

文章编号: 1001 - 893X(2012)08 - 1364 - 04

# 模糊贝叶斯网络模型在卫星导航时频系统 可靠性分析中的应用\*

孙海燕, 谢彦民, 郎治国, 张蕊

(北京环球信息应用开发中心, 北京 100094)

**摘要:**利用模糊贝叶斯网络方法对卫星导航系统的时间频率分系统的可靠性进行建模和分析。在对时间频率系统故障汇总分析的基础上建立时间频率系统的可靠性模型, 并对引发故障的事件进行模糊描述。通过对时频系统发生故障的概率进行计算, 可以对系统发生故障的风险进行评估。模糊贝叶斯网络模型提高了故障概率描述的精确性, 对系统的可靠性分析更加准确可靠。仿真结果验证了该方法的正确性和可行性。

**关键词:**卫星导航系统; 时间频率系统; 贝叶斯网络; 风险评估

**中图分类号:** TN96    **文献标志码:** A    **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.08.029

## Application of Fuzzy Bayesian Network Model in Satellite Navigation System Time and Frequency Subsystem's Reliability Analysis

SUN Hai-yan, XIE Yan-min, LANG Zhi-guo, ZHANG Rui

(Beijing Global Information Center of Application and Exploration, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The reliability of time and frequency subsystem of satellite navigation system is modeled and evaluated using fuzzy Bayesian network method. The model of time and frequency is built by analysing the fault of time and frequency subsystem, and the matters resulting in the fault are described. By calculating the probability of the fault, the risk of system going wrong can be evaluated. Fuzzy Bayesian network model improves the accuracy for describing the fault probability, which results in more exactly and more reliably analysing the system reliability. The result of simulation shows that the method is validity and feasible for time and frequency subsystem.

**Key words:** satellite navigation system; time and frequency subsystem; Bayesian network; risk evaluation

### 1 引言

目前,“北斗”、GPS、GLONASS 等卫星导航系统提供的精确定位和授时服务在通信、电力、轨道交通、金融等支撑国民经济发展的行业以及手机定位和授时信息服务等与人们生活息息相关的领域正发挥着越来越大的作用。作为卫星导航系统的时间频率分系统用于产生和保持系统时间并为其其他分

系统提供时间频率信号。该系统保持的时间精度直接决定了卫星导航系统定位和授时精度,因此时间频率分系统必须稳定、可靠。为了保证在线运行的时间频率分系统稳定可靠,需要对其进行可靠性分析,通过量化分析找到引发系统故障的失效致因,即对可靠性影响较大的薄弱环节,为指导下一步制定改进措施提供依据,以提高系统的稳定性和可靠性。

对卫星导航时间频率系统的可靠性评估方法主

\* 收稿日期: 2012 - 02 - 20; 修回日期: 2012 - 05 - 02

要有安全查表法、故障树分析法、贝叶斯网络法等。但这些方法都基于假设导致系统故障的部件状态是确定性的<sup>[1-2]</sup>。然而,卫星导航时间频率系统中部分事件是不确定的。例如,导致氢钟故障的真空系统微漏气、钛板老化、温度变化超限都存在一个从“正常”到“故障”的渐变过程,存在中间过程的模糊状态。因此,用模糊函数来描述故障部件的模糊状态,称为“模态部件”<sup>[3]</sup>,能够更为精确地描述时间频率系统的部件状态。

本文利用三角模糊数法描述导致系统故障的事件发生概率,并基于模糊贝叶斯网络模型对卫星导航系统时间频率分系统的可靠性进行深入分析,找到影响系统可靠性的薄弱环节,对系统可靠性进行风险评估。

## 2 模糊贝叶斯网络模型

对于导致系统故障的底事件  $x$  (部件或环境因素)可以采用模糊数表示发生概率。模糊描述有三角模糊数、梯形模糊数和正态模糊数等,其中三角模糊数描述简洁、直观,因此采用三角模糊数描述底事件发生概率  $f(x, a, b, c)$ 。

模糊数的定义<sup>[4]</sup>:如果是实数域  $\mathbf{R}$  上的正常模糊集,且对于任意  $0 \leq \lambda \leq 1$ ,其截集  $A$  是一个闭区间,则称  $A$  是一个模糊数。

三角形模糊函数对  $x$  的先验概率  $f(x, a, b, c)$  描述为

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (1)$$

针对三角型模糊数  $f(x, a, b, c)$  的  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  截集有

$$\lambda_1 = f(x_1, a, b, c) = \frac{x_1 - a}{b - a}, a \leq x_1 \leq b \quad (2)$$

$$\lambda_2 = f(x_2, a, b, c) = \frac{c - x_2}{c - b}, b \leq x_2 \leq c \quad (3)$$

