考虑耦合关系的故障模式消减方案决策

杨德真 任 羿 王自力 刘林林

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对目前复杂产品研制过程中故障模式消减方案确定主要凭经验,未考虑故障模式之间的耦合关系问题,建立了考虑耦合关系的故障模式消减方案决策过程. 首先,提出了故障模式关联集(FMCS, Failure Modes Correlation Set)的概念,并运用演绎理论给出了FMCS 的确定方法. 其次,根据故障模式消减后其发生概率变化,构建了不同层次产品可靠性指标受影响的模型,并以此为依据,给定面向可靠性指标实现的故障模式消减方案决策方法. 最后,以某型直升机燃油系统故障模式消减为例验证了上述方法及模型的可行性,初步证明了可靠性定量指标与定性设计之间存在明确的量化关系,可通过其控制故障模式消减,达到以最少资源消耗和较短研制周期实现满足设计要求的产品的目标. 上述方法及模型具有实用性,可进一步在实际工程中推广应用.

关 键 词: 可靠性指标; 耦合关系; 故障模式消减; 演绎法; 故障模式关联集

中图分类号: N 945.17

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)10-1389-06

Decision-making of failure modes mitigation program considering coupling relationship among failure modes

Yang Dezhen Ren Yi Wang Zili Liu Linlin

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: During the development stage of complex products, failure modes mitigation program often decided by experience, without considering the failure modes' coupling relationship. Aiming at solving this problem, a decision process of failure modes mitigation program was proposed. Firstly, a new concept of failure modes correlation set (FMCS) was presented, including the determination approach based on deductive theory. Secondly, according to changes about failure modes occurrence probabilities, models depicting the varying relationship between failure modes mitigation and quantitative achievement of reliability were constructed to decide failure modes mitigation sequence orienting to the requirements achievement. Finally, a case study of helicopter fuel system demonstrated the feasibility of approaches and models, proved the existence of the relationship between reliability quantitative achievement and qualitative design, and the failure modes mitigation could be controlled orienting to the quantitative achievement of reliability availably to satisfy the design requirements with minimal cost of resources and time. Furthermore, the approaches could be applied in real engineering scenarios due to the practicality.

Key words: quantitative reliability requirements; coupling relationship; failure modes mitigation; deductive theory; failure modes correlation set

产品可靠性设计的核心思想是消除其潜在的故障模式. 因此在产品设计过程中,应以故障模式为纽带,协调规划各项可靠性设计分析工作,进而以最少的资源消耗和最短的研制周期设计出满足

收稿日期: 2012-05-21; **网络出版时间**: 2012-09-26 11:04

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120926.1104.017.html

作者简介: 杨德真(1984 -),女,浙江温州人,博士生,muyidz@126.com.

目标要求的产品. 然而作者通过调研国内航空、航天、船舶、兵器、电子等行业的重点型号研制单位发现,目前我国复杂产品承制方在可靠性设计分析工作方面仍存在以下几方面不足:

1) 主要根据产品设计要求中不允许存在 I、II 类故障模式的规定对其进行消减,并未深入分析故障模式之间的耦合关系以及故障模式消减次序不同所带来的效益(如可靠性指标、费用、进度等)变化;

2) 各子系统设计人员主要考虑自身系统的故障模式消减,较少考虑系统综合后,严酷度等级较低的故障模式综合作用后可能产生后果很严重的故障模式的消减以及接口部分新产生的故障模式的消减;

3) 可靠性定性设计与面向可靠性指标的定量设计之间没有明确的量化关系模型,可靠性工程活动的规划和开展难以根据可靠性要求进行;

4) 目前国内外主要侧重于特定故障模式的消减措施研究[1-7],较少关注消减方案及其影响.

上述问题的本质在于产品设计过程缺乏严格的系统工程过程,缺少稳健的可靠性增长计划. 鉴于此,结合可靠性设计的核心思想,本文提出了考虑耦合关系的故障模式消减方案决策方法,建立故障模式消减与可靠性指标之间的量化关系模型,为复杂产品可靠性设计过程控制提供技术支撑.

