

含故障统计相依组件的多态复杂系统故障树分析

侯金丽, 金平, 蔡国飙

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 为精确评估可重复使用火箭发动机系统可靠性,采用带约束变量的布尔算法将状态分析与故障树分析恰当结合,从而对含故障统计相依组件的复杂多态可重复使用火箭发动机系统进行可靠性分析.以航天飞机主发动机(SSME)为研究对象,对管路多态性及预燃室和涡轮泵之间的故障相依性进行深入研究.结果表明:该布尔算法能够很好地消除组件统计相依性从而简化复杂多态系统故障树,组件之间失效相依性对系统可靠性影响较大,因此需要加强组件多态及相依性的研究来获得更精确的系统可靠度.

关键词: 重复使用火箭发动机; 故障树分析; 多态系统; 布尔算法; 统计相依性

中图分类号: V434⁺.2

文献标志码: A

Fault tree analysis of complex multistate system with fault statistically dependent components

HOU Jin-li, JIN Ping, CAI Guo-biao

(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To exactly estimate the reliability of reusable rocket engine, a Boolean algebra with restriction on variables was introduced to properly combine fault tree analysis with state analysis, and the reliability analysis of complex multistate system with statistically dependent components were performed. Both the multistate of pipes and the statistical dependence between preburner and turbopump of space shuttle main engine (SSME) were deeply studied. The result show that the Boolean algebra can well eliminate statistical dependence among components to simplify the fault tree analysis of complex multistate system, and the statistical dependence has significant influence on the system reliability, so further research is required for higher performance of the reusable rocket engine.

Key words: reusable rocket engine; fault tree analysis; multistate system; Boolean algebra; statistical dependence

随着我国深空探测、空间利用任务的深入开展,对火箭运载能力的要求将大幅提升.目前,国内航天运载器所采用的都是一次性使用火箭发动机,即每一套火箭发动机都只能完成一次发射任务,这势必造成很大的资源浪费.可重复使用的天地往返运载技术是降低发射费用、提高发射可靠性、缩短发射周期、实现大规模进出空间的有效途径^[1-5].

与以往一次性使用火箭发动机相比,可重复

使用火箭发动机面临更高的技术要求,整个系统也随之变得更加复杂,故障发生的概率相应提高,故障模式变得多样化.因此,人们迫切需提高航天器、运载器及其推进系统的可靠性和安全性^[6-7].

较为通用的可靠性分析方法有状态分析、失效模式、影响及关键分析、故障树分析(fault tree analysis, FTA)、因果框图、Bayesian 置信网络、事件树分析和可靠性框图等.其中 FTA 以其快速、灵活等独特的优势广泛用于复杂系统的可靠性分

析以及各种复杂系统的故障诊断和维修策略分析^[8-9].

传统故障树分析方法建立在假设各组件之间相互独立且只存在正常、故障两种状态的基础上.事实上,组件之间的故障是存在相依性和传播关系的,而且实际的组件不仅会呈现正常、故障两种状态,更多时候会介于两者之间,因此需要发展更为全面的分析方法来实现精确评估系统可靠性^[10-13].

状态分析法能准确定位到每个单元状态,很容易将组件间的统计相依性包含到模型中,但是由于复杂系统中单元状态数目相当庞大,这种分析方法并不能较好地用于实际分析中.相反,故障树分析法将系统分解到最小割集水平,由于复杂系统中割集数要远小于单元状态数,所以故障树分析法更适用于复杂系统的分析,但故障树分析法无法处理统计相依组件问题,因此这里采用一种带约束变量的布尔算法将两类分析方法较好结合,从而对复杂系统进行精确可靠性分析^[14-15].

本文采用改进故障树分析方法对 SSME 系统中的预燃室、涡轮泵、推力室、管路及控制子系统进行可靠性分析,深入研究管路系统多态以及预燃室和涡轮泵之间的故障相依性,为准确评估可重复使用火箭发动机系统可靠性提供参考.

1 数学模型

引入带约束变量的布尔算法对故障树分析方法进行改进,从而处理系统多态和统计相依性问题.

1.1 带约束变量的布尔算法

图 1 为 NO.1 故障树算例模型,假设各个变量之间相互独立,其中顶事件 T 的布尔函数表达式为

$$T = (c \vee d) \wedge (a \vee b) \quad (1)$$

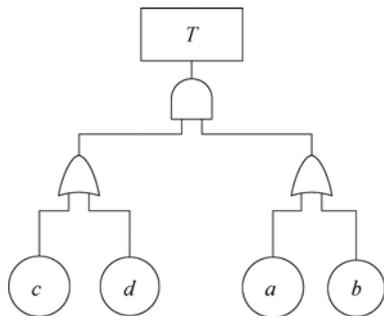


图 1 故障树模型(NO.1)

Fig.1 Fault tree mode (NO.1)

对应真值表见表 1.

