

文章编号: 1000-8055(2009)06-1321-05

贝叶斯网络在动量轮地面试验可靠性分析中的应用

厉海涛, 金 光, 周经伦, 周忠宝
(国防科技大学 信息系统与管理学院, 长沙 410073)

摘 要: 为了有效综合动量轮地面试验过程中积累的大量复杂试验信息, 对动量轮进行可靠性定量分析. 提出了利用贝叶斯网络模型, 融合大量测试和调试数据、专家知识等多种信息, 建立动量轮可靠性模型的方法; 采用贝叶斯网络推理技术, 对动量轮进行可靠性评估、故障诊断和灵敏度分析, 有效解决了动量轮地面试验可靠性分析与评估等难题, 为动量轮可靠性试验提供了理论指导.

关 键 词: 可靠性评估; 故障诊断; 灵敏度分析; 贝叶斯网络; 动量轮

中图分类号: TP18

文献标识码: A

Bayesian networks application to reliability analysis of momentum wheel's ground test

LI Hai-tao, JIN Guang, ZHOU Jing-lun, ZHOU Zhong-bao

(College of Information System and Management,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A lot of intricate information in momentum wheel's ground test has been accumulated. However, an effective method for reliability analysis by fusing such information can hardly be found. The paper firstly proposed a method to build the reliability model of momentum wheel by fusing various test information and expert knowledge using Bayesian network. Then, the reliability assessment, fault diagnosis and sensitivity analysis towards momentum wheel's ground test were carried out using the inference of Bayesian network. The proposed method could solve the problem of reliability analysis and assessment of momentum wheel's ground test, providing a theoretic guidance for reliability test of momentum wheel.

Key words: reliability assessment; fault diagnosis; sensitivity analysis;
Bayesian network; momentum wheel

动量轮是长寿命卫星姿控系统的关键机电部件, 其可靠性是影响卫星寿命的重要因素. 为研究动量轮的失效机理、设计缺陷、性能变化规律等, 动量轮研制与生产部门对其进行了大量的地面试验, 有功能性试验、性能试验、环境试验及其它相关试验. 在试验过程中, 积累了各种各样的故障模式信息, 如, 动不平衡、漏气、摩擦力矩增大等, 如

何有效地利用这些信息对动量轮进行可靠性分析是工程上需要解决的一个问题. 为此, 本文提出了一种利用贝叶斯网络, 融合各种试验信息对动量轮可靠性建模与分析的方法.

本文利用贝叶斯网络的学习算法, 结合动量轮可靠性特点建立动量轮贝叶斯网络模型. 而后, 利用该模型对动量轮进行了有观测信息和无观测

收稿日期: 2008-06-08; 修订日期: 2009-04-14

作者简介: 厉海涛(1983-), 男, 河南通许人, 博士生, 主要研究方向为小子样可靠性分析, 试验信息融合理论与方法.

信息条件下的可靠性评估,给出了可靠度的点估计和区间估计;在地面试验发生故障的条件下,提出了单一故障诊断和复合故障诊断两种方法,能够快速地对动量轮进行故障定位.最后,通过对灵敏度分析研究了各个故障模式对动量轮可靠性的重要度,并给出了动量轮可靠性设计的建议.

1 动量轮贝叶斯网络建模

1.1 贝叶斯网络拓扑结构

根据动量轮物理结构和故障模式,可分层次建立动量轮贝叶斯网络拓扑结构.首先,对动量轮、动量轮四大部件(轴承组件、壳体组件、轮体组件和电机组件)和组成四大组件的零部件进行失效模式与影响分析(FMEA),分别获取其故障模式并作为动量轮贝叶斯网络的节点.然后根据动量轮的故障机理,建立动量轮故障与其三大故障模式(动量轮停转、控制精度不足、功耗过大)的逻辑关系、动量轮三大故障模式和四大组件故障模式(如轴承卡死、电机不转等),以及四大组件故障模式和零部件故障模式(如轴承损伤、摩擦力矩增大等)之间的对应关系.

按上述方式建立的动量轮贝叶斯网络结构如图 1 所示,该网络所有节点变量都只有正常(节点取值为 0)和故障(节点取值为 1)两个状态.

