

重型燃气轮机高温部件试验全场主流空气系统仿真分析

默静飞, 邹鹏飞, 胡龙兵

(中国联合重型燃气轮机技术有限公司, 北京 100016)

摘要:为保证重型燃气轮机高温部件全场主流空气系统调节的全面性和灵活性,基于仿真技术实现了对燃气轮机高温部件试验设施空气系统的调节过程计算,得到了试验段与气源侧流量、压力和温度等状态参数的变化曲线,分析了气源温度、阀门开度及连锁控制对试验运行的影响,并确定了运行控制应对方案。结果表明:试验设施进气系统和排气系统并联的方案可以将试验段流量和压力的调节进行解耦;进气系统和排气系统对应配置的并联阀组与背压阀组可以通过连锁控制确保气源压缩机组和试验段的稳定运行。

关键词:重型燃气轮机;试验设施;仿真;阀门调节

中图分类号:TK47 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.05.008

[引用本文格式]默静飞,邹鹏飞,胡龙兵.重型燃气轮机高温部件试验全场主流空气系统仿真分析[J].热能动力工程,2021,36(5):49-54. MO Jing-fei, ZOU Peng-fei, HU Long-bing. Simulation analysis of mainstream air system for high temperature components of heavy-duty gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(5): 49-54.

Simulation Analysis of Mainstream Air System for High Temperature Components of Heavy-duty Gas Turbine

MO Jing-fei, ZOU Peng-fei, HU Long-bing

(China United Heavy Duty Gas Turbine Technology Co., Ltd., Beijing, China, Post Code: 100016)

Abstract: In order to ensure the comprehensiveness and flexibility of the mainstream air system regulation for the high temperature components of heavy-duty gas turbine, simulation software was used to simulate the adjustment process of the mainstream air system, and the change curves of the flow rate, pressure and temperature of the test section and air source sides were obtained. The influence of air source temperature, valve opening and interlock control on test operation was analyzed, and the optimized operation parameters were determined. The results show that the flow rate and pressure regulation of the test section can be decoupled by means of parallel air inlet and air outlet. The parallel valve group and back pressure valve group corresponding to the intake system and exhaust system can be controlled by interlocking to ensure the stable operation of the air source compressor unit and the test section.

Key words: heavy gas turbine, test facility, simulation, valve regulation

引言

重型燃气轮机是迄今为止效率最高的热-功转换类发电设备^[1]。随着重型燃气轮机技术的发展,其对燃烧室输出、透平输入的温度要求正在逐步提高^[2]。但较高的透平前温度又对燃烧室和透平的

设计提出了巨大的挑战。作为自主正向开发重型燃气轮机产品不可或缺的工具之一,试验验证技术是验证设计方案、设计准则等的主要手段,也是试验设施及其配套工程运行和保障的重要体现。

为了防范燃气轮机及其关联电厂的研制风险,系统仿真被广泛应用:采用仿真手段对重型发电燃

气轮机进行性能预测^[3],采用仿真手段对某型燃气轮机发电机组大负荷突卸进行动态研究以调整控制策略^[4],采用仿真手段研究阀门对主气压力调节的影响等^[5]。对于拟采用的仿真工具 AMESim,普遍应用于试验台的设计与研究^[6]、试验器的设计与研究^[7]、阀门动态特性^[8]和管路流动特性研究^[9]等方面。考虑到我国自主正向开发重型燃气轮机的技术积累、重型燃气轮机技术指标或规格参数要求高等难点,以及传统航空用/舰用等燃气轮机试验设施建设过程中的投资成本高或调试风险大等实际问题,试验设施的建设单位往往会结合相关试验段的工作原理和结构特点,采用仿真手段对试验设施的总体方案和子系统方案进行系统性分析,以便校核、锁定设计方案。

