

基于模糊故障树的 ILS 接收机的故障诊断

耿 宏, 刘 晔, 武泰安

(中国民航大学 航空自动化学院, 天津 300300)

摘 要: 仪表着陆系统是飞机导航系统的重要子系统, 其可靠性直接关系到飞机能否安全运行。为了准确描述故障对仪表着陆系统功能的影响程度, 文中基于对仪表着陆系统接收机故障概率的分析, 将模糊数学和故障树方法相结合, 以 AIRBUS 320 仪表着陆系统接收机为例, 详述了模糊故障树的建模过程, 并通过对其进行失效分析, 给出了仪表着陆系统接收机的故障诊断算法。仿真结果表明, 所建立的模型满足仪表着陆系统对接收机的故障诊断要求, 且建模方法具有广泛的适用性。

关键词: 仪表着陆系统; 模糊数; 故障树分析

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2011)09-0133-04

Fault Diagnosis to Instrument Landing System Based on Fuzzy Fault Tree

GENG Hong, LIU Ye, WU Tai-an

(Aeronautical Automation College, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: Instrument landing system is an important sub-aircraft navigation system, the reliability of which influences the safety of aircraft directly. In order to accurately describe the effect of fault on ILS, it combines fuzzy math and faulty tree based on the analysis of receivers' failure probability. Taking the AIRBUS 320 ILS receiver as example, the modeling procedure of fuzzy fault tree is detailed, and the fault diagnosis algorithm of ILS receiver is presented by failure analysis. The simulation results show that this method is effective to diagnose the fault of the instrument landing system, and the proposed method is widely applicable.

Key words: instrument landing system, ; fuzzy number, ; fault tree analysis

0 引言

仪表着陆系统 (Instrument Landing System, 简称 ILS) 是为飞行员提供航向道、下滑道信息, 或为自动驾驶仪提供着陆控制数据, 引导飞机安全近进着陆的导航系统。该系统需要准确、及时、可靠地为飞机导航系统提供航向信息, 引导飞机安全飞行及着陆。接收机是仪表着陆系统的核心组件, 元器件的可靠程度不高或者外界各种不确定性因素的影响, 使得故障发生的原因非常复杂难辨^[1]。通过查阅手册、法规、文件或维修调研可以获取仪表着陆系统的操作要领、测试进行条件和故障表现效应, 但无法获取接收机故障对仪表着陆系统功能的影响程度。机械工程学院的刘颖等人做了面向维修训练的故障建模、仿真与评估工作, 研

究的前提是只有正常和故障两种情况, 不能体现出故障对系统功能的影响程度。另外, 在结合概率论的条件下, 应用常规基于布尔逻辑的故障树分析理论分析其故障失效的原因, 依然存在很大的误差。

基此, 中文提出一种将仪表着陆系统接收机中的各组件故障概率用模糊理论中的模糊数表示的方法, 依据模糊理论的运算规则, 对仪表着陆系统接收机的内部组件进行故障树分析, 并具体研究仪表着陆系统接收机故障诊断算法。

1 仪表着陆系统原理

仪表着陆系统由地面设备和机载设备两部分构成。地面设备为地面信标, 由航向信标台、下滑信标台和 2 至 3 个指点信标台组成。航向信标台为飞机提供航向引导信号, 由航向信标天线产生辐射场, 在通过跑道中心延长线的垂直平面内形成航向面 (或称航向道)。下滑信标台为飞机提供下滑引导信号, 由下滑信标天线产生辐射场, 形成下滑面。根据机场的净空条件, 下滑面和跑道平面的夹角可以在 2° 至 4° 之间选

收稿日期: 2011-03-01; 修回日期: 2011-06-06

基金项目: 天津市科技攻关计划重点项目 (06YFGZGX00700); 国家自然科学基金重点项目 (60832011, 60572166)

作者简介: 耿 宏 (1964-), 男, 安徽人, 教授, 硕士, 主要研究领域为飞机维修工程、民航数据分析; 刘 晔, 硕士研究生, 主要研究领域为民航故障诊断、数据分析。

