Power Electric Power Research Institute, Nanjing, 211103, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract: Humid air turbine (HAT) cycle is one of the most advanced gas turbine cycles. Saturator water temperature control is a control strategy that adjusts the water flow rate to keep the outlet temperature at the designed value. A HAT cycle model based on the HAT cycle test rig of Shanghai Jiao Tong University is built to analyze the influence of water temperature control on both steady-state and dynamic performance of HAT cycle system. The simulation results show that system efficiency increases by 0.071% for the study object on 75% load. The dynamic response of output power changes little, while the saturator can achieve stable faster.

Key words: gas turbine; humid air turbine; saturator; dynamic modeling; control logic

电能是国家能源战略的核心要素,更是国民经济的命脉,保障生产、生活用电是国家发展战略全局的组成部分,也是社会和谐稳定的重要因素^[1]。由 Mori 提出的湿空气透平(Humid air turbine, HAT)循环,是当今最先进的燃气轮机发电循环之一^[2]。它使用饱和器替代传统的蒸汽发生器(如联合循环中的余热锅炉)回收排烟余热,提高空气含湿量、流量和比热,从而提高燃气轮机的功率和效率,其原理图如图 1 所示。研究表明,在中低功率

等级条件下,HAT 循环在效率方面会比配置双压余热锅炉的联合循环更加出色^[3]。

目前 HAT 循环仍处于研究的初期阶段,仅有少量试验运行的 HAT 循环电站。Watanabe 等^[4]介绍了日立公司先进 HAT 循环项目最新的试运行结果,给出了大量的实验数据,该系统在不同加湿阶段采用恒定的饱和器给水量对空气加湿。De Paepe 等^[5-6]介绍了将 Turbec T100 微燃机改造成微型 HAT 循环后的实验情况,该系统同样通过开

基金项目:中国博士后基金(2016M601593)资助项目。

收稿日期:2016-11-08;**修订日期:**2017-06-13

通信作者:黄地,男,工程师,E-mail:andy_rl@msn.com。

引用格式:黄地,韦婷婷,周登极,等.湿空气透平循环饱和器水温控制建模分析[J].南京航空航天大学学报,2018,50(4):477-483. HUANG Di, WEI Tingting, ZHOU Dengji, et al. Modeling and analysis of water temperature control of saturator of humid air turbine cycle[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(4): 477-483.

式中 d'_{sat} 和 h'_{sat} 分别为饱和湿空气对应的绝对湿度和焓值。

定义动态通用传递系数来描述传热传质与焓差的关系,可得

$$Q = K_{G,D} \Delta h'_m \quad (4)$$

式中 $K_{G,D}$ 是一个新的动态通用传递系数,它综合考虑包含了传热和传质速率,同时考虑了传热传质面积,下标 m 为小室进出口的平均参数。因此

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k \left[G_f (h_f + HV \cdot \eta_b) + G_a h_a - G_g h_g - \left(h_3 - \frac{p_3}{\rho} \right) (G_f + G_a - G_g) \right]}{\rho V} \quad (5)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R_g T_g}{V} (G_f + G_a - G_g) \quad (6)$$

式(5)为燃烧室出口焓的状态方程, p 为压力; η_b 为燃烧效率, HV 为燃烧的热值;下标 f, a, g 分别代表了燃料、空气和烟气,该方程考虑了系统进出的能量变化以及压力变化的影响。式(6)为压力的状态方程, R 为理想气体常数,考虑了进出口质量变化以及能量变化的影响。

1.3 换热器建模

HAT 循环系统中,换热器包括了回热器、经济器、中冷器和后冷器等多个部件。其中经济器、中冷器和后冷器是气-水换热器,回热器是气-气换热器,其建模原理相同。

以经济器为例,考虑水温、气温和管壁温度 3 个状态量对应的状态方程,有

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{G_{w1} (h_{w1} - h_{w2}) + Q_w}{\rho V c_{p,w}} \quad (7)$$

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{G_{a1} (h_{a1} - h_{a2}) - Q_a}{\rho V c_{p,a}} \quad (8)$$

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{Q_a - Q_w}{m c_{p,m}} \quad (9)$$