求得

$$x_1 = a + (b - a)\lambda_1, x_2 = c - (c - b)\lambda_2 \quad (4)$$

则三角型模糊数  $f(x, a, b, c)$  的  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  截集为  $[a + (b - a)\lambda_1, c - (c - b)\lambda_2]$ 。当  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$  时,三角型模糊数的  $\lambda$  截集为  $[a + (b - a)\lambda, c - (c - b)\lambda]$ ,如图 1 所示。

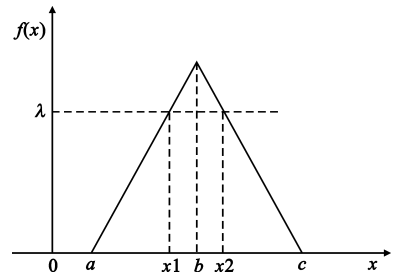


图 1 三角型模糊数  $\lambda$  描述

Fig. 1  $\lambda$  description of triangular fuzzy number

在利用故障统计分析法确定底事件的故障概率时,通常需要根据统计数据结果等先验信息确定隶属度  $\lambda$ ,表示该故障模式发生概率属于其失效概率模糊数的程度<sup>[5]</sup>,即用三角函数法描述故障事件发生隶属度  $\lambda$ ,对应得到的  $[a + (b - a)\lambda, c - (c - b)\lambda]$  为底层故障部件  $x$  选取隶属度  $\lambda$  所对应的先验概率值,再利用贝叶斯网络建立基于模糊描述的条件概率分布表,分别计算顶事件即系统发生故障的概率、可靠度、系统故障条件下底事件发生故障的概率(后验概率)计算得到重要度以及复合故障概率等。计算出的顶事件、底事件以及复合故障概率也是由  $\lambda$  截集形式表示的模糊数。

## 3 卫星导航时间频率系统建模

卫星导航时间频率系统是一个由上百台设备组成的复杂物理系统。对时间频率系统进行可靠性分析首先需要对该系统出现的故障进行分类统计,在此基础上建立时间频率系统的故障树模型,再将故障树模型进一步转换为贝叶斯网络模型,并建立底事件的故障统计表,用  $\lambda$  截集形式的模糊数表示底事件发生故障的先验概率。最后通过贝叶斯网络方法求得各类事件发生故障的概率,为可靠性分析提供依据。

卫星导航时间频率系统主要为卫星导航其他分系统提供各类频率和脉冲信号,因此当某一频率或脉冲信号发生漂移、突跳、中断等故障时,时间频率系统认定为故障状态。因此,各类频率和脉冲信号故障与时间频率系统故障之间用“或门”表示;时间频率系统产生的信号均由多台原子钟组成的原子钟组提供的标准频率和脉冲信号转换产生,每台原子钟故障与原子钟组故障之间用“与门”表示。对卫星导航时间频率系统故障树进行建模,其中  $T$  表示系统故障,也称为顶事件; $A_1(A_2)$  和  $B_1(B_2)$  表示导致系统故障的中间事件; $X_i(i = 1, 2, \dots, n)$  表示导致

系统故障的基本原因,也称为底事件。构建的故障树模型如图2所示,图中符号列表不在此列出。

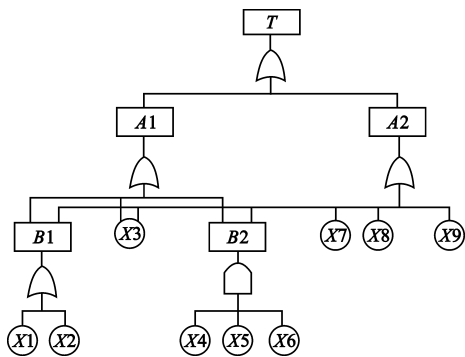


图2 时间频率系统故障树

Fig.2 Time and frequency systems fault tree

依据故障树模型转化为贝叶斯网络模型规则<sup>[6]</sup>建立卫星导航时间频率系统贝叶斯网络模型如图3所示。其中B2是“与门”,B1、A1、A2和T是“或门”。由于篇幅有限,条件概率表不在此列出。