择。指点信标台提供距离信息。机载设备包括两个独立的 ILS 接收机,两者共用着陆航向信标天线和下滑道天线。

航向面和下滑面的交线对应跑道中心线和设定的下滑角,定义为下滑道。飞机沿下滑道在距离跑道入口 300 米处着陆。

2 模糊故障树分析的基本理论

不同于传统理论上的故障树分析方法,文中在定义故障事件发生的概率时采用模糊数理论,以处理不确定性问题的模糊性、随机性。例如,定义事件发生的概率介于 0.02 至 0.03 之间,则很可能在 0.028 左右,那么就可以用一个模糊数来描述该事件发生的概率。获取事件发生故障精确的概率值在实际应用中是十分困难的,而采用模糊理论中的模糊数概念就可解决这个难题。同时,结合工程技术人员的现场实际经验去构造模糊数的隶属函数,从而可以较为准确地描述出故障事件的发生概率,同时在一程度上允许有描述的误差,使得故障事件的描述具有比较大的适应性和灵活性^[2]。

2.1 模糊数

定义 1:模糊数 \tilde{A} 是论域 R 在 $(-\infty, +\infty)$ 上的连续模糊子集,其隶属函数满足^[3]:

$$\max_{x \in R} \mu_{\tilde{A}}(x) = 1 \quad (1)$$

定义 2:设 L, R 为模糊数的参照函数,若有

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} L\left|\frac{m-x}{a}\right|, & \text{当 } x \leq m, a > 0 \\ R\left|\frac{x-m}{\beta}\right|, & \text{当 } x > m, \beta > 0 \end{cases} \quad (2)$$

则称模糊数 \tilde{A} 为 $L-R$ 型模糊数,并记 $\tilde{A} = (m, \alpha, \beta)$,其中: m 为 \tilde{A} 的均值, α, β 分别为 \tilde{A} 的置信上下限, α, β 分布越大, \tilde{A} 越模糊,当 α, β 等于 0 时, \tilde{A} 为非模糊数^[3]。

当前理论中确定隶属度函数的方法很多,主要有三种:第一种是统计调查结果得出的经验曲线作为隶属度函数,如模糊统计实验法;第二种是根据专家的实际经验给出模糊信息的处理算式或相应权系数值来确定隶属函数;第三种是根据问题的具体性质,选用某些典型的数学物理函数作为隶属度函数,如降半矩形分布、升半哥西分布等^[4]。通常,在故障诊断方面一般选择典型函数法,初步确定粗糙的隶属函数,然后通过再学习和实践检验方式逐步修改和完善其性能。常见的有三角型和正态型,见图 1 和图 2。

较常用的是三角模糊数的模糊故障树分析,故仪着陆系统接收机中各底层事件发生的模糊概率采用

三角模糊数 \tilde{A} 表示,其参照函数为:

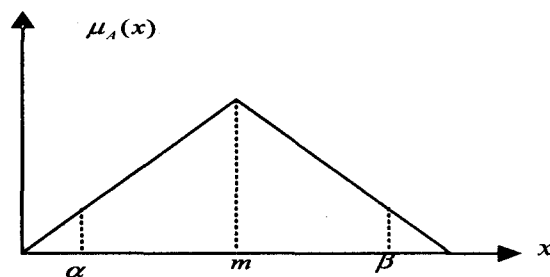


图 1 三角型隶属函数示意图

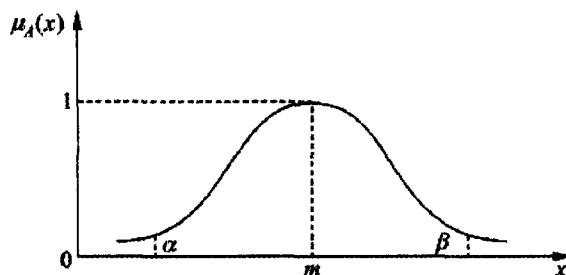


图 2 正态型隶属函数示意图

$$\begin{cases} L\left|\frac{m-x}{a}\right| = \max\left[0, 1 - \frac{m-x}{a}\right], & x \leq m, a > 0 \\ R\left|\frac{x-m}{\beta}\right| = \max\left[0, 1 - \frac{x-m}{\beta}\right], & x > m, \beta > 0 \end{cases} \quad (3)$$