1 故障模式消减方案确定过程

故障模式消减(failure mode mitigation)的概念在实际工程中使用较多,但查询文献,并未找到明确的定义. 其目的是实现可靠性增长,基于国军标中可靠性增长的定义及 GEIA-STD-0009[8] 关于故障模式消减的思想以及实际工程中的理解,首先给出明确的故障模式消减定义.

定义 1 故障模式消减是指根据故障模式产生的原因及其造成的后果严重程度,采取相应的设计改进措施、使用补偿措施、预测诊断等手段,进而使其完全消除或者降低其发生可能性的一个过程. 该过程起始于产品设计早期引入故障的分析,直到采取措施实现消减并验证有效为止,是一个闭合过程.

从定义可知,故障模式消减与可靠性增长存在明显区别. 后者仅仅表示了一种理念,并未给出明确的实现可靠性增长方法. 而前者明确指出在设计过程中以主动消减故障模式为线索,逐步改进可靠性、维修性、保障性、测试性和安全性设计,最终实现可靠性增长,具有完整的控制过程和方法,而且避免了被动,可操作性更强.

那么,在进行具体故障模式消减之前,设计人员首先需要确定故障模式的消减方案,即消减次序,其确定过程如图 1 所示.

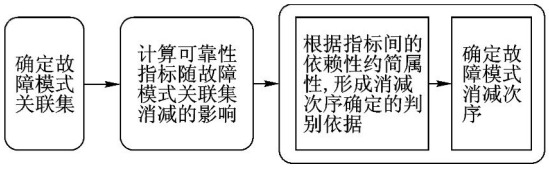

图 1 故障模式消减方案确定过程

由于在复杂产品设计过程中,一方面需识别系统中各类设备的故障模式;另一方面需考虑不同故障模式间的耦合关系,且各类设备的故障模式在系统综合后可能会识别出新的故障模式. 因此,在确定故障模式消减次序时,需首先确定故障模式间的耦合关系,即故障模式关联集(定义见第 2 节);其次,根据故障模式间的耦合关系计算故障模式消减对可靠性指标的影响程度;最后,将前面计算得到的影响作为确定故障模式消减次序的依据,但可靠性指标之间并非完全独立,它们之间具有依赖性,可根据其依赖关系进行约简,进而根据各故障模式关联集消减后对可靠性指标的影响大小确定消减次序,即方案.

2 基于演绎法确定故障模式关联集

必须注意,在特定故障模式消减过程中由于所采取的改进或优化措施,设计人员不仅消减了该故障模式,同时也可能消减与其存在耦合关系的其它故障模式. 因此,在确定特定故障模式消减对可靠性指标的影响时,应重点分析其故障模式关联集消减所产生的影响.

定义 2 假设 $M=\{M_1,M_2,\cdots,M_n\}$ 为某产品的初始故障模式集合. 已知 $\forall M_i(i\in\{1,2,\cdots,n\})$,由于采取改进措施,使得 $M_i\notin M'$(M'为该产品采取改进措施后的新故障模式集)或其故障模式发生概率 β_i 被降低. 此时若 $\exists\{M_{i_1},M_{i_2},\cdots,M_{i_m}\}\subset M$,且满足以下条件:

1) $i_t\neq i(t=1,2,\cdots,m)$;

2) $\forall t\in\{1,2,\cdots,m\}$,均有 $M_{i_t}\notin M'$或者其对应故障模式发生概率β_{i_t}被降低;

则称故障模式集合$\{M_i,M_{i_1},M_{i_2},\cdots,M_{i_m}\}$为与 M_i 对应的故障模式关联集,记作 FMCS_{M_i}. 在无歧义时,可简称为故障模式关联集,记作 FMCS(Failure Modes Correlation Set).

2.1　故障模式耦合关系类型分析

结合工程实际,不妨设故障模式消减措施都是合理有效的,暂不考虑此消彼涨的情况.