式(7—9)中,下标 w, a, m 分别代表了水、空气和管壁, Q_w 和 Q_a 分别代表了水和空气对管壁的吸热量和放热量。

1.4 HAT 循环建模

结合上文饱和器、燃气轮机以及换热器模型,建立 HAT 循环系统模型。该系统简化了中冷器和后冷器,以分轴燃气轮机为核心,如图 3 所示。图中 X 为气体组分, n 为燃机转速, P_w 为功率,图中实线代表了数据的传输方向与流动方向相同,而虚线则表示相反,这是由于模块化建模理论中压力和流动是由不同的模块计算所致。

在高压透平和动力透平之间增加了容积模块,这是为了避免在动态仿真过程中通过迭代计算两个透平中的膨胀比的分配^[19]。容积模块是一个基于压力方程的虚拟部件,在动态计算过程中求解两个透平中各自的膨胀比。

可以通过该参数计算每个小室中的传热和传质过程。

1.2 燃气轮机建模

燃气轮机的建模过程基于模块化建模思想,针对燃气轮机的 3 大部件:压气机、燃烧室和透平,分别建立部件模型。本文建立的燃气轮机模型的核心状态方程分别为能量方程、压力方程^[18],有

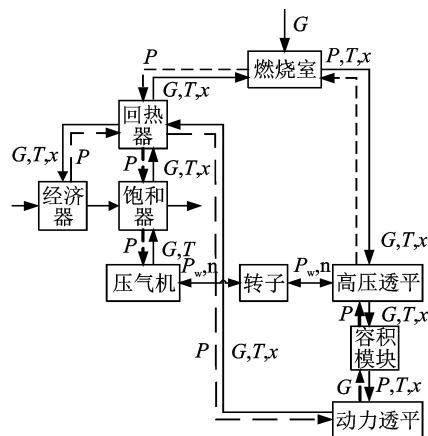


图 3 HAT 循环模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of HAT cycle model

2 模型验证

利用上海交通大学自主设计并建立的 HAT 循环分轴燃气轮机系统对上述模型进行验证。文献[20]详细介绍了实验台设计与等油量加湿试验运行情况,该实验可分为 7 个阶段,分别为:起动、切换阶段,升工况阶段,加湿过程,升温阶段,稳定工况阶段,减湿过程和减油过程。本文重点分析加湿阶段性能,在燃油量保持 0.013 3 kg/s 的前提下,考察饱和器投入运行之后,各参数的变化规律。

针对该系统对 HAT 模型进行简化,对上述过程进行仿真,假设在 50 s 饱和器切入工作,在 1 600 s 开始提高油量,观察各重要参数的动态响应,压力和温度的变化规律如图 4 和图 5 所示。

如图 4 所示,随着饱和器的切入,进入燃烧室的流量增加,尽管温度降低,燃烧室内的压力依然增加,该段时间内压力的提高约 3 715 Pa,与实验结果的趋势相同。之后随着油量的增加,燃烧室的压力增大。在 1 500 s 后,系统由于油量的提升各参数持续变化,此过程的变化规律与传统燃气轮机简单循环相同,由于透平仿真采用的是通用特性曲