表 1 故障树模型初始真值表

Table 1 Complete truth of the fault tree model (initial)

过约束标志	序号	输入				输出
		a	b	c	d	T
+	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	1	0
+	3	0	0	1	0	0
	4	0	0	1	1	0
+	5	0	1	0	0	0
	6	0	1	0	1	1
+	7	0	1	1	0	1
	8	0	1	1	1	1
	9	1	0	0	0	0
	10	1	0	0	1	1
	11	1	0	1	0	1
	12	1	0	1	1	1
	13	1	1	0	0	0
	14	1	1	0	1	1
	15	1	1	1	0	1
	16	1	1	1	1	1

假设系统由 m 个基本组件 $c_j(j=1,2,\dots,m)$ 组成,组件 c_j 的状态集为 $c_{jq}(q=1,2,\dots,n_j)$. 为每个状态 c_{jq} 关联一个布尔变量 C_{jq} ,含义为

$$C_{jq} = \begin{cases} 1 & c_j \text{ 处于 } c_{jq} \text{ 状态} \\ 0 & c_j \text{ 不处于 } c_{jq} \text{ 状态} \end{cases} \quad (2)$$

显然 C_{jq} 之间相互不独立,满足下面约束:

约束 1

$$\bigvee_{q=1}^{n_j} C_{jq} = 1 \quad (3)$$

约束 2

$$C_{jq} \wedge C_{jk} = 0 \quad q \neq k \quad (4)$$

考虑 NO.1 故障树模型,假设基本变量 a 和 d 属于同一个组件,由式(3)和式(4)得到

$$a \vee d = 1 \quad (5)$$

$$a \wedge d = 0 \quad (6)$$

因此,根据式(5)和式(6)判断表 1 中第 1,3,5,7,10,12,14 和 16 行显然不成立,因此真值表简化到 8 行.进一步发现,简化后的真值表中不是所有变量都相互独立, a 和 d 之间是相互影响的,于是将变量 d (或 a)删除,得到变量相互独立的真

值表,结果见表 2.

表 2 故障树模型最终真值表

Table 2 Complete truth of the fault tree model (final)

序号	输入			输出
	a	b	c	T
1	0	0	0	0
2	0	0	1	0
3	0	1	0	1
4	0	1	1	1
5	1	0	0	0
6	1	0	1	1
7	1	1	0	0
8	1	1	1	1

1.2 统计相依变量的消除

假设组件 A 和 B 的转换关系是相依的,即当组件 B 失效时,存在一个固定概率值 K_A 使得 A 也失效,反之亦然.此时需要引入一个超级组件 G, G 的状态由 A 和 B 相交得到,图 2 给出了组件间的状态转换关系.

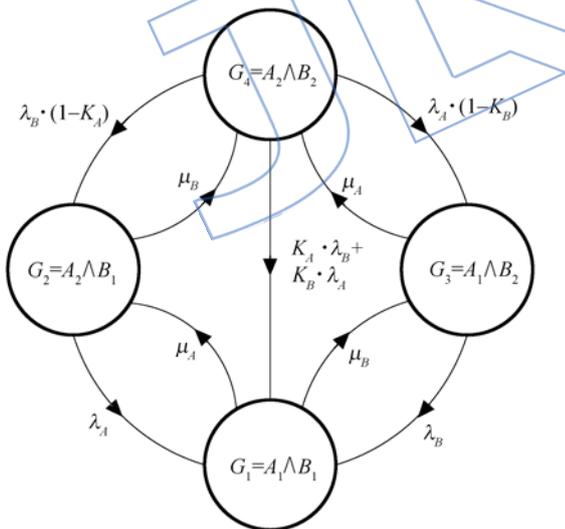


图 2 超级组件 G 的状态图

Fig. 2 State diagram of super-component G

图中 λ_A 代表 $A_2 \rightarrow A_1$ 的转化速率, μ_A 代表 $A_1 \rightarrow A_2$ 的转化速率,同理 λ_B 和 μ_B 代表 B_1 和 B_2 之间的转化速率, K_A 和 K_B 为相依系数.

