

一种新型动态贝叶斯网络分析方法

陈东宁^{1,2} 侯安农³ 姚成玉³ 侯鑫^{1,2} 邢然³

1. 燕山大学河北省重型机械流体动力传输与控制重点实验室, 秦皇岛, 066004

2. 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室(燕山大学), 秦皇岛, 066004

3. 燕山大学河北省工业计算机控制工程重点实验室, 秦皇岛, 066004

摘要:为充分发挥 T-S 动态故障树和动态贝叶斯网络分别在分析建模与推理计算方面的优势, 提出了一种新型动态贝叶斯网络分析方法——基于 T-S 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法。将 T-S 动态故障树转化为动态贝叶斯网络有向无环图, 再将 T-S 动态门及其描述规则转化为动态贝叶斯网络条件概率表, 进而提出了正向推理叶节点失效概率、反向推理根节点后验概率和求解根节点概率重要度、关键重要度、风险业绩值、风险降低值、微分重要度与灵敏度的新型动态贝叶斯网络算法。通过与基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法和静态贝叶斯网络分析方法对比, 验证了所提方法的可行性。最后, 用所提方法对液压缸同步系统进行可靠性分析, 计算得到系统失效概率、根节点后验概率、重要度与灵敏度, 为提高系统可靠性和进行故障诊断提供依据。

关键词:动态贝叶斯网络; T-S 动态故障树; 重要度; 灵敏度; 可靠性分析

中图分类号: TB114.3; TH137.7

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2020.12.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A Novel Dynamic Bayesian Network Analysis Method

CHEN Dongning^{1,2} HOU Annong³ YAO Chengyu³ HOU Xin^{1,2} XING Ran³

1. Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science (Yanshan University), Ministry of Education of China, Qinhuangdao, Hebei, 066004

3. Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

Abstract: In order to give full play to the advantages of T-S dynamic fault tree and dynamic Bayesian network in analysis modeling and reasoning calculation respectively, a novel dynamic Bayesian network analysis method, namely dynamic Bayesian network analysis method, was proposed based on T-S dynamic fault tree. First, a T-S dynamic fault tree was converted into a dynamic Bayesian network directed acyclic graph and a T-S dynamic gate and the description rules were converted into a dynamic Bayesian network conditional probability table. Then, the algorithm of novel dynamic Bayesian network was proposed for forward reasoning leaf node failure probability, backward reasoning root node posterior probability and solving root node probability importance measure, criticality importance measure, risk achievement worth, risk reduction worth, differential importance measure and sensitivity. The feasibility of the proposed method was verified by comparing with dynamic Bayesian network analysis method based on Dugan dynamic fault tree and static Bayesian network analysis method. Finally, the reliability of hydraulic cylinder synchronous system was analyzed by the method proposed herein. Failure probability of the system, posterior probability, importance measures and sensitivities of root nodes were obtained, which may provide basis for improving system reliability and fault diagnosis.

Key words: dynamic Bayesian network; T-S dynamic fault tree; importance measure; sensitivity; reliability analysis

收稿日期: 2019-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975508, 51675460);
中国博士后科学基金资助项目(2017M621101)

0 引言

故障树分析方法是一种用于可靠性分析^[1]、

故障诊断^[2]的基础性方法,得到了广泛的研究和应用。贝叶斯网络具有双向推理的特点,既可以正向推理得到叶节点的失效概率,为系统提供可靠性指标,又可以反向推理得到根节点的后验概率,为故障诊断提供依据^[3],因此贝叶斯网络分析方法同样在可靠性分析^[4-5]和故障诊断^[6]中广泛应用。利用故障树与贝叶斯网络综合求解,可以充分发挥两者在分析建模与推理计算方面的优势^[7]。

传统故障树与贝叶斯网络结合的主要研究内容有:传统故障树向贝叶斯网络的转化(二态系统^[8]、多态系统^[9]),基于传统故障树的贝叶斯网络重要度(概率重要度、结构重要度、关键重要度)^[10]和灵敏度^[11]。传统故障树难以刻画系统全部的静态失效行为,因而转化后的贝叶斯网络也存在不能刻画全部静态失效行为的局限。针对传统故障树及其贝叶斯网络分析方法的上述不足,人们研究了 T-S 故障树分析方法^[12]和基于 T-S 故障树的贝叶斯网络分析方法^[13-14]。

DUGAN 等^[15]针对传统故障树无法刻画分析动态失效行为这一科学问题,创立了 Dugan 动态故障树分析方法。BOUDALI 等^[16]提出了基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法。此后人们对基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法开展研究,文献^[17]给出优先与门、备件门、顺序相关门和功能相关门向动态贝叶斯网络的转化方法;文献^[18]研究了存在公共备件的备件门和层叠功能相关门向动态贝叶斯网络的转化方法;用动态贝叶斯网络求解 Dugan 动态故障树出现了用确定性函数替代条件概率表^[19]和复合梯形积分^[20]等方法。

然而,上述方法都是基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法,受到 Dugan 动态故障树无法描述任意形式的静动态失效行为的限制。针对 Dugan 动态故障树分析方法的不足,我们提出了 T-S 动态故障树分析方法^[21],增强了静动态失效行为的刻画表达能力。本文为充分发挥 T-S 动态故障树和动态贝叶斯网络分别在系统分析建模与推理计算求解方面的优势,提出一种新型动态贝叶斯网络分析方法——基于 T-S 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法:①基于 T-S 动态故障树构造动态贝叶斯网络,提出正向推理叶节点失效概率、反向推理根节点后验概率的求

解算法;②鉴于部件重要度与系统失效概率共同构成了定量分析且 Dugan 动态故障树及其动态贝叶斯网络尚无完整的重要度研究文献,提出新型动态贝叶斯网络的概率重要度、关键重要度、风险业绩值、风险降低值、微分重要度与灵敏度算法,为发现系统薄弱环节和改善系统可靠性提供依据。

1 新型动态贝叶斯网络分析方法的提出

T-S 动态故障树可以描述任意形式的静动态失效行为,因此将 T-S 动态故障树转化为动态贝叶斯网络有向无环图,将 T-S 动态门及其描述规则转化为动态贝叶斯网络条件概率表,提出新型动态贝叶斯网络算法。

1.1 T-S 动态故障树

T-S 动态故障树由事件和 T-S 动态门组成,事件包括基本事件、中间事件和顶事件,T-S 动态门用于描述事件之间存在的静动态逻辑关系。如图 1 所示, $x_1 \sim x_3$ 为基本事件, y_1 为中间事件, y 为顶事件, G_1 门和 G_2 门为 T-S 动态门。

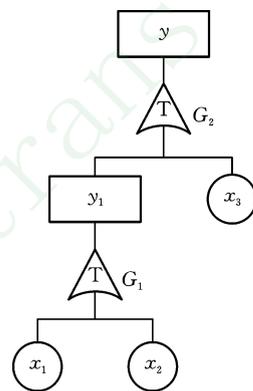


图 1 T-S 动态故障树

Fig.1 T-S dynamic fault tree

T-S 动态故障树通过 T-S 动态门及其描述规则可描述任意静动态失效行为,无限逼近现实系统的失效行为,如图 2 所示。

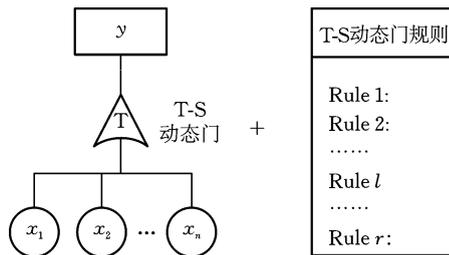


图 2 T-S 动态门及其描述规则

Fig.2 T-S dynamic gate and description rules

T-S 动态故障树通过 T-S 动态门及其描述规则可描述任意静动态失效行为,解决了现有故障树分析方法的不足。为结合 T-S 动态故障树在任意静动态失效行为分析建模与动态贝叶斯网络在推理计算方面的优势,基于 T-S 动态故障树构造动态贝叶斯网络。

1.2 基于 T-S 动态故障树构造动态贝叶斯网络

在贝叶斯网络的基础上引入时间节点得到动态贝叶斯网络,动态贝叶斯网络同样由一个有向无环图和若干条件概率表组成。基于 T-S 动态故障树构造动态贝叶斯网络分为两个步骤:T-S 动态故障树转化为动态贝叶斯网络有向无环图;T-S 动态门及其描述规则转化为动态贝叶斯网络条件概率表。

1.2.1 动态贝叶斯网络有向无环图

将 T-S 动态故障树转化为动态贝叶斯网络有向无环图,如图 3 所示。输入事件和输出事件分别对应动态贝叶斯网络的父节点和子节点,基本事件、中间事件和顶事件分别对应动态贝叶斯网络的根节点、中间节点和叶节点。

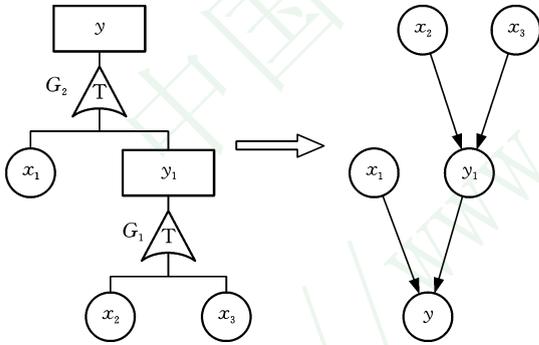


图 3 T-S 动态故障树转化为动态贝叶斯网络有向无环图
Fig.3 Translation of T-S dynamic fault tree into dynamic Bayesian network directed acyclic graph

