

文章编号: 1000-8055(2008)05-0939-7

航空发动机健康等级综合评价方法

王俨凯, 廖明夫

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 研究意义在于将发动机的健康状态量化, 进一步提高发动机健康状态评估的可操作性. 决定发动机健康状态等级的因素众多, 如故障发生的概率、故障的程度以及故障可能造成的损失风险等, 且这些因素的影响作用均具有随机性和模糊性. 将模糊综合评价方法应用于发动机健康状态等级的评估, 将健康状态划分为 5 个等级, 得到每个健康状态等级的隶属度函数, 最后基于最大隶属度原则和最大危险性原则确定发动机的健康状态等级. 通过对两组发动机故障模拟实验器振动数据的等级评价结果对比, 验证了提出方法的有效性和合理性.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 健康等级; 模糊综合评价; 最大隶属原则; 最大危险性原则

中图分类号: V263.6

文献标识码: A

Study on grading of health condition of aerospace propulsion system

WANG Yan-kai, LIAO Ming-fu

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A quantitative evaluation program of health condition of aerospace propulsion system was presented to improve the operability of health condition evaluation of aerospace engines. There are several influential factors to the health of engines, such as: probability of fault, degree of fault and loss risk etc, all of which are random and fuzzy. With fuzzy evaluation theory, then grading of health condition of aerospace propulsion system was confirmed based on maximal membership rule and maximal fatalness rule. Fault simulation was conducted numerically for two sets of engines, showing that this method is applicable and reasonable.

Key words: aerospace propulsion system; grading of health condition; fuzzy evaluation; maximal membership rule; maximal fatalness rule

目前, 基于人工智能算法(例如神经网络^[1]、支持向量机^[2]等)的航空发动机故障诊断研究已广泛开展, 取得了重大的突破. 这些算法得到的诊断结果通常是发动机发生某种故障的概率, 甚至是无物理意义的系数. 即便发生某种故障的概率值是确定的, 但它所代表的含义却是模糊的: 发动机目前的工作状态到底是安全的, 还是危险的, 必须对发动机的健康状态进行量化. 安全与危险是一个相对的、逐渐过渡的概念, 很难用具体的数值表示. 本文用健康状态等级来描述发动机的健康

状态, 每个等级代表明确的安全性与危险性意义, 并可以与维修等级相对应, 具有较强的工程背景和良好的可操作性. 本文提出了发动机健康状态等级的模糊综合评价方法, 利用最大隶属度原则和最大危险性原则确定发动机的健康状态等级. 如果发动机健康状态被评定为不安全, 则未交付的不能出厂, 已交付的必须停飞维修.

1 发动机健康状态等级的划分

对于发动机健康状态的描述, 可以建立健康

收稿日期: 2007-05-08; 修订日期: 2007-12-29

作者简介: 王俨凯(1978-), 男, 陕西西安人, 讲师, 博士, 主要研究方向为航空发动机状态监测与故障诊断.

表 1 发动机健康状态等级

Table 1 Grade of health condition of aerospace propulsion system

等级	健康等级	安全性描述	危险度描述
I	健康	安全性指标优秀,发动机很安全	发生故障的可能性很小
II	亚健康	安全性指标合格,发动机比较安全	发生故障的可能性较小
III	合格	安全性指标基本合格,处于超标的边缘,发动机不太安全	发生故障的可能性在可以接受的范围内
IV	异常	安全性指标不合格,但处于超标的边缘,发动机不安全	发生故障的可能性较大,需要尽快检查维修
V	故障	安全性指标严重偏离安全区域,发动机很不安全	发生故障的风险很大,必须立刻返厂维修

状态函数 $f(n, P_i, D_i, r_i)$, $i = 1, 2 \cdots n$, 其为发动机可能发生故障模式的数目 n , 发生特定故障的概率 P_i , 特定故障的发展程度 D_i , 以及特定故障所造成损失的风险 r_i 等等诸多因素的函数, 函数的精确解表示了发动机的健康状态. 但是, 多自变量性质决定了健康状态函数复杂的数学表达形式, 给数学建模以及精确计算带来诸多不便. 另外, 基于解析数学建立的健康状态函数, 在工程实践中有时会引发“本本主义危机”——一个实际的问题是如何划分正常和故障的界限? 如何划分合格和不合格的界限? 如何划分需要维修和不需要维修的界限? 界限“1”将“0.99”和“1.01”划分为两个状态有时并不是一个合理的结果.

