

船用三轴燃气轮机性能退化指标体系的构建

刘东风^{1,2}, 房友龙^{1,2}, 刘永葆¹, 余良武^{1,2}, 邓志明³

- (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;
3. 海军士官学校 机电系, 安徽 蚌埠 233012)

摘 要:从燃气轮机整体性能、气路部件、滑油系统、结构振动等方面,较为全面地构建了船用三轴燃气轮机性能退化指标体系。提出了表征整机性能退化的排温裕度、热损失指标、功率不足指标、额外热功比、热效率比等指标。明确了表征气路部件退化的退化因子的概念,提出了绝热效率退化因子、流量退化因子、喘振裕度、热电偶分散度等表征压气机、涡轮、燃烧室等气路部件退化的指标。提出了构建数学模型、统计三限值法、小偏差法和卡尔曼滤波等退化指标的求解和分析方法,并进行了实例分析。为进一步开展燃气轮机性能退化状态评估构建了基本框架。

关 键 词:燃气轮机;性能退化;指标体系;退化因子

中图分类号:TK478

文献标志码:A

文章编号:1009-2889(2019)01-0026-08

燃气轮机在使用过程中,腐蚀或结垢导致的叶片表面的变化、磨损导致的叶片表面形状和叶顶间隙的改变、外来物造成的通流部件的损伤、热变形、燃油喷嘴堵塞等均会导致气路几何参数与新机偏离,使得压气机、涡轮等部件的流量和效率发生变化,导致燃气轮机的性能发生退化,燃油消耗增加、部件效率下降、使用寿命下降,直到不稳定工作甚至完全失效^[1-2]。

压气机和涡轮性能的退化主要有三个影响因素:叶顶间隙的增加,叶片几何形状变化和叶片表面质量的变化。前两个因素通常导致不可恢复的性能退化,第三个因素可以通过清洗压气机而至少部分恢复^[3]。一般来说,退化的压气机喘振或失速裕度也会降低^[4]。燃烧系统退化会潜在地导致燃烧室出口温度分布的变化。进气过滤器随着时间增加逐渐发生结垢,导致进气系统压力损失增加,进而降低燃气轮机功率和效率。

Kurz 等^[5]综述了压气机、涡轮、燃烧室等性能退化机理,并研究了性能退化是如何发展并影响燃气轮机压气机工作点、全负载和部分负载下的性能

特性及可测的工作参数^[6]。Khani 等^[7]综述了性能退化机理和对燃气轮机各部件的影响。Zachary^[8]论述了结垢、磨损、间隙增大等内部因素和燃油质量、水等外部因素对压气机、涡轮、燃烧室退化的影响,并提出了燃油质量处理、提高进气过滤装置效果、在线和离线清洗等降低性能退化的方法。Zwebek 等^[10]用绝热效率和流量变化表征压气机和涡轮结垢、磨损、外来物损伤等,利用性能软件仿真研究压气机、涡轮单独和同时发生结垢、磨损等退化对燃气轮机热效率、功率、排气流量和排气温度的影响,并分析了退化对燃气-蒸汽联合循环的影响。Hanachi 等^[12]基于物理模型,利用排温、焓值、热效率和功率等几个参数提取出单轴燃气轮机性能退化指标,采用粒子滤波、模糊神经网络等方法,对额定功率 5MW 的单轴燃气轮机两次大修期间从 2008 年至 2011 年 38 个月运行数据进行了分析。

到目前为止,系统阐述燃气轮机性能退化指标体系的文献还未看到。本文旨在前人研究的基础上,成体系的提出船用三轴燃气轮机性能退化的指标,及指标的计算方法和阈值确定方法,为系统研究

收稿日期:2018-09-04 改稿日期:2018-11-18

作者简介:刘东风(1959—),男,教授,博士,研究方向为舰艇装备状态监测与故障诊断,E-mail:Zhikongshi@163.com;通讯作者:房友龙(1986—),男,博士生,研究方向为舰艇主动力装置状态监测与故障诊断,E-mail:dragon686@163.com。

燃气轮机性能退化打下基础。

1 性能退化指标的建立

本文以某型船用三轴燃气轮机为例进行阐述,其示意图如图1所示。图1和下文中LC、HC、B、HT、LT、PT分别表示低压压气机、高压压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮和动力涡轮。文中字母各下标数字对应图1中标注的相应截面。

