

一种考虑环境因素的自动步枪可靠性分析方法

方义川¹, 赵云², 王永娟¹, 沙金龙³, 云航¹

(1.南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094; 2.预备役联勤保障第三旅, 重庆 400054;
3.中国兵器工业第208研究所, 北京 102202)

摘要: **目的** 分析环境因素对于自动步枪系统可靠性的影响。**方法** 首先介绍贝叶斯网络理论, 然后将自动步枪系统可靠性建模划分为刚性抛壳机构和弹匣供弹机构两大模块。在此基础上, 从设计制造、使用因素和环境因素3个方面进行故障树建模。将故障树转化为贝叶斯模型后, 基于给出的底事件失效概率和引入的环境影响因子, 计算考虑环境因素带来的共因失效效应时自动步枪系统的可靠度。**结果** 从系统层面来看, 环境因素的影响会使系统的可靠度下降8.1%。**结论** 在进行自动步枪的系统可靠性分析时, 考虑由环境因素带来的共因失效效应更为符合实际情况, 不考虑共因失效效应时, 往往会高估子系统的可靠度。

关键词: 环境因素; 自动步枪; 贝叶斯网络; 故障树; 环境影响因子; 共因失效

中图分类号: TJ22

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)06-0011-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.003

An Analysis Method of Automatic Rifle Reliability Considering Environmental Factors

FANG Yi-chuan¹, ZHAO Yun², WANG Yong-juan¹, SHA Jin-long³, YUN Hang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Reserve Joint Logistic Support Brigade 3, Chongqing 400054, China;

3. No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)

ABSTRACT: In order to analyze the influence of environmental factors on the reliability of automatic rifle system, this paper firstly introduces Bayesian network theory, and then divides the reliability modeling of automatic rifle system into two modules: rigid ejection mechanism and magazine feeding mechanism, based on which the fault tree modeling is carried out from three aspects: design and manufacture, use factors and environmental factors. After transforming the fault tree into a Bayesian model, the reliability of the automatic rifle system considering the common cause failure effect caused by environmental factors is calculated based on the given failure probability of basic event and the introduced environmental influence factor. At the system level, the reliability of the system will be reduced by 8.1% due to the influence of environmental factors. Therefore, analyzing the reliability of automatic rifle system, it is more realistic to consider the CCF effect caused by environmental factors, and the reliability of subsystem is often overestimated when the CCF effect is not considered.

收稿日期: 2022-04-30; 修订日期: 2022-06-09

Received: 2022-04-30; Revised: 2022-06-09

作者简介: 方义川 (1996—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为系统可靠性建模与分析。

Biography: FANG Yi-chuan (1996-), Male, Doctorial candidate, Research focus: system reliability modeling and analysis.

通讯作者: 王永娟 (1972—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为轻武器可靠性技术。

Corresponding author: WANG Yong-juan (1972-), Female, Docton, Professor, Research focus: reliability technology for small arms.

引文格式: 方义川, 王永娟, 赵云, 等. 一种考虑环境因素的自动步枪可靠性分析方法[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 011-017.

FANG Yi-chuan, WANG Yong-juan, ZHAO Yun, et al. An Analysis Method of Automatic Rifle Reliability Considering Environmental Factors[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 011-017.

KEY WORDS: environmental factors; automatic rifle; Bayesian network; fault tree; environmental influence factors; common cause failure

针对枪械较为关注的高低温、扬尘、浸河水和盐雾环境下机构动作可靠性的相关研究鲜有文献涉及。枪械作为一个复杂的机械系统,在特种环境下的可靠性更为复杂,现阶段的动力学建模依赖于ADAMS 仿真软件,但其结构形式多样,失效模式及失效机理复杂,仅仅通过仿真计算得到的系统可靠性结果,精确性和应用灵活性受到很大限制,因此考虑环境因素的枪械系统可靠性评估具有重要的理论和工程参考意义。