将发动机的健康状态划分为“健康”、“合格”、“故障”等一系列状态等级, 是一种合理的描述方法. 各等级之间没有明确的边界划分, 只有模糊的过渡区域. 也就是说, 处于健康 - 亚健康边缘状态的发动机可能既隶属于“健康”状态, 也隶属于“亚健康”状态, 只是两种等级的隶属度不同, 这是一种合理的健康状态的评估结果. 当然, 针对不同健康等级的发动机将采取不同的措施, 至于采取哪种处理措施, 可以根据不同状态的隶属度函数得出模糊决策.

发动机健康状态划分的等级既不能太少也不能太多, 常用的是 1~9 级表度法^[3]. 不同等级包含了两层物理意义: 一个是“安全性”, 随着状态等级的减小, 发动机安全性减小; 另一个是“危险度”, 随着状态等级的减小, 发动机危险性增大. 等级数目为奇数能够保证“安全性”和“危险度”的对称性和互补性质, 更符合表述习惯. 因此, 应选择奇数作为发动机健康等级数目.

将发动机健康状态划分为 3 个等级过于粗泛, 而划分为 9 个等级又过于繁琐, 不符合工程实践习惯; 奇数 7 作为除数可能产生无限循环小数, 造成等级区域均匀划分的不便; 数字 5 在十进制体系中具有良好的被整除性质, 因此将发动机健康状态划分为 5 个等级是最科学的.

本文将发动机健康状态划分为“健康”、“亚健康”、“合格”、“异常”和“故障”5 个等级, 每个等级所代表的安全性和危险度如表 1 所示.

2 影响发动机健康等级的主要因素

目前, 在基于振动的发动机健康状态评估领域, 振动烈度几乎成为描述发动机健康状态的唯一标准. 但是, 有时仅仅依靠振动烈度判断出的结果是片面的, 还有一些因素影响发动机的健康状态, 在健康状态等级评估时必须考虑.

故障概率: 通过智能分类识别算法, 将得到发动机处于不同故障模式的概率. 这个故障发生的概率是评估发动机健康状态的主要因素. 处于故障状态的概率越小, 发动机工作状态越好, 其健康状态等级安全性也就越高; 否则反之.

故障程度: 振动烈度是发动机结构故障程度最直接的描述. 振动幅值大, 发动机相应的健康状态危险度高; 振动幅值小的, 发动机相应的健康状态安全性高. 由于不同型号发动机执行的振动标准不同, 将振动绝对幅值与该型发动机该测点位置振动报警值的差值除以振动报警值, 将得到相对振动幅值. 利用相对振动幅值表示故障程度将消除发动机型号、传感器类型以及传感器安装位置的影响.

损失风险: 不同的故障模式发生, 将会造成不

同的后果和不同的损失.例如,相同的振动幅值情况下,发动机处于不平衡与处于叶片掉块故障状态下,造成的后果可能是不同的.发动机转子不平衡是绝对的,平衡是相对的.在一定范围内的不平衡状态,发动机有时甚至可以坚持完成本次运转;但如果发生了叶片掉块,很可能造成机毁人亡的重大事故.因此,不同的故障模式将带来不同的损失风险,这是发动机健康状态评估必须要考虑的因素.

当然,还有许多其它因素决定发动机健康状态等级的评估.这里,仅以 3 个因素为例说明模糊综合评价方法,并且认为 3 个因素对于健康状态等级评估结果的影响作用是相同的.这样,3 个因素的重要性的权值就是相同的,都等于 0.33.

3 发动机健康等级的综合评价原理

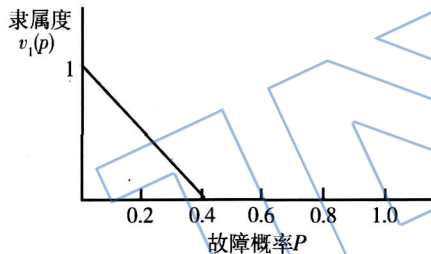
发动机健康状态等级由故障概率、故障程度和损失风险等因素决定,这些影响因素具有随机性或模糊性.且系统安全状态的模糊性已成为人们的共识,可以说,模糊集方法是评价系统安全度的最好方法之一^[3].因此,本文将模糊综合评价方

法应用于发动机健康状态的评价.

