

危害性矩阵分析中故障模式影响概率的确定方法

火建卫, 李雅琳, 薛海红

(中国航空工业集团公司第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 危害性矩阵分析是进行产品分析和指导改进措施的重要手段,为了解决通过经验决定故障模式影响概率的现状,需采用更加实用客观的方法。根据定量危害性矩阵分析的原理和方法,首先收集故障模式影响概率经验估计法的参照依据和取值范围;然后提出采用故障树计算故障模式影响概率的方法,并用算例进行验证,结果表明故障树计算法避免了人为因素的影响,计算量小,准确性好;最后给出故障模式影响概率的确定流程。

关键词: 故障模式影响概率;危害性矩阵;故障树;危害度;最小割集

中图分类号: TH114.3

文献标识码: A

Determination Method of Failure Effect Probability in Criticality Matrix Analysis

Huo Jianwei, Li Yalin, Xue Haihong

(The First Aircraft Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: Criticality matrix analysis is an important method in product performance analysis and guidance for product improvement. Considering that the failure effect probability is empiric, a more practical and objective method must be adopted. Based on the principle and method of quantitative analysis of criticality matrix, the experience reference and ranges of the failure effect probability are collected firstly. Then the method to achieve the failure effect probability based on the fault tree is presented, and an example is given, which is showed that fault tree calculation method could avoid the influence of human factors and is simpler and quicker than quantitative estimation method. Finally, the process to determine the probability of failure mode effect is achieved.

Key words: failure effect probability; criticality matrix; fault tree; criticality; minimal cut sets

0 引言

危害性分析的目的是按每一故障模式的严重程度及该故障模式发生的概率所产生的综合影响对系统中的产品划等分类,以便全面评价系统中各种可能出现的产品故障的影响,而危害性矩阵法是常用的危害性分析方法之一^[1-3]。危害性矩阵分析的目的是比较每个产品及其故障模式的危害性程度,进而为确定产品改进措施的先后顺序提供依据。它分为定性的危害性矩阵分析方法和定量的

危害性矩阵分析方法^[4]。当不能获得产品故障数据时,应选择定性的危害性矩阵分析方法;当可以获得较为准确的产品故障数据时,则选择定量的危害性矩阵分析方法^[5]。在定量危害性矩阵分析中,故障模式影响概率(β_j)是计算产品某个故障模式危害度(C_{mj})和产品危害度(C_r)的重要参数,故障模式影响概率是指产品在第 j 种故障模式发生的条件下,其最终影响导致“初始约定层次”出现某严酷度等级的条件概率^[5-6]。

目前,针对产品的危害性分析通常包含在故障模式影响及危害性分析(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, 简称 FMECA)中,它包括故障模式、影响分析(Failure Mode, Effects Analy-

sis,简称 FMEA)和危害性分析(Criticality Analysis,简称 CA)^[7-10],危害性分析的单独研究并不多见,并且依靠经验的危害性分析通常是根据事故经验,不能体现分析的及时性,导致危害性分析成为“事后行为”,而不能成为设计过程所需要的“事前行为”^[11-15]。

MIL-STD-1629A^[4]中给出了 β_j 的取值方法(需要分析人员通过经验判断得到)和相应的取值范围。GJB/Z 1391^[1]给出了推荐的 β_j 取值。Yun Seong Lee 等^[16]提出了使用权重法确定 β_j 的值:根据分析人员的职称、经验、受教育程度、年龄等确定不同分析人员取值的权重因子,利用补偿因子消除不同分析人员取值的离散性,最后综合计算得到 β_j 的值。

在定量危害性矩阵分析时,按照经验定量估计 β_j 值, β_j 的确受分析人员对产品故障模式、原因和影响等掌握程度的影响,它与分析人员的水平息息相关^[17-18]。对同一个故障模式,不同的分析人员可能选取不同值,导致定量危害性矩阵分析的结果有所不同,影响定量危害性矩阵分析结果的一致性和准确性。而国内外关于 β_j 取值的研究较少,因此亟需一种客观准确的方法来指导 β_j 的确定,避免因分析人员的主观判断带来的影响,为技术人员的定量危害性矩阵分析工作提供参考和借鉴。