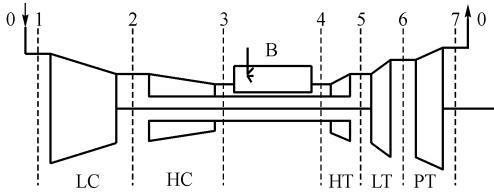


图1 三轴燃气轮机示意图

1.1 整机性能退化指标

1.1.1 排温裕度

随着部件性能退化,燃气轮机转化利用的热能不可能像健康状态时一样多,为获得同样推力必须增大供油量,从而导致燃气发生器排温(即低压涡轮出口温度 T_6)和动力涡轮排温上升。受部件材料温度的限制,排温有一个限制值。针对本文研究的燃气轮机,由于 T_6 设定了阈值 $T_{6,threshold}$,定义排温裕度(exhaust gas temperature margin, M_{egt})为

$$M_{egt} = T_{6,threshold} - T_6/\theta^a \quad (1)$$

式中: $\theta = T_0/288.15$, a 为消除环境温度 T_0 影响的折合指数^[17], $a = \hat{k}_1 \bar{T}_0/\bar{T}_6$, $\bar{T}_6$ 和 $\bar{T}_0$ 分别为某工况下一段时间内 T_6 和 T_0 测量值的平均值, $\hat{k}_1$ 为 T_6 对 T_0 线性回归直线的斜率。 M_{egt} 可以反映燃气发生器性能退化趋势。

1.1.2 热损失指标

对于相同的工况,在动态模型里考虑燃气轮机进口温度、进口压力、燃油流量等控制条件,低压涡轮出口温度升高的量级主要取决于燃气发生器性能退化水平。定义热损失指标(heat loss index, I_{hl})为低压涡轮出口温度与模型期望值的差与设计点温度之比,即

$$I_{hl} = (T_6 - T_{6,exp})/T_{6d} \quad (2)$$

式中: T_6 是实时监测值, $T_{6,exp}$ 是与监测值在同样环境参数和控制条件下,由健康燃气轮机模型求得的期望值, T_{6d} 是额定工况设计点温度值。 I_{hl} 可以反映燃气发生器的性能退化水平。

1.1.3 功率不足指标

由于性能退化,同样的燃油流量,功率一般比健

康状态的燃气轮机功率低,功率下降的量级主要取决于燃气轮机性能退化水平。定义功率不足指标^[13](power deficit index, I_{pd})为功率不足量与设计点功率之比,即

$$I_{pd} = (N_{exp} - N)/N_d \quad (3)$$

式中: N 为实际输出功率; N_{exp} 为由实测值 T_6 求得的理论输出功率; N_d 为设计额定功率。

1.1.4 额外热功比

当产生一定功率时,性能退化得越厉害,导致能量损耗得越多,产生更热的排气。这意味着实际排气的焓与模型求得的焓的差值可用来表征性能的退化。定义额外热功比^[14](excess heat ratio, R_{eh})为排气损失的额外的热量与功率的比值,即

$$R_{eh} = (H_{pto} - H_{pto,m})/N_d \quad (4)$$

式中: H_{pto} 和 $H_{pto,m}$ 分别为动力涡轮出口焓值和模型理论焓值。

1.1.5 热效率比

定义热效率比^[15](thermal efficiency ratio, R_{te})为真实的热效率与相同运行条件下模型预测的热效率之比,即

$$R_{te} = \eta_r/\eta_m \quad (5)$$

$$\eta_r = N/(G_f \cdot H_u) \quad (6)$$

$$\eta_m = N_{exp}/(G_{fm} \cdot H_u) \quad (7)$$

$$G_{fm} \cdot H_u - G_f \cdot H_u = N_{exp} - N \quad (8)$$

式中: η_r 是实测值求得的热效率, η_m 是模型预测的热效率; N 为实际输出功率, N_{exp} 为由实测值 T_6 求得的理论输出功率; G_f 是实际燃油流量, G_{fm} 是理论输出功率对应的理论燃油流量; H_u 是燃油低热值。热效率比 R_{te} 的下降反映了燃气轮机部件内部的性能退化。

1.2 气路部件性能退化指标

1.2.1 退化因子

参考气路故障诊断中故障因子^[18]的定义,本文引入退化因子的概念。如图2所示,燃气轮机在正常状态点A的某部件工作特性为 $x_A = f(y_A)$,其中 $x_A = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为该部件的特性参数, $y_A = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ 为可测的工作参数。

当燃气轮机的某一特性或某些特性发生性能退化时,燃气轮机的工作点将发生变化。如果发生变化的特性是由其它部件的特性变化引起,而自身特性未发生变化,则新的工作点将只沿正常特性线(曲线1)移动。如果该部件自身特性也发生了变化,则其工作点将移动到图中的B点。变化了的真

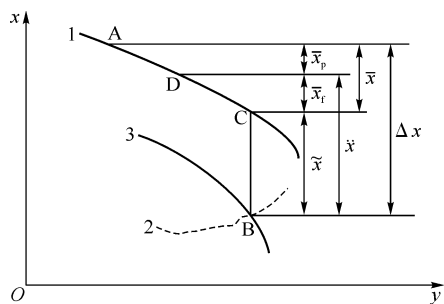


图2 性能退化时部件性能参数的工作点位移与特性线平移
实的部件特性线(图中曲线2)是不知道的,但可以通过将曲线1特性线平移至B点(即曲线3)而完成性能退化评估任务。

