

# 燃气轮机发电机组注蒸汽后温控系统的适应性研究

(哈尔滨七〇三研究所) 李伟顺 林枫 侯宇辉  
(龙电集团) 李 皎

**[摘要]** 结合实用机组,通过理论分析和变工况计算,对回注蒸汽后燃气轮机温控系统的适应性进行了分析研究。结果表明,注蒸汽后,原有温控系统不仅可保证燃机可靠运行,而且对延长机组寿命有贡献。

**关键词** 注蒸汽 温控系统 超温

**中图分类号** TK32 TK47

## 1 前言

燃气轮机发电机组采用蒸汽回注技术,投资较少,机组改动量小,而效果显著。因此,该项技术在国内外已被广泛的应用。但是燃气轮机回注蒸汽后,其原有的温控系统是否需要修改,不修改是否会导致燃气轮机超温运行,该问题一直受到燃机行业的普遍关注。本文将结合实用机组,通过理论分析及变工况计算,对于燃气轮机回注蒸汽前后,其温控系统的适应性进行了详细分析。

## 2 燃气轮机的温控原理

为防止燃气轮机超温运行,每台燃气轮机都限制一最高透平进口燃气温度  $T_{3\max}^*$ 。但是,在实际应用中,直接测量  $T_3^*$  比较困难。因此,燃气轮机的温控回路都是以检测透平排

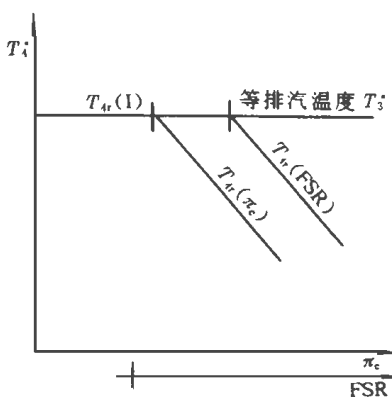


图 1 PG6531温控线示意图

气温度  $T_4^*$  作为  $T_3^*$  的控制信号。图 1即为 PG6531 燃气轮机发电机组的温控基准图。MarKIV 控制 PG6531单轴燃气轮机,应用三种形式的温控线(见图 1)

- (1) 等排气温度温控线  $[T_{4r}(I)]$ ;
- (2) 压气机压比  $c_c$  修正的温控线  $[T_{4r}(c_c)]$
- (3) 燃料冲程基准 FSR 修正的温控线  $[T_{4r}(FSR)]$

在实际运行中,通常  $T_{4r}(c_c)$  做为主温控基准,  $T_{4r}(FSR)$  做为后备温控基准,而  $T_{4r}(I)$  仅在很高的环境温度下或启动时可能被选出使用。因此,仅分析主温控基准的控制原理

根据气体的膨胀公式,可知  $T_3^*$  与  $T_4^*$  的关系如下:

$$T_3^* = T_4^* / (1 - Z_T + Z_T / c_T^{K-1}) \quad (1)$$

式中  $Z_T$  为透平效率,  $K$  为燃气的绝热指数,  $c_T$  为透平的膨胀比,  $c_T$  随压气机压比  $c_c$  的增高而增高,但略小于  $c_c$ 。从式(1)可以看出,  $T_3^*$  与  $T_4^*$  之间存在着非线性关系,为方便控制,将式(1)线性化:

$$\Delta T_3^* = \frac{\partial T_3^*}{\partial T_4^*} \Delta T_4^* + \frac{\partial T_3^*}{\partial c_T} \Delta c_T + \frac{\partial T_3^*}{\partial K} \Delta K + \frac{\partial T_3^*}{\partial Z_T} \Delta Z_T \quad (2)$$

在未注汽的情况下,  $Z_T$  和  $K$  的变化不大,其影响可以忽略不计。因此,式(2)变为:

$$\Delta T_3^* = \frac{\partial T_3^*}{\partial T_4^*} \Delta T_4^* + \frac{\partial T_3^*}{\partial c_T} \Delta c_T \quad (3)$$

式中,  $\frac{\partial T_3^*}{\partial T_4^*}$ 、 $\frac{\partial T_3^*}{\partial c_T}$  为透平进口温度  $T_3^*$  对  $T_4^*$  及  $c_T$  的偏导数,即

$$\frac{\partial T_3^*}{\partial T_4^*} = 1 / (1 - Z_T + Z_T / c_T^{K-1})$$

及

$$\frac{\partial T_3^*}{\partial c_T} = T_4^* \frac{\left(\frac{K-1}{K}\right) Z_T c_T^{-\frac{2K-1}{K}}}{\left(1 - Z_T + \frac{Z_T}{c_T^{\frac{K-1}{K}}}\right)^2}$$