由图 2 的状态关系,可以得到组件 A 和 B 关于组件 G 的变量函数关系.

$$A_1 = G_1 \vee G_3 \quad (7)$$

$$A_2 = G_2 \vee G_4 \quad (8)$$

$$B_1 = G_1 \vee G_2 \quad (9)$$

$$B_2 = G_3 \vee G_4 \quad (10)$$

1.3 两两互斥布尔函数的分离

布尔函数的分离指将布尔函数表示成多个单项式的分解格式,这里的单项式由基本变量组合而成,且满足以下特性:

- 1) 任意单项式 X 非 0,即 X 不包含互斥的布尔变量.
- 2) 单项式 X 中不包含重复的变量.
- 3) 单项式之间不能互相包含.
- 4) 单项式中不能含有负变量.

显然布尔函数可以有多种单项式表达形式,将一种形式称为布尔函数的一组基,于是包含所有单项式的基称作完整基.若任何一个单项式被删除后,其余单项式的组合不再构成一组基时,称这组基为非冗余基,当非冗余基含有最小数目的单项式时,此非冗余基成为最小非冗余基.

故障树中顶事件 T 布尔函数的非冗余基求解过程如下.

- 1) 获得布尔函数的分离形式

图 3 为 NO. 2 故障树模型,先获得故障树变量表,格式见表 3. 先自上而下填写变量,然后自下而上填写门信息.

获得故障树变量表后进行布尔函数分离形式的求解,这里采用单项式表方法,基本原理是遇到或门纵向添加元素,遇到与门横向添加元素,具体过程见表 4.

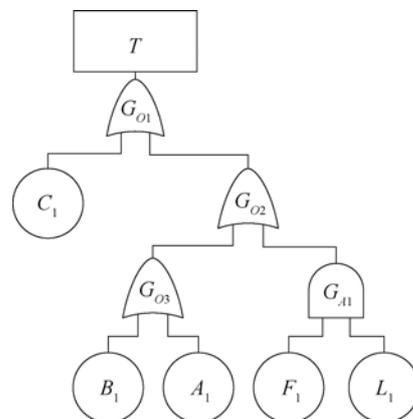


图 3 NO. 2 故障树模型

Fig. 3 Fault tree model (NO. 2)

表 3 故障树变量表

Table 3 Variable of the fault tree (NO. 2)

序号	变量	布尔关系	输入	继承
1	C_1			G_{O1}
2	B_1			G_{O8}
3	A_1			G_{O8}
4	F_1			G_{A1}
5	L_1			G_{A1}
6	G_{O8}	OR	B_1, A_1	G_{O2}
7	G_{A1}	AND	F_1, L_1	G_{O2}
8	G_{O2}	OR	G_{O8}, G_{A1}	G_{O1}
9	$G_{O1}(T)$	OR	C_1, G_{O2}	

表 4 故障树单项式表

Table 4 Monomials of the fault tree (NO. 2)

序号	布尔关系式	单项式表
9	$G_{O1} = C_1 \vee G_{O2}$	C_1
		G_{O2}
8	$G_{O2} = G_{O8} \vee G_{A1}$	C_1
		G_{O8}
		G_{A1}
7	$G_{O8} = B_1 \vee A_1$	C_1
		B_1
		A_1
		G_{A1}
6	$G_{A1} = F_1 \wedge L_1$	C_1
		B_1
		A_1
		F_1, L_1

于是得到 T 布尔函数的分离形式为

$$T = C_1 \vee B_1 \vee A_1 \vee F_1 \cdot L_1 \quad (11)$$

2) 由分离格式出发, 求解完整基

这里引入简化准则:

互斥准则

$$C_{jq} \wedge C_{jk} = 0 \quad q \neq k \quad (12)$$

单一准则

$$C_{jq} \wedge C_{jq} = C_{jq} \quad (13)$$

吸收准则

$$\text{若 } X_a \wedge X_b = X_b \text{ 则 } X_a \vee X_b = X_a \quad (14)$$

设分离格式为 Φ , 先求解 $\bar{\Phi}$ 的分离格式, 利用简化准则简化, 结果记为 \bar{F} ; 求解 F 的分离形式, 利用简化准则简化, 结果记为 K; K 即是布尔函数 Φ 的完整基.

3) 从完整基中抽取非冗余基

本文只关注布尔函数发生概率求解, 故提取非冗余基的原理不再赘述, 为更容易求解顶事件发生概率, 进一步将得到的 T 表达式变换处理.