对应模糊数 \tilde{A} 的隶属度函数为:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < m-a \\ 1 - \frac{x-m}{a}, & m-a \leq x \leq m \\ \frac{x-m}{\beta}, & m < x \leq m+\beta \\ 0, & x > m+\beta \end{cases} \quad (4)$$

模糊数 \tilde{A} 的 λ 截集为一区间数,可表示为:

$$\tilde{A}_\lambda = [(m-\alpha) + \alpha\lambda, (m+\beta) - \beta\lambda] \quad (5)$$

依据经典模糊理论的扩展原则,假设 \tilde{A}, \tilde{B} 为三角模糊算子,对 $\forall \lambda \in [0, 1]$ 有下面的扩展公式:

1) 加法:

$$\tilde{A}_\lambda + \tilde{B}_\lambda = [L_A^\lambda, R_A^\lambda] + [L_B^\lambda, R_B^\lambda] = [L_A^\lambda + L_B^\lambda, R_A^\lambda + R_B^\lambda]$$

2) 减法:

$$\tilde{A}_\lambda - \tilde{B}_\lambda = [L_A^\lambda, R_A^\lambda] - [L_B^\lambda, R_B^\lambda] = [L_A^\lambda - L_B^\lambda, R_A^\lambda - R_B^\lambda]$$

3) 乘法:

$$\tilde{A}_\lambda \times \tilde{B}_\lambda = [L_A^\lambda, R_A^\lambda] \times [L_B^\lambda, R_B^\lambda] = [L_A^\lambda \times L_B^\lambda, R_A^\lambda \times R_B^\lambda]$$

4) 除法:

$$\tilde{A}_\lambda / \tilde{B}_\lambda = [L_A^\lambda, R_A^\lambda] / [L_B^\lambda, R_B^\lambda] = [L_A^\lambda / L_B^\lambda, R_A^\lambda / R_B^\lambda]$$

2.2 故障树分析的模糊算子

在传统的故障树分析理论中,对于一个给定的故障树,在底层事件发生的故障概率和结构函数已知的条件下,顶事件故障发生的概率是可以唯一确定的。输入模糊化完成从故障征兆向量到输入模式之间的转

化,即将故障现象信号转化为以隶属度表示的模糊量集合,作用在于将输入信号进行模糊化处理^[5]。

在文中的模糊故障树分析中,认为组成系统的底层事件发生的概率为模糊数 \bar{F}_x ,顶层故障事件 P 可能发生的模糊概率用系统的模糊结构函数 $\bar{\Phi}(x_1, x_2, \dots, x_{13})$ 来表示,中间故障事件 M_i 有可能发生故障的模糊概率用 \bar{F}_{m_i} 来表示,最底层故障事件 X_i 有可能发生故障的模糊概率用 \bar{F}_{x_i} 来表示。

由式(5)可以定义:

$$\bar{F}_{s_1} = [(m_1 - \alpha_1) + \alpha_1 \lambda, (m_1 + \beta_1) - \beta_1 \lambda] \quad (6)$$

$$\bar{F}_{s_2} = [(m_2 - \alpha_2) + \alpha_2 \lambda, (m_2 + \beta_2) - \beta_2 \lambda] \quad (7)$$

如果或/与门的输入故障发生概率事件分别用 s_1 和 s_2 来表示,输出事件用 s 来表示,模糊故障发生概率分别用 \bar{F}_{s_1} 和 \bar{F}_{s_2} 来表示,则通过下式可以求得故障树中或/与门的输出事件 s 模糊故障概率 \bar{F}_s ^[1]:

1) 与门结构:

$$\bar{F}_{s_i}^{\text{and}} = \bar{F}_{s_1} \bar{F}_{s_2} =$$

$$[(m_1 - \alpha_1) + \alpha_1 \lambda, (m_1 + \beta_1) - \beta_1 \lambda][(m_2 - \alpha_2) + \alpha_2 \lambda, (m_2 + \beta_2) - \beta_2 \lambda] =$$

$$|[(m_1 - \alpha_1) + \alpha_1 \lambda][(m_2 - \alpha_2) + \alpha_2 \lambda], [(m_1 + \beta_1) - \beta_1 \lambda][(m_2 + \beta_2) - \beta_2 \lambda]| \quad (8)$$

