

文章编号:1001-9081(2007)07-1802-04

## 结合贝叶斯理论的飞控系统故障树诊断方法

尹 伟,章卫国,李 斌,刘小雄

(西北工业大学 自动化学院,西安 710072)

(why4000@gmail.com)

**摘要:**由于飞行器地勤维修的复杂性,在维修中容易造成地勤人员排故过程的盲目和低效,提出一种基于故障树理论知识的模糊故障诊断专家系统。利用贝叶斯理论修改模糊关系算式以获得定量运算关系,并且给出了决策步骤。应用飞行控制系统实例进行仿真验证,得到了满意的结果。

**关键词:**故障树;模糊专家系统;贝叶斯理论;故障诊断;飞行控制系统

**中图分类号:** TP182 **文献标志码:** A

## Fault tree diagnosis method in flight control system combined with Bayesian

YIN Wei, ZHANG Wei-guo, LI Bin, LIU Xiao-xiong

(College of Automation, Northwest Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

**Abstract:** The complexity of aircraft ground maintenance always causes the blindness and low efficiency of ground crew during the debug process in flight service. For solving this problem, a method of the fuzzy fault diagnosis expert system based on fault tree theory was proposed. By using Bayes' theorem to modify fuzzy relation formula, the quantitative relation equation was got and the decision-making step was given. Through the simulation, a flight control example was given and satisfying results were got.

**Key words:** fault tree; fuzzy expert system; Bayes' theorem; fault diagnosis; flight control system

### 0 引言

飞行器机上自检和维护技术在地勤维修活动中起到了关键性作用,然而,故障诊断和隔离、维修方案,需要维修人员经过逐渐摸索和经验知识大致确定,这增加了维修费用和维修时间。基于故障树的故障诊断专家系统提高了维修效率,为维修决策提供了一种先进的解决方案。

可靠性技术中故障树分析方法是一种用于复杂系统可靠性、安全性分析与预测的最有效的方法之一。<sup>[1]</sup>然而,现有的理论和方法需要将故障树顶事件和底事件发生的概率视为一精确值,应用在飞行控制系统故障树是不易得出有效结论的。主要因为:其一,飞控系统和组成单元不能提供大量的数据以供统计之用,而且往往带有一定误差;其二,飞控系统属于高可靠性系统,故障发生频率很低,无法获得足够数据信息;其三,飞控系统具有复杂的人-机系统,由于人的因素、相关失效,共因失效等造成系统故障建模的不确定性,纯概率方法难以奏效。此外,飞行器飞行时受外界环境的影响,上述的概率值通常也会发生变化。

因此,对于飞行控制系统进行故障树分析时,故障树各事件发生的概率本身带有不确定性,而故障树各事件的组合会产生不同的维修决策,采用贝叶斯方法结合模糊规则为获得这类不确定知识问题的专家解提供了帮助。

### 1 飞行控制系统故障诊断模糊专家系统结构

在传统的专家系统中,规则的前件和结论只能是精确的数值或命题,只能在{0,1}中取值。如果要模拟领域专家知

识的不确定性、只能在规则的尾部引进一个“置信度”,用以表示规则的可信程度,除此以外,规则本身是不允许含有模糊数据(如“大约5”)和模糊命题(如“传感器传输数据有误”)的。因此利用贝叶斯方法,对条件之间进行模拟,以得出一个定量数据,结合模糊函数,求解出不确定数据的置信度。

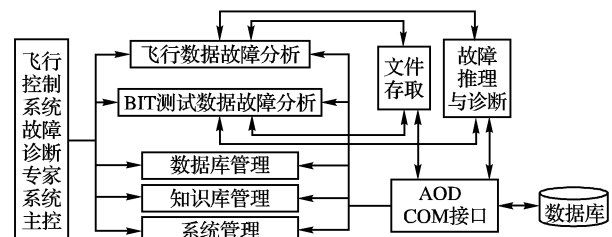


图1 飞控系统故障诊断专家系统模块

### 2 贝叶斯与模糊方法在故障树推理中的应用

#### 2.1 故障树的建立

故障诊断知识的获取和推理是以故障树分析技术为基础的,故障树分析法就是把所研究系统的最不希望发生的故障状态作为故障分析的目标,然后寻找直接导致这一故障发生的全部因素,再找出造成下一级事件发生的全部直接因素,一直追查到那些原始的、无须再深究的因素为止。