基于上述假设,本文将故障模式间的耦合关系分为以下几种类型:

1) 此消引新型(Ⅰ型):故障模式 M_i 被消除,但引入新的故障模式集 $\{f_1^{eN}, f_2^{eN}, \cdots, f_{t_e}^{eN}\}$,其对应的故障模式发生概率记为 $\{\bar{\beta}_1^{eN}, \bar{\beta}_2^{eN}, \cdots, \bar{\beta}_{t_e}^{eN}\}$. 记Ⅰ型 $FMCS_{M_i}$ 为 $\mathbf{C}_{Ⅰ} = \{M_i, f_1^{eN}, f_2^{eN}, \cdots, f_{t_e}^{eN}\}$.

2) 此消彼消型(Ⅱ型):故障模式 M_i 被消除,同时故障模式集 $\{f_1^{ee}, f_2^{ee}, \cdots, f_E^{ee}\}$ 也被消除. 记Ⅱ型 $FMCS_{M_i}$ 为 $\mathbf{C}_{Ⅱ} = \{M_i, f_1^{ee}, f_2^{ee}, \cdots, f_E^{ee}\}$. 注意,此时被同时消除的故障模式并不一定是同一产品的故障模式,有可能是与其存在接口的其它产品的故障模式(下同,不予赘述).

3) 此消彼减型(Ⅲ型):故障模式 M_i 被消除,故障模式集 $\{f_1^{ed}, f_2^{ed}, \cdots, f_{D_e}^{ed}\}$ 的发生概率也被降低,由原来的 $\{\beta_1^{ed}, \beta_2^{ed}, \cdots, \beta_{D_e}^{ed}\}$ 降低为 $\{\bar{\beta}_1^{ed}, \bar{\beta}_2^{ed}, \cdots, \bar{\beta}_{D_e}^{ed}\}$. 记Ⅲ型 $FMCS_{M_i}$ 为 $\mathbf{C}_{Ⅲ} = \{M_i, f_1^{ed}, f_2^{ed}, \cdots, f_{D_e}^{ed}\}$.

4) 此减引新型(Ⅳ型):故障模式 M_i 的发生概率被降低,但引入新的故障模式集 $\{f_1^{dN}, f_2^{dN}, \cdots, f_{t_d}^{dN}\}$,其对应的故障模式发生概率记为 $\{\bar{\beta}_1^{dN}, \bar{\beta}_2^{dN}, \cdots, \bar{\beta}_{t_d}^{dN}\}$. 记Ⅳ型 $FMCS_{M_i}$ 为 $\mathbf{C}_{Ⅳ} = \{M_i, f_1^{dN}, f_2^{dN}, \cdots, f_{t_d}^{dN}\}$.

5) 此减彼减型(Ⅴ型):故障模式 M_i 的发生概率被降低,故障模式集 $\{f_1^{dd}, f_2^{dd}, \cdots, f_{D_d}^{dd}\}$ 的发生概率也被降低,由原来的 $\{\beta_1^{dd}, \beta_2^{dd}, \cdots, \beta_{D_d}^{dd}\}$ 降低为 $\{\bar{\beta}_1^{dd}, \bar{\beta}_2^{dd}, \cdots, \bar{\beta}_{D_d}^{dd}\}$. 记Ⅴ型 $FMCS_{M_i}$ 为 $\mathbf{C}_{Ⅴ} = \{M_i, f_1^{dd}, f_2^{dd}, \cdots, f_{D_d}^{dd}\}$.

6) 系统综合引新型(Ⅵ型):主要考虑接口处故障模式以及系统综合所激发的严酷度等级较高的故障模式,记为 $\{f_1^{IN}, f_2^{IN}, \cdots, f_{t_I}^{IN}\}$,其对应的故障模式发生概率记为 $\{\bar{\beta}_1^{IN}, \bar{\beta}_2^{IN}, \cdots, \bar{\beta}_{t_I}^{IN}\}$. 记Ⅵ型 FMCS 为 $\mathbf{C}_{Ⅵ} = \{f_1^{IN}, f_2^{IN}, \cdots, f_{t_I}^{IN}\}$.

实际工程中,由于所采取措施的不唯一性和综合性,Ⅰ型 ~ Ⅴ型故障模式关联集并不是唯一存在的,真正的故障模式关联集应为它们的并集,即 $\mathbf{C} = \mathbf{C}_{Ⅰ} \cup \mathbf{C}_{Ⅱ} \cup \mathbf{C}_{Ⅲ} \cup \mathbf{C}_{Ⅳ} \cup \mathbf{C}_{Ⅴ}$. 而Ⅵ型故障模式关联集是由于系统综合所激发的,与Ⅰ型 ~ Ⅴ型并无关联关系,其关联集合需单独分析确定.