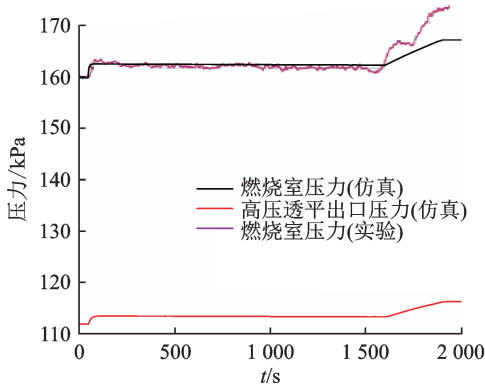


图4 等燃油加湿试验压力动态响应

Fig. 4 Pressure dynamic response of humidification with constant fuel rate

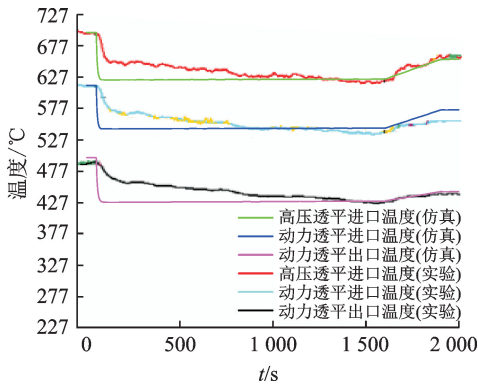


图5 等燃油加湿试验温度动态响应

Fig. 5 Temperature dynamic response of humidification with constant fuel rate

线,仿真结果产生偏差,但采用经典的特性线建模方法是准确的。

观察图5中温度的变化规律,随着饱和器的切入,进入燃烧室的空气温度下降,湿度增加,引起饱和器温度的骤降,该温差为63.2 K。之后随着饱和器逐渐稳定,温度也开始稳定。加湿阶段的温度变化规律要快于实验结果,这是由于实验中燃烧室的热惯性更大,此外模型没有考虑加湿后燃烧室的燃烧效率和散热损失的变化,导致模型反应更快。随着油量的增加,燃烧室的温度增加,该规律与燃气轮机简单循环相同。分析可知,对压力和温度等核心参数的计算可以满足HAT循环仿真的要求。

3 饱和器水温控制性能仿真

上文所述的HAT循环实验台中,饱和器给水温度由电加热器控制。但对于成熟的HAT循环电站,应加装经济器回收烟气余热,为饱和器给水提供能量,提高系统效率。因此在未来实验台改造过程中,经济器会被添加进系统之中。经济器的工作性能会随着变工况过程而改变,在不同的排气参数条件下,进入饱和器的水温也会发生改变,因此我们需要分析饱和器水温控制对系统的影响。

3.1 仿真条件

对HAT循环实验台进行分析可知该实验台存在着一定的散热、泄露和功率损失,系统性能没有达到设计指标。对新设计的HAT循环系统进行仿真,表1列出饱和器水温控制分析的仿真条件,燃气轮机的变工况参考文献[20]中给出的压气机和透平特性。

表1 饱和器水温控制仿真条件

Tab. 1 Simulation conditions of saturator water temperature control

部件	项目	数值	部件	项目	数值
燃气轮机	压气机压比	3.0	饱和器	压损/%	0.5
	压气机效率/%	79		通用传递系数/(kW·kJ ⁻¹)	0.1
	燃烧室压损/%	4		压损/%	1
回热器	燃烧效率/%	95	回热器	热源传热系数/(kW·m ⁻² ·K ⁻¹)	0.08
	燃烧室出口温度/℃ (设计值)	750		冷源传热系数/(kW·m ⁻² ·K ⁻¹)	0.08
	高压透平膨胀比	1.949 1		压损	1%
经济器	高压透平效率/%	78	经济器	热源传热系数/(kW·m ⁻² ·K ⁻¹)	0.024
	动力透平膨胀比	1.472 9		冷源传热系数/(kW·m ⁻² ·K ⁻¹)	0.024
	动力透平效率/%	77			

现有的HAT循环实验电站以验证HAT循环可行性为目标,多采用手动调节饱和器给水流量,无法对饱和器动态性能做更深入的分析。本文基于饱和器水温控制的思想设计控制系统,其控制逻辑见图6。

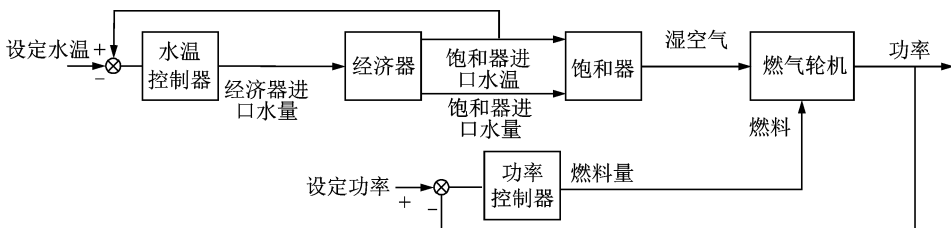


图6 带饱和器水温控制的HAT循环功率控制逻辑图

Fig. 6 Control diagram of HAT cycle power control with saturator water temperature control

