

间冷燃气轮机预防凝析问题研究

周亚峰^{1,2}, 朱之丽¹

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 针对间冷燃气轮机过程控制, 提出了湿空气凝析问题. 以湿空气等压和等温热力学状态变化为基础, 分析了间冷燃气轮机压缩、间冷过程湿空气状态变化特征, 推导了湿空气经过低压压气机压缩与间冷器冷却后状态参数的变化关系, 得出了只有在间冷过程才会发生湿空气凝析的结论, 建立了湿空气凝析的条件判别式. 以在线测量参数可获取性为基础, 建立了以间冷后静温为控制目标的多参数的逻辑控制方法, 并结合工程实例对转换的控制静温进行了精度分析, 结果表明其误差在 0.6% 以内, 编制了工程适用的间冷燃气轮机控制程序, 并给出了全工况运行的控制方案.

关 键 词: 燃气轮机; 间冷器; 湿空气; 凝析; 控制方案

中图分类号: V23

文献标志码: A

Research on condensation-preventing problem of intercooled gas turbine

ZHOU Ya-feng^{1,2}, ZHU Zhi-li¹

- (1. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Shenyang Engine Design and Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: In view of the process control of intercooled gas turbine, wet air condensation was put forward. Based on isopiestic and isothermal thermodynamics state change of wet air, wet air state change characteristic of intercooled gas turbine in the compressing and intercooling process was analyzed. The change relationship of state parameters of wet air which was compressed by low pressure compressor and cooled by intercooler was deduced. The conclusion was drawn that wet air can condense only in the intercooling process. The conditional discriminant of wet air condensation was found. Based on the feasibility of acquiring online measuring parameters, multi-parameter logic control method was founded by taking the static temperature after intercooling as the control target. Precision analysis of transformed control static temperature was carried out by combining with a project case. The results indicate the error is within 0.6%. The control program applicable in project of intercooled gas turbine was developed, and the running control scheme under full conditions was presented.

Key words: gas turbine; intercooler; wet air; condensation; control scheme

随着航空技术的提升, 简单循环燃气轮机得到了长足的发展^[1], 同时以 LMS100 和 WR21 为代表的间冷和间冷回热循环燃气轮机也获得了整

机性能的大幅提升, 其优良的全工况性能大大超过了简单循环燃气轮机带来的收益^[2-4]. 国外的实践表明, 先进循环已成为未来高效率、大功率轻型燃

气轮机的发展趋势,国内在这方面也作了许多有益的探索^[5-8],研究表明,采用间冷循环发展我国大功率轻型燃气轮机是一条切合国情的技术路线^[9].

间冷循环燃气轮机是在多转子简单循环燃气轮机的高压与低压压气机之间增加换热装置,目的是降低高压压气机进气静温,减少压气机耗功,以增加燃气轮机的输出功率.

用于船用燃气轮机的机上间冷器具有高紧凑度、高换热效率的特点.目前国内外的研究重点主要集中在换热器流路布局以及换热模块气动性能等方面^[10-12],而关于高湿度进气环境下,湿空气在间冷过程中可能带来的凝析问题的研究却很少.凝析的水分长时间、高频率地冲刷压气机叶片将严重威胁燃气轮机的运行安全,因此,有必要开展间冷燃气轮机预防凝析问题研究.

1 湿空气凝析的基本原理

根据理想气体道尔顿分压定律,湿空气总静压 p 等于干空气分静压 p_a 和水蒸气分静压 p_v 之和^[13],即

$$p = p_a + p_v \quad (1)$$

湿空气中水蒸气的状态由其分静压 p_v 和湿空气静温决定,未饱和湿空气可以通过如下两种方式达到饱和状态进而析出水分:①等温过程,即保持湿空气静温不变,通过增加水蒸气的质量分数,对应的水蒸气分静压升高,如图1状态A至状态B的变化过程,此时水蒸气分静压 p_v 达到了饱和静压 p_s ,进一步增加水蒸气质量分数,湿空气将凝结为水滴从中析出;②等压过程,即保持水蒸气质量分数不变(分静压 p_v 不变)的降温过程,如图1状态A至状态C的变化过程,此时达到饱和状态,其静温达到了水蒸气分静压 p_v 对应的静温,称为露点静温,继续冷却就会结露,水分

析出,发生凝析,这时水蒸气的分静压降低,沿CD线变化.图1中的横坐标 V 为容积.

