

民机隐蔽故障维修间隔优化方法研究^{*}

Study on Maintenance Interval Optimization of Hidden Failure of Civil Aircraft

中国民航大学航空工程学院 贾宝惠 刘涛 杨杭 李耀华

[摘要] 针对民用飞机维修间隔优化问题,考虑目前国内航空公司定量优化评估方法和模型不足的实际情况,对隐蔽功能故障安全影响类维修间隔的优化调整进行研究分析,提出一种基于风险约束函数的平均不可靠度和成本率函数优化检查和恢复间隔的模型,并采用线性规划求解工具进行求解。最后,通过实际案例分析研究,验证该模型的合理性和有效性。

关键词: 维修间隔 优化调整 风险约束 线性规划

[ABSTRACT] Currently considering the lack of quantitative optimization methods and models of civil aircraft to assess maintenance intervals for domestic airlines, maintenance interval optimal adjustment of “safety effect” categories of hidden failures is studied and analyzed. In this paper, an optimization model based on the mean fractional dead time with risk-constraint and a cost rate function (CRF) is proposed to assess inspection and restoration intervals, and the linear programming tools are used to solve it. Finally, through the actual case analysis of study, the rationality and effectiveness of the model are verified.

Keywords: Maintenance interval Optimal adjustment Risk-constraint Linear programming

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S1.020

在ATA MSG-3中,针对隐蔽功能故障项目的主要维修策略是使用功能检查,即“故障发现检查”(Failure Finding Inspection, FFI),用来发现已经发生的但却不容易被空勤组发现的功能故障。故障发现检查能够降低发生多重故障的风险,保证隐蔽功能的可用性^[1]。然而单一的故障发现检查并不能有效地降低风险到一个可接受的水平。因此,在故障发现检查后,需要执行恢复任务,保证隐蔽故障的安全使用,降低故障风险到一个可接受的水平。其中,隐蔽功能故障项目的检查和恢复维修间隔就成为了一个关键点,间隔设置过大直接影响

到了民用飞机的可靠性,但是间隔如果设置过小不仅会降低飞机的可靠性也会大大增加航空公司的维修成本,因此,维修间隔的优化问题就成为了民航企业所面临的一大问题,也是航空公司维修方案优化所研究的一个主要问题。

目前国内外对民机隐蔽故障有一些研究,根据多个假设提出了隐蔽故障系统的维修优化模型。如苏义^[2]研究了针对隐蔽故障的故障管理策略,选择氧气系统使用可用度模型来确定故障检查间隔期,以保证机载设备的可用度;Lienhardt等^[3]提出以更新维修风险为约束,维修花费率为目标的隐蔽故障维修解决方法;刁海飞等^[4]基于MSG-3分析原理,分别从使用性和经济性出发,建立了确定隐蔽功能故障检测间隔期的模型。这些研究大多基于假设系统本身失效或系统零部件失效是相互独立的,与实际不符。另外,研究只是针对隐蔽故障的某一方面,缺乏系统性,并且对民机隐蔽故障系统维修优化研究较少。

因此,本文综合考虑隐蔽功能系统的维修策略、可靠度函数和维修成本,针对“安全影响类”检查和恢复间隔进行优化研究,提出一种基于风险约束函数的平均不可靠度和成本率函数优化检查和恢复间隔的模型,并采用线性规划求解工具对模型进行求解。最后,收集某机型飞机在实际运行中所产生的大量系统部件监控数据、故障记录、部附件送修记录,整理、筛选出了电动液压泵的故障数据进行案例研究,验证了优化模型的合理性和有效性。

1 隐蔽功能系统的维修策略及可靠度函数

隐蔽功能系统的故障发生是随机的点过程,随机点过程包括齐次泊松过程的更新过程和非齐次泊松过程^[5]。在不相交的时间区间内独立同分布的属于更新过程,该过程基于完美维修策略,部件恢复如新;在不相交的时间区间内非独立同分布的是非齐次泊松过程,该过程基于最小维修策略,部件恢复如旧^[6]。工程经验表明,大多数隐蔽功能系统独立同分布的假设是不成立的,所以属于非齐次泊松过程,也是幂律过程的一种。因此,基于最小维修策略,可以采用幂律过程拟合隐蔽功能系统在连续检查间隔内的故障发生过程。其可靠