1.2.2 动态贝叶斯网络条件概率表

将 T-S 动态门描述规则转化为动态贝叶斯网络条件概率表。

假定系统任务时间 T_M 平均划分为 m 段,时间间隔 $\Delta = T_M/m$,则整个时间轴划分为 $[0, \Delta), [\Delta, 2\Delta), \dots, [(m-1)\Delta, m\Delta), [m\Delta, +\infty)$,分别记为时间段 1, 2, $\dots, m, m+1$ 。父节点 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 在时间段 $j_i (j_i=1, 2, \dots, m, m+1)$ 发生失效,子节点 y 在时间段 $j_y (j_y=1, 2, \dots, m, m+1)$ 的失效状态 $y^{[j_y]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ ($b_y=1, 2, \dots, k_y$),且 $0 \leq S_y^{(1)} < S_y^{(2)} < \dots < S_y^{(k_y)} \leq 1$ 。

当 $m=2, n=2$ 时,规则总数 $r = (m+1)^n = 9$,将 T-S 动态门描述规则转化为动态贝叶斯网络条件概率表,如表 1 所示。

表 1 动态贝叶斯网络条件概率表

Tab.1 Conditional probability table of dynamic Bayesian network

规则	x_1	x_2	$P(y^{[j_y]}=1 x_1, x_2)$		
			1	2	3
1	1	1	$P_{(1)}(y^{[1]})$	$P_{(1)}(y^{[2]})$	$P_{(1)}(y^{[3]})$
2	1	2	$P_{(2)}(y^{[1]})$	$P_{(2)}(y^{[2]})$	$P_{(2)}(y^{[3]})$
3	1	3	$P_{(3)}(y^{[1]})$	$P_{(3)}(y^{[2]})$	$P_{(3)}(y^{[3]})$
4	2	1	$P_{(4)}(y^{[1]})$	$P_{(4)}(y^{[2]})$	$P_{(4)}(y^{[3]})$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
l	j_1	j_2	$P_{(l)}(y^{[1]})$	$P_{(l)}(y^{[2]})$	$P_{(l)}(y^{[3]})$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9	3	3	$P_{(9)}(y^{[1]})$	$P_{(9)}(y^{[2]})$	$P_{(9)}(y^{[3]})$

以规则 l 为例,表示父节点 x_1 在时间段 j_1 发生失效、 x_2 在时间段 j_2 发生失效,则子节点 y 在时间段 1,2,3 的失效状态 $y^{[1]}, y^{[2]}, y^{[3]}$ 为 $S_y^{(b_y)}$ 的失效概率分别为 $P_{(l)}(y^{[1]}), P_{(l)}(y^{[2]}), P_{(l)}(y^{[3]})$ 。

1.3 新型动态贝叶斯网络算法

在基于 T-S 动态故障树构造动态贝叶斯网络的基础上,提出正向推理叶节点失效概率,反向推理根节点后验概率、重要度与灵敏度的新型动态贝叶斯网络算法。

1.3.1 叶节点失效概率

根节点 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 在时间段 $j_i (j_i=1, 2, \dots, m, m+1)$ 的故障状态为 $x_i^{[j_i]}$,中间节点 y_1 在时间段 $j_{y_1} (j_{y_1}=1, 2, \dots, m, m+1)$ 的故障状态为 $y_1^{[j_{y_1}]}$,中间节点 y_2, y_3 等以此类推,叶节点 y 在时间段 $j_y (j_y=1, 2, \dots, m, m+1)$ 的故障状态为 $y^{[j_y]}$ 。根节点 x_i 在时间段 j_i 的失效概率 $P(x_i^{[j_i]}=1)$ 为

$$P(x_i^{[j_i]}=1) = \int_{(j_i-1)\Delta}^{j_i\Delta} f_i(t) dt = \int_{(j_i-1)\Delta}^{j_i\Delta} \frac{dF_i(t)}{dt} dt = \frac{(\exp(\lambda_i\Delta) - 1)\exp(-\lambda_i j_i \Delta)}{\lambda_i} \quad (1)$$

式中, $f_i(t)$ 为下级事件 x_i 的失效概率密度函数;根节点 x_i 不可靠度函数为 $F_i(t) = 1 - \exp(-\lambda_i t)$; λ_i 为根节点 x_i 的失效率。

假设动态贝叶斯网络的所有根节点为 $X = \{x_1^{[j_1]}, x_2^{[j_2]}, \dots, x_n^{[j_n]}\}$,所有中间节点为 $Y = \{y_1^{[j_{y_1}]}, y_2^{[j_{y_2}]}, \dots, y_k^{[j_{y_k}]}\}$,叶节点为 y 。已知根节点在时间段 j_i 的失效概率,可正向推理求得叶节点 y 在时间段 j_y 的失效概率为

$$P(y^{[j_y]} = 1) = \sum_{x_1^{[j_1]}, \dots, x_n^{[j_n]}, y_1^{[j_{y_1}]}, \dots, y_k^{[j_{y_k}]}} P(x_1^{[j_1]}, \dots, x_n^{[j_n]}, y_1^{[j_{y_1}]}, \dots, y_k^{[j_{y_k}]}, y^{[j_y]} = 1) \quad (2)$$

1.3.2 根节点后验概率

动态贝叶斯网络具有反向推理的特点,已知叶节点在某一时间段的失效概率,可反向推理求得对应根节点的后验概率。动态贝叶斯网络的根节点后验概率为

$$P(x_i = 1 | y^{[j_y]} = 1) = \frac{P(x_i = 1, y^{[j_y]} = 1)}{\sum_{j_y=1}^m P(y^{[j_y]} = 1)} \quad (3)$$

式中, $P(y^{[j_y]} = 1)$ 为叶节点 y 在时间段 j_y 的失效概率; $P(x_i = 1, y^{[j_y]} = 1)$ 为根节点 x_i 在任务时间内发生失效和叶节点 y 在时间段 j_y 发生失效的联合概率。

根节点 x_i 在任务时间内发生失效时的后验概率为

$$P(x_i = 1 | y = 1) = \sum_{j_y=1}^m P(x_i = 1 | y^{[j_y]} = 1) \quad (4)$$

1.3.3 根节点重要度与灵敏度

在进行系统可靠性分析时,系统中的部件往往呈现出非均等重要性,重要度和灵敏度是定量分析部件在系统中重要程度的指标。通过重要度和灵敏度分析可为发现系统薄弱环节和改善系统可靠性提供依据^[11,22]。

(1) 概率重要度。概率重要度表示部件(根节点)状态变化引起的系统失效概率的变化程度,反映了部件在由正常到失效时引起系统失效概率变化的大小^[23]。基于此,定义本文所提动态贝叶斯网络的概率重要度算法。当叶节点 y 在时间段 j_y 发生失效时,根节点 x_i 的概率重要度

$$I^{Pr}(x_i, y^{[j_y]} = 1) = P(y^{[j_y]} = 1 | x_i = 1) - P(y^{[j_y]} = 1 | x_i = 0) \quad (5)$$

式中, $P(y^{[j_y]} = 1 | x_i = 1)$ 为根节点 x_i 发生失效时叶节点 y 在时间段 j_y 发生失效的条件概率; $P(y^{[j_y]} = 1 | x_i = 0)$ 为根节点 x_i 正常时叶节点 y 在时间段 j_y 发生失效的条件概率。

根节点 x_i 在任务时间内的概率重要度

$$I^{Pr}(x_i) = \sum_{j_y=1}^m I^{Pr}(x_i = 1, y^{[j_y]} = 1) \quad (6)$$

(2) 关键重要度。关键重要度表示部件(根节点)失效概率的变化率与引起系统失效概率的变化率的比值^[24]。基于此,定义本文所提动态贝叶斯网络的关键重要度算法。当叶节点 y 在时间段 j_y 发生失效时,根节点 x_i 的关键重要度

$$I^{Cr}(x_i, y^{[j_y]} = 1) =$$

$$\frac{P(x_i = 1)}{\sum_{j_y=1}^m P(y^{[j_y]} = 1)} I^{Pr}(x_i = 1, y^{[j_y]} = 1) \quad (7)$$

式中, $P(x_i = 1)$ 为根节点 x_i 发生失效的概率。根节点 x_i 在任务时间内的关键重要度

$$I^{Cr}(x_i) = \frac{1}{m} \sum_{j_y=1}^m I^{Cr}(x_i^{[j_i]} = 1, y^{[j_y]} = 1) \quad (8)$$

(3) 风险业绩值。VESELY 等^[25]提出了对系统概率风险评估的风险业绩值和风险降低值。周忠宝等^[26]将传统故障树风险业绩值和风险降低值引入静态贝叶斯网络。风险业绩值是指在根节点发生失效的情况下系统不可靠度与根节点故障状态为初始值下系统不可靠度的比值。基于此,定义本文所提动态贝叶斯网络的风险业绩值算法。当叶节点 y 在时间段 j_y 发生失效时,根节点 x_i 的风险业绩值

$$I^{RAW}(x_i, y^{[j_y]} = 1) = \frac{P(y^{[j_y]} = 1 | x_i = 1)}{\sum_{j_y=1}^m P(y^{[j_y]} = 1)} \quad (9)$$