所谓模糊综合评价方法就是综合考虑不同因素对发动机健康状态的影响,在研究各种因素的重要性权值向量和不同健康状态等级的隶属矩阵的基础上,将各因素指标值大小转换成为隶属于上述 5 个健康状态等级的隶属度向量,最后基于最大隶属度原则确定发动机的健康状态等级.

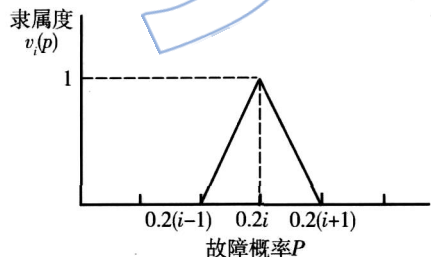
前面已经讨论了决定发动机健康状态的重要因素,并确定故障概率、故障程度和损失风险的权重系数均为 0.33.以上 3 个因素的隶属度函数分布是另一个重要的研究内容.

首先讨论不同故障概率时,发动机被评估成不同健康状态等级的隶属度函数.这里暂不考虑多故障并发时,故障之间的诱发、加强和削弱等相互作用.这样,对于耦合故障,可以逐个考虑单故障对发动机安全性的影响,分别评估健康状态.发动机最终的健康状态由这些单故障评估健康状态的最高等级决定.即单故障中所引发的最高危险度作为决定耦合故障危险度等级的依据.由此,以下讨论均以单故障为研究对象.



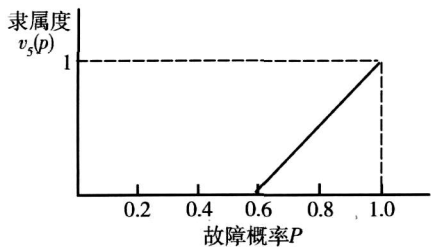
(a) 等级 I 隶属度函数

$$v_1(p)=\begin{cases} 1, & p=1 \\ \frac{0.4-p}{0.4}, & 0\leq p<0.4 \\ 0, & 0.4\leq p\leq 1 \end{cases} \tag{1a}$$



(b) 等级 II, III, IV 隶属度函数

$$v_i(p)=\begin{cases} 0, & 0\leq p<0.2(i-1) \\ \frac{p-0.2(i-1)}{0.2}, & 0.2(i-1)\leq p<0.2i \\ \frac{0.2(i+1)-p}{0.2}, & 0.2i\leq p<0.2(i+1) \\ 0, & 0.2(i+1)\leq p\leq 1 \end{cases} \tag{1b}$$



(c) 等级 V 隶属度函数

$$v_5(p)=\begin{cases} 0, & 0\leq p<0.6 \\ \frac{p-0.6}{0.4}, & 0.6\leq p<1 \\ 1, & p=1 \end{cases} \tag{1c}$$

图 1 不同故障概率隶属于 5 个健康状态等级的隶属函数

Fig. 1 Membership function of fault probability

如表1所示,现有5个健康等级.从低到高,等级的安全性逐步降低,危险性依次增加.不妨将故障概率的值域空间 $[0,1]$ 也等分成5份,每一份的宽度为0.2.在一定置信区间条件下,故障概率越低,发动机的安全性越高;故障概率越高,安全性越低.因此,如果故障概率低于10%,发动机的安全性最佳,最应该被划分为“等级I健康”,亦即此时等级的隶属度函数值最大.同理,如果故障概率高于90%时,等级V的隶属度函数值应该最大.不失一般性讨论,如果故障概率处于区间 $[0.2i, 0.2(i+1)]$, $i=0,1,2,3,4$ 时,等级 i 的隶属度函数值最大,等级 $i+1$ 和等级 $i-1$ 的隶属度函数值次之,等级 $i+2$ 和等级 $i-2$ 的隶属度函数值再次之.

根据上述分析,选择三角分布作为不同故障概率隶属于上述5个健康状态等级的隶属度分布模型.式(1a)~(1c)是5个健康等级的隶属度函数的数学表示,图1显示了5个健康等级的隶属度函数曲线.对于一个确定的故障概率,将其值代入式(1),将依次得到5个健康状态等级的隶属度值,由这5个值组成的隶属度向量表示这个故障概率下,发动机健康状态处于5个等级的程度.例如,如果经过模式识别算法,得出发动机处于不平衡故障的概率为90%,代入式(1)得到隶属度向量为 $[0 \ 0 \ 0 \ 0.5 \ 0.75]$,它的物理意义是:此时,发动机处于“健康”状态的模糊程度为0,而处于“故障”状态的模糊程度为0.75.如果不考虑其它因素,仅根据故障概率单因素评估发动机健康状态,依据最大隶属度原则,应该评定发动机为“故障”状态.这是一个合理评估的结果.

