

贝叶斯网络在飞控系统可靠性评估中的应用

唐 甜¹ 赵淑利²

(1. 飞行器控制一体化技术重点实验室, 西安 710065;

2. 飞行自动控制研究所飞控部, 西安 710065)

Reliability Analysis of Flight Control System Based on Bayesian Networks

Tang Tian¹ Zhao Shuli²

(1. Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Xi'an 710065, China;

2. Dept. of Flight Control, Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

摘要:把一种基于贝叶斯网络的故障树分析法应用于飞控系统俯仰控制功能的可靠性评估中,突破传统故障树分析法的局限性——各部件独立、状态为二值,不但可以计算系统的可靠性指标,而且可以定量给出某个事件或某几个事件在系统可靠性中所占的地位,找出系统的薄弱环节。

关键词:可靠性评估;贝叶斯网络;故障树;飞控系统

[Abstract] Researching the application of Bayesian networks to the reliability assessment of pitch channel of flight control system for the limits of traditional fault tree analysis method—components must be independent with two states. The new method can not only compute the reliability indices, but also quantitatively analyze the weights of certain components in the system reliability to find the vulnerable position in the system.

[Key words] reliability assessment; Bayesian networks; fault tree; flight control system

0 引言

近年来,随着系统复杂度和集成度的提高,对飞机的可靠性和安全性评估提出了更高的要求,而传统的评估方法存在一定的局限性,比如故障树分析法不能定量给出某几个事件或中间事件在系统可靠性中所占的地位,而且它是在事件状态为两态、各事件之间独立等假设条件下进行的,而实际情况是很多系统不能满足这些条件,但也只能放宽要求用故障树分析。

与此同时,贝叶斯网络作为不确定知识表达和推理领域内最有效的理论模型之一得到了大量的应用。1988年, Pearl 在总结并发展前人工作的基础上,提出了贝叶斯网络。20世纪90年代,有效的推理和学习算法的出现,推动了贝叶斯网络的发展和应用,首先获得应用的是决策专家系统。随后,在故障诊断、预测、军事目标自动识别、作战意图自动估计、无人自动驾驶、智能机器人、医学上的病理诊断、商业上的金融市场分析、信息融合和信息智能检索等领域开展了广泛的应用研究^[1]。近几年,其在可靠性领域的潜力也得到了开发,应用于配电系统的可靠性评估^[2],故障树向贝叶斯网络转化的方法^[3],贝叶斯网络^[4]应用于一般机械系统的可靠性评估研究。

飞行控制系统是保障飞机飞行安全的重要机载设备系统之一,其工作性能的好坏,可靠程度的高

低,直接影响着飞机能否安全飞行,因此采用更加先进有效的可靠性评估方法进行飞控系统的分析设计是大有帮助的。

1 贝叶斯网络

贝叶斯网络(简称BN)是一种基于网络结构的有向图解描述,适用于表达和分析不确定和概率性事物,可从不完全或不确定的知识或信息中作出推理。它是基于概率分析、图论的一种不确定性知识表达和推理模型,是一种将因果知识和概率知识相结合的信息表示框架。

BN网络是包含一个条件概率表的有向无环图(DAG),已成为表示概率知识基础上不确定性的有力工具,它以节点代表变量,以节点间的弧代表父代与子代的概率关系,通过条件概率表(CPT)的注释,使在模型中表达局部条件依赖性成为可能。贝叶斯网络采用图形化的网络结构直观地表达变量的联合概率分布及其条件独立性,能大量地节约概率推理计算,对概率推理是非常有用的。