燃气轮机性能退化后,部件性能参数会因自身部件尺寸变化而变化,也会因其他部件尺寸变化而重新匹配后变化。部件特性参数的变化有三部分:

$$\Delta x = \bar{x}_p + \bar{x}_f + \tilde{x} \quad (9)$$

式中: $\bar{x}_p$ 是单纯性工作点位移,是自身特性不变的情况下,匹配其他部件特性变化而产生的变化(图2中由A到D); $\bar{x}_f$ 是退化性工作点位移,是自身特性变化时沿正常特性曲线的工作点位移(图2中由D到C); $\tilde{x}$ 是特性线平移,是自身特性变化而产生的特性线的平移量(图2中BC段)。如果燃气轮机部件发生性能退化,即部件尺寸发生了变化,也就是部件特性发生了变化,则 $\tilde{x}$ 必不为0。

称 $\tilde{x}$ 为第一类退化因子, $\tilde{x} = \bar{x}_f + \tilde{x}$ 为第二类退化因子,均是气路部件尺寸变化即性能退化的表征。本文采用第一类退化因子。

压气机和涡轮性能退化指标:绝热效率退化因子 $\tilde{\eta}$,折合流量退化因子 $\tilde{G}$ 。

燃烧室性能退化指标:燃烧效率退化因子 $\tilde{\eta}_B$,总压恢复系数退化因子 $\tilde{\xi}_B$ 。

进气和排气系统性能退化指标:进气压力损失退化因子 $\tilde{\xi}_{in}$,排气压力损失退化因子 $\tilde{\xi}_{ex}$ 。

1.2.2 喘振裕度

在运行过程中,应保证燃气轮机的工作点离压气机喘振工作线有足够距离,以保证有足够大的稳定裕度,即喘振裕度(surge margin),其定义为:

$$K = \left(\frac{\pi_s}{G_s} \cdot \frac{G_0}{\pi_0} - 1 \right) \times 100\% \quad (10)$$

式中: π_0 、 G_0 为工作点的压比和流量, π_s 、 G_s 为对应的等转速线与喘振边界线的交点的压比和流量。

1.2.3 热电偶温度分散度

在低压涡轮出口处周向布有16个热电偶温度传感器。热电偶温度分散度为热电偶读数之差。定义热电偶温度1#分散度 S_1 为热电偶最高读数与最低读数之差,2#分散度 S_2 为热电偶最高读数与次低读数之差,3#分散度 S_3 为热电偶最高读数与第3低读数之差。热电偶温度分散度允许值为 S_a ,它是热电偶平均值和低压压气机出口温度的函数,即

$$S_a = k_1 T_6^* - k_2 T_3 + b \quad (11)$$

式中: T_6^* 指18个热电偶读数中除去野点(比第2高点低278℃的所有测点)、再除去最高点和最低点后的平均值, T_3 为低压压气机出口温度。本文取系数 $k_1 = 0.1$, $k_2 = 0.08$,温度补偿值取 $b = 33.3$ 。

通过比较 S_1 、 S_2 和 S_3 (下文统称 S)和 S_a ,可综合反映燃烧室燃烧部件、燃料供给系统和高压涡轮静叶等的状态^[19]。当分析同一工况时,负荷保持定值,则 S 只与燃烧室燃烧情况、燃料供给系统、涡轮气流通路和环境温度有关。为消除环境温度 T_0 的影响,定义折合分散度为

$$S_c = S/\theta^a \quad (12)$$

式中: $\theta = T_0/288.15$, a 即式(1)中的 a 值。

1.3 滑油系统性能退化指标

(1) 滑油污染和衰败指标:污染度、粘度、含水量、氧化水平、光谱污染元素浓度、光谱添加剂元素浓度等。

(2) 燃气轮机磨损指标:光谱金属磨粒浓度、光谱金属磨粒浓度变化梯度、PQ指数、直读铁谱DL和DS值、磁性金属屑信号等。可反映燃气轮机内部轴承、齿轮等部件的磨损情况。

(3) 滑油滤器压差。压差下降表明旁通状态或需要更换滤器。

1.4 结构振动指标

(1) 振动速度有效值。在压气机、动力涡轮机匣上装有在线振动加速度传感器,可实时测量对应部件的振动速度有效值,反应相应部件的振动烈度。

(2) 临界转速。当转子转动时,会出现横向干扰,在某些转速下还会引起系统强烈振动(即共振),出现这种情况时的转速就是临界转速。临界转速的大小与轴的结构、粗细、叶轮质量及位置、轴的支承方式等因素有关。随着燃气轮机的使用,叶片质量会因磨损、断裂或结垢而发生变化,轴承也可能会出现疲劳磨损,故而高压轴和低压轴转子的临界转速会发生变化。