故障程度是决定发动机健康等级的另一个重要参数.本文利用振动烈度来表示故障程度.为了排除发动机型号、传感器类型以及传感器安装位置等因素的干扰,需将绝对振动幅值变化成为相对振动幅值,如式(2)

$$A_r = \frac{A - B}{B} \quad (2)$$

其中 A 为绝对振动幅值,即测试得到的振动幅值, B 为相同型号发动机相同测点位置的振动报警值, A_r 为变换后的相对幅值.

振动幅值和发动机健康状态等级具有相同的递变规律:一般情况下,振动幅值越小,发动机的安全性越高;振动幅值越大,安全性越低.这里需要考虑故障程度对健康等级的影响作用和故障概率的区别:如果故障概率很大,在一定置信水平下,发动机的健康状态只能是“异常”或“故障”状

态,是不可能被评定为“健康”状态的,因此,表示其隶属于“健康”、“亚健康”和“合格”状态的隶属度值为零;但是,故障程度却不同,即使发动机振动幅值不大,也不能肯定发动机一定处于健康状态.此时发动机处于5个状态的可能性都存在,即隶属度向量的5个元素的值都不为零.但如果发动机振动幅值超标,其健康状态却不能是“健康”.因此,选取模糊分布模型应该是全值域上平滑函数,且偏大型函数(如图1(a))和偏小型函数(如图1(c))不具有对称性.通过修改三角模糊分布模型,得到5个健康等级的隶属度函数(式(3)),其函数曲线如图2所示.

损失风险是发动机健康状态评估必须要考查的因素.不同故障模式,可能造成的损失是不相同的.按照故障发生的特性,可以将故障分为原发故障、渐变故障以及突发故障.原发故障的发生是在发动机的制造过程中产生的,例如不平衡故障、不对中故障.这类故障的特点是只能降低故障程度,无法彻底消除,故障程度不会随发动机的运转时间增加而加重,其振动特征相对稳定,只要运行时振动幅值在许可的范围内,一般不会造成重大的损失.渐变故障是指其故障特征会随着时间的推移而加重或变化,故障的发生表现为一种逐步的过程,一些轴承磨损表现出这一特点.

另外,渐变故障有时属于诱发故障,例如碰摩.它被其它故障诱发,并可能诱发其它一些故障.这类故障危险性大于原发故障,无法预料故障的发展过程,因此损失风险较大.损失风险最大要数突发故障,这类故障都是疲劳破坏.在疲劳极限以前,故障特征很小,在超越疲劳极限时,故障突然发生,并表现为结构破坏,其中典型的有叶片脱落和转轴断裂.

可以通过模糊统计法来分别估计原发故障、渐变故障和突发故障对5个健康状态等级的隶属度.模糊统计与故障概率统计是不同的,故障概率是在一定故障次数下,统计不平衡所占的比重,不对中占的比重等等,它表示的是发生不同模式故障的随机性;不同故障损失风险的模糊统计是研究某一故障发生后,发动机健康状态隶属于5个等级的模糊程度,其是在发生某一特定故障次数下,统计其造成结构破坏的频度,振动超标的频度等等.当然,在故障数据库不完善的情况下,可以结合专家打分法得到隶属度值.表2给出了基于专家打分法的发动机典型故障模式的损失风险隶属于5个健康状态等级的隶属度值.