4) 将 T 表示成两两互斥的布尔函数结合式

$$T = \bigvee_{i=1}^Q Y_i \quad (15)$$

其中 Y_i 为布尔函数, 两两互斥, 且满足

$$Y_i \cdot Y_k = 0 \quad i \neq k \quad (i, k = 1, 2, \dots, Q) \quad (16)$$

5) 根据每个变量概率求解顶事件概率.

2 算例分析

为精确预测复杂多态可重复使用火箭发动机系统的可靠性, 以 SSME 为研究对象, 考虑管路系统多态及预燃室和涡轮泵之间的相依性, 建立多态系统故障树, 如图 4 所示, 组件变量符号及具体含义见表 5.

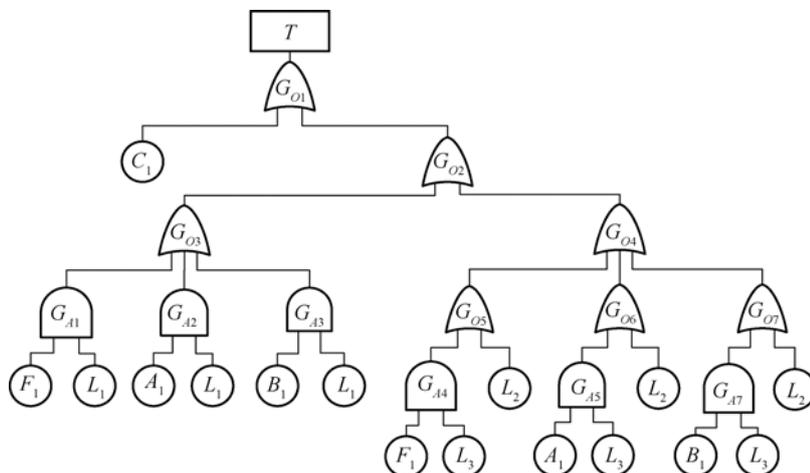


图 4 SSME 系统多态故障树模型

Fig. 4 Multistate fault tree of SSME

表 5 SSME 主要组件及变量表

Table 5 Variables and main components of SSME

主要组件		相依组件	组件状态		
名称	组件		命名	变量	
控制系统	C	B	故障	C ₁	
			正常	C ₂	
预燃室	A		故障	A ₁	
			正常	A ₂	
涡轮泵	B		A	故障	B ₁
				正常	B ₂
推力室	F	故障		F ₁	
		正常		F ₂	
管路系统	L	断裂		L ₁	
		堵塞		L ₂	
		正常	L ₃		

引入超级组件 G 来消除组件 A 和 B 之间的相依性,重新整理多态系统故障树,求得多态故障树变量表见表 6.

表 6 多态故障树变量表

Table 6 Variable of the new multistate fault tree

序号	变量	布尔关系	输入	继承
1	C ₁			G ₀₁
2	G ₁			G ₀₈ , G ₀₉ , G ₀₁₀ , G ₀₁₁
3	G ₂			G ₀₉ , G ₀₁₁
4	G ₃			G ₀₈ , G ₀₁₀
5	F ₁			G _{A1} , G _{A4}
6	L ₁			G _{A1} , G _{A2} , G _{A3}
7	L ₂			G ₀₅ , G ₀₆ , G ₀₇
8	L ₃			G _{A4} , G _{A5} , G _{A6}
9	G ₀₁₀	OR	G ₁ , G ₃	G _{A5}
10	G ₀₁₁	OR	G ₁ , G ₂	G _{A6}
11	G ₀₈	OR	G ₁ , G ₃	G _{A2}
12	G ₀₉	OR	G ₁ , G ₂	G _{A3}
13	G _{A4}	AND	F ₁ , L ₃	G ₀₅
14	G _{A5}	AND	G ₀₁₀ , L ₃	G ₀₆
15	G _{A6}	AND	G ₀₁₁ , L ₃	G ₀₇
16	G _{A1}	AND	F ₁ , L ₁	G ₀₃
17	G _{A2}	AND	G ₀₈ , L ₁	G ₀₃
18	G _{A3}	AND	G ₀₉ , L ₁	G ₀₃
19	G ₀₅	OR	G _{A4} , L ₂	G ₀₄
20	G ₀₆	OR	G _{A5} , L ₂	G ₀₄

求得顶事件 T 布尔函数的分离形式为

$$T = (C_1 \vee F_1) \cdot (L_3 \vee L_2 \vee G_1) \cdot (L_3 \vee G_3) \cdot (L_3 \vee G_2) \cdot (L_3 \vee F_1) \cdot (L_1 \vee G_1) \cdot (L_1 \vee G_3) \cdot (L_1 \vee G_2) \cdot L_1$$

通过分离形式求解完整基并化简,得到

$$T = C_1 \vee F_1 \vee L_2 \vee G_1 \vee G_2 \vee G_3$$

通过应用带约束变量的布尔算法,顶事件分离格式得到明显简化,这在高度复杂的可重复使用火箭发动机失效模式研究中有着重要意义.