控制的目的是当压气机压比  $c_T$  变化时,用改变所控制的  $T_4^*$  加以修正,以保持  $\Delta T_3 = 0$ ,这时,由式(3)可得  $\Delta T_4^*$  与  $\Delta c_T$  的关系为:

$$\frac{\partial T_3^*}{\partial T_4^*} \Delta T_4^* = - \frac{\partial T_3^*}{\partial c_T} \Delta c_T \tag{4}$$

即

$$\frac{\Delta T_4^*}{\Delta c} = - \left( \frac{\frac{\partial T_3^*}{\partial c_T}}{\frac{\partial T_3^*}{\partial T_4^*}} \right) = - T_4^* \frac{Z_T \left(\frac{K-1}{K}\right)}{1 - Z_T + \frac{Z_T}{c_T^{\frac{K-1}{K}}}} \times \frac{1}{c_T^{\frac{2K-1}{K}}} \tag{5}$$

式(5)就是图1中  $T_{4r}(c_T)$  温控基准的原理表达式。Mark IV 检测透平的排气温度信号,根据检测到的排气温度值与

温控基准值的比较结果去修改供油量。当排气温度值超过温控基准值时,燃气轮机就减少燃油量的供应;当排气温度值低于温控基准值时,就增加燃油量的供应,从而保证燃气轮机始终在等  $T_3^*$  线上运行。

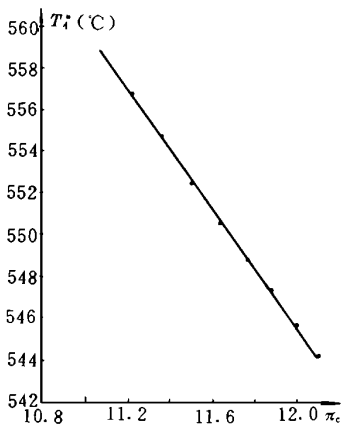


图2 压比  $c_T$  变化时,  $T_4^*$  的变化曲线

### 3 注蒸汽后 $T_4^*$ 的变化趋势

在未注汽的情况下,仅考虑了燃气轮机压气机压比  $c_T$  的变化对于燃气轮机排气温度  $T_4^*$  的影响。但是,燃气轮机注入蒸汽后,流经透平的工质成份和流量都发生了变化。因此,透平效率  $Z_T$  和绝热指数  $K$  的变化对  $T_4^*$  的影响不容忽视。同时,注汽后,随着注汽量的变化,压气机的压比  $c_T$  也将发生改变。因此,必须分析在保持  $T_3^*$  不变的前提下,三者变化对于  $T_4^*$  的影响。

3.1 燃气轮机注汽后,透平流量增加,根据透平的流量公式(亚临界状态):

$$\frac{G}{G_0} = \frac{T_{30}^*}{T_3^*} \frac{c_{T0}^2 - 1}{c_T^2 - 1} \tag{6}$$

式中:  $T_{30}^*$  —— 额定负载时透平前的燃气温度

$c_{T0}$  —— 额定负载时透平的膨胀比。

$G_0$  —— 额定负载时透平流量

$T_3^*$  —— 注汽后透平前的燃气温度。

$c_T$  —— 注汽后压气机的压比。

$G$  —— 注汽后透平流量。

在保持  $T_3^* = T_{30}^*$  的条件下,由于注汽后流量增加,即  $G > G_0$ ,使得膨胀比  $c_T > c_{T0}$ ,即膨胀比  $c_T$  增大。经计算分析表明,临界状态的变化趋势与亚临界状态相同。

3.2 燃机注汽后,由于注入的水蒸气的比热容明显地大于燃气的比热容,因此,混合气体的平均绝热指数  $K$  将下降。

3.3 燃气轮机注汽后,由于透平的通流量和膨胀比升高,导致透平偏离设计工况,透平效率  $Z_T$  下降。

由式(1)可知  $T_4^*$  与  $Z_T$ ,  $K$  及  $c_T$  的关系式:

$$T_4^* = T_3^* \left(1 - Z_T + \frac{Z_T}{c_T^{\frac{K-1}{K}}}\right) \tag{7}$$

从上式可以看出,在保持  $T_3^*$  不变的情况下,  $T_4^* = f(Z_T, c_T, K)$ ,分别将透平排气温度  $T_4^*$  对  $Z_T$ ,  $c_T$  和  $K$  求导。