早期的研究主要从枪械的失效历史数据入手,对枪械的可靠性进行评估。白俊敏等^[1]运用经典的可靠性理论,将轻武器装备寿命试验归结为可修复系统的有替换定时截尾试验,通过分析某型机枪的寿命试验数据,对母体寿命可能的分布类型作出假设,通过比较,确定母体分布类型,建立了该型机枪寿命的可靠性数学模型,对同类轻武器装备的可靠性指标评定提供了一定的参考。柳吉龄等^[2]对枪械故障分布规律进行了建模研究和特征分析,说明在使用寿命内可以用指数分布来近似,并以指数分布为基础,运用可靠性工程理论和数学方法,开展了枪械定时截尾和序贯截尾2类试验统计方案的研究。张俊斌等^[3]针对枪械环境适应性试验可靠性评定方法展开了研究,从枪械在典型环境下的故障机理和故障形式入手,讨论了枪械故障分布,给出了对枪械可靠性试验结果进行单项评定的方法,以及利用泰勒法对枪械可靠性进行综合评定的方法。

随着虚拟样机技术的进步和动力学软件ADAMS 的普及,各类机构的仿真模型相继建立,枪械机构可靠性研究范畴进一步拓展^[4]。王亚平等^[5-6]运用多体动力学分析软件 ADAMS 进行了结构变参数设计以及机构动作可靠性分析,并提出了对某自动步枪三发点射机构的动作可靠性要求,制定了可靠性准则,通过 Monte Carlo 模拟法对随机参数进行了模拟,得出了动作可靠度。邹衍等^[7]以自动步枪的抛壳机构为研究对象,确立了影响抛壳动作可靠性的主要影响参数,建立了一套自动步枪刚性抛壳可靠性与分析流程,通过虚拟样机仿真分析和可调抛壳窗位置的验证试验,初步阐释了自动步枪卡壳的故障机理。袁克斌等^[8]通过 ADAMS 软件建立了抛壳机构的简化虚拟样机模型,仿真得到了影响抛壳可靠的主要因素,借助 MATLAB 软件编写了神经网络预测抛壳失效判据,确定了影响抛壳机构的敏感参数(如温度、摩擦因数、气室冲量效率),采用蒙特卡洛法抽样仿真计算了抛壳的失效概率。

1 贝叶斯网络与共因失效

1.1 基本概念

贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)是综合利用概率论知识和图论方法解决系统可靠性建模的重要方法^[9-12]。图1是一个简单的贝叶斯网络,设A、B、C、D为4个具有状态0和1的随机变量。图1中有向边体现了父子节点的因果关系,变量的定量关系由各自的概率分布决定。

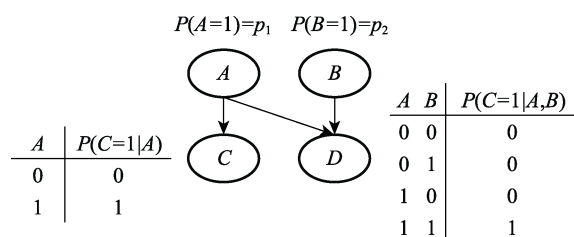


图1 一个简单的贝叶斯网络
Fig.1 A simple Bayesian network

1.2 故障树向贝叶斯网络的转化

从某种意义上来说,故障树^[13-16]和贝叶斯网络具有很大的相似性,故障树分析和贝叶斯网络都是基于底事件的信息推断顶事件的信息,最主要的区别在于贝叶斯网络采用有向边和条件概率的方式表达变量的因果关系,而故障树则依赖于逻辑门。采用 Bobbio 等^[17]给出的算法可以将任何给定的故障树转化为与之等效的贝叶斯网络。

以 X_1 、 X_2 和 X_3 组成的系统为例, X_1 和 X_2 串联后的中间事件Y和 X_3 并联后,得到了系统S,依据逻辑关系建立系统S的故障树模型,如图2所示。其对应的等效贝叶斯网络模型如图3所示,概率分布的0和1分别对应组件的正常和故障2种状态。

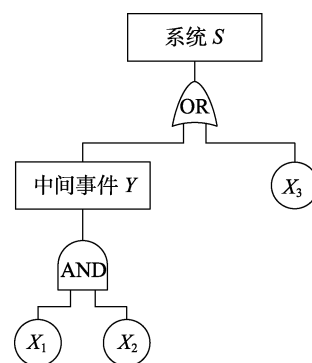


图2 系统S的故障树模型
Fig.2 Fault tree model of system S

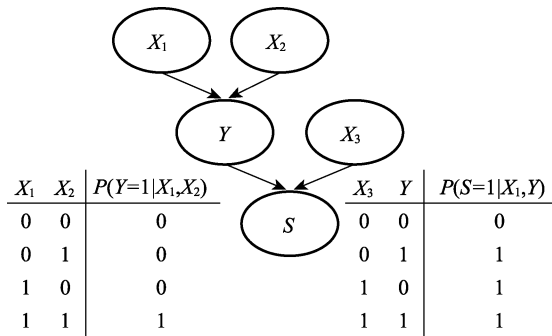


图 3 与系统 S 故障树等效的贝叶斯网络
Fig.3 Bayesian network equivalent to fault tree of system S

