

# 基于贝叶斯网络的飞行安全人因可靠性评估模型

刘莉, 徐浩军, 井凤玲, 孙作

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:**基于广义人-机-环境复杂系统,对飞行人员可靠性、空中交通管制人员可靠性和航空器维修人员可靠性进行了分析,综合考虑常用可靠性评估方法的优缺点,采用贝叶斯网络建立了飞行安全人因可靠性的评估模型。该模型综合运用诊断推理和支持推理形式,分析直观,计算简便,适用于广义的人-机-环境复杂系统建模;同时该模型可以根据后验概率来调整先验概率,从而有效地提高了评估的精度。

**关键词:**人-机-环境;飞行安全;人因可靠性;贝叶斯网络

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2009.03.002

**中图分类号:**V328 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2009)03-0005-05

随着航空技术的迅速发展,飞机的可靠性和安全性不断提高,导致飞行事故的人为因素与机械因素比例有了明显的变化。机械因素引起的飞行事故比例逐渐下降,而人为因素导致的飞行事故比例逐渐升高。在飞机使用的1-2年里,60%-75%的飞行事故由机械因素造成,12-14年后只有15%-30%的飞行事故是由机械因素造成的,70%-85%的飞行事故出于各类人员的操作错误<sup>[1-3]</sup>。

目前可用于研究航空领域中人员可靠性的数学模型及方法有广义人的可靠度函数、鲁克模型、人认知可靠性(HCR)计算模型、应力-强度模型以及马尔可夫过程方法等<sup>[4]</sup>,但是这些方法存在着以下不足之处<sup>[5]</sup>:①人的可靠性数据缺乏;②数据的量化过多依赖专家判断,无法对数据的可信性进行验证,使得预测的正确性和准确性受主观因素的影响;③方法的正确性和准确性难以验证;④对人的认知行为和心理处于探索和研究阶段,对组织管理的方法和态度、文化差异、社会背景等在处理方法上缺乏一致性和可比性。

基于此,本文提出基于贝叶斯网络的飞行安全人因可靠性评价方法,其关键在于建立一个贝叶斯网络的因果模型,直观地对人因可靠性作定量分析和定性分析,并找出影响人因可靠性的关键节点。

## 1 基于贝叶斯网络的人因可靠性评估算法

基于贝叶斯网络的飞行安全人因可靠性评估算法分为2部分:一是描述人因可靠性评估推理过程的贝叶斯网络,即推理模型;二是基于推理模型的人因可靠性评估算法。

### 1.1 推理模型

贝叶斯网络的理论基础是统计概率理论和图论,它用具有网络结构的有向图表达各个信息要素之间的关联关系,用条件概率表(Conditional Probabilities Table, CPT)表达各个信息要素之间的影响程度。

可以从定性和定量2个方面对模型进行分析。贝叶斯网络是一个有向无环图(DAG),其数学描述为 $L = \{DAG, CPT\}$ , DAG表示网络的结构,  $DAG = \{V, E\}$ ,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 代表网络中的节点变量集,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 表示节点中有联系的有向边的集合,每条边表示两节点间直接的依赖关系,终点节点依赖于始点

\* 收稿日期:2009-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60572172)

作者简介:刘莉(1976-),女,陕西高陵人,博士生,主要从事飞行安全评估研究;

E-mail:sunjiaoyue@sohu.com

徐浩军(1965-),男,浙江余姚人,教授,博士生导师,主要从事飞行安全评估与作战效能研究。

节点,依赖程度决定于条件概率;CPT是一组条件概率分布的集合,也称为节点概率表。贝叶斯网络建立在条件独立的假设上,遵照 Pearl 的观点,将联合概率分解为如下的乘积形式:

$$P(V) = \prod_{i=1}^n P(X_i | X_1, \dots, X_{i-1}) = \prod_{i=1}^n P(X_i | N_{\text{parent}}(X_i)) \quad (1)$$