湿空气通常可以用相对湿度 ϕ 和含湿量 d 来表示,其定义如下:

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{p_v}{p_s} \\ d &= \frac{m_v}{m_a} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 m_v 和 m_a 分别表示湿空气的质量和干空气的质量.

2 间冷燃气轮机凝析

间冷过程湿空气凝析问题是间冷燃气轮机的关键问题之一,简单循环燃气轮机控制系统是以动力涡轮转速为被调目标、燃油量为被调参数进行过程控制的.间冷燃气轮机除了常规的控制原理外,还需研究对间冷器出口气流静温的控制,以防止出现湿空气凝析.关于传统压缩机中的冷却凝析问题,国内外已有所研究^[14-15],通常是在过程中增加除湿设备,以去除凝析出的液态水.船用燃气轮机要求结构紧凑,一般采用机上间冷模式,其结构多采用板翅结构^[16-17],没有空间增加除湿设备.因此在船用燃气轮机技术风险评估中^[18],必须进行湿空气凝析问题的风险分析.通常船用燃气轮机过程控制一般都采取防止液态水形成的技术措施,因此预测流程中湿空气的凝析问题就成了制定燃气轮机运行策略的关键.

湿空气经低压压气机压缩后进入间冷器,冷却后的空气再进入高压压气机.为便于研究,将燃气轮机压缩和冷却过程进行微观尺度分解,简化流程模型,将低压压气机进、出口截面湿空气状态变化过程等同于连续的等温过程;将间冷器中发生的冷却过程等同于等压过程来进行3个截面的湿空气状态变化研究.

2.1 低压压气机凝析

低压压气机进口气体是干空气与水蒸气的混合湿空气,其静压为当地大气压力.如前所述,将低压进、出口截面空气的状态变化分别当作湿空气连续等温过程进行凝析问题研究是可行的.假设进口(截面1)湿空气状态参数如下:相对湿度为 ϕ_1 ,静压为 p_1 ,静温为 t_1 ,对应 t_1 的饱和水蒸气静压为 p_{s1} ;出口(截面2)湿空气状态参数为:相对湿度为 ϕ_2 ,静压为 p_2 ,静温为 t_2 ,对应 t_2 的饱和水蒸气静压为 p_{s2} .则进口湿空气的水蒸气分静压 (p_{v1})为

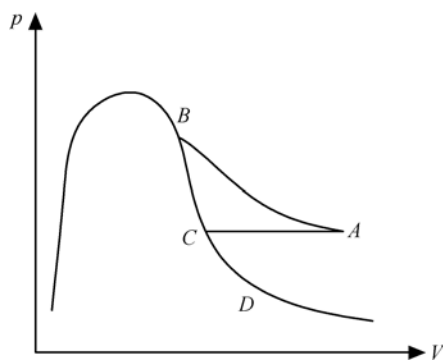


图1 湿空气中的水蒸气状态

Fig. 1 Status of steam in wet air

$$p_{v1} = \phi_1 \times p_{s1} \quad (3)$$

出口湿空气的水蒸气分静压(p_{v2})为

$$p_{v2} = \phi_2 \times p_{s2} \quad (4)$$

按式(1),湿空气中所含水蒸气的分静压也按相同压比变化,进、出口参数关系为

$$\frac{p_{v2}}{p_{v1}} = \frac{p_2}{p_1} \quad (5)$$

由式(3)~式(5)可求得 ϕ_2 为

$$\phi_2 = \phi_1 \times \frac{p_{s1}}{p_{s2}} \times \frac{p_2}{p_1} \quad (6)$$

方程中饱和静压 p_s 仅是当地静温的单值、单调函数,随着静温的增加而增加,且小于等于当地静压^[13],即

$$p_s = \frac{2}{15} \exp \left[18.591 - \frac{3991.11}{t + 233.84} \right] \quad (7)$$

式中 p_s 的单位为 kPa;湿空气的静温 t 的单位为 $^{\circ}\text{C}$.

