

一种基于经验的燃气轮机参数折合方法

房友龙^{1,2}, 刘东风^{1,2}, 余又红¹, 贺星¹, 余良武¹

(1. 海军工程大学 动力工程学院, 武汉 430033;

2. 中国人民解放军 91663 部队, 山东 青岛 266012)

摘 要: 针对状态评估过程中如何对燃气轮机性能参数进行折合从而消除环境温度和环境压力的影响问题, 提出一种基于经验的方法, 利用对环境温度(或环境压力)回归直线的斜率、环境温度(或环境压力)均值和被折合参数均值确定折合指数, 对某参数进行折合。实例分析表明: 与常规折合法相比, 经验折合法能更有效消除环境温度和环境压力的影响。性能参数的经验折合值与环境温度和环境压力的相关系数均接近 0, 更能反映燃气轮机本身的状态变化趋势, 便于开展状态评估。

关 键 词: 参数折合; 燃气轮机; 经验法; 状态评估; 环境温度; 环境压力

中图分类号: V235.1; TK478

文献标志码: A

Parameter correction of gas turbine based on an empirical method

FANG Youlong^{1,2}, LIU Dongfeng^{1,2},

YU Youhong¹, HE Xing¹, YU Liangwu¹

(1. College of Power Engineering,

Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Unit No. 91663,

Chinese People's Liberation Army, Qingdao Shandong 266012, China)

Abstract: In order to correct the gas turbine parameter and eliminate the influence of environmental temperature and pressure when assessing the gas turbine engine performance, an empirical method was proposed. The correction exponents were determined by the slope of regression line to the ambient temperature (or ambient pressure), the average of ambient temperature (or ambient pressure) and the average of target parameter, to correct the target parameter. The test data analyses showed that the proposed empirical correction method can more effectively eliminate the influence of ambient temperature and ambient pressure compared with regular correction method, and the correlation coefficient of empirical corrected performance parameter and the ambient temperature (or ambient pressure) was close to zero. The empirical corrected parameters can reflect the state change trend of gas turbine itself well, making it convenient for performance assessment.

Key words: parameter correction; gas turbine engine; empirical method; performance assessment; environmental temperature; environmental pressure

收稿日期: 2018-01-31

基金项目: 海军工程大学自主立项资助项目(425517K004, 425517K137); 中国博士后科学基金重点资助项目(20017T100799)

作者简介: 房友龙(1986—), 男, 助理工程师, 博士生, 主要从事舰艇装备状态监测与故障诊断研究。

引用格式: 房友龙, 刘东风, 余又红, 等. 一种基于经验的燃气轮机参数折合方法[J]. 航空动力学报, 2018, 33(11): 2802-2808. FANG Youlong, LIU Dongfeng, YU Youhong, et al. Parameter correction of gas turbine based on an empirical method[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(11): 2802-2808.

环境温度和压力对燃气轮机运行状态有重要影响,而状态评估关键技术之一就是必须在一定环境条件下建立燃气轮机健康指标基准点。而实际燃气轮机运行状态受环境条件变化的影响很大,且呈高度非线性特性。因此,消除环境温度和压力对燃气轮机各部件进出口热力参数的影响,将其折合到标准状态,进而进行统一的状态评估和故障诊断是非常必要的。