1.2 节点验前条件概率

由于网络中的节点都是两态的,因而根据贝

叶斯原理,取 Beta 分布作为节点事件发生的条件概率 θ 的验前分布.根据经典的贝叶斯网络学习算法,网络中节点条件概率采用成败型试验确定,而实际上没有足够的试验数据用于确定 $Beta(\theta; \alpha, \beta)$ 分布的参数 α 和 β ,因此,本文将通过咨询专家意见,获取关于条件概率 θ 验前分布的均值 μ ,然后采用极大熵^[1]方法确定验前分布参数.

由连续分布密度函数 $\pi(\theta)$ 最大熵的定义

$$\varepsilon_N(\pi) = - \int \pi(\theta) \ln \left[\frac{\pi(\theta)}{\pi_0(\theta)} \right] d\theta \tag{1}$$

以及 θ 的自然无信息验前 $\pi_0(\theta) = 1$,得 $Beta(\theta; \alpha, \beta)$ 分布的熵为

$$\varepsilon_N(\pi) = - \int Beta(\theta; \alpha, \beta) \ln [Beta(\theta; \alpha, \beta)] d\theta \tag{2}$$

根据专家给定的参数 θ 的验前均值 μ ,由 Beta 分布的性质,可得分布参数之间的关系

$$\beta = \alpha \cdot \frac{1 - \mu}{\mu} \tag{3}$$

由(2),(3)式,可得使 $\varepsilon_N(\pi)$ 最大的 α 和 β ,此 α, β 即为最大熵验前分布参数.

1.3 节点验后条件概率

动量轮在研制、生产和使用过程中积累了一些数据,其中包含了关于动量轮可靠性的重要信息.本文共收集了动量轮地面试验的 351 次试验数据,其中 315 次无任何故障发生(即所有节点事

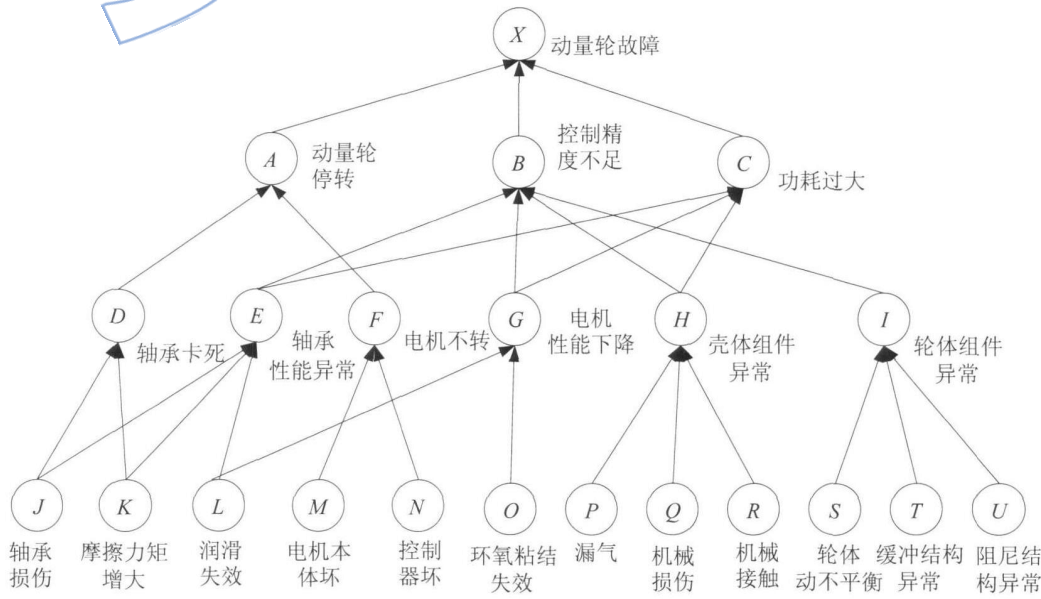


图 1 动量轮贝叶斯网络结构

Fig. 1 Structure of momentum wheel's Bayesian network

件均为正常),36 次有零部件故障发生(网络中某个或几个节点故障,其余节点事件正常).由于故障数据极少,采用经典学习方法是比较困难的,本文将利用贝叶斯方法^[2],通过融合验前分布和样本信息来得到验后分布.