水温控制器接受饱和器进口水温的信号,当温度大于设定水温时,增大进入经济器的流量降低水温;当温度小于设定水温则相反。此外,功率控制器的设计同常规燃气轮机控制,通过调节燃油量满足 HAT 循环出功要求。为了评价饱和器水温控制的性能,将该系统与饱和器水量不调节的常规系统比较,此时系统的控制逻辑与燃气轮机简单循环相同。

令燃气轮机运行在透平进口温度 750 °C 的额定条件下,此时系统功率 144 kW。设定饱和器水温控制器的设定温度为 80 °C,在第 50 s 开始将系统功率设定值阶跃下降至 108 kW(75%工况),分别观察新设计的 HAT 循环系统饱和器水温控制和常规控制下系统的性能表现。

3.2 稳态仿真结果

首先观察系统稳定之后的性能表现,如表 2 所示。当系统运行在 75% 工况下,较低的排烟温度使得进入经济器的能量减少,饱和器进口水温和最终的出口湿空气参数均有所下降。采用饱和器水温后,系统通过减少进入经济器的水量维持饱和器的进口水温。此时饱和器出口水温高于常规控制 6.684 °C,使得绝对加湿量比常规控制条件下高 14.168%。虽然高湿度的空气使得透平进口温度下降 6.270 °C,但更高的压比和工质比热增加了湿烟气在透平中膨胀做功的潜力。最终系统所需的燃料量更低,效率比常规控制高 0.071%。

表 2 常规控制与饱和器水温稳态结果

Tab. 2 Comparison of simple control and saturator water temperature control

项目	常规控制	水温控制
功率/kW	108	108
燃油量/(kg · s ⁻¹)	0.017 5	0.017
效率/%	12.388	12.459
饱和器进口水温/°C	73.316	80
饱和器进口水量/(kg · s ⁻¹)	1.337	1.087
加湿量/(kg · kg _{dry} ⁻¹)	0.048 7	0.055 6
压比	2.971	2.972
透平进口温度/°C	690.861	684.591

系统效率的提升是由于饱和器水温控制提升了饱和器加湿潜力。由于实验系统内的燃机参数较低,提升的幅度较小。该数值会随着系统设计参数的提高而进一步提高。

3.3 动态仿真结果

本节讨论饱和器水温控制下系统的动态响应。图 7 和图 8 分别给出了功率控制系统输出的燃料量以及对应的系统功率响应。可以看出,采用饱和器水温控制后系统的功率动态特性,与不使用水温

控制的常规系统相比几乎相同,均在 300 s 内达到稳定,这说明影响燃料和功率动态特性的主要是 HAT 循环系统的功率控制过程。如上文所述,饱和器水温调节使得变工况下饱和器进口水温依然可以维持在额定温度,提高了效率,因此采用饱和器水温控制的系统的燃料量更低。

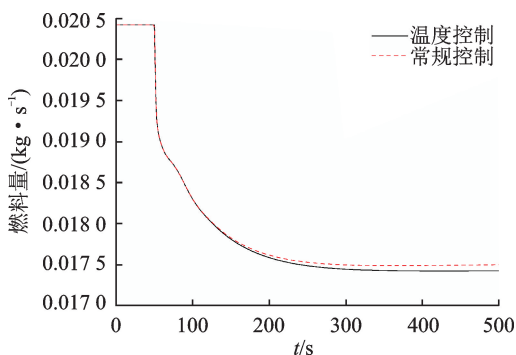


图 7 饱和器水温控制燃料量动态响应

Fig. 7 Fuel rate dynamic response of saturator water temperature control

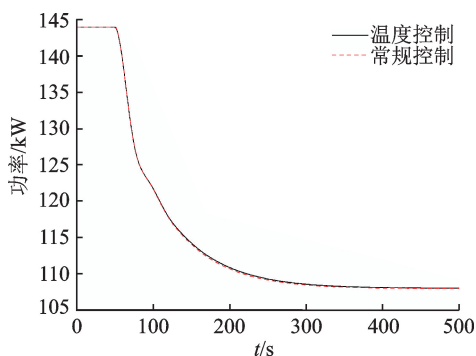


图 8 饱和器水温控制功率动态响应

Fig. 8 Power dynamic response of saturator water temperature control

饱和器进口水温和湿空气出口含湿量的动态响应分别见图 9 和图 10。可以看出,虽然常规控制没有对饱和器进口水温进行调节,但随着系统功率在 300 s 内达到稳定,饱和器进口水温也近似稳