2.2　基于演绎法的故障模式关联集确定

在工程中,FMCS 的确定较为困难,需结合产品功能原理、故障传播[9]等进行分析确定. 为了便于应用,本文提出运用演绎法的思维运动方向[10]逐层分析寻找与特定故障模式相关联的故障模式集合的方法.

针对Ⅰ型 ~ Ⅴ型,该方法可分为两个步骤完成:第 1 步构建可视化的故障模式消减逻辑树图;第 2 步计算 FMCS.

第 1 步:构建可视化的故障模式消减逻辑树图. 该图包含 4 个层次,具体如下:

1) 第 0 层(消减对象层):指定具体的消减对象,即指定具体要消减的故障模式.

2) 第 1 层(消减方式层):结合故障模式消减定义,可将消减分为两类:一是故障模式被消除;二是故障模式发生概率被降低. 那么在进行演绎推理时,第 1 层即为“故障模式被消减”与“故障模式发生概率被降低”两种消减方式的“逻辑或”的关系.

3) 第 2 层(消减措施层):针对具体的故障模式消减方式,结合导致故障模式发生的原因,制定需采取的措施和手段,形成演绎推理的第 2 层,即第 2 层为各类改进措施或手段的“逻辑与”、“逻辑或”、“条件逻辑”等关系.

4) 第 3 层(关联模式层):针对具体的改进措施或手段,结合产品的功能原理及接口关系,分析由该措施或手段确定的所有可能的关联故障模式. 在逻辑树图中应用本文添加的“模式关联门”表示,该门与“逻辑与门”算法相同,但该门给出了关联故障模式的消减顺序,即从左到右同时被消除或故障模式发生概率被降低的量逐渐减小.

基于上述过程,可建立不同故障模式消减的逻辑树图,图 2 给出了某故障模式的示例.

第 2 步:计算 FMCS,即根据逻辑树图中隐含的逻辑关系,通过下行法或上行法[11]计算确定具有关联关系的 FMCS.

针对Ⅵ型,该方法需分为 4 个步骤完成:

1) 基于故障演绎逻辑构建可视化的故障树模型;

2) 计算最小割集(主要关注阶数 > 1 的割集);

3) 构建可视化的故障模式消减逻辑树图;

4) 计算 FMCS.

第 1)、第 2)步按照故障树分析法进行分析即可;第 3)、第 4)步可按照上述Ⅰ型 ~ Ⅴ型 FMCS 确定方法进行处理.