1.3 考虑共因失效的贝叶斯网络

共因失效 (Common Cause Failure, CCF) 是冗余系统可靠性分析中的一个重要概念,指的是由于某种共同原因造成多个单元的同时失效^[18-22]。通常来说,如果造成若干个单元同时故障的各种环境应力冲击来自系统外部,则可认为各种冲击作用彼此相互独立,这也是大多数共因失效分析模型基本假设的基础。将共因失效引入贝叶斯网络需要解决 2 个关键问题:如何合理确定系统中的共因失效组(冗余系统处理方便);如何将共因失效部件的故障率分解为其独立失效故障率和共因失效故障率 2 部分。

假设 X_1 、 X_2 和 X_3 串联构成一个共因失效组 Y , 部件的正常和故障对应概率分布的 0 和 1。图 4 为共因失效组 Y 的贝叶斯网络模型。图 4 中, x_1 、 x_2 、 x_3 分别对应 X_1 、 X_2 、 X_3 的独立失效因子, x_{12} 、 x_{13} 、 x_{23} 为 2 变量共因失效因子, x_{123} 为 3 变量共因失效因子。

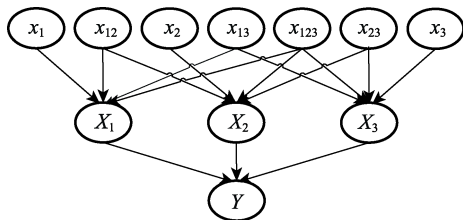


图 4 考虑共因失效的 3 部件串联系统的 BN 模型
Fig.4 BN model of three component series system considering common cause failure

2 自动步枪的可靠性分析

2.1 自动步枪系统及其故障树模型

以某型号自动步枪为例,其全寿命周期内,卡壳和卡弹故障占据故障总数的 70%以上。因此,在考虑自动步枪系统及其故障树模型时,主要考虑自动步枪的刚性抛壳机构和弹匣供弹机构。

影响自动步枪刚性抛壳机构可靠性的因素很多,从设计制造角度来看,拉壳钩和抛壳挺的位置关系决

定了弹壳和抛壳挺的叠合量以及弹壳抛出的初始状态,直接影响到抛壳的可靠性。此外,抛壳不合理的抛壳窗位置和迎弹面角度导致抛出弹壳与抛壳窗撞击点位置的一致性差,抛壳路线的一致性下降,同时也增加了弹壳与抛壳窗撞击点接近弹壳口部而导致弹壳被撞回机匣内的风险。从使用因素角度来看,拉壳钩簧弹性疲劳簧力不足和抛壳挺的磨损或变形会导致弹壳被抽出后运动不平稳,与抛壳挺碰撞的随机性增大,容易产生抛壳无力等不利因素。

类似地,对于弹匣供弹机构,从设计制造角度来看,弹匣形状不合理会导致枪弹在弹匣内的初始定位不准确,无法保证线接触。弹匣与枪弹或托弹板初始间隙过小,供弹阻力偏大。从使用因素角度来看,复进簧和托弹簧的弹性疲劳簧力不足是导致供弹可靠性降低的重要原因。

特种环境对于自动步枪动作可靠性的影响机制体现在以下几个方面。

1) 高低温环境通过影响内弹道过程的膛压曲线分布改变了自动机的最大后坐速度,高温环境下的润滑脂挥发以及低温环境下的润滑脂黏度降低,都会导致运动部件的摩擦阻力增大,材料由于高低温产生的热胀冷缩会改变间隙的大小。

2) 扬尘、浸河水环境下,由于泥沙、尘土等杂质进入枪械内部,使弹底窝和弹壳底部、导轨和自动机的间隙发生变化,影响了抱弹的确实性和运动平顺性。泥沙和尘土的附着也会改变运动副表面的摩擦系数、阻尼系数和碰撞恢复系数等力学参数。

