

文章编号: 1000-8055(2009)09-2091-05

基于推力功势的航空燃气轮机故障性能研究

贺 星, 孙丰瑞, 张仁兴
(海军工程大学 船舶与动力学院, 武汉 430033)

摘 要: 利用热力学第二定律的功势转化指标之一的推力功势转化性能指标, 对航空燃气轮机在性能故障下进行了数学建模, 采用了小偏差的方法推导出了故障性能系数矩阵, 从推力功势转化性能和传统的效率表示的性能对比、各部件之间的推力功势转化性能比较、燃气轮机系统推力功势转化性能这三个方面进行了分析研究. 结果表明: 推力功势转化性能指标从能源转化为有用功的角度更好地衡量燃气轮机的故障性能. 为进一步研究各种故障下燃气轮机的能源转化和利用的性能趋势, 奠定基础.

关 键 词: 推力功势; 燃气轮机; 故障; 性能

中图分类号: V231.1+2 **文献标识码:** A

Research on aero gas turbine performance in the condition of fault based on thrust work potential

HE Xing, SUN Feng-rui, ZHANG Ren-xing
(College of Naval Architecture and Power,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The mathematical model of the gas turbine performance in the condition of fault was established by using the thrust work potential transfer function, which is a figure of merit of the work potential based on the second law of thermodynamics. The performance matrix of fault model was derived by using the small deviation method. The thrust work potential transfer function was compared with the efficiency, which was the traditional function. The thrust work potential transfer function among the components was compared. The thrust work potential transfer function of the gas turbine system was analyzed. The results show that the thrust work potential transfer function can express the gas turbine performance wonderfully in the point of view of transferring the work potential contained in fuel into useful thrust work. This lays a foundation for the future study of the capability of the gas turbine under the conditions of all kinds of faults.

Key words: thrust work potential; gas turbine; fault; performance

在以往的燃气轮机性能研究中, 主要是用传统的部件效率来衡量燃气轮机的性能. 然而传统的部件效率不能确切表示出燃气轮机作为能源转化工具的性能. 其局限性原因有三点: 首先是传统的部件效率是基于热力学第一定律, 从能量平衡的角度去定义的, 只是从能量的“量”去衡量其部件性能, 没有考虑能量“质”的区别; 二是传统的部件效率是根据各个部件来定义的, 缺乏统一的基础(这一点我们可以从压气机效率增加 1% 和涡轮效率增加 1% 的效果是不一样这个众所周知的事实可以知道); 三是传统的部件效率没有考虑到各种用途的燃气轮机做功的根本目的的不同, 对

各种燃气轮机的同一部件千篇一律地使用同样的部件效率定义式。为此,基于热力学第二定律的各种功势转化指标能解决此问题:首先,从能量“质”的利用去衡量燃气轮机的性能,贴切地表达其能源利用的性能;其次,有统一的定义的基础和方式来衡量各个部件的性能;第三,对不同用途的燃气轮机,由于其客观存在的不可避免的耗散迥异,有不同的功势转化指标(例如对于航空燃气轮机来说,产生推力功是最根本的目的;而对于地面和舰船简单燃气轮机来说,产生最大的可用能是目的;而对于联合循环中的燃气轮机来说,追求最大的火用是目的)。所以用热力学第二定律来研究燃气轮机的性能有着更为优越的效果。

在燃气轮机性能的理论研究方面,陈林根等^[1]运用有限时间热力学在燃气轮机循环的性能分析和优化上的应用进行了卓有成效的研究。在具体燃气轮机的实际运行热力性能分析上,Roth^[2]运用热力学第二定律,提出了功势的概念,并运用各种功势转化性能指标对航空燃气轮机进行了详细的功势损失分析。余又红等^[3]基于热力学第二定律的对燃气轮机实际热力循环性能进行了研究。但这些都是基于循环理论和燃气轮机在正常性能下的研究。实际上,在燃气轮机的运行中,不可避免产生了零件表面的腐蚀、叶片结垢、外来物损伤、喷嘴堵塞等性能故障。为了尽可能在运行中消除一些故障,以提高燃气轮机的实际运行性能。为此,研究各种故障对运行性能的影响也是迫切需要的,进而为修复燃气轮机的性能提供参考。

而在由Urban^[4,5]开创的燃气轮机的故障诊断的研究领域中,迄今为止主要的工作是针对故障的预测和隔离^[6,7],且其中用到的效率也是具有局限性的传统的基于第一定律的部件效率。