一个贝叶斯网络由代表变量的节点及连接这些节点的有向边构成,有向边由父节点(双亲节点)指向子节点(后代节点),用单线箭头表示。有向图蕴涵了条件独立性假设,贝叶斯网络规定图中的每个节点 V_i 条件独立于由 V_i 的父节点给定的非 V_i 以及后代节点构成的任何节点子集。也就是说,如果用 $a(V_i)$ 表示非 V_i 后代节点构成的任何节点子集,用 $b(V_i)$ 表示 V_i 的直接双亲节点^[1]。

$$P(V_i | a(V_i), b(V_i)) = P(V_i | b(V_i)) \quad (1)$$

将条件独立性应用于链式规则,贝叶斯网络就可以求得所有节点的联合概率:

$$P(V_1, V_2, \dots, V_k) = \prod_{i=1}^k P(V_i | b(V_i)) \quad (2)$$

可见,贝叶斯网络使变量的联合概率求解大大简化。

一个简单的贝叶斯网络如图 1 所示, H 代表吸烟的历史, B 代表支气管炎, L 代表肺癌, F 代表疲乏, C 代表胸部 X 射线, 1 为真 2 为假, 如 $P(h_1) = 0.2$ 指有吸烟的历史的概率为 0.2, $P(f_1 | b_1, l_2) = 0.10$ 指在患有支气管炎且没有肺癌的情况下出现疲乏现象的概率为 0.10。

通过贝叶斯网络的双向推理机制,可以计算任意一个或多个节点的概率,也可以计算任意一

$$P(f_1) = \sum_{h,b,l} P(h,b,l,f_1) = \sum_{b,l} P(f_1 | b,l) \sum_h P(b,l | h) P(h) = \sum_{b,l} P(f_1 | b,l) [P(b,l | h_1) P(h_1) + P(b,l | h_2) P(h_2)] = P(f_1 | b_1, l_1) [P(b_1, l_1 | h_1) P(h_1) + P(b_1, l_1 | h_2) P(h_2)] + P(f_1 | b_2, l_1) [P(b_2, l_1 | h_1) P(h_1) + P(b_2, l_1 | h_2) P(h_2)] + P(f_1 | b_1, l_2) [P(b_1, l_2 | h_1) P(h_1) + P(b_1, l_2 | h_2) P(h_2)] + P(f_1 | b_2, l_2) [P(b_2, l_2 | h_1) P(h_1) + P(b_2, l_2 | h_2) P(h_2)] \quad (3)$$

计算得: $P(f_1) = 0.0548$

$$P(b_1 | f_1) = \frac{P(f_1 | b_1) P(b_1)}{P(f_1)}$$

$$\frac{[P(f_1 | b_1, l_1) P(l_1) + P(f_1 | b_1, l_2) P(l_2)] P(b_1)}{P(f_1)}$$

计算得: $P(b_1 | f_1) = 0.1649$

2 贝叶斯网络对可靠性评估方法的改进

贝叶斯网络在国外可靠性领域已经得到了广泛的应用,包括可靠性预计^[5]、FMEA 的构建^[6]、故障树的分析、动态故障树的建模与分析 and 故障数据的收集与处理等,因此贝叶斯网络成为可靠性领域越来越重要的工具。由于贝叶斯网络节点的条件独立性及双向推理机制,它可以方便地计算出系统故障条件下节点发生的条件概率,从而为系统的故障诊断和查找设计初期系统薄弱环节提供了依据,进一步为可靠性指标的改进指明了方向。文献[4]通过分析比较,指出系统故障后元件故障的条件概率比概率的重要度、关键重要度和结构重要度这些指标反映的更为合理、可靠。

同时,从故障树到贝叶斯网络的转化已经形成了一套完整的方法,图 2 给出了与门、或门、非门、异

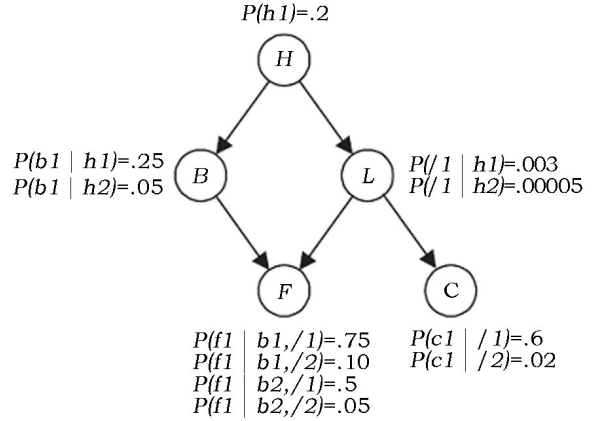


图 1 贝叶斯网络示例

个或多个节点给定的情况下,其他节点发生的条件概率。如:

或门、禁止门、与非门、或非门、表决门向贝叶斯网络转化的方法,假定 $E=0$ 表示事件 E 不发生, $E=1$ 表示事件 E 发生^[3]。

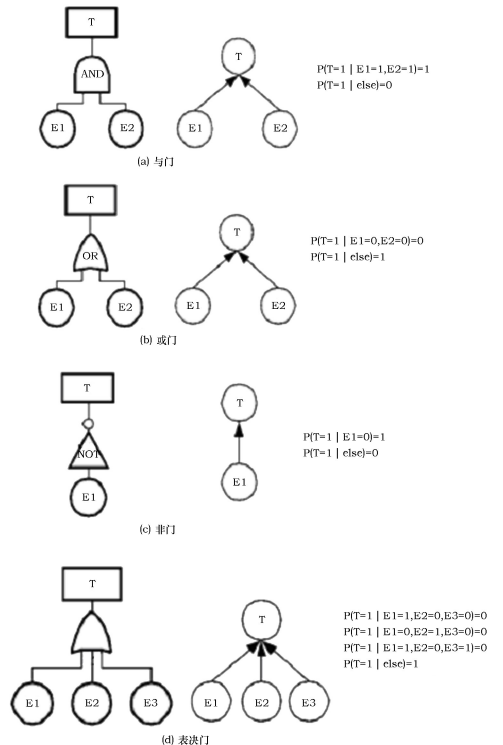


图 2 故障树逻辑关系的贝叶斯网络表述

3 将贝叶斯网络应用于飞控系统可靠性分析

3.1 建立贝叶斯网络模型

依据某机型飞控系统丧失俯仰控制功能的故障树,可用可靠性软件 Relex 进行故障树的搭建及初步分析。运用上节所述的从故障树向贝叶斯网络转化的方法,通过使用微软公司提供的免费贝叶斯网

络建模分析软件 MSBNx 进行贝叶斯网络建模及深入分析。

由于故障树太大,只给出了故障树的一部分,如图3所示。表1给出了系统故障事件列表及底事件的发生概率,通过故障树分析,得出丧失俯仰控制功能的概率为 7.63×10^{-14} 。

