

doi: 10.7690/bgzdh.2022.08.009

基于贝叶斯网络的航天任务态势不确定性融合

彭亚飞, 杨凡德

(航天工程大学复杂电子系统仿真重点实验室, 北京 101416)

摘要: 为提高航天指挥员战场决策能力, 保证其决策时效性, 对航天任务不确定性态势融合进行研究。分析航天态势融合相关概念, 根据其特点将航天态势融合环节分为低融合层的确定性态势融合和高融合层的不确定性态势融合 2 个模块; 针对航天态势高融合层, 提出一种基于贝叶斯网络的不确定性态势融合方法, 研究态势融合机理和流程, 并以航天应急发射任务为例对该方法进行验证。结果表明, 该研究可支持航天指挥员在空间战场中做出正确的指挥决策。

关键词: 态势融合; 贝叶斯网络; 航天任务

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Space Mission Situation Uncertainty Fusion Based on Bayesian Network

Peng Yafei, Yang Fande

(Complex Electronic System Simulation Key Laboratory, Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to improve the battlefield decision-making ability of space commanders and ensure the timeliness of their decision-making, the uncertain situation fusion of space missions is studied. The concepts of space situation fusion are analyzed, and the space situation fusion is divided into 2 modules according to its characteristics: the deterministic situation fusion in the lower fusion layer and the uncertain situation fusion in the higher fusion layer. Aiming at the high fusion layer of space situation, an uncertain situation fusion method based on Bayesian network is proposed, and the mechanism and process of situation fusion are studied, and the method is verified by taking space emergency launch mission as an example. The results show that the research can support space commanders to make correct command decisions in the space battlefield.

Keywords: situation fusion; Bayesian network; space mission

0 引言

由于航天任务是一个复杂性任务, 通过传感器获取的态势信息呈现海量趋势, 会对指挥员的战场情况研判造成干扰, 降低其决策时效性^[1]。对航天任务进行态势融合是模仿指挥员的态势认知思维, 对获取的多层次态势要素进行融合处理, 得到指挥员需要的战场态势知识, 提高指挥员对战场态势的认知程度, 加快指挥决策效率, 促进航天任务 OODA 环的循环^[2-4]; 因此, 笔者对航天任务态势融合进行研究。

1 态势融合相关概念

信息是维持航天指挥决策活动进行的必备条件, 航天指挥决策信息是指与航天指挥决策活动相关的各种信息, 也称航天任务态势信息。

1) 航天态势融合。

航天态势融合是指在空间领域中, 通过综合敌方、我方及空间环境等因素, 将观测到的目标空间

分布及其状态和战场环境在一定准则下加以分析、优化综合以完成所需的决策和任务估计而进行的信息处理过程^[5]。

2) 航天态势要素。

态势要素是指战场中能够感知获取到的最小态势单元, 主要可以分为环境、实体以及事件 3 大态势要素。航天态势要素作为态势融合的输入, 在对航天任务态势进行融合之前必须确定航天态势要素的组成序列, 不同航天任务其关注的态势要素组成序列不同, 在实际航天军事任务中, 可以通过任务与态势之间的逻辑需求关系构建航天态势模型, 描述航天战场中任务实体、事件与环境 3 大态势要素之间的关系。

3) 航天态势产品。

对任务态势要素进行提取后, 根据要素间的关联关系, 对态势要素进行组合、分析, 并对未来的态势进行推断, 态势产品便应运而生。态势产品来源于军事上的态势认知, 从系统角度看, 态势产品

收稿日期: 2022-05-29; 修回日期: 2022-06-28

基金项目: 复杂电子系统仿真重点实验室基础研究基金(DXZT-JC-ZZ-2019-001)