^{*} 中央高校基本科研业务费资助项目(SY-1408);中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122014C007);国家自然科学基金项目“基于智能算法的民航飞机维修管理调度优化方法研究”(U1233107)资助。

度函数和分布函数如下^[7]:

$$R(t) = e^{-H(t)}, \quad (1)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-H(t)}, \quad (2)$$

式中, α 是比例参数, β 是形状参数。 $H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta$ 为幂律分布的累积分布函数^[8]。

2 维修优化模型的建立

民机隐蔽功能系统故障根据 MSG-3 故障影响的类别分为隐蔽的安全性影响和隐蔽的非安全性影响。下面对隐蔽的安全性影响类基于故障发现检查和恢复任务研究其维修优化模型,安全影响类故障首先要保证隐蔽功能系统具有要求的可靠度,降低多重故障的发生概率在用户可接受的水平,从而保证系统的安全性和使用性要求。除此之外,还要保证经济性要求使单位时间的维修花费最小。因此,本文在基本假设的基础上研究了隐蔽功能系统的不可靠度和维修成本,构建了符合安全影响类的维修优化模型,并对模型的求解算法进行了研究分析。

2.1 模型基本假设

隐蔽故障的“安全影响”类,在“FFI 和恢复任务”维修策略下,维修间隔的优化模型基于如下假设。

(1) 故障发现检查是完备的,即在检查 / 测试时,只要系统存在故障就一定可以被探测到。

(2) 检查 / 修理和恢复任务后,零部件功能完好,系统恢复如新。

(3) 在优化模型中,维修任务本身不会增加故障率且不考虑由设计制造和突发事件引起的故障。

基于如上假设连续检查周期循环的结构简图如图 1 所示。 T_i 和 T_r 相对于 T 的时间可以忽略,所以运营时间 $T_k=KT$, 系统在 T_k 时刻进行恢复任务。

2.2 隐蔽功能系统的不可靠度分析

隐蔽功能系统首先是可修复系统,但其故障后的修理工作可能是不完美的,且在维修工作中的润滑和勤务也会导致故障率的增加。所以,在构建模型中采用最小维修策略更符合工程实际情况。

假设系统在 t_1 时刻正常,在 t_1 检查后 t_2 时刻故障的

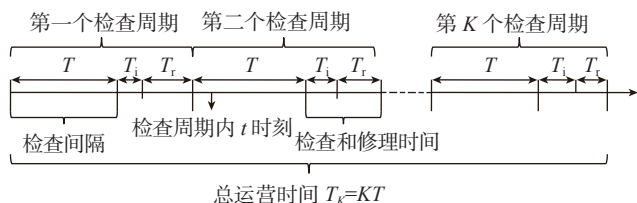


图1 检查周期循环的结构简图

Fig.1 Structural diagram of inspection cycles

条件概率为:

$$\begin{aligned} \Pr(t_2|t_1) &= \frac{F(t_2) - F(t_1)}{R(t_1)} = 1 - \frac{R(t_2)}{R(t_1)} \\ &= 1 - \exp(H(t_1) - H(t_2)) \end{aligned} \quad (3)$$

同理,在 $N-1$ 次检查正常,在 N 次检查周期 t 时刻的条件故障概率为:

$$F_N(t) = 1 - \exp\left(\left(\frac{(N-1)T}{\alpha}\right)^\beta - \left(\frac{(N-1)T+t}{\alpha}\right)^\beta\right), \quad (4)$$

其中“ t ”表示第 N 次检查周期内的任意时刻。

对于可靠度要求较高的系统,工程上更多关注的是系统在检查间隔内的平均不可靠度^[8]。对于隐蔽故障的“安全影响类”,在第 N 个以 T 为检查间隔的检查周期内的平均不可靠度 MFDT (Mean Fractional Dead Time) 如下^[9]:

$$\begin{aligned} \text{MFDT}_{(T,N)} &= \frac{1}{T} \int_0^T F_N(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \left(1 - \exp\left(\left(\frac{(N-1)T}{\alpha}\right)^\beta - \left(\frac{(N-1)T+t}{\alpha}\right)^\beta\right)\right) dt \end{aligned} \quad (5)$$

