

基于 BBN 的航空公司风险评估技术研究

金灿灿¹, 左洪福^{1,*}, 张营¹, 白芳²

1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016

2. 中国电子科技集团公司第二十八研究所 装备制造部, 江苏 南京 210007

摘要: 在人、机、环境和管理(MMEM)系统理论的基础上,通过研究有关民航规则、标准中的相关内容建立航空公司风险评估指标体系;利用层次分析法(AHP)确定指标权重,运用模糊综合评价法(FCE)量化其中的定性指标;基于贝叶斯置信网络(BBN)软件 GeNIe 完成了整个系统贝叶斯网络拓扑结构的建立,将航空公司历史数据作为贝叶斯网络参数学习的训练数据,获取节点概率表(NPT),建立航空公司风险评估模型,并对其进行概率推理计算;通过环比分析确定影响风险的主要因素。

关键词: 模糊综合评价法; 贝叶斯置信网络; GeNIe; 环比分析; 风险评估

中图分类号: V328 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6893(2013)03-0588-09

民航具有技术密集、资金投入大、运营风险高的特点,安全是民航赖以生存和发展的重要基础。航空公司作为民航的直接运营者,处在航空安全工作的前沿。风险评估是航空公司防范危险、解决安全隐患的重要手段。航空公司风险评估系统是一个有着相互联系的多指标系统。要实现了对航空公司风险的科学准确评估,不仅需要单个指标进行评估,更需要对多指标体系进行综合评估。因此,探索一种能够综合评估航空公司风险的方法,是一项亟待解决的工作。

传统的航空公司风险评估方法主要有:概率风险评估方法^[1]、D-S 证据推理方法^[2]、模糊综合评价法(FCE)^[3]和神经网络方法^[4]等,这些方法大多采用定性评估,缺乏定量数据的有力支撑。近年来迅速发展的贝叶斯置信网络(BBN)方法是一种能将各种证据,专家经验和测试、运行信息

整合在一起的技术,具备很强的描述能力,既能用于推理,还能用于诊断^[5],非常适合用于风险评估。本文采用模糊综合评价法对其中的定性指标量化后,运用 BBN 方法进行综合评估,通过发挥两种方法的优势和集成作用,提高风险评估的效果和准确度。

本文是在“安全状况及维修质量管理综合评估系统”项目这个大背景下,开展了航空公司风险评估的研究。通过对航空公司进行充分调研,分析了影响航空公司风险的影响因素,参考人、机、环境和管理(MMEM)系统理论建立了航空公司风险评估指标体系。通过模糊综合评价法量化其中的定性指标,利用贝叶斯网络软件 GeNIe 建立了风险综合评估模型^[6],并进行概率推理计算。最后通过对评估结果作环比分析确定影响风险的主要因素。

收稿日期: 2012-04-09; 退修日期: 2012-06-26; 录用日期: 2012-08-02; 网络出版时间: 2012-09-13 10:44

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120913.1044.003.html

基金项目: 国家自然科学基金与中国民航联合资助基金重点项目(60939003); 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(61179058)

* 通讯作者. Tel.: 025-84891098 E-mail: rms@nuaa.edu.cn

引用格式: Jin C C, Zuo H F, Zhang Y, et al. Research on risk evaluation for airlines based on BBN. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(3): 588-596. 金灿灿, 左洪福, 张营, 等. 基于 BBN 的航空公司风险评估技术研究. 航空学报, 2013, 34(3): 588-596.

1 基于 BBN 的航空公司风险评估方法

本文以中国东方航空公司作为航空公司风险评估的考察对象。数据来源主要包括可靠性数据、维修性数据、安全性数据和管理类数据等。其中,定性数据采用专家打分和调查表相结合的方式获得;定量数据包括航空公司提供的每个月各项运行保障数据、安全数据等,整个风险评估过程如图 1 所示,图中 AHP 为层次分析法。