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_4^*}{\partial Z_T} &= \frac{T_3^*}{c_T^{\frac{K-1}{K}}} \cdot \left(1 - c_T^{\frac{K-1}{K}}\right) \\ &= - T_3^* c_T^{\frac{1-K}{K}} \left(c_T^{\frac{K-1}{K}} - 1\right) \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_4^*}{\partial c_T} &= T_3^* \cdot Z_T \cdot c_T^{\frac{1-2K}{K}} \left(\frac{1}{K} - 1\right) \\ &= - T_3^* Z_T c_T^{\frac{1-2K}{K}} \left(1 - \frac{1}{K}\right) \end{aligned} \tag{9}$$

$$\frac{\partial T_4^*}{\partial K} = - \frac{1}{K^2} T_3^* \cdot Z_T \cdot c_T^{\frac{1-K}{K}} \cdot \ln(c_T) \tag{10}$$

由于膨胀比  $c_T$  及绝热指数  $K$  恒大于 1,所以  $T_4^*$  对于  $Z_T$ ,  $c_T$  和  $K$  的偏导均为负值。从式(9)可知,注汽后,膨胀比  $c_T$  升高,使得  $T_4^*$  下降。此时若不考虑  $Z_T$  和  $K$  的影响,那么  $T_4^*$  不会偏离温控基准。但是,注汽后  $Z_T$  和  $K$  均减小,从式(8)、(10)可以看出,由于  $Z_T$  和  $K$  的下降将使  $T_4^*$  升高,因此,温控系统由于

$T_4^*$  偏离温控基准而开始进入控制, 将  $T_4^*$  拉回到温控基准线上。由于  $T_4^*$  下降,  $T_3^*$  也将随之下降, 从而不会导致燃机超温运行。

#### 4 变工况计算分析

仍以 PG6531 燃气轮机发电机组为例, 在 ISO 条件下, 燃机出力为 36 600 kW, 透平进口燃气温度  $T_3^*$  为 1 377. 15 K, 压比  $\pi_c$  为 11. 7, 透平排气温度  $T_4^*$  为 816. 15 K 计算中保持  $T_3^*$  不变, 分别改变大气温度和注汽量进行变工况计算, 结果表明:

4. 1 大气温度降低, 导致压气机压比升高, 透平排气温度  $T_4^*$  下降, 压比  $\pi_c$  与  $T_4^*$  之间存在着线性关系 (图 2), 与理论分析相符。

4. 2 假定某一注汽温度, 改变注汽量, 可以看出注汽后压比  $\pi_c$  升高 (图 3), 由于  $Z_4$  和  $K$  的影响, 随着注汽量的增加, 压比  $\pi_c$  升高,  $T_4^*$  也越来越偏离温控基准 (图 4)。

#### 5 结束语

(1) 燃气轮机注入蒸汽后, 在原有温控系统不变的情况下, 透平进口温度  $T_3^*$  将降低, 而不会导致燃气轮机超温运行, 这对于延长燃气轮机高温部件的使用寿命非常有利。

(2) 如果将燃机的温控系统进行相应修改, 使得注汽后的  $T_3^*$  保持与注汽前同样的  $T_3^*$  温度, 将会进一步提高燃机的出力, 这一点在实际应用中具有重要的价值。

#### 参考文献

- 1 沈炳正. 燃气轮机装置. 机械工业出版社, 1981
- 2 王丰. 热力发动机优化设计. 国防工业出版社, 1993
- 3 倪维斗, 徐基豫. 自动调节原理与透平机械自动调节. 机械工业出版社, 1981
- 4 燃气蒸汽联合循环电站培训教材, 第 1 3 册. 清华大学热能工程系, 大庆石油管理局供电公司, 1988

