

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.07.008

# 基于贝叶斯网络的导弹武器系统人因故障定量分析

王君, 蔡伟

(第二炮兵工程大学二系 202 室, 西安 710025)

**摘要:** 为提高导弹武器系统的安全性, 在确定影响号手操作因素的基础上, 建立导弹武器系统人因故障分析的贝叶斯网络模型。介绍贝叶斯网络, 探讨人因失误的影响因素与机理, 通过实例分析, 结合专家经验知识对装备人因故障的概率进行建模与评估。结果表明: 该分析方法求解获得的装备人误故障概率与装备统计数据符合性良好, 提出的量化评估模型正确有效。

**关键词:** 导弹武器系统; 贝叶斯网络; 定量分析; 人因故障

**中图分类号:** TJ760.6 **文献标志码:** A

## Quantitative Human Faults Analysis of Missile Weapon System Based on Bayesian Network

Wang Jun, Cai Wei

(No. 202 Room, No. 2 Department, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** To improve safety of missile weapon systems, and based on ascertaining affecting factors of human operating, establish human fault analysis model of missile weapon system based on Bayesian network. Introduce Bayesian network, discuss the human fault influence factor and mechanism. Through example analysis, combine expert experience and knowledge to establish model and evaluate equipment human fault probability. The result shows that the human fault probability and equipment statistic data were conform by analysis method. The quantitative evaluation model is correct and effective.

**Key words:** missile weapon system; Bayesian network; quantitative analysis; human faults

### 0 引言

虽然现代大规模人一机系统自动化的程度大幅提高, 但归根到底还要由人来控制操作、维修以及决策, 人因事故已是最主要的事源之一。据统计, 70%~85%的飞行事故出于各类人员的失误<sup>[1]</sup>, 在导弹武器系统中, 由人引起的失误约占60%~70%<sup>[2]</sup>。由于导弹地面设备接口繁多、操作复杂、号手间协作环节多、恶劣且紧张的作业环境导致人为误操作发生概率居高不下, 如何通过人因可靠性分析, 降低误操作所造成的危害, 已成为亟待解决的问题。

近十几年发展起来的贝叶斯网络 (Bayesian network, BN), 由于具有坚实的数学理论基础, 被认为是不确定环境中实现知识表示、推断、预测等最理想的工具, 已在数据挖掘、故障诊断、图像识别、可靠性工程等领域得到了较好的应用<sup>[3]</sup>。在人因可靠性评价方面, 贝叶斯网络技术已经被大量采用<sup>[4-6]</sup>, 但在导弹武器系统领域的应用相对较少。因此, 笔者在确定影响号手操作因素的基础上, 建立了导弹武器系统人因故障分析的贝叶斯网络模型,

对人因故障进行研究与评估, 为如何提高导弹武器系统的人因安全性提供理论支持。

### 1 贝叶斯网络

贝叶斯网络是一个有向无环图 (directed acyclic graph, DAG)<sup>[7]</sup>, 由代表变量的节点及连接这些节点的有向边构成。图 1 给出了一个简单的 6 个节点的贝叶斯网络示例, 其中未包含条件概率分布 (conditional probabilities distribution, CPD)。

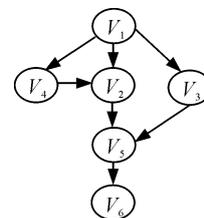


图 1 一个简单的贝叶斯网络

一个具有  $N$  个节点的贝叶斯网络可用  $N = \langle \langle V, E \rangle, P \rangle$  来表示, 其中包括网络结构和网络参数 2 部分:

1)  $\langle V, E \rangle$  表示一个具有  $N$  个节点的有向无环图

收稿日期: 2012-02-22; 修回日期: 2012-03-20

作者简介: 王君 (1987—), 男, 山东人, 硕士研究生, 从事自动检测与故障诊断研究。

G. 图中的节点  $V=\{V_1, \dots, V_n\}$  代表变量, 节点的有向边  $E$  代表了变量间的关联关系。节点变量可以是任何问题的抽象, 如部件状态、观测值、人员操作等。通常认为有向边表达了一种因果关系, 因而贝叶斯网络也称因果图。对于有向边  $(V_i, V_j)$ ,  $V_i$  称为  $V_j$  的父节点, 而  $V_j$  称为  $V_i$  的子节点。没有父节点的节点称为根节点, 没有子节点的节点称为叶节点。 $V_i$  的父节点集合和非后代节点集合分别用  $Pa(V_i)$  和  $A(V_i)$  来表示。有向图中蕴含了条件独立性假设, 即在给定  $Pa(V_i)$  下,  $V_i$  和  $A(V_i)$  条件独立:

$$P(V_i|Pa(V_i), A(V_i)) = P(V_i|Pa(V_i)) \quad (1)$$

2) P 表示一个与每个节点相关的条件概率分布 (conditional probabilities distribution, CPD)。由贝叶斯网络的条件独立性假设可知, 条件概率分布可用  $P(V_i|Pa(V_i))$  来表述, 它表达了节点与其父节点的关联关系。如果给定根节点的条件概率分布, 可以得到包含所有节点的联合概率分布:

$$P(V) = P\{V_1, \dots, V_n\} = \prod_{i=1}^n P(V_i|V_1, \dots, V_{i-1}) \quad (2)$$

## 2 导弹武器系统的人因故障评估模型

### 2.1 人因故障原因分析

轨迹交叉的事故致因理论认为<sup>[8-9]</sup>, 事故的发生是由于人的不安全行为和物的不安全状态在各自发展过程(轨迹)中, 在同一时空发生了接触(交叉)所造成的。其中武器装备的容错性能, 即物的不安全状态不是文中研究的重点。

导弹武器系统的特点是分系统、仪器设备众多, 技术复杂, 状态变化快而且大。导弹的设计、生产、使用与维修工作, 需要诸多号手的密切配合<sup>[10]</sup>。操作号手越多, 任务越复杂, 发生人因失误的可能性就越大, 特殊条件下更是如此。实弹发射过程, 号手在思想高度集中而又高度紧张的条件下进行操作, 因而更容易发生人因失误。

根据人的行为原理, 惠特森建立了人因失误模型(如图 2 所示)<sup>[11]</sup>, 把人失误的原因归结为过负荷、决策失误和人机学原因 3 个方面。

通过与专家探讨交流, 误操作的发生是号手产生失误倾向和把关人员失职共同作用的结果; 而诱发号手失误倾向的因素参照人因失误模型可归结为: 侥幸心理和疏忽大意(决策失误); 操作技能不高和人机界面设计缺陷(人机学原因); 号手过度紧张, 疲劳和环境因素(过负荷)等。