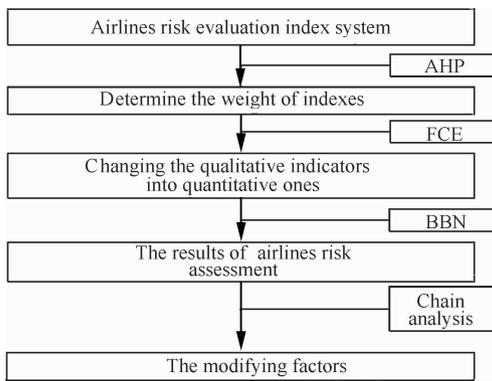


图 1 航空公司风险评估流程图

Fig. 1 Airlines risk evaluation flow chart

1.1 指标体系

建立一套科学合理的指标体系是保证风险评估效果的关键所在。在建立指标体系之前,需要收集相关的资料,包括民航规则、标准中的相关内容和国内外实践经验。指标体系的建立应满足以下条件:①能够反映航空公司当前安全状态和隐患情况;②能充分利用航空公司提供的数据;③将 MEM 系统理论贯穿到指标体系的建立过程中,MEM 系统理论是从人、机、环境和管理 4 个方面构成出涉及安全状况的各个要素,可以更加全面地分析出影响航空公司安全状况的指标,避免了指标的遗漏;④实现定性指标与定量指标的分隔。经过上面的对指标体系的初步建立,通过与专家不断的讨论,构建一套具有 3 级指标的航空公司风险评估指标体系。将航空公司风险评估系统分为飞机技术状态子系统(U_1)、维修质量子系统(U_2)、环境影响子系统(U_3)、安全管理子系统(U_4)和人员状况子系统(U_5),其中 U_1 、 U_2 、 U_3 子系统包含的指标为定量指标, U_4 和 U_5 子系统包含的指标为定性指标。体系如图 2 所示,图中:

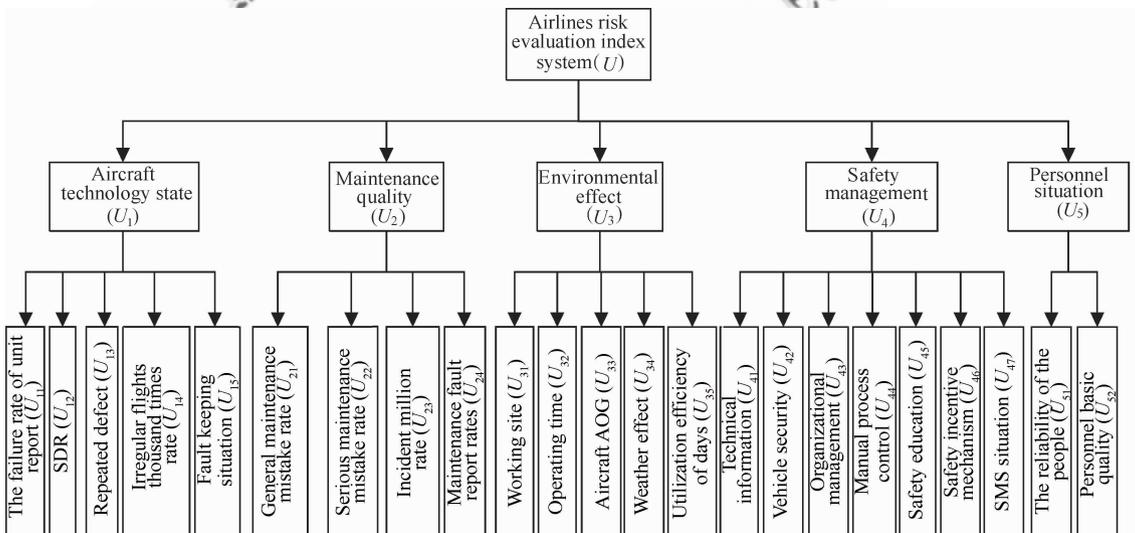


图 2 航空公司风险评估指标体系

Fig. 2 Airlines risk evaluation index system

SDR 表示航空器使用困难报告; AOG 表示飞机停飞待用; SMS 表示安全管理体系。

1.1.1 飞机技术状态子系统(U_1)

1) 机组报告故障率(U_{11}): 机组报告故障次

数/飞行小时数。

2) SDR(U_{12}): 统计周期内维修过程中发现的缺陷和不适航状况次数(次/每天)。注: 除外来物打击和维修差错以外的 SDR 次数。

3) 重复性故障(U_{13}): 同一架飞机在 10 天内

出现 3 次或 3 次以上相同故障的次数。

4) 航班不正常千次率(U_{14}): 航班不正常次数/营运起落次数。

5) 故障保留情况(U_{15}): 统计周期内所选飞行架次总故障保留数/所选飞行架次。

1.1.2 维修质量子系统(U_2)

1) 一般维修差错万时率(U_{21}): 一般维修差错次数 $\times 10\ 000$ /飞行小时数。

2) 严重维修差错万时率(U_{22}): 严重差错次数 $\times 10\ 000$ /飞行小时数。

3) 事故征候万时率(U_{23}): 空停事故征候次数 $\times 10\ 000$ /飞行小时数。

4) 机务报告故障率(U_{24}): 维修人员检查发现故障次数/飞行小时数。

1.1.3 环境影响子系统(U_3)