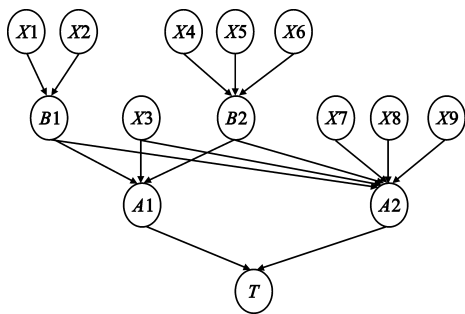


图3 时间频率系统贝叶斯网络图

Fig.3 Time and frequency systems Bayesian networks

### 4 时间频率系统可靠性分析

根据系统卫星导航系统实际运行故障统计,利用三角型模糊函数对导致系统故障的底事件失效概率进行描述,如表1所示。

表1 系统底事件模糊失效率表

Table 1 The events invalidation fuzzy probability table

节点	模糊失效率	节点	模糊失效率
X1	(0.000 1,0.001 0, 0.015 0)	X6	(0.002 0,0.003 5, 0.018 5)
X2	(0.000 5,0.002 6, 0.004 0)	X7	(0.002 0,0.005 5, 0.010 5)
X3	(0.002 4,0.015 0, 0.063 5)	X8	(0.002 5,0.005 0, 0.023 5)
X4	(0.001 5,0.003 0, 0.015 5)	X9	(0.002 0,0.006 5, 0.035 0)
X5	(0.002 5,0.004 5, 0.021 0)		

用隶属度作为先验概率描述贝叶斯网络的条件概率分布<sup>[5]</sup>,根据公式(2)~(4),对于节点X1的失效概率为(0.000 1,0.001 0,0.015 0), $a = 0.000 1, b = 0.001 0, c = 0.015 0$ 。当根据先验信息确认其隶属度 $\lambda$ 为0.95时,对应得到的失效概率为0.000 955(0.001 7),即当节点X1失效概率为0.000 955或0.001 7时,导致上层节点失效的概率为0.95,因此 $[0.000 955, 0.001 7]$ 可表示节点X1隶属度 $\lambda = 0.95$ 时得到的先验概率离散值。根据对时频系统运行管理经验,通常设置 $\lambda = 0.90$ ,由此,可得底事件模糊先验概率,如表2所示。

表2 基于 $\lambda$ 的底事件模糊先验概率表

Table 2 Fuzzy probability table based on  $\lambda$

节点	$\lambda$ 模糊失效率	节点	$\lambda$ 模糊失效率
X1	[0.000 91,0.002 4]	X6	[0.003 4,0.005 0]
X2	[0.002 4,0.002 7]	X7	[0.005 2,0.006 0]
X3	[0.013 7,0.019 9]	X8	[0.004 8,0.006 9]
X4	[0.002 9,0.004 2]	X9	[0.006 0,0.009 3]
X5	[0.004 3,0.006 2]		

根据第3节建立的时间频率系统贝叶斯网络模型,可以进一步对系统可靠性进行深入分析。

#### 4.1 系统可靠度计算

利用推理算法对时频系统发生故障的概率计算如下:

$$P(T = 1) = \sum_{X_i, B_i, A_i} P(X_1, \dots, X_9, B_1, B_2, A_1, A_2, T)$$

由于底事件采用模糊区间描述,系统发生故障的概率也为一区间数,对于隶属度 $\lambda$ 的不同取值,可得到系统故障概率的置信区间。当 $\lambda = 1$ 时,系统发生故障概率为 $P(T = 1) = 0.015$ ,即底事件发生概率为确定值时,时频系统发生故障概率为1.5%,系统的可靠度 $R = 1 - P(T = 1) = 0.985$ ,即98.5%。当 $\lambda = 0.90$ 时,系统发生故障概率的置信区间为 $[0.013 7, 0.019 9]$ ,即由于存在某些不确定因素,系统可靠度为98.01%至98.63%之间,这种区间表述方式更加符合时频系统的实际情况,便于进一步对故障原因进行深入探讨。

#### 4.2 底事件重要度计算

在系统故障情况下,计算单台设备或元件以及配套软件出现故障的条件概率 $P(X_i = 1 | T = 1), i = 1, 2, \dots, 9$ ,并由此归一化计算得到各底事件重要度,如表3所示。

表 3 底事件重要度列表  
Table 3 The events importance list

底事件	重要度	底事件	重要度
X1	[0.001 1,0.002 6]	X6	[0.003 3,0.004 8]
X2	[0.002 5,0.002 9]	X7	[0.005 0,0.005 8]
X3	[0.970 6,0.958 5]	X8	[0.004 7,0.006 6]
X4	[0.002 8,0.004 0]	X9	[0.005 8,0.008 9]
X5	[0.004 2,0.005 9]		

由表 3 可以得知,底事件 X3 对系统保证可靠性的重要度最大,其次是底事件 X9 和 X7 等。对保障系统可靠性的重要底事件需要优先加强监控并配备相应的冷备件,以保证系统运行的稳定性和可靠性。

### 4.3 复合故障概率计算

在已知多个故障事件同时发生的前提下,可以计算并推导出导致多个故障事件同时发生的底事件,为复合故障的排查和设备状态排查提供技术支持,节约排查时间,提高故障排查效率。例如,已知系统  $T$  和中间结点  $A1$  发生故障的前提下,计算与之相关的中间结点及底事件发生故障的概率,如表 4 所示。

