

基于模糊故障树的军用气象物资包装可靠性分析

刘高飞, 蔺东伟, 王冬冬, 段黎明

(解放军理工大学, 南京 211101)

摘要: 应用模糊故障树分析方法对军用气象物资包装可靠性进行了系统分析, 简要介绍了模糊故障树分析方法的基本理论, 利用专家判断和模糊集理论相结合的方法, 评估了故障树底事件发生的模糊失效概率。并以“TFS-1 通风干湿表包装”为例, 建立了包装系统的故障树, 采用下行法求解了引起顶事件发生的最小割集, 定量分析计算, 得出模糊失效率为 0.0705, 同时计算了各底事件的重要度。模糊故障树分析方法对于提高军用气象物资包装防护能力, 确保物资装备质量, 具有非常重要的意义。

关键词: 气象物资; 包装可靠性; 故障树

中图分类号: TB487; TB488 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)09-0050-05

Reliability Analysis of Military Meteorological Materiel Packaging Based on Fuzzy Fault Tree

LIU Gao-fei, LIN Dong-wei, WANG Dong-dong, DUAN Li-ming

(PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: Reliability of military meteorological materiel packaging was analyzed systematically using fuzzy fault tree analysis method. The basic theory of fuzzy fault tree was introduced. Fuzzy failure probability of fault tree bottom event was evaluated using expert estimation method combined with fuzzy sets theory. A packaging system fault tree was established with an instance of TFS-1 ventilated psychrometer packaging. Minimal cut sets causing top event happening was solved using descending method. The happening probability of top event was obtained to be 0.0705 and the importance of bottom events was calculated. It was concluded that the method has important significance for improving the reliability of military meteorological materiel packaging and insuring materiel quality.

Key words: meteorological materiel; packaging reliability; fault tree

随着军事高科技的快速发展和新军事变革的深入推进, 我军气象保障事业取得了飞速的发展, 各种新型高技术气象物资不断被研制并装配部队。这些高新气象物资效能的最大发挥受其包装影响较大, 且其包装可靠性的高低直接关系到内装产品的质量。军用气象物资的使用环境一般较为恶劣且复杂多变, 经常受到各种因素的影响, 因包装不当而引起的装备失效, 给国民经济造成了巨大的经济损失。重视军用气象物资的包装可靠性研究, 对于提高包装防护能力, 确保我军气象物资装备质量, 延长其使用寿命, 具有非常重要的意义。

故障树分析方法(Fault Tree Analysis)是复杂系

统可靠性研究的一种有效工具, 也是安全系统工程的主要分析方法之一。该方法把所分析系统最不希望发生的故障模式作为故障分析的目标(即顶事件), 然后找出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, 自上而下地层层查找, 直到找到最原始的, 且故障原因、机理或概率分布已知而不用再深究的因素为止(即底事件)^[1]。在对系统进行可靠性分析时, 常规的 FTA 方法往往把底事件的发生概率作为精确的数值来处理, 然而对于军用气象物资包装可靠性的分析而言, 顶事件和底事件的发生不仅与包装质量有关, 还与储藏、运输条件等息息相关, 且受人为因素影响较大。它们的发生概

收稿日期: 2013-01-18

基金项目: 总后勤部军品包装科研计划项目

作者简介: 刘高飞(1961-), 男, 江苏溧水人, 硕士, 解放军理工大学气象海洋学院副教授, 主要从事可靠性教学与研究。

率通常同时存在着随机性和模糊性,所需的可靠性数据极难获取,而利用统计方法得到的底事件发生的概率值又具有不确定性,即模糊性,因此更适合利用模糊数学进行分析。

1 军用气象物资包装可靠性分析

一般军品的可靠性通常分为固有可靠性和使用可靠性:固有可靠性是指由设计决定、制造实现和保证的可靠性,是产品的固有属性;使用可靠性是指产品在使用过程中,因受环境条件、维修方式及人为因素的影响所能达到的可靠性。由于很多军品在运输储运过程中发生了破损,所以还应该考虑一个包装可靠性。军品包装可靠性是指军品包装在规定的条件下和时间内,完成规定功能的能力^[2],因而,军品包装可靠性和一般可靠性具有相同点,即需要完成规定的功能。同时,军品包装可靠性又与一般可靠性有不同之处,一般可靠性的焦点是产品本身,而军品包装可靠性的焦点不单单只是包装本身,更强调的是包装军品的安全可靠^[3]。