1) 作业场地(U_{31}): 包括有无机库和机坪复杂程度。

2) 作业时间(U_{32}): 由于深夜疲劳是造成维修人员差错的主要原因。通过统计 24 点以后的航后数来衡量作业时间。

3) 飞机 AOG (U_{33}): 以飞机非计划维修停场率表示。

4) 天气影响(U_{34}): 主要考虑维修单位北方区域冬季天气(9 月—次年 2 月)的影响和南方区域雨季(3 月—6 月)的影响。

5) 日利用率(U_{35}): 飞机营运统计表中日利用率(空地)每月平均值。

1.1.4 安全管理子系统(U_4)

主要采取调查问卷的形式获取技术资料(U_{41}) (主要指工卡)、车辆保障(U_{42})、组织管理(U_{43})、手册程序控制(U_{44})、安全教育(U_{45})、安全激励机制(U_{46})和 SMS 工作状况(U_{47})对安全管理系统的定性影响。

1.1.5 人员状况子系统(U_5)

1) 人的可靠度(U_{51}): 在航空科技高度发达的今天, 人为因素是造成事故和事故征候的主要原因^[7]。本文以维修人员在连续工作条件下的可靠性表示人的可靠度。

2) 人员基本素质(U_{52}): 考虑维修人员的基

本素质。以专家打分表的形式获取。

1.2 基于模糊综合评价法的定性指标量化

对于环境影响子系统和安全管理子系统包含的定性指标, 运用模糊综合评价法将其量化。模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法。它具有结果清晰、系统性强的特点, 能较好地解决模糊的、难以量化的问题。模糊综合评价法包含 3 个要素: 因素集、评价集和单因素评价^[8]。主要计算步骤^[9]如下所述。

步骤 1 建立因素集和权重集

因素集根据图 2 建立的指标体系获得, 可表示为

$$U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\} \quad (1)$$

式中: 元素 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为因素集中第 i 个因素。

权重集由层次分析法^[10]得到。层次分析法是能把数据、专家意见和分析人员的判断有效结合的方法。它不仅能保证模型的系统性和合理性, 而且能充分运用专家经验。运用 AHP 计算权重的相关步骤详见文献^[9]。

步骤 2 建立评价集

本文在确定评价等级时, 将评价等级集 V 定义为 4 个等级, 即用式(2)来表示航空公司风险评价等级, 表 1 为评价结果与评价等级对照表。

$$\tilde{V} = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{优, 良, 中, 差}\} \quad (2)$$

表 1 评价结果与评价等级对照表

Table 1 Comparison of evaluation results and grades

| Estimation grade | Estimation result | Mean |
|------------------|------------------------|------|
| Excellent | $90 \leq u_i \leq 100$ | 95 |
| Normal | $75 \leq u_i < 90$ | 82 |
| Medium | $60 \leq u_i < 75$ | 67 |
| Bad | $0 \leq u_i < 60$ | 30 |

步骤 3 隶属度的确定

在确定了因素集、权重集和评价集之后, 进行单因素评判以确定评价指标的隶属度。本文采取同行评议统计法, 即寻找对各个层次指标比较熟悉的专家(一般要求有 20 人), 以调查问卷的形式对指标进行单因素评价和归一化处理。

步骤 4 模糊算子

多因素综合评价集, 即评价矩阵 \tilde{R} , 是由单因素评价集构成的, 即

$$\tilde{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{R}}_1 \\ \tilde{\mathbf{R}}_2 \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{R}}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ r_{31} & r_{32} & \cdots & r_{3m} \\ r_{41} & r_{42} & \cdots & r_{4m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $r_{ij} = \mu_k(u_i, v_j)$ ($0 \leq r_{ij} \leq 1$) 表示考虑因素 u_i 时对评判对象做出评判结果 v_j 的程度。当因素权重集 $\tilde{\mathbf{A}}$ 和评价矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}$ 已知时,进一步得到模糊综合评价集 $\tilde{\mathbf{B}}$ 为

$$\tilde{\mathbf{B}} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{R}} = [a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_n] \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ r_{31} & r_{32} & \cdots & r_{3m} \\ r_{41} & r_{42} & \cdots & r_{4m} \end{bmatrix} = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_n] \quad (4)$$

式中: a_j 为权重; b_j 为模糊综合评判指标,其具体含义为在综合考虑所有影响因素的情况下,评判对象对评价集 V 中第 j 个元素的隶属程度。

步骤 5 反模糊化

为了充分利用 $\tilde{\mathbf{B}}$ 的结果,进一步用于被评判对象间的排序评优,本文采用重心法进行反模糊化,计算公式为

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n b(u_i) \times u_i}{\sum_{i=1}^n b(u_i)} \quad (5)$$