实际上,故障诊断分为两大问题^[8]:

1) 故障的正向问题(即故障性能研究)。已知故障源的位置和大小,分析由于该故障源所引起的各组件的不可逆增加,又称热经济学研究;

2) 故障的逆向问题(即故障定位研究)。已知热力系统的两个运行状态,即正常运行工况和故障运行工况,辨识系统故障的原因及位置。

其实这两大问题代表了故障性能分析和诊断定位的两个方面和阶段。

本文针对故障的正向问题,运用热力学第二定律,首次提出推力功势故障因子,用推力功势的转化性能指标来对航空燃气轮机在故障状态下的

性能进行分析。分析并量化了各种推力功势转化性能指标故障因子对功势耗散变化程度的影响程度,为进一步研究各种故障下燃气轮机的能源转化和利用性能趋势,奠定基础。

1 燃气轮机故障数学模型

1.1 推力功势转化性能指标和传统的部件效率的关系式

虽然传统的部件效率和功势转化性能指标是从不同的角度来定义的,但它们之间具有不可分割的联系,即其存在一定的函数关系^[9]。本文的对象是航空燃气轮机,所以选用的是推力功势转化性能指标。

理论上,从部件性能的角度来说,如果部件在做功过程中,没有任何损耗,此时部件的效率为理想中的极值1;从能源转化和利用的角度来说,能源从该部件的输入到输出不仅仅保持“量”的守恒,还保持“质”的不变,那么此时各种功势转化效率和传统的效率一样,都应该达到1。而文献[9]中推导出的涡轮的推力功势转化性能指标和传统的部件效率的关系式为 $\eta_{\text{wp},T} = \sqrt{\eta_T \pi_T^{m_g}}$,当 $\eta_T = 1$ 而 $\pi_T > 1$, $0 < m_g < 1$,则 $\pi_T^{m_g} > 1$, $\pi_T^{m_g} < 1$ 即 $\eta_{\text{wp},T} < 1$,和理论分析结果不吻合。所以文献[9]中所得到的关系式是错误的。

正确的压气机、涡轮、燃烧室的推力功势转化性能指标和传统的部件效率的关系式如式(1)~式(3)。

$$\eta_{\text{wp},C} = \sqrt{\frac{\eta_C + \pi_C^{m_a} - 1}{\pi_C^{m_a}}} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{wp},T} = \sqrt{\frac{\pi_C^{m_g} + \eta_T (\pi_T^{m_g} - 1) - \pi_T^{m_g}}{\pi_C^{m_g} - 1}} \quad (2)$$

$$\eta_{\text{wp},B} = \sqrt{\frac{f H_u \eta_B + c_{pa} T_2}{f H_u + c_{pa} T_2}} \quad (3)$$

式中 η_C , η_T , η_B 是传统定义的部件效率,分别表示压气机、涡轮、燃烧室等三大部件的效率; $\eta_{\text{wp},C}$, $\eta_{\text{wp},T}$, $\eta_{\text{wp},B}$ 是基于推力功势转化的性能指标,分别表示压气机、涡轮、燃烧室等三大部件把能源转化成推力功势的能力。

1.2 燃气轮机故障数学模型的建立

由式(1)~式(3)可得

$$\eta_C = \pi_C^{m_a} \eta_{\text{wp},C}^2 + 1 - \pi_C^{m_a} \quad (4)$$

$$\eta_T = \frac{\pi_{\text{tp},T}^2 (\pi_{\text{C}}^m - 1) - \pi_{\text{C}}^m + \pi_{\text{T}}^m}{\pi_{\text{T}}^m - 1} \quad (5)$$

$$\eta_B = \frac{(f H_u + c_{pa} T_2) \pi_{\text{tp},B}^2 - c_{pa} T_2}{f H_u} \quad (6)$$

将式(4)~式(6)代入文献[10]所采用的燃气轮机正常状态数学模型可得基于推力功势转化性能指标的燃气轮机正常状态数学模型。

引入第一类故障因子 $\tilde{\eta}_{\text{tp},C}$, $\tilde{G}_C$, $\tilde{\eta}_{\text{tp},T}$, $\tilde{A}_T$, 建立基于推力功势转化性能指标的燃气轮机故障数学模型(取控制条件为 $n = \text{常数}$)。

$$\eta_{\text{tp},C} = (1 - 0.4383 \pi_{\text{C}}^m + 0.03825 \pi_{\text{C}}^{1-m} - 0.001116 \pi_{\text{C}}^{2-m})^{\frac{1}{2}} + \tilde{\eta}_{\text{tp},C} \quad (7)$$