我军气象物资是我军实施军事大气探测和军事气象保障的各种技术设备总称,是军事气象保障的物质基础。其包装最主要的功能就是实现对气象物资的保护。许多气象物资从离开生产线到装配部队开始服役,不仅要经历相当长的储存时间,而且要做多次搬运。在此期间包装应起防水、防潮、防冲击、防震、防菌、防污染、防光、防氧化、防电磁干扰等多方面的保护作用,且气象物资最大限度地分散在各种类型气候条件下使用,工作在广泛的地域,要经常、连续不断地对千变万化的大气物理过程及其规律进行探测,处于多种气象要素综合变化的作用下,影响因素相互交错,其工作条件的应力因素错综复杂,因此军用气象物资包装可靠性就变得相当复杂。现有的包装可靠性研究常集中于运输包装可靠性方面,利用包装动力学理论对产品的包装进行可靠性分析。这些方法着眼于产品运输过程中冲击、振动及跌落等外界机械力对包装的影响,而由于环境要素、人为等因素的不确定性,所需的可靠性数据极难获取,无法精确量化,导致这部分因素的影响常常被忽略,而对于气象物资而言,这些因素的影响无法忽略。由此可知,运输包装可靠性分析方法无法全面、真实地反应产品包装的可靠性。专家判断和模糊故障树方法可以很好地解

决环境、人为等因素无法精确量化的问题,且可以全面地考虑影响可靠性的所有因素,为军用气象物资包装可靠性研究提供了一种有效的途径。

模糊故障树分析方法将常规的 FTA 方法与模糊数学理论相结合,不仅能对系统的各种危险性进行辨识和评价,分析系统故障的直接和潜在的原因,并且能够很好地处理顶事件、底事件发生概率模糊的情形。它采用模糊数对底事件、顶事件进行描述,并进行定性、定量分析。目前,在军事气象业务中主要涉及的气象物资种类繁多、型号不一、数量巨大,主要有气象车辆、气象雷达、气象信息传输处理设备、地面气象观测设备、高空气象探测设备、气象仪器检定设备等。文中以典型的湿度测量设备,国瑞智技术有限公司生产的“TFS-1 通风干湿表”的包装为例,利用专家判断和模糊故障树方法对其包装可靠性进行分析。

2 故障树的建立与定性分析

2.1 故障树建立

通风干湿表是一种携带方便,精度较高,适宜于野外勘测的良好仪器。整套仪器由一对感应部分为柱状的温度表、支架、三通管及通风管组成,并附有专用直流稳压电源、双控开关和电缆。适用于我军气象台站、实验室及科研单位等测量空气湿度及相对湿度。TFS-1 通风干湿表外包装箱采用铝合金外壳,箱体为 EVA 减震内衬。根据其包装故障原因,构建了以“包装失效事件”为顶事件的故障树,见图 1。

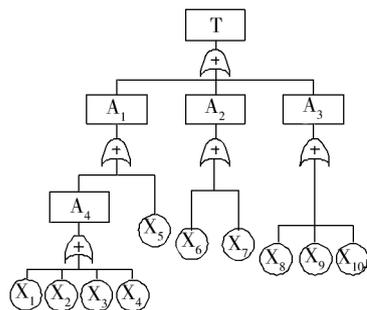


图 1 包装失效故障树

Fig. 1 FTA of packaging

2.2 故障树定性分析

定性分析的主要目的是寻找导致顶事件发生的所有可能的故障模式,也就是分析清楚导致系统顶事件发生的所有可能的底事件或底事件的组合,这些底事件或底事件的组合称为故障树割集。定性分析的

表 1 各代码对应事件
Tab. 1 Codes for events

代码	事件名称	代码	事件名称
T	包装失效事件	X_4	缓冲能力不足
A_1	包装不合理	X_5	包装检测不严
A_2	人为因素	X_6	野蛮装卸
A_3	环境因素	X_7	不合理堆码
A_4	包装设计不合理	X_8	冲击和振动
X_1	包装尺寸不合理	X_9	温度和湿度
X_2	包装材料不合理	X_{10}	光照、化学腐蚀等
X_3	缓冲材料不合理		

关键就是找到故障树所有的最小割集,任一最小割集中所有的底事件发生必然导致顶事件的发生,因此,最小割集代表了导致该系统顶事件发生的所有可能的故障模式。故障树最小割集的求解通常采用上行法或下行法,利用故障树结构中的逻辑关系从顶事件向下或从底事件向上逐级分析。