1.3 基于 BBN 的综合评估模型

Pearl 提出的贝叶斯网络^[11](又称贝叶斯置信

网络)是基于概率分析、图论的一种不确定性知识的表达和推理的模型^[12-14]。用贝叶斯置信网络进行风险评估的优点主要包括:①可以综合先验信息和后验信息;②适合处理不完整数据集问题;③易于发现数据间的因果关系;④高效率推理算法和成熟软件。

运用贝叶斯置信网络进行综合评估的首要工作是建立贝叶斯网络模型。贝叶斯网络建模^[5]的主要任务包括确定网络的拓扑结构和确定网络中各个节点的条件概率分布。本文采用两阶段建模方法,首先依据指标体系手动建立模型拓扑结构,然后依据专家对各个影响因素安全状况等级的划分,结合调研采集到的航空公司数据,通过参数学习的方法获取各节点的条件概率表。

1.3.1 贝叶斯网络拓扑结构模型的建立

通过分析图 2 所示的航空公司风险评估指标体系,可知各层指标与其上层指标之间的关系是贝叶斯网络局部连接方式中的汇连关系,即上层指标的情况是由下层指标的状况推断出来的。这种汇连关系通过由父节点指向子节点的有向边来表示,即由二级指标指向对应的一级指标最终汇聚到总指标 U 。通过上述分析,利用贝叶斯置信网络软件 GeNIe 构建的航空公司风险评估网络拓扑结构如图 3 所示(该图截自 GeNIe 界面)。

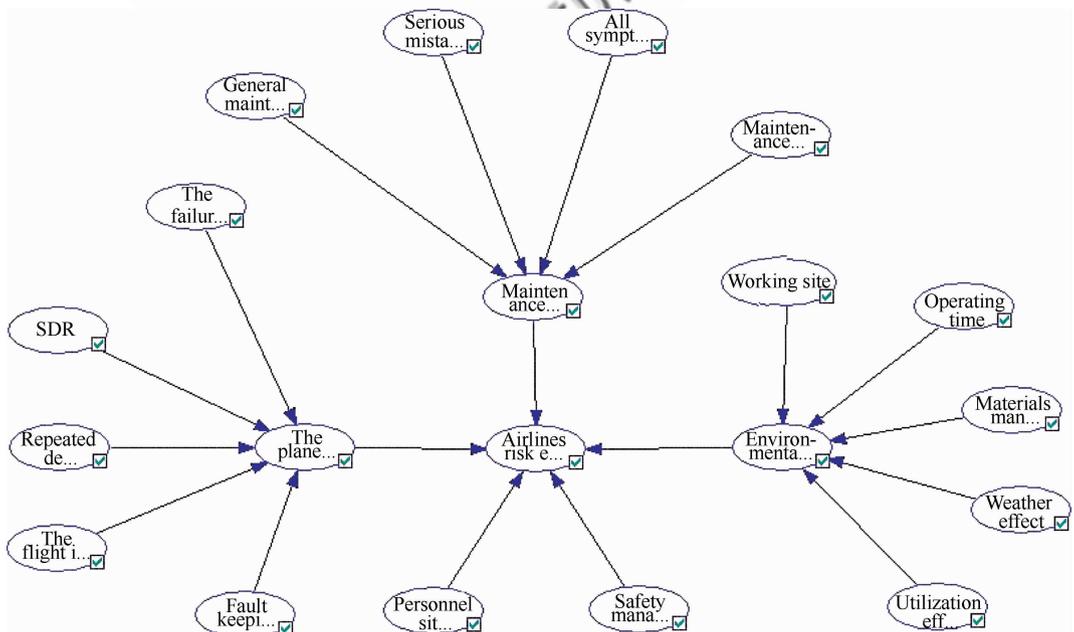


图 3 航空公司风险评估网络拓扑结构

Fig. 3 Network topology structure of airlines risk assessment

1.3.2 条件概率表

选取航空公司调研获取的 2009 年 1 月—2010 年 12 月的 24 组数据作为训练样本。考虑到从航空公司采集的数据样本不足和时间不对应的情况,本文采用 EM 算法^[15] 修补缺值样本后,利用 GeNIe 软件提供的参数学习功能,获取各节点的条件概率表。而各节点条件概率的确定则是通过统计航空公司采集样本数据中对应状态事件发生的频次获得。以机组报告故障率(U_{11})和 SDR(U_{12})为例,其条件概率如表 2 所示。

表 2 条件概率
Table 2 Conditional probability

| U_{11} | $U_1/\%$ | | |
|----------|----------|--------|-----|
| | Good | Medium | Bad |
| High | 37 | 30 | 33 |
| Normal | 68 | 30 | 2 |
| Low | 90 | 9 | 1 |
| U_{12} | $U_1/\%$ | | |
| | Good | Medium | Bad |
| High | 33 | 40 | 27 |
| Normal | 47 | 42 | 11 |
| Low | 66 | 33 | 1 |

