

基于模糊故障树和因子化分析的重复使用 火箭发动机失效模式

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: 为确定发动机薄弱环节, 指导重复使用火箭发动机可靠性设计, 以航天飞机主发动机为研究对象, 通过模糊故障树分析法和因子化分析法对发动机主要组件的关键失效模式进行研究. 结果表明: 模糊故障树分析法给出关键重要度最高的底事件为由剥落、凹坑、磨损和腐蚀致高压氧化剂涡轮泵的轴承失效; 因子化分析法通过考虑风险、时间和概率 3 种因素综合评估出发动机系统中的综合因子最高的失效模式为涡轮叶片失效.

关键词: 重复使用火箭发动机; 失效模式; 模糊故障树分析; 因子化分析; 关键重要度

中图分类号: V434⁺.2

文献标志码: A

Failure mode of reusable rocket engine based on fuzzy fault tree and factor analysis

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

(School of Astronautics,

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

Abstract: To confirm weak parts of engine and guide the reusable rocket engine reliability design, the key failure mode analysis of major components for space shuttle main engine (SSME) was conducted based on fuzzy fault tree analysis and factor analysis. The result show that the elementary event of highest critical importance is the bearing failure of high-pressure oxidizer turbine pump caused by flaking, pits, wear and corrosion, which is obtained by fuzzy fault tree analysis. The typical failure mode of highest comprehensive factor in engine system is turbine blade failure evaluated by considering risk time, and probability in factor analysis.

Key words: reusable rocket engine; failure mode; fuzzy fault tree analysis; factor analysis; critical importance

重复使用运载器能有效降低进入空间费用, 是航天运载器发展的一个重要方向. 推进系统是 整个运载器中故障敏感多发部位, 复杂的结构和 恶劣的工作条件致使重复使用火箭发动机存在 多种失效模式, 因此对发动机进行失效模式研究 可以有效保证发动机运行效益, 提高其工作可靠性^[1-4].

重复使用火箭发动机系统复杂程度高, 进行 试验的高额费用及高风险在一定程度上成为阻碍

其发展的重要因素, 因此, 研制人员通常在进行 试验前, 对所研制的产品进行故障预想, 并希望通 过类似的方法来发现设计中存在的缺陷或薄弱环 节, 并进行修改.

美国经过对航天飞机主发动机(SSME)历次 故障详细分析, 公布了 SSME 故障模式、效应分 析及关键项目表, 确定了 14 种最关键的故障模 式, 覆盖了如高压氧化剂涡轮泵轴承失效、密封泄

漏等 5 个出现概率较高的故障模式^[5-6],该报告对各国研制重复使用火箭发动机有着重要参考意义. 20 世纪 80 年代后期,前苏联对 RD-170, RD-120 和 RD-0120 等发动机的故障进行分析,并按故障发生的时间将故障分成 3 类,针对这 3 类故障,研制了检测、诊断和控制的方法^[7-8]. 文献[9]以国内 4 种泵压式液体火箭发动机研制历史为基础,提出了常见的故障模式,并进行了初步的故障发生、传播机理和后果分析.

模糊故障树分析法可用于大型复杂系统的故障诊断和维修策略分析,在分析故障现象与原因之间的模糊关系以及处理不确定性问题方面有着显著优势^[10-13].

当然,模糊故障树分析法建立在对事件发生概率分析的基础上,而精确评价一种失效模式对系统性能的影响程度不能完全依赖于概率. 于是,本文在模糊故障树分析法基础上引入因子化分析法,将每种失效模式的风险、时间和概率进行因子化,最后由因子水平排序确定失效模式的关键程度^[5].

本文采用模糊故障树分析和因子化分析两种可靠性分析方法对 SSME 总体失效模式进行研究,通过计算底事件关键重要度和因子值从不同角度确定影响重复使用火箭发动机性能的典型失效模式.

1 计算模型

1.1 模糊理论

采用模糊数 p 来表示无法准确获得的概率值,隶属函数 $\mu_p(x)$ 代表了模糊数 p 对于模糊子集的隶属程度^[14-15].

定义 $p=(m, \alpha, \beta)$, 其中 m 为模糊数 p 的均值, α, β 称为置信上、下限. 当 α, β 等于零时, p 为一个准确值, α, β 越大, p 越模糊.