作者简介: 彭亚飞(1996—), 男, 安徽人, 从事辅助决策、态势认知、航天发射、空间信息系统分析与集成研究。

E-mail: pengyafeiw@163.com。

作为态势融合环节输出的信息产品，是计算机态势分析系统与指挥员交互的媒介，其产品的准确与快速生成直接影响指挥员对空间战场的态势认知，进而影响航天指挥决策效率。

航天任务态势产品是指在执行航天任务过程中指挥员依据自己对战场态势的判断及理解，根据自己的思维方式生成满足航天任务军事需求的态势信息集合，是航天态势融合的输出。

2 航天态势融合特点与思路

2.1 航天态势融合特点

1) 航天态势融合流程具有因果性。

航天态势产品的生成是按照态势要素与任务、任务与任务之间的因果关系进行推理融合，任务的层次结构约束了航天态势信息的逐层融合过程，其反映了航天任务多层次多成员的特点，保证了各任务态势之间的关联性。

2) 航天态势融合结果具有直观性。

航天任务态势融合目标是辅助指挥员快速决策，通过对输入的证据进行组合、分析得到任务指挥员所关注的态势产品从而进行战场决策；因此，要求航天态势融合结果必须具有直观性，方便指挥员直接进行决心的下定^[6-7]。

3) 航天态势融合过程具有模块化。

由于航天任务是一个复杂性任务，可分解为底层任务层和高层计划层 2 个网络模块^[8]：底层任务层是由最基本的元任务组成的战役网络模块，高层计划层是由中间子任务组成的战术网络模块。其中底层任务层关注的态势由传感器观测的数据进行确定性融合生成，高层计划层关注的态势是由底层任务层生成的态势产品模糊化后作为证据进行不确定性融合生成。

2.2 航天态势融合思路

航天任务涉及到的信息多种多样，既包括确定信息，又包括模糊信息；因此，通过态势融合获取航天任务态势必须考虑到不同类型信息的融合方式。结合航天态势融合特点，可以将航天态势融合分为低融合层和高融合层 2 个模块。低融合层属于航天态势的确定性融合过程，是对来自各传感器的战场数据进行关联、组合处理，得到确切的目标航迹以及识别信息，属于像素级和特征级的融合过程^[9]。如将卫星搭载的雷达半锥角与卫星的轨道参数进行融合，可以得到侦察指挥员关注的侦察覆盖

率。高融合层属于航天态势的不确定性融合过程，是将低融合层生成的态势产品进行模糊化，根据态势之间的因果关系，对战场态势进行估计和威胁判断^[10]，属于航天态势融合中的决策级融合^[11]。如通过对空间环境中的碎片碰撞概率和空间扰动情况进行融合，判断出空间环境的稳定程度。低融合层生成的态势产品是面向于底层基础任务指挥员，这类指挥员对态势融合精度需求较高，对反映全局性态势的需求较低。高融合层生成的态势产品是面向于决策层指挥员，与低层指挥员不同，这类指挥员对态势融合精度需求较低，对反映全局性态势的需求较高。如图 1 所示，对低融合层态势进行确定性融合后，把融合生成的态势产品模糊化并作为证据输入到如图 2 所示的高融合层进行融合推理，生成反应战场宏观态势的产品。