同时,各根节点等级所属范围的划分通过计算警戒值获得。警戒值是用来衡量可靠性指标是否超限的极限值,通过历史数据来确定。在本文中,采用标准偏差的方法来计算警戒值。标准偏差公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}}{N-1}} \quad (6)$$

式中: X 为指标月比率; N 为月数。

警戒值计算公式为

$$UCL = \bar{X} + K\sigma \quad (7)$$

式中: $K = \frac{\sum X}{N}$; \bar{X} 为平均值。

K 值由可靠性工程师进行警戒值计算时设置,一般 K 设置为 1~2。通过与航空公司专家探讨,本文中,当 $X \leq \bar{X} + \sigma$ (K 取 1) 时,情况为好;当 $\bar{X} + \sigma < X \leq \bar{X} + 1.5\sigma$ (K 取 1.5) 时,情况为

中;当 $X > \bar{X} + 1.5\sigma$ 时,情况为差。

2 案例分析

2.1 建立因素集

根据 1.1 节确定的指标体系,得到安全管理子系统的因素集为 $[U_{41} \ U_{42} \ U_{43} \ U_{44} \ U_{45} \ U_{46} \ U_{47}]$

2.2 运用层次分析法确定权重集

组织航空公司机务工作人员及有关专家共计 20 人以调查问卷的形式对安全管理子系统的指标进行单因素评价和归一化处理(即隶属于 4 个等级的人数的频率),得到安全管理子系统的隶属度矩阵为

$$\tilde{R}_{U_4} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.50 & 0.15 & 0.10 \\ 0.30 & 0.45 & 0.20 & 0.05 \\ 0.15 & 0.40 & 0.25 & 0.20 \\ 0.10 & 0.30 & 0.40 & 0.20 \\ 0.05 & 0.20 & 0.65 & 0.10 \\ 0.15 & 0.45 & 0.30 & 0.10 \\ 0.25 & 0.40 & 0.35 & 0 \end{bmatrix}$$

由层次分析法得到的安全管理子系统权重集为

$$\tilde{A}_{U_4} = [0.032 \ 5 \quad 0.020 \ 3 \quad 0.410 \ 0 \quad 0.256 \ 0 \quad 0.147 \ 3 \quad 0.083 \ 6 \quad 0.050 \ 3]$$

2.3 基于模糊综合评价法的定性指标量化

首先利用 MATLAB 的矩阵运算功能求得安全管理子系统模糊综合评价集为

$$\tilde{B}_{U_4} = \tilde{A}_{U_4} \tilde{R}_{U_4} = [0.133 \ 8 \quad 0.353 \ 4 \quad 0.352 \ 3 \quad 0.160 \ 6]$$

然后利用重心法确定安全子系统评价等级为

$$M = (0.133 \ 8 \times 95 + 0.353 \ 4 \times 82 + 0.352 \ 3 \times 67 + 0.160 \ 6 \times 30) / (0.133 \ 8 + 0.353 \ 4 + 0.352 \ 3 + 0.160 \ 6) = 70.10$$