$$G_C = 98.00 + 4.500 \pi_{\text{C}} - 0.3611 (\pi_{\text{C}})^2 + \tilde{G}_C \quad (8)$$

$$T_2 - T_1 = \frac{T_1 (\pi_{\text{C}}^m - 1)}{\pi_{\text{C}}^m \pi_{\text{tp},C}^2 + 1 - \pi_{\text{C}}^m} \quad (9)$$

$$G_C = \frac{K \alpha_B P_1 \pi_{\text{C}} A_T}{\sqrt{T_3}} \quad (10)$$

$$c_{pg} T_3 \left\{ \left[\pi_{\text{tp},T}^2 (\pi_{\text{C}}^m - 1) - \pi_{\text{C}}^m \right] \pi_{\text{T}}^m + 1 \right\} \eta_m = c_{pa} \frac{T_1 (\pi_{\text{C}}^m - 1)}{\pi_{\text{C}}^m \pi_{\text{tp},C}^2 + 1 - \pi_{\text{C}}^m} = \quad (11)$$

$$T_3 - T_5 = T_3 \left\{ 1 + \left[\pi_{\text{tp},T}^2 (\pi_{\text{C}}^m - 1) - \pi_{\text{C}}^m \right] \pi_{\text{T}}^m \right\} \quad (12)$$

$$G_C c_p (T_3 - T_2) = (G_f H_u + G_C c_{pa} T_2) \pi_{\text{tp},B}^2 - G_C c_{pa} T_2 \quad (13)$$

$$\frac{\pi_{\text{T}} A_T}{\sqrt{T_3}} = \frac{A_E}{\sqrt{T_5}} \quad (14)$$

$$\eta_{\text{tp},T} = \sqrt{\frac{\pi_{\text{C}}^m - 0.91 - 0.09 \pi_{\text{T}}^m}{\pi_{\text{C}}^m - 1}} + \tilde{\eta}_{\text{tp},T} \quad (15)$$

$$A_T = 0.072325 + \tilde{A}_T \quad (16)$$

$$\eta_{\text{tp},B} = \sqrt{\frac{f H_u \eta_{\text{B}} + c_{pa} T_2}{f H_u + c_{pa} T_2}} \quad (17)$$

式中

$$m_a = \frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}, \quad m_g = \frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}, \quad c_p = \frac{c_{pa} + c_{pg}}{2}, \quad f = \frac{G_f}{G_C}$$

式(7)~式(17)就构成了基于推力功势转化性能指标的燃气轮机故障数学模型。

2 故障性能系数矩阵

取燃气轮机的外部条件(边界条件):

$$\gamma_a = 1.40, \quad \gamma_g = 1.33, \quad c_{pa} = 1004.71 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)},$$

$$c_{pg} = 1158.31 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}, \quad \eta_m = 0.99, \quad \eta_B = 0.98,$$

$$H_u = 0.43 \times 10^8 \text{ J/kg}, \quad \alpha_B = 0.95, \quad T_1 = 288.15 \text{ K},$$

$$A_E = 0.26397 \text{ m}^2, \quad p_1 = 101325 \text{ Pa}$$

对故障方程组进行微分, 得到小偏差方程组为

$$\delta \eta_{\text{tp},C} - 0.0590 \delta \pi_{\text{C}} = \delta \tilde{\eta}_{\text{tp},C} \quad (18)$$

$$\delta G_C + 0.499974 \delta \pi_{\text{C}} = \delta \tilde{G}_C \quad (19)$$

$$\delta T_2 - 0.3322 \delta \pi_{\text{C}} + 2.4045 \delta \eta_{\text{tp},C} = 0 \quad (20)$$

$$\delta G_C + 0.50 \delta T_3 - \delta \pi_{\text{C}} = \delta \tilde{A}_T \quad (21)$$

$$\delta T_3 - 0.6619 \delta \pi_{\text{C}} + 4.4045 \delta \eta_{\text{tp},C} + 0.6511 \delta \pi_{\text{T}} + 4.1078 \delta \eta_{\text{tp},T} = 0 \quad (22)$$

$$\delta T_5 - \delta T_3 - 0.0203 \delta \pi_{\text{C}} + 1.5654 \delta \eta_{\text{tp},T} + 0.2481 \delta \pi_{\text{T}} = 0 \quad (23)$$