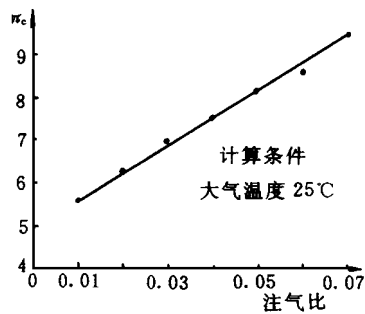


图 3 压比随注汽量的变化曲线

注: 注汽比为注蒸汽量与压气机进口空气质量之比

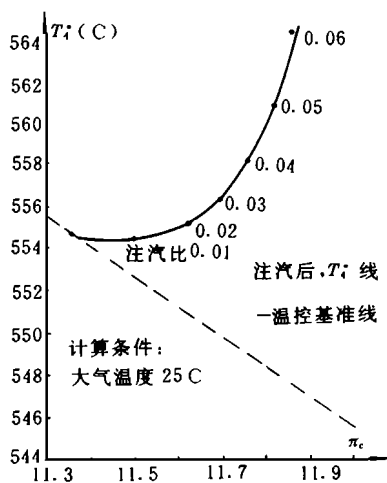


图 4 注汽量变化时,  $T_3^*$  随压比的变化曲线

#### 船舶燃机

#### WR-21 燃机完成耐久性试验

据“Diesel & Gas Turbine Worldwide”1998年1-2月号报道, WR-21中间冷却回热式(ICR)船舶燃气轮机于1997年5月末到9月10日在英国Prestock试验室内成功完成了500h的耐久性试验。试验证实了此研制阶段预期的燃油消耗的节省目标。

WR-21是为美国和盟国海军未来的战舰研制的。几个欧洲国家的海军显然对此研制计划感兴趣。法国和英国已对此研制计划作了投资, 并且英国、法国和意大利新一代的护卫舰也可能装用WR-21发动机。

预期, 生产型发动机将在世纪之交时可供应用。未来的试验计划将包括修改发动机箱装体, 使之能满足海军最近规定的维护准则, 并满足严格的噪声、抗冲击以及防核、化学和生物战的要求。

(思娟 供稿)

**基于信息和知识集成的汽轮机智能诊断 = Intelligent Diagnosis of Steam Turbines Based on Information and Knowledge Integration** [刊,中] / Ruan Yue, Sun Guobin, Xu Shichang ( Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). 280~ 281, 284

After an analysis of the types of symptoms in a steam turbine failure intelligent diagnostic system this paper presents the strategies of diagnostic information integration and a model for diagnostic knowledge integration. Expounded is a mixed reasoning method based on case examples, rules and models. Key words information integration, knowledge integration, intelligent diagnosis, steam turbine

**中央空调蓄冷系统运行优化控制模式 = Optimized Control Mode of a Central Air-conditioning Cold Storage System Operation** [刊,中] / Yu Guangbao, Liu Zhenyan, et al ( China National University of Science & Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 282~ 284

The authors present a brief description of the current technical operation level in cold-storage air-conditioning cold discharge process along with an analysis of its deficiencies. With the aid of systemized knowledge proposed is a new mathematical model for an optimized operation. A method for problem solving and also optimized results are given and the economics of an optimized operation control mode is analyzed. On this basis a more detailed analytical study is conducted of the possible approaches for the further improvement and development of the operation optimized model. Key words cold storage air conditioning, cold discharge operation, optimized control, mode

**燃气轮机发电机组注蒸汽后温控系统的适应性研究 = A Study of the Adaptability of the Temperature Control system after Gas Turbine Generator Steam Injection** [刊,中] / Li Weishun, Lin Feng, Hou Yuhui ( Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 285~ 287

In connection with a practical machinery unit and through theoretical analysis and off-design condition calculation an analytical study is performed of the adaptability of the gas turbine temperature control system after steam injection. The study results show that following the steam injection the original temperature control system can not only ensure the reliable operation of the gas turbine, but can also contribute to the lengthening of the gas turbine life. Key words steam injection, temperature control system, overtemperature

**锅炉单相受热面动态静态特性通用计算方法 = A General Calculation Method for Dynamic and Static Characteristics of Boiler Single-phase Heating Surfaces** [刊,中] / Wang Guangjun, Wang Weiran, et al (North-east China Institute of Electrical Power Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 288~ 290

Based on a fluid microelement tracking calculation method the authors have come up with a general method for calculating the dynamic and static characteristics of a boiler single-phase heating surface thermodynamic process. With the help of this calculation model it is possible to not only analyze the dynamic process of the boiler single-phase heating surfaces but also perform the static verification computation of the said heating surface thermodynamic characteristics. In addition, it can also very conveniently determine the dynamic and static distribution status of the boiler single-phase heating surface thermodynamic parameters. Key words boiler, dynamic characteristics, static characteristics, calculation method

**采暖锅炉计算机监控、管理系统 = A Computer-based Monitoring and Management System for Heating Boilers** [刊,中] / Lu Zehua, Xu Xiangdong, Cao Renfeng, et al ( Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 291~ 294

The present monitoring system features a convenient quick-action operating platform and a fair man-ma-