3) 盐雾环境会加速金属零件的锈蚀,改变运动副表面的力学参数,在增加运动件等效质量的同时,使运动副性能衰退。

通过以上讨论,建立自动步枪系统故障树模型,如图 5 所示。底事件 X_1 — X_{13} 可作为二状态事件处理,即仅有不合理产生故障状态(定义为 0)和合理不会产生故障状态(定义为 1)。

2.2 环境影响因子的引入

共因失效组的确定是进行含共因失效系统可靠性分析的基础,需要遵循部件功能的相同性或相关性,以及部件工作环境的相同性原则。对于自动步枪系统来说,特种环境同时从火药动力偏差以及自动机运动能量耗散等多个方面影响系统的可靠性,抛壳速度 X_5 和抱弹确实性 X_6 虽然具有不同的失效机理,但从环境影响的角度来看具有相同的失效原因。因此,将自动步枪系统故障树模型中环境因素下的 X_5 和 X_6 作为系统的一组共因失效组 $CCF_1(c_1, c_2)$ 处理, X_{11} 、 X_{12} 和 X_{13} 作为系统中另一组共因失效组 $CCF_2(c_3, c_4, c_5)$ 处理。其中 c_1 和 c_2 表示 X_5 和 X_6 的失效概率, c_3 — c_5 表示 X_{11} — X_{13} 的失效概率。

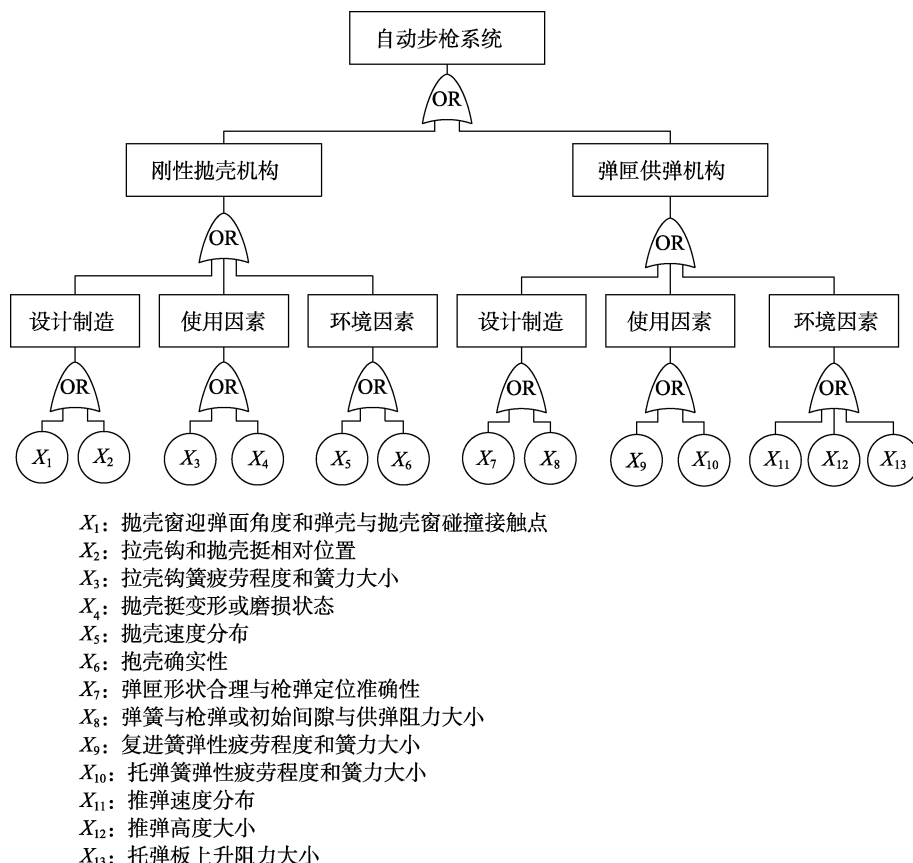


图5 自动步枪系统故障树模型

Fig.5 Fault tree model of an automatic rifle system

为了在建模中体现环境因素对于自动步枪系统可靠性的影响,引入环境影响因子对共因失效组中的共因失效部件进行故障率分解。假设共因失效率是单个组件失效率的线性组合,将环境影响因子定义为该线性变换的系数矩阵,即由失效率为 $c_1 \sim c_m$ 的 m 个组件组成的 m 阶共因失效组,其对应的各阶环境失效因子满足式(1)。