$$\delta T_3 - 0.4279 \delta G_f + 0.4279 \delta G_C - 1.918 \delta \eta_{\text{tp},B} - 0.5721 \delta T_2 = 0 \quad (24)$$

$$\delta \pi_{\text{T}} - 0.5 \delta T_3 + 0.5 \delta T_5 = -\delta \tilde{A}_T \quad (25)$$

$$\delta \eta_{\text{tp},T} - 0.013 \delta \pi_{\text{C}} + 0.0394 \delta \pi_{\text{T}} = \delta \tilde{\eta}_{\text{tp},T} \quad (26)$$

$$\delta A_T = \delta \tilde{A}_T \quad (27)$$

$$\delta \eta_{\text{tp},B} + 0.0025 \delta G_f - 0.0025 \delta G_C - 0.2796 \delta T_2 = 0 \quad (28)$$

上述小偏差故障方程形式为 $\mathbf{B} \delta \mathbf{y} = \mathbf{C} \delta \mathbf{x}$. 对向量 $\delta \mathbf{y}$ 求解, 有

$$\delta \mathbf{y} = \mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{C} \cdot \delta \mathbf{x} = \mathbf{A} \cdot \delta \mathbf{x} \quad (29)$$

式中 $\delta \mathbf{y} = [\delta \eta_{\text{tp},C} \quad \delta \eta_{\text{tp},T} \quad \delta \eta_{\text{tp},B} \quad \delta \pi_{\text{C}} \quad \delta \pi_{\text{T}} \quad \delta T_2 \quad \delta T_3 \quad \delta T_5 \quad \delta G_C \quad \delta G_f \quad \delta A_T]^T$ 为 11 维响应向量, $\delta \mathbf{x} = [\delta \tilde{\eta}_{\text{tp},C} \quad \delta \tilde{G}_C \quad \delta \tilde{\eta}_{\text{tp},T} \quad \delta \tilde{A}_T]^T$ 为 4 维故障因子向量, 响应与故障因子分别位于式中的左右两边, 因此上式就是故障方程, 而 $\mathbf{A} = \mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{C}$ 就是故障性能系数矩阵, 且为第一类故障性能系数矩阵。

由于燃气轮机性能参数既有简单性能参数 A_T ; 又有其值不只与部件自身特性、还与其它部件或总体部件特性相关的复杂性能参数 $\eta_{\text{tp},C}$, 故求解故障方程的最终目地应该是第二类小偏差故障性能系数矩阵的获得. 根据式(30)就可以很容易把第一类故障性能系数矩阵转化成第二类故障性能系数矩阵。

$$\ddot{a}_{ij} = \tilde{a}_{ij} \cdot \frac{\ddot{\delta x}_j}{\delta x_j} = \tilde{a}_{ij} \cdot \frac{\ddot{\delta x}_j}{\tilde{a}_{pj} \cdot \delta x_j} = \frac{\tilde{a}_{ij}}{\tilde{a}_{pj}} \quad (30)$$

式中 $\tilde{a}_{ij}$ 第一类故障系数, $\ddot{a}_{ij}$ 为第二类故障系数, $\tilde{a}_{pj}$ 为第一类故障性能系数矩阵中对应于第 j 列故障因子的复杂性能参数(位于第 p 行)对于该因子的第一类故障系数。

式(30)就是由第一类系数矩阵转化为第二类系数矩阵的方程式。

由式(18)~式(28)可得

$$A = \begin{bmatrix} 0.9020 & 0.0445 & -0.1008 & -0.0325 \\ -0.0216 & 0.0098 & 0.9438 & 0.0363 \\ -0.7491 & 0.0395 & -0.0628 & -0.0321 \\ -1.6612 & 0.7543 & -1.7086 & -0.5508 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.8631 & -1.1028 \\ -2.7207 & 0.1436 & -0.3252 & -0.1048 \\ -4.9836 & 0.2630 & -5.1258 & 0.3475 \\ -4.9835 & 0.2629 & -6.8520 & 0.5531 \\ 0.8306 & 0.6229 & 0.8543 & 0.2754 \\ -3.8210 & 0.8683 & -10.4084 & 1.3714 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$A' = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0715 & -0.1068 & -0.0325 \\ -0.0239 & 0.0157 & 1.0000 & 0.0363 \\ -0.8305 & 0.0635 & -0.0665 & -0.0321 \\ -1.8418 & 1.2111 & -1.8104 & -0.5508 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.9145 & -1.1028 \\ -3.0163 & 0.2305 & -0.3446 & -0.1048 \\ -5.5252 & 0.4222 & -5.4311 & 0.3475 \\ -5.5251 & 0.4221 & -7.2601 & 0.5531 \\ 0.9208 & 1.0000 & 0.9051 & 0.2754 \\ -4.2362 & 1.3940 & -11.0284 & 1.3714 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