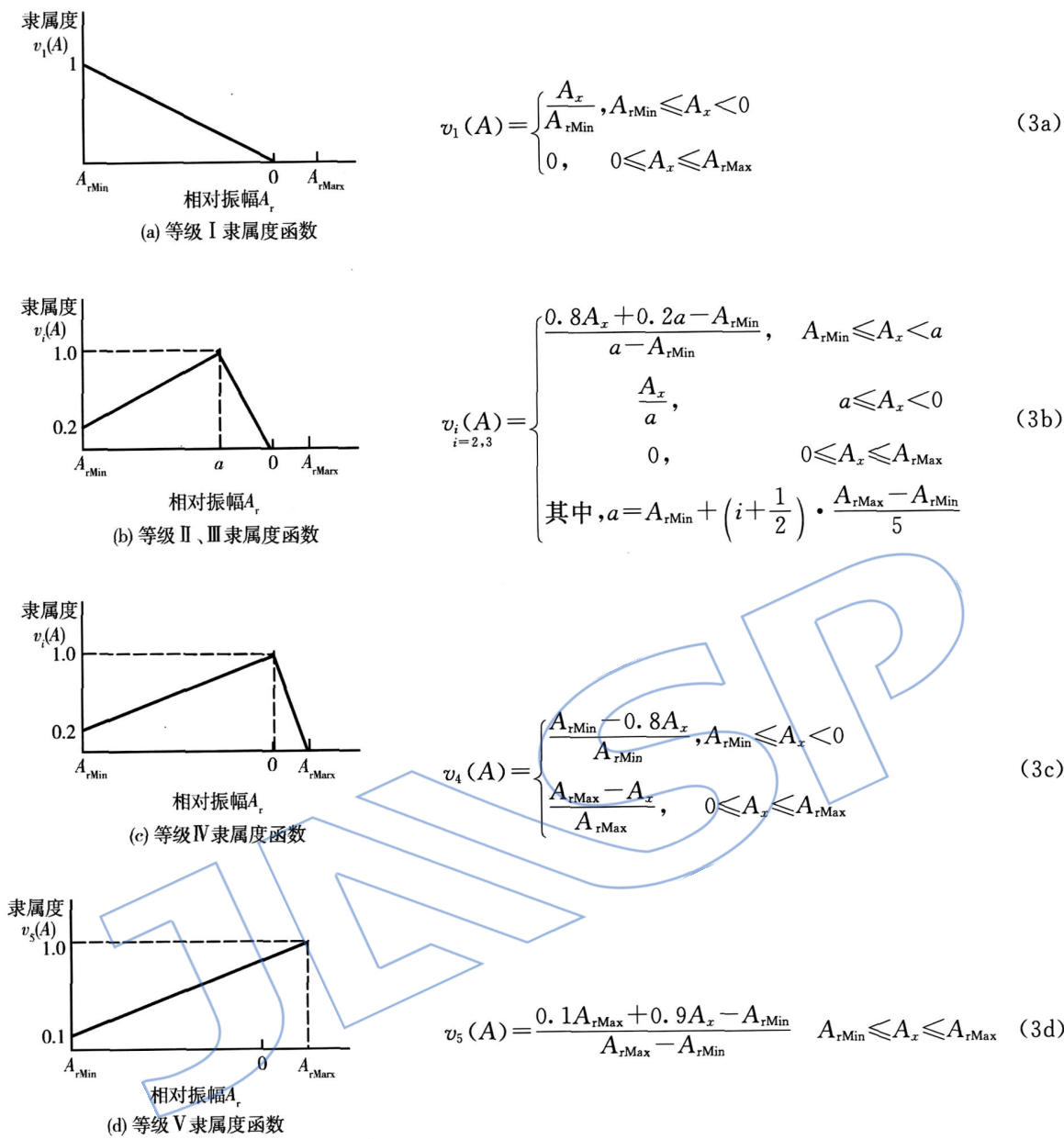


图 2 不同故障程度隶属于 5 个健康状态等级的隶属度函数

Fig.2 Membership function of fault degree

表 2 不同损失风险故障对 5 个健康状态等级的隶属度值

Table 2 Membership function of loss risk

故障模式	等级 I健康	等级 II亚健康	等级 III合格	等级 IV异常	等级 V故障
不平衡	0.1	0.1	0.2	0.4	0.2
不对中	0.1	0.1	0.2	0.4	0.2
转静碰摩	0	0	0.2	0.2	0.6
转子松动	0	0	0.2	0.2	0.6
轴承失效	0	0	0.2	0.5	0.3
气流激荡	0	0	0.2	0.4	0.4
转轴裂纹	0	0	0	0.2	0.8
叶片掉块	0	0	0	0.2	0.8

4 发动机健康等级的确定

前节讨论了发动机健康状态的重要因素,确定故障概率、故障程度和损失风险的权重系数 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0.33$, 并得到故障概率对于5个健康状态的隶属度函数式(1), 对于确定的故障概率, 可得隶属度向量 ($v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{15}$); 将确定的相对振动幅值代入式(2), 得到故障程度隶属于5个健康状态的隶属度向量 ($v_{21}, v_{22}, v_{23}, v_{24}, v_{25}$); 通过查表2可以得到损失风险隶属于5个健康状态的隶属度向量 ($v_{31}, v_{32}, v_{33}, v_{34}, v_{35}$).

