

涡喷发动机涡轮转子模糊可靠性分析与计算^{*}

Analysis and Calculation for Fuzzy Reliability of Turbine Rotor in Turbojet Engine

南京航空航天大学民航学院 余有锋 左洪福 刘鹏鹏
太原理工大学信息工程学院 刘丽芳

[摘要] 航空发动机涡轮转子处于高温高压的工作环境,这类零部件单纯从设计可靠性角度来考虑具有较大的局限性,比如无法量化评估实际使用环境下的涡轮转子的可靠性情况。建立了考虑工作环境因素的涡轮转子磨损模型,结合模糊数学模糊集与隶属函数的理论提出了评估随时间变化的对涡轮转子进行模糊可靠性分析与计算所依据的模糊可靠性数学模型。通过量化分析涡轮转子磨损量的影响因素确定了相应的隶属函数,利用该模糊可靠性模型实现计算基于时间的涡轮转子磨损的模糊可靠度。

关键词: 发动机 涡轮转子 可靠性 模糊性

[ABSTRACT] An aeroengine works under the environment of high-pressure and high-temperature, the consideration of its component only from design reliability has great limitations. A wear model for turbine rotor considering working environment factors is built, making the mathematical model of the fuzzy reliability for analysis and calculation of the fuzzy reliability of the turbine rotor. Based on the fuzzy math and fuzzy sets membership function theory, the related information of the turbine rotor's wear determined the membership function is analyzed, and the fuzzy reliability theory is used to calculate the fuzzy reliability of turbine rotor's wear based on time.

Keywords: Aero engine Turbine rotor Reliability Fuzzy

涡喷发动机的涡轮转子由涡轮盘、轴承、涡轮轴及工作叶片等部分组成。由于转子的圆周速率和工作温度都非常高,所以涡轮转子多设计为盘式,其中多级式涡轮中为提高转子的刚性,也可将涡轮转子做成鼓盘混合式^[1]。

涡轮转子容易发生磨损的部位主要有:叶片与机匣或封严(碰摩)、轴承;前者主要发生在发动机的使用初期,而后者则在发动机使用全过程中都持续存在。因为涡轮转子工作环境(高温高压等等)相当复杂,致使它的

一些信息具有不定性,是随机的或者是模糊的,如果继续运用传统可靠性分析方法对涡轮转子的可靠性进行分析,就不能准确地判断和计算涡轮转子的可靠度。由于传统可靠性设计不能表述这种模糊性,所以只有借助模糊集合和隶属函数来表述它^[2]。

1 涡轮转子的模糊可靠性数学模型

1.1 模糊集和模糊可靠度

模糊集 \tilde{A} 是指在论域 $u \in U$ 都指定了一个数 $\mu_{\tilde{A}}(u) \in [0, 1]$,这时我们称 $\mu_{\tilde{A}}(u)$ 为 u 对 \tilde{A} 的隶属度,它代表了 u 属于这个子集 \tilde{A} 的程度,称

$$\mu_{\tilde{A}}: U \rightarrow [0, 1], u \rightarrow \mu_{\tilde{A}}(u), \quad (1)$$

为 \tilde{A} 的隶属函数^[3]。在论域 U 上,若模糊子集 \tilde{A} 是一个随机变量,则称 \tilde{A} 为一个模糊事件。失效概率为:

$$P(\tilde{A}) = \mu_{\tilde{A}}(x) \int_U f(x) dx \quad (2)$$

其模糊可靠度为:

$$R = 1 - P(\tilde{A}) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) \int_U f(x) dx \quad (3)$$

1.2 隶属函数的确定

确定模糊性事物的隶属函数有多种不同的方法。一般采用以下几种方法确定隶属函数:模糊统计法、三分法、专家打分法和二元对比排序法等^[4]。隶属函数的确定必须依据一定的客观规律,应当能较客观地、准确的反映实际存在的模糊性。由于机械设计中有很多变量,例如许用变形、许用应力等,它们都是连续性的随机变量,则对这类变量宜采用偏小型的隶属函数来描述。如果用降半正态分布和降半梯形进行描述,则都能很好的表示出该过渡过程。

(1) 偏小型降半梯形分布。

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} (a_2 - x) / (a_2 - a_1) & a_1 < x \leq a_2 \\ 0 & x > a_2 \\ 0 & x \leq a_1 \end{cases}, \quad (4)$$