通过 MSBNx 建立贝叶斯网络模型,图4为飞控系统丧失俯仰控制功能的贝叶斯网络。

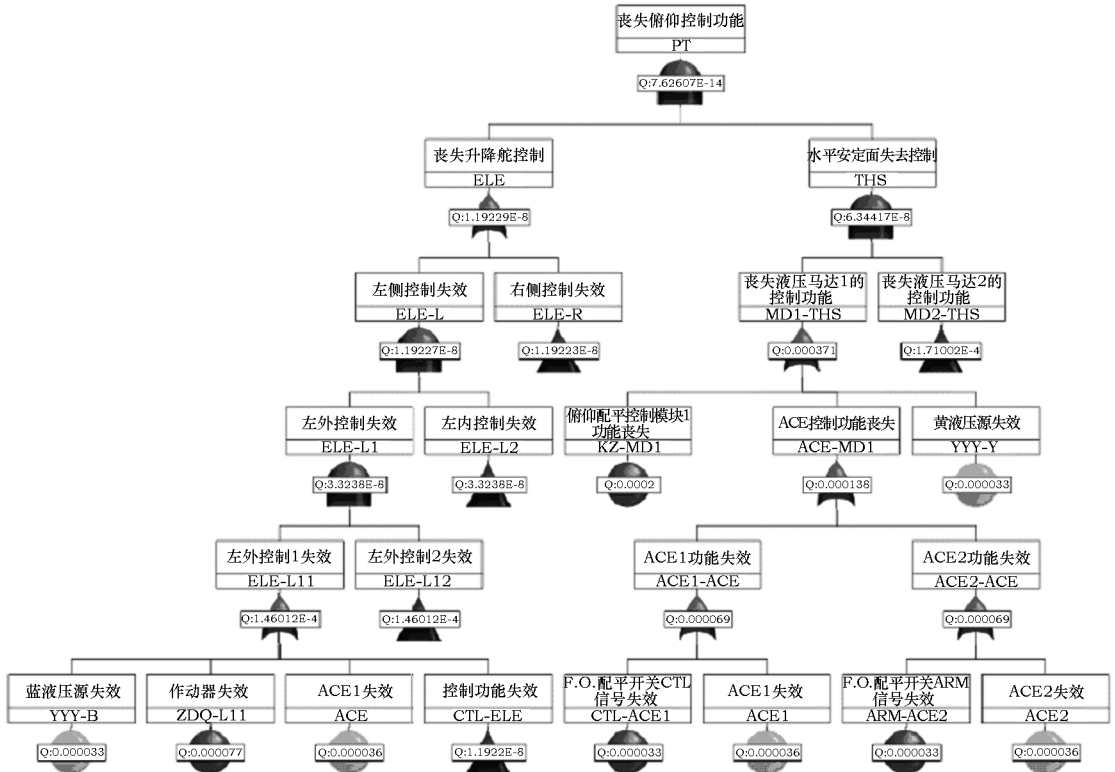


图3 飞控系统丧失俯仰控制功能的部分故障树

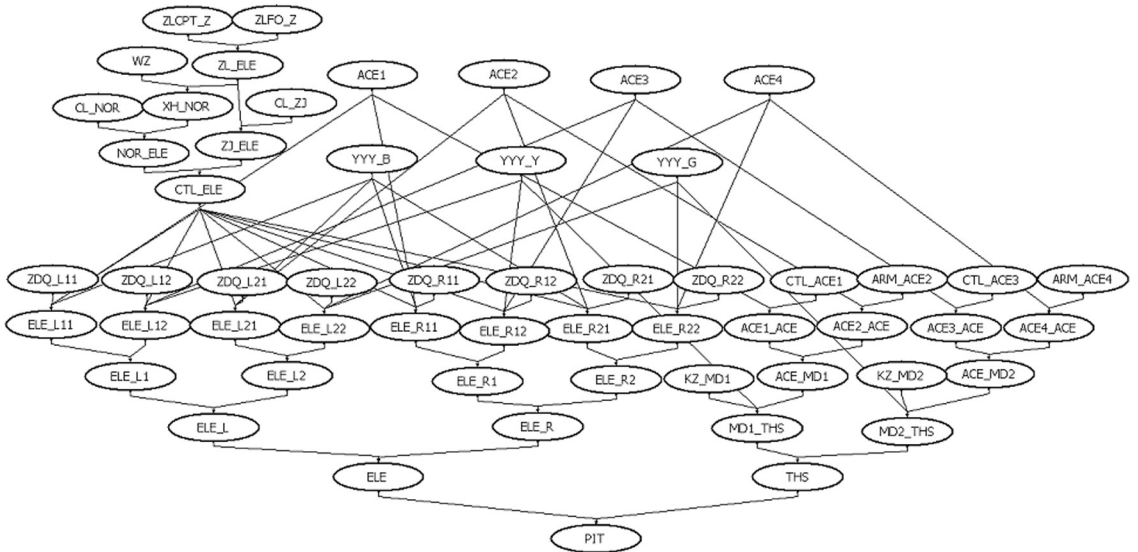


图4 飞控系统丧失俯仰控制功能的贝叶斯网络

表 1 系统故障事件及故障率列表

故障事件	事件代号	底事件	事件代号	故障率
丧失俯仰控制功能	PIT	俯仰配平模块 1 丧失	KZ-MD1	2.00E-04
丧失升降舵控制	ELE	俯仰配平模块 2 丧失	KZ-MD2	2.00E-04
水平安定面失控	THS	ACE1 失效	ACE1	3.60E-05
左侧控制失效	ELE-L	ACE2 失效	ACE2	3.60E-05
右侧控制失效	ELE-R	ACE3 失效	ACE3	3.60E-05
左外控制失效	ELE-L1	ACE4 失效	ACE4	3.60E-05
左内控制失效	ELE-L2	蓝色液压源失效	YYY_B	3.30E-05
左外控制 1 失效	ELE-L11	绿色液压源失效	YYY_G	3.30E-05
左外控制 2 失效	ELE-L12	黄色液压源失效	YYY_Y	3.30E-05
左内控制 1 失效	ELE-L21	左外作动器 1 失效	ZDQ_L11	7.70E-05
左内控制 2 失效	ELE-L22	左外作动器 2 失效	ZDQ_L12	7.70E-05
右外控制失效	ELE-R1	左内作动器 1 失效	ZDQ_L21	7.70E-05
右内控制失效	ELE-R2	左内作动器 2 失效	ZDQ_L22	7.70E-05
右外控制 1 失效	ELE-R11	右外作动器 1 失效	ZDQ_R11	7.70E-05
右外控制 2 失效	ELE-R12	右外作动器 2 失效	ZDQ_R12	7.70E-05
右内控制 1 失效	ELE-R21	右内作动器 1 失效	ZDQ_R21	7.70E-05
右内控制 2 失效	ELE-R22	右内作动器 2 失效	ZDQ_R22	7.70E-05
液压马达 1 失控	MD1-THS	信号处理失效	CL_NOR	1.08E-04