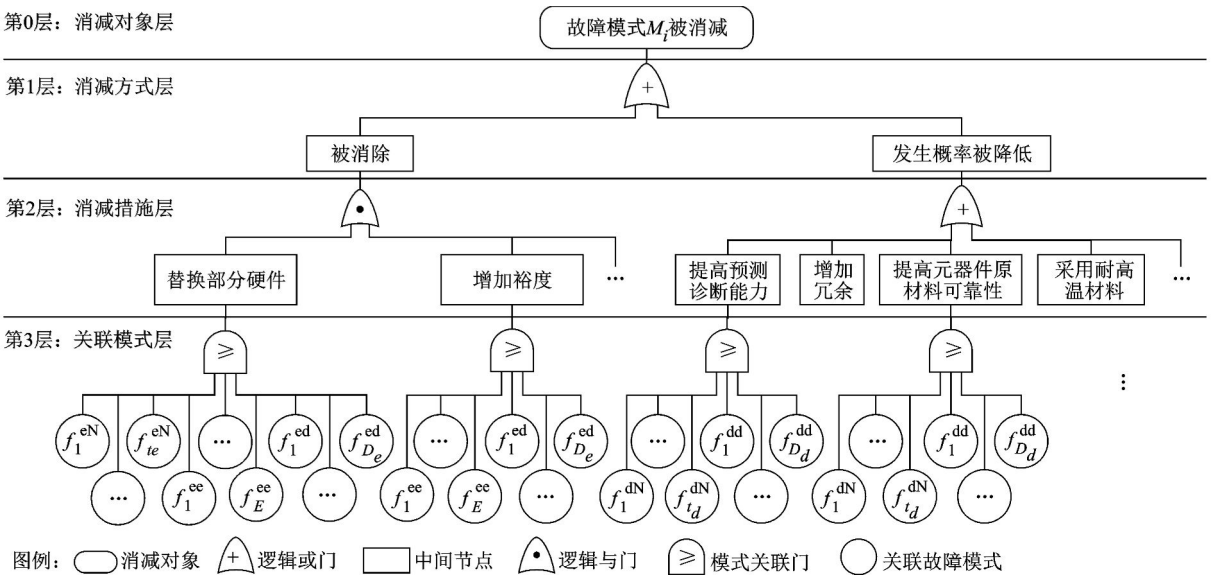

图 2 基于演绎法确定故障模式关联集示例

3 可靠性指标影响模型构建

根据此消彼消型(Ⅱ型)和此消彼减型(Ⅲ型)的特点,在构建影响模型时,可利用示性函数将它们合并考虑. 对复杂产品而言,常用的可靠性合同参数可归纳如表 1 所示[12-13].

表 1 复杂产品常用可靠性合同参数

参数名称	适用范围	
	系统	设备
故障率	√	√
平均故障间隔时间 T_{BF}	√	√
平均维修间隔时间 T_{BM}	√	
平均故障前时间 T_{TF}		√
平均致命性故障间隔时间 T_{BCF}	√	
任务可靠度 R	√	

注:√表示适用.

结合故障模式间的耦合关系类型,可把故障模式消减对可靠性指标的影响模型分为两类:一是设备级故障模式消减对其自身可靠性指标的影响模型,二是设备级产品综合后对系统可靠性指标的影响模型.

3.1 设备级可靠性指标影响模型

不妨设设备级产品 p 的失效分布类型为指数分布,其故障模式 M_i 的发生概率为 β_i. 经消减后,记其故障模式发生概率为

$$\bar{\beta}_i I_i \left(I_i = \begin{cases} 1 & M_i \text{ 发生概率被降低} \\ 0 & M_i \text{ 被消除} \end{cases} \right)$$

则产品 p 的故障率 λ_p 变为

$$\bar{\lambda}_p = \lambda_p - (\beta_i - \bar{\beta}_i I_i) + (1 - I_i)\left(\sum_{j=1}^{t_e} \bar{\beta}_j^{\mathrm{eN}} - \sum_{j=1}^{D_e} (\beta_j^{\mathrm{ed}} - \bar{\beta}_j^{\mathrm{ed}} I_j) \right) + I_i\left(\sum_{j=1}^{t_d} \bar{\beta}_j^{\mathrm{dN}} - \sum_{j=1}^{D_d} (\beta_j^{\mathrm{dd}} - \bar{\beta}_j^{\mathrm{dd}} I_j) \right) \quad (1)$$

式中, $I_j = \begin{cases} 1 & \text{故障模式 } j \text{ 发生概率被降低} \\ 0 & \text{故障模式 } j \text{ 被消除} \end{cases}$. 若 FMCS 中包含其它产品的故障模式,则按产品分别进行计算,下同.

1) 若产品 p 可修复,则其平均故障间隔时间 $T_{\mathrm{BF}p}$ 可表示为

$$T_{\mathrm{BF}p} = 1/\bar{\lambda}_p \quad (2)$$

2) 若产品 p 不可修复,则其平均故障前时间 $T_{\mathrm{TF}p}$ 可表示为

$$T_{\mathrm{TF}p} = 1/\bar{\lambda}_p \quad (3)$$

3.2 系统级可靠性指标影响模型

不妨设系统级产品由 n 个设备级产品组成,且暂不考虑系统综合所引入新故障模式的消减. 因此,先分析设备级故障模式消减对系统级产品可靠性指标的影响.

