

# 基于隶属度函数的电子设备故障预测研究

赵玉刚, 鞠建波, 张经纬

(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对当前电子设备模块化方向发展现状, 及时了解电子设备的运行状态, 预防故障并缩短维修时间, 采用模糊隶属度函数的方法, 将设备的模糊状态进行量化, 引入可信度因子及有关融合算法对以上数据进行处理, 最后根据自动测试设备 (ATE) 测得的数据及专家经验, 对该方法进行了验证; 经实验证明, 该方法是可行有效的, 对电子设备的故障预测具有较高的准确度。

**关键词:** 故障预测; 故障机理; 隶属度函数; 特征参数; 可信度因子

## Research on Fault Prediction of Electronic Device Based on Subjection Function

Zhao Yugang, Ju Jianbo, Zhang Jingwei

(Navy Aeronautics and Astronautics University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In view of the current electronic equipment modular direction development, timely understanding of electronic equipment running status, to prevent failures and shorten the maintenance time, adopt the method of fuzzy membership function, and to quantify the fuzzy state of the equipment, introducing the credibility factor and the fusion algorithm to deal with the above data, according to the automatic test equipment (ATE) measured data and expert experience, the method are verified. The experiments show that this method is feasible and effective, for the fault of electronic equipment has high forecast accuracy.

**Keywords:** fault prediction; fault mechanism; subjection function; feature parameter; certainty factor

### 0 引言

随着科学技术的不断发展, 现代电子设备高度智能化、复杂化和模块化, 各模块之间相互耦合, 互相作用, 所以很难用一个精确的数学模型来描述其工作状态。如果在设备发生故障前, 能够对电子设备进行有效的故障预测, 这将为设备维修节省大量的维修成本。电子设备的故障预测存在的困难在于<sup>[1]</sup>: ①难以建立相应的预测模型②模块之间相互耦合、互相作用使得信号之间相互关联③不同的电子设备故障预测方法难以通用④单一故障的原因不止一个或者同一原因产生多个故障。隶属度函数是一个模糊理论中的概念, 它反映了论域中变量与模糊集中元素之间的映射关系。由于电子设备故障概率在 0—1 内的闭区间, 并且特征参数的取值与设备发生故障的概率是一种映射, 所以合理选择隶属度函数, 可以很好地反映参数与设备发生故障之间的关系。

本文首先在分析某型电台工作原理的基础上, 结合 ATE 设备的测试数据及专家经验, 进行了故障预测特征参数的选择。由于现有各模块的运行特征参数直接反应了对应模块的运行状态, 所以根据参数及建立的隶属度函数关系, 来完成对模块故障概率的预测。

### 1 电子设备故障预测参数的选择

#### 1.1 基于信号流程图的故障预测参数选择

信号流程图反映了设备运行时, 各组成部分之间的对应关系及信号之间的依赖关系。通过信号流程图能够清晰地看出故障预测特征参数与电子设备可更换模块之间的对应关系。假设一个系统有 m1、m2、m3 和 m4 四个模块组成, 能反映系统与模块状态的特征参数主要有: s1、s2、s3、s4、s5、s6、s7、s8、s9、s10、s11, 其信号流图如图 1 所示。其中 T1、T2、T3、T4、T5、T6 为对外测试端口。根据信号流程图, 可以建立该系统的故障预测矩阵, 如表 1 所示。其中表中的各元素为故障状态特征参数能否反映模块的状态<sup>[2]</sup>。

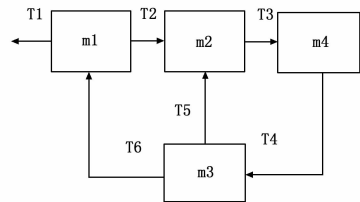


图 1 系统信号流程图

表 1 故障预测矩阵

测试端口	T1	T2	T3	T4	T5	T6					
主要参数	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11
模块 m1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
模块 m2	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0
模块 m3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
模块 m4	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0

收稿日期:2015-01-06; 修回日期:2015-04-07。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60874112);军队科研专项资助项目(41512321);军队科研专项资助项目(415C173)。

作者简介:赵玉刚(1980-),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事智能故障预测与诊断方向的研究。