对照表 1 设定的评价等级,可知在该次评判中,该航空公司安全管理子系统的评价等级为中。同理,可得到该航空公司人员状况子系统的评价结果为中。

2.4 基于 BBN 的航空公司风险综合评估

对于 U_4 和 U_5 子系统,它们的先验概率是通过前文模糊综合评价法获得的优、良、中、差评价等级分布频次确定的。最终完成的贝叶斯网络综

合评估模型以及各节点条件概率表的确立如图 4 所示(该图截自 GeNIe 界面)。

然后在此评估模型基础上对该航空公司 2011 年 1 月风险状况进行评估。在 GeNIe 软件中更新根节点的边缘概率,结果如图 5 所示。

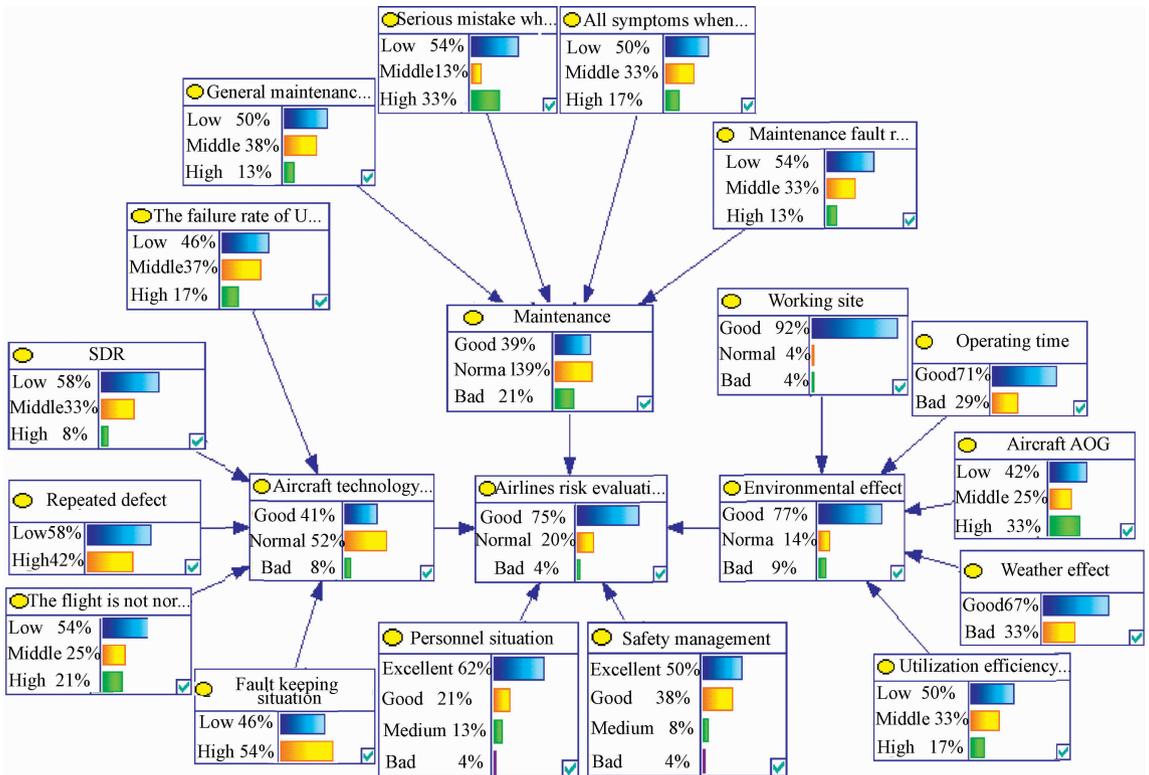


图 4 航空公司风险评估模型

Fig. 4 Airlines risk assessment model

此时,航空公司风险评估节点(U)为好的概率是 75%,保持不变;飞机技术状态(U_1)节点为好的概率从 41%下降至 39%;维修质量从 39%上升至 41%;环境影响由 77%降至 75%;安全管理子系统、人员状况子系统情况不变。同理可得到 2011 年 2 月至 2011 年 9 月该航空公司风险状况。

2.5 通过环比分析确定主要影响因素

首先将得到的 2011 年 1 月至 2011 年 9 月航空公司风险评估节点(U)为好的概率做图进行环比分析,如图 6 所示, U 节点为好的概率在 2011 年 2 月达到最高点以后持续降低,可知该航空公司的风险状况总体呈上升趋势。

其次,针对各子系统作环比分析,变化情况如

图 7 所示。

由图 7 可知, U_2 、 U_3 、 U_4 和 U_5 这 4 个子系统的情况基本保持不变,但 U_1 子系统为好的概率从 2011 年 5 月开始呈下降趋势,可见风险的上升是由于飞机技术状态导致的。最后,查看 2011 年 5 月—2011 年 9 月飞机技术状态子系统的相关数据,对照获得的各节点等级划分依据,如表 3 所示。表中:H、M、L 分别表示高、中、低。

由表 3 可以看出,主要是由于机组报告故障率、SDR、重复性故障、故障保留数的持续偏高造成的航空公司风险的上升。此评估结果反映了维修人员在航后检查、日常维护、飞机放行等工作环节的不规范,航空公司需要对维修单位进行安全生产检查,及时纠正不规范行为。