隶属函数 $\mu_p(x)$ 存在多种形式,常用的有三角型、梯型和正态型等. 本文选用三角模糊数,隶属函数形式为

$$\mu_p(x) = \begin{cases} 1 - \frac{m-x}{\alpha} & m - \alpha \leq x \leq m \\ 1 - \frac{x-m}{\beta} & m \leq x \leq m + \beta \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

模糊数 p 的 λ 截集为

$$p = [(m - \alpha) + \alpha \cdot \lambda, (m + \beta) + \beta \cdot \lambda] \quad (2)$$

该截集为一个区间数,设 p_1, p_2 均为三角模糊数,则有如下代数运算法则:

$$p_1 + p_2 = (\alpha_1, m_1, \beta_1) + (\alpha_2, m_2, \beta_2) = (\alpha_1 + \alpha_2, m_1 + m_2, \beta_1 + \beta_2) \quad (3)$$

$$p_1 - p_2 = (\alpha_1, m_1, \beta_1) - (\alpha_2, m_2, \beta_2) = (\alpha_1 - \alpha_2, m_1 - m_2, \beta_1 - \beta_2) \quad (4)$$

$$p_1 \cdot p_2 = (\alpha_1, m_1, \beta_1) \cdot (\alpha_2, m_2, \beta_2) = (\alpha_1 \cdot \alpha_2, m_1 \cdot m_2, \beta_1 \cdot \beta_2) \quad (5)$$

在模糊数代数运算法则的基础上,给出模糊故障树分析的模糊算子如下:假设事件 i 发生的概率为一模糊数 p_i ,则与门、或门的模糊算子可分别记为

$$P_{\text{fuzzy}} = \prod_{i=1}^n p_i = \left[\prod_{i=1}^n (m_i - a_i), \prod_{i=1}^n m_i, \prod_{i=1}^n m_i + b_i \right] \quad (6)$$

$$P_{\text{fuzzy}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) = \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n [1 - (m_i - a_i)], 1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_i), 1 - \prod_{i=1}^n [1 - (m_i + b_i)] \right\} \quad (7)$$

重要度在可靠性工程中是一个重要的概念,它不仅用于系统可靠性分配,还可用于系统设计优化以及指导系统维修和诊断.

概率重要度定义为顶事件发生概率 $P(t)$ 对某个部件的偏导数

$$I_i^p(t) = P[1, P(t)] - P[0, P(t)] = \frac{\partial P(t)}{\partial p_i(t)} \quad (8)$$

关键重要度是底事件 i 的故障概率变化率与由它引起的顶事件发生的概率变化率之比,定义为

$$I_i^c(t) = \lim_{\Delta p_i(t)} \frac{\Delta P(t)/P(t)}{\Delta p_i(t)/p_i(t)} = I_i^p(t) \cdot \frac{p_i(t)}{P(t)} \quad (9)$$

关键重要度不仅反映了底事件发生概率变化对顶事件发生概率变化的影响,同时也反映了底事件发生概率大小对顶事件发生概率变化的影响,通过对底事件关键重要度的计算可以有效找出系统最薄弱的环节,从而加以防护.

1.2 因子化分析

由于 SSME 存在大量的失效模式,显然不可

能将所有的失效模式完全考虑到,于是本文遵循以下 3 条标准:①考虑关键度为 1,2,3 的所有失效模式;②删除不会影响发动机性能的失效事件;③删除影响很小且维修后不再发生的失效事件。

本文考虑包括风险、时间和概率在内的 3 个影响因素,具体的因子化和排序标准如下:

1) 风险因子(F_r)

由各种失效模式的关键程度确定以下风险因子值,见表 1.

表 1 风险因子
Table 1 Risk factor

因子值	描述
1.00	发动机运行失败
0.90	发动机潜在故障
0.80	发动机大量损坏
0.60	发动机局部损坏
0.40	发动机局部较小的损坏
0.25	发动机非常小的损坏
0.15	零件损坏
0.10	部件仍然完好

2) 时间因子(F_t)

依据从每种失效模式出现到导致发动机故障的时间间隔规定以下时间因子,见表 2.

表 2 时间因子
Table 2 Time factor

因子值	描述
1.000	即时发生
0.500	0.001 s
0.333	0.1 s
0.250	1/6 s
0.167	1 h 或永远不发生

3) 概率因子(F_p)

考虑到数据来源的精准度有限,这里研究失效模式间的相对重要度,计算式为

$$F_p = \sqrt{\frac{N}{100}} \quad (10)$$

式中 N 为每种失效模式在规定时间内故障发生统计次数.