故障树的特点是故障搜索沿“树枝”逐步进行,在下行搜索遇到的每一节点处设置“鉴别”操作项目,按照其鉴别的结果对照相应的判据,确定后续搜索寻找故障原因的方向。故障树规定出各项“鉴别”操作,经过优化确定的先后顺序,避免了盲目搜索,提高了诊断效率。因此,故障树具有分辨率

收稿日期:2007-01-18;修回日期:2007-03-20。

作者简介:尹伟(1979-),男,湖南长沙人,博士研究生,主要研究方向:故障诊断、智能控制; 章卫国(1956-),男,安徽南陵人,教授,博士生导师,主要研究方向:智能控制理论与应用、飞行控制、鲁棒控制; 李斌(1980-),男,山东邹城人,博士研究生,主要研究方向:故障诊断、信息融合; 刘小雄(1973-),男,陕西人,讲师,博士,主要研究方向:飞行控制与仿真、故障诊断、冗余容错技术。

高、误差率较小、所用时间较短、代价最小的优点;故障树同时也是故障诊断知识库的理想组织形式,用之生成的专家系统知识库,在一定程度上减小了知识获取的难度。

根据这一特点构建了基于故障树的故障征兆诊断知识库,并且将知识形式化为数据库的形式,便于诊断策略的实施。故障树分析法首先要构造故障树。故障树的构造:先选定系统中最不希望发生的故障事件为顶端事件  $A, B$ , 其后找出导致该事件发生的各种因素或因素组合,如硬件故障、环境因素、人为因素等作为第二级事件(或中间事件),用适当的逻辑门把它们与顶级事件联结起来,同理将导致第二级事件的原因找出来并列在第二级事件的下面,作为第三级事件,并用适当的逻辑门与第二级相应的事件联结起来,如此逐层展开,直到把最基本的原因分析出来为止。假定  $T_1, T_2, T_3$  为中间事件,  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in R^n$  组成了故障集合。如图 2 所示。

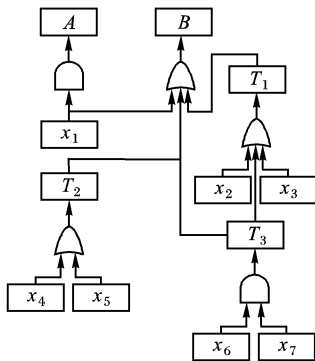


图 2 一个故障树的例子

例如:根节点  $A$  为飞控系统机械零位偏移,  $B$  为飞控系统飞控计算机(Flight Control Computer, FLCC)故障,那么  $T_1$  定义为电缆故障,  $T_2$  为速率传感器(Rate Sensor Assembly, RSA)故障,  $T_3$  为 LOE(Loss of Effectiveness)故障,表示测量的故障数据。

### 2.2 故障树模糊隶属函数的推导

假设各底事件发生的模糊概率已知,则可以令顶事件发生的模糊概率的隶属函数为:

$$\mu_{\bar{P}_R}(y) = \begin{cases} \sup_{X \in \phi^{-1}(y)} \min[\mu_{\bar{P}_{x1}}(x), \mu_{\bar{P}_{x2}}(x), \dots, \mu_{\bar{P}_{x_n}}(x)], & \phi^{-1}(y) \neq \emptyset \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\phi(X)$  为故障树的结构函数,  $\bar{P}_{x_i} (i = 1, 2, \dots, n)$  为部件  $i$  发生的模糊概率的隶属函数,  $\bar{P}_R$  为顶事件发生的模糊概率的隶属函数,  $n$  为故障个数。

概率传递为:

$$R = T_1 + T_2 + T_3 + x_1 \quad (2)$$

则  $P(R) = P(T_1) + P(T_2) + P(T_3) + P(x_1)$  为其故障顶事件发生的概率。

对于规则 IF  $X$  THEN  $T$ , 其模糊隶属函数为:

$$\mu_{X \rightarrow T}(u, v) = \min(\mu_X(u), \mu_T(v)) \quad (3)$$

其中  $u, v$  对应  $X, T$  的论域。在飞行控制系统故障诊断中可以依此定义规则:

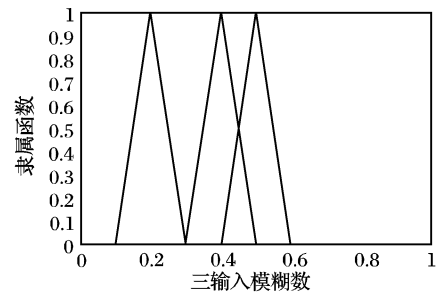
IF 传感器测量电压超限很多 THEN 故障的可能性很大  
对于测量数据, Zadeh 假设给出的数据为  $X_{data}$ , 模糊置信

度通过一个常常被称为推理的合成规则(Compositional Rule of Inference, CRI)传播。为了解释 CRI, 给定规则是“IF  $X$  THEN  $T$ ”, 有效数据为  $X_{data}$ 。目标就是建立  $T$  的一个隶属函数包括了  $X_{data}$  的有效证据, 因此得到:

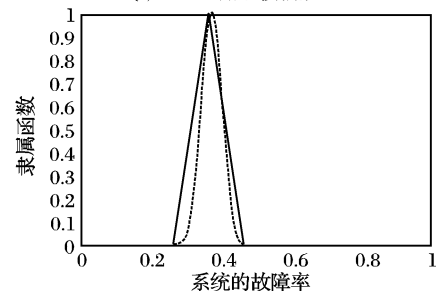
$$\mu_T(v) = \sup_u \{ \min(\mu_{X_{data}}(u), \mu_{X \rightarrow T}(u, v)) \} \quad (4)$$

在这里需要扩展(Span)运算, 实际上就是一种 max-min 形式的扩展。扩展原理是指映射  $f$  将模糊集合考虑两个模糊数“相互作用”时可以采用其他算子, 基于“max-概率积”的扩展原理可以表示为:

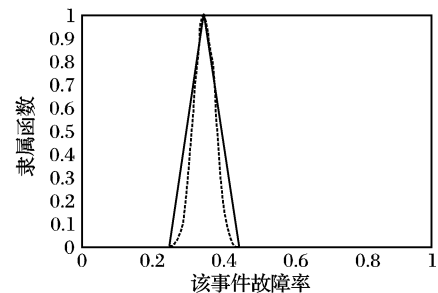
$$\forall y \in Y, \mu_{f(\bar{A}_1, \bar{A}_2, \dots, \bar{A}_r)}(y) = \begin{cases} \sup_{y=f(x_1, x_2, \dots, x_r)} [\mu_{\bar{A}_1}(x_1) \cdot \mu_{\bar{A}_2}(x_2) \cdot \dots \cdot \mu_{\bar{A}_r}(x_r)], & f^{-1} \neq \emptyset \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$



(a) 三个三角形模糊数



(b) 顶事件模糊概率



(c) 中间事件模糊概率

图 3 三角形模糊数隶属函数举例

设  $f: R \times R \rightarrow R$  上的二元运算,  $\tilde{C} = f(\tilde{A}, \tilde{B})$ , 则:

$$\mu_{\tilde{C}}(z) = \int_M \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot \mu_{\tilde{B}}(y) dx dy, z \in R, \quad M = \{(x, y) \in R^2, z = f(x, y)\} \quad (6)$$

或

$$\mu_{\tilde{C}}(z) = \sum_M \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot \mu_{\tilde{B}}(y), z \in Q, \quad M = \{(x, y) \in Q^2, z = f(x, y)\} \quad (7)$$

$Q$  为模糊数有限支集。

根据  $T$  的隶属函数, 得到  $T$  对  $X$  的权值  $W$ , 与  $X$  的概率相

乘得到  $T_i$  故障的置信度  $E = w_i P_{x_i}$ 。故障推理举例说明如下 ( $W$  为最大故障等级, 为  $w_i$  的最大值):

IF  $X_1$  故障 THEN  $E_B = W_1 \times P(X_1) / W \Rightarrow B$  发生故障的可信度为  $E$ , 做出决策支持。

IF  $X_1, X_2$  同时故障 THEN  $E_B = [W_1 \times P(X_1) + W_2 \times P(X_2)] / [2 \times W] \Rightarrow T_1$  发生故障的可信度为  $E_{T_1}$ , 做出决策支持。