2 性能退化指标的计算与阈值的确定

2.1 数学模型与回归分析

利用压气机、涡轮特性曲线拟合建立部件特性关系式,结合部件进出口截面参数关系方程、流量连续方程、功率平衡方程等部件匹配关系式,在一定的控制条件下建立数学模型,由式(13)描述,得相同环境和控制条件下的健康期望值,与实际值比较进而可求取热损失指标等整机性能退化指标。各整机性能退化指标可经数据平滑处理后,回归分析求得其变化趋势。具体可参考文献[21]。

$$F(T_0, P_0, G_t, n_1, n_h, T_6, T_7, P_2, P_3, P_6, P_7, N) = 0 \quad (13)$$

2.2 统计三限值法

在没有相关标准的情况下,指标的阈值如热电偶温度分散度、滑油磨损浓度和梯度阈值可以由统计三限值法求得。

警告阈值:

$$\begin{aligned} x_{\text{warning}} &= \bar{X} + 2\sigma \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i + 2 \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \end{aligned} \quad (14)$$

异常阈值:

$$\begin{aligned} x_{\text{threshold}} &= \bar{X} + 3\sigma \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i + 3 \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\bar{X}$ 是某指标 n 个值 x_i 的平均值, σ 为 n 个值 x_i 的标准差。

2.3 小偏差法

退化因子可采用小偏差法求解。由燃气轮机健康数学模型,即式(13),通过特性线平移的方法引入退化因子构建退化模型,取小偏差可得

$$B\delta y = C\delta x \quad (16)$$

式中: $\delta y = \Delta y / y_0$ 为可测的工作参数的相对小偏差向量, $\delta x = \Delta \tilde{x} / x_0$ 为退化因子的相对小偏差向量。

$$\delta y = B^{-1} C \delta x = H \delta x \quad (17)$$

式中: B^{-1} 为 B 的广义逆, H 称为影响系数矩阵,其元素 H_{ij} 的意义是退化因子 δx_j 每变化1个单位而其它退化因子不变时测量参数 δy_i 的变化量。则有

$$\delta \tilde{x} = H^{-1} \delta y \quad (18)$$

式中: H^{-1} 为 H 的广义逆,称为退化系数矩阵。由测量参数的相对小偏差向量 δy ,可求得退化因子的相对小偏差向量 $\delta \tilde{x}$ 。具体求解方法可见参考文献[18]。

2.4 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波算法是基于燃气轮机退化数学模型转化而得的状态空间模型,即部件特性方程和参数联系方程组经某方法(如小扰动法^[23])转化为状态更新方程 F_t 和测量方程 H_t ,如式(19)所示,进而利用线性或非线性的卡尔曼滤波递推公式求解。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = F_t(x(t), u(t), w(t)) \\ y(t) = H_t(x(t), u(t), v(t)) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $x(t)$ 为退化因子和状态参数向量, $u(t)$ 为控制参数向量, $y(t)$ 为测量参数向量, $w(t)$ 为状态噪声, $v(t)$ 为测量噪声。设计好状态和噪声初始值,结合实测数据,该方法可实现对效率、流量等退化因子的实时评估。具体方法可见参考文献[24]。

3 实例分析

某船用三轴燃气轮机历时2年多进行了2 000 h性能退化试验,期间在595 h、986 h、1 274 h进行了三次水清洗。监测参数有环境温度 T_0 、大气压力 P_0 、低压轴转速 n_l 、高压轴转速 n_h 、PT转速 n_{pt} 、LC出口压力 P_2 、HC出口压力 P_3 、LT出口压力 P_6 、LT出口温度 T_6 、PT出口温度 T_7 、输出功率 N 、燃油流量 G_t 等。下面以气路数据进行分析,以下数据均取自额定功率工况。

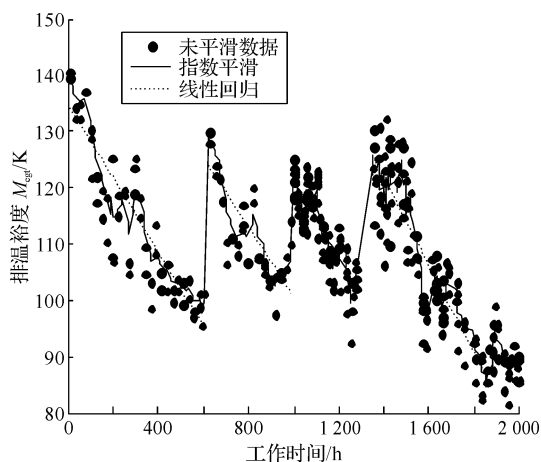
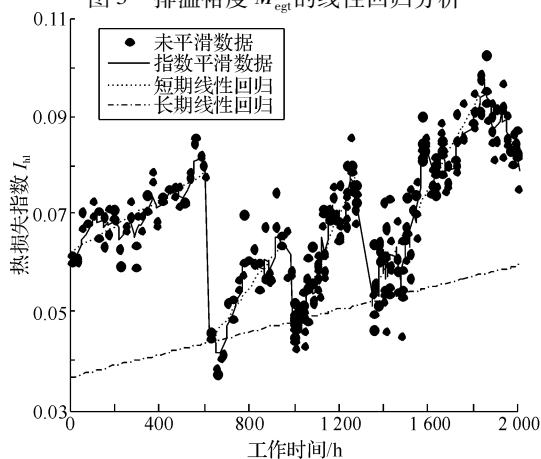
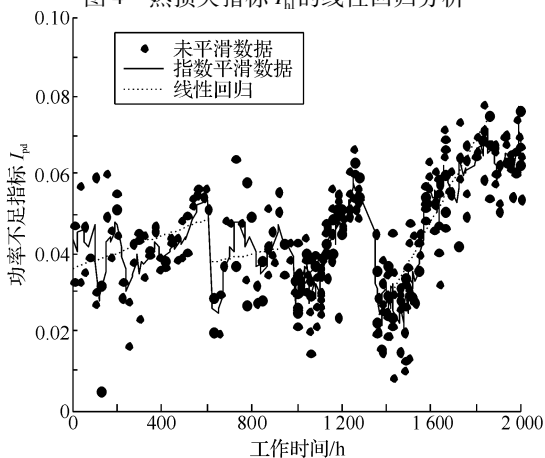
3.1 整机性能指标计算