鞠建波(1961-),男,山东烟台人,教授,博士生导师,主要从事智能故障预测与诊断方向的研究。

### 1.2 根据设备功能结构进行故障预测参数选择

要完成设备功能结构下的故障预测特征参数的选择,不仅要充分了解设备的工作原理,全面准确分析影响各模块正常运行的各种参数,而且需要大量的监测数据和专家经验。

下面以某型电台激励模块为例进行分析。该电台有两种工作模式,常规模式、抗干扰模式。在常规工作模式中,又分为两种工作状态,调幅(AM)和调频(FM);在抗干扰工作状态中也有两种工作方式,扩频(DS)和扩跳频(DS+FH)。在不同的工作模式下,对同一个模块的影响参数是不相同的。在常规调幅(AM)工作模式下,根据对该电台工作原理的分析、ATE 设备提供的数据和专家经验,得出反映电台设备中激励模块运行的主要特征参数有:UUT 发信端电流、频率准确度、频率误差、发射功率、AM 调幅度及 AM 调幅失真度等。

以上选择出的特征参数是该模块运行状态的直接体现者,也就是说特征参数值反映了模块的运行状况。设备在健康状态下工作时,其各项特征参数都是在正常范围的,随着设备运行过程中元器件的老化等原因,其健康状况不断下降,各项预测特征参数也会慢慢超出正常范围,这时设备就进入到了亚健康状态。一般情况下,一旦设备的特征参数超过了容许值,那么设备就会出现故障。所谓亚健康状态是指,设备形态和性能的亚健康,具有向健康状态和故障状态双向转化的特点,其对应的特征参数值处于容许值和上(下)限值之间。而特征参数值与设备状态的这种对应关系,可以通过隶属度函数来体现。

## 2 隶属度函数

隶属度函数的概念是 L. A. Zadeh 教授于 1965 年提出,实现了定量地刻画模糊性对象的目的。设  $U$  为论域(研究的范围),则  $U$  上的一个模糊集合  $A$  由  $U$  上的一个实值函数来表示。

$$\begin{aligned} &U \rightarrow [0,1] \\ \mu_A: &x \mapsto \mu_A(x) \end{aligned} \tag{1}$$

其定义<sup>[3]</sup>为:对于  $x \in U$ ,函数值  $\mu_A(x)$  称为  $x$  对于  $A$  的隶属度,而函数  $\mu_A$  称为  $A$  的隶属函数。隶属度  $\mu_A(x)$  越接近于 1,表示  $x$  属于  $A$  的程度越高, $\mu_A(x)$  越接近于 0 表示  $x$  属于  $A$  的程度越低。用取值于区间 0,1 的隶属函数  $\mu_A(x)$  表征  $x$  属于  $A$  的程度高低。

### 2.1 隶属度函数的确定方法

在电子设备故障预测中,合理地选择隶属度函数十分重要,它关系到是否恰如其分地将当前的模糊状态进行量化。由于隶属度函数的选取没有统一的方法,所以不同的工程人员在选取隶属度函数时可能不同。尽管如此,只要能正确反映当前的模糊状态,尽管形式不同,它们本质上是一致的。在故障预测领域通常采用的方法<sup>[4]</sup>有:有模糊统计法、典型函数法和带确信度的德菲尔专家确定法等。德菲尔专家确定法主要是建立隶属度函数,根据个人经验特别是专家经验给出具体数值,不断对隶属度函数进行修正。该方法较适合论域中变量为离散和有限的情况,本文中选取隶属度函数时采用此方法。

### 2.2 电子设备隶属度函数的确定

根据隶属度函数的确定方法及特征参数对应模块的性质,定义隶属度函数曲线如图 2 所示。对某型通信电台激励单元各测试参数进行测试时,其测试值应该是确定的。当故障预测参数  $x \in (x_1', x_1)$  时,设备运行正常;当故障预测特征参数  $x \in (x_1, x_2) \cup (x_2, x_1')$  时,随着特征参数值越靠近边缘

值时,发生故障的可能性将逐渐增大;当故障预测特征参数  $x \in (-\infty, x_1) \cup (x_1, +\infty)$  时,可认为故障状态。其中, $x_1', x_1$  为上、下限值, $x_2', x_2$  为特征参数容许值。