式中, a_1, a_2 为分布参数,且大于零^[2]。

(2) 偏小型降半正态分布。

$$\mu_{\tilde{A}} = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{k}\right] & x > a \\ 1 & x \leq a \end{cases}, \quad (5)$$

^{*} 国家自然科学基金与中国民航联合资助基金重点项目(60939003),江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX12-0164)资助。

式中, a, k 为分布参数, 且均大于零^[5]。

1.3 模糊可靠度的数学模型

将 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 和 $f(x)$ 带入式 3, 即可求得在不同的隶属函数条件下不同变量的相应模糊可靠度。

(1) 隶属函数为偏小型降半梯形分布。

$$R = \frac{1}{a_{2x} - a_{1x}} \{ (a_{2x} - \bar{x}) \phi\left(\frac{a_{2x} - \bar{x}}{\sigma_x}\right) - (a_{1x} - \bar{x}) \times \phi\left(\frac{a_{1x} - \bar{x}}{\sigma_x}\right) - \frac{\sigma_x}{\sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{(a_{1x} - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} - e^{-\frac{(a_{2x} - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} \right] \} \quad (x = \tau, \theta, \sigma, y, s) \quad (6)$$

(2) 隶属函数为偏小型降半正态分布。

$$R = \phi\left(\frac{a - \bar{x}}{\sigma_x}\right) + \sqrt{\frac{k}{2\sigma_x^2 + k}} \exp\left[-\frac{(a - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2 + k}\right] \times \phi\left(-\sqrt{\frac{k}{2\sigma_x^2 + k}} \frac{a - \bar{x}}{\sigma_x}\right) \quad (x = \tau, \theta, \sigma, y, s) \quad (7)$$

1.4 涡轮转子轴承摩擦副磨损量分析

前面提到, 叶片与机匣或封严的摩擦磨损主要集中在发动机的使用初期, 它主要影响发动机的使用效率; 而轴承的磨损后果则比较严重, 它首先会导致发动机涡轮转子运行不平衡, 失稳, 使得发动机振动加剧, 不定因素增加, 严重时可导致发动机系统失效, 故本文研究工作主要集中于涡轮转子轴承摩擦副磨损情况。轴承摩擦副的磨损主要是由于回转运动造成的, 且是动态的。在方向固定的外载作用下, 表面接触应力大大增强, 摩擦强度加剧, 从而形成磨损。总之, 磨损是一个连续的动态复杂的物理过程。涡轮轴在工作过程中, 磨损过程一般划分为以下几个过程: 磨合阶段、稳定阶段和故障阶段。磨合阶段, 接触表面微凸体的形状高度大小发生改变, 零件材料经冷作硬化也会发生改变, 冷作硬化和微观几何形状的改变, 在形成弹性接触之后达到稳定阶段, 该阶段, 由于接触应力相对平稳, 则出现稳定的摩擦力和小量的磨损。磨损量由零件加工后本身具有的起始粗糙度决定, 零件摩擦表面在不断磨合后, 达到最佳粗糙度, 不饱和接触变为饱和接触, 可稳定工作一段时间, 但随时间的推移, 磨损量的积累, 直至磨损超量致使零件失效, 最终的磨损极限应当依据经验、试验, 和轴承摩擦副的配合公差进行确定, 对于后者, 最终磨损极限一般不能超过该处配合的最大间隙。

2 模糊可靠度计算

涡轮转子磨损过程具有模糊性, 其影响因素也具有模糊性, 外部载荷仅是影响磨损的一个重要因素, 实际当中, 涡轮转子磨损受许多因素的影响, 例如温度、润

滑条件、选用材料等, 这些因素都是难以量化的, 具有不确定性, 即模糊性。因此, 将它们处理为模糊变量更为合理, 此类磨损可以以可靠性为基础, 采用模糊可靠性方法计算较为合适。

对涡轮转子做模糊可靠性计算, 首先需要确定极限磨损量, 极限磨损量根据各类的涡轮转子不同特点而不同, 可根据具体情况, 由多种不同方式确定, 可依经验、实际测量、试验等方法。对于涡轮转子各部分磨损量可以根据实际尺寸应趋于合格产品尺寸的中间值, 设为 S_c , 零件报废尺寸 S_b , 设 $[M]$ 为其允许的最大磨损量:

$$[M] = M_{\max} = (S_c - S_b) / 2 \quad (8)$$

当然, 此值未必是准确值, 如前所述, 磨损量及允许磨损量均具有模糊性, 计算时可依具体情况加以修正。

根据模糊数学理论, 涡轮转子的基于磨损的寿命为一模糊事件, 可表示为:

$$[M] = M_{\max} = (S_c - S_b) / 2 \quad (9)$$

式中, M_{μ} 为实际磨损量, $[M]$ 为允许磨损量, 根据式 \tilde{A} 的隶属函数如下式:

$$\mu_{\tilde{A}}(M) = \begin{cases} \frac{M_{\mu} - ([M] - \delta)}{2\delta} & [M] - \delta < M_{\mu} < [M] + \delta \\ 0 & M_{\mu} \geq [M] + \delta \\ 1 & M_{\mu} \leq [M] - \delta \end{cases} \quad (10)$$

式中, δ 为 \tilde{A} 中 $[M]$ 的变化量, 表达了磨损量的模糊不确定性, 可依经验和实际, 用扩增因数法确定^[6]。

涡轮转子使用后度过磨合期, 磨损量 M 与时间 t 为线性关系^[7], 所以可表示:

$$M = M_0 + M_V t \quad (11)$$

M_0 为初始磨损, M_V 为磨损速度, t 为工作时间。

M_0 和 M_V 可视为正态分布, 综上所述分析, 依据模糊事件概率计算可得基于时间的磨损工作可靠度如下:

$$R = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \{ [\beta_2 \Phi(\beta_2) - \beta_1 \Phi(\beta_1)] + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\exp\left(-\frac{\beta_2^2}{2}\right) - \exp\left(-\frac{\beta_1^2}{2}\right) \right] \} \quad \beta_1 = \frac{[M] - \delta - \mu}{\sigma}, \beta_2 = \frac{[M] + \delta - \mu}{\sigma} \quad (12)$$

μ 为磨损速度, σ 为标准差。

利用上式可以分析涡轮转子相应于某运转周期的可靠度。

3 算例

以微型涡喷发动机 SIMJET-1200 AES 为例计算其涡轮转子的涡轮轴的模糊可靠度。轴承外径为 $\phi 23_{-0.023}^{+0.023}$ mm, 轴承内径为 $\phi 20_{-0.076}^{+0.030}$ mm, 初始磨损量均值 μ_0 为 0, 初始标准差 σ_0 为 $0.8\mu\text{m}$, 磨损速度均值 μ_V 为 $0.02\mu\text{m/h}$, 标准差 μ_V 为 $0.006\mu\text{m}$ 。计算涡喷发动机工作

600h 后,该轴承的使用可靠度。

(1) $[M]_{zc} = (S_c - S_b) / 2 = \{ [0.023 - (-0.023)] + [(-0.030) - (0.076)] \} / 2 = 46 \mu\text{m}$, 因为轴承内外圈与滚动体构成了双摩擦副, 所以 $[M] = \frac{1}{2} [M]_{zc} = 23 \mu\text{m}$ 。

(2) $\delta = 0.2 [M] = 0.2 \times 23 \mu\text{m} = 4.6 \mu\text{m}$ (扩增因子取 0.2)。

$$\begin{aligned} (3) M(\mu, \sigma) &= M_0(\mu_0, \sigma_0) + M_v(\mu_v, \sigma_v) t \\ &= S \left(0.02t, \sqrt{0.8 + (0.006t)^2} \right) \mu\text{m} \\ &= S(12, 3.7094) \mu\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (4) \beta_1 &= \frac{[M] - \delta - \mu}{\sigma} = \frac{23 - 4.6 - 12}{3.7094} = 1.7253 \\ \beta_2 &= \frac{[M] + \delta - \mu}{\sigma} = \frac{23 + 4.6 - 12}{3.7094} = 4.2055 \end{aligned}$$

根据式(12),

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \{ [\beta_2 \Phi(\beta_2) - \beta_1 \Phi(\beta_1)] \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\exp\left(-\frac{\beta_2^2}{2}\right) - \exp\left(-\frac{\beta_1^2}{2}\right) \right] \} \end{aligned}$$

≈ 0.869 , 涡喷发动机工作 600h 后, 轴承的可靠度是 86.9% 左右。

4 总结

本文主要分析了喷气发动机的涡轮转子的一些工作信息, 使用环境复杂, 难以用传统常规的可靠性理论分析计算可靠度。基于模糊可靠性设计理论计算的模糊可靠度要较常规可靠度更接近实际情况。这种分析计算方法可以克服常规可靠度分析计算中的不足^[8], 使涡轮转子的可靠性分析与计算更为合理。本文仅讨论了涡轮转子基于时间的磨损的模糊可靠性问题, 没有深入研究涡轮转子其他因素下的可靠性问题, 例如实际工作中涡轮转子所具有的急剧温升变化对其结构影响的可靠性分析与计算。但文中的方法在分析其它带有模糊信息时的可靠性计算中, 具有普遍适用性。