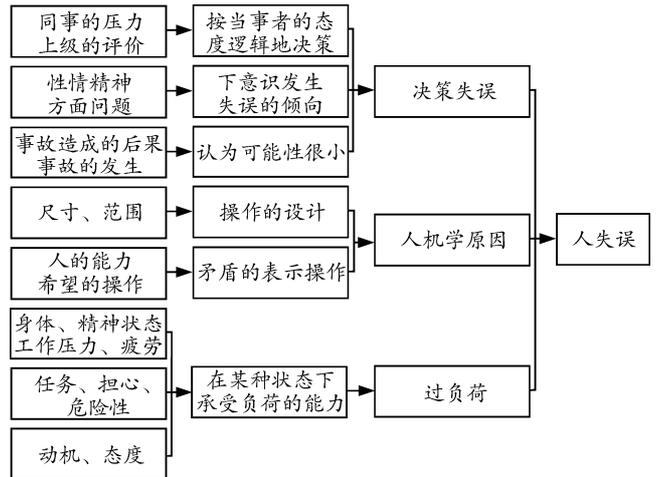


图 2 惠特森的人因失误模型

### 2.2 人因故障模型的建立

针对导弹人因故障, 建立的 4 层贝叶斯网络如图 3 所示。

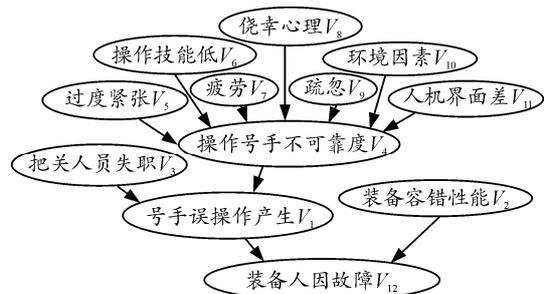


图 3 导弹人因故障分析的贝叶斯网络

图 3 中,  $V_2, V_3, V_5, V_6, V_7, V_8, V_9, V_{10}, V_{11}$  均为根节点。假定  $V_i$  的优劣程度为  $P(V_i)$ ,  $P(V_i) \in [0, 1]$ , 其数值越大, 表明该因子越危险。

为方便研究, 笔者作如下假设:

1) 导弹武器系统人因故障与号手误操作的发生、号手误操作的发生与号手可靠性降低均为高相关关系;

2) 任一号手产生误操作的影响因素 ( $V_5 \sim V_{11}$ ) 均可诱发号手误操作, 导致其不可靠, 由此号手不可靠的条件影响函数  $F(V_4 | \bar{V}_5, \dots, V_i, \dots, \bar{V}_{11}) (i=5 \sim 11)$

表达式为

$$F(V_4 | \bar{V}_5, \dots, V_i, \dots, \bar{V}_{11}) = \left[ 1 - \prod_{i=5}^{11} [1 - F(V_4 | V_i)] \right] \cdot P(V_4) \quad (3)$$

式中  $F(V_4 | \bar{V}_5, \dots, V_i, \dots, \bar{V}_{11})$  表示影响条件的叠加, 即因素  $V_5, V_6, V_7, V_8, V_9, V_{10}, V_{11}$  同时影响了  $V_4$ 。

3) 假设理想条件下, 导弹武器系统的不可靠度

为 0.4, 保守估计  $P(V_{12})=0.4$ 。

根据贝叶斯网络理论, 某一误操作导致导弹故障的概率  $P$  的表达式为

$$P = P(V_{12}) \cdot F(V_{12} | V_2) \cdot F(V_{12} | V_1 | V_3, V_4 | \bar{V}_5, \dots, \bar{V}_i, \dots, \bar{V}_{11}) \quad (4)$$

其中,  $i=5 \sim 11$ 。

这样, 式 (4) 即为基于贝叶斯网络的导弹武器系统人因故障分析的定量评估模型。

贝叶斯网络建立后, 须量化如  $F(V_{12} | V_2)$  的条件影响函数, 用以表示各因素之间的影响关系。图 3 中, 各节点间存在着一定的关联性, 按照 HRA 手册提供的方法, 在给定 A 任务失败后的条件下, B 任务的条件下失败概率, 可按以下不同的公式计算<sup>[12-13]</sup>。

全相关 (CD):

$$P(B|A)=1 \quad (5)$$

高相关 (HD):

$$P(B|A)=\frac{1+P(A)}{2} \quad (6)$$

中相关 (MD):

$$P(B|A)=\frac{1+6P(A)}{7} \quad (7)$$

低相关 (LD):

$$P(B|A)=\frac{1+19P(A)}{20} \quad (8)$$

零相关 (ZD):

$$P(B|A)=P(B) \quad (9)$$

得到条件影响函数后, 还需要获取贝叶斯网络中根节点 (如图 3 中  $V_3$ ) 的失效概率。可用于计算差错概率的数据来源有多种, 如通用数据、专家数据和仿真数据等, 将差错概率和条件影响函数进行相应的数学计算, 即可求得导弹人因故障的概率。

### 3 实例分析

#### 3.1 事件选取

笔者分别选取 2 名操作号手为研究对象。经过前期对某型导弹武器系统故障的梳理, 操作号手 a 的常见误操作是插头连接错误, 导致台腿不能正常收回; 操作号手 b 的常见误操作是计算机菜单选择错误, 平台始终无法正常调平, 导致发射进程受阻。