式中: $P(V)$ 表示网络的联合概率分布; $N_{\text{parent}}(X_i)$ 表示节点 $X_i$ 的父节点。

基于贝叶斯网络的推理模型如图1所示。网络节点分为2类:假想(Hypothesis)节点( $H$ 节点)和事件(Event)节点( $E$ 节点)。假想节点表示人对某种事物的主观看法,事件节点表示在一定的时空范围内发生的客观事实。事件可分为2类,一类是可直接观测的,称为事件线索或事件征兆(Event Cue),另一类是不可直接观测的。

节点之间的有向联结表示假想之间、假想和事件之间以及事件之间的因果关系,采用条件概率矩阵描述两者之间的关联程度。考虑一个有向联结 $x-y$ ,其条件概率矩阵定义为: $M_{y|x}P(y|x)P(Y=y|X=x)$ 。

矩阵中的每一项 $P(y|x)$ 表示为: IF  $P(X=x) = p_x$ , THEN  $P(Y=y) = p_y$ 。

根据模型,可以从观测到的事件出发,逐层推理,最终得到假想的状态。推理过程中,所有节点的状态概率都是运用贝叶斯方法综合先验概率和条件概率获得的,模型能够保存节点每次更新的结果。显然,假想的最终状态不仅与现在最新获得的事件信息有关,而且与以前一个时间段内事件累积的结果有关。因此,基于贝叶斯网络的推理模型具有信息的时间累计功能,这种记忆功能是基于产生式规则的传统推理机制无法实现的。

## 1.2 推理机制

推理模型是根据先验信息构建的,当叶节点的状态概率分布不变时,网络保持平衡状态,一旦叶节点的状态根据观测信息改变时,整个网络中的节点都将根据 Pearl 的算法更新其状态概率分布。

本文采用树状贝叶斯网络作为推理模型,其结构特点为每个节点最多只有1个父节点。图2表示一个包含4个离散变量的贝叶斯网络:人的外部因素(节点因子 $H_{EF}$ )、人的内部因素(节点因子 $H_{IF}$ )、人的行为(节点 $H_A$ )及行为后果(节点 $H_C$ )4个节点变量。 $H_{EF}$ 及 $H_{IF}$ 是 $H_A$ 的父节点, $H_C$ 是人的 $H_A$ 的子节点。

在定量分析前,先简述符号标记和贝叶斯原理。如果在试验或评估前,对模型的参数有一定的了解,并知道其概率分布,此时称模型参数的概率分布 $\pi(\theta)$ 为先验分布。用 $P(\theta|x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示事件/样本 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 对模型参数 $\theta$ 的条件密度;该分布可以看作是模型参数 $\theta$ 在样本 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 条件下的分布,此时, $g(x_1, x_2, \dots, x_n|\theta)$ 相对于 $\pi(\theta)$ ,可以被看作是在经过样本 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 检验后得到的模型参数概率,一般 $g(x_1, x_2, \dots, x_n|\theta)$ 被称为后验分布。此时贝叶斯公式为:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n|\theta) = \frac{\pi(\theta)p(x_1, x_2, \dots, x_n|\theta)}{\int \pi(\theta)p(x_1, x_2, \dots, x_n|\theta)d\theta}$$

从上式可以看出,应用贝叶斯公式对参数 $\theta$ 的估计可以看作是在结合了新的样本数据 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 和参数 $\theta$ 的先验信息情况下,对参数 $\theta$ 的估计,估计的结果更具合理性。

对 $H_A$ 节点进行定量分析。在某给定的条件下,首先根据以前的资料、仿真模拟器或专家的评判得到人的行为模型 $\pi(H_A)$ ,此时 $\pi(H_A)$ 被当作先验信息,最新在仿真模拟器或专家评判得到的节点数据的概率模型记为 $P(H_{EF}, H_{IF}|H_A)$ ,认为节点 $H_{EF}, H_{IF}$ 的数据是在模型 $\pi(H_A)$ 得到的最新数据,此时应用贝叶斯公式,得到 $H_A$ 节点概率估计:

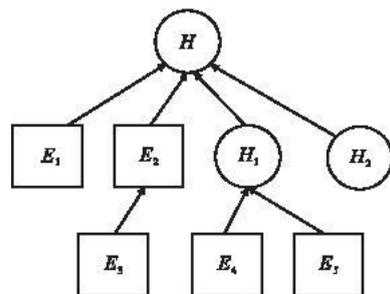


图1 基于贝叶斯网络的推理模型

Fig.1 Reasoning model based on bayesian networks



图2 用于人因分析的典型树状贝叶斯网络

Fig.2 Human factor analysis based on tree bayesian networks

$$g(H_{EF}, H_{IF} | H_A) = \frac{\pi(H_A)P(H_{EF}, H_{IF} | H_A)}{\int \pi(H_A)P(H_{EF}, H_{IF} | H_A) dH_A}$$

当节点  $H_{EF}$  和  $H_{IF}$  有数据更新时,应用上式就可以对节点作出最新的估计。当网络中任一节点数据有更新时,应用上述公式就可对整个网络节点进行更新,完成网络节点的最新估计。

当完成节点的概率计算后,在网络上标出条件概率表,逐级确定节点间的影响,最终确定哪一个节点对最后节点的影响大,并采取相应的改进措施。贝叶斯网络的推理难题之一是:当网络节点比较多时,其数据更新的计算量就成指数级数增加,也是通常所说的 NP 难题<sup>[6-7]</sup>。

### 1.3 人因可靠性模型

贝叶斯网络的人因可靠性分析模型(HRABN)是在参考了第一、二代人因可靠性分析模型和方法、应用贝叶斯网络对不确定性的推理和良好的层次图表示方式的基础上提出的一种新的概率分析模型。

在 HRABN 中,人的行为被当作是人的内部因子和人的外部因子共同作用的结果,人的内部因子节点可分解为多种因素。图 3 是一个简单的贝叶斯网络的人因可靠性分析/评价模型。该模型以图 2 为基础,把人的内部因子分解为身体状况节点、精神状态节点、能力节点等,人的能力状态节点可分解为经验/技能节点、学习能力节点、决策能力节点等。人的外部因子节点可分解为环境节点、事件节点、组织节点等。环境节点又可分解为人-机界面节点、操作空间节点等。每一层次的节点可以视实际情况进行分解或增加,直至找出最终的影响人的行为因子节点。



图 3 简单的 HRABN 层次示意图(未带条件概率表)  
Fig.3 Simple HRABN administrative - level sketch map (without conditional probabilities table)

当 HRABN 的结构图建立后,首先要根据人因可靠性数据建立各个节点的条件概率密度表及相应的概率分布函数,人因可靠性数据的获取可参看文献[8-9],当条件概率密度表和节点的模型参数的概率分布函数确定后,利用贝叶斯公式、贝叶斯推理理论和算法,求出人的行为节点的条件概率,其条件概率的数学期望与人的行为可靠性对应。根据人的行为的概率进一步推断其行为可能产生的后果。当内外因子的数据有改变或者更新时,根据贝叶斯推理理论,很容易对人的行为做出预测,并且,应用贝叶斯因子可进一步对整个模型的可信度进行定量分析。

## 2 基于贝叶斯网络的飞行安全人因可靠性评估模型

### 2.1 评估模型

针对传统的事件树、故障树方法在复杂系统分析中的局限性,人们在不断探索复杂系统可靠性评估的新方法。狭义的人-机-环境复杂系统在空中运动过程中,假设会遇到众多不利因素影响,经过操纵干预后发生风险的全过程是一个随机过程,因此应用马尔可夫状态转移链来描述这一过程<sup>[10]</sup>。贝叶斯网络能够描述事件多态性和非确定性逻辑关系,可广泛应用于安全性分析。采用贝叶斯网络可以综合运用诊断推理和支持推理形式,分析航空事故致灾因素的因果关系,揭示了人、机、环境与管理因素各个变量之间相互作用的内在规律,适合应用于广义的人-机-环境系统建模,具体网络模型见图 4。

对于输入变量,飞行过程中,随着飞行员操纵的不同,飞行安全的认知复杂性和物理复杂性是不同的,这就要求事先根据已有资料和数据库,对飞行员操纵动作和生理心理因素对飞行安全的影响进行初始评估,即得到贝叶斯网络节点之间的先验概率分布。