针对上述情况,本文提出利用故障树的最小割集来确定 β_j 的方法,同时给出一种简化的故障树计算 β_j 的方法,并给出相应的算例,最后总结出确定 β_j 值的一般流程。

1 危害度的计算

1.1 故障模式危害度

故障模式危害度(C_{mj})是产品危害度的一部分。在工作时间 t 内,产品以第 j 个故障模式发生的某严酷度等级下的危害度,如式(1)所示。

$$C_{mj} = \alpha_j \times \beta_j \times \lambda_p \times t \quad (1)$$

式中: $j=1,2,\dots,N$, N 为产品的故障模式总数; α_j 为故障模式频数比,是产品第 j 种故障模式发生次数与产品所有可能的故障模式发生次数的比率; β_j 为故障模式影响概率; λ_p 为被分析产品在其任务阶段内的故障率,单位为 1/小时; t 为产品任务阶

段的工作时间,单位为小时(h)。

1.2 产品危害度

产品危害度(C_r)是该产品在给定的严酷度类别和任务阶段下的各种故障模式危害度之和,如式(2)所示。

$$C_r = \sum_{j=1}^N C_{mj} = \sum_{j=1}^N \alpha_j \times \beta_j \times \lambda_p \times t \quad (2)$$

式中: $j=1,2,\dots,N$, N 为该产品在相应严酷度类别下的故障模式总数。

2 故障模式影响概率的确定方法

2.1 经验定量估计法

定量危害性矩阵分析时,分析人员需考虑产品的设计余度、工作方式、工作环境等因素,结合相似(或同类)产品的使用统计信息,依据经验定量估计 β_j 的数值。在 GJB/Z 1391、MIL-STD-1629A 等资料中,给出了某故障模式发生时,按照对其产生的最终影响事件发生可能性的定性描述,列出了 β_j 的数值的选择范围,如表 1 所示^[2-3]。

表 1 故障模式影响概率(β_j)的推荐值

Table 1 Recommended values for failure effect probability

序号	方法来源	最终影响的发生可能性	β_j 的规定值
1	GJB/Z 1391	实际丧失	1
		很可能丧失	0.1~1
		有可能丧失	0~0.1
		无影响	0
2	GB 7826	肯定损伤	1
		可能损伤	0.5
		很少可能	0.1
		无影响	0
3	国内某歼击飞机设计采用	一定丧失	1
		很可能丧失	0.5~0.99
		可能丧失	0.1~0.49
		可忽略	0.01~0.09
4	MIL-STD-1629A	无影响	0
		实际丧失	1
		很可能丧失	>0.1 to <1
		有可能丧失	>0 to =0.1
		无影响	0

参照定量危害性分析的相关标准、分析要求等技术资料,依据经验定量估计 β_j 值的方法,具有简便、快捷的优点,但其取值的准确程度依赖于分析

人员的技术水平和工程经验。

2.2 故障树计算法

2.2.1 计算方法

故障模式影响概率是在某个故障模式 j 发生的条件下,其最终影响导致初始约定层次出现某严酷度等级的条件概率^[2]。条件概率的定义:设 A 、 B 是两个事件,且 $P(A) > 0$,称 $P(B/A)$ 为在事件 A 发生的条件下事件 B 发生的条件概率。 $P(B/A)$ 是限制在事件 A 已经发生的条件下计算 B 事件的发生概率。

$$P(B/A) = \frac{P(AB)}{P(A)} \quad (3)$$

设:表示某个故障模式的底事件 $X_j (j=1, 2, \dots, N)$ 发生而导致最终影响顶事件 T 发生的事件为 $T_j (j=1, 2, \dots, N)$,由式(3)可知:

$$\beta_j = P(T_j) = P(T/X_j) = \frac{P(TX_j)}{P(X_j)} \quad (4)$$

利用故障树定量计算顶事件的发生概率,假设故障树的全部最小割集为 K_1, K_2, \dots, K_{N_k} ,在多数情况下,底事件可能在几个最小割集中重复出现,即最小割集之间是相交的,精确计算顶事件发生概率的计算公式共有 $(2^{N_k} - 1)$ 项。当最小割集数 N_k 足够大时,产生“组合爆炸”问题;使用直接化法或递推化法将相交和化为不交和,计算量很大。在工程中常用一阶近似算法(式(5))和二阶近似算法(式(6))来近似计算^[5]顶事件 T 发生的概率。