排序算法为

$$T = 2000 \times F_r \times F_t \times F_p \quad (11)$$

因子排序规则见表 3.

表 3 因子排序规则
Table 3 Rule of factor ranking

T	排序
>260	1
200~260	2
150~200	3
100~150	4
70~100	5
50~70	6
30~50	7
20~30	8
10~20	9
<10	10

2 结果分析

2.1 模糊故障树分析结果

本文对 SSME 中主喷注器、主燃烧室、喷管、2 个预燃室、4 个涡轮泵等关键组件进行了模糊故障树分析,共确定了 45 个底事件,令底事件概率为三角模糊数,均值概率由文献统计得到,通过均值加、减自身的 10% 得到模糊数上、下限.

依据模糊数运算法则计算得到顶事件的模糊概率为

$$F = [2.60 \times 10^{-3} + 2.90 \times 10^{-4} \lambda, 3.18 \times 10^{-3} - 2.90 \times 10^{-4} \lambda]$$

其中 λ 为自变量,可取 0~1.0 之间任何值.

顶事件发生故障的概率区间为 0.002 6~0.003 18,最可能的故障发生概率为 0.002 89.

F 为一区间值,对 λ 取不同的值可得到 F 不同的置信区间,结果见表 4.

表 4 概率函数的置信区间
Table 4 Confidence interval of probability function

λ	F 的下限/ 10^{-3}	F 的上限/ 10^{-3}
0	2.60	3.18
0.1	2.63	3.15
0.3	2.69	3.09
0.5	2.75	3.03
0.7	2.80	2.98
0.9	2.86	2.92
1.0	2.89	2.89

求得各底事件关键重要度结果见图 1。由各底事件的关键重要度排序容易得知高压氧化剂涡轮泵是整个系统故障最多的组件,其中由振动、热过载及安装误差导致的结构裂纹和由污染、轴承摩擦及腐蚀等因素导致零件磨损是主要失效形式。关键重要度仅次于高压氧化剂涡轮泵的组件是主燃烧室,主要表现为由不稳定裂纹扩散导致的冷却通道和燃气壁面的损坏。

表 5 给出 SSME 失效概率前 10 位的底事件,显然,SSME 的故障几乎完全取决于关键结构失效,分析结果显示最关键失效模式分别是高压氧化剂涡轮泵轴承失效和主燃烧室管路焊接失效。

2.2 因子化分析结果

本文对 SSME 的 8 个主要组件中 74 种失效

模式进行因子化分析,因子量化过程见表 6,表 7 给出具体计算过程,因子排序结果见表 8。

在本文假设的因子指标和排序标准下,因子值排在第 1 位的为高压燃料涡轮泵涡轮叶片失效,而不再是模糊故障树分析给出的高压氧化剂涡轮泵轴承失效,因为虽然轴承失效概率较高,但危险等级和时间效应没有高压燃料涡轮泵涡轮叶片失效对发动机影响显著,因此综合评估后高压燃料涡轮泵涡轮叶片失效成为影响发动机性能最关键的失效模式。当然,高压氧化剂涡轮泵轴承失效也仍然是不可忽视的重要失效类型,它的综合因子值与高压燃料涡轮泵涡轮叶片失效相差不到 8%,尤其是两类轴承问题分别占据第 2、第 3 位,证明高压氧化剂涡轮泵的故障需要重点防护。