典型重型燃气轮机高温部件试验设施主要包括试验配套工程和试验设施工程,其中,配套工程以高温气源为建设中心,辐射水、电和天然气等建设内容;试验设施工程包括进气系统、试验段和排气系统等。试验设施的空气系统包括气源空气系统、试验设施进气系统和排气系统等,主要是为试验段提供试验所需的空气流量、压力和温度等工况参数,其中空气系统的阀门选型、配置以及调节特性是影响试验工况灵活性调节的重要参数。因此,验证试验设施空气系统中关键阀门选型的合理性,并分析试验运行的控制方案,对于降低试验设施调试风险,确保试验设施建成等有着非常重要的工程意义。本文结合理论计算公式对试验设施的空气系统进行了建模与分析,对重型燃气轮机高温部件试验设施开展了系统仿真,从流量、压力、温度调节到各参数调节所需的各路阀门动作执行要求、关联影响与应对等进行了分析,用以支撑试验设施总体技术方案的论证与技术状态锁定。

1 空气管网介绍

试验段在运行过程中,来流需要满足一定的参数状态条件,如压力、流量和温度要求等。诸如此类的参数状态需要依靠空气系统进行产生、输运与调节。在经过方案比选后,最终确定的重型燃气轮机高温部件典型空气系统如图 1 所示,其采用了主路调节和旁路排气的并联结构形式,各支路采用一大

一小两台并联阀门配置的方案,以实现调节范围增大为目的,确保各试验工况点均能有效地得到调节。

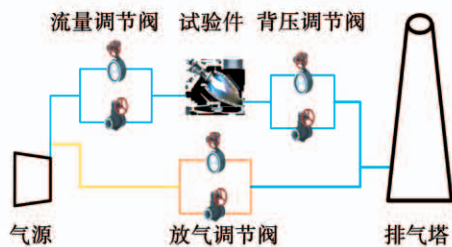


图 1 典型试验设施空气管路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air piping of typical test facilities

2 数学模型及计算方法

2.1 数学模型

2.1.1 亚音速流动

当阀门前、后压差较小时,阀门流动处于亚临界状态,此时阀门流量为:

$$m = \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \cdot A \quad (1)$$

式中: m —空气质量流量, kg/s ; ρ —气相密度, kg/m^3 ; p_1 —阀门前压力, Pa ; p_2 —阀门后压力, Pa ; A —阀门的有效面积, mm^2 。

2.1.2 超音速流动

当阀后静压 p_2 与阀前总压 p_1^* 的比值减小到一定程度后,阀门将处于临界状态,对于空气介质,该临界值为 0.528。此时,阀门内喉道处的空气流量将达到音速,阀门对应的流量只与阀前压力和阀门喉道面积有关,对应的流量为:

$$m = K \frac{p^*}{\sqrt{T_{\text{total}}}} A \quad (2)$$

式中: K —常数,对于空气介质,该常数约为 0.040 4 $\text{s} \cdot \sqrt{\text{K}}/\text{m}$; p^* —总压, Pa ; T_{total} —总温, K 。

2.2 系统仿真建模

采用一维仿真软件搭建的系统模型如图 2 所示,其中,气源供应的高温、高压空气一路流经进气管路进入试验段,排气系统一方面将流经试验段的主气排入大气,另一方面,对主气实现背压调节;另一路流经排气管路排入大气。