$$P(T) = \sum_{i=1}^{N_k} P(K_i) \quad (5)$$

$$P(T) = \sum_{i=1}^{N_k} P(K_i) - \sum_{i < j-2}^{N_k} P(K_i K_j) \quad (6)$$

定量危害性分析中,单点故障模式是导致初始约定层次发生某严酷度等级事件的单因素事件,当单点故障模式发生时,初始约定层次必定发生与某严酷度等级对应的事件,即 $\beta_j = 1$;对于非单点类故障模式,某非单点故障模式发生的条件下,其最终影响导致初始约定层次发生某严酷度等级的事件,该事件是条件事件,其发生概率(β_j)的计算应考虑导致事件发生的各原因事件。

2.2.2 最小割集计算 β_j 的算例

某产品的故障模式、影响及危害性分析中,故

障模式 $X_j (j=1, 2, \dots, 8)$ 导致初始约定层次发生某严酷度等级的事件为 T ,导致事件 T 发生的原因事件有 X_1, X_2, \dots, X_8 。以 T 为顶事件、 $X_j (j=1, 2, \dots, 8)$ 为底事件建立的故障树,如图1所示。

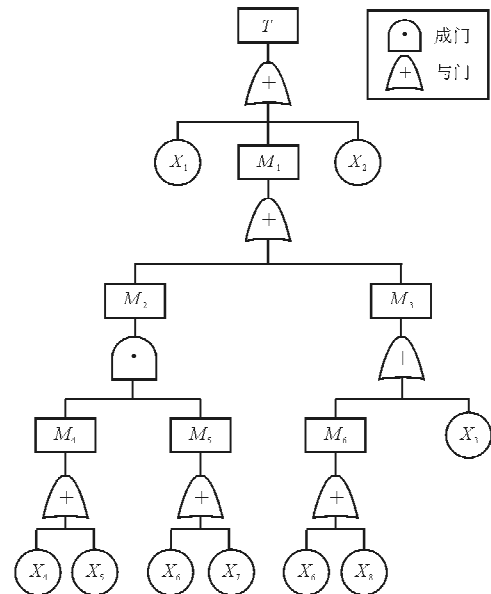


图1 算例的故障树

Fig. 1 Fault tree for the example

采用上行法或下行法求得图1中故障树的全部最小割集: $\{X_1\}, \{X_2\}, \{X_3\}, \{X_6\}, \{X_8\}, \{X_4, X_7\}, \{X_5, X_7\}$ 。

求得故障树的最小割集后,仅选择含有底事件 $X_j (j=1, 2, \dots, 8)$ 的最小割集,可利用式(5)或式(6)计算 $P(TX_j)$ 的值。本算例中,利用式(6)计算图1故障树的 $P(TX_j)$,利用式(4)计算各 β_j 的数值,计算结果如表2所示。

表2 算例的故障模式影响概率计算结果

Table 2 Results for the failure effect probability

j	$P(X_j)$	$P(TX_j)$	β_j
1	0.001 0	0.001 00	1.000 0
2	0.002 0	0.002 00	1.000 0
3	0.008 0	0.008 00	1.000 0
4	0.020 0	0.000 20	0.010 0
5	0.010 0	0.000 10	0.010 0
6	0.000 6	0.000 60	1.000 0
7	0.010 0	0.002 98	0.029 8
8	0.000 8	0.000 80	1.000 0