TFS-1 通风干湿表包装可靠性研究以包装失效引起产品故障为顶事件。由图 1 故障树可知,该故障树全部由“或门”组成,利用下行法可求出全部最小割集为: $\{X_1\}, \{X_2\}, \{X_3\}, \{X_4\}, \{X_5\}, \{X_6\}, \{X_7\}, \{X_8\}, \{X_9\}, \{X_{10}\}$ 。由此可知,任一底事件的发生均会导致顶事件的发生。假设底事件相互独立,顶事件可以表示为:

$$T = X_1 + X_2 + \dots + X_{10} \quad (1)$$

2.3 故障树定量分析

故障树的定量分析是在定性分析的基础上展开的,主要包括 2 个方面的内容:计算顶事件的发生概率;计算底事件的重要度。

根据故障树的定性分析知,顶事件等同于所有最小割集的并事件。假设所有最小割集为 $K_i (i=1, 2, \dots, N_K)$, N_K 为最小割集的个数,在所有底事件相互独立的条件下,利用容斥公式可得顶事件 T 发生概率,可用式(2)表示^[4]:

$$P(T) = P\left(\bigcup_{i=1}^n K_j\right) = \sum_{i=1}^n P(K_i) - \sum_{i < j=2}^n P(K_i K_j) + \sum_{i < j < k=3}^n P(K_i K_j K_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(K_1 K_2 \dots K_n)$$

$$P(K_j) = \prod_{i \in K_j} Q_i \quad (2)$$

其中 Q_i 为底事件 X_i 的发生概率。一般情况下,底事件的发生概率很小,对于较为复杂的系统(最小割集数量较多且阶次较高),在实际计算中可近似地

取(2)式的前一项或几项。

底事件的重要度通常包括底事件概率重要度、结构重要度、相对概率重要度及相关割集重要度,这 4 个重要度从不同的角度描述了底事件在故障树中的定位和关键程度。文中结合模糊数学理论,仅对底事件的概率重要度进行分析和计算。其定义是,在已知各基本事件可靠度(或不可靠度)的情况下,基本事件不发生(假设发生概率为 0)与发生时(假设发生概率为 1)相比,系统不可靠度的减少量,是顶事件的发生概率对底事件发生概率的偏导数^[1]。设顶事件的发生概率为 $P(T)$,则基本事件 X_i 的概率重要度为 $\partial P(T) / [\partial P(X_i)]$ 。底事件概率重要度反映了底事件发生概率的变化对顶事件发生概率的影响程度,它可以用来定量衡量降低各底事件的发生概率对于降低顶事件发生概率的贡献程度,从而确定对顶事件发生概率影响最大的底事件。这对于用有限的人力和物力最大的提高系统可靠性有较大的意义。

3 底事件发生概率的确定

3.1 模糊数及 λ 截集

底事件发生概率的确定是对系统故障树进行定量分析计算的基础,一旦底事件的发生概率确定后,就可以对顶事件的发生概率进行定量计算,并可以计算底事件的概率重要度。底事件发生概率数据一般是通过可靠性试验、现场使用反馈得到的,数据本身带有较大的随机性和统计性。由于可靠性试验要求真实地模拟实际典型环境,在模拟实际使用的工作条件及真实使用的环境条件下长期工作^[5],因此所需的周期相当漫长,获取代价极大。对于气象物资包装而言,其发生的故障与环境、储运条件、使用等环境客观因素紧密相关,通过实验获取的数据的代表性不强,并且人为的因素影响较大,纯粹的依靠抽样的概率方法难以奏效。

采用专家判断法对底事件的发生概率进行模糊评价。通过调查该领域专家对各个底事件发生概率大小的评价,利用模糊集理论将模糊评价语言转化为相应的模糊数据。专家根据自己的经验等对某底事件的发生概率作出类似“很小”、“较小”等的模糊语言评价。评价分为“很小、小、较小、中等、较大、大、很大”(用“VL, L, FL, M, FH, H, VH”表示)7 个等级,用三角或梯形模糊数代替这些自然语言,见图 2^[6]。