根节点 x_i 在任务时间内的风险业绩值

$$I^{RAW}(x_i) = \sum_{j_y=1}^m I^{RAW}(x_i = 1, y^{[j_y]} = 1) \quad (10)$$

(4) 风险降低值。风险降低值是指系统的不可靠度与根节点处于正常状态时系统不可靠度的比值^[25]。基于此,定义本文所提动态贝叶斯网络的风险降低值算法。当叶节点 y 在时间段 j_y 发生失效时,根节点 x_i 的风险降低值

$$I^{RRW}(x_i, y^{[j_y]} = 1) = \frac{P(y^{[j_y]} = 1)}{\sum_{j_y=1}^m P(y^{[j_y]} = 1 | x_i = 0)} \quad (11)$$

根节点 x_i 在任务时间内的风险降低值

$$I^{RRW}(x_i) = \sum_{j_y=1}^m I^{RRW}(x_i = 1, y^{[j_y]} = 1) \quad (12)$$

(5) 微分重要度。文献^[27]针对传统故障树提出微分重要度,它是基本事件可靠性变化引起系统可靠性变化与所有基本事件可靠性变化引起系统可靠性变化总和的比值^[28]。基于此,定义本文所提动态贝叶斯网络的微分重要度算法。当根节点 x_i 在时间段 j_i 发生失效,叶节点 y 在时间段 j_y 发生失效时,根节点 x_i 的微分重要度

$$I^{DIM}(x_i, y^{[j_y]} = 1) = \frac{\frac{\partial P(y^{[j_y]} = 1)}{\partial P(x_i^{[j_i]} = 1)} P(x_i = 1)}{\sum_{j_i=1}^n \frac{\partial P(y^{[j_y]} = 1)}{\partial P(x_j^{[j_j]} = 1)} P(x_j = 1)} \quad (13)$$

根节点 x_i 在任务时间内的微分重要度为

$$I^{DIM}(x_i) = \sum_{j_y=1}^m I^{DIM}(x_i = 1, y^{[j_y]} = 1) \quad (14)$$

(6)灵敏度。灵敏度的大小反映了叶节点随根节点失效状态变化的敏感程度,因此,灵敏度分析广泛应用于系统的特征分析和异常特征发现方面,通过灵敏度评估可以发现影响系统失效的高风险事件,为提高系统的可靠性提供依据^[14]。基于此,定义本文所提动态贝叶斯网络的灵敏度算法。当叶节点 y 在时间段 j_y 发生失效时,根节点 x_i 的灵敏度

$$S(x_i, y^{[j_y]} = 1) = \frac{I^{\text{Pr}}(x_i = 1, y^{[j_y]} = 1)}{\sum_{j_y=1}^m P(y^{[j_y]} = 1 | x_i = 0)} \quad (15)$$

根节点 x_i 在任务时间内的灵敏度

$$S(x_i) = \sum_{j_y=1}^m S(x_i = 1, y^{[j_y]} = 1) \quad (16)$$

2 新型动态贝叶斯网络分析方法的验证与应用

为验证新型动态贝叶斯网络及重要度与灵敏度分析方法的可行性,将该方法与基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法、静态贝叶斯网络分析方法进行对比。

2.1 与基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法对比

以心脏辅助系统和数字飞控计算机系统为例,用新型动态贝叶斯网络分析方法与基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法进行对比。

2.1.1 心脏辅助系统

用新型动态贝叶斯网络分析方法求解心脏辅助系统 (hypothetical cardiac assist system, HCAS) 的失效概率。建造心脏辅助系统 T-S 动态故障树,如图 4 所示。

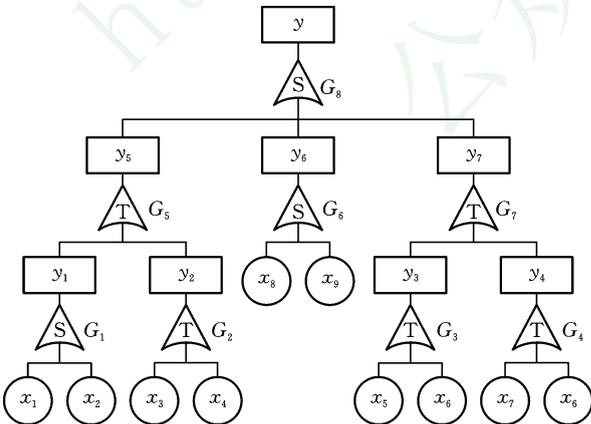


图 4 心脏辅助系统 T-S 动态故障树
Fig.4 T-S dynamic fault tree of HCAS

图 4 中, $G_1 \sim G_8$ 为 T-S 动态门,表示的逻辑关系分别为或门、温备件门、冷备件门、冷备件门、功能相关门、与门、优先与门、或门。 y 为顶事件,表示心脏辅助系统。 $y_1 \sim y_7$ 为中间事件,分别表示交叉开关模块、CPU 单元、血泵模块的子系统 1、血泵模块的子系统 2、系统控制、马达模块、血泵模块。基本事件 $x_i (i=1, 2, \dots, 9)$ 的失效率 λ_i 如表 2 所示。基本事件 x_i 的不可靠度函数 $F_i(t) = 1 - \exp(-\lambda_i t)$ 。

表 2 心脏辅助系统基本事件失效率

Tab.2 Failure rates of HCAS basic events $10^{-6}/h$

基本事件 x_i	事件名称	失效率 λ_i
x_1	交叉开关	1
x_2	监管系统	2
x_3	CPU	4
x_4	备用 CPU	4
x_5	血泵 1	5
x_6	备用血泵	5
x_7	血泵 2	5
x_8	马达 1	5
x_9	马达 2	1

将 T-S 动态故障树转化为图 5 所示的动态贝叶斯网络。T-S 动态故障树的基本事件、中间事件和顶事件分别对应动态贝叶斯网络的根节点、中间节点和叶节点。

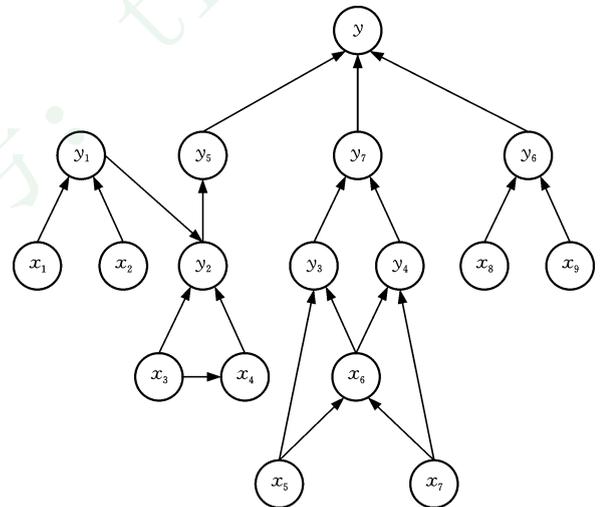


图 5 心脏辅助系统动态贝叶斯网络

Fig.5 Dynamic Bayesian network of HCAS

将 T-S 动态门描述规则转化为动态贝叶斯网络条件概率表。其中, G_2 门表示的逻辑关系为温备件门,当任务时间划分段数 $m=5$ 时,中间节点 y_2 的条件概率表见表 3。

表 3 中间节点 y_2 的条件概率表(心脏辅助系统)

Tab.3 Conditional probability table of intermediate node y_2 (HCAS)

序号	x_3	x_4	$P(y_2^{[jy_2]}=1 x_3, x_4)$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	2	0	1	0	0	0	0
3	1	3	0	0	1	0	0	0
4	1	4	0	0	0	1	0	0
5	1	5	0	0	0	0	1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
35	6	5	0	0	0	0	0	1
36	6	6	0	0	0	0	0	1

G_3, G_4 门表示的逻辑关系为冷备件门,当任务时间划分段数 $m=5$ 时,中间节点 $y_3(y_4)$ 的条件概率表如表 4 所示。

表 4 中间节点 $y_3(y_4)$ 的条件概率表(心脏辅助系统)

Tab.4 Conditional probability table of intermediate node $y_3(y_4)$ (HCAS)

序号	$x_5(x_7)$	x_6	$P(y_3^{[jy_3]}=1 x_5, x_6)(P(y_4^{[jy_4]}=1 x_7, x_6))$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	2	0	1	0	0	0	0
2	1	3	0	0	1	0	0	0
3	1	4	0	0	0	1	0	0
4	1	5	0	0	0	0	1	0
5	1	6	0	0	0	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	5	6	0	0	0	0	0	1
16	6	6	0	0	0	0	0	1

再将其他 T-S 动态门描述规则同样转化为条件概率表,此处不一一列举。当任务时间 $T_M=100\ 000\ h$ 、任务时间划分段数 m 为 1 和 5 时,根据节点之间的条件概率表和式(2),求得系统的失效概率如表 5 所示,并与文献[16]的结果对比。