结合可靠性理论,可得系统级产品的故障率表达式为

$$\lambda_s = \sum_{p=1}^{n} \bar{\lambda}_p + \sum_{j=1}^{t_I} \bar{\beta}_j^{\mathrm{IN}} \quad (4)$$

系统级产品一般可修,结合上述公式,其对应的平均故障间隔时间 $T_{\mathrm{BF}s}$ 可表示为

$$T_{\mathrm{BF}s} = \frac{1}{\lambda_s} \quad (5)$$

在产品设计过程中,可只考虑固有原因引起的故障,因此结合波音公司的统计参数,对于飞机产品的平均维修间隔时间 $T_{\mathrm{BM}s}$[11] 可表示为

$$T_{\mathrm{BM}s} = K \times (T_{\mathrm{BF}s})^{\theta} \quad (6)$$

其中,K 为环境系数;θ 为复杂性系数;二者将随产品而变化,一般由历史数据统计确定. 将 T_{BM} 视

作合同参数时,一般只考虑固有原因引起的故障,因此式(6)中可取 $K=0.59$,$\theta=0.7$.

同样,结合系统级产品的 $T_{\mathrm{BF}s}$ 可得其平均致命性故障间隔时间 $T_{\mathrm{BCF}s}$ 的表达式为

$$T_{\mathrm{BCF}s}=\frac{\lambda_s}{\sum_{i=1}^{k}\beta_{\mathrm{CF}i}}\times T_{\mathrm{BF}s} \tag{7}$$

式中,$\frac{\lambda_s}{\sum_{i=1}^{k}\beta_{\mathrm{CF}i}}$ 为致命性故障因子[14];$\beta_{\mathrm{CF}i}$ 表示经消减后,致命性(Ⅰ,Ⅱ类)故障模式发生概率;k 表示致命性(Ⅰ,Ⅱ类)故障模式总数.

在规定的任务剖面(假设其任务时间为 T)下,对于寿命服从指数分布的复杂产品任务可靠度 R_s 可表示为

$$R_s=e^{-T/T_{\mathrm{BCF}s}} \tag{8}$$

再回到本小节开始所作的假设,对于系统综合后引入的新故障模式,其消减对系统可靠性指标的影响模型构建可参照设备级可靠性指标影响模型构建方法进行处理,不予赘述.

4　确定故障模式消减方案

结合上述构建的故障模式消减对可靠性指标的影响模型,可判断不同 FMCS 消减对可靠性指标影响的大小,按照可靠性指标提升最多的原则可确定故障模式消减方案. 理论上,应该考虑所有相关的可靠性指标,然而从影响模型可以看出,由故障率可以直接导出其它可靠性指标,它们之间具有相互依赖的关系. 根据属性依赖性约简规则[15],直接取故障率作为依据确定方案即可. 经该过程确定的消减方案可表示如下:

$$\{f_{M_1},f_1^{\mathrm{eN}},f_1^{\mathrm{ee}},f_2^{\mathrm{ee}}\}\succ\{f_{M_2},f_1^{\mathrm{ed}},f_2^{\mathrm{ed}}\}\succ\cdots \tag{9}$$

式中,$\succ$表示序关系,$\{f_{M_1},f_1^{\mathrm{eN}},f_1^{\mathrm{ee}},f_2^{\mathrm{ee}}\}$需优先于$\{f_{M_2},f_1^{\mathrm{ed}},f_2^{\mathrm{ed}}\}$进行消减.

5　案　例

下面以作者所在单位参与研制的某型直升机的燃油系统为例验证本文所提出方法的合理性与可行性. 在特定技术状态下燃油系统各组成部分的故障率如表 2 所示.

表 2　燃油系统各组成初始故障率表(节选)

产品名称	故障率	产品名称	故障率
燃油箱	0.25	排泄阀	0.24
燃油增压泵	0.45	单向阀	0.45
燃油供油软管组件	0.18	防火供油软管组件	0.45
吸油口组件	0.25		

注:故障率单位为每百万小时.

对应技术状态下燃油系统的故障模式影响分析(FMEA)结果(节选)如表 3 所示.