最后,为方便求解 T 发生概率,将其表示成两两互斥的布尔函数结合式.

$$Y_1 = G_1, \quad Y_2 = G_2,$$

$$Y_3 = G_3, \quad Y_4 = G_4 \cdot (C_1 \vee F_1 \vee L_2)$$

因此顶事件发生概率用期望来获得

$$E(T) = \sum_{i=1}^4 E(Y_i)$$

为对比假设组件相依与组件独立时结果的异同,本文通过设定合理的初始条件,求得各组件及系统顶事件发生概率结果见表 7.

表 7 变量发生概率结果

Table 7 Probability result of variables

变量	概率
C ₁	6.666 662 × 10 ⁻⁷
C ₂	9.999 993 × 10 ⁻¹
F ₁	8.467 400 × 10 ⁻⁴
F ₂	9.991 533 × 10 ⁻¹
A ₁	2.011 668 × 10 ⁻⁴
B ₁	1.782 531 × 10 ⁻³
L ₁ & L ₂	3.099 904 × 10 ⁻⁵
T	2.853 993 × 10 ⁻³

图 5 给出系统故障率随预燃室和涡轮泵的故障相依性变化趋势.圆点实线表示组件独立时系统故障率(下文相同)随相依系数 K_A 的变化关系,其余 3 条线分别表示 K_B = 0, K_B = 0.01 和 K_B = 0.1 时系统故障率随 K_A 的变化曲线,显然在考虑了组件的相依性后系统故障率有较大变化.

首先随着 K_A 的增大,系统故障率逐渐升高,这是由于涡轮泵发生故障时会相应地提高预燃室的故障率,相依系数越大,预燃室故障率越高,进而系统失效概率升高,此时故障率变化率不受 K_B 的影响,因此除圆点实线外其余 3 条线的斜

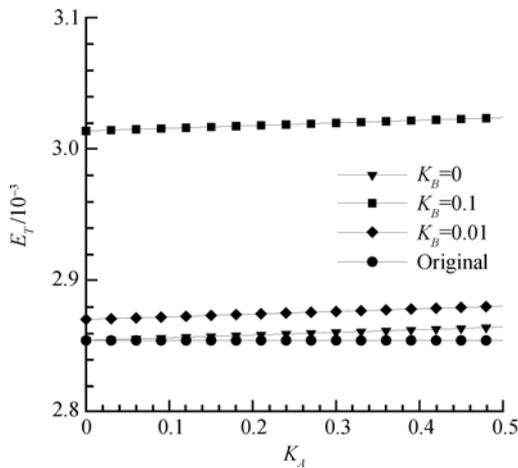


图5 组件相依系数对系统故障率的影响

Fig. 5 Effect of components dependence coefficients on system fault rate

率相同。 K_B 反映预燃室故障率对涡轮泵失效的影响程度,很明显, K_B 越大,系统失效率显著增长,这是因为涡轮泵的失效率远高于预燃室,所以对系统的影响程度较大。综上,组件的相依性对系统可靠度的影响不容忽视,尤其是高复杂、高风险的可重复使用火箭发动机系统,更需要考虑这方面影响,从而获得更加精确的系统可靠度。