表 5 心脏辅助系统的失效概率

Tab.5 Failure probabilities of HCAS

任务时间划分段数 m	基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络 ^[16]	本文方法
1	0.329 535	0.329 535
5	0.363 672	0.363 672

由表 5 可以看出,新型动态贝叶斯网络分析方法求解的结果与基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法所得的结果相同,验证了所提出的方法的可行性。

2.1.2 数字飞控计算机系统

本文用新型动态贝叶斯网络分析方法求解数

字飞控计算机系统的失效概率。建造数字飞控计算机系统 T-S 动态故障树,如图 6 所示。

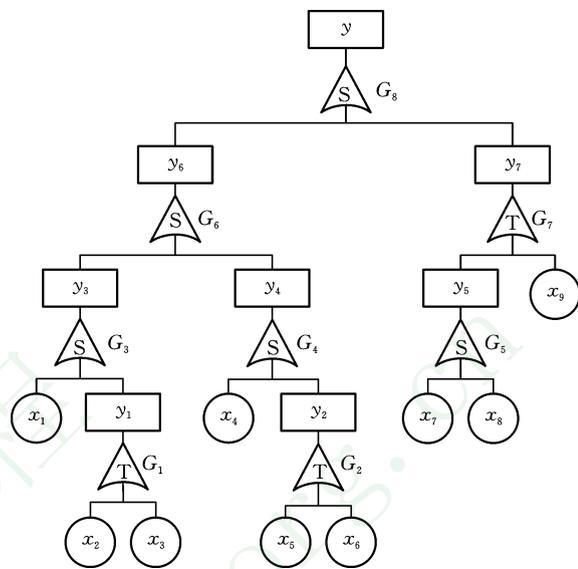


图 6 数字飞控计算机系统 T-S 动态故障树

Fig.6 T-S dynamic fault tree of digital aviation control computer system

图 6 中, $G_1 \sim G_8$ 为 T-S 动态门,表示的逻辑关系依次为温备件门、温备件门、或门、或门、与门、与门、功能相关门、与门。 y 为顶事件,表示数字飞控计算机系统。 $y_1 \sim y_7$ 为中间事件,依次表示软件系统 1、软件系统 2、主控制系统 1、主控制系统 2、旁路控制系统、主控制系统、主控制系统与旁路控制系统转换异常。基本事件 $x_i (i=1, 2, \dots, 9)$ 的失效率 λ_i 如表 6 所示。

表 6 数字飞控计算机系统的基本事件失效率

Tab.6 Failure rates of digital aviation control computer system basic events $10^{-4}/h$

基本事件 x_i	事件名称	失效率 λ_i
x_1	硬件系统 1	10
x_2	主软件系统 1	5
x_3	备用软件系统 1	5
x_4	硬件系统 2	10
x_5	主软件系统 2	5
x_6	备用软件系统 2	5
x_7	旁路控制系统 1	0.1
x_8	旁路控制系统 2	0.1
x_9	接口单元	0.01

将 T-S 动态故障树转化为图 7 所示的动态贝叶斯网络。T-S 动态故障树的基本事件、中间事件和顶事件分别对应动态贝叶斯网络的根节点、中间节点和叶节点。

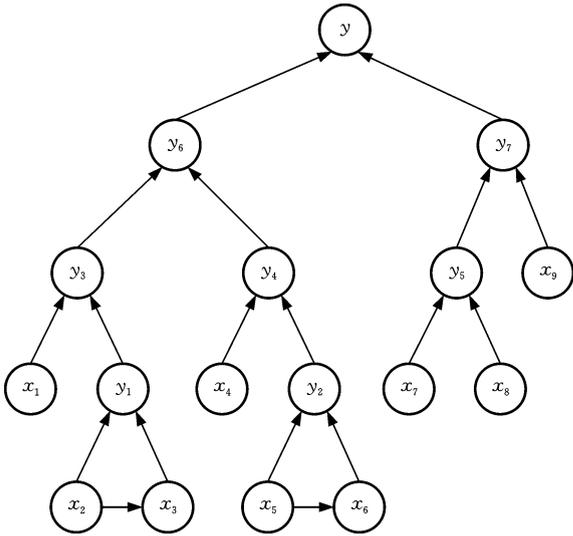


图 7 数字飞控计算机系统动态贝叶斯网络

Fig.7 Dynamic Bayesian network of digital aviation control computer system

将 T-S 动态门规则转化为动态贝叶斯网络条件概率表。例如, G_1 门表示的逻辑关系为温备件门, 将其规则表转化为条件概率表, 中间节点 y_1 的条件概率表见表 7。 G_7 门表示的逻辑关系为功能相关门, 将其规则表转化为条件概率表, 中间节点 y_7 的条件概率表见表 8。

表 7 中间节点 y_1 的条件概率表(数字飞控计算机系统)
Tab.7 Conditional probability table of intermediate node y_1 (digital aviation control computer system)

序号	x_2	x_3	$P(y_1^{[j]} y_1=1 x_2, x_3)$							
			1	2	3	...	50	51		
1	1	1	1	0	0	...	0	0		
2	1	2	0	1	0	...	0	0		
3	1	3	0	0	1	...	0	0		
4	1	4	0	0	0	...	0	0		
5	1	5	0	0	0	...	0	0		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮		
2 600	51	50	0	0	0	...	0	1		
2 601	51	51	0	0	0	...	0	1		

表 8 中间节点 y_7 的条件概率表(数字飞控计算机系统)
Tab.8 Conditional probability table of intermediate node y_7 (digital aviation control computer system)

序号	x_9	y_5	$P(y_7^{[j]} y_7=1 x_9, y_5)$							
			1	2	3	...	50	51		
1	1	2	1	0	0	...	0	0		
2	1	3	1	0	0	...	0	0		
3	1	4	1	0	0	...	0	0		
4	1	4	1	0	0	...	0	0		
5	1	5	1	0	0	...	0	0		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮		
2 600	51	50	0	0	0	...	1	0		
2 601	51	51	0	0	0	...	0	1		

根据节点之间的条件概率表和式(2), 求得系统失效概率, 并与文献[29]及用 Markov 链求解的 Dugan 动态故障树分析方法对比, 如表 9 所示。

表 9 数字飞控计算机系统的失效概率

Tab.9 Failure probabilities of digital aviation control computer system

任务时间 T_M (h)	叶节点失效概率 $P(y)$		
	Markov 链 ^[29]	基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络 ^[29]	本文方法
5	$1.246\ 25 \times 10^{-10}$	$1.248\ 02 \times 10^{-10}$	$1.245\ 60 \times 10^{-10}$
10	$9.939\ 93 \times 10^{-10}$	$9.948\ 08 \times 10^{-10}$	$9.937\ 96 \times 10^{-10}$
15	$3.344\ 58 \times 10^{-9}$	$3.345\ 32 \times 10^{-9}$	$3.343\ 93 \times 10^{-9}$
20	$7.903\ 85 \times 10^{-9}$	$7.900\ 87 \times 10^{-9}$	$7.902\ 31 \times 10^{-9}$
25	$1.539\ 02 \times 10^{-8}$	$1.537\ 52 \times 10^{-8}$	$1.538\ 73 \times 10^{-8}$
30	$2.651\ 32 \times 10^{-8}$	$2.647\ 14 \times 10^{-8}$	$2.650\ 80 \times 10^{-8}$
35	$4.197\ 30 \times 10^{-8}$	$4.188\ 19 \times 10^{-8}$	$4.196\ 49 \times 10^{-8}$
40	$6.246\ 11 \times 10^{-8}$	$6.228\ 83 \times 10^{-8}$	$6.244\ 92 \times 10^{-8}$
45	$8.865\ 98 \times 10^{-8}$	$8.836\ 18 \times 10^{-8}$	$8.864\ 30 \times 10^{-8}$
50	$1.212\ 43 \times 10^{-7}$	$1.207\ 63 \times 10^{-7}$	$1.212\ 20 \times 10^{-7}$

由表 9 可以看出, 本文方法与基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法所求结果一致, 且结果更接近 Markov 链求解 Dugan 动态故障树分析方法, 误差更小。

通过对比分析验证了所提新型动态贝叶斯网络分析方法的可行性, 并且与基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法相比, 所提方法可以描述任意静态失效行为。

2.2 重要度与灵敏度的验证

为验证所提出的新型动态贝叶斯网络重要度与灵敏度算法的可行性, 将所提方法与静态贝叶斯网络分析方法进行对比。

2.2.1 静态贝叶斯网络的重要度与灵敏度

以图 8 所示的贝叶斯网络为例, 假设任务时间 $T_M=5\ 000\ h$, 各节点寿命均服从指数分布, 根节点 x_1, x_2, x_3 的失效率分别为 $2 \times 10^{-6}/h, 5 \times 10^{-6}/h, 8 \times 10^{-6}/h$ 。

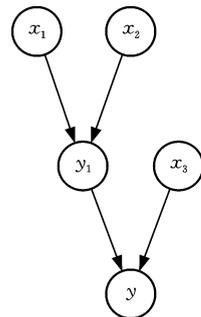


图 8 贝叶斯网络

Fig.8 Bayesian network

根据节点之间的逻辑关系构建节点的条件概率率表(表 10、表 11)。

表 10 中间节点 y_1 的条件概率率表(静态贝叶斯网络)