由燃气轮机数学模型求得排温裕度 M_{egt} 、热损失指标 I_{hl} 、功率不足指标 I_{pd} 、额外热功比 R_{eh} 、热效率比 R_{te} 分别如图3~图7所示。0~595 h、624~986 h、995~1 274 h和1 348~1 856 h四个时间段 I_{hl} 、 I_{pd} 和 R_{eh} 均呈逐步上升趋势, M_{egt} 和 R_{te} 呈逐步下降趋势。

由图3~图7可知每经一次离线清洗,燃气轮机的性能就会明显得到恢复,而随后的运行中性能会逐渐下降。可知离线清洗可以改善结垢等引起的性能退化水平。

3.2 热电偶温度分散度计算

图8显示了额定工况下折合分散度 S_{1c} 、 S_{2c} 、 S_{3c} 在2 000 h内的变化趋势,并用三限值法计算了 S_{1c} 的警告和异常阈值。图8最上方虚线是由式(11)

图3 排温裕度 M_{egt} 的线性回归分析图4 热损失指标 I_h 的线性回归分析图5 功率不足指标 I_{pd} 的线性回归分析

求得的允许分散度 S_a 。 S_{1c} 、 S_{2c} 、 S_{3c} 均未超过允许分散度 S_a 。异常阈值接近于 S_a 。在 300 ~ 480 h 时间段 S_{1c} 接近警告阈值。可知在未知相关标准的情况下,三限值方法能有效提出警告和异常预警。

3.3 影响系数矩阵求解

由边界条件和控制条件,设定 N 、 T_0 、 P_0 不变,由三轴燃气轮机非线性模型,在各特性参数方程式

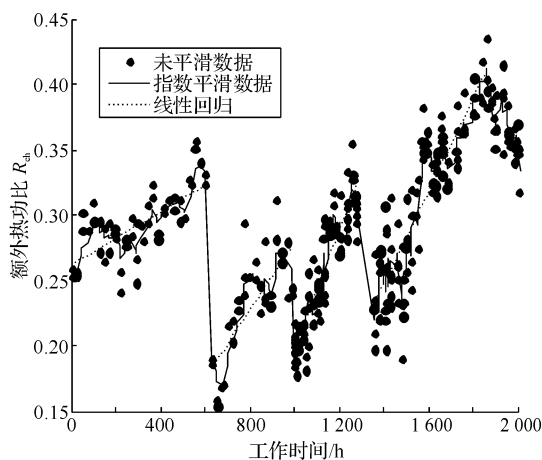
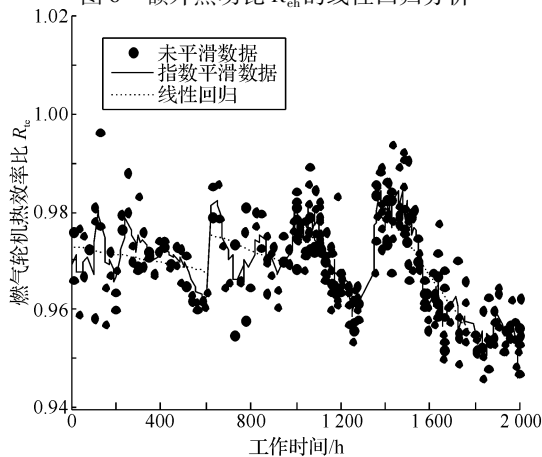
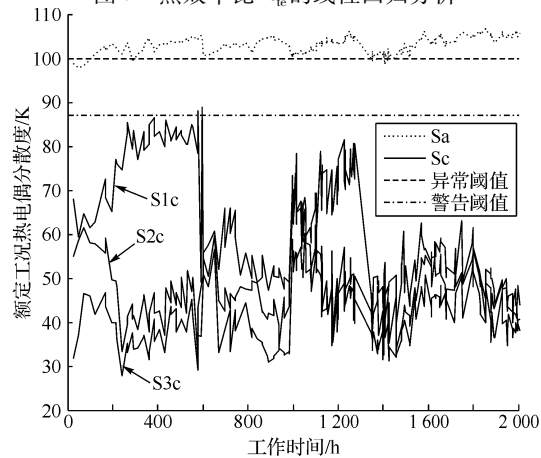
图6 额外热功比 R_{ch} 的线性回归分析图7 热效率比 R_{te} 的线性回归分析