参考文献

- [1] 陶春虎, 钟培道, 王仁智, 等. 航空发动机转动部件的失效与预防. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [2] 宋保维, 王晓娟. 系统可靠性设计与分析. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [3] 赵鸣, 刘朝英. 轴颈磨损寿命的模糊可靠性计算. 吉林建筑工程学院学报, 2008, 25(1): 78-80.
- [4] 刘凤冕, 王明强, 何登峰, 等. 轴类零件的模糊可靠性设计研究. 机电工程, 2005, 22(1): 36-39.
- [5] 董玉革, 王爱因, 吴成龙, 等. 传统可靠性理论在模糊可靠性计算中的应用. 农业机械学报, 2007, 38(2): 142-145.
- [6] Ahmed H, Ferhat L, Moulod G. A new engineering method for fuzzy reliability analysis of surge control. Engineering and Applied

Sciences, 2009, 2(4): 676-682.

[7] Guang H L, Tao T L, Li H Z. The fuzzy reliability robust design based on Matlab. Advanced Materials Research, 2012, 479: 995-1003.

[8] Jiang Q M, Chen C H. A numerical algorithm of fuzzy reliability. Reliability Engineering & System Safety, 2003(80): 299-307.

(责编 小城)

(上接第 90 页)

应力下(800MPa 以上), 母材及焊接接头的疲劳性能相近, 随着载荷的下降, 母材与焊接接头的疲劳性能相差越来越大, 在低应力下(676MPa), 焊接接头的循环次数能达到母材的 70%。

(4) 母材与焊接接头断裂具有相似的形貌特征, 主要以韧性断裂为主, 疲劳扩展源区多发生在预腐蚀造成的蚀坑处, 预腐蚀疲劳裂纹扩展源是多个, 从扩展源向各个方向有明显的射线图案, 可以很清楚地看见大量微坑覆盖断面。韧窝的形成是由于塑性变形使夹杂物界面上首先形成裂纹, 并不断扩大, 最后夹杂物之间的基体金属产生“内缩颈”, 当缩颈达到一定程度后被撕裂或剪切断裂, 使空洞连接, 从而形成了所看到的韧窝断口形貌。

参考文献

- [1] 蒋祖国. 飞机结构腐蚀疲劳. 北京: 航空工业出版社, 1992.
- [2] 穆志韬. 飞机结构的腐蚀修理及防护控制技术. 飞机制造工程, 1995, 12(5): 212-214.
- [3] 刘建华, 尚海波, 陶斌武, 等. 0Cr18Ni5 和 AF1410 高强度钢的腐蚀行为研究. 材料工程, 2004(8): 29.
- [4] 吴冰, 左从进, 李晋炜, 等. 电子束焊 GH4169 合金高温裂纹尖端张开位移试验. 焊接学报, 2005, 26(11): 109.
- [5] Malarvizhi S, Raghukandan K, Viswanathan N. Investigations on the influence of post weld heat treatment on fatigue crack growth behaviour of electron beam welded AA2219 alloy. Int J Fatigue, 2008, 30(9): 1543.

(责编 小城)

(上接第 94 页)

- [2] 陈光. 一种整体叶盘的加工方法—线性摩擦焊. 航空工程, 1999(4): 14-15.
- [3] 罗键. 连续驱动摩擦焊能量参数的计算机一体化实时检测技术. 西安交通大学学报, 1998, 32(6): 43-46.
- [4] 王益全. 电机测试技术. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] 李威宣, 黄建新. 基于 LabVIEW 平台的通用数据采集卡的驱动方法及数据采集. 电子质量, 2005(7): 13-16.
- [6] Vairis A, Frost M. Modeling the linear friction welding of titanium blocks. Materials Science and Engineering, 2000, A292: 8-17.
- [7] Vairis A, Frost M. High frequency linear friction welding of a titanium alloy. Wear, 1998, 217: 117-131.
- [8] Vairis A, Frost M. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti-6Al-4V. Materials Science and Engineering, 1999, A271: 477-484.

(责编 三丰)