表 3　燃油系统 FMEA 结果及发生概率变化(节选)

部件名称	故障模式	S	$\beta/10^{-6}$	消减后 $\beta/10^{-6}$
燃油箱	燃油箱壁渗漏 11	Ⅳ	0.15	0.08
	坠毁后燃油泄漏 12	Ⅱ	0.07	0.04
燃油增压泵	燃油增压泵不工作 21	Ⅱ	0.12	0.08
	无流量 22	Ⅱ	0.15	0
	压力脉动 23	Ⅱ	0.18	0
吸油口组件	堵塞 31	Ⅱ	0.12	0
	泄漏 32	Ⅱ	0.13	0
防火供油软管组件	软管组件接头处燃油泄漏 41	Ⅰ	0.45	0
燃油供油软管组件	软管组件接头处燃油泄漏 51	Ⅱ	0.18	0
单向阀	堵塞 61	Ⅱ	0.15	0
	渗漏 62	Ⅲ	0.18	0.18
	泄漏 63	Ⅱ	0.12	0
排泄阀	排泄阀打不开,放不出水分和杂质 71	Ⅲ	0.12	0.08
	排泄阀排泄水分和杂质后关不上 72	Ⅳ	0.12	0.08

注:S 表示严酷度等级;β 表示故障模式发生概率;消减后的故障模式发生概率为消减方案确定后分析得到,非 FMEA 结果,限于篇幅,将其列于同一表中.

1) 基于演绎法确定故障模式关联集.

以燃油增压泵压力脉动模式消减为例构建的逻辑树图如图 3 所示. 由于该故障模式严酷度等级较高,且入口滤网孔径优化设计在技术经济上均可行,因此采取该方案对其进行消除. 从图 3 可知,与其同时被消减的故障模式有"燃油增压泵无流量",因此与其对应的 FMCS 即为{燃油增压泵压力脉动,燃油增压泵无流量,吸油口组件堵塞,单向阀堵塞},记为$\{f_{23},f_{22},f_{31},f_{61}\}$. 同理,可确定其它被消除的 FMCS 有$\{f_{32},f_{41},f_{51},f_{63}\}$,故障模式发生概率同时被降低的 FMCS 有$\{f_{11},f_{12}\}$和$\{f_{21},f_{71},f_{72}\}$.

2) 计算各 FMCS 消减的影响.

上述各 FMCS 经消减后,燃油系统的故障率

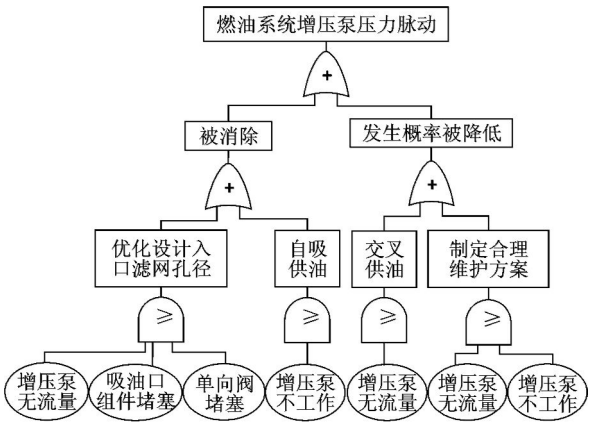

图 3　燃油系统增压泵压力脉动消减逻辑树图

指标如下：

① $\{f_{23}, f_{22}, f_{31}, f_{61}\}$：0.000 001 67；

② $\{f_{32}, f_{41}, f_{51}, f_{63}\}$：0.000 001 39；

③ $\{f_{11}, f_{12}\}$：0.000 002 17；

④ $\{f_{21}, f_{71}, f_{72}\}$：0.000 002 15.

根据各 FMCS 对可靠性指标的影响大小可确定上述 4 个 FMCS 的消减顺序如下：

$$\{f_{32}, f_{41}, f_{51}, f_{63}\} \succ \{f_{23}, f_{22}, f_{31}, f_{61}\} \succ \{f_{21}, f_{71}, f_{72}\} \succ \{f_{11}, f_{12}\}$$

应用本文提出的方法，对某型飞机燃油系统特定的故障模式进行消减控制，仅经一轮迭代，其可靠性指标即达到规定的阶段性要求，大大缩短了研制周期.