设置进口为恒定空气流量边界条件、出口为恒定空气压力边界条件,详细参数如表 1 所示。其中,

除恒定边界条件以外,其他参数均可调,以实现全场主流空气系统的全工况调节覆盖仿真。

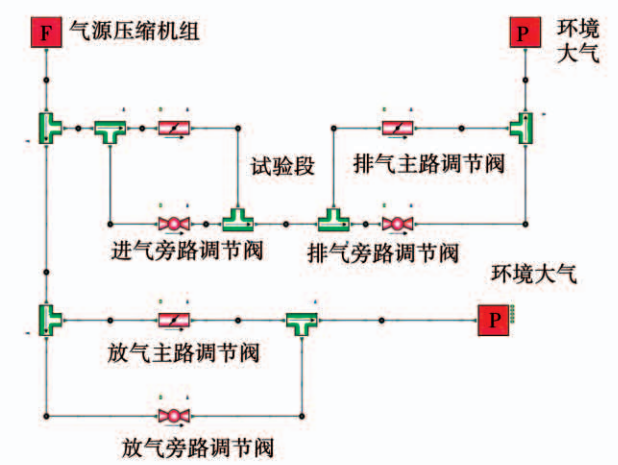


图 2 试验设施空气系统一维模型

Fig. 2 1-D model of the test facility air system

表 1 模型的进出口边界条件

参 数	进口边界条件	出口边界条件
流量/kg · s ⁻¹	50	—
压力/Pa	—	101 325
温度/K	373	273
介质组分	干空气	干空气

2.3 阀门参数设置

阀门是空气管网中的核心部件,主要包括蝶阀和单座调节阀,反映其流通特性的参数为 CV 值,即表征恒定压力条件下的流量。管网系统中各阀门的主要参数如表 2 所示。

表 2 阀门的主要参数

Tab. 2 Main parameters of valves

阀门名称	阀门形式	调节特性	额定 CV
进气主路调节阀	三偏心蝶阀	近似等百分比	3 534
进气旁路调节阀	单座调节阀	等百分比	325
排气主路调节阀	三偏心蝶阀	近似等百分比	5 136
排气旁路调节阀	单座调节阀	等百分比	580
排气主路背压阀	三偏心蝶阀	近似等百分比	8 068
排气旁路背压阀	单座调节阀	等百分比	630

鉴于蝶阀近似等百分比的特性曲线,且通常在 80% 开度左右流通能力已经接近最大开度,因此对

蝶阀的流动能力进行拟合:

$$C = B \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{180} \cdot k \right) \right) \tag{3}$$

式中: C —阀门 CV 的百分比; k —阀门开度百分比; B —拟合系数。

以排气主路的背压蝶阀为例,采用式 (3) 获得的拟合曲线如图 3 所示。

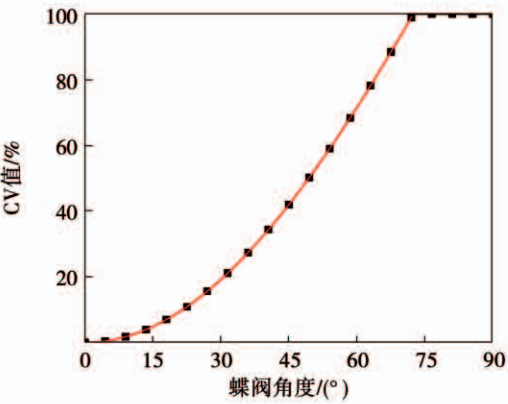


图 3 蝶阀特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of butterfly valve

对于单座调节阀通常为等百分比特性,其阀门 CV 百分比随开度的变化规律为:

$$C = R^{(k-1)} \tag{4}$$

式中: R —阀门特性参数。

图 4 为单座调节阀的特性曲线,该阀门的特性参数 R 取 30,阀门的特性公式为 $C = 30^{(k-1)}$ 。从图 4 可以看出,该阀门为快开特性,在小开度情况下,阀门 CV 变化较小,可以实现较高的调节精度,但在大开度下 CV 变化较大,可以满足较大的调节范围。

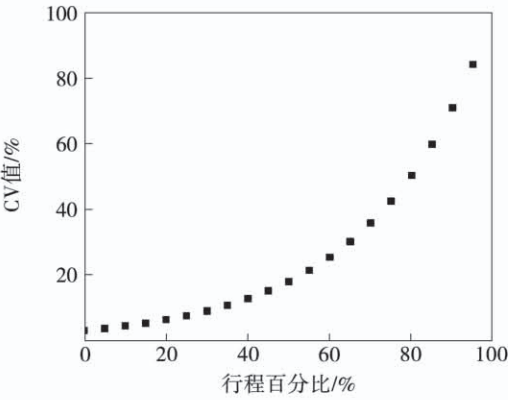


图 4 单座调节阀的特性曲线

Fig. 4 Characteristic curve of single seat regulating valve

3 结果与分析

采用非定常方法,针对每个工况开展 200 ~ 2 000 s 计算,其中,前 100 s 阀门、工况参数保持不变,由系统计算收敛并得到稳定结果,之后对阀门开度、气源温度等参数进行调节,以便对其影响进行分析。