对隐蔽故障安全影响类,故障发现检查和恢复任务的目的是降低多重故障的风险,保证隐蔽功能的可用性,同时减小经济损失。制造商根据大型 / 航线维修时间间隔及适航规章制度来规定 MSG-3 第 8 类故障的最大或可接受多重故障的发生概率,即任何单一部件失效概率均不可超过该值,并以此来保证安全性与可靠性。设 P_{\max} 为多重故障发生概率的极限值,结合 IP44 规定,设定置信区间为 95% 情况下的准则如下^[10]:

$$\varphi \text{MFDT}_{(T,N=K)} \leq P_{\max}, \quad (6)$$

式中, $\frac{P_{\max}}{\varphi} = 0.05$, φ 是单元需求率; K 是检查频率。

2.3 隐蔽功能系统的成本分析

系统的维修成本如下:

(1) 每次检查任务的直接成本 C_i 。 C_i 在连续的检查周期内为常数。

(2) 修理任务的直接成本 C_r 。随着运营时间和检查频率的增加,系统的风险会发生变化。因此,在第 N 次检查周期内修理任务的期望费用为 $C_r \cdot F_N(t)$ 。

(3) 多重故障单位时间损失费用 C_A 。在第 N 次检查周期内多重故障损失费用 C_A 与功能不可用的期望时间“ $\text{MFDT}_{(T,N)} \cdot T$ ”和单元需求率 φ 的乘积成正比,即 $C_A \varphi \text{MFDT}_{(T,N)} \cdot T$ 。

(4) 单位时间停机损失费用 C_{OC} 。该费用与飞机检查和修理的停机时间 T_i 和 T_r 有关,在连续的检查周期内 T_i 随着 $F_N(T)$ 变化,因此,在第 N 次检查周期内飞机丧失生产力的停机损失期望值为 $C_{OC} (T_i + T_r \cdot F_N(T))$ 。

(5) 一次恢复任务的成本 C_{Res} 。 C_{Res} 包括人工时、

材料费的直接维修成本以及物流、关税等间接成本。可通过模型计算,一般为常数^[11]。

设 $CRF(T, K)$ 表示系统检查间隔为 T , 运营时间为 T_k 的成本率, 计算公式如下:

$$CRF_{(T,K)} = \frac{C_i}{T} + \frac{C_r}{KT} \sum_{N=1}^K F_N(T) + \frac{C_{oc}T_i}{T} + \dots \quad (7)$$

$$\frac{C_{oc}T_i}{KT} \sum_{N=1}^K F_N(T) + \frac{C_A\varphi T}{KT} \sum_{N=1}^K MFDT_{(T,N)} + \frac{C_{Res}}{KT}$$

对公式(7)进行简化,得到如下公式^[12],

$$CRF_{(T,K)} = \frac{C_i}{T} + \frac{C_i H(T_k)}{T_k} + \frac{C_{oc}T_i}{T} + \frac{C_{oc}T_i H(T_k)}{T_k} + \frac{C_A\varphi TH(T_k)}{2T_k} + \frac{C_{Res}}{T_k} \quad (8)$$

其中, $H(T_k)$ 表示在区间 $(0, T_k)$ 上的累积风险函数。

2.4 优化模型

若故障发现检查间隔期过长,致使部件处于故障状态,会增加多种故障的风险费用损失;如果检查间隔期过短,又会造成不必要的过多检查费用损失。检查和恢复任务的目标是利用风险约束函数和成本率函数选择最优的检查/恢复间隔 T 和频率 K , 使其经过长期运行的单位时间期望损失最小。其优化模型如下:

$$\begin{cases} \min CRF_{(T,K)} = \frac{C_i}{T} + \frac{C_i H(T_k)}{T_k} + \frac{C_{oc}T_i}{T} + \frac{C_{oc}T_i H(T_k)}{T_k} \\ \quad + \frac{C_A\varphi TH(T_k)}{2T_k} + \frac{C_{Res}}{T_k} \\ \text{st } \varphi MFDT_{(T,N=K)} \leq P_{max} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n, T > 0) \end{cases} \quad (9)$$

2.5 优化模型的求解

常用的求解组合优化问题的方法分为传统方法、智能优化方法、混合方法。传统方法主要包括分支定界方法、拉格朗日松弛法和多面体割平面方法等,主要用于求解规模不大的优化问题;智能优化法包括遗传算法、递归算法、迭代算法等寻优方法,在规模较大的组合优化问题的求解过程中有较广泛的应用^[13]。以上算法的共同之处是求解过程比较繁琐都需要通过编程和迭代进行求解,然而,微软在 Excel 中开发的“规划求解”工具以单纯形法为基础、原理相对简单、通用性较强。因此,本文采用如图 2 所示的规划求解模块对模型(9)进行优化求解。