2) 或门结构:

$$\bar{F}_{s_i}^{\text{or}} = 1 - (1 - \bar{F}_{s_1})(1 - \bar{F}_{s_2}) = [1, 1] -$$

$$\prod_{i=1}^2 ([1, 1] - [(m_i - \alpha_i) + \alpha_i \lambda, (m_i + \beta_i) - \beta_i \lambda])$$

$$= |1 - \prod_{i=1}^2 [1 - (m_i - \alpha_i) - \alpha_i \lambda], 1 - \prod_{i=1}^2 [(1 - (m_i + \beta_i) + \beta_i \lambda)]| \quad (9)$$

与门结构以及或门结构的算子可以由上式(8)和(9)得到,进而可由故障树的模糊结构函数逐步地计算出系统顶层事件发生故障的概率,也就是系统的不可靠度^[5]。

3 仪表着陆系统接收机故障树建立

3.1 仪表着陆系统接收机底层事件的概率

故障树分析法把事件分成3个层面,第一个是最顶层事件,把系统中最不希望发生的故障状态放在故障树分析法中最顶层事件的位置,然后逐层去寻找导致顶层事件发生的直接原因,再找寻直接原因的过程中,将它们之间存在的逻辑关系用规定的特定逻辑符号语言(逻辑与、或)表示出来,就这样由上到下逐级一级一级的分解,一直分解到不能再分解为止。第二个是中间事件,第三个是最底层事件,也就是把不能再分解的事件称为最底层事件,顶层事件和最底层事件以外的所有事件都可以称之为中间事件。故障树分析

法的关键在于故障树整个的建立过程,故障树建立的是否完善将直接影响到故障发生原因分析查找的准确程度。寻找导致顶层事件发生的原因事件或者原因事件的组合是通过对故障树进行定性分析得到的,也就是在求出故障树的全部最小割集的过程中获取的。为说明问题方便,文中以仪表着陆系统接收机的输出故障为例建立故障树,如图3所示。先求出该故障树全部的最小割集,由于仪表着陆系统故障树中各底层事件均为或的关系,不存在与的关系,使得分析简便许多,一个底层事件就构成了一个最小割集^[6]。故障树中对应的事件参见表1。