3.1 流量参数的调节

进气管路和排气管路上的阀门可以用于调节试验段的流量参数。以进气管路的单座调节阀为例,100 s 后增加阀门开度,流经试验段的流量和压力均会增加,如图 5 所示。

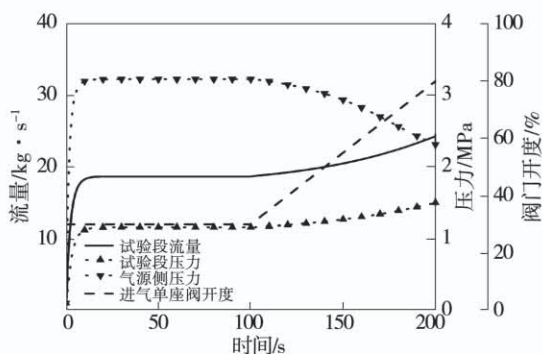


图 5 进气单座调节阀开度对系统参数的影响

Fig. 5 Influence of intake single seat regulating valve opening on system parameters

但是,单独增加或减小该阀门的开度,使气源侧压力下降或增加,造成气源压缩机组的堵塞或喘振,从而影响机组运行的稳定性。为了应对该问题,可以对进气管路和排气管路上的阀门进行联锁控制,从而确保气源压缩机组下游管路的总有效面积保持不变,以稳定气源机组的排气压力,如图 6 所示。

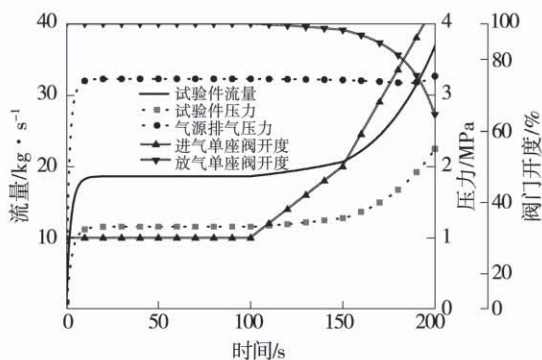


图 6 进、排气阀门联锁运行对系统参数的影响

Fig. 6 Influence of interlocking operation of intake and exhaust valves on system parameters

鉴于进气系统和排气系统阀门的总有效面积保持不变,结合式(4)和阀门的 CV,可以得到排气系统单座调节阀开度随进气系统单座调节阀开度的计算公式:

$$k_2 = \log_{R_2}^{(D-CV_1 \cdot R_1^{k_1-1})/CV_2} \quad (5)$$

式中: k_1 —进气系统单座调节阀的开度; k_2 —排气系统单座调节阀的开度; R_1 —进气系统单座调节阀的特性参数; R_2 —排气系统单座调节阀的特性参数; CV_1 —进气系统单座调节阀的额定 CV; CV_2 —排气系统单座调节阀的额定 CV; D —系统常数,为调节前进气系统和排气系统的 CV 之和。

3.2 压力参数调节

排气管路上的阀门可以用于调节试验段的压力,以排气管路的单座调节阀为例,100 s 后减小阀门开度,试验段的压力参数有所增加,但流量参数则不会发生改变,如图 7 所示。

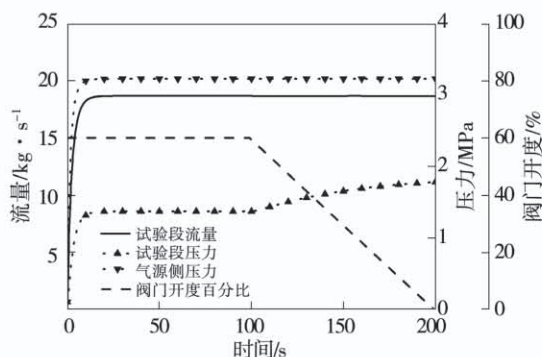


图 7 排气阀门开度对系统参数的影响

Fig. 7 Influence of exhaust valve opening on system parameters

试验段流量参数不发生变化的主要原因是,进气管路上的阀门处于临界状态,排气管路上的压力变化不会影响到进气管路的空气流量。

但当排气管路上压力变化过于剧烈,使得进气管路上阀门从临界状态转变为亚临界工作状态,则排气管路上阀门动作会影响试验段的流量参数,如图 8 所示。当排气阀门开度减小后,试验段压力陡增;当继续调减阀门开度时,存在试验段压力增大的变化时刻,并在此时刻下,气源侧压力随之增大。