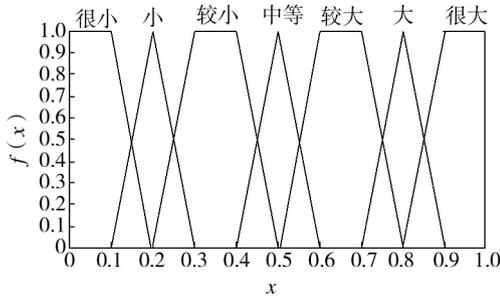


图2 代表自然语言的模糊数

Fig. 2 Fuzzy number representing natural language

这些评价语言对应的模糊数形式和 λ 截集描述见表 2^[7]。

表 2 模糊数形式和 λ 截集

Tab. 2 Form of fuzzy number and cut set of λ

模糊语言	模糊数形式	截集
很小	$f_{VL}=(0,0,0.1,0.2)$	$f_{VL}^{\lambda}=[0,-0.1\lambda+0.2]$
小	$f_L=(0.1,0.2,0.3)$	$f_L^{\lambda}=[0.1\lambda+0.1,-0.1\lambda+0.3]$
较小	$f_{FL}=(0.2,0.3,0.4,0.5)$	$f_{FL}^{\lambda}=[0.1\lambda+0.2,-0.1\lambda+0.5]$
中等	$f_M=(0.2,0.3,0.4,0.5)$	$f_M^{\lambda}=[0.1\lambda+0.4,-0.1\lambda+0.6]$
较大	$f_{FH}=(0.5,0.6,0.7,0.8)$	$f_{FH}^{\lambda}=[0.1\lambda+0.5,-0.1\lambda+0.8]$
大	$f_H=(0.7,0.8,0.9)$	$f_H^{\lambda}=[0.1\lambda+0.7,-0.1\lambda+0.9]$
很大	$f_{VH}=(0.8,0.9,1,1)$	$f_{VH}^{\lambda}=[0.1\lambda+0.8,1]$

3.2 专家权重的确定

为提高专家评价数据的质量,必须选取适当的专家进行评价,并且由于专家个人学识、经验等的不同,对每位专家的评价不能作等同处理,必须对他们的评价赋予不同的权重^[8]。文中从级别、工作经验、对领域的熟悉程度等 3 个方面对专家进行赋值,3 个方面的等级对应不同的分数,见表 3。则每位专家的权重可利用式(3)得到,其中 $WS_i(i=1,2,\dots,n)$ (n 为专家数)为专家 i 的得分。

$$\omega_i = \frac{WS_i}{\sum_{i=1}^n WS_i} \quad (3)$$

3.3 底事件发生概率计算

1) 计算平均模糊数 W 。对于底事件 X_1 ,由 5 位专家对其发生可能性进行判断,5 位专家的权重值可利用式(3)和表 3 求出,分别为 0.2314,0.2066,0.1901,0.1653,0.2066,对应的评估意见分别为“中等、较大、

表 3 专家的权重系数分配

Tab. 3 Weight coefficient assigning of experts

项目	项目级别	权值
级别	正高级职称	15
	副高级职称	12
	中等职称	9
	初级职称	6
	技术工人	3
工作经验 (年)	≥ 30	10
	20 ~ 30	8
	10 ~ 20	6
	5 ~ 10	4
	< 5	2
对领域的熟悉程度	非常熟悉	5
	熟悉	3

较大、中等、较大”。可得底事件 X_1 的平均模糊数为:

$$W_1 = \omega_1 f_1 \oplus \omega_2 f_2 \oplus \dots \oplus \omega_5 f_5 = [0.2314(0.1\lambda + 0.4) + 0.2066(0.1\lambda + 0.5) + 0.1901(0.1\lambda + 0.5) + 0.1901(0.1\lambda + 0.5) + 0.1653(0.1\lambda + 0.4) + 0.2066 \cdot (0.1\lambda + 0.5), 0.2314(-0.1\lambda + 0.6) + 0.2066(-0.1\lambda + 0.8) + 0.1901(-0.1\lambda + 0.8) + 0.1653(-0.1\lambda + 0.6) + 0.2066(-0.1\lambda + 0.8)] = [0.1\lambda + 0.46033, -0.1\lambda + 0.72066] \quad (4)$$

由模糊扩展理论知, W 也为模糊集。令 $W_{\lambda 1} = [z_1, z_2]$ 可得, $\lambda = (z_1 - 0.46033) / 0.1$, $\lambda = (0.72066 - z_2) / 0.1$, 则 W_1 的关系函数为:

$$f_{w1} = \begin{cases} \frac{z-0.46033}{0.1} & (0.46033 < z \leq 0.56033) \\ 1 & (0.56033 < z \leq 0.62066) \\ \frac{0.72066-z}{0.1} & (0.62066 < z \leq 0.72066) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (5)$$