注: A 为第一类故障性能系数矩阵, A' 为第二类故障性能系数矩阵。

3 故障性能分析

3.1 和传统效率下的故障性能比较分析

对比文献[10]中所得第二类故障性能系数矩阵,从本文的系数矩阵 A' 可以看出,第一列和第二列的系数的绝对值要大于文献[10]中的系数的绝对值。于是我们可以得出这样的结论:性能参数的故障因子 $\tilde{\eta}_{wp,C}$, $\tilde{\eta}_{wp,T}$ 对各测量参数的影响程度要大于传统性能参数(即部件效率)的故障因子 $\tilde{\eta}_C$, $\tilde{\eta}_T$ 对各测量参数的影响程度。从另外一个角度上讲,当燃气轮机发生同样的性能故障,即测量

参数变化量相同时,部件效率的变化量中的故障因子的值(即能量中“量”的利用性能恶化程度)要大于推力功势转化性能指标的变化量中的故障因子的值(即能量中“质”的利用性能恶化程度)。

3.2 各部件之间推力功势转化性能比较分析

从本文的故障性能系数矩阵 A' 的第10行可以得到

$$\delta G_T = -4.2362\delta\tilde{\eta}_{wp,C} + 1.3940\delta\tilde{G}_C - 11.0284\delta\tilde{\eta}_{wp,T} + 1.3714\delta\tilde{A}_T \quad (31)$$

如果产生单独的压气机(涡轮)性能故障时,即除了 $\delta\tilde{\eta}_{wp,C}$ ($\delta\tilde{\eta}_{wp,T}$) 以外,其它故障因子均为零。式(31)变为式(32)和式(33)

$$\delta G_T = -4.2362\delta\tilde{\eta}_{wp,C} \quad (32)$$

$$\delta G_T = -11.0284\delta\tilde{\eta}_{wp,T} \quad (33)$$

由式(32)和式(33)可知:故障因子 $\tilde{\eta}_{wp,C}$, $\tilde{\eta}_{wp,T}$ 对 δG_T 的影响是不一样的,尽管 $\delta\tilde{\eta}_{wp,C}$ 的效应等价于 $\delta\tilde{\eta}_{wp,T}$ 的效应,但在排除性能故障的优先次序上讲,即同时产生了相同量的 $\delta\tilde{\eta}_{wp,C}$ 和 $\delta\tilde{\eta}_{wp,T}$ 时,理论上应该先消除 $\delta\tilde{\eta}_{wp,T}$ 的故障影响,即恢复涡轮性能。

从文献[10]的表2-6-1可得

$$\delta G_T = -1.7874\delta\tilde{\eta}_C + 1.8148\delta\tilde{G}_C - 2.7169\delta\tilde{\eta}_T + 1.4327\delta\tilde{A}_T \quad (34)$$

由式(34)可得

$$\delta G_T = -1.7874\delta\tilde{\eta}_C \quad (35)$$

$$\delta G_T = -2.7169\delta\tilde{\eta}_T \quad (36)$$

由式(35)和式(36)可知:同时产生了相同量的 $\delta\tilde{\eta}_C$ 和 $\delta\tilde{\eta}_T$ 时,理论上也应该先消除 $\delta\tilde{\eta}_T$ 的故障影响,即恢复涡轮的性能。

这样得出了两个类似的结论,但角度不一样,文献[10]是从传统的部件效率出发,而本文从能源转化为推力功势的性能来衡量部件的性能。在统一的推力功势转化性能指标中,从能源转化成有效的推力功这个统一目标的角度来分析研究。

另外,由式(31)可知, $\delta\tilde{G}_C$ 和 $\delta\tilde{A}_T$ 对 δG_T 的影响系数要比 $\delta\tilde{\eta}_{wp,C}$ 和 $\delta\tilde{\eta}_{wp,T}$ 对 δG_T 的影响系数小得多,这和式(34)中得到的信息是不同的,由此可知,从能源转换的角度上来看, $\delta\tilde{\eta}_{wp,C}$ 和 $\delta\tilde{\eta}_{wp,T}$ 这两类故障的消除更为迫切。