在燃气轮机热力计算过程中,传统的方法是采用相似原理将转速、流量等性能参数折合至标准大气工况^[1]。Volponi^[1]以涡扇发动机为例详细阐述了燃气轮机参数折合原理和方法,提出基于敏感系数矩阵的模型分析法和基于实际数据的经验法来求修正指数。刘大响^[2]利用相似原理研究了大气湿度对发动机性能的影响及其修正方法。Assadi 等^[3]将神经网络应用于蒸发式燃气轮机参数修正。Kurzke^[4]讨论了用气动热力学模型建立经验指数时产生的问题,先调整模型使其和测试数据一致,将数据折合至标准大气条件,然后计算额定性能。Casoni 等^[5]开发了“参数修正控制”(CPC)逻辑,使燃气轮机不受周围环境和负荷条件的影响,并在其最优性能的基础上运行。Mathioudakis^[6]讨论了注水燃烧工况下燃气轮机测量参数的折合问题。Veer 等^[7]研究了以结垢等性能退化分析评估为目的的近海燃气轮机测量参数折合问题。骆广琦等^[8]指出了参数折合中考虑环境温度、湿度、燃油热值、雷诺数等修正方法。Kyritsis 等^[9]介绍了燃气轮机基于分析法的参数折合方法。Li 等^[10]介绍了基于燃油成分进行参数折合的方法。针对涡轴发动机性能参数的修正,黄开明等^[11]提出了等效相似转换法,以消除自由涡轮工作状态不相似导致的换算误差;针对涡轴发动机高空台试验存在进出口条件模拟偏差的影响,马前容等^[12]提出了相似换算和小偏差分析相结合的参数修正方法。钟诗胜等^[13]考虑了大气温度、大气湿度以及燃烧热值对标准化模型的影响,基于气路参数偏差值的求解提出了修正后的标准化模型。由于传统的转速折合中理想气体的假设会有不少误差,Berdanier 等^[14]提出了新的考虑湿空气的转速和质量流量折合方法和基于实测数据的多元校正因子法,并用实验与传统的折合方法作了比较。Madsen 等^[15]研究了压气机效率的修正方法,以改进对压气机性能退化趋势的诊断能力。韦海等^[16]提出了一种研究燃气轮机相似性的通用方法,研究了单转子定轴燃气

轮机的燃气发生器性能换算的原理。

Urban 等^[17]指出传统的简化维数分析得到的 θ 和 δ 折合指数不是非常精确的。传统的标准化折合模型是一种理想状态,未考虑大气温度、传感器灵敏度等其他因素的影响^[13,18]。本文作者通过试验数据计算,也发现监测参数常规折合方法给出的 θ 指数有时不能完全消除环境温度的影响。消除环境温度影响的方法之一是将温度对环境温度进行线性回归,其残差可反映温度变化趋势,但回归后的残差不方便参与状态评估,因为残差要增加多少才对应真实的状态是不知道的。本文针对燃气轮机气流通道中各截面参数的标准化折合这一问题进行研究,提出一种基于实测数据的经验折合方法,使得折合后能够明显消除环境温度和压力波动对燃气轮机性能参数的影响,使各截面性能参数更能反映燃气轮机本身的状态,便于开展状态评估。

1 基于经验的参数折合方法

设 X 为需要标准化折合的参数,传统的标准化折合公式为

$$X_c = \frac{X}{\theta^a \delta^b} \quad (1)$$

式中 $\theta = \frac{T_0}{288.15}$, $\delta = \frac{p_0}{101325}$; a, b 分别是 θ, δ 的指数; T_0 是环境温度; p_0 是环境压力。文献[1]中介绍的基于实际数据的经验法来求修正指数 a 值的方法较为繁琐,本文提出一种更为简便的基于测试数据的经验分析方法。以温度折合为例说明方法的推导过程。

1.1 基于经验的折合方法的推导

设环境温度为 T_0 ,需要标准化折合的温度参数为 T ,目前常用的标准化折合公式^[1]是取 $a = 1, b = 0$,即

$$T_c^* = \frac{T}{\theta} \quad (2)$$

有时在热力计算中该标准化再乘以一个温度修正系数 C_T ,如式(3),该修正系数是环境温度的线性函数^[8]。然而下文的实例将验证,即使乘以修正系数,该标准化折合也不能使得 T_c^* 与 T_0 线性无关,即不能有效消除环境温度对燃气轮机温度的影响。