#### 3.2 概率计算

图 3 建立的是一般导弹武器系统的人因故障分析贝叶斯网络, 由于导弹武器系统人因可靠性研究成果较少, 相关因素的通用数据无从查证, 对具体的操作号手而言, 错误操作导致故障的因素又不尽相同, 笔者采用调查问卷的方式, 将获得的数据作为根节点的故障概率。

调查问卷的对象是在导弹发射与控制专业具有较高声望和权威的专家, 对贝叶斯网络中的各个根节点的危险程度 (分为高、中、低、微 4 个等级) 作出估计, 按照表 1 的对应转化关系, 将定性评估转化为定量计算所需数据。

表 1 危险程度的数据设定

危险程度	数值区间	数据设定	危险程度	数值区间	数据设定
高	0.75~0.95	0.850	低	0.25~0.5	0.375
中	0.5~0.75	0.625	微	0.05~0.25	0.150

号手 a 插头连接错误 (网络 1) 和号手 b 计算机菜单选择错误 (网络 2) 导致装备故障的根节点评估结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 专家组对网络 1 根节点的评估表

根节点指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6	均值	结论
$V_2$	高	高	低	中	中	中	0.658 3	中
$V_3$	中	高	高	高	高	高	0.812 5	高
$V_5$	高	中	高	高	高	高	0.812 5	高
$V_6$	中	中	高	中	中	低	0.620 8	中
$V_7$	低	低	低	低	中	低	0.454 2	低
$V_8$	中	低	微	微	低	低	0.341 7	低
$V_9$	中	中	中	中	高	高	0.700 0	中
$V_{10}$	低	低	中	中	中	中	0.500 0	低
$V_{11}$	中	中	高	中	高	高	0.737 5	中

表 3 专家组对网络 2 根节点的评估表

根节点指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	均值	结论
$V_2$	低	高	高	低	高	0.660 0	中
$V_3$	中	低	低	高	中	0.570 0	中
$V_5$	高	高	中	高	高	0.805 0	高
$V_6$	中	中	中	中	中	0.625 0	中
$V_7$	中	高	中	中	低	0.620 0	中
$V_8$	低	低	低	中	微	0.380 0	低
$V_9$	中	中	高	高	中	0.715 0	中
$V_{10}$	微	微	微	微	微	0.150 0	微
$V_{11}$	低	低	低	中	中	0.475 0	低

将根节点的专家估计值代入对应的条件影响函数, 根节点的危险程度与条件影响函数一一对应, 由此可分别得到 2 个贝叶斯网络的中间节点的条件影响因子, 如表 4 和表 5 所示。

表 4 网络 1 的中间节点条件影响因子

指标	评估值	指标	评估值	指标	评估值
$F(V_1   V_3)$	0.906 2	$F(V_4   V_9)$	0.742 8	$F(V_4   V_7)$	0.481 5
$F(V_4   V_5)$	0.906 2	$F(V_4   V_{11})$	0.775 0	$F(V_4   V_8)$	0.374 6
$F(V_4   V_6)$	0.675 0	$F(V_{12}   V_2)$	0.707 1	$F(V_4   V_{10})$	0.525 0

表 5 网络 2 的中间节点条件影响因子

指标	评估值	指标	评估值	指标	评估值
$F(V_1   V_3)$	0.631 4	$F(V_4   V_9)$	0.755 7	$F(V_4   V_7)$	0.674 3
$F(V_4   V_5)$	0.902 5	$F(V_4   V_{11})$	0.501 2	$F(V_4   V_8)$	0.411 0
$F(V_4   V_6)$	0.678 6	$F(V_{12}   V_2)$	0.708 6	$F(V_4   V_{10})$	0.000 0