具体学习步骤如下:对图 1 所示贝叶斯网络模型,取其第 i 个节点,在父节点第 j 个组合状态下,该节点的验前分布为

$$\pi(\theta_{ij}) = \text{Beta}(\theta_{ij}; \alpha_{ij}, \beta_{ij}) \tag{5}$$

并且通过样本数据发现,在第 i 个节点的父节点的第 j 个组合状态发生 N 次的条件下,该节点事件发生了 m 次,则似然函数为

$$P(D|\theta_{ij}) = \theta_{ij}^m (1 - \theta_{ij})^{N - m} \tag{6}$$

将(5),(6)式带入(4)式可得参数 θ_{ij} 的验后分布

$$\pi(\theta_{ij}|D) = \text{Beta}(\theta_{ij}; \alpha_{ij} + m, \beta_{ij} + N - m) \tag{7}$$

θ_{ij} 验后分布的均值即为更新后该节点在父节点第 j 个组合状态下的条件概率.其中 D 为样本数据集.

2 动量轮地面试验可靠性分析

贝叶斯网络能够很好地描述不确定性信息,并能进行多种模式的推理,因而在可靠性分析领域有着非常广泛的应用^[3,4].下文将利用建立的贝叶斯网络模型对动量轮地面试验进行可靠性评估、故障诊断和灵敏度分析.

2.1 可靠性评估

可靠性评估^[5]就是利用所能掌握的信息对系统的可靠性进行估计的过程.

2.1.1 观测信息条件下的可靠性评估

无观测信息条件下的可靠性评估,是指在无观测到动量轮任何试验信息的条件下对动量轮进行可靠性评估.在无观测信息时,对本文建立的贝叶斯网络模型进行推理得到动量轮可靠度(节点正常)的点估计值 $P(X = 0) = 0.9171$,动量轮三种主要故障模式不发生的概率的点估计值分别为 $P(A = 0) = 0.9892$, $P(B = 0) = 0.9546$, $P(C = 0) = 0.9697$.

也可对动量轮的可靠度进行区间估计.由建立的贝叶斯网络模型可知,动量轮各个零部件故障模式节点的可靠度(节点正常概率)服从 Beta 分布.因而,通过对零部件节点故障模式进行抽样,可得动量轮可靠度的一组仿真数据.图 2 即为

抽样仿真所得的动量轮可靠度 1000 组样本数据的直方图.

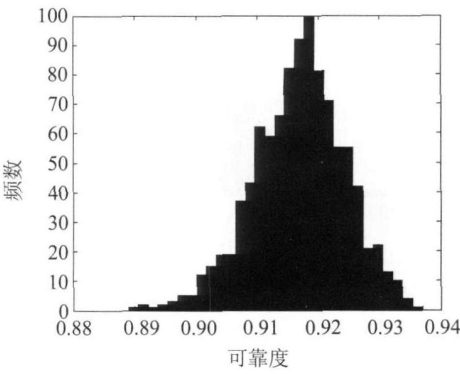


图 2 动量轮可靠度直方图

Fig. 2 Reliability histogram of momentum wheel

由仿真数据可估计动量轮可靠度在置信水平为 0.70,0.75,0.80,0.85,0.90,0.95 时的置信区间下限,如表 1 所示.

表 1 动量轮可靠度置信下限

Table 1 Reliability confidence lower bound of momentum wheel

置信水平	$X = 0$ 的置信下限
0.70	0.9134
0.75	0.9120
0.80	0.9105
0.85	0.9095
0.90	0.9074
0.95	0.9038

2.1.2 有观测信息条件下的可靠性评估

有观测信息条件下的可靠性评估,是指在观测到动量轮某些试验信息的条件下对动量轮进行可靠性评估.例如,观测到润滑失效条件下动量轮可靠度 $P(\text{动量轮正常}|\text{润滑失效}) = 0.1105$,轴承损伤条件下动量轮可靠性为 $P(\text{动量轮正常}|\text{轴承损伤}) = 0.3729$,润滑失效与轴承损伤同时发生条件下动量轮可靠度 $P(\text{动量轮正常}|\text{轴承损伤, 润滑失效}) = 0.0841$,等等.

进一步,取动量轮润滑失效发生 $P(L = 1) = 1$,对其余根节点事件发生概率抽样 1000 次,可得动量轮可靠度的 1000 个样本数据,图 3 即为该组样本数据的直方图.