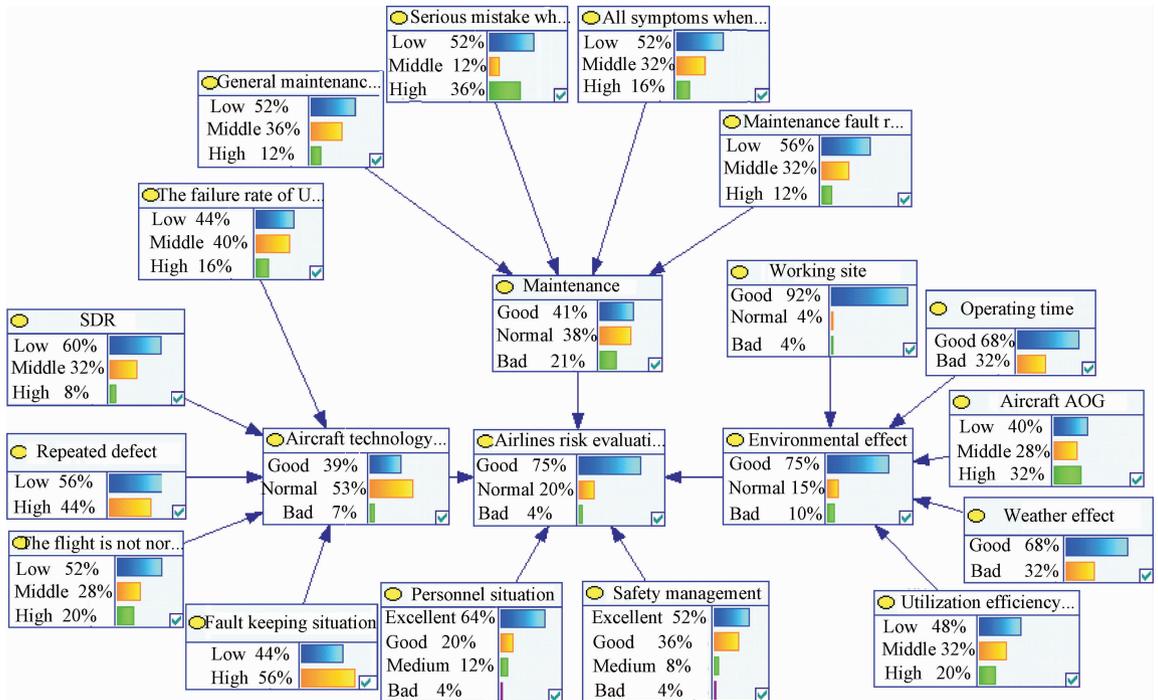


图5 2011年1月航空公司风险概率

Fig. 5 Airlines risk probability in January 2011

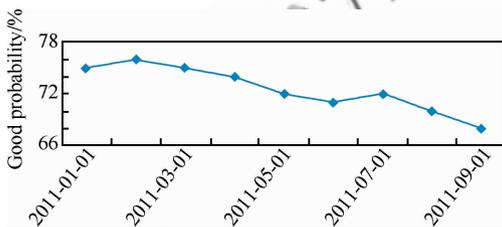


图6 航空公司风险环比分析

Fig. 6 Airline risk chain analysis

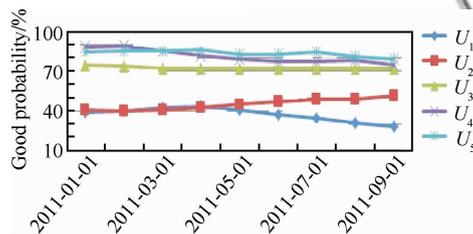


图7 子系统环比分析图

Fig. 7 Subsystem chain analysis diagram

表3 2011年5月—2011年9月飞机技术状态数据表

Table 3 May-September 2011 aircraft technology state data

| Time | U_{11} | U_{12} | U_{13} | U_{14} | U_{15} |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2011.5 | 0.37(H) | 44(M) | 77(H) | 3.34(L) | 481(H) |
| 2011.6 | 0.53(H) | 48(H) | 91(H) | 4.70(M) | 452(H) |
| 2011.7 | 0.50(H) | 55(H) | 103(H) | 4.38(M) | 494(H) |
| 2011.8 | 0.70(H) | 49(H) | 64(H) | 4.23(M) | 489(H) |
| 2011.9 | 0.56(H) | 51(H) | 42(H) | 4.51(M) | 402(H) |

3 结论

将基于概率风险分析的贝叶斯置信网络技术应用于航空公司风险评估中,采用模糊综合评价法对定性指标进行量化,将航空公司历史数据作为贝叶斯网络参数学习的案例,利用贝叶斯网络软件 GeNIe 建立了综合评估模型,并对其进行概率推理计算。该风险评估方法还可以推广到其他类似的复杂系统风险评估中。

通过对整个航空公司的评估结果进行环比分析,并根据分析结果确定影响风险的主要影响因素。研究结果对于提升航空公司安全管理和质量管理能力,以及推动整个航空事业的健康发展具有重要意义,同时为2012年中国东方航空公司通过维修单位 SMS 补充运行合格审定奠定良好基础。

参 考 文 献

- [1] Zhao L Y, Gu J F. The application of probabilistic risk assessment approach to the safety analysis of one specific type of launch vehicle in China. *System Engineering Theory and Practice*, 2000(6): 91-97. (in Chinese)

赵丽艳, 顾基发. 概率风险评估(PRA)方法在我国某型号运载火箭安全性分析中的应用. *系统工程理论与实践*.
© 航空学报编辑部 http://hkxb.buaa.edu.cn