IF  $X_1, X_2, X_3$  同时故障 THEN 计算  $E_{T_1}$  和  $E_{T_2}$  同时计算  $E_B \Rightarrow T_1, T_2, B$  发生故障的可信度, 做出决策支持。

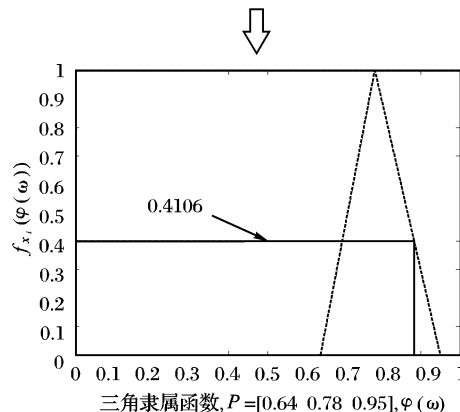
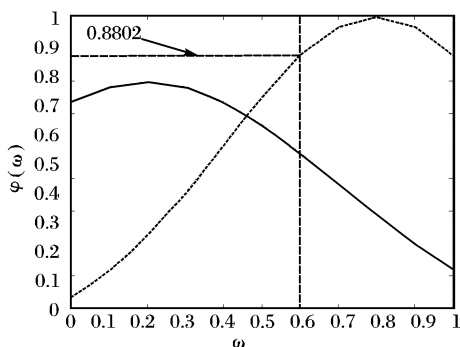
以三角形模糊数为例:

$$\mu(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (8)$$

以  $x_1$  (模糊数为 0.1, 0.2, 0.3),  $x_2$  (模糊数为 0.4, 0.5, 0.6),  $x_3$  (模糊数为 0.3, 0.4, 0.5) 为例, 求卷积, 获得中间事件  $T_1$  和顶事件  $B$  的隶属函数如图 3。

### 2.3 贝叶斯理论改进模糊关系算式

依据上述模糊隶属度函数, 判定故障的结论是忽略相互故障之间影响, 和不考虑其他故障为前提的。而从故障本身与故障原因之间关系, 需要建立具有条件约束的量化结论。贝叶斯理论中含有的条件概率关系, 为解决这一问题提供了理论基础。



三角隶属函数,  $P=[0.64 \ 0.78 \ 0.95], \varphi(\omega)$

图 4 函数映射图

根据贝叶斯公式, 定义故障和故障原因之间的贝叶斯概率:

$\omega$  是故障原因的概率为  $P(\omega)$ ,  $\omega \in R^d$  ( $d$  维欧几里德空间);  $x_i$  发生故障的概率为  $P(x_i)$ ;  $\omega$  为故障是由于  $x_i$  导致的概率为  $P(\omega | x_i)$ ;  $x_i$  发生故障的原因是  $\omega$  的概率为  $P(x_i | \omega)$ , 得到:

$$\varphi(\omega) = P(x_i | \omega) = \frac{P(\omega | x_i)P(x_i)}{\sum_{i=1}^n P(\omega | x_i)P(x_i)} \quad (9)$$

$$P(\omega) = \sum_{i=1}^n P(\omega | x_i)P(x_i) \quad (10)$$

这里的贝叶斯概率主要是当故障发生时, 该故障原因是由该故障导致的条件概率。

由概率以及欧几里德空间的定义, 已知  $0 \leq \|\varphi(\omega)\| \leq 1$ , 定义模糊函数  $F$ :

$$D(F) \subset \Phi \mapsto \mu$$

$Fx = \mu(\varphi(\omega)) = f_{x_i}(\varphi(\omega))$  通过线性运算得到下式:

$$f(\omega) = \frac{\sum_{i=1}^n k_{x_i} f_{x_i}(\varphi(\omega))}{\sum_{i=1}^n k_{x_i}}, \quad 0 \leq \|f(\omega)\| \leq 1 \quad (11)$$

$k_{x_i} = 0, 1, 2, \dots$  为  $x_i$  故障的模糊加权, 是根据故障的重要程度由小到大的整数。

$x_i$  发生故障定义为  $S_{x_i} = \begin{cases} 0, & \text{未发生故障} \\ 1, & \text{底层故障} \end{cases}$  为二值状态数