利用以上样本数据可得润滑失效情况下,动量轮可靠度置信水平为 0.70,0.75,0.80,0.85,

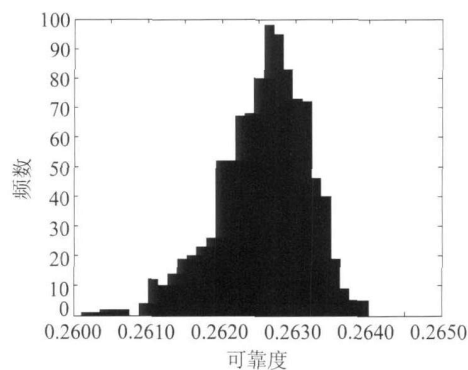


图 3 润滑失效情况下动量轮可靠度直方图

Fig. 3 Reliability histogram of momentum wheel in condition of lubricant failure

0. 90 ,0. 95 的置信区间下限估计 ,如表 2 所示.

表 2 润滑失效情况下动量轮可靠度置信下限

Table 2 Reliability confidence lower bound of momentum wheel in condition of lubricant failure

置信水平	$X = 0$ 的置信下限
0. 70	0. 262 3
0. 75	0. 262 2
0. 80	0. 262 1
0. 85	0. 262 0
0. 90	0. 261 7
0. 95	0. 261 4

2. 2 故障诊断^[6]

由于动量轮地面试验过程中 ,故障机理十分复杂以及不确定性因素极多 ,难以直接推断出其故障原因 ,必须通过对动量轮各个零部件进行解剖试验才能够找到原因 .因而通过贝叶斯网络对其进行故障诊断定位 ,将大大减小解剖试验的工作量 ,有着十分重要的意义 .

2. 2. 1 单一故障诊断推理

单一故障诊断推理就是在故障发生的情况下 ,求取故障最可能的一个原因 .

某型号动量轮试验中 ,发现动量轮长时间功耗过大 ,经调试之后 ,仍不能恢复正常 .利用本文建立的贝叶斯网络模型 ,在给定动量轮功耗过大的情况下 ,推理可得各根节点发生的验后概率 ,如表 3 所示 .可见动量轮功耗过大最可能原因是润滑失效 ,其次是摩擦力矩增大、轴承损伤等 .经过对动量轮的解剖分析 ,发现功耗过大确实是由润滑失效所造成 ,与分析结果相符 .

表 3 动量轮功耗过大情况下根节点故障的验后概率

Table 3 Posterior probability of fault of the root node in condition of momentum wheel's excessive energy consumption

故 障	概率	故 障	概率
轴承损伤	0. 049	漏气	0. 011
摩擦力矩增大	0. 095	机械损伤	0. 007
润滑失效	0. 671	机械接触	0. 015
电机本体坏	0. 002	轮体动不平衡	0. 024
控制器坏	0. 003	缓冲结构异常	0. 006
环氧粘结失效	0. 037	阻尼结构异常	0. 005

2. 2. 2 复合故障诊断推理

复合故障诊断推理就是在故障发生的情况下 ,求取故障所有可能原因的最可能的组合状态 .下面以动量轮停转为例进行分析 .

根据贝叶斯网络的条件独立性原理可知 ,动量轮停转发生与否 ,只与根节点事件 J 轴承损伤、 K 摩擦力矩增大、 M 电机本体坏、 N 控制器坏有关 ,而与其他根节点无关 .对此 ,复合故障诊断就是求取 J, K, M, N 的一个组合状态 ,使 $P(J, K, M, N| A = 1)$ 取最大值 .经过推理可得各个组合状态下的条件概率如表 4 所示 .由表可知 :

表 4 J, K, M, N 各个组合状态下的条件概率值

Table 4 Conditional probability of combinatorial state of J, K, M, N

J	K	M	N	$P(J, K, M, N A = 1)$
1	1	1	1	$1. 68 \times 10^{-8}$
1	1	1	0	$2. 52 \times 10^{-6}$
1	1	0	1	$1. 22 \times 10^{-6}$
1	1	0	0	$2. 26 \times 10^{-4}$
1	0	1	1	$9. 16 \times 10^{-6}$
1	0	1	0	$1. 16 \times 10^{-3}$
1	0	0	1	$5. 35 \times 10^{-4}$
1	0	0	0	$9. 10 \times 10^{-2}$
0	1	1	1	$5. 89 \times 10^{-6}$
0	1	1	0	$7. 10 \times 10^{-4}$
0	1	0	1	$3. 21 \times 10^{-4}$
0	1	0	0	$5. 26 \times 10^{-2}$
0	0	1	1	$2. 91 \times 10^{-3}$
0	0	1	0	$1. 85 \times 10^{-1}$
0	0	0	1	$5. 75 \times 10^{-2}$
0	0	0	0	$6. 09 \times 10^{-1}$