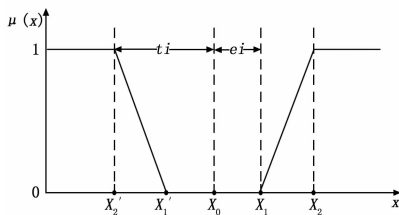


图 2 隶属度函数分布

根据以上分析及专家经验,隶属度函数的表达式<sup>[5]</sup>如下:

$$u(x) = \begin{cases} 1 & x_m \leq x_0 - t_i \\ -\alpha \frac{x_m - x_0 + e_i}{t_i - e_i} & x_0 - t_i < x_m < x_0 - e_i \\ 0 & x_0 - e_i < x_m \leq x_0 + e_i \\ \alpha \frac{x_m - x_0 - e_i}{t_i - e_i} & x_0 + e_i < x_m \leq x_0 + t_i \\ 1 & x_m > x_0 + t_i \end{cases} \tag{2}$$

式中,  $x_m$  为实际特征参数测量数值,  $x_0$  为电路正常工作时被测元件特征参数的标准值,  $t_i$  为极限偏差,  $e_i$  为正常变换范围;  $u(x)$  为故障预测元件的属于故障的隶属度函数;  $\alpha$  为修正系数。

## 3 基于隶属度函数的故障预测方法

### 3.1 隶属度与被测元件故障概率的对应关系

根据对通信电台工作原理的分析及专家经验,激励模块相关的各故障预测特征参数都可以用隶属度函数关系式(2)表示,即隶属度值定义为发生故障概率。假设引发故障参数的隶属度分别为  $u(i)$ , 对应发生故障概率分别为  $p(j)$ , 那么  $u(i) = m \cdot p(j)$ 。其中  $i, j = 1, 2, \dots$ , 此处设  $m = 1$ 。

### 3.2 预警值的建立

故障预测主要在于特征信号是否位于允许的正常波动范围之内,设备发生故障的显著表现就是特征参数值超过了容许值,有些特征参数稍超过容许值时,如功率,可能不影响设备的正常使用,但有的特征参数,如电压、电流等,则不能超过容许值,否则会造成设备故障,甚至会烧毁设备。对于容易引发故障或引发严重故障的特征参数,我们需要建立相应的预警值(阈值)。假设实际特征参数测量数值为  $x$ , 其隶属度函数  $u(x)$  满足式(1),同时要求  $x$  满足以下关系式时预警。

$$\begin{cases} \text{故障预警} & x \in (-\infty, x_2') \cup (x_2, +\infty) \\ \text{故障预警} & x \in (x_2', x_1') \text{ 且 } \left| \frac{x - x_2'}{x_2} \right| \leq 0.05 \\ \text{故障预警} & x \in (x_1, x_2) \text{ 且 } \left| \frac{x - x_2}{x_2} \right| \leq 0.05 \\ \text{不预警} & \text{其他} \end{cases} \tag{3}$$

### 3.3 可信度因子的引入

在进行故障预测时,由于不确定性因素及特征参数本身特点的影响,会出现大部分故障是由于某一特征参数的变化而引起的,而很少一部分故障是由其他特征参数引起的情况。对于这种不确定性我们采用可信度因子<sup>[6]</sup>来解决。可信度因子可以转化为故障条件的权值,从而使得预测结果更符合实际。

表 2 某型通信电台特征信号及部分实测数据(AM 模式 C 波段)

序号	测试项目	上限	下限	容许值(上/下)	阈值	实际参数值	是否预警	隶属度	可信度因子	故障概率(%)
1	UUT 发信端电流(A)	10	4.0	10.3/2.8	10.25	10.237	否	0.79	0.95	75.1
2	频率准备度(kHz)	175.000	174.949	175.450/174.500	无	174.975	否	0	0.85	0
3	频率误差(KHz)	1.5	-1.5	2.0/-2.0	无	0.3	否	0	0.9	0
4	发射功率(W)	100.0	10.0	102/9	9.45	9.5	否	0.5	0.9	45
5	AM 调幅度(%)	100	80	110/75	78.75	79.0	否	0.2	0.85	14
6	AM 调幅失真度(%)	6.0	0	6.5/0	6.175	6.125	否	0.25	0.85	21.25