液压马达 2 失控	MD2-THS	直接控制模块失效	CL_ZJ	2.00E-05
ACE 丧失控制	ACE-MD1	俯仰角速率信号失效	WZ	4.88E-04
ACE 丧失控制	ACE-MD2	CPT 指令失效	ZLCPT-Z	2.00E-06
控制功能失效	CTL_ELE	FO 指令失效	ZLFO-Z	1.00E-06
正常控制功能失效	NOR_ELE	FO 开关 CTL 失效	CTL_ACE1	3.30E-05
直接控制功能失效	ZJ_ELE	FO 开关 CTL 失效	CTL_ACE3	3.30E-05
信号失效	XH_NOR	FO 开关 ARM 失效	ARM_ACE2	3.30E-05
驾驶员指令失效	ZL_ELE	FO 开关 ARM 失效	ARM_ACE4	3.30E-05

3.2 两种方法结果的对比

经贝叶斯网络评估和故障树分析,得出如下结论:

(1)贝叶斯网络评估得出顶事件(丧失俯仰控制功能)发生的概率为 7.63×10^{-14} 。这与用故障树方法算出的结果一样。

(2)贝叶斯网络评估出在顶事件发生的情况下各底事件发生的概率,如表 2 所示。从表 2 中可以看到,系统故障时,YYY-B(蓝色液压源)、YYY-Y(黄色液压源)、ACE4(4号电子控制单元)故障概率

是最大的,为系统薄弱环节,在设计初期应加强其可靠性设计或者调整方案以降低其在系统可靠性中的重要性。

用故障树分析方法虽然可以定性找到导致顶事件发生的最小割集来定位薄弱环节,但不能定量地给出割集中每个事件的影响大小,同时对最小割集的求解会导致大量的计算。

(3)用贝叶斯网络可以方便地计算出在各元件故障条件下系统各节点的故障概率,如表 3 所示。对于大型系统而言,通过这种分析可以找出某些特

定元件(比如其固有可靠性不高)对系统哪些元组件影响较大,从而评估特定元件的使用情况。此项分析可以与(2)项分析相结合来找出系统薄弱环节。

而故障树分析方法虽然可以通过设置底事件的逻辑来计算其对其它事件的影响,但操作与计算较贝叶斯网络复杂。

(4)贝叶斯网络可以计算出在某几个元件同时发生故障的条件下系统顶事件发生的概率,如表4所示。

表2 系统故障时各元件故障的概率(诊断)