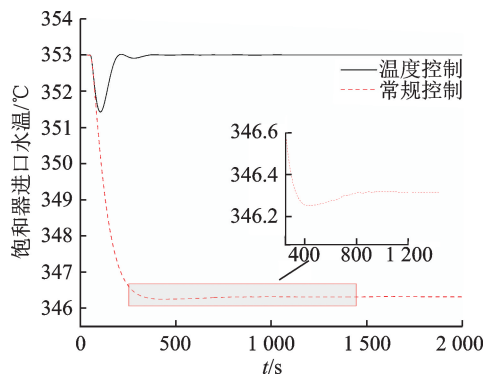


图 9 饱和器水温控制水温动态响应

Fig. 9 Water temperature dynamic response of saturator water temperature control

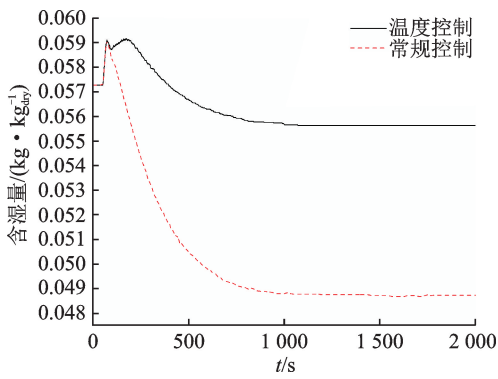


图10 饱和器水温控制含湿量动态响应

Fig. 10 Humidity dynamic response of saturator water temperature control

定。但是,由于饱和器内水的热惯性更大,水温达到稳定的速度会慢于燃气轮机内的气体工质。此时饱和器进口水温还在持续变化,从而影响饱和器的传热传质过程。尽管此时饱和器出口参数的变化幅度已经非常小,但系统仍需要在750 s左右才能达到稳定。采用饱和器水温控制系统后,由于饱和器进口水温得到了控制,使得饱和器的传热传质过程更加稳定,因此饱和器水温可以在350 s内达到稳定,使得饱和器出口湿度更快达到稳定。

4 结 论

本文在上海交通大学 HAT 循环实验台的基础上,加装经济器和回热器,设计新的 HAT 循环系统并进行建模,该系统简单循环条件下燃气轮机设计压比 3.0,额定透平进口温度 750 °C,重点讨论了饱和器水温控制对系统稳态和动态性能的影响。饱和器水温控制通过控制进入经济器的水量调节经济器出口即饱和器进口的水温,使得系统动态调节过程中饱和器运行更加稳定。主要结论包括:

(1) 采用饱和器水温控制使得 HAT 循环运行在变工况时,饱和器进口水温不会下降,虽然给水量降低,但湿空气加湿量高于定给水量的常规调节,调高了系统效率。在该系统 75% 工况条件下效率提高 0.071%。

(2) 饱和器水温控制对系统功率控制的动态特性影响较小,将系统从额定工况降至 75% 工况的过程,功率输出约在 300 s 达到稳定,与不考虑水温控制的常规控制结果基本相同。

(3) 不考虑饱和器水温控制的系统,在功率达到稳定后,水温变化幅度减小,但不会完全达到稳定,饱和器出口参数继续受到水温影响而变化。采用饱和器水温控制会使得饱和器更快地达到稳定,从而使得系统其他各主要参数更快达到稳定。

综上所述,采用水温控制的 HAT 循环系统,对系统变工况性能有所提升,对系统功率调节的影响较小,但加快了饱和器的调节速度。

参考文献:

- [1] 李作锋,黄奇峰,杨世海,等. 适应新型电力供需的多元化友好互动体系研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(5):1-5.
LI Zuofeng, HUANG Qifeng, YANG Shihai, et al. Research on plurallistic and friendly interaction system adapted for new power supply and demand[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(5):1-5.
- [2] 林汝谋,蔡睿贤,张娜. 跨世纪的 HAT 热力循环[J]. 燃气轮机技术, 1993, 6(2):1-6.
LIN Rumou, CAI Ruixian, ZHANG Na. The cross-century HAT thermodynamic cycle[J]. Gas Turbine Technology, 1993, 6(2):1-6.
- [3] NAKHAMKIN M, PELINI R, PATEL M I, et al. Power augmentation of heavy duty and two-shaft small and medium capacity combustion turbines with application of humid air injection and dry air injection technologies[C]// Proceedings of 2004 ASME Power. [S. l.]:[s. n.], 2004:301-306.
- [4] WATANABE Y, TAKAHASHI T. Performance analysis of a 40 MW class advanced humid air turbine pilot plant[C]// ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. San Diego:[s. n.], 2013.
- [5] DE PAEPE W, CARRERO M M, BRAM S, et al. Experimental characterization of a T100 micro gas turbine converted to full humid air operation[J]. Energy Procedia, 2014, 61:2083-2088.
- [6] DE PAEPE W, CARRERO M M, BRAM S, et al. T100 Micro gas turbine converted to full humid air operation; A thermodynamic performance analysis [C]// ASME Turbo Expo 2015; Turbine Technical Conference and Exposition. Montreal:[s. n.], 2015.
- [7] WANG Y Z, LI Y X, WENG S L, et al. Numerical simulation of counter-flow spray saturator for humid air turbine cycle[J]. Energy, 2007, 32(5):852-860.
- [8] CARATOZZOLO F, TRAVERSO A, MASSARDO A F. Development and experimental validation of a modelling tool for humid air turbine saturators[C]// ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. Glasgow:[s. n.], 2010,3:821-829.
- [9] CARATOZZOLO F, TRAVERSO A, MASSARDO A F. Implementation and experimental validation of a modeling tool for humid air turbine saturators[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(16):3580-3587.
- [10] DE PAEPE W, CONTINO F, DELATTIN F, et al.

- New concept of spray saturation tower for micro humid air turbine applications [J]. *Applied Energy*, 2014, 130:723-737.
- [11] TREYBAL R E. Mass-transfer operation[M]. Columbus: McGraw-Hill, 1968.
- [12] NYBERG B, THERN M. Thermodynamic studies of a HAT cycle and its components[J]. *Applied Energy*, 2012, 89(1):315-321.
- [13] CARRERO M M, FERRARI F L, DE PAEPE W, et al. Transient simulations of a T100 micro gas turbine converted into a micro humid air turbine[C]// ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. Montreal:[s. n.], 2015.
- [14] 欧阳艳艳. 微型湿空气透平循环动态模拟研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
OUYANG Yanyan. Dynamic modeling and simulation of a micro humid air turbine[D]. Beijing:Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [15] 严志远. 微型湿空气透平循环建模与控制研究[D]. 南京:东南大学, 2014.
YAN Zhiyuan. Investigation on modeling and control of micro humid air turbine cycle [D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
- [16] KOGANEZAWA T, KATAGIRI Y, MIURA K. Humid air turbine, humid air turbine control system, and humid air turbine control method; Japan, 08001454.1[P]. 2008.
- [17] PARENTE J O S, TRAVERSO A, MASSARDO A F. Saturator analysis for an evaporative gas turbine cycle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(10):1275-1293.
- [18] 付云鹏. 电站用燃气轮机建模及控制系统分析与仿真[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
FU Yunpeng. Modeling and simulation of gas turbine control system for power plant[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [19] 苏明, 陈德来. 一种燃气轮机模块化非线性仿真模型[J]. *热能动力工程*, 1998(6):435-437.
SU Ming, CHEN Delai. A modularized non-linear simulation model for gas turbines[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1998(6): 435-437.
- [20] 卫琛喻. 湿空气透平循环性能仿真与试验研究[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
WEI Chenyu. Performance simulation and experimental investigation of a humid air turbine cycle[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2014.

(编辑:刘彦东)