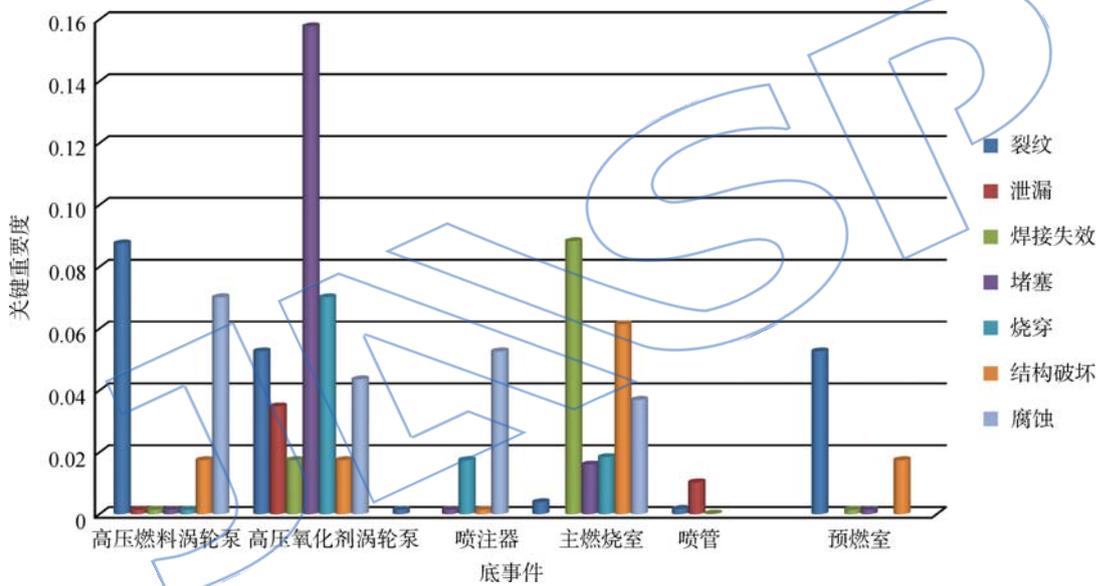


图 1 底事件关键重要度

Fig. 1 Critical importance of elementary event

表 5 SSME 失效概率前 10 位的底事件

Table 5 Top ten elementary events of failure probability for SSME

序号	事件描述	失效概率/ 10^{-4}	系统故障率百分比/%
1	高压氧化剂涡轮泵轴承失效	4.52	15.64
2	主燃烧室管路焊接失效	2.53	8.75
3	高压燃料涡轮泵涡轮叶片失效	2.51	8.69
4	高压氧化剂涡轮泵气穴失效	2.01	6.95
5	高压燃料涡轮泵叶轮/扩散器失效	2.01	6.95
6	主燃烧室衬层结构失效	1.76	6.09
7	主喷注器液氧喷嘴结构失效	1.51	5.22
8	低压氧化剂涡轮泵结构失效	1.51	5.22
9	高压燃料涡轮叶片失效	1.51	5.22
10	燃料预燃室面板腐蚀失效	1.51	5.22

表 6 主燃烧室中高频的关键失效模式

Table 6 Critical failure modes with high frequency in main chamber

序号	1980 年		1981 年		1982 年		1983 年		关键重要度			失效模式
	1—6 月	7—12 月	1	2	3							
1	5		1	1	3					1	9	爆炸隔膜泄漏
2						2					2	热燃气壁面腐蚀
3		2				1					3	热燃气壁面裂纹
4	2	1	1	3	1	1	1	4			14	燃烧室冷却通道裂纹
5	2	4	4	2	3	1	4	2			22	内衬结构失效
6							3		3			涡轮燃气输入管路泄漏
7						1	3				4	冷却剂入口焊接失效
8			1		1	5					7	污染

表 7 因子化计算过程

Table 7 Process of factor calculation

组件	失效模式	风险因子	时间因子	概率因子	T	排序
主燃烧室	热燃气壁面裂纹	0.40	0.200	0.173	27.680	8
	爆炸隔膜泄漏	0.60	0.167	0.316	63.326	6
	涡轮燃气输入管路泄漏	1.00	0.500	0.173	173.00	3
	内衬结构失效	0.40	0.333	0.473	126.00	4
	热燃气壁面腐蚀	0.15	0.167	0.141	7.064	10
	燃烧室冷却通道裂纹	0.25	0.167	0.374	31.229	7
	污染	0.15	0.167	0.265	13.277	9
	冷却剂入口焊接失效	0.25	0.200	0.200	20.000	8

由表 8 可见,燃烧室中因子值最高的是涡轮燃气输入管路泄漏,然后依次是内衬结构失效和爆炸隔膜泄漏.由具体因子值分析发现,涡轮燃气输入管路泄漏的发生概率并不高,但由于它对整个发动机的致命影响程度及故障瞬变发生的特点,使其在综合评估中成为最主要的失效模式.内衬结构失效是燃烧室典型的结构失效类型,也是进行燃烧室可靠性设计的关键研究内容,它对燃烧室甚至整个发动机的性能相当重要.