节点	故障概率	节点	故障概率
ACE1	0.003 66	YYY-B	0.976
ACE2	0.003 66	YYY-G	0.469
ACE3	0.004 22	YYY-Y	0.976
ACE4	0.512	ZDQ-L11	0.000 713
ARM-ACE2	0.002 18	ZDQ-L12	0.001 31
ARM-ACE4	0.001 99	ZDQ-L21	0.000 713
CL-NOR	0.003 95	ZDQ-L22	0.001 05
CL-ZJ	0.021 3	ZDQ-R11	0.007 13
CTL-ACE1	0.002 18	ZDQ-R12	0.001 31
CTL-ACE3	0.001 99	ZDQ-R21	0.000 713
KZ-MD1	0.013 2	ZDQ-R22	0.001 05
KZ-MD2	0.012 1	ZLCPT-Z	0.000 001 78
WZ	0.017 9	ZLFO-Z	0.000 001 78

表3 元件故障时系统各节点的故障概率(因果)

故障元件	节点故障概率			
	ELE	MD1-THS	PIT	THS
ACE1	1.19E-08	1.00E+00	7.84E-12	3.71E-04
ACE2	1.19E-08	1.00E+00	7.84E-12	3.71E-04
ACE3	1.93E-08	3.71E-04	9.06E-12	3.71E-04
ACE4	1.93E-08	3.71E-04	1.10E-09	3.71E-04
YYY-B	4.98E-08	3.71E-04	2.28E-09	1.38E-07
YYY-G	1.93E-08	3.71E-04	1.10E-09	3.71E-04
YYY-Y	1.93E-08	1.00E+00	2.28E-09	3.71E-04

表4 元件组合故障条件下对顶事件的影响

顶事件	任三个 ACE 发生故障			
	ACE1/2/3	ACE1/2/4	ACE1/3/4	ACE2/3/4
PIT	2.23E-04	2.23E-04	2.23E-04	2.23E-04
顶事件	任两路液压源发生故障			
	YYY-B/G	YYY-B/Y	YYY-G/Y	
PIT	3.31E-05	6.90E-05	3.30E-05	

任三个 ACE 故障,丧失俯仰控制功能的概率为 2.23E-4。

任两路液压源故障,丧失俯仰控制功能的概率量级为 1E-5。从此项分析可以总结出系统设计余度是否满足安全性要求。

而故障树分析方法较难进行这方面的计算。

4 结论

贝叶斯网络不仅可以得到故障树分析得出的结论,比如顶事件发生的概率,还可以求出在顶事件发生的情况下,各元件发生的条件概率以及某几个元件同时发生故障时顶事件发生的概率。而且,对指标的改进以及对先验知识和后验数据的完美结合使贝叶斯网络能充分综合各方面的信息,对可靠性评估具有更大的指导意义。

参考文献:

[1]陈二强. 贝叶斯网络在飞机故障诊断与维修优化中的应用[D]. 电子科技大学,2006.

[2]霍利民,朱永利,范高峰,等. 一种基于贝叶斯网络的电力系统可靠性评估新方法[J]. 电力系统自动化,2003,27(5):36-40.

[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,2006,6:95-100.

[4]尹晓伟,钱文学,谢里阳. 系统可靠性的贝叶斯网络评估方法[J]. 航空学报,2008,29(6):1482-1489.

[5]MartinNeil, et al. Using Bayesian belief networks to predict the reliability of military vehicles [J]. Computing & Control Engineering Journal (S0956-3385), 2001. 12(1): 11-20

[6]Burton H. Lee. Using Bayes belief networks in industrial FMEA modeling and analysis [C]. Reliability and Maintainability Symposium 2001 Proceedings Annual (S0-7803-6615-8), 2001, 7-15.