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= \beta_{c_1}^e \lambda_1 \\
 \lambda_{12} &= \beta_{c_1}^e \lambda_1 + \beta_{c_2}^e \lambda_2 \\
 &\dots \\
 \lambda_{123\dots m} &= \beta_{c_1}^e \lambda_1 + \beta_{c_2}^e \lambda_2 + \dots + \beta_{c_m}^e \lambda_m
 \end{aligned} \quad (1)$$

将共因失效组 S_1 的故障率分解为 X_5 和 X_6 的独立失效概率 λ_1/λ_2 和共因失效概率 λ_{12} , 共因失效组 S_2 的故障率分解为 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{13} 的独立失效概率 $\lambda_3/\lambda_4/\lambda_5$ 、两两共因失效概率 $\lambda_{34}/\lambda_{35}/\lambda_{45}$ 和全部失效概率 λ_{345} 。

2.3 考虑环境因素的自动步枪系统贝叶斯网络

根据自动步枪系统故障树模型,分别建立不考虑和考虑环境共因失效影响的自动步枪系统贝叶斯网络,如图6所示。

不考虑环境共因失效时,对于子系统 Y_3 ,通过贝叶斯网络计算得到 Y_3 的可靠度表达式为:

$$R_{Y_3} = R_{A_1} R_{A_2} \quad (2)$$

考虑环境共因失效时,共因失效组 CCF_1 由2个独立失效因子 (λ_1 、 λ_2 、 λ_3) 和1个环境失效因子 (λ_{12}) 串联,此时共因失效组 CCF_1 的可靠度可以表达为:

$$R_{CCF_1} = R_{A_1} R_{A_2} R_{\lambda_{12}} \quad (3)$$

不考虑环境共因失效时,通过贝叶斯网络计算得到 Y_6 的可靠度表达式为:

$$R_{Y_6} = R_{A_3} R_{A_4} R_{A_5} \quad (4)$$

考虑环境共因失效时,共因失效组 CCF_2 由3个独立失效因子 (λ_3 、 λ_4 、 λ_5)、3个2阶环境失效因子 (λ_{34} 、 λ_{35} 、 λ_{45}) 和1个3阶失效因子 (λ_{345}) 串联,此时共因失效组 CCF_2 的可靠度可以表达为:

$$R_{CCF_2} = R_{\lambda_3} R_{\lambda_{34}} R_{\lambda_4} R_{\lambda_{35}} R_{\lambda_{345}} R_{\lambda_{45}} R_{\lambda_5} \quad (5)$$