为了综合考虑三种因素的综合影响, 评估发动机的健康状态的等级, 可采用下述综合评估数学模型:

$$B(b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4 \quad b_5) = (\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3) \times \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & v_{14} & v_{15} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & v_{24} & v_{25} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} & v_{34} & v_{35} \end{pmatrix} \quad (4)$$

计算得到的评判向量 $B(b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4 \quad b_5)$ 是发动机健康状态对5个等级的隶属度, 将发动机健康状态划分为隶属度值最大的等级, 即最大隶属度原则.

如果发动机处于耦合故障模式, 以组成耦合故障的单故障逐一计算健康状态等级, 最终发动机的健康状态等级等于其中最高的健康状态等级, 即最大危险性原则.

归一化的评判向量 B 尽管具有概率的形式, 但并不具有概率的物理意义. 它表示发动机健康状态可以被评估为5个健康状态等级的隶属程度, 根据最大隶属度原则确定的健康等级具有确定的意义. 但是必须指出的是, 被评估为健康状态, 并不能保证一定不发生事故, 同时被评估故障状态并不意味着一定会发生事故. 事故与不安全是两个既有联系又有区别的概念. 可以说, 一切事故是由于不安全引发, 但并非一切不安全便会导致事故的发生. 对发动机健康状态等级的评估以安全性(危险性)为描述对象, 力图在事故发生之前预测到事故的发生, 采取必要的措施避免事故的发生, 这正是对发动机健康状态等级评估的意义.

5 发动机健康等级评估实例

以西北工业大学的发动机故障模拟实验器的两组实验数据为例, 说明上述发动机健康状态综合评价的方法, 并分析评价结果的准确性和合理性.

性.

使发动机故障模拟器在不同故障模式及正常状态下工作, 在压气机盘水平方向安装传感器, 采集振动数据. 该通道的振动报警值为 20 mm/s . 建立朴素贝叶斯分类器, 将不同模式的振动数据作为训练集, 用以实现发动机健康状态的模式识别.

首先利用发动机故障模拟实验器模拟不平衡故障. 通过在压气机盘上配加配重, 可以模拟不平衡量对发动机健康状态的影响. 第一次实验配加一个螺母(约 $23 \text{ g} \cdot \text{cm}$), 得到振动信号 a , 其振动幅值为 21.70 mm/s , 代入式(2), 转换成相对振动幅值为 0.085 , 将振动信号 a 进行状态模式识别, 识别结果为: 发动机为不平衡状态的概率为 83% . 将故障概率 0.83 代入式(1), 得到故障概率因素影响下, 振动信号 a 对5个健康状态等级的隶属度向量 ($0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.85 \quad 0.58$); 将相对振动幅值 0.085 代入式(3), 得到故障程度影响下, 隶属度向量 ($0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.72 \quad 0.67$); 查表2得到不平衡故障可能引起损失对5个等级的隶属度向量 ($0.1 \quad 0.1 \quad 0.2 \quad 0.4 \quad 0.2$), 由此可得归一化的评估向量

$$B_a = (0.02 \quad 0.02 \quad 0.06 \quad 0.52 \quad 0.38)$$

根据最大隶属度原则, 振动信号 a 所反映的发动机健康状态被评定为等级 IV: 异常状态.

第二次实验配加两个螺母(约 $46 \text{ g} \cdot \text{cm}$), 得到振动信号 b , 其振动幅值为 25.05 mm/s , 转换成相对振动幅值为 0.2525 , 将振动信号 b 进行状态模式识别, 识别结果为: 发动机为不平衡状态的概率为 85% . 将故障概率 0.85 代入式(1), 得到故障概率因素影响下, 振动信号 a 对5个健康状态等级的隶属度向量 ($0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.75 \quad 0.63$); 将相对振动幅值 0.2525 代入式(3), 得到故障程度影响下, 隶属度向量 ($0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.17 \quad 0.93$); 查表2得到不平衡故障可能引起损失对5个等级的隶属度向量 ($0.1 \quad 0.1 \quad 0.2 \quad 0.4 \quad 0.2$), 由此可得归一化的评估向量 $B_b = (0.03 \quad 0.03 \quad 0.06 \quad 0.38 \quad 0.50)$

根据最大隶属度原则, 振动信号 b 所反映的发动机健康状态被评定为等级 V: 故障状态.