Microsoft Excel 的“规划求解”工具取自德克萨斯大学奥斯汀分校的 Leon Lasdon 和克里夫兰州立大学的 Allan Waren 共同开发的 Generalized Reduced Gradient (GRG2) 非线性最优化代码。线性 and 整数规划问题取自 Frontline Systems 公司的 John Watson 和 Dan Fylstra 提供的有界变量单纯形法和分支定界法。“规划求解”的原理是对与目标单元格中的公式相关联的一组单元



(a) Excel 中的规划求解参数 (b) Excel 中的规划求解选项

图2 规划求解模块

Fig.2 Modules of programming solving

格中的数值进行调整,最终达到满足约束条件的目标单元格中最大或最小的期望值。与目标单元格中的公式相关联的一组单元格被称为可变单元格,应对其进行约束条件限制。

3 案例分析

某机型电动液压泵属于隐蔽功能系统安全影响类,利用该机型飞机在实际运行中产生的大量系统部件监控数据、故障记录和部附件送修记录整理、筛选出了电动液压泵的故障数据,按照首次故障送修时的使用时间从小到大的顺序排列得到如表 1 所示数据。

采用相关系统优化法对幂律分布的参数进行了估计,得到尺度参数 $\alpha=16632$, 形状参数 $\beta=2$ 。电动液压泵的每次检查费用 C_i 约为 100 元,检查时间 T_i 约为 0.5 人工时,修理费用 C_r 约为 1000 元,修理时间 T_r 约为 1.0 人工时,单位时间的停机损失费用 C_{oc} 约为 1000 元/每飞行小时,一次恢复任务的成本 C_{Res} 约为 8000 元,多重故障单位时间损失费用 C_A 和单元需求率 φ 的乘积约为 10。运用 Microsoft Excel 的“规划求解”工具对模型进行求解基本步骤如下:

表1 电动液压泵故障数据

序号	首修时间 / 飞行小时	序号	首修时间 / 飞行小时	序号	首修时间 / 飞行小时	序号	首修时间 / 飞行小时
1	2758	13	9586	25	15864	37	22385
2	4373	14	9625	26	16774	38	23746
3	5011	15	9852	27	17051	39	24624
4	6674	16	10034	28	17438	40	24838
5	7490	17	11263	29	17654	41	25031
6	8023	18	12058	30	18406	42	25933
7	8088	19	12229	31	18663	43	26002
8	8149	20	12683	32	18975	44	27468
9	8309	21	13892	33	19520	45	29652
10	8457	22	14250	34	19783		
11	8977	23	14778	35	20959		
12	9552	24	15409	36	21247		

(1) 构建优化模型的 Excel 模型, 见图 3。

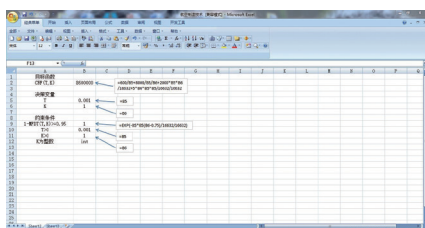


图3 优化模型的Excel模型

Fig.3 Optimization model in Microsoft Excel

(2) 单击“数据”菜单的“规划求解”, 在弹出的“规划求解参数”对话框中输入各项参数, 见图 4。

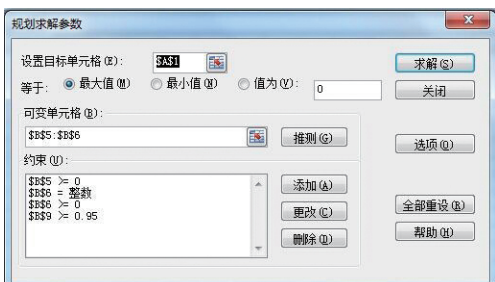


图4 规划求解参数

Fig.4 Parameters of programming solving

(3) 设置“规划求解”选项, 见图 5。

(4) 生成运算结果报告, 见表 2。

利用本文建立的优化模型可以求得满足置信度为 95%, 同时使单位时间维修费用最低为 1.497 的最优检查间隔为 1176 飞行小时, 恢复间隔为 12936 飞行小时。航空公司根据自己的实际情况, 对最优检查和恢复间隔进行调整, 最终确定出自己的维修方案。本分析模型具有可靠的科学依据, 不仅满足安全性要求, 降低了航空公司的运营成本, 还为服役后飞机维修大纲的优化提供了一种理论借鉴。