图8 热电偶折合分散度变化趋势

中引入退化因子得到退化方程,在三个转子转速不变的条件下,采用小偏差法求得影响系数矩阵如表 1。 $\bar{G}$ 表示流量标准折合,字母下标 c 表示相应参数的标准折合值。该矩阵表达了性能参数与测量参数之间的关系。由影响系统矩阵求广义逆得退化系数矩阵。确定了健康状态的测量参数和性能参数的基准值,进而测量参数的相对小偏差向量 δy ,由式

(18)可求得退化因子的相对小偏差向量 $\delta \tilde{\mathbf{x}}$ 。通过影响系统矩阵可进一步分析测量参数的敏感性、相关性和系统的可观性,受篇幅所限,不再展开阐述。

表 1 影响系数矩阵

	$\delta \tilde{G}_{LC}$	$\delta \tilde{\eta}_{LC}$	$\delta \tilde{G}_{HC}$	$\delta \tilde{\eta}_{HC}$	$\delta \tilde{G}_{HT}$	$\delta \tilde{\eta}_{HT}$	$\delta \tilde{G}_{LT}$	$\delta \tilde{\eta}_{LT}$	$\delta \tilde{G}_{PT}$	$\delta \tilde{\eta}_{PT}$	$\delta \tilde{\eta}_B$
δT_{2c}	0.36	-0.37	-0.21	0.03	-0.13	0.05	0.00	0.03	0.01	0.04	-0.08
δT_{3c}	0.29	-0.28	0.06	-0.26	-0.39	0.11	0.06	0.03	0.00	0.05	-0.18
δT_{4c}	-0.13	-0.03	0.01	-0.04	-0.11	0.08	0.08	-0.01	0.04	-0.06	0.38
δT_{5c}	-0.07	0.04	-0.03	0.06	0.13	-0.08	-0.11	0.02	0.04	-0.01	0.18
δT_{6c}	-0.19	0.10	0.01	0.05	0.09	-0.03	0.07	-0.07	-0.04	-0.06	0.05
δT_{7c}	-0.17	0.14	-0.01	0.10	0.12	0.00	0.08	-0.06	0.08	-0.22	-0.04
δP_{2c}	1.02	-0.13	-0.66	-0.01	-0.44	0.02	0.01	0.00	0.01	-0.01	0.07
δP_{3c}	0.82	-0.02	0.01	0.00	-1.04	0.04	0.05	-0.01	0.01	-0.03	0.17
δP_{4c}	0.81	-0.03	0.02	-0.03	-1.05	0.02	0.04	-0.01	0.02	-0.05	0.22
δP_{5c}	0.85	0.00	-0.02	0.04	0.09	-0.05	-1.04	-0.01	0.01	-0.02	0.11
δP_{6c}	0.06	-0.02	0.00	-0.02	-0.03	0.01	-0.02	0.03	-0.53	-0.52	-0.03
$\delta \eta_{LC}$	-0.01	0.98	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.04
$\delta \eta_{HC}$	0.08	-0.06	-0.30	0.96	0.27	-0.03	-0.03	0.01	0.00	0.00	0.00
$\delta \eta_{PT}$	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.04	0.95	0.03
$\delta \bar{G}_{LC}$	0.96	-0.01	0.02	-0.01	0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.03
$\delta \bar{G}_{HC}$	0.12	-0.07	0.57	0.01	0.38	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.01	-0.08
$\delta \bar{G}_{PT}$	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	-0.04	0.00
$\delta \bar{G}_t$	0.45	0.13	0.00	0.09	0.11	0.00	0.08	-0.05	0.08	-0.20	-0.04

3.4 卡尔曼滤波求退化因子

不考虑传感器故障,不考虑环境温度、环境压力、燃油流量和转速的变化,取状态变量为前 4 个退

化因子 $X = [\delta \tilde{G}_{LC}, \delta \tilde{\eta}_{LC}, \delta \tilde{G}_{HC}, \delta \tilde{\eta}_{HC}]^T$, 取其它的退化因子为 0, 测量参数取 $Y = [\delta P_{2c}, \delta P_{3c}, \delta P_{6c}, \delta T_{6c}, \delta T_{7c}]^T$, 设计线性状态空间方程为

$$X(k+1) = X(k) + W(k)$$
$$Y(k) = HX(k) + V(k)$$

$W(k)$ 的方差取 $Q = 10^{-4} E_{4 \times 4}$, $V(k)$ 的方差取 $R = \text{diag}\{\sigma_{\delta P_{2c}}^2, \sigma_{\delta P_{3c}}^2, \sigma_{\delta P_{6c}}^2, \sigma_{\delta T_{6c}}^2, \sigma_{\delta T_{7c}}^2\}$, 协方差初始值取 $P_0 = \text{diag}\{31.33, 4.26, 32.96, 0.006\}$, H 取小偏差法求得故障系数矩阵的相应部分, 利用线性卡尔