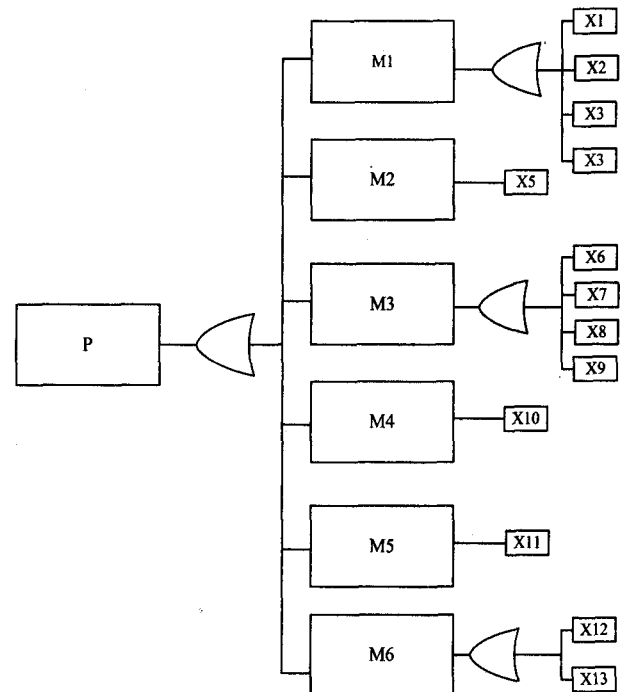


图3 仪表着陆系统接收机故障树

表1 事件编码表

事件代号	事件名称	事件代号	事件名称
P	ILS 接收机故障	M6	接收机输出端口 2 故障
M1	115V 交流电源故障	X1	2RT1 · AC/2 口故障
M2	维护数据丢失	X2	2RT1 · AC/3 口故障
M3	接收机天线故障	X3	线 L3436 · 0001 故障
M4	ILS 音频输出故障	X4	线 L3436 · 0002 故障
M5	自测试功能故障	X5	2RT1 · AB/2B(2C) 端口故障
X6	2RT1 · AC/1 端口故障	X7	2 RT1 · AC/5 端口故障
X8	线 L3436 · 0011 故障	X9	线 L3436 · 0013 故障
X10	2RT1 · AB/1A(1B) 端口故障	X11	2RT1 · AB/15D 端口故障
X12	2RT1 · AB/11B(11C) 端口故障	X13	线 L3436 · 7056R 故障

建立故障树是故障树分析法中最关键的环节,也是分析故障树的前提。ATA 规定外场航线故障诊断主要是更换航线可更换件(Line Replaceable Unit 简称 LRU),因此以 LRU 为飞机机载电子系统组成基本单

元,分析系统原理和功能,抽象出是故障点的LRU。首先以系统结构和原理为基础,通过查找A320 Trouble Shooting Manual手册,抽象出是故障点的LRU^[7]。

表1对导致仪表着陆系统接收机故障的各事件进行了编码。根据仪表着陆系统接收机的工作原理和各部件之间的内部关系,采用演绎法建立仪表着陆系统接收机故障树,如图3所示。

根据有关试验数据、历史统计资料以及工程技术人员经验,仪表着陆系统接收机中各底层事件的故障率均值 m 以及置信上下限 α, β 估计如表2所示。

表2 接收机各底层事件故障率

均值 m 、置信上下限 α, β

事件号	m	α, β	事件号	m	α, β
X1	0.004	0.0007	X2	0.002	0.0005
X3	0.004	0.0007	X4	0.002	0.0005
X5	0.003	0.0007	X6	0.002	0.0006
X7	0.002	0.0006	X8	0.002	0.0006
X9	0.003	0.0006	X10	0.006	0.0004
X11	0.004	0.0006	X12	0.003	0.0007
X13	0.004	0.0006			

3.2 仪表着陆系统接收机模糊故障树定量分析

传统的故障树分析理论中,利用故障树最小割集的方法可以精确计算出故障树中最顶层事件故障的发生概率^[8]。但由于ILS接收机故障发生的原因过于复杂难辨,因此,在进行故障树定量分析的过程中,文中利用模糊数学理论模糊化输入,然后进行下面的组件模糊故障树分析^[9]。

由图3知,各事件逻辑关系式可表示如下:

$$\begin{aligned}
 P &= M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 \\
 M_1 &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \\
 M_2 &= X_5 \\
 M_3 &= X_6 + X_7 + X_8 + X_9
 \end{aligned} \quad (10)$$

$$M_4 = X_{10}$$

$$M_5 = X_{11}$$

$$M_6 = X_{12} + X_{13}$$

可推出顶层事件和底层事件的逻辑关系是:

$$\begin{aligned}
 P &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 \\
 &+ X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13}
 \end{aligned} \quad (11)$$

根据对各底层事件的故障概率估计,对底层事件 $X_1 \sim X_{13}$ 作 λ 截集可得:

$$\tilde{F}_{X_1} = (0.0033 + 0.0007\lambda, 0.0047 - 0.0007\lambda)$$

$$\tilde{F}_{X_2} = (0.0015 + 0.0005\lambda, 0.0025 - 0.0005\lambda)$$

$$\tilde{F}_{X_3} = (0.0033 + 0.0007\lambda, 0.0047 - 0.0007\lambda)$$

$$\tilde{F}_{X_4} = (0.0015 + 0.0005\lambda, 0.0025 - 0.0005\lambda)$$

$$\tilde{F}_{X_5} = (0.0023 + 0.0007\lambda, 0.0037 - 0.0007\lambda)$$

$$\tilde{F}_{X_6} = (0.0014 + 0.0006\lambda, 0.0026 - 0.0006\lambda)$$

$$\tilde{F}_{X_7} = (0.0014 + 0.0006\lambda, 0.0026 - 0.0006\lambda)$$

$$\tilde{F}_{X_8} = (0.0014 + 0.0006\lambda, 0.0026 - 0.0006\lambda)$$

$$\tilde{F}_{X_9} = (0.0024 + 0.0006\lambda, 0.0036 - 0.0006\lambda)$$

$$\tilde{F}_{X_{10}} = (0.0067 + 0.0003\lambda, 0.0073 - 0.0003\lambda)$$

$$\tilde{F}_{X_{11}} = (0.0023 + 0.0007\lambda, 0.0037 - 0.0007\lambda)$$

$$\tilde{F}_{X_{12}} = (0.0014 + 0.0006\lambda, 0.0026 - 0.0006\lambda)$$

$$\tilde{F}_{X_{13}} = (0.0043 + 0.0007\lambda, 0.0057 - 0.0007\lambda) \quad (12)$$

根据以上获取的截集,对上式进行反复运用式(9)的运算,并忽略 $o(\lambda)$ 的高阶项,进而求得顶层事件的模糊概率^[10]:

$$\tilde{\Phi}_A = (0.0091 + 0.0009\lambda, 0.0108 + 0.0008\lambda) \quad (13)$$

当 $\lambda = 1$ 时, $\tilde{\Phi}_A = 0.01$,即当各底层事件故障发生的概率不存在模糊性时,仪表着陆系统接收机不能工作,发生故障的概率为1%;当 $\lambda = 0$ 时, $\tilde{\Phi}_A = [0.0091, 0.0108]$,即当各底层事件模糊性十分明显,故障概率的不确定性较大的时候,仪表着陆系统接收机失效概率在0.92% ~ 1.08%之间进行变化。

3.3 仪表着陆系统接收机故障诊断算法研究

当仪表着陆系统接收机发生故障的时候,需要高效快速地查找故障源并对故障予以及时排除^[11]。文中主要是通过对所建故障树的节点进行逐层搜索来完成仪表着陆系统接收机的故障诊断,先利用各事件的模糊故障概率(参考历史经验数据)作为启发信息,然后采用优先搜索技术,对树中的所有故障进行一一查找,直到最底层的所有叶子节点均被搜索到为止^[12]。

故障诊断程序流程安排如下:

1)若仪表着陆系统接收机故障顶层事件 P 没有发生,程序直接跳转至结束,显示故障诊断无误;

2)否则取下一层节点集 W ,先计算出 W 的模糊概率均值,然后对其排序,若节点集 W 为空集,也直接跳转至程序结束;

3)若节点 $\text{Test} = \text{first}(W)$, $\text{Remove}(\text{Test}, W)$,若 Test 发生故障,记录故障;

4)若节点集 W 是空集,程序直接跳转至2);否则,程序直接跳转至3);

5)显示最终的故障诊断结果,程序结束。

4 结束语

文中在介绍仪表着陆系统接收机工作原理和模糊

(下转第140页)

(10) xl.Run "chatset"

(11) xlcomp.CodeModule.DeleteLines 1, xlcomp.CodeModule.CountOfLines

2.3.5 断开连接

当结束时,断开连接,利用 MSComm 的 PortOpen 属性关闭,将其设置为 False,释放资源。

3 结束语

手机作为一种方便快捷的通讯工具已经渗透到人们的日常生活中。手机短信,以其简便的操作、即时的通信,以及低廉的成本等优点受到大学生的青睐。鉴于此,文中针对多媒体课堂教学中师生间缺乏互动沟通,对 GSM 模块在课堂教学中的应用进行了一个初步的探讨,设计了一个简单的系统。系统在保持教师上课方式的基础上,将 Excel 作为数据库,把 PowerPoint 和 Excel 关联起来,并运用宏代码更新 Excel 表中的图表,实时为教师呈现学生对知识的掌握情况。不仅调动了学生上课的积极性,使学生认真听讲,而且使教师能及时了解学生对知识的掌握情况,及时修改讲课的内容和进度。系统对研究复杂的互动式多媒体课堂系统具有一定的基础作用。

参考文献:

[1] 姜传国.多媒体课堂教学的利弊分析及对策[J].辽宁工学

院学报,2006,8(6):140-142.