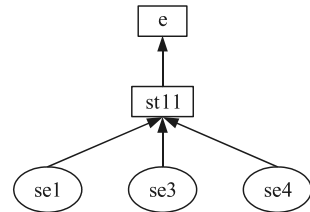


图 1 低融合层确定性态势融合

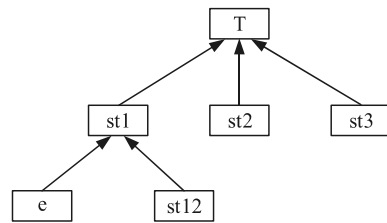


图 2 高融合层不确定性态势融合

需要注意的是，在实际航天技术支持类任务中，由于低融合层是对确定性的态势进行融合，通常具有固定的融合计算方法，例如侦察卫星侦察覆盖范围计算方法如下：

$$d = \arccos(R \cos \alpha / (R + h)) - \sigma \tag{1}$$

式中：O 为地球；S 为卫星；R 为地球半径；h 为卫星轨道高度；α 为半视场角。

卫星对地侦察覆盖范围如图 3 所示。

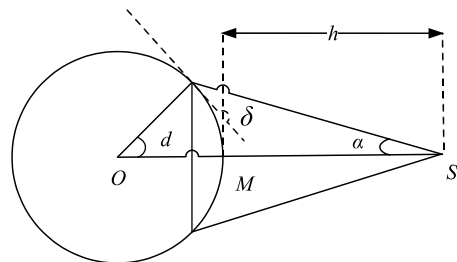


图 3 卫星对地侦察覆盖范围

在低融合层中只需确定输入的态势要素数据，便可以对相应的态势能力进行分析，生成局部态势产品。这些融合方法已经成熟，不需过多研究。笔者针对航天高融合层的不确定性融合进行研究，目的是生成能反映航天任务全局态势的产品，辅助高级指挥员进行决策。

3 航天任务态势不确定性融合策略

在高融合层模块中，指挥员关注的态势产品通常是能反映任务宏观的整体态势，对于具体的微观节点态势数据其实并不关心。高融合层是在低融合层定量融合的基础上进行的定性融合，是在专家知识、指挥员的业务水平条件下，对整体航天任务态势的发展情况进行推断。由于指挥员并不具备瞬时推理的能力和难以掌控大量决策信息，导致指挥员难以在实时战场决策中发挥作用。贝叶斯网络是一种通过概率论对决策问题中的不确定性知识进行融合推理的方法^[12-13]，可贴切地描述空间态势网络节点之间的因果关系，其推理思路是通过根据任务与态势之间的需求，构建空间态势网络结构，通过概率方法表示各个态势节点之间的关联程度，从而实现对外节点态势知识的融合生成；因此，将贝叶斯网络应用到航天不确定性态势融合领域是合理的。

3.1 贝叶斯网络理论

贝叶斯网络是以网络图模型方法对任务涉及到的态势节点之间关联关系以及概率分布进行表示，模型中的节点表示相应的态势要素，态势节点之间的边连接表示存在关联关系，其关联程度用概率进行表示。

定义 1：贝叶斯网络是一个有向无环图，可以用三元组表示为： $B = \langle V, A, P \rangle$ ，其中： V 为任务中要素节点集合； A 为要素之间存在联系，在网络中以边进行连接； P 为要素之间的条件概率集合，表示要素之间的关联程度。对每个节点 V_i 都存在一组条件概率集合，定量表示其父节点与该节点之间的相互关系。

对于节点 V_i 与父节点为 V_j ，条件概率为 $P(V_j)$ ，则该节点 V_i 发生的概率为 $P(V_i) = P(V_i | P(V_j))$ ，由于现实中一个节点影响因素通常是多个的；因此，将该单个父节点决定的子节点概率推导至由 n 组变量决定的子节点联合概率为：

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

利用贝叶斯网络对节点进行推理的主要机制是通过贝叶斯网络模型以及节点的条件概率集合，在已知的航天态势信息证据基础上计算未知节点发生的概率。在航天态势高融合层中，任务中所涉及的通过传感器获取的态势要素数据以及通过低层次融合生成的态势信息为证据节点，高级指挥员关注的态势信息为未知节点，通过贝叶斯网络可以融合生成指挥员所需的态势产品。

3.2 贝叶斯网络模型构建方法

对航天任务的不确定性态势进行融合首先是构造网络拓扑模型，对网络内节点之间的关系进行描述。构建航天态势贝叶斯网络模型需要确定网络内父节点与子节点变量：本文中的贝叶斯网络模型构建思路是根据航天任务层次结构以及通过任务——态势需求关系对航天任务不确定性态势贝叶斯网络结构中的节点变量和关系进行确定，即总任务的态势节点是中间子任务和元任务态势节点的父节点，中间子任务的态势节点是元任务态势节点的父节点，通过这种方法以及态势之间的因果关系可以确定航天不确定性态势融合贝叶斯网络结构中的父子节点之间的关系^[7, 14-15]。