3 考虑环境因素的自动步枪可靠性算例分析

依据某型号自动步枪的历次失效故障数据的统计分析,给出不受共因失效影响的底事件失效概率,见表1。

给出共因失效组 CCF_1 和 CCF_2 中底事件的独立失效概率及其对应的环境影响因子,按照式(1)计算得到环境共因失效概率的具体结果见表2。

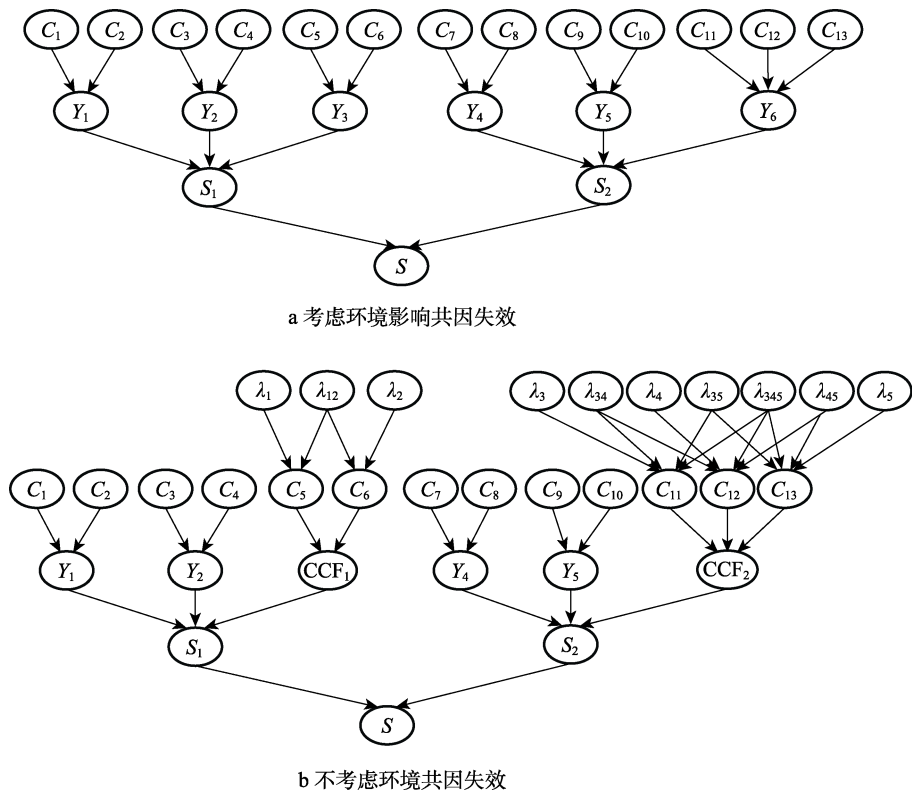


图 6 自动步枪系统贝叶斯网络
Fig.6 Bayesian network of an automatic rifle system: a) considering environmental CCF; b) not considering environmental CCF

表 1 部件或子系统的失效率		
Tab.1 Failure rate of components or subsystems		
部件或子系统		失效率
Y_1	c_1	0.000 004
	c_2	0.000 003
Y_2	c_3	0.000 001
	c_4	0.000 001 5
Y_4	c_7	0.000 003
	c_8	0.000 002
Y_5	c_9	0.000 002 5
	c_{10}	0.000 001

假设各底事件的失效服从以自动步枪射弹量为参数的指数分布, 考虑到自动步枪的实际使用和寿命情况, 取 $N=10\,000$ 。以共因失组 CCF_1 和 CCF_2 为研究对象, 利用图 6 所示的贝叶斯网络分别计算考虑环境因素和不考虑环境因素时部件或子系统的可靠度, 结果见表 3。

由表 3 可知, 不考虑环境因素影响时, CCF_1 和 CCF_2 的 Y_3 和 Y_6 的可靠度均为 94.18%; 考虑环境因素影响时, 共因失效组的可靠度分别为 91.58%、89.14%, 相较于不考虑环境因素时分别下降 2.76% 和 5.35%。进一步考虑系统的可靠度指标, 不考虑环境因素影响时, 系统的可靠度为 74.08%; 考虑环境因素影响时系统可靠度为 68.18%, 可靠度下降了 8.1%。

表 2 共因失效组的失效率计算结果				
Tab.2 Failure rate calculation results of CCF groups				
共因失效组		独立失效率	环境影响因子	环境共因失效率
CCF_1	c_5	$\lambda_1=0.000\ 004$	$\beta_{12}^e=[0.4,0.6]$	$\lambda_{12}=0.000\ 002\ 8$
	c_6	$\lambda_2=0.000\ 002$		
CCF_2	c_{11}	$\lambda_3=0.000\ 003$	$\beta_{34}^e=[0.2,0.4]$	$\lambda_{34}=0.000\ 001$
	c_{12}	$\lambda_4=0.000\ 001$	$\beta_{35}^e=[0.2,0.3]$	$\lambda_{35}=0.000\ 001\ 2$
	c_{13}	$\lambda_5=0.000\ 002$	$\beta_{45}^e=[0.3,0.4]$	$\lambda_{45}=0.000\ 001\ 1$
			$\beta_{345}^e=[0.2,0.4,0.6]$	$\lambda_{345}=0.000\ 002\ 2$

表 3 $N=1\ 000$ 时共因失效部件或子系统的可靠度计算结果
Tab.3 Reliability calculation results of CCF components or subsystems when $N=1\ 000$

共因失效组	不考虑环境因素		考虑环境因素	
	部件或子系统	可靠度	部件或子系统	可靠度
CCF1	c_5	0.960 789 439	c_5	0.960 789 439
	c_6	0.980 198 673	c_6	0.980 198 673
	Y_3	0.941 764 534	c_5/c_6	0.972 388 367
			Y_3	0.915 760 877
CCF2	c_{11}	0.970 445 534	c_{11}	0.970 445 534
	c_{12}	0.990 049 834	c_{12}	0.990 049 834
	c_{13}	0.980 198 673	c_{13}	0.980 198 673
	Y_6	0.941 764 534	c_{11}/c_{12}	0.990 049 834
			c_{11}/c_{13}	0.988 071 713
			c_{12}/c_{13}	0.989 060 279
			$c_{11}/c_{12}/c_{13}$	0.978 240 235
			Y_6	0.891 366 144