$$T_c^* = C_T \frac{T}{\theta} \quad (3)$$

令 T 的折合值 T_c 为

$$T_c = \frac{T}{\theta^a} \tag{4}$$

问题则是如何确定修正指数 a 值,使得 T_c 与 T_0 线性无关。

设 T 和 T_0 间存在以下线性关系:

$$T = k_1 T_0 + l_1 + \epsilon_1 \tag{5}$$

式中 k_1 和 l_1 分别是线性回归直线的斜率和截距; ϵ_1 是均值为 0, 方差为 σ^2 且服从正态分布的随机误差,它是一切随机因素影响的总和。

T 的一组观测值为 $T_i = k_1 T_{0,i} + l_1 + \epsilon_{1,i}; i = 1, 2, \dots, n$ 。利用最小二乘法,由观测值可求得 k_1

$$\text{和 } l_1 \text{ 的估计 } \hat{k}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{0,i} T_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{0,i} \sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_{0,i}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n T_{0,i} \right)^2},$$

$$\hat{l}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i - \hat{k}_1 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{0,i}, \text{ 可得 } E(T) \text{ 的估计为}$$

$$\hat{T} = \hat{k}_1 T_0 + \hat{l}_1 \tag{6}$$

其线性回归后的残差为

$$e_1 = T - \hat{T} \tag{7}$$

式中 $e_1 = \{e_{1,i}\}, e_{1,i} = T_i - \hat{T}_i = T_i - \hat{k}_1 T_{0,i} - \hat{l}_1, i = 1, 2, \dots, n$ 。

设 T_c 和 T_0 间存在以下线性关系:

$$T_c = k_2 T_0 + l_2 + \epsilon_2 \tag{8}$$

若要 T_c 与 T_0 线性无关,则只需 $k_2 = 0$ 。令 $\epsilon_2 = e_1 = T - \hat{T}$,有

$$T_c = k_2 T_0 + l_2 + T - \hat{k}_1 T_0 - \hat{l}_1 \tag{9}$$

为求 a 值,式(9)两边对 T_0 求导(注意 θ 也是 T_0 的函数),整理得

$$\frac{1 - \theta^a}{\theta^a} \cdot \frac{dT}{dT_0} - \frac{aT}{\theta^a T_0} + \hat{k}_1 - k_2 = 0 \tag{10}$$

取 $\frac{dT}{dT_0} = \hat{k}_1, k_2 = 0$, 则有 $a = \frac{\hat{k}_1 T_0}{T}$ 。当 T 与

T_0 取一段时间内的测试值的平均值 $\bar{T}$ 与 $\bar{T}_0$ 时,如式(11)所示,可以给出 a 的值,能使得 T_c 与 T_0 线性相关系数非常小,从而使 T_c 与 T_0 几乎线性无关。

$$a = \frac{\hat{k}_1 \bar{T}_0}{\bar{T}} \tag{11}$$

式中 $\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \bar{T}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{0,i}; \hat{k}_1$ 是 T 对 T_0 线性回归直线的斜率。

1.2 经验折合法的折合步骤

一般情况下,同一工况燃气轮机气路各截面温度参数与环境温度正相关,压力与环境压力正

相关,流量、功率、燃油流量等参数与环境温度和环境压力均呈一定的相关性。若相关系数或偏相关系数显示某监测参数 X 与环境温度 T_0 和环境压力 p_0 均高度相关,则采用以下折合步骤:

1) 先对环境温度折合。令监测参数 X 的折合值 X_{c1} 为

$$X_{c1} = \frac{X}{\theta^a} \tag{12}$$

$$a = \frac{\hat{k}_1 \bar{T}_0}{\bar{X}} \tag{13}$$

式中 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \bar{T}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{0,i}; \hat{k}_1$ 是 X 对 T_0 线性回归直线的斜率; X_i 是 X 的第 i 次测量值; $T_{0,i}$ 是 T_0 的第 i 次测量值。