2.2.3 简化故障树的计算方法

采用故障树方法计算某个底事件导致顶事件发生的条件概率时,也可采用简化故障树的方法计算。依据“与”门直接增加割集的容量、“或”门直接增加割集的数目的性质进行简化,得到因某个底事件导致顶事件发生的条件事件故障树。简化方法是:计算底事件 X_j 导致顶事件 T 发生的条件概率时,从故障树的底事件 X_j 开始,从下往上进行简化,采用集合运算法则加以简化、吸收,遇到“或”门时,去掉与底事件 X_j 并列的其他底事件(或者与底事件 X_j 无关的故障树分支),遇到“与”门时,保留与底事件 X_j 并列的底事件(或故障树分支),逐层向上进行简化,得到底事件 X_j 导致顶事件 T 发生的条件事件故障树。同理,也可直接建立底事件 X_j 导致顶事件 T 发生的条件事件故障树,然后用故障树顶事件的计算方法求的故障模式影响概率 β_j 。

对于图 1 的故障树,因底事件 X_7 发生导致顶事件 T 发生的条件事件故障树的简化结果如图 2 所示。采用简化故障树的方法,计算图 1 中故障树各底事件 X_j 导致顶事件 T 发生的条件概率 β_j ,计算结果与表 2 中的结果相同。

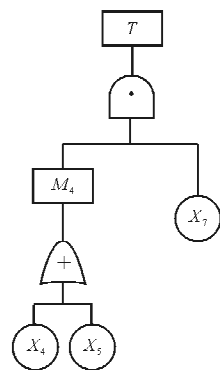


图 2 简化后的故障树

Fig.2 The simplified fault tree

故障分析软件均提供了方便的故障树修改、编辑和计算功能,操作简便易行。利用故障树分析软件简化故障树,计算故障模式影响概率的方法操作简便、计算快速。

3 故障模式影响概率的确定流程

产品的故障模式及影响分析是定量危害性矩

阵分析的基础,故障模式及影响分析必须与产品设计或工艺设计紧密结合,迭代开展故障模式及影响分析,相应的定量危害性矩阵分析也需要更新。定量危害性矩阵分析时,可用的故障模式、故障率数据等基础数据有所差异。在产品定量危害性矩阵分析时,根据开展工作所具备的条件,选择可实施的 β_j 的确定方法。

β_j 数值的确定流程如图 3 所示。(1) 首先对产品进行故障模式及影响分析;(2) 根据上一步的故障模式及影响分析确定故障模式对产品的最终影响;(3) 判断故障模式、故障数据是否准确、齐全,如果不满足要求则参照标准根据经验来确定 β_j ,如果满足要求则进行下一步操作;(4) 判断是否有对应顶事件的故障树,如果没有则需要建立相应的故障树;(5) 判断是否有故障树分析软件,如果有则用故障树分析软件计算 β_j ,如果没有则用最小割集计算 β_j 。

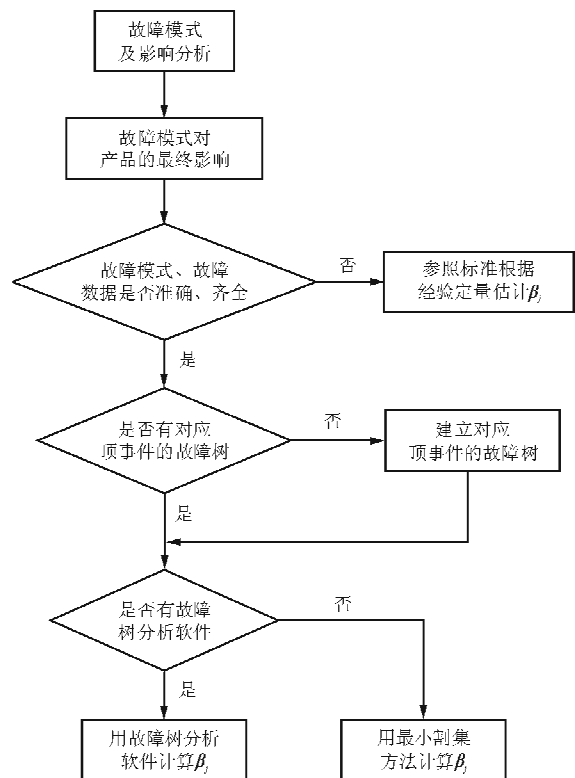


图 3 故障模式影响概率的确定流程

Fig.3 Process to achieve failure effect probability

4 结论

(1) 根据定量危害性矩阵分析的原理和方法,

提出了采用故障树的最小割集来确定故障模式影响概率的方法,并给出了一种简化故障树计算故障模式影响概率的方法,可用于故障树较为复杂的产品,减小计算量,最后给出了故障模式影响概率的确定流程。