4 结论

本文运用故障树和贝叶斯网络对考虑环境因素的自动步枪系统可靠性进行了研究,得出以下结论:

1) 采用故障树与贝叶斯网络相结合的方法进行可靠性分析具有一定的方法论优势,故障树较为直观,易于进行故障原因分析和归零,而贝叶斯网络能够根据底事件的失效概率高效计算系统的可靠度。

2) 结合自动步枪的抛壳机构和供弹机构的组成和工作环境影响,进行系统可靠性分析时,考虑由环境因素带来的共因失效效应更为符合实际情况。

3) 对系统中的共因失效组进行可靠性分析,不考虑共因失效效应时往往会高估子系统的可靠度,从系统层面来看,环境因素的影响会使系统可靠度下降 8.1%。

参考文献:

- [1] 白俊敏,董富强,曾妍.轻武器寿命可靠性模型研究[J].火力与指挥控制,2016,41(3):166-169.
BAI Jun-min, DONG Fu-qiang, ZENG Yan. Research on the Reliability Model of Light Weapons Life[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(3): 166-169.
- [2] 柳吉龄,闫培新,任意,等.枪械可靠性试验统计方案与参数估计研究[J].火力与指挥控制,2019,44(11):186-191.
LIU Ji-ling, YAN Pei-xin, REN Yi, et al. Research on Statistical Scheme and Parameter Estimation of Firearms Reliability Test[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(11): 186-191.
- [3] 张俊斌,马力.枪械环境适应性试验可靠性评定方法的研究[J].轻兵器,1998(2):15-18.
ZHANG Jun-bin, MA Li. Study on Reliability Evaluation Method of Gun Environmental Adaptability Test[J]. Small Arms, 1998(2): 15-18.
- [4] 曹伟.某自动步枪典型故障可靠性分析及研究[D].南京:南京理工大学,2018.
CAO Wei. Reliability Analysis and Research on Typical Faults of an Automatic Rifle[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [5] 王亚平,徐诚,宋梅利.机构变参数设计与动作可靠性分析的一种新方法[J].南京理工大学学报(自然科学版),2002,26(5):449-452.
WANG Ya-ping, XU Cheng, SONG Mei-li. A New Method of the Variant Parametric Design and the Motion Reliability Analysis of the Mechanism[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2002, 26(5): 449-452.
- [6] 王亚平,聂宏,王永娟.步枪三发点射机构的运动可靠性研究[J].南京理工大学学报(自然科学版),2008,32(6):686-689.
WANG Ya-ping, NIE Hong, WANG Yong-juan. Motion Reliability of Rifle's Three-Shot Burst Mechanism[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2008, 32(6): 686-689.
- [7] 邹衍,徐诚,罗少敏,等.自动步枪刚性抛壳可靠性分析与设计方法研究[J].兵工学报,2017,38(2):209-217.
ZOU Yan, XU Cheng, LUO Shao-min, et al. Study of Rigid Ejection Reliability Analysis and Design Method of Automatic Rifle[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(2): 209-217.
- [8] 袁克斌,方峻.考虑环境因素影响下某机枪抛壳可靠性分析[J].兵器装备工程学报,2021,42(4):80-85.
YUAN Ke-bin, FANG Jun. Reliability Analysis of a Machine Gun Cartridge Case Ejection Considering Environmental Factors[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(4): 80-85.
- [9] 张连文,郭海鹏.贝叶斯网引论[M].北京:科学出版