2) 计算折合值 X_{c1} 与环境压力的相关系数,若相关系数的绝对值小于某一较小值 ϵ (本文取 0.05),即 $|\rho(X_{c1}, p_0)| < \epsilon$,则折合过程结束。否则,对环境压力 p_0 折合,令监测参数 X 的折合值 X_{c2} 为

$$X_{c2} = \frac{X_{c1}}{\delta^b} \tag{14}$$

$$b = \frac{\hat{k}_2 \bar{p}_0}{\bar{X}_{c1}} \tag{15}$$

式中 $\bar{X}_{c1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{c1,i}, \bar{p}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{0,i}; \hat{k}_2$ 是 X_{c1} 对 p_0 线性回归直线的斜率; $X_{c1,i}$ 是 X_{c1} 的第 i 个值; $p_{0,i}$ 是 p_0 的第 i 次测量值。

3) 计算折合值 X_{c2} 与环境温度的相关系数,若 $|\rho(X_{c2}, T_0)| < \epsilon$,则折合过程结束。否则,则重复步骤 1)和步骤 2),直至折合值 X_c 与环境温度和环境压力的相关系数均小于值 ϵ 。过程总的折合式为

$$X_c = \frac{X}{\theta^{a_1+a_2} \delta^{b_1+b_2}} \tag{16}$$

式中 a_1, b_1, a_2, b_2 是重复步骤 1)和步骤 2)求得的修正指数。

1.3 关于经验折合方法的几点说明

式(4)和式(11)所完成的折合过程其本质是通过将 T 值关于 T_0 的分布进行拉伸和旋转,将回归直线旋转为斜率为 0 的水平状态的过程。根据折合式(4)可知,本折合方法是将目标参数乘以一个缩放系数;若式(11)求得 $a > 0$,当 T_0 大于 288.15 K 时,折合式是将 T_0 值乘以一个缩小系数, T_0 越大,缩小系数越大;当 T_0 小于 288.15 K 时,折合式将 T_0 值乘以一个放大系数, T_0 越小,放大系数越大。 $a < 0$ 时则情况相反。

由于本折合方法求指数 a 、 b 时取的是一段时间内的燃机性能参数、环境温度和環境压力的均值,运行中燃气轮机会逐步发生性能退化,性能参数会发生变化,环境温度和環境压力也是时刻变化的,故不同时间段内求的指数很可能是不同的。但任一时间段内本方法进行的参数的折合值均可以保证消除该段时间内环境温度和環境压力的影响,进而可以分析该段时间内参数的变化趋势。

当然本方法可以推广到其他参数对与其相关的参数的折合,用以消除相关参数波动对目标参数的影响。

2 低压涡轮出口温度实验验证

以船用三轴燃气轮机为例分析。该型机燃气发生器为双转子,高压涡轮驱动高压压气机,低压涡轮驱动低压压气机,动力涡轮单一根轴输出功率。在低压涡轮出口周向布有 16 个热电偶测其温度,考虑一定的气流旋转角度,可间接反映环管型燃烧室燃烧情况。该燃气轮机运行控制策略是:当入口空气温度低于 300.15 K 时,控制燃油流量保持功率不变,此时随入口空气温度升高,功率不变,而高压轴转速上升;高于 300.15 K 时,采用燃烧室出口温度(由低压涡轮出口温度表征)低于限制值的策略,此时随入口空气温度升高,功率下降,而高压轴转速保持恒定。2000 h 试验运行中入口空气温度未超过 300.15 K,低压涡轮出口温度也未出现超限的情况。

热电偶测得的 16 个低压涡轮出口温度平均值记为 T_6 。图 1 为 2000 h 试验中额定功率工况下 T_6 的变化趋势。相关系数 $\rho(T_6, T_0) = 0.6161, \rho(T_6, p_0) = -0.04, T_6$ 与 T_0 显著正相