(2) 采用故障树方法计算故障模式影响概率的准确性好,避免了危害性矩阵定量分析中人为因素的影响,根据开展工作所具备的条件,选择可实施的故障模式影响概率的确定方法,该方法与传统的基于经验确定故障模式影响概率的方法相结合,可以较为准确地确定故障模式影响概率。

(3) 该故障模式影响概率确定方法的思路也可推广于利用可靠性框图、马尔科夫链等方法计算条件事件的发生概率。

(4) 依据故障树计算故障模式影响概率的方法可操作性好,具有良好的工程指导意义,可为技术人员的定量危害性矩阵分析工作提供参考和借鉴。

参考文献

- [1] GJB/Z 1391 故障模式、影响及危害性分析指南[M]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2006: 95-98.
GJB/Z 1391. Failure mode, effects and criticality analysis guide[M]. Beijing: The General Armament Department of Military Standard Publishing Department, 2006: 95-98. (in Chinese)
- [2] 赵东元. 可靠性工程与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 141-143.
Zhao Dongyuan. Reliability engineering and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 141-143. (in Chinese)
- [3] GJB 450A-2004 装备可靠性工作通用要求[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2004.
GJB 450A-2004 General requirement for materiel reliability program[S]. Beijing: The General Armament Department of Military Standard Publishing Department, 2004. (in Chinese)
- [4] MIL-STD-1629A Procedure for performing a failure modes, effects criticality analysis[M]. Washington, U. S. Department of Defense, 1980: 102-115.
- [5] Stamatis D H. Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution[M]. Milwau-kee, WI: ASQC Quality Press, 1995.
- [6] Li Jun, Xu Huibin. Reliability analysis of aircraft equipment based on FMECA[J]. Physics Procedia, 2012, 25: 1816-1822.
- [7] 陆廷孝, 郑鹏洲, 何国伟, 等. 可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 176-177.
Lu Yanxiao, Zheng Pengzhou, He Guowei, et al. The design and analysis of reliability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 176-177. (in Chinese)
- [8] 李良巧, 顾唯明. 机械可靠性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 61-63.
Li Liangqiao, Gu Weiming. Mechanical reliability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 61-63. (in Chinese)
- [9] 张海, 周志兵. 故障模式影响分析技术进展[J]. 航空制造技术, 2007(8): 64-66.
Zhang Hai, Zhou Zhibing. Technical progress of failure mode effect analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(8): 64-66. (in Chinese)
- [10] 张大钢, 刘雁潮, 韩静. 故障模式影响及危害性分析(FMECA)技术标准发展和应用研究[J]. 质量与可靠性, 2013, 165(3): 48-51.
Zhang Dagang, Liu Yanchao, Han Jing. Failure mode effects and criticality analysis(FMECA) technology standard development and application research[J]. Quality and Reliability, 2013, 165(3): 48-51. (in Chinese)
- [11] 邵延峰, 薛红军. 故障数分析法在系统故障诊断中的应用[J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(1): 72-77.
Shao Yanfeng, Xue Hongjun. Application of fault tree analysis in fault diagnosis[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2007, 36(1): 72-77. (in Chinese)
- [12] 钱鑫, 蔡忠春, 常旭, 等. 某型军用发动机故障模式、影响及致命性分析[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(10): 48-51.
Qian Xin, Cai Zhongchun, Chang Xu, et al. Analysis of certain type's military engine failure mode, effects and fatal [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(10): 48-51. (in Chinese)
- [13] 姚成玉, 赵静一. 液压系统模糊故障树分析方法研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(14): 1656-1659.
Yao Chengyu, Zhao Jingyi. Research on fuzzy fault tree analysis method of hydraulic system[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(14): 1656-1659. (in Chinese)
- [14] 邓海飞, 吕艳梅, 王家林, 等. 某型无人机伞降回收系统故障模式、影响及危害性分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 90-98.
Deng Haifei, Lü Yanmei, Wang Jialin, et al. FMECA for parachuted recovery system of a type UAV[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 90-98. (in Chinese)
- [15] 孙凯帆, 阚树林, 曹召锋, 等. 基于模糊FMECA的液压系统可靠性分析[J]. 液压与密封, 2014(5): 21-25.
Sun Kaifan, Kan Shulin, Cao Zhao Feng, et al. Application of fuzzy FMECA in analysis of hydraulic system reliability [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2014(5): 21-25. (in Chinese)