因此,在实际运行过程中,需要尽量保证排气蝶阀的动作值在开启后保持恒定,以免影响上游的进气调节阀的流通状态。

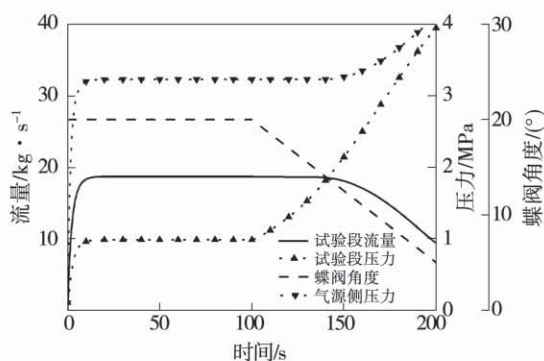


图8 排气蝶阀角度对系统参数的影响

Fig. 8 Influence of exhaust butterfly valve angle on system parameters

3.3 温度调节

根据试验设施示意图,气源机组产生一定温度(温度不高于 373 K),但试验段需要的来流温度远大于此温度。在这种情况下,通过天然气加温炉或电加热器进行一级加温,以产生试验段所需的来流温度。通过改变气源侧的温度边界条件来实现对试验段来流温度的调节,升温速率按照 10 K/min 计算。100 s 后温度的增加不会影响试验段的流量,但会改变试验段的压力,如图 9 所示。

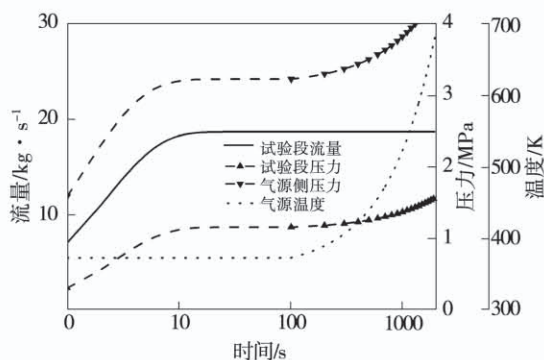


图9 气源温度对系统参数的影响

Fig. 9 Influence of air source temperature on system parameters

同时,从图 9 中还可以看出,试验段压力的增加又会影响到气源侧的压力,从而影响压缩机组的运行,因此升温过程还应同步调节进、排气调节阀的开启度,以免影响气源机组的运行。

图 10 为升温过程中,为保证压缩机组运行的稳定性,对系统进行的多因素综合模拟。从图 10 可以看出,在升温的瞬间,通过联锁控制来实现进、排气

调节阀开度的匹配,是解决压缩机组运行稳定性的一种方式。

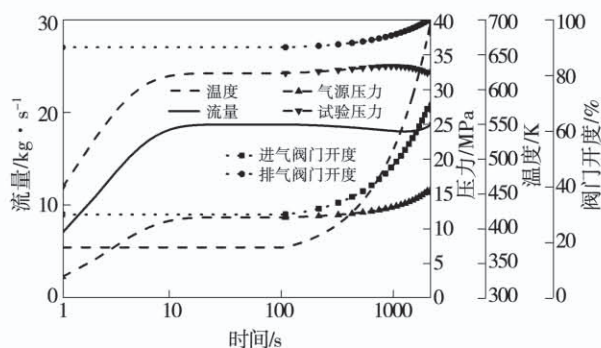


图10 升温过程中进、排气管路的阀门动作曲线

Fig. 10 Valve action curve of intake and exhaust pipes in the process of heating

4 结 论

(1) 试验设施上进、排气系统并联的方案,在进气系统阀门处于临界状态的情况下,排气系统背压调节阀可以在保证流量不变的情况下,对压力进行调节,从而增强了试验工况调节的灵活性。

(2) 单独调节进气系统和排气系统的阀门均可调节试验段的流量和压力,但会造成气源侧压力的变化,从而影响气源压缩机组的运行,但可以对进、排气系统的多台阀门进行联锁控制,从而解决该问题。