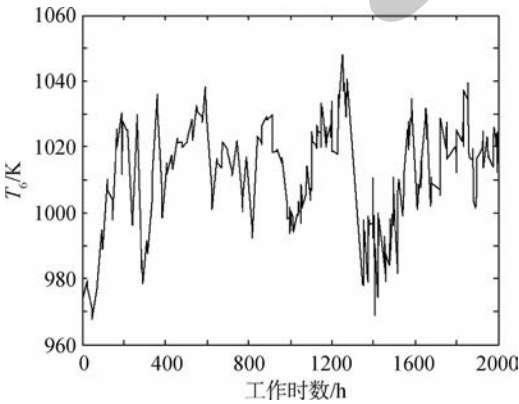


图 1 2000 h 中 T_6 变化趋势

Fig. 1 Variation trend of T_6 during 2000 working hours

关,而与 p_0 几乎不相关,故 T_6 只需对 T_0 进行折合。

T_6 对 T_0 作线性回归分析,最小二乘法估计回归系数 $\hat{k}_1 = 2.0122, \hat{l}_1 = 439.5$,得回归直线为 $\hat{T}_6 = 2.0122T_0 + 439.5$,如图 1 所示。图 2 同时显示了 $a = 1$ 时乘以温度修正系数 $C_T = 1 - 4.09 \times 10^{-4}(T_0 - 288.15)$ 的常规折合值 T_{6c}^* 的线性回归 $\hat{T}_{6c}^* = -1.984T_0 + 1591.1$ 。图 3 显示了 T_6 对 T_0 的线性回归后的残差 e_1 在 2000 h 中的变化趋势。残差 e_1 是消除环境温度影响后 T_6 本身的变化趋势。按式(3)进行的常规折合,相关系数 $\rho(T_{6c}^*, T_0) = -0.6025$,该折合并没有消除 T_0 对 T_6 的影响。图 4 所示常规折合后 T_{6c}^* ($a = 1$)

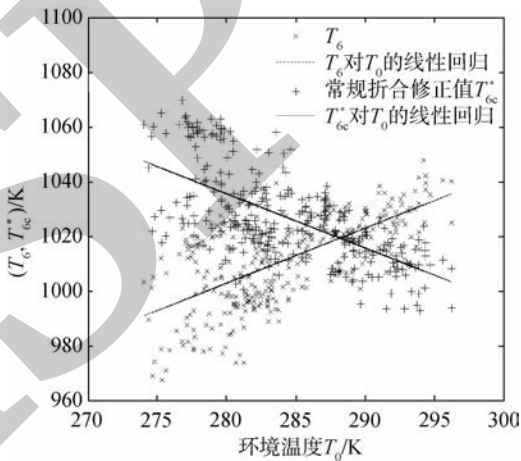


图 2 T_6 和 T_{6c}^* 对 T_0 的线性回归($a=1$)

Fig. 2 Linear regressions of T_6 and T_{6c}^* against T_0 ($a=1$)

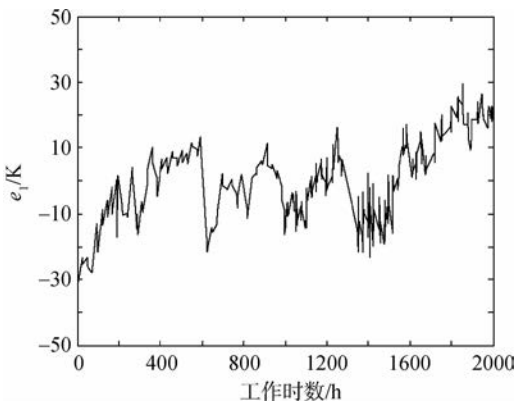


图 3 T_6 对 T_0 的线性回归后的残差 e_1 在 2000 h 中的变化趋势

Fig. 3 Variation trend of residual errors e_1 of the linear regression of T_6 against T_0 during 2000 working hours