需要注意的是，实际航天任务中，指挥员为方便了解敌我双方的战场情况，通常将航天任务态势分成敌情、我情以及空间环境 3 方面的态势；因此，在构建航天不确定性态势贝叶斯网络结构时需将其按照敌情、我情以及空间环境 3 方面进行划分。

1) 敌情态势节点。

敌情态势节点表示在航天技术支持类任务中，敌方对我方航天器在轨运行中产生的威胁等级，主要包括敌方对我方航天器的打击摧毁能力、对我方的通信干扰情况，根据敌方态势，判断敌方可能采取的行为意图，进而我方对空间战场中的实体要素采取相应的进攻或规避等动作^[16]。

2) 我情态势节点。

我情态势节点表示空间战场中，我方实体要素能力支撑完成航天任务的等级，主要包括信息支撑能力、武器作战能力和空间保障能力等。这些能力共同反映己方进行相应空间活动的的能力，供指挥员制定下一步的作战计划^[17]。

3) 空间环境态势节点。

空间环境态势节点表示空间战场中，由于环境的复杂性对我方实体产生的各种影响，主要包括对空间中航天器的姿态影响、上下行通信链路信号的

衰减和空间碎片的碰撞等。己方的空间活动需结合空间态势影响情况进行，根据环境情况采取继续执行或暂缓执行^[18]。

3.3 先验概率集获取方法

在航天任务不确定态势贝叶斯网络模块中，网络参数确定了网络中各节点之间的关联程度；因此，在对航天态势要素进行融合前必须确定各关联节点间的条件概率。

目前，对于父子节点之间的先验概率获取方法最常用的方法有专家估计和参数学习 2 种方法。参数学习方法是利用大量样本数据集输入到网络模型中进行重复学习，最终确定各参数的最合适值，该方法与“灰箱子法”相似，在确定网络拓扑结构后只需重复训练便可以确定网络参数。由于航天任务态势数据属于内部保密资料，不易获取；因此，笔者选取专家估计方法确定航天任务不确定性态势贝叶斯网络结构中节点之间的条件概率。专家估计方法是在训练样本缺乏时，利用专家的经验知识对网络模型中各条件概率进行估计^[18-19]。

3.4 态势融合机理

以消息传播算法作为贝叶斯网络态势融合推理算法，以航天任务关注的态势要素作为证据节点，通过节点之间的概率消息传递实现对任务节点态势的求解^[20]。

定义 2: 贝叶斯网络中任务节点 V 为有限集合 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ ，其中 V_1, V_2, \dots, V_n 之间相互独立，假设与节点 V 有关联的证据节点集和为 $\varepsilon = \varepsilon_X^- \cup \varepsilon_X^+$ ，其中 ε_X^- 表示与节点 V 有直接关联的证据，在网络中表现为两节点通过边直接相连； ε_X^+ 表示与节点 V 存在间接影响的证据，在网络中表现为节点之间有其他节点作为介质实现两节点之间的关联。

关于节点 V 的置信度则为^[21-22]：

$$Bel(V) = P(V | \varepsilon_X^-, \varepsilon_X^+) = \alpha P(\varepsilon_X^- | V) P(V | \varepsilon_X^+) \quad (3)$$

式中： α 为证据归一化值， $\alpha = 1 / P(\varepsilon_X^-, \varepsilon_X^+)$ ； $P(\varepsilon_X^- | V)$ 为下层节点对该节点的判断支持； $P(V | \varepsilon_X^-)$ 为上层节点对该节点的因果支持。对于 $P(\varepsilon_X^- | V)$ 和 $P(V | \varepsilon_X^+)$ ，将其扩展到 m 个证据节点中，根据条件独立性可得，联合判断支持为：

$$P(\varepsilon_X^- | V) = \prod_{j=1}^m P(\varepsilon_X^- | V_j) \quad (4)$$

式中： $P(\varepsilon_X^- | V)$ 为根节点 V 的联合判断支持率； $P(\varepsilon_X^- | V_j)$ 为子节点向 V 发送的 P 消息。