由于压气机出口静温远大于进口静温,则

$$p_{s1} < p_{s2} \quad p_{s1} < p_1 \quad (8)$$

最大极限时($p_{s2} = p_2$),由式(6)~式(8)可得

$$\phi_2 = \phi_1 \times \frac{p_{s1}}{p_1} \quad (9)$$

因此可得

$$\phi_2 < \phi_1 \quad (10)$$

即经过低压压气机压缩后,静温升高,出口截面气流相对湿度一定小于进口截面的相对湿度.通常进口截面相对湿度均小于1,因此低压压气机出口截面一般不存在湿空气凝析问题.

2.2 间冷器凝析

初步研究表明:燃气轮机上间冷器流程损失约为2.5%,可近似将间冷器降温流程当作等压降温过程研究,如图1中AC的变化过程.

同理,按式(6)可建立间冷器进口截面(不计流程损失可视作低压压气机出口截面2)和间冷器出口截面(截面3)的关系式

$$\phi_3 = \phi_2 \times \frac{p_{s2}}{p_{s3}} \times \frac{p_3}{p_2} \quad (11)$$

设 $p_3/p_2 = 0.975$,则

$$\phi_3 = \phi_2 \times \frac{p_{s2}}{p_{s3}} \times 0.975 = \phi_2 \times \xi \quad (12)$$

低压压气机的性能决定了间冷器进口气流静温,而间冷器的性能决定了间冷器出口气流可能达到的极限静温.图2给出了饱和状态下,参数 ξ 与间冷器降温 Δt 的关系.通常燃气轮机设计状态间冷器的 Δt 一般都超过了 100°C ,例如 WR21 燃

气轮机为 110°C 左右,则参数 $\xi \gg 1$,可推得

$$\phi_3 > \phi_2 \quad (13)$$

因此经过间冷器降温后,增加了流程中湿空气的相对湿度.

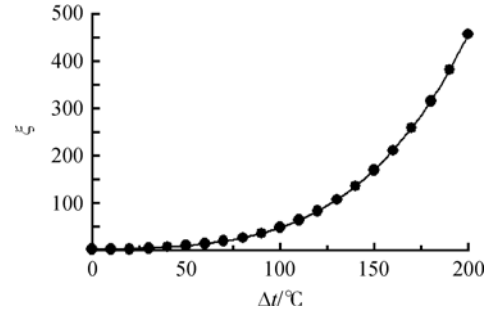


图2 Δt 与 ξ 的关系

Fig. 2 Relationship between Δt and ξ

由式(6)和式(12)可建立起燃气轮机进口截面与间冷器出口截面相对湿度的关系式

$$\phi_3 = 0.975 \times \phi_1 \times \frac{p_{s1}}{p_{s3}} \times \frac{p_2}{p_1} \quad (14)$$

当截面3相对湿度达到1时,湿空气即为饱和状态,如果继续降低温度就有水分凝析,此时温度即为当地露点静温.因此,间冷器出口截面湿空气是否发生凝析可用如下判别式判定:

$$\begin{cases} p_{s3} > 0.975 \phi_1 \times p_{s1} \times \frac{p_2}{p_1} & \text{无凝析} \\ p_{s3} = 0.975 \phi_1 \times p_{s1} \times \frac{p_2}{p_1} & \text{临界无凝析} \\ p_{s3} < 0.975 \phi_1 \times p_{s1} \times \frac{p_2}{p_1} & \text{有凝析} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中参数均为气流流程状态参数, ϕ_1 可通过进口湿度仪测得; p_2, p_1 可通过低压压气机进、出口壁面静压传感器获得; p_{s1} 是进口静温的单值函数,可通过测量环境大气干球静温,按式(7)编程求解计算获得.利用判别式(15)计算发生凝析时的临界 p_{s3} ,并换算出对应的间冷器出口临界静温 t_{s3} ,如式(16)所示.