(3) 鉴于供气温度的变化不会影响流量,但会影响试验段和气源侧的压力,因此在试验过程中还需同步调节试验设施进、排气管路的调节阀,确保气源压缩机组运行的稳定性。

参考文献:

- [1] 蒋洪德,任 静,李雪英,等. 重型燃气轮机现状与发展趋势[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29): 5096-5102.
JIANG Hong-de, REN Jing, LI Xue-ying, et al. Status and development trend of the heavy duty gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5096-5102.
- [2] BOYCE M P. An overview of gas turbines[M/OL]. Gas Turbine Engineering Handbook, 2012: 3-88.
- [3] 黄 伟,常 俊,孙智滨. 重型发电燃气轮机的建模与状态监测研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(3): 81-86.
HUANG Wei, CHANG Jun, SUN Zhi-bin. Modeling and condition monitoring of heavy-duty power generation gas turbine[J]. Journal

- of Engineering for Thermal Energy & Power, 2020, 35 (3): 81–86.
- [4] 孙 鹏,张善科,马正军,等. 某型燃气轮机发电机组大负荷突卸时动态特性仿真与试验研究[J]. 热能动力工程, 2019, 34 (7): 66–70.
- SUN Peng, ZHANG Shan-ke, MA Zheng-jun, et al. Simulation and experimental study on dynamic characteristics of a gas turbine generator unit during suddenly unloading at heavy load[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34 (7): 66–70.
- [5] 周云龙,王 迪. 300 MW 机组快速甩负荷初期主汽压力动态特性仿真[J]. 热能动力工程, 2014, 29 (4): 391–396, 459.
- ZHOU Yun-long, WANG Di. Simulation of the dynamic characteristics of the main steam pressure during the initial stage of the fast cut-back of a 300 MW unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2014, 29 (4): 391–396, 459.
- [6] 刘志军,黄志坚,夏 海,等. 基于 AMESim 的蓄能器油压试验台开发与应用[J]. 机床与液压, 2010, 38 (20): 46–48, 74.
- LIU Zhi-jun, HUANG Zhi-jian, XIA Hai, et al. Development and application of hydraulic test station for accumulators based on AMESim[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38 (20): 46–48, 74.
- [7] 陈海生. 基于 AMESim 的煤油强度试验器研制与分析[J]. 液压气动与密封, 2020, 40 (12): 46–49.
- CHEN Hai-sheng. Development and analysis of kerosene strength tester based on AMESim[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2020, 40 (12): 46–49.
- [8] 陈雨洋,李靖祥,杨昌群,等. 基于 AMESim 的轴流先导式水击卸压阀动态特性分析[J]. 液压与气动, 2020 (11): 8–14.
- CHEN Yu-yang, LI Jing-xiang, YANG Chang-qun, et al. Analysis of dynamic characteristics of axial pilot-operated surge relief valve based on AMESim[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020 (11): 8–14.
- [9] 王金鹏,王才才,赵梅香,等. 封头压机移动工作台在不同负载下启动速度波动问题的研究[J]. 锻压技术, 2020, 45 (9): 162–165.
- WANG Jin-peng, WANG Cai-cai, ZHAO Mei-xiang, et al. Research on startup speed fluctuation of heading press mobile workbench under different loads[J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (9): 162–165.
- (王治红 编辑)
- (上接第 29 页)
- [11] VERSTRAETE D, BOWKETT C. Impact of heat transfer on the performance of micro gas turbines[J]. Applied Energy, 2015, 138 (15): 445–449.
- [12] 付 雷,丰镇平. 毫米级微型燃气轮机系统设计原则与可实现性循环分析[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45 (5): 42–46.
- FU Lei, FENG Zhen-ping. Design principle and cycle analysis of millimeter-scale micro-turbine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45 (5): 42–46.
- [13] 沈维道,童均耕. 工程热力学(4 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. 6: 442–443.
- SHEN Wei-dao, TONG Jun-geng. Engineering thermodynamics (4th Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. 6: 442–443.
- [14] 范作民,傅巽权. 热力过程计算与燃气表(下册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- FAN Zuo-min, FU Xun-quan. Thermodynamic process calculation and gas meter (II) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1987.
- (孙嘉忆 编辑)