3.3 燃气轮机系统推力功势转化性能分析

当涡轮叶片受到机械损伤时,其效率将下降,设 $\delta\tilde{\eta}_{wp,T} = -0.05$ 。由故障性能系数矩阵 A' 的子

矩阵可得

$$\begin{bmatrix} \delta\eta_{\text{twp,C}} \\ \delta\eta_{\text{twp,T}} \\ \delta\eta_{\text{twp,B}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1068 \\ 1.0000 \\ -0.0665 \end{bmatrix} [\delta\tilde{\eta}_{\text{twp,T}}] =$$

$$\begin{bmatrix} -0.1068 \\ 1.0000 \\ -0.0665 \end{bmatrix} [-0.05] = \begin{bmatrix} +0.0053 \\ -0.0500 \\ +0.0033 \end{bmatrix}$$

在发生该故障时,从能源转化为推力功势的性能来看:其涡轮功势转化效率降低了0.05%,而压气机和燃烧室功势转化效率分别增加了0.53%和0.33%。而且,从功势转化效率的角度来说,其涡轮功势转化效率和压气机功势转化效率的变化量不仅仅和燃气轮机本身的性能变化量不一样,而且还具有统一性,即故障的总效应为

$$\delta\eta_{\text{twp}} = \delta\eta_{\text{twp,C}} + \delta\eta_{\text{twp,B}} + \delta\eta_{\text{twp,T}} =$$

$$+0.53\% + 0.33\% - 0.5\% = -4.14\%$$

而从传统的部件效率的角度来看故障的总效应没有统一性,即: $\delta\eta \neq \delta\eta_{\text{C}} + \delta\eta_{\text{T}} + \delta\eta_{\text{B}}$ 。

4 结 论

在纠正文献[9]中错误的基础上,推导出了正确的推力功势转化性能指标 η_{twp} 的表达式,并用 η_{twp} 来对燃气轮机在故障下的性能进行了建模、计算和分析,结果表明:

1) 完全从存储在能源中的功势转化(即能量中“质”的利用)的角度来直接衡量燃气轮机在发生故障时各部件的性能变化;

2) 有了统一的对比效果,即 $\delta\eta_{\text{twp,C}}$ 的效应等价于 $\delta\eta_{\text{twp,T}}$ 的效应;

3) 当燃气轮机发生同样的性能故障,即测量参数变化量相同时, $\delta\tilde{\eta}_{\text{twp}} < \delta\tilde{\eta}$ 反映了故障对燃气轮机在能源利用的性能影响不是从表面上部件效率降低那么大,燃气轮机本体的性能退化引起其能源转化能力的退化是不一样的。

参考文献:

- [1] 陈林根, 吴晏, 孙丰瑞. 燃气轮机循环有限时间热力学分析: 理论和应用[J]. 燃气轮机技术, 2001, 14(1): 46-53. CHEN Lingen, WU Yan, SUN Fengrui. Finite time thermodynamic analyses for gas turbine cycle: theory and application [J]. Gas Turbine Technology, 2001, 14(1): 46-53. (in Chinese)
- [2] Roth B A. A theoretical treatment of technical risk in modern propulsion system design [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2000: 23-98.
- [3] 余又红, 孙丰瑞, 张仁兴. 燃气轮机实际简单循环熵产分析[J]. 海军工程大学学报, 2002, 14(5): 88-91. YU Youhong, SUN Fengrui, ZHANG Renxing. The entropy generation analysis for real simple gas turbine cycles [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2002, 14(5): 88-91. (in Chinese)
- [4] Urban L A. Gas path analysis applied to turbine engine condition monitoring [J]. Journal of Aircraft, 1972, 10(7): 400-406.
- [5] Urban L A. Parameter selection for multiple fault diagnosis of gas turbine engines [J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1975: 225-230.
- [6] 杨勇刚. 燃气轮机热参数故障的性能模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2000. YANG Yonggang. Performance simulation of the gas turbine gas path fault [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2000. (in Chinese)
- [7] 林海. 船用三轴燃气轮机故障诊断数学模型的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2002. LIN Hai. The research on the fault diagnosis model for triple axial gas turbine [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2000. (in Chinese)
- [8] Valero A, Torres C, Lerch F. Structural theory and thermoeconomic diagnosis: Part III- Intrinsic and induced malfunctions [C]// The 1999 ECOS, Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems. Tokyo, Japan: Ecos, 1999, 35-41.
- [9] Roth B A. A work potential perspective of engine component performance [R]. AIAA 2001-3300.
- [10] 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.