据, 定义如下关系  $g(r)$ :

$$g(\text{AND}) = \bigcap_{i=1}^n R^n = \prod_{i=1}^n S_{x_i} \quad (12)$$

$$g(\text{OR}) = \frac{\sum_{i=1}^n S_{x_i}}{n} = \begin{cases} 1, & g(\text{OR}) > 0 \\ 0, & g(\text{OR}) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$g(\text{XOR}) = \frac{\sum_{i=1}^n S_{x_i}}{n} = \begin{cases} 1, & 0 < g(\text{OR}) < 1 \\ 0, & g(\text{OR}) = 0 \text{ 或 } 1 \end{cases} \quad (14)$$

由此可以得到关系算式:

$$f(\omega) = \frac{\sum_{i=1}^n k_{x_i} f_{x_i}(\varphi(\omega))g(r)}{\sum_{i=1}^n k_{x_i}} \quad (15)$$

认为  $f(\omega)$  为故障树决策的置信度。

### 3 故障树决策

故障树决策步骤如图 5 所示, 当故障数据输入后, 利用模糊隶属函数确定对故障加权因子, 经过计算得出故障种类和可信度, 得到结论。如果不能找出故障, 需要转入分系统故障诊断模式, 对上一次故障和其权值进行进一步的分析, 直至找出最后的故障原因。

以图 2 故障树为例, 飞行控制系统中某测试信号  $x_i$  出现故障, 其期望的电压值 (或者说无故障电压值) 为  $\text{EXP} < -6.996\text{V}$ , 实测为  $0.024\text{V}$ , 其概率数据如表 1。

表 1 概率数据表

概率	$p$	$A   \bigcirc$	$B   \bigcirc$	$T_1   \bigcirc$	$T_2   \bigcirc$
$x_1$	0.9	0.9	0.5		
$x_2$	0.2			0.2	
$x_4$	0.5				0.3
$T_1$	0.8		0.2		
$T_2$	0.3		0.3		

此时  $x_2$  也发生故障, 根据故障重要程度得到权值  $W =$

(0,1,2,3,4), 求出概率为:  $\varphi_{x_1}(B) = 0.45$ ,  $\varphi_{x_2}(B) = 0.16$ ,  $f(B) = 0.34$  ( $\mu_{x_1} = 0, 8, k_{x_1} = 4, \mu_{x_2} = 0.2, k_{x_2} = 1, \mu_{T_1} = \mu_{T_2} = 0, k_{T_1} = 2, k_{T_2} = 3$ ) 认为  $B$  的故障由  $x_1$  引起。

而当  $x_4$  发生时,  $\varphi_{x_4}(B) = 0.09$ ,  $f(B) = 0.61$  ( $\mu_E = 0.9$ )。

规则可定义为: 如果  $\varphi(\omega) \leq 0.35$ , 可以认为误差故障; 如  $\varphi(\omega) \geq 0.6$ , 认为需要检查该系统的电路; 如果  $\varphi(\omega) \geq 0.9$ , 判定需要更换该部件。

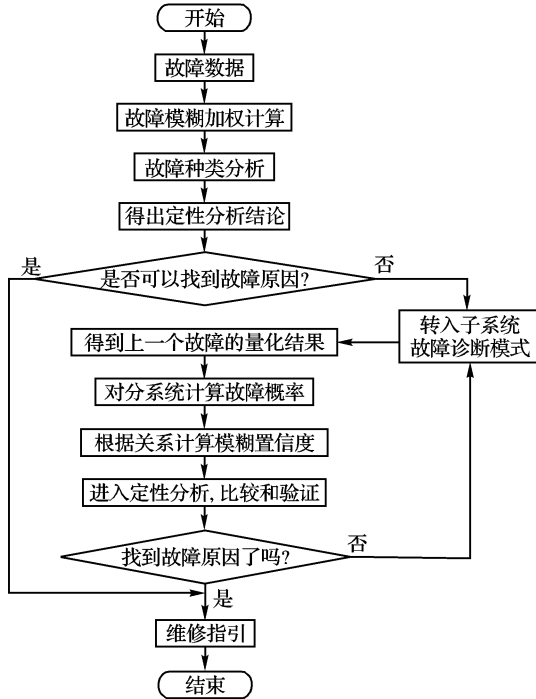


图 5 故障树决策流程

#### 4 结语

本文提出了采用故障树建立故障诊断专家系统知识库, 和模糊隶属函数计算的扩展概念, 以飞行控制系统故障为主要研究对象, 应用贝叶斯理论改进了关系和模糊函数运算, 通过故障的不确定性知识推理, 得到维修决策。目前飞行控制系统故障诊断专家系统已应用在现有飞行器故障诊断中, 利用飞行器 BIT 和飞行测试数据进行试验, 其诊断结果为维修方案的选择提供了易理解的参考。