在 2000 h 中的变化趋势,与图 3 残差 e_1 的变化趋势也不一致。

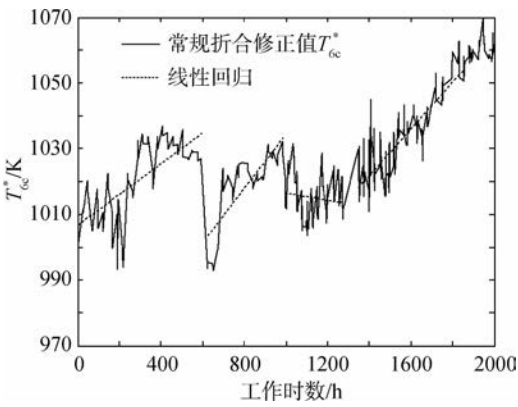


图 4 常规折合修正值 T_{6c}^* ($a=1$) 在 2000 h 中的变化趋势

Fig. 4 Variation trend of regular correction value T_{6c}^* ($a=1$) during 2000 working hours

由实验数据求得 $\bar{T}_6=1011.4\text{K}$, $\bar{T}_0=284.2\text{K}$, 由式(11)求得 $a=0.5654$, 则本文提出的折合公式为 $T_{6c}=\frac{T_6}{\theta^{0.5654}}$ 。当然如果由另一组实验数据求得的 a 可能不同。图 5 显示了 T_{6c} 对 T_0 的线性回归 $\hat{T}_{6c}=0.0008T_0+1019.1$ 。如图 5 所示, 折合值 T_{6c} 对 T_0 的线性回归斜率约为 0, 相关系数 $\rho(T_{6c}, T_0)=0.0003$, 表明 T_0 和 T_{6c} 几乎不存在线性关系, 说明该方法标准化后基本上消除了环境温度变化对低压涡轮出口温度的影响。图 5 同时显示了 T_6 值和折合值 T_{6c} 关于 T_0 的分布和回归直线, 表明本经验折合法是将 T_6 乘以一个

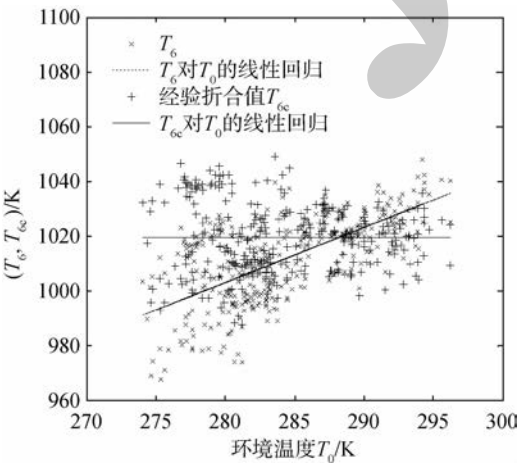


图 5 T_6 和 T_{6c} 对 T_0 的线性回归 ($a=0.5654$)

Fig. 5 Linear regressions of T_6 and T_{6c} against T_0 ($a=0.5654$)

缩放系数,对 T_6 值关于 T_0 的分布进行拉伸和旋转,将回归直线旋转为斜率为 0 的水平状态的过程。

图 6 显示了标准化折合后 T_{6c} ($a=0.5654$) 在 2000 h 中的变化趋势。对比图 2 和图 5, 标准化折合后的 T_{6c} 变化趋势与 T_6 对 T_0 线性回归后的残差 e_1 变化趋势完全一致, 再次证明 T_0 对 T_6 的影响基本消除。进而可以对 T_{6c} 分析。图 6 与图 1 相比, 折合后温度变化趋势更清晰。在本例中, 由于运行中结垢等导致压气机、涡轮流通面积减小而使得燃气轮机性能退化, 进而使得 T_{6c} 值阶段性升高, T_{6c} 值下降的时刻则对应了燃气轮机清洗的时刻。