Tab.10 Conditional probability table of intermediate node y_1 (static Bayesian network)

序号	x_1	x_2	$P(y_1^{[j_{y_1}]}=1 x_1, x_2)$	
			0	1
1	0	0	1	0
2	0	1	0	1
3	1	0	0	1
4	1	1	0	1

表 11 叶节点 y 的条件概率率表(静态贝叶斯网络)

Tab.11 Conditional probability table of leaf node y (static Bayesian network)

序号	x_3	y_1	$P(y^{[j_y]}=1 x_3, y_1)$	
			0	1
1	0	0	1	0
2	0	1	1	0
3	1	0	1	0
4	1	1	0	1

由静态贝叶斯网络算法可以求得叶节点 y 在任务时间内的失效概率为

$$P(y=1) = P(x_1)P(x_3) + P(x_2)P(x_3) - P(x_1)P(x_2)P(x_3) = 0.00135$$

根据静态贝叶斯网络分析方法可以求得该系统根节点的后验概率为

$$P(x_1=1|y=1) = \frac{P(x_1=1, y=1)}{P(y=1)} = 0.28929$$

$$P(x_2=1|y=1) = \frac{P(x_2=1, y=1)}{P(y=1)} = 0.71785$$

$$P(x_3=1|y=1) = \frac{P(x_3=1, y=1)}{P(y=1)} = 1$$

根据文献[10-11, 26]可得静态贝叶斯网络的概率重要度 $I^{Pr}(x_i)$ 、关键重要度 $I^{Cr}(x_i)$ 、风险业绩值 $I^{RAW}(x_i)$ 、风险降低值 $I^{RRW}(x_i)$ 与灵敏度 $S(x_i)$:

$$I^{Pr}(x_i) = P(y=1|x_i=1) - P(y=1|x_i=0) \quad (17)$$

$$I^{Cr}(x_i) = \frac{P(x_i=1)}{P(y=1)} I^{Pr}(x_i) \quad (18)$$

$$I^{RAW}(x_i) = \frac{P(y=1|x_i=1)}{P(y=1)} \quad (19)$$

$$I^{RRW}(x_i) = \frac{P(y=1)}{P(y=1|x_i=0)} \quad (20)$$

$$S(x_i) = \frac{I^{Pr}(x_i)}{P(y=1|x_i=0)} \quad (21)$$

基于传统故障树微分重要度定义静态贝叶斯网络的微分重要度 $I^{DIM}(x_i)$ 如下:

$$I^{DIM}(x_i) = \frac{\frac{\partial P(y=1)}{\partial P(x_i=1)} P(x_i=1)}{\sum_{j=1}^n \frac{\partial P(y=1)}{\partial P(x_j=1)} P(x_j=1)} \quad (22)$$

根据式(17)~式(22)求得各根节点的重要度与灵敏度,如表 12 所示。

表 12 根节点的重要度与灵敏度(静态贝叶斯网络)

Tab.12 Importance measures and sensitivities of root nodes (static Bayesian network)

根节点	概率重要度 $I^{Pr}(x_i)$	关键重要度 $I^{Cr}(x_i)$	风险业绩值 $I^{RAW}(x_i)$	风险降低值 $I^{RRW}(x_i)$	微分重要度 $I^{DIM}(x_i)$	灵敏度 $S(x_i)$
x_1	0.03824	0.28215	29.07435	1.39305	0.14158	39.50208
x_2	0.03882	0.71071	29.07435	3.45668	0.35663	99.50083
x_3	0.03439	1	25.50333	∞	0.50179	∞

2.2.2 新型动态贝叶斯网络重要度与灵敏度

这里用新型动态贝叶斯网络分析方法进行分析。将任务时间划分为 2 段,整个时间轴被划分为 3 段,分别记为时间段 1、2、3。将 T-S 动态门规则转化为动态贝叶斯网络条件概率率表,中间节点 y_1 、叶节点 y 的条件概率率表分别见表 13、表 14。

表 13 中间节点 y_1 的条件概率率表(动态贝叶斯网络)

Tab.13 Conditional probability table of intermediate node y_1 (dynamic Bayesian network)

序号	x_1	x_2	$P(y_1^{[j_{y_1}]}=1 x_1, x_2)$		
			1	2	3
1	1	1	1	0	0
2	1	2	1	0	0
3	1	3	1	0	0
4	2	1	1	0	0
5	2	2	0	1	0
6	2	3	0	1	0
7	3	1	1	0	0
8	3	2	0	1	0
9	3	3	0	0	1

表 14 叶节点 y 的条件概率率表(动态贝叶斯网络)

Tab.14 Conditional probability table of leaf node y (dynamic Bayesian network)

序号	x_3	y_1	$P(y^{[j_y]}=1 x_3, y_1)$		
			1	2	3
1	1	1	1	0	0
2	1	2	0	1	0
3	1	3	0	0	1
4	2	1	0	1	0
5	2	2	0	1	0
6	2	3	0	0	1
7	3	1	0	0	1
8	3	2	0	0	1
9	3	3	0	0	1

由式(2)和表 14 得到叶节点 y 在时间段 1、2、3 的失效概率

$$P(y^{[1]}=1) = \sum_{x_3^{[j_3]}, y_1^{[j_{y_1}]}} P(x_3^{[j_3]}, y_1^{[j_{y_1}]}, y^{[1]}=1) = \frac{P(x_3^{[1]})P(y_1^{[1]})}{P(x_3^{[1]})P(y_1^{[1]})} \quad (23)$$

$$P(y^{[2]} = 1) = \sum_{x_3^{[3]}, y_1^{[2]}} P(x_3^{[3]}, y_1^{[2]}, y^{[2]} = 1) = P(x_3^{[1]})P(y_1^{[2]}) + P(x_3^{[2]})P(y_1^{[2]}) + P(x_3^{[3]})P(y_1^{[2]}) \quad (24)$$

$$P(y^{[3]} = 1) = \sum_{x_3^{[3]}, y_1^{[3]}} P(x_3^{[3]}, y_1^{[3]}, y^{[3]} = 1) = P(x_3^{[1]})P(y_1^{[3]}) + P(x_3^{[2]})P(y_1^{[3]}) + P(x_3^{[3]})P(y_1^{[3]}) \quad (25)$$

其中, $P(y_1^{[1]})$ 、 $P(y_1^{[2]})$ 、 $P(y_1^{[3]})$ 分别表示中间节点 y_1 在时间段 1、2、3 的失效概率。由式(2)和表 13, 得到中间节点 y_1 在时间段 1、2、3 的失效概率

$$P(y_1^{[1]} = 1) = \sum_{x_1^{[1]}, x_2^{[2]}} P(x_1^{[1]}, x_2^{[2]}, y_1^{[1]} = 1) = P(x_1^{[1]})P(x_2^{[1]}) + P(x_1^{[1]})P(x_2^{[2]}) + P(x_1^{[1]})P(x_2^{[3]}) + P(x_1^{[2]})P(x_2^{[1]}) + P(x_1^{[3]})P(x_2^{[1]}) = 0.01735$$

$$P(y_1^{[2]} = 1) = \sum_{x_1^{[1]}, x_2^{[2]}} P(x_1^{[1]}, x_2^{[2]}, y_1^{[2]} = 1) = P(x_1^{[2]})P(x_2^{[2]}) + P(x_1^{[2]})P(x_2^{[3]}) + P(x_1^{[3]})P(x_2^{[2]}) = 0.01705$$

$$P(y_1^{[3]} = 1) = \sum_{x_1^{[1]}, x_2^{[2]}} P(x_1^{[1]}, x_2^{[2]}, y_1^{[3]} = 1) = P(x_1^{[3]})P(x_2^{[3]}) = 0.96561$$

将以上结果代入式(23)~式(25), 结合式(1)所得 x_3 在时间段 1、2、3 的失效概率, 计算得到叶节点 y 在时间段 1、2、3 的失效概率

$$P(y^{[1]} = 1) = 0.00034$$

$$P(y^{[2]} = 1) = 0.00101$$

$$P(y^{[3]} = 1) = 0.99865$$

根据式(3)求得叶节点 y 在不同时间段失效时根节点 x_1 、 x_2 、 x_3 的后验概率, 再利用式(4)求得根节点在任务时间内的后验概率, 如表 15 所示。

表 15 根节点的后验概率(动态贝叶斯网络)
Tab.15 Posterior probabilities of root nodes (dynamic Bayesian network)

根节点	系统失效时间段 j_y		任务时间 T_M
	1	2	
x_1	0.07413	0.21516	0.28929
x_2	0.18329	0.53456	0.71785
x_3	0.25471	0.74529	1

利用式(5)~式(16)求得叶节点在不同时间段失效时根节点的重要度与灵敏度、根节点在任务时间内的的重要度与灵敏度, 如表 16 所示。

对比表 12、表 15、表 16 可知, 本文所提的新型动态贝叶斯网络分析方法求得的系统任务时间内根节点的后验概率、重要度及灵敏度与静态贝叶斯网络分析方法求得的对应值相同。本文方法不仅可以求得根节点在任务时间内的的重要度与灵敏