2) 将模糊数转化为模糊可能性值 FPS 。模糊可能性值 FPS 是模糊数的清晰值表示,利用 Cheng 和 Hwang 所提出的左右模糊排序法可实现该转化^[6],该方法定义最大模糊集和最小模糊集为:

$$f_{\max} = \begin{cases} x & (0 < x < 1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{\min} = \begin{cases} 1-x & (0 < x < 1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

则模糊数 W 的左右模糊可能性值分别为:

$$FPS_R = \sup_x [f_w(x) \wedge f_{\max}(x)] = 0.6551$$

$$FPS_L = \sup_x [f_w(x) \wedge f_{\min}(x)] = 0.4906 \quad (7)$$

W 的模糊可能性值为:

$$FPS(W) = \frac{1}{2} [FPS_R(W) + (1 - FPS_L(W))] = 0.5823 \quad (8)$$

3) 将 FPS 转化为模糊失效率 FFR 。故障树底事件的发生概率是由专家评价与模糊理论相结合得到的,模糊可能性值 FPS 并不能表示底事件的发生概率,但却与其存在着对应的关系,利用式(9)可将 FPS 转化为模糊失效率^[9] FFR ,即底事件的发生概率:

$$FFR = \begin{cases} 1/10^K & (FPS \neq 0) \\ 0 & (FPS = 0) \end{cases} \quad (9)$$

其中 $K = \left(\frac{1-FPS}{FPS}\right)^{\frac{1}{3}} \times 0.301$ 。从而可以得到故障

树中底事件 X_1 的发生概率为 0.008 712。

通过类似的方法可依次求出 $X_2 \cdots X_{10}$ 的发生概率。各底事件的发生概率、概率重要度及重要度排序见表 4。

表 4 各底事件发生概率及重要度

Tab. 4 Happening probability and importance of bottom events

底事件	模糊失效率	概率重要度	排序
X_1	0.008 712	0.062 335	6
X_2	0.004 15	0.066 631	4
X_3	0.010 674	0.060 475	8
X_4	0.010 446	0.060 691	7
X_5	0.002 814	0.067 88	3
X_6	0.010 674	0.060 475	9
X_7	0.004 805	0.066 016	5
X_8	0.016 969	0.054 459	10
X_9	0.002 125	0.068 524	2
X_{10}	0.001 362	0.069 236	1

利用式(2)可得顶事件的发生概率为 0.0705。由定量分析结果可知,冲击和振动是最易引起“TFS-1 通风干湿表”包装失效的底事件,其次是野蛮装卸和缓冲材料不合理。由此可见,人为因素是引起其包装失效的重要因素,在包装件的储运和装卸过程中应当加以适当的防范。光照、化学腐蚀、温度和湿度是包装失效事件中概率重要度较高的因素,是包装失效的薄弱环节。为了更好地提高“TFS-1 通风干湿表”的包

装可靠性,应在其包装中增加对此类因素的防护措施。

4 结论

模糊故障树分析方法克服了常规故障树分析法将故障发生概率视为精确值的缺点,既考虑了故障发生概率本身的模糊性,又可将实验数据与工程技术人员的经验相结合,具有较强的灵活性与实用性。在军用气象物资包装的可靠性分析中,由于环境复杂和人为因素等的影响,基本事件的发生概率很难用一个精确值表示出来,且所需的可靠性数据极难获取。把模糊集合理论引入到故障树分析中,利用专家判断和模糊故障树分析方法,能够在一定程度上科学地评价其包装发生故障的模糊概率及基本事件的重要程度,对明确其包装的薄弱环节及制定防护措施有极为重要的意义。

参考文献:

- [1] 卢明银,徐人平. 系统可靠性[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
LU Ming-yin, XU Ren-ping. System Reliability [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [2] 张华良,顾祖莉,金国斌. 现代物流中商品运输包装动力可靠性[J]. 包装工程,2004,25(4):135-137.
ZHANG Hua-liang, GU Zu-li, JIN Guo-bin. Transport Package's Dynamic Reliability of Modern Logistics [J]. Packaging Engineering, 2004, 25(4): 135-137.
- [3] 李良春,郭宝华,谢关友. 基于一体化联合作战的军品包装需求分析[J]. 包装工程,2008,29(10):211-213.
LI Liang-chun, GUO Bao-hua, XIE Guan-you. Requirement Analysis of Military Packaging Based on Joint Operations [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 211-213.
- [4] 金星,洪延姬. 系统可靠性与可用性分析方法[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
JIN Xing, HONG Yan-ji. Analytical Method of System Reliability and Availability [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [5] 王德言,张建国,钟琼华,等. 环境试验与可靠性试验技术的发展[J]. 装备环境工程,2005,2(5):10-13.
WANG De-yan, ZHANG Jian-guo, ZHONG Qiong-hua, et al. Development of Environmental Test and Reliability Test Technique [J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(5): 10-13.