- [2] 顾国民,郑河荣,赵小敏.基于短信平台的高校互动教学模式[J].高教与经济,2008,21(4):36-38.
- [3] Kalden R, Meirick I, Meyer M. Wireless Internet Access Based on GPRS[J]. IEEE Personal Comm, 2000, 7(2): 8-18.
- [4] Peersman G, Cvetkovic S. The Global System for Mobile Communications Short Message Service [J]. IEEE Personal Comm, 2000, 7(3): 15-23.
- [5] GSM 07.07 version 7.5.0: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); AT command set for GSM Mobile Equipment (ME) [S]. 1998.
- [6] GSM 07.07 version 5.0.0: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); AT command set for GSM Mobile Equipment (ME) [S]. 1996.
- [7] 钟志荣. PowerPoint 在课堂教学中的应用[J]. 中国远程教育, 2001(3): 64-66.
- [8] 付光辉. CAI 课件制作中 PowerPoint 的数据合并及技巧[J]. 实验室科学, 2006(2): 71-73.
- [9] 王珂. GSM 模块简介[EB/OL]. 2009. <http://www.gogddq.com/html/2009-03/452783.htm>.
- [10] 葛磊蛟, 姚素娟, 毛一之, 等. 基于 C#.NET 的 GSM MODEM 短信猫应用设计开发[J]. 现代电子技术, 2009(6): 94-96.
- [11] 李继容, 何湘初. 基于 GSM 的家校短信管理系统的设计[J]. 农业网络信息, 2008(5): 177-179.
- [12] 李寿林, 张鹰, 李秀萍. 利用 GSM 无线模块收发短信[J]. 计算机与数字工程, 2005, 33(7): 79-84.

(上接第 136 页)

理论的基础上,对利用模糊故障树理论构造的仪表着陆系统接收机模糊故障树进行了初步的定量分析。通过定量分析可知:充分考虑各事件故障概率不确定性,仪表着陆系统接收机失效的概率将会在 0.92%~1.08% 之间变化。虽然该结果仍然具有一定的不确定性和模糊性,但相比于之前的采用精确概率理论进行系统部件失效分析具有更广泛的实际意义,更能直接说明仪表着陆系统接收机的可靠性程度。在研究仪表着陆系统接收机的故障诊断算法时,利用了各事件的模糊概率作为一种提示性信息对故障树进行搜索,提高了故障诊断的效率。

参考文献:

- [1] 龙志强,吕治国,常文森.基于模糊故障树的磁浮列车悬浮系统故障诊断[J].控制与决策,2004(2):139-142.
- [2] 赵艳萍,贡文伟.模糊故障树分析及其应用研究[J].中国安全科学学报,2001(6):31-34.
- [3] 张世伟.模糊数学应用[M].上海:同济大学出版社,1991.
- [4] 冯辉宗,钟玲,袁荣棣.基于模糊神经网络的天然气发动机故障诊断[J].计算机应用,2010(12):282-287.

- [5] 柴春红,刘家学.模糊数学在飞机故障诊断中的作用[J].模糊系统与数学,2003,17(3):25-35.
- [6] 刘颖,朱元昌,邸彦强.面向维修训练的故障建模、仿真与评估[J].计算机工程,2007,33(13):245-247.
- [7] 程树林,姚合生,叶家鸣.基于模糊产生式规则推理的电脑故障诊断系统[J].计算机技术与发展,2007,17(12):37-43.
- [8] 虞和济,陈长征,张省.基于神经网络的智能诊断[M].北京:冶金工业出版社,2000:264-266.
- [9] 李国勇,杨庆佛.基于模糊神经网络的车用发动机智能诊断系统[J].系统仿真学报,2007,19(5):1034-1037.
- [10] Song F, Allen J. Mixed-initiative systems for collaborative problem solving[J]. Artificial Intelligence Magazine, 2007, 28(2): 23-32.
- [11] Choi J Y, Farrell J A. Adaptive observer backstopping control using neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2001, 12(5): 1103-1112.
- [12] Geng Hong, Li Jingzhao. A Novel Function Model of the Electronic Fault Diagnosis Simulator [C]//2009 Second International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling. [s.l.]: [s.n.], 2009: 241-243.