4 结论

针对民航隐蔽故障安全影响类可修复系统故障特



图5 规划求解选项

Fig.5 Options of programming solving

点, 构建可靠性模型, 在模型假设的情况下提出一种基于风险约束函数的 MFD T 和成本率函数确定检查和恢复等间隔的优化方法, 并利用 Excel 规划求解工具进行研究分析。通过可靠性数据得到的分析结果表明, 本方法不仅提高了隐蔽功能系统的可用性, 降低了多重故障的发生概率, 还降低了维修成本, 可以为航空公司制定维修方案提供参考。此优化模型不仅适用于隐蔽故障的安全影响类还适用于非安全影响类, 随着民航维修间隔优化的深入研究, 今后可以设定初始检查间隔与检查周期不同进行不等间隔的分析。此外, 还可以基于不完美维修假设, 引入役龄回退因子对维修活动前后系统性能的变化进行描述, 使系统状态处于修复如旧与修复如新之间优化检查和恢复间隔。

参考文献

- [1] ATA MSG-3 Operator/manufacturer scheduled maintenance developments. Air Transport Association of America, 2009.
- [2] 苏义. 机载设备隐蔽故障及维修策略. 航空制造技术, 2010(12):86-88.
- [3] Lienhardt B, Hugues E, Bes C, et al. Failure-finding frequency for a repairable system subject to hidden failures. Journal of Aircraft, 2007,45(5):1804-1809.
- [4] 刁海飞, 蔡景, 林海彬, 等. 基于多目标的隐蔽功能故障检测间隔优化方法研究. 飞机设计, 2014, 34(3):33-36.
- [5] 杨卫东, 梁坤, 左洪福. 以故障发现为基础的民航隐蔽功能 (下转第 32 页)

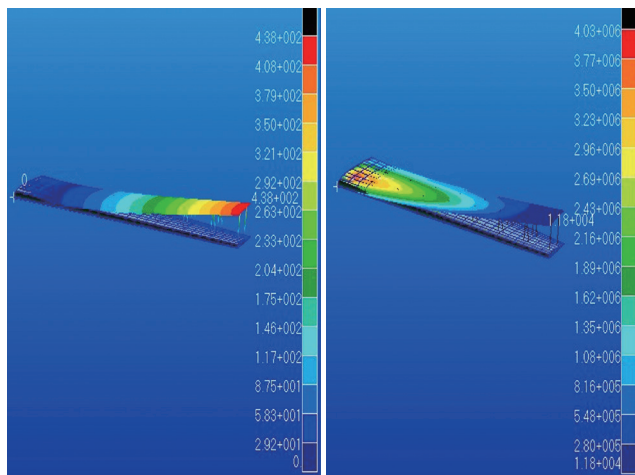
表2 运算结果报告

	单元格	名字	初值	终值	单元格值	公式
目标单元格(最小值)	\$B\$2	CRF (T, K)	8600000	1.496903307		
可变单元格	\$B\$5	T	0.001	1176.557731		
	\$B\$6	K	1	11		
约束单元格	\$B\$9	1-MFD T (T, K) >= 0.95			0.94999991	\$B\$9 >= 0.95
	\$B\$5	T			1176.557731	\$B\$5 >= 0
	\$B\$6	K			11	\$B\$6 >= 0
	\$B\$6	K			11	\$B\$6 = 整数

5.2 机翼模型结合 MSC.Nastran 的有限元分析

首先将实例中生成的机翼三维 CATIA 模型另存为初始图形交换规范(Initial Graphics Exchange Specification, 简称 iges)格式,然后导入 Patran 中,根据梁和翼肋位置将机翼蒙皮分块,结合机翼尺寸大小,给分割后的每块蒙皮周边布点,最后整体生成有限元网格,选择梁与机翼上蒙皮相交的直线进行曲线网格划分,并生成梁单元。进行材料属性的定义,均定义为超硬铝合金^[10],弹性模量为 69GPa,泊松比为 0.33。