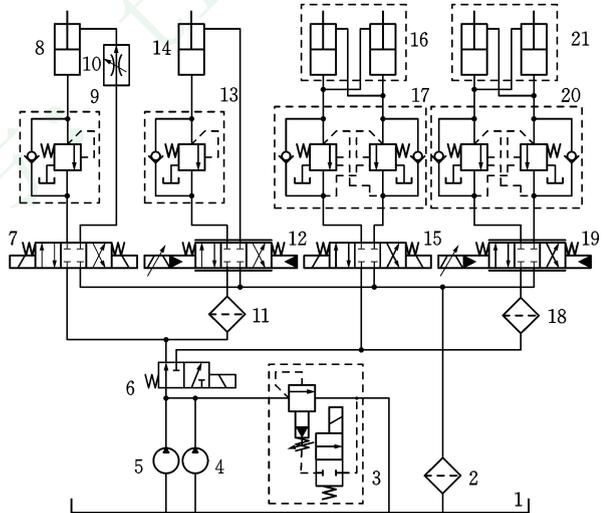
度, 还能求得系统在不同时间段失效时根节点的重要度与灵敏度, 为发现系统薄弱环节提供依据。

表 16 根节点的重要度与灵敏度(动态贝叶斯网络)
Tab.16 Importance measures and sensitivities of root nodes (dynamic Bayesian network)

根节点	概率重要度 $I^{Pr}(x_i)$			关键重要度 $I^{Cr}(x_i)$		
	时间段 1	时间段 2	任务时间内	时间段 1	时间段 2	任务时间内
x_1	0.00980	0.02844	0.03824	0.14143	0.14072	0.28215
x_2	0.00991	0.02891	0.03882	0.35757	0.35313	0.71071
x_3	0.00876	0.02563	0.03439	0.50500	0.49500	1
根节点	风险业绩值 $I^{RAW}(x_i)$			风险降低值 $I^{RRW}(x_i)$		
	时间段 1	时间段 2	任务时间内	时间段 1	时间段 2	任务时间内
x_1	7.45059	21.62376	29.07435	0.35482	1.03823	1.39305
x_2	7.42354	21.65081	29.07435	0.88045	2.57623	3.45668
x_3	6.49593	19.00740	25.50333	∞	∞	∞
根节点	微分重要度 $I^{DIM}(x_i)$			灵敏度 $S(x_i)$		
	时间段 1	时间段 2	任务时间内	时间段 1	时间段 2	任务时间内
x_1	0.03629	0.10529	0.14158	10.12498	29.37710	39.50208
x_2	0.09107	0.26556	0.35663	25.40770	74.09314	99.50083
x_3	0.12781	0.37398	0.50179	∞	∞	∞

3 液压缸同步系统可靠性分析

液压缸同步系统在工程中广泛应用^[30], 通常液压缸同步系统运动的稳定性和精度都有着严格的要求^[31-32]。优良可靠的液压缸同步系统不仅能降低失效率、提高工作效率, 还会降低作业的危险性。下面针对自装卸运输车液压缸同步系统进行可靠性分析^[33]。图 9 为液压缸同步系统原理图。



1. 油箱 2. 回油过滤器 3. 电磁溢流阀 4. 主泵 5. 备用泵
6. 主油路换向阀 7, 15. 电磁换向阀 8, 14. 伸缩液压缸
9, 13. 平衡阀 10. 调速阀 11, 18. 压油过滤器 12, 19. 电液伺服阀
16, 21. 摆动液压缸组 17, 20. 双向平衡阀

图 9 液压缸同步系统原理图

Fig.9 Principle diagram of hydraulic cylinder synchronous system

为对液压同步系统进行故障分析,建造 T-S 动态故障树,并将其转化为动态贝叶斯网络有向

无环图,如图 10 所示。

假设任务时间 $T_M=10\ 000\text{ h}$,任务时间划分

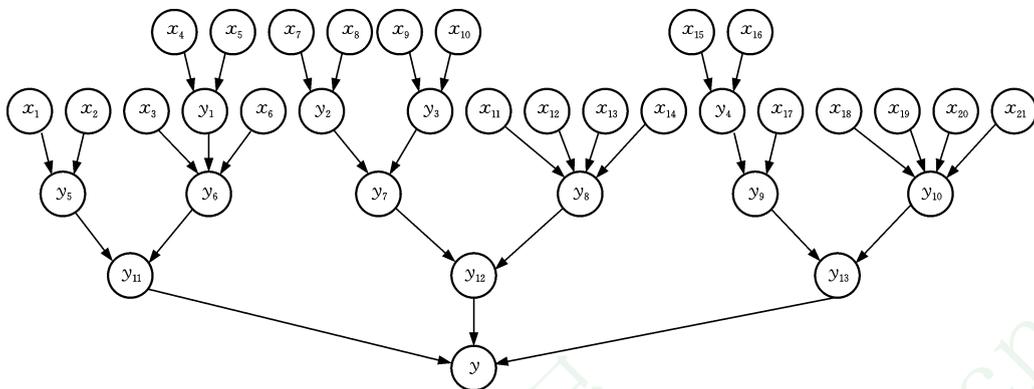


图 10 液压缸同步系统动态贝叶斯网络

Fig.10 Dynamic Bayesian network of hydraulic cylinder synchronous system

段数 $m = 5$, 整个时间轴划分为 $[0, 2\ 000)$, $[2\ 000, 4\ 000)$, $[4\ 000, 6\ 000)$, $[6\ 000, 8\ 000)$, $[8\ 000, 10\ 000)$, $[10\ 000, +\infty)$, 分别记为时间段 1, 2, ..., 6。假设根节点寿命均服从指数分布, 各根节点 x_i 失效率如表 17 所示。

表 17 液压缸同步系统的根节点失效率

Tab.17 Failure rates of hydraulic cylinder synchronous system root nodes $10^{-6}/\text{h}$

根节点	节点名称	失效率 λ_i	根节点	节点名称	失效率 λ_i
x_1	液压油	0.5	x_{12}	电液伺服阀	8.6
x_2	回油过滤器	0.8	x_{13}	后平衡阀	6.3
x_3	电磁溢流阀	4.7	x_{14}	后伸缩液压缸	5.5
x_4	主泵	13	x_{15}	摆动系统换向阀	4.5
x_5	备用泵	13	x_{16}	前摆动液压缸组	10
x_6	主油路换向阀	3.8	x_{17}	前双向平衡阀	8.1
x_7	电磁换向阀	4.5	x_{18}	压油过滤器	1
x_8	前伸缩液压缸	5.5	x_{19}	电液伺服阀	8.6
x_9	前平衡阀	6.3	x_{20}	后双向平衡阀	8.1
x_{10}	调速阀	7.5	x_{21}	后摆动液压缸组	10
x_{11}	压油过滤器	1			

叶节点 y 表示液压缸同步系统失效。中间节点 $y_1 \sim y_{13}$ 分别表示供油系统故障、前伸缩液压缸换向异常、前伸缩液压缸速度异常、前摆动液压缸组换向异常、回油系统故障、系统压力异常、前伸缩液压缸故障、后伸缩液压缸不同步、前摆动液压缸组故障、后摆动液压缸组不同步、泵站故障、伸缩系统故障、摆动系统故障。

3.1 叶节点失效概率

将 T-S 动态故障树各 T-S 动态门描述规则转化为动态贝叶斯网络的条件概率表, 其中, 备用泵 x_5 是主泵 x_4 的冷备件, 表示的含义为当主泵失效后, 启动备用泵继续为系统提供动力, 直到备用泵失效, 系统才会失效。将此种动态逻辑关系

的 T-S 动态门描述规则转化为条件概率表, 则中间节点 y_1 的条件概率表见表 18。

表 18 中间节点 y_1 的条件概率表(液压缸同步系统)

Tab.18 Conditional probability table of intermediate node y_1 (hydraulic cylinder synchronous system)

序号	x_4	x_5	$P(y_1^{[j]y_1}=1 x_4, x_5)$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	2	0	1	0	0	0	0
2	1	3	0	0	1	0	0	0
3	1	4	0	0	0	1	0	0
4	1	5	0	0	0	0	1	0
5	1	6	0	0	0	0	0	1
6	2	3	0	0	1	0	0	0
7	2	4	0	0	0	1	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	5	6	0	0	0	0	0	1
16	6	6	0	0	0	0	0	1

液压油 x_1 与回油过滤器 x_2 构成的关系为顺序强制和延时的组合, 只有当液压油污染才能引起回油过滤器堵塞, 若液压油不污染, 回油过滤器就不会出现堵塞; 而当液压油污染后, 回油过滤器会根据实际情况延时一段时间再失效。将此种动态逻辑关系的 T-S 动态门描述规则转化为条件概率表, 则中间节点 y_5 的条件概率如表 19 所示。

表 19 中间节点 y_5 的条件概率表(液压缸同步系统)

Tab.19 Conditional probability table of intermediate node y_5 (hydraulic cylinder synchronous system)

序号	x_1	x_2	$P(y_5^{[j]y_5}=1 x_1, x_2)$					
			1	2	3	4	5	6
1	1	2	0	1	0	0	0	0
2	2	3	0	0	1	0	0	0
3	3	4	0	0	0	1	0	0
4	4	5	0	0	0	0	1	0
5	5	6	0	0	0	0	0	1
6	6	6	0	0	0	0	0	1