可信度因子是通过属于某一特征参数类型的故障次数及故障发生的总次数之比来表示的。其计算公式如下:可信度因子 =  $\frac{\text{属于某一特征参数类型的故障次数}}{\text{故障发生的总次数}}$ 。取值范围为  $[0, 1]$ , 该值越靠近 1, 说明该类型的故障发生概率越高;反之,越靠近 0, 说明该类型的故障发生概率越低。可信度因子的引入, 表征了各特征参数在故障形成过程中不同的重要程度。其结构如图 3 所示。

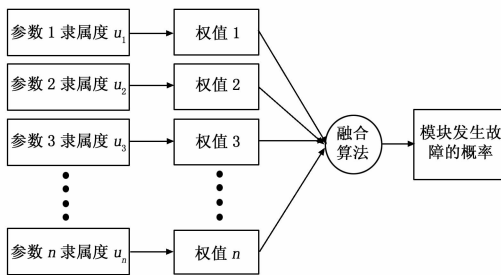


图 3 引入可信度因子(权值)的故障预测模型

### 3.4 融合算法的选择

融合算法的选择对预测结果的准确性有比较重要的影响, 常见的算法规则<sup>[7]</sup>有: 1) 主因素突出型; 2) 加权平均型; 3) 全面制约型; 4) 取小上界和型; 5) 均衡平均型。

主因素突出型, 不仅突出了主要因素, 同时也兼顾了其他因素。因此本文选用主因素突出法作为融合算法。其算法规则如下:

$$b_j = \bigvee_{i=1}^m (a_i \cdot r_{ij})$$

$$(j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中,  $\cdot$  为普通实数乘法,  $\bigvee$  为取大(max)运算。

### 3.5 故障预测步骤

- 1) 根据对设备工作原理的分析和专家经验, 选择特征参数;
- 2) 选择合适的隶属度函数;
- 3) 对特征参数进行加权平均, 求特征参数的实际测量值;
- 4) 将实际测量值与设定阈值比较, 确定是否报警;
- 5) 利用隶属度函数求其各特征参数对应发生故障的概率值;
- 6) 将各概率值进行融合获得模块发生故障概率。

## 4 故障预测实例

要实现准确的故障预测, 就应该获取所有很重要的关键信号, 实际上这对于复杂电子设备是不可能全部获得的。根据 ATE 设备对某型通信设备的长期实时检测, 能够表征激励模块工作状态的参数及部分监测数据(AM 模式 C 波段)见表 2。

以上数据为 ATE 设备测得的实际数据, 经过隶属度函数运算, 得到对应的隶属度值; 然后, 进行可信度因子加权, 获得各特征参数对应的故障预测概率; 最后, 采用主因素突出型融合算法得出激励模块故障预测概率为 75.1%, 即在当前的工作状态下, 该设备的激励模块会有 75.1% 的可能性发生故障。通过实际设备状态跟踪发现, 该方法可以有效获得设备当前各模块的工作状态, 能够对模块发生故障概率进行较为准确的预测。

## 5 结束语

本文在某型电台工作原理分析及专家经验的基础上, 采用模糊理论中隶属度函数的方法, 将当前设备的模糊状态进行了量化, 并将测得的特征参数具体数据以隶属度值的形式呈现。然后, 通过引入可信度因子及有关融合算法对以上数据进行了处理, 最终实现了电子设备的故障预测。根据预测结果和对设备状态的持续监测, 发现该方法是可行有效的, 具有较高的预测准确度。

### 参考文献:

- [1] 许丽佳, 王厚军, 龙兵. 基于贝叶斯网络的复杂系统故障预测[J]. 系统工程与电子技术, 2008(4), 30: 780-784.
- [2] Deb S, Pattipati K R, Raghavan V, Multi-signal Flow Graphs: A Novel Approach for System Testability Analysis and Fault Diagnosis[J]. IEEE AES System Magazine, 1995(5): 14-25.
- [3] 陈水利, 李敬功, 等. 模糊集理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] 鄂加强. 智能故障诊断及其应用[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2006.
- [5] 任占勇. 航空电子产品预测与健康管理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [6] 何勇枢, 陈赣. 基于 BP 神经网络模型的故障预测分析[J]. 微计算机信息(测控自动化) 2006, 22: 220-222.
- [7] 时旺, 孙宇锋, 王自力, 等. PHM 系统及其故障预测模型研究[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(10): 29-35.