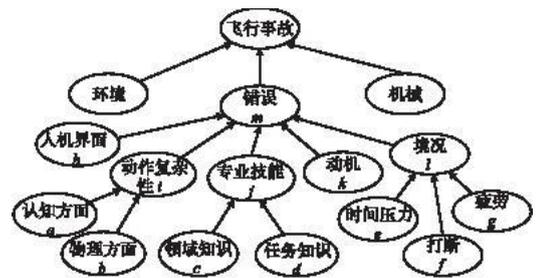


图 4 评估飞行员可靠性的贝叶斯网络  
Fig.4 The bayesian networks for evaluating pilots reliability

将各变量状态的确定和解释与实际意义联系起来,初始化网络得到不安全飞行风险的概率可表示为:

$$p(m | a, b, c, \dots, k, l) = \frac{p(a, b, c, \dots, k, l, m)}{p(a, b, c, \dots, k, l)}$$

因此可预测飞行员操作失误所引起的飞行风险概率。

但是,确定每个变量的局部先验概率分布是费时的,当单个节点有3个以上输入变量的时候,会出现组合爆炸的问题,这使得确定变量的局部先验概率分布十分困难<sup>[11]</sup>。对一般的多变量问题,直接计算往往是困难的,目前的解决办法是使用条件独立和一些技巧以简化计算,变量之间的条件独立可由上面的网络图得出。该网络图不是惟一的,也可以重新构建,如可把错误分为一般的小的失误和概念性错误,然后再将二者合为统一的错误,这样网络中就可能不会出现1个变量有超过3个输入变量的情况,可以大大简化确定每个变量的局部先验概率分布的工作量<sup>[9]</sup>。

## 2.2 网络更新

以境况( $l$ )节点为例,设其子节点的先验概率为 $\pi(l)$ ,而在最新的仿真模拟器或专家评判得到的节点数据的概率模型记为 $P(e, f, g | l)$ ,认为节点 $e, f, g$ 的数据是在模型 $\pi(l)$ 得到的最新数据,此时应用贝叶斯公式,得到 $l$ 节点概率估计:

$$g(e, f, g | l) = \frac{\pi(l)P(e, f, g | l)}{\int \pi(l)P(e, f, g | l) dl}$$

当节点 $e, f, g$ 或网络中任一节点有数据更新时,应用上式就可以对节点作出最新的估计。

## 3 实例应用

图5为复杂人-机-环境系统的简化模型,此模型涵盖了对飞行安全构成影响的主要因素。

参考文献[1],假定人-机-环境系统模型中各事件的先验概率见表1。先验信息为算法的启动提供了条件,在算法的运行阶段,其为上一次的评估结果。

通过对图5所示贝叶斯网络的仿真,可获得飞行事故的发生概率为 $0.27 \times 10^{-8}$ 。依据俄罗斯风险评估标准,此人-机-环境复杂系统处于二级安全水平。通过仿真同时获得了影响因素的后验概率,见表1。



图5 简化的人-机-环系统模型  
fig.5 Predigested men-machine-environment system model

表1 影响因素的先验概率、后验概率

Tab.1 Forwards probabilities of the influence factors

因素	A	B	C	D
先验概率	$0.1 \times 10^{-8}$	$0.5 \times 10^{-8}$	$0.09 \times 10^{-8}$	$0.05 \times 10^{-8}$
后验概率	$0.16 \times 10^{-8}$	$0.68 \times 10^{-8}$	$0.04 \times 10^{-8}$	$0.08 \times 10^{-9}$

从表1可以看出因素B的概率值增幅最大,这说明飞行员的操纵失误仍然是导致飞行事故的首要因素。因素A的概率值同时也增大,这说明环境因素仍是导致飞行事故的重要因素。因素C的概率值减小,说明如能不断提升空中管制的管理水平,可以降低其对飞行事故的影响。因素D的概率值大大减小,说明随着航空技术的不断进步,若能不断提高航空器的可靠性,由机械故障引发的飞行事故率将会继续减小。