曼滤波求得 2 000 h 试验中 LC 流量退化因子 $\delta \tilde{G}$ 和 HC 流量退化因子 $\delta \tilde{G}_{HC}$ 变化趋势分别如图 9 和图 10 所示。图中同样列出了 3 次清洗前后数据的线性回归值。退化因子在初始时刻和第二次清洗后出

现大于 0 的情况是因为其状态比选取的基准参考点要好。

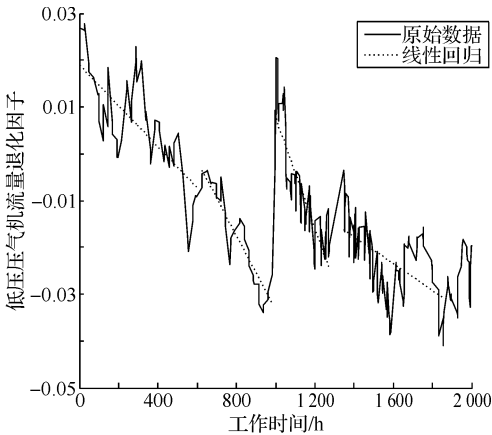


图 9 低压压气机流量退化因子变化趋势

综合图 9 和图 10 可知,LC 流量最大退化量约为 7%,HC 流量最大退化了约 11%,HC 要比 LC 流量退化得严重。第二次清洗 LC 和 HC 流量退化因子均明显增加,说明第二次清洗对压气机流量退化

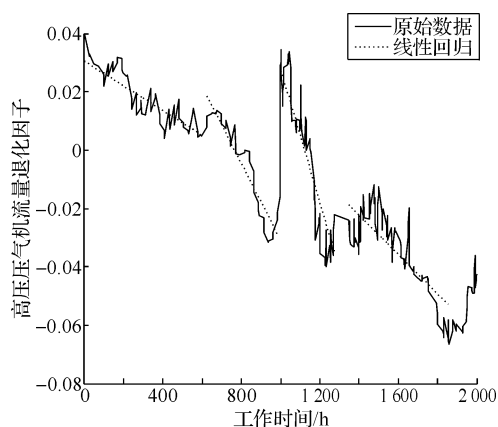


图10 高压压气机流量退化因子变化趋势

修复效果较好,第一次和第三次清洗修复不明显。

4 结束语

本文从燃气轮机整体性能、气路部件、滑油系统、结构振动等方面,较为全面地构建了燃气轮机性能退化指标体系。提出了构建数学模型、统计三限值法、小偏差法和卡尔曼滤波等退化指标的求解和分析方法,并进行了实例分析。为进一步开展燃气轮机性能退化状态评估构建了基本框架。实例分析表明:

(1) 排温裕度、热损失指标、功率不足指标、额外热功比和热效率比等指标可以有效反应燃气轮机整机的性能退化情况,对结垢和清洗前后的性能变化反映比较直观。

(2) 热电偶分散度反映燃烧室燃烧部件、燃料供给系统和高压涡轮静叶等的状态,三限值方法能有效提出警告和异常预警。

(3) 退化因子是因退化导致部件性能特性发生变化的部分。在引入退化因子建立退化模型后,经小偏差法求得退化系数矩阵,进而利用卡尔曼滤波方法可求得退化因子的实时变化,便于开展退化状态评估。

参考文献:

- [1] MOHAMMADI E, MONTAZERI G M. A fuzzy-based gas turbine fault detection and identification system for full and part-load performance deterioration[J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 46: 82-93.
- [2] 贺星. 基于热力学功势的燃气轮机性能退化研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2010.
- [3] STALDER J. Gas turbine compressor washing state of the art: field experiences[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(2): 363-370.