令 $P(\varepsilon_X^- | V)$ 为 $\lambda(V)$ ，则上式可表示为：

$$\lambda(V) = \prod_{j=1}^m \lambda(V_j) \quad (5)$$

对于 $P(V | \varepsilon_X^+)$ ，将其扩展到 n 个父节点中，联合因果支持为：

$$P(V | \varepsilon_X^+) = \sum_{i=1}^n P(V | X_i) \prod_{i=1}^n P(X_i) \quad (6)$$

令 $P(V | \varepsilon_X^+)$ 为 $\pi(V)$ ，则上式可表示为：

$$\pi(V) = \sum_{i=1}^n P(V | X_i) \prod_{i=1}^n P(X_i) \quad (7)$$

对于根节点 V 推理得到的置信度为：

$$Bel(V) = \alpha \lambda(V) \pi(V) \quad (8)$$

当 V 为根节点时， $\pi(V)$ 为根节点的先验概率， $P(V) = \pi(V)$ 。

消息传播算法在航天态势融合贝叶斯网络中的过程如下^[23]：

Step1: 计算航天态势贝叶斯网络中待求节点的联合判断支持 $\lambda(V)$ 与联合因果支持 $\pi(V)$ ；

Step2: 对待求节点的置信度进行更新；

Step3: 将节点的置信度向后传播，直至所有待求节点置信度均更新，否则重复此步骤。

应用贝叶斯网络对航天不确定性态势进行融合的主要思想是构建航天不确定性态势网络结构，确定网络节点之间的条件概率，根据传感器或者低融合层传递来的证据对网络中节点的置信度进行更新，确定未知节点态势的分布情况^[12, 24]。

3.5 航天任务不确定性态势融合流程

在航天任务不确定性态势贝叶斯网络结构中存在 2 类节点：显节点和隐节点。其中：显节点是指通过航天确定性态势融合得到的特征量，作为不确定性态势网络中的证据节点；隐节点是指网络中需要根据显节点的证据信息融合推理得到态势信息的未知节点。基于贝叶斯网络的航天任务不确定性态势融合就是通过当前时刻的显节点态势信息，通过消息传播方法，利用父子节点之间的因果关系，对隐节点的未知态势进行置信度更新的过程。

需要注意的是，在对航天任务确定性态势融合后，得到的是确切的态势数据，而航天任务不确定性态势融合输入是证据节点的状态；因此，需要将

融合获取的确切态势数据信息进行状态确定^[25-26]。笔者根据取值情况，将显节点赋予相应的状态，例如单颗电子侦察卫星的侦察能力分为好和差 2 种状态，其对应的平均侦察覆盖率为大于 30%和小于