1) 当 J, K, M, N 四种故障模式仅有一个发生时,故障组合 $J = 0, K = 0, M = 1, N = 0$ 概率最大, $P(J = 0, K = 0, M = 1, N = 0 | A = 1) = 1.85 \times 10^{-1}$;

2) 当 J, K, M, N 四种故障模式有两个发生时,故障组合 $J = 0, K = 0, M = 1, N = 1$ 概率最大, $P(J = 0, K = 0, M = 1, N = 1 | A = 1) = 2.91 \times 10^{-3}$;

3) 当 J, K, L, M 四种故障模式有三个发生时,故障组合 $J = 1, K = 0, M = 1, N = 1$ 概率最大, $P(J = 1, K = 0, M = 1, N = 1 | A = 1) = 9.16 \times 10^{-6}$.

3.3 灵敏度分析

对动量轮贝叶斯网络模型,取 y 为动量轮的可靠度,即 $y = p(X = 0)$, x 为某个零部件故障模式的不发生概率,即 $x = p(N_i = 0)$,当只有一个零部件故障模式的不发生概率变化,其他的零部件故障模式不发生概率不变的情况下,由贝叶斯网络推理原理,可得

$$y = ax + b \tag{8}$$

本文定义参数 a 为灵敏度,也就是动量轮可靠度相对于零部件故障模式不发生概率的变化率^[7-8].

由式(8)计算可得零部件故障模式节点的灵敏度函数,表 5 所示为参数 a 和 b 的值.可见零部件故障模式润滑失效的灵敏度最大,是最重要的

表 5 零部件故障模式节点灵敏度参数
Table 5 Sensitivity parameter of part's failure mode nodes

参 数		
节 点	a	b
J 轴承损伤	0.541	0.373
K 摩擦力矩增大	0.518	0.398
L 润滑失效	0.832	0.111
M 电机本体坏	0.439	0.473
N 控制器坏	0.385	0.527
O 环氧粘结失效	0.560	0.354
P 漏气	0.331	0.584
Q 机械损伤	0.420	0.494
R 机械接触	0.364	0.552
S 轮体动不平衡	0.165	0.748
T 缓冲结构异常	0.141	0.770
U 阻尼结构异常	0.097	0.814

故障模式,其次是环氧粘结失效、轴承损伤等.由于灵敏度较大的零部件故障模式的发生概率较小的变化就能导致动量轮可靠度较大的变化,因而,在动量轮的可靠性设计和运行监控中应予以重视.

3 小 结

针对动量轮地面试验有着大量复杂信息的特点,提出了利用贝叶斯网络融合多种试验信息的动量轮可靠性建模与分析方法,实例分析表明,该方法有效解决了动量轮地面试验可靠性分析与评估等难题,为动量轮地面可靠性试验提供了理论指导.本文的理论与方法还可以推广应用到卫星上其他与动量轮有着类似性质的机电部件的可靠性分析中.

参考文献:

[1] Berge J O. Statistical decision theory and bayesian analysis [M]. New York: Springer-Verlag, 1985.

[2] Heckerman D. A tutorial on learning with Bayesian networks [R]. Washington: Microsoft Research, 1996.

[3] Langseth H. Bayesian networks with applications in reliability analysis [D]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2002.

[4] Tchangani A P. Reliability analysis using Bayesian networks [J]. Studies in Informatics and Control, 2001, 10 (3): 181-188.

[5] Yu D C, Nguyen T C, Haddawy P. Bayesian network model for reliability assessment of power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14 (2): 426-432.

[6] Przytula K W, Thompson D. Construction of Bayesian network for diagnostics [C]// IEEE Aerospace Conference Proceedings. Big Sky, M. T., United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2000: 193-200.

[7] Castillo E F, Gutierrez J M, Hadi A S. Sensitivity analysis in discrete Bayesian networks [C]// IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part A - Systems and Humans. Piscataway, N. J., United States: IEEE, 1997: 412-423.

[8] Laskey K B. Sensitivity analysis for probability assessments in Bayesian networks [C]// IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Piscataway, N. J., United States: IEEE, 1995: 901-909.