再将其他 T-S 动态门描述规则同样转化为条件概率表,此处不一一列举。根据节点之间的条件概率表和式(2),求得系统在不同时间段的失效概率,如表 20 所示。

表 20 系统在不同时间段的失效概率
Tab.20 Failure probabilities of the system in various time intervals

时间段	1	2	3	4	5	6
失效概率	0.185 55	0.151 13	0.123 00	0.100 03	0.081 29	0.347 08

根据表 20 的数据,求得系统在任务时间内的失效概率为 0.652 92。

用基于 Dugan 动态故障树的动态贝叶斯网络分析方法^[16-17,19,29]求解系统的失效概率。首先,建造液压缸同步系统 Dugan 动态故障树;然后,将 Dugan 动态故障树转化为动态贝叶斯网络有向无环图并构造条件概率表;最终求得系统在任务时间内的失效概率为 0.652 92。这与本文方法所得结果相同,进一步验证了新型动态贝叶斯网络分析方法的正确性。

本文方法不但能够描述系统的任意形式静态失效行为,而且可以计算不同时间段系统的失效概率及根节点的后验概率、重要度与灵敏度。

3.2 根节点后验概率

根据式(3)可求得系统在不同时间段失效时根节点的后验概率。再根据式(4)可求得系统在任务时间内失效时根节点的后验概率,如表 21 所示。由表 21 可知,根节点 x_{16} 、 x_{21} 、 x_{12} 、 x_{19} 、 x_4 、 x_{17} 的后验概率较大,当系统发生失效进行故障检测时,应优先对这些根节点对应的部件进行排查、处理。

表 21 根节点后验概率(液压缸同步系统)
Tab.21 Posterior probabilities of root nodes (hydraulic cylinder synchronous system)

根节点	后验概率	根节点	后验概率
x_1	0.001 01	x_{12}	0.127 03
x_2	0.000 01	x_{13}	0.094 12
x_3	0.070 77	x_{14}	0.082 49
x_4	0.124 86	x_{15}	0.067 83
x_5	0.009 52	x_{16}	0.146 69
x_6	0.057 48	x_{17}	0.119 94
x_7	0.067 83	x_{18}	0.015 34
x_8	0.082 49	x_{19}	0.127 03
x_9	0.094 12	x_{20}	0.119 94
x_{10}	0.111 38	x_{21}	0.146 69
x_{11}	0.015 34		

3.3 根节点重要度与灵敏度

为衡量系统在不同时间段故障时各部件的重要程度,根据所提的动态贝叶斯网络重要度与灵敏度算法公式,可计算系统在不同时间段故障时部件的重要度与灵敏度。利用式(5)~式(16)求得根节点在任务时间内的的重要度和灵敏度,如表 22 所示。由表 22 可知,根节点 x_{16} 、 x_{21} 、 x_{12} 、 x_{19} 、 x_{17} 、 x_{20} 的重要度与灵敏度较大,为系统的薄弱环节,提高这些部件的可靠性对系统可靠性的提高更为有效。

表 22 根节点的重要度与灵敏度(液压缸同步系统)
Tab.22 Importance measures and sensitivities of root nodes(hydraulic cylinder synchronous system)

根节点	概率重要度 $I^{Pr}(x_i)$	关键重要度 $I^{Cr}(x_i)$	风险业绩值 $I^{RAW}(x_i)$	风险降低值 $I^{RRW}(x_i)$	微分重要度 $I^{DIM}(x_i)$	灵敏度 $S(x_i)$
x_1	0.513 83	0.003 93	0.198 69	0.996 02	0.006 00	0.798 42
x_2	0.645 34	0.007 88	0.001 22	0.992 04	0.012 05	0.998 77
x_3	0.363 78	0.025 58	1.513 33	1.026 75	0.039 13	0.582 71
x_4	0.017 69	0.003 30	1.005 53	1.003 38	0.005 05	0.027 69
x_5	0.349 24	0.003 30	1.513 33	1.003 38	0.099 74	0.546 68
x_6	0.360 53	0.020 59	1.513 33	1.021 42	0.031 49	0.574 49
x_7	0.363 06	0.024 47	1.513 33	1.025 56	0.037 43	0.580 87
x_8	0.366 71	0.030 06	1.513 33	1.031 58	0.045 98	0.590 16
x_9	0.369 65	0.034 57	1.513 33	1.036 50	0.052 88	0.597 73
x_{10}	0.374 11	0.041 40	1.513 33	1.044 03	0.063 33	0.609 34
x_{11}	0.350 57	0.005 34	1.513 33	1.005 47	0.008 17	0.549 91
x_{12}	0.378 25	0.047 74	1.513 33	1.051 11	0.073 03	0.620 26
x_{13}	0.369 65	0.034 57	1.513 33	1.036 50	0.052 88	0.597 73
x_{14}	0.366 71	0.030 06	1.513 33	1.031 58	0.045 98	0.590 16
x_{15}	0.363 06	0.024 47	1.513 33	1.025 56	0.037 43	0.580 87
x_{16}	0.383 59	0.055 91	1.513 33	1.060 39	0.085 52	0.634 56
x_{17}	0.376 37	0.044 85	1.513 33	1.047 87	0.068 61	0.615 27
x_{18}	0.350 57	0.005 34	1.513 33	1.005 47	0.008 17	0.549 91
x_{19}	0.378 25	0.047 74	1.513 33	1.051 11	0.073 03	0.620 26
x_{20}	0.376 37	0.044 85	1.513 33	1.047 87	0.068 61	0.615 27
x_{21}	0.383 59	0.055 91	1.513 33	1.060 39	0.085 52	0.634 56

4 结论

(1)本文综合 T-S 动态故障树和动态贝叶斯网络在分析建模与推理计算的优势,提出了一种新型动态贝叶斯网络分析方法。基于 T-S 动态故障树构造动态贝叶斯网络,提出了求解叶节点失效概率、根节点后验概率、概率重要度、关键重要度、风险业绩值、风险降低值、微分重要度与灵敏度的算法。

(2)将所提方法分别与基于 Dugan 动态故障

树的动态贝叶斯网络分析方法和静态贝叶斯网络分析方法对比,验证了所提方法的可行性。新型动态贝叶斯网络分析方法不但能够描述系统任意形式静态失效行为,而且可以计算不同时间段系统的失效概率及根节点的后验概率、重要度与灵敏度。

(3)用新型动态贝叶斯网络分析方法对液压缸同步系统进行分析,得到系统在各时间段和任务时间内的失效概率以及根节点在各时间段和任务时间内的后验概率、重要度与灵敏度,为提高系统可靠性和进行故障诊断提供了依据。所提重要度与灵敏度算法可推广移植到 Dugan 动态故障树及其动态贝叶斯网络分析方法。

参考文献:

- [1] PURBA J H. A Fuzzy-based Reliability Approach to Evaluate Basic Events of Fault Tree Analysis for Nuclear Power Plant Probabilistic Safety Assessment[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 70: 21-29.
- [2] ROGITH D, IYENGAR M S, SINGH H. Using Fault Trees to Advance Understanding of Diagnostic Errors[J]. *Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety*, 2017, 43(11): 598-605.
- [3] 张根保, 刘佳, 葛红玉. 装配可靠性的动态贝叶斯网络建模与分析[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(2): 211-215.
ZHANG Genbao, LIU Jia, GE Hongyu. Modeling and Analysis for Assembly Reliability Based on Dynamic Bayesian Network[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(2): 211-215.
- [4] BLOCKLEY D. Analysing Uncertainties: Towards Comparing Bayesian and Interval Probabilities[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 37(1): 30-42.
- [5] 王瑶, 孙秦. 一种解决混联系统组合爆炸问题的贝叶斯网络[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(2): 520-530.
WANG Yao, SUN Qin. A Bayesian Network for Solving the Combinational Explosion Problem of Compound System[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2019, 39(2): 520-530.
- [6] ZHAO Y, WEN J, XIAO F, et al. Diagnostic Bayesian Networks for Diagnosing Air Handling Units Faults—Part I: Faults in Dampers, Fans, Filters and Sensors[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 111: 1272-1286.
- [7] 姚成玉, 陈东宁, 王斌. 基于 T-S 故障树和贝叶斯网络的模糊可靠性评估方法[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(2): 193-201.
YAO Chengyu, CHEN Dongning, WANG Bin. Reliability Analysis of Multi-state Hydraulic System Based on T-S Fuzzy Fault Tree and Bayesian Network[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(2): 193-201.
- [8] BOBBIO A, PORTINALE L, MINICHINO M, et al. Improving the Analysis of Dependable Systems by Mapping Fault Trees into Bayesian Networks[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2001, 71(3): 249-260.
- [9] 尹晓伟, 钱文学, 谢里阳. 基于贝叶斯网络的多状态系统可靠性建模与评估[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2): 206-212.
YIN Xiaowei, QIAN Wenxue, XIE Liyang. Multi-state System Reliability Modeling and Assessment Based on Bayesian Networks[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 206-212.
- [10] 周忠宝, 董豆豆, 周经伦, 等. 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.
ZHOU Zhongbao, DONG Doudou, ZHOU Jinglun, et al. Application of Bayesian Networks in Reliability Analysis[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2006(6): 95-100.
- [11] 陈东宁, 姚成玉. 系统可靠性评估的超椭圆贝叶斯网络及其灵敏度方法[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(4): 529-535.
CHEN Dongning, YAO Chengyu. System Reliability Assessment Method Based on Hyper-ellipsoid Bayesian Networks and Their Sensitivities[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(4): 529-535.
- [12] 姚成玉, 赵静一. 基于 T-S 模型的液压系统模糊故障树分析方法研究[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(16): 1913-1917.
YAO Chengyu, ZHAO Jingyi. Research on Fuzzy Fault Tree Analysis Method for Hydraulic System Based on T-S Model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(16): 1913-1917.
- [13] 陈东宁, 姚成玉, 党振. 基于 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络的多态液压系统可靠性分析[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(7): 899-905.
CHEN Dongning, YAO Chengyu, DANG Zhen. Reliability Analysis of Multi-state Hydraulic System Based on T-S Fuzzy Fault Tree and Bayesian