30%，若空间中我方电子侦察卫星平均侦察覆盖率为 35.75%，则其侦察能力为好。

根据上述对航天任务态势的研究，航天不确定性态势融合流程如图 4 所示。

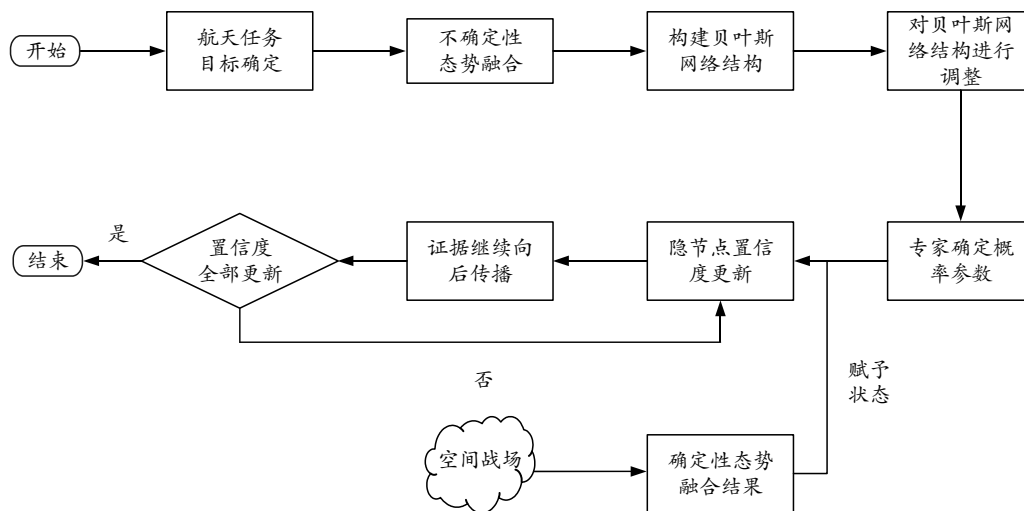


图 4 航天任务不确定性态势融合流程

- Step1: 输入航天任务，确定航天任务目标；
- Step2: 根据航天任务层次结构和任务——态势需求，确定航天任务不确定性态势贝叶斯网络结构中的节点变量和关系，构建贝叶斯网络结构；
- Step3: 按照敌情、我情以及空间战场环境 3 方面对航天任务不确定性态势贝叶斯网络结构进行调整；
- Step4: 对网络结构中有关联的节点之间利用专家估计法确定先验概率；
- Step5: 将确定性态势融合生成的数据信息根据取值情况，赋予对应的状态，并作为证据输入到贝叶斯网络中；
- Step6: 计算贝叶斯网络中隐节点的联合判断支持 $\lambda(V)$ 与联合因果支持 $\pi(V)$ ；
- Step7: 对隐节点的置信度进行更新；
- Step8: 将隐节点的置信度向后传播，直至所有隐节点置信度均更新，否则重复 Step 6—8；
- Step9: 结束航天任务的不确定性态势融合流程。

4 案例分析

4.1 任务想定

因空间碎片碰撞，导致甲国的一颗低轨电子侦察卫星在轨运行时被损毁，造成甲国家的局部电子信号侦察能力受到制约。于是甲国家向本国航天发射中心下达一项电子侦察卫星应急发射任务，要求

侦察卫星轨道高度在 500 km 左右，侦察覆盖范围在 20°N~20°S。

4.2 贝叶斯网络模型构建

由于实际航天应急发射任务需要考虑的态势要素众多，笔者把问题简化，将航天应急发射整体态势作为父节点，我情、敌情和空间环境 3 个态势模块作为子节点，根据航天应急发射任务层次结构，建立基于 Netica 的航天应急发射贝叶斯网络模型如图 5 所示^[12,27]。对于贝叶斯网络中节点状态取值范围如表 1 所示，因篇幅原因，笔者不对节点名称一一列举，只用字母代替。

表 1 贝叶斯网络中节点取值状态

节点	状态值	节点	状态值
A	发射、终止	L	长、短
B	好、中、差	M	在任务要求轨道范围内、不在
C	强、中、弱	N	满足、不满足
D	稳定、不稳定	O	良好、差
E	优、差	P	强、中、弱
F	满足、不满足	Q	在范围内、不在
G	强、中、弱	R	高、中、低
H	强、中、弱	S	在、不在
I	扰动在可控范围内、不在	T	高、中、低
J	存在发射窗口、不存在	U	强、中、弱
K	快、中、慢		