在上述基础上,进行单元属性的定义,蒙皮和翼肋均定义为厚度为 4mm 的壳单元,翼梁定义为截面为工字梁形状的梁单元,进行边界条件的设置,加 100kg/m²的翼载。最后利用 MSC.Nastran 求解器,进行有限元分析。图 10 为机翼应力云纹图与位移云纹图。



(a) 位移云纹图 (b) 应力云纹图

图10 位移云纹图与应力云纹图

Fig.10 Displacement and stress nephograms

6 结束语

通过以上算例可知,对机翼进行参数化描述后,利用 CATIA Automation 二次开发技术可以自动生成机翼三维模型。机翼模型参数化 CAD 模型生成系统的开发实现了机翼模型的快速设计,提升了翼面结构的设计能力和设计水平,具有现实的工程意义和使用价值。应用 CATIA Automation 二次开发方法能够快速、准确地建立参数化的翼面结构模型。在此基础上,通过将二次开发所生成的机翼模型与 MSC.Nastran 有限元分析相结合,并结合以上算例验证了此模型进行有限元分析的可行性,在很大程度上提高了建模、变换、有限元分析优化综合流程的效率。为以后在飞机设计过程提供了快速、精确的模型建立途径以及有限元分析模型。再者,还可以通过机翼模型参数化 CAD 模型生成系统所生成的三维 CAD 模型,获取机翼零件模型图样,确定相应的加工工

艺,在此基础上编写数控加工程序,加工出相应的实体模型,可以为科学研究提供尺寸数据精确的试验件,从而很好地将理论与实践相结合。

参考文献

- [1] 孟令涛,刘莉,龙腾,等.基于 CATIA 模型在 CFD 中的应用. 弹箭与制导学报,2008,28(5):161-164.
- [2] Sohlenius G. Concurrent engineering. Annals of the CIRP, 1992, 41(2):645-655.
- [3] Duffy A H B, Duffy S M. Sharing the learning activity using intelligent CAD. Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing,1996, 10(2):83-100.
- [4] 周桂生,陆文龙. CATIA 二次开发技术研究与应用. 机械设计与制造,2010(1):81-83.
- [5] 范辉,李为吉. CAD 系统的二次开发在飞机构型优化中的应用. 计算机工程与设计,2006,27(13):2319-2321.
- [6] Kulfan B M. A universal parametric geometry representation method—CST//AIAA. Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA 2007-62.
- [7] HEL Stress and emotion recognition in natural speech in the work and fallibly enrinnments[D]. Melbourne: RMIT University, 2011:26-76.
- [8] 胡挺,吴立军. CATIA 二次开发技术基础. 北京:电子工业出版社,2007:14-27.
- [9] 马爱军,周传月,王旭. Patran 和 Nastran 有限元分析. 北京:清华大学出版社,2005:224-233.
- [10] 邓阳晨,孙聪,王琦. 飞机设计中工程优化方法与建模. 长春:吉林大学出版社,2009:183-194.

(责编 叶枫)

(上接第 23 页)

系统维修优化研究. 中国西部科技,2013,12(11):22-24.

- [6] Modarres M. Risk analysis in engineering: Techniques, tools, and trend. NW: Taylor & Francis,2006.
- [7] Vaurio J K. On time dependent availability and maintenance optimization of standby units under various maintenance policies. Reliability Engineering and System Safety, 1997, 56(1):79-89.
- [8] Vaurio J K. Optimization of test and maintenance intervals based on risk and cost. Reliability Engineering and System Safety, 1995,49(1):23-36.
- [9] Rausand M, Vath J. Reliability modeling of surface controlled subsurface safety valves. Reliability Engineering and System Safety, 1998,61(1/2):159-166.
- [10] Evolution / Optimization Guidelines IMRBPB Issue Paper 44 (Issue 3). IMRBPB,2007.
- [11] Kumar U, Akersten P A. Availability and maintainability// Melnik L, Everitt B S. Encyclopedia of quantitative risk analysis and assessment. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.
- [12] Aven T, Abrahamsen E. On the use of cost-venefit analysis in ALARP processes. International Journal of Performability Engineering, 2007,3(3):345-353.
- [13] 刘福胜,吴纬,单志伟,等. 装甲装备使用可用度与维修保障费用的优化模型. 装甲兵工程学院学报,2010,24(4):11-14.

(责编 春早)