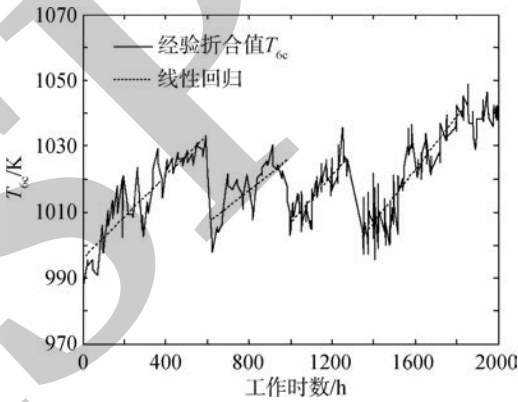


图 6 经验折合值 T_{6c} ($a=0.5654$) 在 2000 h 中的变化趋势

Fig. 6 Variation trend of empirical correction value T_{6c} ($a=0.5654$) during 2000 working hours

3 功率折合方法验证

因本文试验数据取自额定工况,环境温度没有超过 300.15 K, 功率随环境温度波动变化不大。测试数据显示相关系数 $\rho(P, T_0)=-0.1097$, $\rho(P, p_0)=0.1965$, 功率 P 与环境温度 T_0 呈负弱相关性, 与环境压力 p_0 呈正弱相关性。为了完全消除环境参数的影响, P 先对 T_0 进行折合, $a=-0.0444$, 折合值 P_{c1} 与 p_0 的相关系数为 $0.1714>\epsilon$ (ϵ 取 0.05), 则 P_{c1} 继续对 p_0 进行折合, $b=0.1975$, 折合值 P_{c2} 与 T_0 的相关系数为 $0.0410<\epsilon$, 折合过程结束。本过程的功率

折合公式为 $P_{c2}=\frac{P}{\theta^{-0.0444}\delta^{0.1975}}$ 。表 1 列出了折合过程中每步折合值与 T_0 和 p_0 的相关系数。本例只需前两步即达到了折合要求, 为了说明问题,

表 1 列出了 4 次迭代折合的结果,相应的功率折合公式为 $P_{c4} = \frac{P}{\theta^{-0.0444+0.0163\delta} \delta^{0.1975+0.0106\phi}}$ 。经过 4 次折合,功率折合值与环境温度和环境压力的相关系数均非常小,折合消除环境参数的影响比较彻底。

表 1 功率折合值与环境温度和环境压力的
相关系数

Table 1 Correlation coefficient between power
correction value and environmental temperature
and pressure

折合指数	折合值	$\rho(P_c, T_0)$	$\rho(P_c, p_0)$
$a_1 = -0.0444$	P_{c1}	-0.0003	0.1714
$b_1 = 0.1975$	P_{c2}	0.0410	-0.0004
$a_2 = 0.0163$	P_{c3}	0.0001	0.0093
$b_2 = 0.0106$	P_{c4}	0.0023	-2.7×10^{-5}

4 结 论

传统的燃气轮机性能参数标准化折合即相似定理下的标准化模型是一种理想状态,由于受到大气温度、大气压力、传感器灵敏度等其他因素的影响,使得理想标准化折合模型精度下降。本文提出了一种基于经验的参数折合方法,利用对环境温度(或环境压力)回归直线的斜率、环境温度(或环境压力)均值和被折合参数均值确定折合指数,对燃气轮机性能参数进行折合,以消除环境温度和压力的影响,方便进行状态评估。该方法折合过程本质是将性能参数乘以一个缩放系数,对被折合性能参数关于环境温度(或环境压力)的分布进行拉伸和旋转,将回归直线旋转为斜率为 0 的水平状态的过程。

通过两个实例验证表明,本文提出的折合方法能够有效消除环境温度和环境压力对燃气轮机气路中性能参数的影响,折合后的参数与环境温度和环境压力均不相关,其变化趋势与该参数对环境温度(或环境压力)线性回归后的残差一致,更能反映燃气轮机本身的状态,便于进一步进行燃气轮机状态评估,分析状态变化趋势和预警。

参考文献:

[1] VOLPONI A J. Gas turbine parameter corrections[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1999, 121(10):613-621.
[2] 刘大响. 大气湿度对发动机性能的影响及其修正方法[J].