发动机健康状态的模糊综合评估算法对两次不平衡故障都进行了正确的评估, 并且将由一个螺母模拟不平衡量的振动信号 a 评判为等级 IV, 将由两个螺母模拟不平衡量的振动信号 b 评判为等级 V, 实现了发动机健康状态的定量分析, 得到的评估结果准确、合理.

动静碰摩也是发动机常见的故障之一. 利用发动机故障模拟实验器进行局部碰摩故障模拟实验,得到振动信号 c ,其压气机盘水平方向机匣测振通道的振动幅值为 21.47 mm/s . 转换成相对幅值为 0.0735 . 将振动信号 c 进行状态模式识别,识别结果为:发动机为动静碰摩故障的概率为 83% . 依照上述的分析方法,可以得到隶属度矩阵

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.85 & 0.58 \\ 0 & 0 & 0 & 0.75 & 0.66 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.2 & 0.6 \end{bmatrix}$$

代如式(4),得到归一化的评估向量 $B_c = (0\ 0\ 0.05\ 0.47\ 0.48)$,根据最大隶属度原则,振动信号 c 所反映的发动机健康状态被评定为等级 V:故障状态.

通过振动信号 a 与振动信号 c 的比较发现,信号 c 的振动幅值小于信号 a ,但被划分的健康状态等级却高于信号 a . 分析可知,信号 a 是不平衡故障的数据,信号 c 是动静碰摩故障数据. 尽管信号 c 的振动幅值暂时小于信号 a ,但碰摩故障会对叶片的强度产生严峻的考验,继续发展可能引发叶片折断等结构破坏,造成严重的后果. 此时,信号 c 反映发动机的危险性要大于信号 a . 因此,这种健康状态评估结果准确且合理.

6 结 论

航空发动机健康状态的评估本身具有模糊性,适合用模糊理论进行评价. 将健康状态划分为 5 个等级,得到每个健康状态等级的隶属度函数,最后基于最大隶属度原则和最大危险性原则确定发动机的健康状态等级. 通过研究,得到以下结论:

1) 将发动机健康状态划分为 5 个等级是科学的;

2) 有时仅仅依靠振动烈度判断出的结果是片面的,在健康状态等级评估时必须考虑包括故障概率、故障程度和损失风险在内的多方面因素;

3) 归一化的评判向量 B 尽管具有概率的形式,但并不具有概率的物理意义. 它表示发动机健康状态可以被评估为 5 个健康状态等级的隶属程度. 根据最大隶属度原则确定的健康等级具有确定的意义;

4) 如果发动机处于耦合故障模式,可以按组成耦合故障的单故障逐一计算健康状态等级,最终发动机的健康状态等级等于其中最高的健康状态等级,即最大危险性原则;

5) 发动机故障模拟实验器振动数据验证结果表明,利用模糊综合评价方法对发动机健康状态的等级评价结果准确且合理.

参考文献:

[1] TANG Genglin, Charlie L. Y, CHEN Daguang. Comparative study of two neural networks applied to jet engine fault diagnosis [C] // AIAA/ ASME/ SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit , 34th, Cleveland:1998.

[2] HAO Ying, SUN Jianguo, YANG Guoqing. The application of support vector machines to gas turbine performance diagnosis[J]. Chinese Journal of aeronautics,2005,18 (1):15-18.

[3] 许开立,陈宝智,陈全. 安全等级特征量及其计算方法[J]. 中国安全科学学报,1999,9(6):6-12.

XU Kaili, CHEN Baozhi, CHEN Quan. Characteristic quantity of safety grade and Its calculation method[J]. China Safety Science Journal, 1999,9(6):6-12.

[4] 潜伟建,夏志澜. 舰船技术状态等级划分方法研究[J]. 船舶工程,2001,5:62-64.

QIAN Weijian, XIA Zhilan. Study on grading of technical condition of warship[J]. Ship Engineering,2001,5:62-64.