- 社, 2006.
- ZHANG Lian-wen, GUO Hai-peng. Introduction to Bayesian networks[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [10] 尹晓伟, 钱文学, 谢里阳. 基于贝叶斯网络的系统可靠性共因失效模型[J]. 中国机械工程, 2009, 20(1): 90-94.
- YIN Xiao-wei, QIAN Wen-xue, XIE Li-yang. Common Cause Failure Model of System Reliability Based on Bayesian Networks[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(1): 90-94.
- [11] 李志强, 徐廷学, 安进, 等. 冗余系统共因失效动态贝叶斯网络建模[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 190-198.
- LI Zhi-qiang, XU Ting-xue, AN Jin, et al. Common Cause Failure Modeling for Redundant System Based on Dynamic Bayesian Network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 190-198.
- [12] 赵峰, 刘荣峥, 梁丽, 等. 基于贝叶斯网络融合共因失效的接触网系统可靠性分析[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(5): 61-67.
- ZHAO Feng, LIU Rong-zheng, LIANG Li, et al. Reliability Analysis of Catenary System Based on Bayesian Network with Fusion of Common Cause Failure[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(5): 61-67.
- [13] 刘洋, 王佳, 江泳, 等. 基于故障树-蒙特卡洛的输电可靠性设计[J]. 电子设计工程, 2022, 30(6): 95-99.
- LIU Yang, WANG Jia, JIANG Yong, et al. Transmission Reliability Design Based on Fault Tree-Monte Carlo[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(6): 95-99.
- [14] 陈晨. 基于故障树分析法的航空运输中隐含危险品安全风险研究[J]. 民航学报, 2022, 6(2): 1-4.
- CHEN Chen. Research on Safety Risk of Hidden Dangerous Goods in Air Transportation Based on Fault Tree Analysis[J]. Journal of Civil Aviation, 2022, 6(2): 1-4.
- [15] 王慧明, 张严林, 许茹悦. 基于故障树分析的直升机助力器卡滞故障诊断[J]. 新技术新工艺, 2022(1): 76-80.
- WANG Hui-ming, ZHANG Yan-lin, XU Ru-yue. Fault Diagnosis of Helicopters Booster Binding Based on Fault Tree Analysis[J]. New Technology & New Process, 2022(1): 76-80.
- [16] 刘昆, 纵帅, 王加夏, 等. 基于模糊故障树和贝叶斯网络的FPSO碰撞风险分析方法研究[J]. 船舶力学, 2022, 26(4): 574-583.
- LIU Kun, ZONG Shuai, WANG Jia-xia, et al. Collision Risk Analysis Method of Deepwater General FPSO Based on Fuzzy Fault Tree and Bayesian Network[J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(4): 574-583.
- [17] BOBBIO A, PORTINALE L, MINICHINO M, et al. Improving the Analysis of Dependable Systems by Mapping Fault Trees into Bayesian Networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 71(3): 249-260.
- [18] 王鹏, 孙紫荆, 张帆, 等. 考虑概率型共因失效的多阶段任务系统可靠性分析模型[J/OL]. 系统工程与电子技术: 1-15[2022-04-30].
- WANG Peng, SUN Zi-jing, ZHANG Fan, et al. Reliability Analysis Model of Multistage Mission System Considering Probabilistic Common Cause Failure[J/OL]. Systems Engineering and Electronic Technology: 1-15 [2022-04-30].
- [19] 张振海, 王悦榕, 党建武. 考虑共因失效的列控车载子系统可靠性分析[J]. 铁道学报, 2021, 43(9): 63-70.
- ZHANG Zhen-hai, WANG Yue-rong, DANG Jian-wu. Reliability Analysis of Onboard Subsystem of Train Control System Considering Common Cause Failure[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(9): 63-70.
- [20] 王双川, 贾希胜, 胡起伟, 等. 考虑随机共因失效的战时合成部队任务成功概率仿真评估[J]. 兵工学报, 2021, 42(1): 199-208.
- WANG Shuang-chuan, JIA Xi-sheng, HU Qi-wei, et al. Simulation Evaluation of Mission Success Probability of Synthetic Forces during Wartime Considering Random Common Cause Failure[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(1): 199-208.
- [21] 杨化动, 史宗杰. 基于共因失效的多态系统灰色贝叶斯网络可靠性分析模型[J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(5): 390-394.
- YANG Hua-dong, SHI Zong-jie. Grey Bayesian Network Model for Reliability Analysis of Multi-State Systems Based on Common Cause Failure[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2020, 18(5): 390-394.
- [22] 王博文, 谢里阳, 樊富友, 等. 考虑共因失效的折叠翼展开机构可靠度分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(5): 161-171.
- WANG Bo-wen, XIE Li-yang, FAN Fu-you, et al. Reliability Analysis of Folding Wing Deployable Mechanism Considering Common Cause Failure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(5): 161-171.

责任编辑: 刘世忠