6 结 论

综合以上分析内容，可得以下结论：①给出了故障模式消减定义及其方案确定过程，可为实际工程中确定故障模式消减方案提供参考；②给出了故障模式关联集 FMCS 的定义、类型划分及其确定方法，为故障模式消减对可靠性指标影响模型的构建奠定基础；③构建了可靠性指标受 FMCS 消减的影响模型，为故障模式消减方案确定提供依据；④在产品寿命服从指数分布的假设条件下，可基于所构建的可靠性指标影响模型构建维修性指标（如平均修复时间）、测试性指标（如故障检测率）等受故障模式消减的影响模型，为故障模式消减方案确定提供更丰富的依据.

但必须指出，上述方法还存在许多改进优化的空间，具体如下：①仅对寿命服从指数分布的产品进行分析，对于其它分布类型，如威布尔分布、正态分布等，还需进一步研究对应的可靠性指标影响模型；②仅考虑可靠性指标对故障模式消减方案的影响，并未考虑维修性保障性测试性安全性指标、进度、费用等因素，还需进一步研究这些因素综合作用产生的影响；③由于实际工程中故障模式发生概率的获取难度较大，尤其是新研产品，更缺乏历史数据的支撑，需进一步探索应用模糊理论等确定故障模式消减方案的可行性.

作者将在后续研究中针对以上问题逐一进行完善.

参考文献（References）

[1] IAEA. Fuel failure in water reactors: causes and mitigation[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003

[2] Sandeep Neema, Ted Bapty, Shweta Shetty, et al. Autonomic fault mitigation in embedded systems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2004, 17(7): 711 – 725

[3] Stelios A M, Stelios C A T, Christos N C. On array failure mitigation with respect to probability of failure, using constant excitation coefficients and a genetic algorithm[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2006, 5(1): 187 – 190

[4] Avirah S E, Singh A K. Failure mitigation of semi active multi beam antenna array for portable surveillance radar using genetic algorithm[C]//IEEE RADAR Conference. Rome: IEEE, 2008: 1 – 6

[5] Athar A Syed. A systems approach to mitigation of project failure modes[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2009

[6] Peter T Bullemer, Liana Kiff, Anand Tharanathan. Common procedural execution failure modes during abnormal situations[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(6): 814 – 818

[7] Jonny C D S, Abhinav S, Edward B, et al. A knowledge-based system approach for sensor fault modeling, detection and mitigation[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 7734: 1 – 13

[8] GEIA-STD-0009 Reliability program standard for systems design, development, and manufacturing[S]

[9] Rao N S V. On parallel algorithms for single-fault diagnosis in fault propagation graph systems[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1996, 7(12): 1271 – 1223

[10] 塔尔斯基. 逻辑与演绎科学方法论导论[M]. 周礼全, 吴允曾, 晏成书译. 北京：商务印书馆, 1963
Alfred Tarski. Introduction to logic and to the methodology of deductive sciences[M]. Translated by Zhou Liquan, Wu Yunceng, Yan Chengshu. Beijing: The Commercial Press, 1963 (in Chinese)

[11] 曾声奎. 可靠性设计与分析[M]. 北京：国防工业出版社, 2011
Zeng Shengkui. Reliability design and analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011 (in Chinese)

[12] GJB 1909A-2009 装备可靠性维修性保障性要求论证[S]
GJB 1909A-2009 Demonstration of reliability, maintainability and supportability requirements for materiel[S] (in Chinese)

[13] 王自力. 可靠性维修性保障性要求论证[M]. 北京：国防工业出版社, 2011
Wang Zili. Demonstration of reliability, maintainability and supportability requirements[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011 (in Chinese)

[14] 章文晋. 计算机辅助可靠性维修性保障性要求制定方法研究[D]. 北京：北京航空航天大学可靠性与系统工程学院, 1999
Zhang Wenjin. Method study for computer-aided determination of reliability, maintainability and supportability requirements [D]. Beijing: School of Reliability and System Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999 (in Chinese)

[15] 董威. 粗糙集理论及其数据挖掘应用[M]. 沈阳：东北大学出版社, 2009
Dong Wei. Rough set theory and data mining application[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2009 (in Chinese)

（编 辑：娄 嘉）