表 4 复合故障时底事件故障概率表

Table 4 The events fault probability table in condition of complex fault

节点	导致复合故障概率 ( $T=1, A1=1$ )	节点	导致复合故障概率 ( $T=1, A1=1$ )
B1	$[2.18 \times 10^{-6}, 6.48 \times 10^{-6}]$	X2	[0.002 4,0.002 7]
X3	[0.013 7,0.019 9]	X4	[0.002 9,0.004 2]
B2	$[4.24 \times 10^{-8}, 1.302 \times 10^{-7}]$	X5	[0.004 3,0.006 2]
X1	$[9.1 \times 10^{-4}, 0.002 4]$	X6	[0.003 4,0.005 0]

由表 4 可知,当发现系统  $T$  及中间结点  $A1$  故障时,导致其发生的底事件发生概率依次排序前 3 项为 X3、X5、X6,因此指导技术人员首先排查部件 X3,其次排查部件 X5、X6,从而提高复合故障排查的准确性及工作效率。

## 5 结 论

与传统的贝叶斯网络法相比,基于模糊隶属度描述的贝叶斯网络方法能够更加精确地描述系统发生故障的概率,提高可靠性分析的准确性和针对性,可以广泛适用于分析具有渐变过程或状态的系统可靠性。对时频系统实例分析的结果表明,该方法能够较好地满足时频系统可靠性分析的实际需要,为进一步制定提高系统可靠性的改进措施提供了理论依据。

## 参考文献:

- [1] 张勇军,陈超,许亮. 基于模糊聚类和相似度的电力系统可靠性原始参数预估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8):1-5.  
ZHANG Yong-jun, CHEN Chao, XU Liang. Prediction of original reliability parameters of power system based on fuzzy clustering and similarity[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8):1-5. (in Chinese)
- [2] 马成业,黎锁平,杨胜良. 模糊多目标可靠性优化设计的遗传算法[J]. 兰州理工大学学报,2009,35(1):156-158.  
MA Cheng-ye, LI Suo-ping, YANG Sheng-liang. Genetic algorithm for fuzzy multi-objective optimization of reliability[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(1): 156-158. (in Chinese)
- [3] 董豆豆,冯静,孙权,等. 模糊情形下基于贝叶斯网络的可靠性分析方法[J]. 系统工程学报,2006,21(6):668-672.  
DONG Dou-dou, FENG Jing, SUN Quan, et al. Method for reliability analysis based on Bayesian network under fuzzy environments[J]. Journal of Systems Engineering, 2006, 21(6):668-672. (in Chinese)
- [4] 安宗文,祝红林,张鹏,等. 核级蝶阀的模糊故障树分析[J]. 兰州理工大学学报,2011, 37(2): 57-60.  
AN Zong-wen, ZHU Hong-lin, ZHANG Peng, et al. Fuzzy fault tree analysis of nuclear-class butterfly valve[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2011, 37(2):57-60. (in Chinese)
- [5] 武侠,宋汉强,江式伟,等. 基于贝叶斯网络的末制雷达模糊可靠性分析[J]. 航空计算技术,2011,41(2): 64-66,71.  
WU Xia, SONG Han-qiang, JIANG Shi-wei, et al. Fuzzy reliability analysis of X Missile's terminal guidance radar based on Bayesian network [J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(2):64-66, 71. (in Chinese)
- [6] 孙海燕,谢彦民,邱震,等. 基于贝叶斯网络的综合原子时系统可靠性评估[C]//第二届中国卫星导航学术年会论文集.上海:[s. n.],2011:675-678.  
SUN Hai-yan, XIE Yan-min, QIU Zhen, et al. The reliability of synthesis atomic time systems evaluating based on Bayesian networks[C]//Proceedings of the 2nd China Satellite Navigation Conference. Shanghai:[s. n.], 2011:675-678. (in Chinese)

## 作者简介:

孙海燕(1975—),女,湖北武汉人,博士,工程师,主要从事卫星导航及时间频率方面的工作;

SUN Hai-yan was born in Wuhan, Hubei Province, in 1975. She is now an engineer with the Ph.D. degree. Her research concerns satellite navigation, time and frequency.

Email: shyldn@126.com

谢彦民(1966—),女,山西芮城人,硕士,高级工程师,主要从事卫星导航及时间频率方面的工作;

XIE Yan-min was born in Ruicheng, Shanxi Province, in 1966. She is now a senior engineer with the M.S. degree. Her research concerns satellite navigation, time and frequency.

郎治国(1977—),男,辽宁营口人,博士,工程师,主要从事频率基准研究工作。

LANG Zhi-guo was born in Yingkou, Liaoning Province, in 1977. He is now an engineer with the Ph.D. degree. His research concerns time and frequency standard.