- neering handbook*. Aviation manufacturing engineering handbook-heat treatment[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [14] 《弹性元件质量问题及技术改进选编》编辑委员会. 弹性元件质量问题及技术改进选编[M]. 太原: 中航工业太原航空仪表有限公司, 2008.
Editorial Board of *elastic components and technology to improve the quality of selected*. Elastic components and technology to improve the quality of selected[M]. Taiyuan: AVIC Taiyuan Aviation Instrument Co., Ltd., 2008. (in Chinese)
- [15] 俞尚知. 焊接工艺人员手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1991.
Yu Shangzhi. *Welding technologist handbook*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1991. (in Chinese)
- 作者简介:**
张永红(1973—),男,工程师。主要研究方向:航电机载设备空速— Ma 。
郭 凯(1986—),男,助理工程师。主要研究方向:航电机载设备高度表。
刘海珍(1986—),女,助理工程师。主要研究方向:大气数据传感器。
- (编辑:马文静)

~~~~~

(上接第 221 页)

- Li Zhengneng. Aircraft structure[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005. (in Chinese)
- [9] 李晓乐. 大型飞机复合材料机身结构设计[C]//第十届中国科协年会论文集(三), 郑州: 中国科学技术协会, 2008: 1664-1669.  
Li Xiaole. The structural design of composites of large airplane fuselage[C]//Collection of the 10th annual meeting of the China Association for Science and Technology (3), Zhengzhou: China Association for Science and Technology, 2008: 1664-1669. (in Chinese)
- [10] 陈绍杰. 复合材料与 A380 客机[J]. 航空制造技术, 2002(9): 27-29.  
Chen Shaojie. Composites and airliner A380[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2002(9): 27-29. (in Chinese)
- [11] 鲁 隽. 用先进结构和材料精心打造 A380[J]. 国际航空, 2004(1): 41-42.  
Lu Jun. Advanced structures and materials of A380[J]. *International Aviation*, 2004(1): 41-42. (in Chinese)
- [12] 张纪奎, 酆正能, 程小全, 等. 复合材料整体结构在大型民航机上的应用[J]. 航空制造技术, 2007(9): 38-43.  
Zhang Jikui, Li Zhengneng, Cheng Xiaoquan, et al. Application of composite integrity structure in large commercial jet[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2007(9): 38-43. (in Chinese)
- [13] 杨乃宾. 新一代大型客机复合材料结构[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 596-604.  
Yang Naibin. Composite structures for new generation large commercial jet[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(3): 596-604. (in Chinese)
- 作者简介:**  
何 薇(1982—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构设计。  
樊庆文(1982—),男,工程师。主要研究方向:飞机总体设计。
- (编辑:马文静)

~~~~~

(上接第 232 页)

- [16] Yun Seong Lee, Dong-Jin Kim, Jin-O Kim. New FMECA methodology using structural importance and fuzzy theory [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(4): 2364-2370.
- [17] 康锐, 石荣德. FMECA 技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 35-40.
Kang Rui, Shi Rongde. FMECA technology and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 35-40. (in Chinese)
- [18] Anmei Zhou, Dejie Yu, Wenyi Zhang. A research on intelligent fault diagnosis of wind turbines based on ontology and FMECA[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2015, 29(1): 115-125.
- 作者简介:**
火建卫(1974—),男,高级工程师。主要研究方向:可靠性设计、分析等。
李雅琳(1966—),女,高级工程师。主要研究方向:可靠性设计与分析。
薛海红(1968—),女,高级工程师。主要研究方向:可靠性设计、分析、试验。
- (编辑:赵毓梅)