$$t_{s3} = \frac{3991.11}{18.591 - \ln(7.5 p_{s3})} - 233.84 \quad (16)$$

求得 t_{s3} 后,按式(17)进行总压、静压换算,可得到间冷器出口总温 t_3^* .

$$\frac{t_3^*}{t_{s3}} = 1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \quad (17)$$

式中 κ 为等熵指数.

图3为间冷器出口截面马赫数 Ma 分布,其平均值约为0.055,按式(17)进行总温、静温转换得 $t_3^* = 1.0006 t_{s3}$,其绝对差值小于温度传感器测试误差,因此工程上可将上述计算获得的 t_{s3} 看作

出口截面总温 t_3^* .

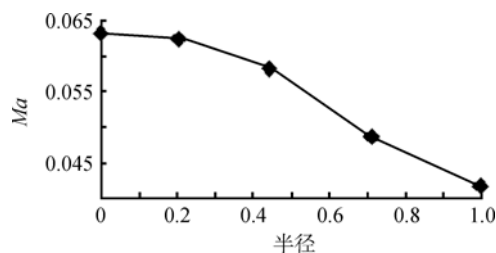


图3 间冷器出口截面马赫数分布

Fig. 3 Mach number distribution of intercooler outlet section

在燃气轮机运行中,可以按照燃气轮机控制规律,通过可编程逻辑控制器(PLC)编程求取 t_{s3} ,再将 t_{s3} 与间冷器出口截面用温度传感器测量的实际出口总温进行逻辑判断来进行运行控制,如式(18)所示.

$$t_3^* = t_{s3} + \Delta t \quad (18)$$

工程上 Δt 一般选 5°C 为宜,PLC 控制间冷器出口气流总温高于当地露点静温,以防止湿空气发生凝析.

3 分析实例

利用上述研究结果,对某间冷燃气轮机实例进行了计算分析,图4为在等 p_2/p_1 条件下,间冷器出口湿空气在饱和状态下, t_3 随 t_1 和 ϕ_1 的变化关系;图5为 $\phi_1 = 60\%$ 条件下, t_3 随 t_1 和 p_2/p_1 的变化关系.

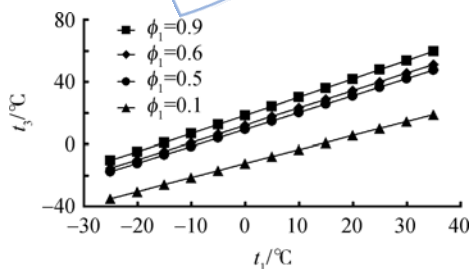


图4 等 p_2/p_1 下 t_3 随 t_1 和 ϕ_1 的变化关系

Fig. 4 Changing t_3 along with t_1 and ϕ_1 when p_2/p_1 is constant

可见在等进气湿度或等压比时,间冷器出口静温与进口静温呈线性关系.

图6是不同大气温度 t_{air} 下,间冷器出口静温 t_3 与进口湿度 ϕ_1 的关系,在湿度较小时具有非线性特征.