在研究相依系数对系统失效率影响的基础上,进一步探讨当组件间存在故障相依性时,任意相依组件失效率改变后系统故障率的变化趋势,结果见图6。

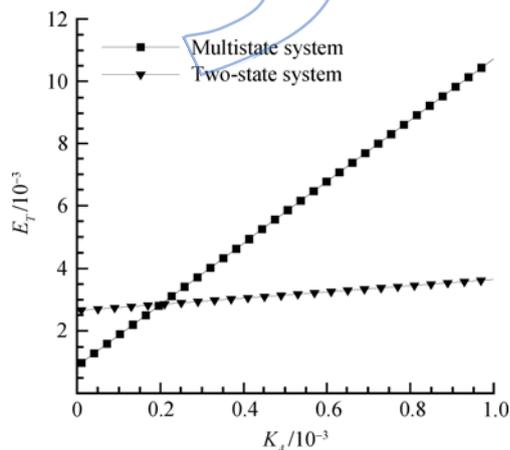


图6 组件相依系数对系统失效率的影响

Fig. 6 Effect of component dependence coefficients on system failure rate

由图6可知两条曲线的交点为假定SSME系统最易发生故障的概率点,当组件相互独立时,系统故障率随预燃室失效率的变化趋势比较平

缓,而一旦预燃室与涡轮泵存在故障相依后,系统的故障变化率被明显放大。在实际的发动机试验和飞行过程中,组件间的故障会相互影响,因此需要在传统的可靠度分析方法基础上添加组件相依系数,从而更加精确地预估发动机总体可靠度。

3 结论

本文采用基于带约束变量的布尔算法的改进故障树方法对SSME系统进行可靠性分析,通过计算结果及分析总结如下:

1) 带约束变量的布尔算法能够对复杂布尔函数有效简化,在处理大型可重复使用火箭发动机多态系统失效模式分析方面有着重要应用。

2) 超级组件的引入有效消除了复杂系统故障树中组件统计相依性,解决了组件相依系统故障率简化求解的难题。

3) 改进后的故障树分析方法能够处理复杂系统的多态和非独立问题。

4) 组件间故障相依对系统可靠性影响较为明显,深入研究组件的相依性可对系统可靠度进行精确预测。

参考文献:

- [1] 才满瑞. 可重复使用运载器的近期发展[J]. 导弹与航天运载技术, 1999, 28(2): 56-62.
CAI Manrui. Recent development of reusable launch vehicles[J]. Missiles and Space Vehicles, 1999, 28(2): 56-62. (in Chinese)
- [2] 杨勇, 王小军, 唐一华, 等. 重复使用运载器发展趋势及特点[J]. 导弹与航天运载技术, 2002, 31(5): 16-19.
YANG Yong, WANG Xiaojun, TANG Yihua, et al. Development trends and characteristics of reusable launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2002, 31(5): 16-19. (in Chinese)
- [3] Taniguchi H, Shibato Y. NASDA RLV concept study[C]// 48th International Astronautical Federation Congress, Turin, Italy; National Aeronautics and Space Administration, 1997: 1-10.
- [4] Maita M, Kubota H, Moriguchi Y. Japanese spaceplane/RLV programme[C]// International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Norfolk, US; Japan Aerospace Exploration Agency, 1999: 1-8.
- [5] Dujarric C, Caporicci M, Kuczera H, et al. Conceptual studies and technology requirements for a new generation of European launchers[J]. Acta Astronautica, 1997, 41(4): 219-228.
- [6] Kevin J O. Rocket engine propulsion system reliability[C]// AIAA/SAE/ASME/ASEE 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Nashville, US; American Institute of

- Aeronautics and Astronautics,1992;1-11.
- [7] Chelkis F Y,Chwiedor T D,Connolly P T,et al. Incorporation of RD-180 failure response features in the Atlas V booster emergency detection system[C]// AIAA Space 2011 Conference & Exposition. Long Beach; American Institute of Aeronautics and Astronautics,2011;1-14.
- [8] Cooper L S. Avionics fault tree analyzer[C]// AIAA Aircraft Design, Systems and Technology Meeting. Fort Worth,Texas; American Institute of Aeronautics and Astronautics,1983;1-6.
- [9] LIU Keming, YANG Weihong, XU Guangming, et al. Fuzzy fault diagnosis of a diesel engine non-start[J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2009,14(3):147-150.
- [10] Barlow R E, Wu A S. Coherent systems with multi-state components[J]. Mathematics of Operations Research, 1978,3(4):275-281.
- [11] Hudson J C, Kapur K C. Reliability theory for multistate systems with multistate components[J]. Microelectron Reliability,1982,22(1):1-7.
- [12] ZHANG Yuepeng. Multi-state system in a fault tree analysis of a nuclear based thermochemical hydrogen plant[D]. Oshawa,Canada;University of Ontario Institute of Technology,2008.
- [13] Levitin G, LIU Xingdong. Reliability and performance of multi-state systems with propagated failures having selective effect[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010,95(6):655-661.
- [14] Caldarola L. Coherent systems with multistate components [J]. Nuclear Engineering and Design, 1980, 58 (1): 127-139.
- [15] Caldarola L. Generalized fault tree analysis combined with state analysis [R]. Karlsruhe, Germany; Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, KfK 2530,1980.

JALSP