涡轮试验与研究, 1989, 2(3):9-16.
LIU Daxiang. The influence of atmospheric humidity on engine performance and its correction method [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1989, 2(3):9-16. (in Chinese)
[3] ASSADI M, MESBHI E, TORISSON T, et al. A novel correction technique for simple gas turbine parameters[R]. ASME Paper 2001-GT-0009, 2001.
[4] KURZKE J. Model based gas turbine parameter corrections[R]. ASME Paper GT2003-38234, 2003.
[5] CASONI A, COLITTO N, ELLIOTT J, et al. Corrected parameter control for two shaft gas turbines[R]. ASME Paper GT2004-53888, 2004.
[6] MATHIOUDAKIS K. Gas turbine test parameters corrections including operation with water injection[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(4): 334-341.
[7] VEER T, HAGLEROD K K, BOLLAND O. Measured data correction for improved fouling and degradation analysis of offshore gas turbines[R]. ASME Paper GT2004-53760, 2004.
[8] 骆广琦, 桑增产, 王如根, 等. 航空燃气涡轮发动机数值仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 97-123.
[9] KYRITSIS V E, PILIDIS P. An analytical approach for gas turbine parameter corrections[R]. ASME Paper GT2008-50716, 2008.
[10] LI B, GROSS M J, SCHMITT T P. Gas turbine gas fuel composition performance correction using wobbe index [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133(10):104501. 1-104501. 4.
[11] 黄开明, 黄金泉, 任丹, 等. 涡轴发动机性能参数的等效换算[J]. 航空动力学报, 2010, 25(9):2036-2040.
HUANG Kaiming, HUANG Jinquan, REN Dan, et al. Performance parameter equivalent correction of turbo-shaft engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(9):2036-2040. (in Chinese)
[12] 马前容, 吴虎, 刘涛, 等. 涡轴发动机高空台模拟偏差影响的性能修正方法[J]. 航空动力学报, 2013, 28(9):1997-2002.
MA Qianrong, WU Hu, LIU Tao, et al. Correction method of influence of simulation bias oil performance of turboshaft engine test in ATF[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(9):1997-2002. (in Chinese)
[13] 钟诗胜, 崔智全, 王体春, 等. 基于偏差值的航空发动机参数标准化修正模型[J]. 航空动力学报, 2012, 27(11): 2592-2597.
ZHONG Shisheng, CUI Zhiquan, WANG Tichun, et al. Corrected standardization model of aero-engine parameter based on deviation[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(11):2592-2597. (in Chinese)
[14] BERDANIER R A, SMITH N R, FABIAN J C, et al. Humidity effects on experimental compressor performance-corrected conditions for real gases[J]. Journal of Turbo-

machinery,2015,137(10):031011. 1-031011. 10.

[15] MADSEN S,BAKKEN L E. Gas turbine fouling offshore: correction methodology compressor efficiency[R]. ASME Paper GT2017-63025,2017.

[16] 韦海,曹千驹. GTCP131-9A 辅助动力装置性能参数换算公式研究[J]. 航空动力学报,2018,33(1):77-86.

WEI Hai, CAO Qianju. Study on performance parameter correction formula of GTCP131-9A APU[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(1):77-86. (in Chinese)

[17] URBAN L A,VOLPONI A J. Mathematical methods of relative engine performance diagnostics[R]. SAE Transactions, Technical Paper 922048,1992.

[18] 崔智全. 民航发动机气路参数偏差值挖掘方法及其应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

CUI Zhiquan. Civil aeroengine gas path parameter deviation mining method with application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2013. (in Chinese)

(编辑:叶 青)