假设号手不可靠,同时又发生把关人员失职时,必然导致人为误操作的发生,即  $P(V_1)=1$ ;文献[6]中,采用 Bayes 信息融合的人为差错概率计算方法,得到人为差错概率为 0.027 1,笔者假定一般状况下  $P(V_4)=0.027 1$ 。将表 4 和表 5 中的计算结果分别代入式 (3) 和 (4) 中,得到号手 a 插头连接错误和号手 b 计算机菜单选择错误导致装备故障的概率  $P_1$  与  $P_2$ ,如表 6 所示。

表 6 算例的导弹人因故障概率

项目	号手 a	号手 b
$F(V_{12}   V_1   V_3, V_4   \bar{V}_5, \dots, V_i, \dots, \bar{V}_{11})$	0.732 7	0.622 1
$P_i$	0.207 0	0.188 0

### 3.3 结果分析

2 个实例的故障概率值  $P$  约为 20%,发生概率比较高,对导弹武器系统的安全性构成较大威胁。从表 2 和表 3 调查问卷结果分析,号手过度紧张、疏忽大意、把关人员失职和人机界面设计缺陷是导致事故的重要原因,应该采取相应措施降低导弹人因故障的概率。从号手和把关人员方面改进,就是要增强其心理素质,训练过程中不紧张、不慌乱,并按照工位有针对性地加强训练,对操作难点重点进行反复强化,使其不但要掌握如何操作、如何把关,更要理解工作原理。从人机界面方面改进,就是要做好设计和训练 2 步工作,人机界面的设计应遵循“机宜人”的原则,即保证人机界面设计合理,符合号手的人体尺寸和生理、心理特性要求,以便于完成各种操作和控制;对已经列装的武器,应依据“机宜人”的原则,对号手实施充分训练,使其熟练地掌握获取有关信息和执行操作的程序、方法

和技巧。

## 4 结论

笔者运用了贝叶斯理论建立了导弹人因故障分析网络,分别以 2 种典型误操作导致故障为研究对象进行了评估和分析。算例结果表明:该方法能够将人因失误因素作为带有概率分布的节点,利用其清晰的网络结构,通过推理计算求出人因失误导致装备故障的概率,评价过程中减少了主观因素的影响,准确性较高,对导弹武器系统效能评估具有良好的借鉴作用。

## 参考文献:

- [1] 周传祥. 载人航天中的人员可靠性问题及研究进展[J]. 中国航天, 2000(12): 34-38.
- [2] 李青, 潘旭峰, 辜益山. 导弹保障人员可靠性研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2003(3): 15-18.
- [3] 周忠宝, 董豆豆, 周经伦. 贝叶斯网络在可靠性分析中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(6): 95-100.
- [4] 侯政良, 杨自春, 陈国宾. 基于贝叶斯网络的燃油控制系统人因安全性定量分析[J]. 燃气轮机技术, 2010, 23(4): 38-43.
- [5] 轩永波, 黄长强, 崔亮, 等. 基于贝叶斯网络的导弹系统人因可靠性分析[J]. 电光与控制, 2009, 16(8): 32-35.
- [6] 蒋英杰, 孙志强, 谢红卫. 基于 Bayes 信息融合的人为差错概率计算方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(4): 949-953.
- [7] 侯政良, 杨自春, 初珠立. 基于贝叶斯网络的船舶人因安全性评估模型[J]. 船舶工程, 2011, 33(1): 78-81.
- [8] 隋鹏程, 陈宝智, 隋旭. 安全原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 55.
- [9] 钱家庆. 怎样防止与控制电气误操作[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 43-52.
- [10] 韩锐. 导弹保障系统人因工程应用研究[J]. SCIENCE & TECHNOLOGY INFORMATION, 2010(7): 34-35.
- [11] 肖国清, 陈宝智. 人因失误的机理及其可靠性研究[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(1): 22-25.
- [12] 张力. 概率安全评价中人因可靠性分析技术研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2004.
- [13] 阎晨光, 蒲金云, 侯岳. 基于贝叶斯网络的 HRA 研究在舰船 PSA 中的应用[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2009, 23(5): 377-382.