- [4] SPAKOVSKY Z S, GERTZ J, SHARMA O P, et al. Influence of compressor deterioration on engine dynamic behavior and transient stall margin[R]. ASME Paper 99-GT-439, 1999.
- [5] KURZ R, BRUN K. Degradation in gas turbine systems[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123: 70-77.
- [6] KURZ R, BRUN K, WOLLIE M. Degradation effects on industrial gas turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(6): 062401. 1-062401. 7.
- [7] KHANI N, SEGOVIA C, NAVARATNE R, et al. Towards development of a diagnostic and prognostic tool for civil aero-engine component degradation[R]. ASME Paper GTINDIA2012-9703, 2012.
- [8] ZACHARY J. Evaluating performance degradation in gas turbines a challenging task[R]. ASME Paper PWR2005-50024, 2005.
- [9] ZACHARY J. Assessing performance degradation in gas turbines for power applications - a challenging task[R]. ASME Paper GT2007-27976, 2007.
- [10] ZWEBEK A, PILIDIS P. Degradation effects on combined cycle power plant performance part I: gas turbine cycle component degradation effects[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125: 651-657.
- [11] ZWEBEK A, PILIDIS P. Degradation effects on combined cycle power plant performance part III: gas and steam turbine component degradation effects[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126: 306-315.
- [12] HANACHI H, LIU J, BANERJEE A, et al. Effects of humidity condensation on the trend of gas turbine performance deterioration[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137: 122604. 1-122604. 11.
- [13] HANACHI H, LIU J, BANERJEE A, et al. A physics-based modeling approach for performance monitoring in gas turbine engines[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2015, 64(1): 197-205.
- [14] HANACHI H, LIU J, BANERJEE A, et al. A physics-based performance indicator for gas turbine engines under variable operating conditions[R]. ASME Paper GT2014-26367, 2014.
- [15] HANACHI H, LIU J, BANERJEE A, et al. A framework with nonlinear system model and nonparametric noise for gas turbine degradation state estimation[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(6): 065604.
- [16] HANACHI H, LIU J, BANERJEE A, et al. Effects of the intake air humidity on the gas turbine performance monitoring[R]. ASME Paper GT2015-43026, 2015.
- [17] 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.
- [18] 范作民, 孙春林, 白杰. 航空发动机故障诊断导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 27-30, 40-47.
- [19] 汪雪飞, 杨建明. PG6551B 燃机排气分散度大故障的分析与处理[J]. 燃气轮机技术, 2004, 17(2): 58-68.
- [20] 周晓宇, 潘勇进. DLN-210 + 燃烧室燃烧异常的判断及处理[J]. 燃气轮机技术, 2007, 20(2): 56-60.

[21] 房友龙,刘东风,刘永葆,等. 燃气轮机结垢性能退化特征提取和剩余寿命预测 [J]. 海军工程大学学报, 2018, 30 (2): 100-104.

[22] 张会生,周登极. 燃气轮机可靠性维护理论及应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016:102-106.

[23] 樊思齐. 航空发动机控制 (下册) [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008:113-121.

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

[25] LU F, JU H, HUANG J. An improved extended Kalman filter with inequality constraints for gas turbine engine health monitoring [J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 58:36-47.

Construction of Performance Degradation Indices System of Three-Shaft Marine Gas Turbine

Liu Dongfeng^{1,2}, Fang Youlong^{1,2}, Liu Yongbao¹, Yu Liangwu^{1,2}, Deng Zhiming³

(1. College of Power Engineering, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. Unit No. 91663, Chinese People’s Liberation Army, Shandong Qingdao 266012, China;
3. Mechanical and Electrical Department, Naval Petty Officer Academy, Anhui Bengbu 233012, China)

Abstract: The indices system of marine three-shaft gas turbine performance degradation is built, from the aspect of the overall engine performance, gas path components, the lubricating oil system, vibration, etc. The exhaust gas temperature margin, heat loss index, power deficit index, the extra heat ratio and thermal efficiency ratio are put forward, which are the characterization of overall engine performance degradation. The concept of degradation factor, characterizing the degradation of gas path components, is expounded. The degradation indexes of gas path components such as compressor, turbine and combustion chamber are put forward, including the adiabatic efficiency degradation factor, the flow capacity degradation factor, the surge margin, the thermocouple dispersion and so on. The solving and analysis methods of degradation indices are proposed, such as building mathematical model, statistical threshold method, small deviation method and Kalman Filter method, which are carried on the instance analysis. The paper constructs the basic framework for further research of gas turbine performance degradation.

Key words: gas turbine engine; performance degradation; indices system; degradation factor

+++++
(上接第 11 页)

Numerical Analysis on the Influence of Methane Composition on the Combustor in Micro Gas Turbine

Liu Hongzhao¹, Wang Yuzhang¹, Gao Huifeng², Weng Shilie¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Aerospace Energy Co., Ltd., Shanghai 201201, China)

Abstract: In order to explore the influence of methane composition on the combustor of micro gas turbine, the flow and combustion processes in the annular combustor of micro gas turbine were numerically analysed under the various fuel components. The parameters such as pressure, temperature and pollutant generation in the combustor were obtained. The change of fuel flow, temperature and pollutant distribution and export parameter was also investigated. The results show that to maintain the thermal load of micro gas turbine, the decrease of CH₄ in fuel will increase the flow and pressure of fuel. In addition, the rise of CO₂ in fuel increases the high temperature area and temperature gradient in the combustor, affects the process of complete combustion, and then adds the formation of NO_x and CO.

Key words: micro gas turbine; combustor; methane; numerical analysis