5 结语

CCD 自动套准检测装置可应用于传统的单张纸 4 色胶印机。实用中,在胶印机收纸台上方对边中点 2 处均装上一个 CCD 测量头。这样 CCD 测量头的全部动作只是沿垂直于纸面的轴线转位 90°角,滤色板平移 4 个档位,使测量动作简单,运行控制方便。由于可自动显示定位偏差的方向和量化的偏差幅值,使调整要求一目了然。除可降低操作人员劳动强度以外,还可提高版位调整速度。

参考文献:

- [1] 孟璇,刘昕.单张纸胶印机自动套准的研究[D].西安:西安理工大学,2006.
MENG Xuan, LIU Xin. Study on Automatic Registration of Sheet-fed Offset Press [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [2] 钱军浩.现代印刷机与质量控制技术[M].北京:中国轻工业出版社,2001:86-90.
QIAN Jun-hao. Modern Printing Press and Quality Control

Technique[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001: 86-90.

- [3] 蒋恩松,肖辉军,孙刘杰,等.基于机器视觉的套印误差自动检测系统设计[J].计算机技术与发展,2008(7):173-175.
JIANG En-song, XIAO Hui-jun, SUN Liu-jie, et al. Design of Automatic Detecting Pegistration Deviation System Based on Machine Vision[J]. Computer Technology and Development, 2008(7):173-175.
- [4] 张海燕,赵博.基于图像处理的单张纸胶印机对角线套准及自动控制系统的[J].包装工程,2005,26(2):50-51.
ZHANG Hai-yan, ZHAO Bo. Diagonal Register and Automatic Control System Based on Image Processing for the Sheet-fed Offset Press[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(2):50-51.
- [5] 周世生.印刷色彩学[M].北京:印刷工业出版社,2008:220-224.
ZHOU Shi-sheng. Printing Chromatics[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2008:220-224.
- [6] 严洁.单片机原理及其接口技术[M].北京:机械工业出版社,2010:65-105.
YAN Jie. Principle of Single Chip Computer and Interfacing [M]. Beijing: Engineering Industry Press, 2010:6-105.

(上接第 54 页)

- [6] CHEN S J, HWANG C L. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Application[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1990.
- [7] 朱云斌,黄晓明,常青.模糊故障树分析方法在机场环境安全中的应用[J].国防科技大学学报,2009,31(6):126-131.
ZHU Yun-bin, HUANG Xiao-ming, CHANG Qing. Application of the Fuzzy Tree Analysis Method to Airport Environment Security [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(6):126-131.

- [8] 黄兴玲,曾广武,黎庆芬.船舶下水安全性评估的模糊故障树方法[J].中国舰船研究,2006,1(3):15-19.
HUANG Xing-ling, ZENG Guang-wu, LI Qing-fen. Fuzzy Fault-tree Approach to the Safety Assessment of Ships Launching [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2006, 1(3):15-19.
- [9] ONISAWA T. An Approach to Human Reliability in Man-machine Systems Using Error Possibility[J]. Fuzzy Sets and System, 1998, 58:205-213.

(上接第 83 页)

- [5] 赵晨飞.印刷纸颜色对印品色彩再现的影响[J].包装工程,2008,29(6):73-80.
ZHAO Chen-fei. Effects of Printing Paper's Color on Color Duplication of Printed Matter [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6):73-80.
- [6] 陈文革,蒋文燕,王长智.包装印刷纸对阶调和色彩再现影响的研究[J].包装工程,2010,31(9):114-141.
CHEN Wen-ge, JIANG Wen-yan, WANG Chang-zhi. Study

on Influence of Package Printing Paper on Tone and Color Rendering [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(9):114-141.

- [7] CHEN Wen-ge. Study on Reproduction of Ink Color with Paper Performance based on Energy Saving and Special Material Proper [J]. Advanced Materials Research, 2012(578): 21-24.