图7为利用上述研究成果完成的某间冷燃气

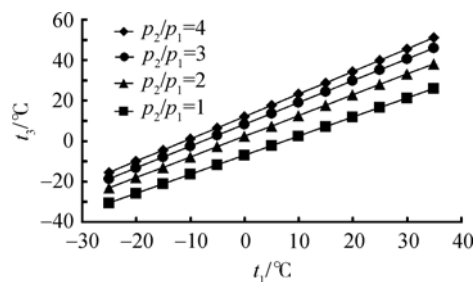


图5 等 ϕ_1 下 t_3 随 t_1 和 p_2/p_1 的变化关系

Fig. 5 Changing t_3 along with t_1 and p_2/p_1 when ϕ_1 is constant

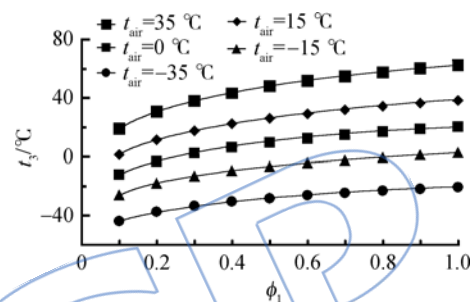


图6 不同大气温度下 t_3 随 ϕ_1 的变化关系

Fig. 6 Changing t_3 along with ϕ_1 with different air temperatures

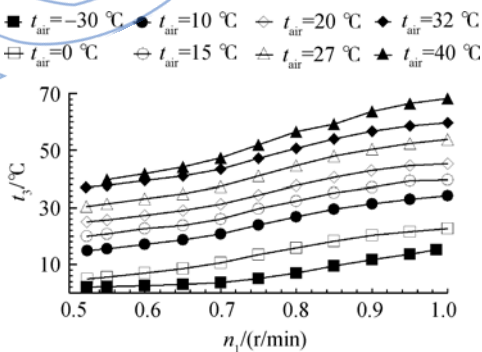


图7 某间冷燃气轮机的过程控制

Fig. 7 Process control of an intercooled gas turbine

轮机实例过程控制的计算结果. 计算以满足全工况稳定运行裕度为条件,完成了不同转速 n 、不同进气湿度、不同大气温度下对间冷器出口总温控制的研究. 整机过程控制是以进口湿度 100% 为极限条件,以间冷器出口总温为被调目标,通过调整燃气轮机工作转速及间冷系统间冷度实现的. 间冷度的控制是通过在不同海水温度下,进行二次换热系统循环流量优化匹配实现的.

4 结论

本文从间冷燃气轮机安全运行和过程控制需求出发,提出了间冷燃气轮机的凝析问题,推导了

间冷燃气轮机过程控制凝析问题判据,以在线测量参数的可获取性为原则获得了过程控制的逻辑方法,并结合工程实例进行了过程控制编程。

通过本文的研究,得出初步结论如下:

1) 间冷燃气轮机过程控制的实质在于通过调整主机状态和间冷系统间冷度来调节间冷器出口静温,使其始终高于当地露点静温,从而避免流动过程发生湿空气凝析现象。

2) 间冷燃气轮机凝析问题只发生在间冷器出口截面,在等进气湿度或等低压压比条件下,间冷器出口静温与进口环境温度呈线性关系,在等环境温度条件下,间冷器出口静温与进口湿度呈近似线性关系,湿度较低时呈非线性关系。

3) 按判别式(15)进行湿空气凝析问题判定,采用 PLC 计算机编程,以在线测量参数的可获取性为基础,能实现间冷燃气轮机过程控制,该方法能保证间冷燃气轮机在全工况范围安全运行。

参考文献:

- [1] 李孝堂. 燃气轮机的发展及中国的困局[J]. 航空发动机, 2011, 37(3): 1-7.
LI Xiaotang. Development of gas turbine and dilemma in China[J]. Aeroengine, 2011, 37(3): 1-7. (in Chinese)
- [2] 梁春华. 间冷回热循环舰船用燃气轮机 WR-21 的技术特点[J]. 航空发动机, 2007, 33(1): 55-58, 41.
LIANG Chunhua. Technological feature of WR-21 marine intercooled recuperated gas turbine[J]. Aeroengine, 2007, 33(1): 55-58, 41. (in Chinese)
- [3] 闻雪友, 李伟. WR-21: 新一代的船用燃气轮机[J]. 热能动力工程, 1999, 14(1): 1-6.
WEN Xueyou, LI Wei. WR-21: a new generation of marine gas turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1999, 14(1): 1-6. (in Chinese)
- [4] 张方伟, 张会生, 苏明. 中冷回热循环燃气轮机技术[J]. 船舶工程, 2004, 26(2): 7-9.
ZHANG Fangwei, ZHANG Huisheng, SU Ming. On the inter-cooled recuperated gas turbine technology[J]. Ship Engineering, 2004, 26(2): 7-9. (in Chinese)
- [5] 闻雪友, 肖东明. 对发展大功率船用燃气轮机的新思考[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(4): 17-21.
WEN Xueyou, XIAO Dongming. A new concept concerning the development of high-power marine gas turbines[J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(4): 17-21. (in Chinese)
- [6] WEN Xueyou, XIAO Dongming. Feasibility study of an intercooled-cycle marine turbine[R]. ASME Paper GT2007-27609, 2007.
- [7] 肖东明, 闻雪友, 曾喜, 等. 简单循环船用燃气轮机间冷回热改造方案探讨[J]. 热能动力工程, 2004, 19(1): 89-92.
XIAO Dongming, WEN Xueyou, ZENG Xi, et al. Exploratory study of a modification scheme incorporating inter-cooling and regeneration for a simple cycle marine gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(1): 89-92. (in Chinese)
- [8] 郑培英, 聂海刚, 高凤树. 某型间冷燃气轮机热力计算方法研究[J]. 航空发动机, 2008, 34(1): 13-15, 52.
ZHENG Peiying, NIE Haigang, GAO Fengshu. Thermal dynamic calculation method on an intercooled gas turbine[J]. Aeroengine, 2008, 34(1): 13-15, 52. (in Chinese)
- [9] 张忠文. 舰船燃气轮机技术的发展途径[J]. 航空发动机, 2009, 35(6): 48-52.
ZHANG Zhongwen. Development approach of marine gas turbine[J]. Aeroengine, 2009, 35(6): 48-52. (in Chinese)
- [10] 董威, 高鹏, 郑培英, 等. 舰船燃气轮机间冷器优化设计与性能分析[J]. 航空发动机, 2011, 37(3): 22-25.
DONG Wei, GAO Peng, ZHENG Peiying, et al. Optimal design and performance analysis of marine gas turbine intercooler[J]. Aeroengine, 2011, 37(3): 22-25. (in Chinese)
- [11] Traverso A, Aristide F. Optimal design of compact recuperators for microturbine application[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(14): 2054-2071.
- [12] 李卓, 张惠冰, 闻雪友, 等. 复杂循环船用燃气轮机间冷器的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2008, 23(2): 148-152.
LI Zhuo, ZHANG Huibing, WEN Xueyou, et al. Numerical simulation of an intercooler for a complex-cycle marine gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(2): 148-152. (in Chinese)
- [13] 沈维道. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [14] 张勤, 何丽红. 压缩机级间冷却器凝析问题分析及冷凝水量计算[J]. 压缩机技术, 2005(4): 26-27.
- [15] 赵为民. 预估压缩机中间冷却器和后冷却器的非设计工况[J]. 压缩机技术, 2001(6): 7-8, 12.
- [16] 宋翀芳, 李安桂. 湿空气在肋片表冷器上的传热传质及肋片效率[J]. 暖通空调, 2001, 31(4): 96-97, 106.
SONG Chongfang, LI Angui. Heat and mass transfer of moist air on a finned air cooler and fin efficiency[J]. Journal of Heating Ventilating and Air Conditioning, 2001, 31(4): 96-97, 106. (in Chinese)
- [17] 谢公南, 王秋旺. 遗传算法在板翅式换热器尺寸优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 53-57.
XIE Gongnan, WANG Qiuwang. Geometrical optimization design of plate-fin heat exchanger using genetic algorithm[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(7): 53-57. (in Chinese)
- [18] 周亚峰, 尹家录, 李泳凡. 某型燃气轮机设计方案技术风险分析[J]. 航空发动机, 2011, 37(3): 18-21.
ZHOU Yafeng, YIN Jialu, LI Yongfan. Technology risk analysis of design concept for a gas turbine[J]. Aeroengine, 2011, 37(3): 18-21. (in Chinese)