喷注器最关键的失效模式是增加火花点火器(ASI)供应线裂纹,与前文给出的液氧喷嘴结构失效和面板腐蚀失效稍有不同,原因是 ASI 供应线裂纹对发动机造成的危险等级相当高,一旦产生故障极有可能导致发动机的严重事故.

喷管和低压氧化剂涡轮泵的综合评估结果与模糊故障树分析基本吻合,这是因为 3 个组件的失效模式类型较少,且对发动机性能的影响程度相对较低,因此采用概率评估就能较好地预测失效模式的重要程度.

表 8 因子排序结果(部分)

Table 8 Result of factor ranking (partial)

排序	组件	失效模式
1	高压燃料涡轮泵	涡轮叶片失效
	高压氧化剂涡轮泵	轴承转子磨损
2	高压氧化剂涡轮泵	轴承振动
	主燃烧室	涡轮燃气输入管路泄漏
3	高压燃料涡轮泵	结构裂纹
	主燃烧室	内衬结构失效
4	喷管	导管泄漏
	预燃室	面板腐蚀
5	高压燃料涡轮泵	扩散器失效
	主喷注器	ASI 供应线裂纹
5	喷管	导管裂纹
	高压燃料涡轮泵	密封破坏
	高压燃料涡轮泵	螺栓丢失
	高压燃料涡轮泵	气穴振动
	高压氧化剂涡轮泵	外壳裂纹
	低压氧化剂涡轮泵	轴承转子磨损

3 结 论

本文通过两种可靠性分析方法从不同角度评价了 SSME 关键组件中典型失效模式对系统性能的影响程度,通过计算和分析总结如下:

1) 模糊故障树分析结果表明高压氧化剂涡轮泵轴承失效、主燃烧室管路焊接失效和高压燃料涡轮泵涡轮叶片失效是影响重复使用火箭发动机寿命的主要因素。

2) 底事件关键重要度数值定量描述了失效模式对系统顶事件发生的影响权重,为重复使用火箭发动机进行快速故障诊断提供依据。

3) 因子化分析法综合多方面因素衡量失效模式对系统的影响,构建出较为完善的重复使用火箭发动机总体失效模式评估体系。

4) 将模糊故障树分析和因子化分析有效结合可实现对重复使用火箭发动机系统进行快速、准确和全面的故障检测,为重复使用火箭发动机可靠性设计提供参考。

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(2):56-62.
CAI Manrui. Recent development of reusable launch vehicles[J]. Missiles and Space Vehicles, 1999(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(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(5): 16-19. (in Chinese)
- [3] Taniguchi H, Shibato Y. Nasda RLV concept study[R]. NASA IFA-97-V. 305, 1997.
- [4] O'Hara K J. Rocket engine propulsion system reliability [R]. AIAA 92-34-21, 1992.
- [5] Glover R C, Kelley B A, Tischer A E. SSME failure data review, diagnostic survey and SSME diagnostic evaluation [R]. NASA N87-15268, 1986.
- [6] Science Application International Corporation Advanced Technology Division. Probabilistic risk assessment of the space shuttle[R]. NASA N95-26398, 1995.
- [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 [R]. AIAA-2001-7120, 2001.
- [8] Rachuk V, Goncharov N, Martinyenko Y, et al. Evolution of the RD-0120 for future launch systems[R]. AIAA 96-3004, 1996.
- [9] 殷谦,张金容.液体火箭发动机故障模式及分析[J].推进技术,1997,18(1):22-25.
YIN Qian, ZHANG Jinrong. Failure mode and analysis for liquid propellant rocket engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 1997, 18(1): 22-25. (in Chinese)
- [10] Tanaka H, Fan L T, Lai F S, et al. Fault-tree analysis by fuzzy probability [J]. IEEE Transaction on Reliability, 1983, 32(5): 453-457.
- [11] Singer D. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1990, 34(2): 145-155.
- [12] Singer D. Fault tree analysis based on fuzzy logic[J]. Computers Chemical Engineering, 1990, 14(3): 259-266.
- [13] Huang H Z, Tong X, Ming J, et al. Posbist fault tree analysis of coherent systems [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 84(2): 141-148.
- [14] 黄洪钟.模糊设计[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [15] 李士勇.工程模糊数学及应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.