- 2000(6): 91-97.
- [2] Wang H W, Zuo H F. Evaluation of airline safety. *System Engineering*, 2006(2): 46-51. (in Chinese)
王华伟, 左洪福. 航空公司安全评估研究. *系统工程*, 2006(2): 46-51.
- [3] Ma G Z, Mi W Y, Liu X D. The civil aviation system safety multi level fuzzy evaluation method. *Journal of Southwest Jiao Tong University*, 2007, 42(1): 104-109. (in Chinese)
马国忠, 米文勇, 刘晓东. 民航系统安全的多层次模糊评估方法. *西南交通大学学报*, 2007, 42(1): 104-109.
- [4] Wang H F. Safety risk assessment model for civil aviation flight phase based on BP neural network. *Information and Electronic Engineering*, 2010, 8(5): 612-615. (in Chinese)
王浩锋. 基于 BP 神经网络的民用航空航段安全风险评估. *信息与电子工程*, 2010, 8(5): 612-615.
- [5] Zhou Z B. Research on methods and application of probabilistic safety assessment based on Bayesian network. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 22-23. (in Chinese)
周忠宝. 基于贝叶斯网络的概率安全评估方法及应用研究. 长沙: 国防科技大学, 2006: 22-23.
- [6] Greenberg R, Cook S C, Harris D. A civil aviation safety assessment model using a Bayesian belief network (BBN). *The Aeronautical Journal*, 2005, 109(1101): 557-568.
- [7] McFadden K L, Towell E R. Aviation human factors; a framework for the new millennium. *Journal of Air Transport Management*, 1999(5): 177-184.
- [8] Ruan D, Huang C F. *Fuzzy sets and operations research for decision support (advances in fuzzy mathematics and engineering)*. Beijing: Beijing Normal University Press, 2009.
- [9] Xu J W. The formal safety assessment (FSA) of shipping company safety management. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2004: 40-43, 48-53. (in Chinese)
许家武. 海运公司安全管理的 FSA(综合安全评估)研究. 上海: 上海海事大学, 2004: 40-43, 48-53.
- [10] Vidal L A, Marle F, Bocquet J C. Using a Delphi process and the analytic hierarchy process (AHP) to evaluate the complexity of projects. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(5): 5388-5405.
- [11] Pearl J. *Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1988.
- [12] Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Safety analysis in process facilities: comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, 96(8): 925-932.
- [13] Berry D A. Teaching elementary Bayesian statistics with real applications in science. *The American Statistician*, 1997, 51(3): 241-246.
- [14] Tu F, Pattipati K. Rollout strategies for sequential fault diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 2003, 33(1): 269-295.
- [15] Ramoni M, Sebastiani P. *Learning Bayesian networks from incomplete data*. KMi-TR-43. Knowledge Median Institute, The Open University, 1997.

作者简介:

金灿灿 女, 博士研究生。主要研究方向: 系统安全性分析与风险评估、民用航空器故障诊断。

Tel: 025-84895772

E-mail: cangan-heart@163.com

左洪福 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 民用航空器健康管理、故障诊断与维修诱导、系统安全性分析与适航评估验证技术等。

Tel: 025-84891098

E-mail: rms@nuaa.edu.cn

Research on Risk Evaluation for Airlines Based on BBN

JIN Cancan¹, ZUO Hongfu^{1,*}, ZHANG Ying¹, BAI Fang²

1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Equipment Manufacturing Department, The 28th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China

Abstract: On the basis of the theory of MMEM (Man, Machine, Environment and Management) system, an airlines risk evaluation index system is established through a research on civil aviation rules and standards. The weights of indexes are determined by using the analytic hierarchy process (AHP), and the qualitative indexes are quantified by using fuzzy comprehensive evaluation (FCE). Based on a Bayesian belief network (BBN) software—GeNIe, the whole system of the Bayesian network topology structure is established, and by using the historical data of airlines as Bayesian network parameter learning training data, a node probability table (NPT) is obtained. Thus an airline risk evaluation model is built to carry on the inference of probability calculation and determine the main impact factors on safety through chain analysis.

Key words: fuzzy comprehensive evaluation method; Bayesian belief network; GeNIe; chain analysis; risk evaluation

<http://hkxb.buaa.edu.cn>
<http://hkxb.buaa.edu.cn>

Received: 2012-04-09; **Revised:** 2012-06-26; **Accepted:** 2012-08-02; **Published online:** 2012-09-13 10:44

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120913.1044.003.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China and Chinese Civil Aviation Jointly Funded Foundation Project (60939003); National Natural Science Fund Committee and the Civil Aviation Administration of China Jointly Funded Project (61179058)

* **Corresponding author.** Tel.: 025-84891098 E-mail: rms@nuaa.edu.cn