#### 参考文献:

(上接第 1775 页)

[4] CZAJKOWSKI K, FOSTER I, KESSELMAN C, et al. Resource management architecture for metacomputing system [C]// Proceedings of the 4th Workshop on Job Scheduling Strategies for Parallel Processing, LNCS 1459. Orlando: Springer - Verlag, 1998, 1459: 62 - 82.

[5] BRAUN T D, SIEGEL H J, BECK N. A comparison of eleven static heuristics for mapping a class of independent tasks onto heterogeneous distributed computing systems[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2001, 61(6): 810 - 837.

[6] SIEGEL H, ALI S. Techniques for mapping tasks to machines in heterogeneous computing systems [J]. Journal of Systems Architecture, Special Issue on Heterogeneous Distributed and Parallel Architectures: Hardware, Software and Design Tools, 2000, 46(8): 627 - 639.

[7] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社,

[1] 王永传, 庄钊文. 一种基于修正模糊算子的模糊故障树分析方法[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(9): 80 - 86.

[2] 周纪经, 孙权. 一种故障树分析的新算法[J]. 模糊系统与数学, 1997, 11(3): 74 - 78.

[3] 王丽荣. 电控发动机故障诊断专家系统的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2004.

[4] 田应忠. 基于模糊集的模糊专家系统研究与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.

[5] 李登. 飞行控制系统故障检测理论研究及软件系统设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.

[6] 潘茂庆, 王奇, 沈云山. 多媒体歼击机故障诊断专家系统[J]. 计算机工程, 2004, 30(4): 127 - 128.

[7] GIARRATANO J, RILEY G. 专家系统原理与编程[M]. 印鉴, 刘星成, 汤庸, 译. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[8] 刘有才, 刘增良. 模糊专家系统原理与设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.

[9] 闻新, 张洪钺, 周露. 控制系统的故障诊断和容错控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[10] LUSSIER B, CHATLA R, INGRAND F, et al. On fault tolerance and robustness in autonomous systems[C]// Proceedings of the third IARP/IEEE-RAS/EURON Joint Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments. Manchester, GB: [s. n.], 2004.

[11] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of an expert system for the condition assessment of transformer insulation based on dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1127 - 1134.

[12] PAN J, DE SOUZA C N, KAK A C. FuzzyShell: A large-scale expert system shell using fuzzy logic for uncertainty reasoning[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1998, 6(4): 563 - 581.

[13] MANIAN R, DUGAN J B. Combining various solution techniques for dynamic fault tree analysis of computer systems[C]// The 3rd IEEE International Symposium on High-Assurance Systems Engineering. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 1998: 21 - 28.

[14] GOLDEN J. Fault diagnostics using expert systems[C]// AIAA 30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, Nevada, USA: AIAA, 1992.

[15] TANG C, YATES C L, ZHANG J, et al. A practical intelligent system for condition monitoring and fault diagnosis of jet engines [C]// 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.

2001.

[8] GLOVER F. New approach for heuristic search: a bilateral linkage with artificial intelligence [J]. European Journal of Operational Research, 1989, 39(1): 119 - 130.

[9] FRANCA P M, GENDREAU M, LAPORTE G, et al. A tabu search heuristic for the multiprocessor scheduling problem with sequence dependent setup times [J]. International Journal of Production Economics, 1996, 43(2/3): 79 - 89.

[10] PORTO S C S, RIBEIRO C C. A tabu search approach to task scheduling on heterogeneous processor under precedence constraints[J]. International Journal of High Speed Computing, 1995, 7(1): 45 - 71.

[11] BUYYA R. Economic-based distributed resource management and scheduling for grid computing[D]. Melbourne, Australia: Monash University, 2002.

[12] 魏天宇, 曾文华, 黄宝边. 基于 Min-Min 改进后的网格调度算法[J]. 计算机应用, 2005, 25(5): 1190 - 1192.