- Network[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(7): 899-905.
- [14] 齐金平, 李兴运. 动车组受电弓系统失效风险分析[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(7): 824-828.
QI Jinping, LI Xingyun. Failure Risk Analysis of EMU Pantograph Systems[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(7): 824-828.
- [15] DUGAN J B, BAVUSO S J, BOYD M A. Dynamic Fault-tree Models for Fault-tolerant Computer Systems[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1992, 41(3): 363-377.
- [16] BOUDALI H, DUGAN J B. A Discrete-time Bayesian Network Reliability Modeling and Analysis Framework [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2005, 87(3): 337-349.
- [17] 古莹奎, 邱光琦. DTBN 在复杂系统动态概率安全评价中的应用[J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(4): 74-79.
GU Yingkui, QIU Guangqi. Application of DTBN to Complex System Dynamic Probabilistic Safety Assessment [J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(4): 74-79.
- [18] 周忠宝, 马超群, 周经伦, 等. 基于动态贝叶斯网络的动态故障树分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2008, 28(2): 35-42.
ZHOU Zhongbao, MA Chaoqun, ZHOU Jinglun, et al. Dynamic Fault Tree Analysis Based on Dynamic Bayesian Networks[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2008, 28(2): 35-42.
- [19] 房丙午, 黄志球, 李勇, 等. 基于贝叶斯网络的复杂系统动态故障树定量分析方法[J]. *电子学报*, 2016, 44(5): 1234-1239.
FANG Bingwu, HUANG Zhiqiu, LI Yong, et al. Quantitative Analysis Method of Dynamic Fault Tree of Complex System Using Bayesian Network [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(5): 1234-1239.
- [20] 兰杰, 袁宏杰, 夏静. 基于离散时间贝叶斯网络的动态故障树分析的改良方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(4): 948-953.
LAN Jie, YUAN Hongjie, XIA Jing. Improved Method for Dynamic Fault Tree Analysis Based on Discrete-time Bayesian Network[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(4): 948-953.
- [21] 姚成玉, 饶乐庆, 陈东宁, 等. T-S 动态故障树分析方法[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(16): 17-32.
YAO Chengyu, RAO Leqing, CHEN Dongning, et al. T-S Dynamic Fault Tree Analysis Method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(16): 17-32.
- [22] 夏侯唐凡, 刘宇, 张皓冬, 等. 考虑认知不确定性的多状态系统 Birnbaum 重要度分析方法[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(8): 223-232.
XIAHOU Tangfan, LIU Yu, ZHANG Haodong, et al. Birnbaum Importance Measure of Multi-state Systems under Epistemic Uncertainty[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(8): 223-232.
- [23] BIRNBAUM Z W. On the Importance of Different Components in a Multi-component System [M]. New York: Academic Press, 1969: 581-592.
- [24] LAMBERT H E. Fault Trees for Decision Making in Systems Analysis[D]. Livermore: University of California, 1975.
- [25] VESELY W E, DAVIS T C, DENNING R S, et al. Measures of Risk Importance and Their Applications[M]. Washington D C: United States Nuclear Regulatory Commission, 1983: 3-12.
- [26] 周忠宝, 周经伦, 金光, 等. 基于贝叶斯网络的概率安全评估方法研究[J]. *系统工程学报*, 2006, 21(6): 636-643.
ZHOU Zhongbao, ZHOU Jinglun, JIN Guang, et al. Probabilistic Safety Assessment Research Based on Bayesian Networks[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2006, 21(6): 636-643.
- [27] BORGONOVO E, APOSTOLAKIS G E. A New Importance Measure for Risk-informed Decision Making [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2001, 72(2): 193-212.
- [28] 王海涛, 吴宜灿, 李亚洲, 等. 核电站实时风险管理系统部件重要度计算方法研究[J]. *核科学与工程*, 2008, 28(1): 61-65.
WANG Haitao, WU Yican, LI Yazhou, et al. Study on the Algorithm of the Calculation of the Components' Importance Measures in a Risk Monitor[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2008, 28(1): 61-65.
- [29] 周忠宝, 周经伦, 孙权, 等. 基于离散时间贝叶斯网络的动态故障树分析方法[J]. *西安交通大学学报*, 2007, 46(6): 732-736.
ZHOU Zhongbao, ZHOU Jinglun, SUN Quan, et al. Dynamic Fault Tree Analysis Method Based on Discrete-time Bayesian Networks [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 46(6): 732-736.
- [30] 谢苗, 刘治翔, 谢春雪, 等. 巷道超前支护装备双缸同步推移控制方法[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(4): 404-409.

- al. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Hydraulic Fluid Pollution Degree Based on Entropy Weight Method[J]. *Hydraulic & Pneumatics*, 2018 (2): 63-67.
- [14] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
WEN Shizhu, HUANG Ping. Principles of Tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [15] 程启超, 金勇, 欧阳武, 等. 水槽布置方式对水润滑轴承摩擦性能的影响[J]. *船舶工程*, 2017, 39(12): 38-42.
CHENG Qichao, JIN Yong, OUYANG Wu, et al. Influence of Groove Layout on Friction Performance of Water-lubricated Bearing[J]. *Ship Engineering*, 2017, 39(12):38-42.
- [16] 戴明城, 刘正林, 樊发孝. SF-1 材料水润滑艉轴承摩擦性能研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2011, 33(3): 58-61.
DAI Mingcheng, LIU Zhenglin, FAN Faxiao. Friction Characteristics of SF-1 Water-lubricated Stern Tube Bearings[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(3):58-61.
- [17] 杨期江. 柔性阻尼支承可倾瓦轴承油膜动力及减振性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
YANG Qijiang. Study on Oil Film Dynamics and Vibration Damping of Flexible Damping Supported Tilting Pad Bearings[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [18] 姚世卫, 杨俊, 张雪冰, 等. 水润滑橡胶轴承振动噪声机理分析与试验研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(2): 215-218.
YAO Shiwei, YANG Jun, ZHANG Xuebing, et al. Vibration and Noise Mechanism Analysis and Tests for Water Lubrication Rubber Bearings[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(2):215-218.
- [19] 王东伟, 莫继良, 王正国, 等. 沟槽织构化表面影响摩擦振动噪声机理[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(23):112-116.
WANG Dongwei, MO Jiliang, WANG Zhengguo, et al. Mechanism of Frictional Vibration and Noise Influenced by Grooved Textured Surface[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23):112-116.
- [20] 钟慧敏. 考虑主客观权重和成本的多元稳健设计模型[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
ZHONG Huimin. Multi-response Robust Design Based on Comprehensive Weight and Cost [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- (编辑 王旻玥)
-
- 作者简介: 欧阳武, 男, 1987年生, 副教授、博士。研究方向为推进系统摩擦学及动力学、船舶新型高效推进技术。E-mail: ouyangw@whut.edu.cn.
-
- (上接第 1406 页)
- XIE Miao, LIU Zhixiang, XIE Chunxue, et al. Double Cylinder Synchronous Control Method of Advanced Support of Roadway Support[J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(4):404-409.
- [31] 刘芮葭, 陈凯. 多缸调平系统模糊相邻耦合同步控制研究[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(17):2316-2321.
LIU Ruijia, CHEN Kai. Research Fuzzy Adjacent Coupling Synchronization Control in Multi-cylinder Leveling System[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(17):2316-2321.
- [32] 成思铭, 章青. 大型结构物模块对接新型装置及多缸同步控制[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(10): 1214-1219.
CHENG Siming, ZHANG Qing. New Device for Large Structure Block Docking and Multi-cylinder Synchronization Control Method [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(10):1214-1219.
- [33] 司癸卯, 吕奎, 李峙峰, 等. 自装卸运输车吊装机构同步液压系统设计计算[J]. *液压与气动*, 2016(6):88-91.
SI Guimao, LYU Kui, LI Zhifeng, et al. Design and Calculation of Synchronous Hydraulic System for Self-handing Trailers' Lifting Mechanism [J]. *Chinese Hydraulic and Pneumatics*, 2016(6): 88-91.
- (编辑 王旻玥)
-
- 作者简介: 陈东宇, 女, 1978年生, 副教授、博士研究生导师。研究方向为可靠性分析及优化。E-mail: dncchen@ysu.edu.cn.