## 4 结论

本文在对飞行人员可靠性、空中交通管制人员可靠性和航空器维修人员可靠性进行分析的基础上,综合考虑常用评估方法的优缺点,采用贝叶斯网络建立了飞行安全人因可靠性的评估模型,得出如下结论:

1) 该模型综合运用诊断推理和支持推理形式,分析直观,计算简便,适用于广义的人-机-环境复杂系统建模;

2) 该模型的最大优点在于能够根据后验概率来调整先验概率,从而更新网络,使网络的精度不断提高,

达到最优。

### 参考文献:

- [1] 班永宽. 航空事故与人为因素[M]. 北京:中国民航出版社,2002.  
BAN Yongkuan. Aviation Accidents and Human Factors[M]. Beijing: CAAC Press,2002. (in Chinese)
- [2] 周前祥. 载人航天中人的可靠性问题及研究进展[J]. 中国航天,2000,(12):34-38.  
ZHOU Qianxiang. The Research Evolution of Human Reliability in Manned Spaceflight[J]. Aerospace China, 2000,(12): 34-38. (in Chinese)
- [3] 周前祥. 载人航天中人的可靠性模型及其分析[J]. 系统工程与电子技术,1997,19(8):34-39.  
ZHOU Qianxiang. The Analysis of Human Reliability Model in Manned Spaceflight[J]. System Engineering and Electronic Technology, 1997, 19(8): 34-39. (in Chinese)
- [4] 高金源,李陆豫,冯亚昌,等. 飞机飞行品质[M]. 北京:国防工业出版社,2003.  
GAO Jinyuan, LI Luyu, FENG Yachang, et al. Aircraft Flight Quality [M]. Beijing: National Defence Industry Press,2003. (in Chinese)
- [5] 龙涛,张执国. 人的可靠性与航空维修差错[J]. 江苏航空,2007,(1):34-35.  
LONG Tao, ZHANG Zhiguo. Human Reliability and Aviation maintaining Error [J]. Jiangsu Aviation, 2007,(1): 34-35. (in Chinese)
- [6] 孙旋,牛秦洲,徐和飞. 基于贝叶斯网络的人因可靠性评价[J]. 中国安全科学学报,2006,16(8):22-27.  
SUN Xuan, NIU Qinzhou, XU Hefei. Human Reliability Assessment Based on Bayesian Networks [J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(8): 22-27. (in Chinese)
- [7] 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(2):22-26.  
XIAO Guoqing, CHEN Baozhi. Human Error Mechanism and Reliability Research [J]. China Safety Science Journal, 2001, 11(2): 22-26. (in Chinese)
- [8] 苏畅,张恒喜. 飞机作战效能评估中人的可靠性的引入方法[J]. 航空学报,2006,27(2):262-266.  
SU Chang, ZHANG Hengxi. Method of Considering Human Reliability in Combat Effectiveness Evaluation of Aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(2):262-266. (in Chinese)
- [9] Mmleh A, Chang Y H. Model-based Human Reliability Analysis: Prospects and Requirements[J]. Reliability Engineering and System Safety,2004,83: 241-253.
- [10] Sankaran Mahadevan, Ramesh Rebba. Validation of Reliability Computational Models using Bayes Networks[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005,87: 223-232.

(编辑:姚树峰,徐敏)

## Flight Safety Human Reliability Evaluation Model Based on Bayesian Networks

LIU Li, XU Hao-jun, JING Feng-ling, SUN Zuo

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China)

**Abstract:** Based on the man-machine-environment complex system, pilot reliability, air traffic control personnel and aircraft maintenance crew are analyzed. The virtue and disadvantage of reliability evaluation method are studied. A flight safety human reliability evaluation model is built by Bayesian Networks. For this model, diagnosis inference and sustaining inference are utilized. The analysis progress is intuitional and the calculating progress is convenient. Thus the model is applicable to the man-machine-environment complex system modeling.

**Key words:** man-machine-environment; flight safety; human reliability; Bayesian networks