4.3 构建任务贝叶斯网络条件概率表

模型中，需要对所有存在联系的节点之间设置条件概率，对于没有父节点的航天整体态势节点 A 只需设置先验概率：(0.8, 0.2)。笔者根据专家意见

和相关参考资料对模型中节点之间的条件概率进行获取，部分条件概率如表 2 所示^[17-18]。

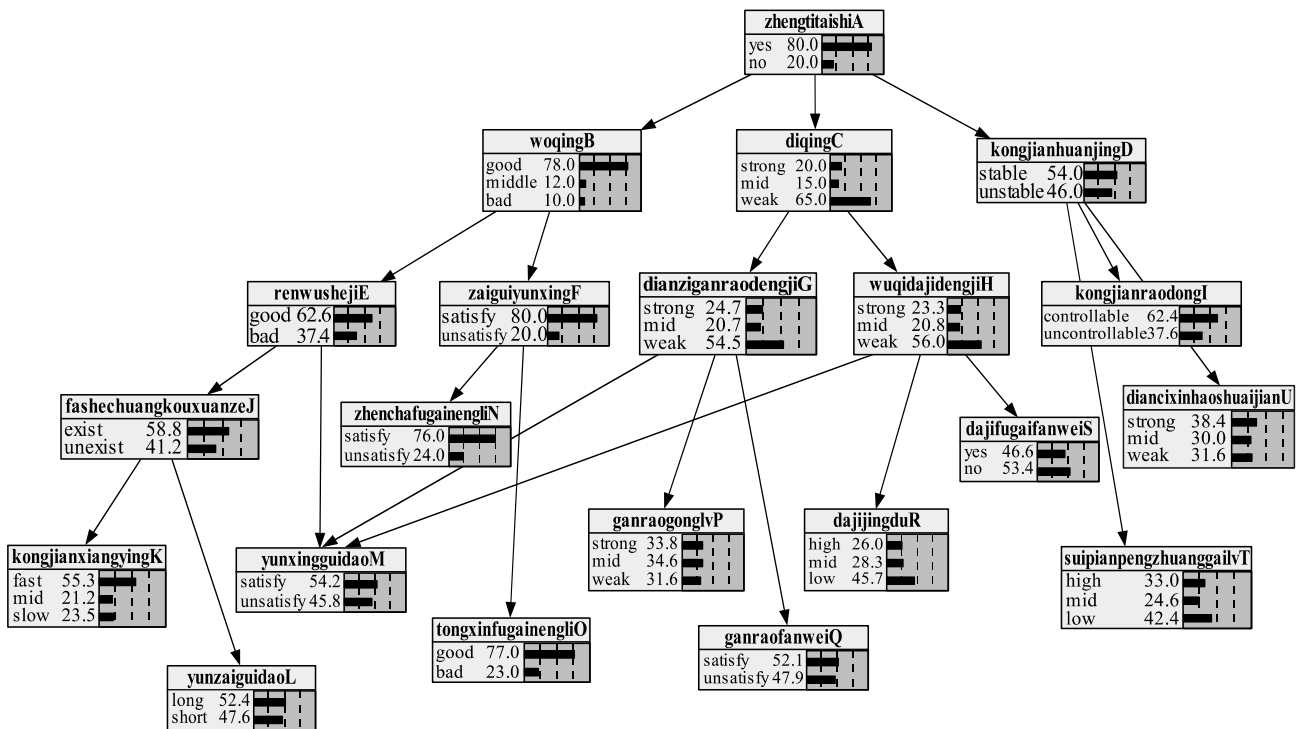


图 5 航天应急发射贝叶斯网络模型

表 2 整体态势、我情、敌情和空间环境条件概率

A	B			C			D	
	好	中	差	强	中	弱	稳定	不稳定
发射	0.9	0.1	0	0.05	0.15	0.80	0.6	0.4
终止	0.3	0.2	0.5	0.80	0.15	0.05	0.3	0.7

4.4 节点置信度更新

构建网络模型以及确定节点之间先验概率后，根据网络中显节点，通过 STK 对航天应急发射进行仿真，相关的轨道参数来自 <http://celestrak.com>。在获取相应的态势数据信息后根据表 1 进行节点状态选取，对网络中隐节点置信度进行更新，结果如表 3 所示。

表 3 贝叶斯网络中隐节点置信度

隐节点	置信度	隐节点	置信度
E(任务设计: 优)	0.888	H(武器威胁等级: 弱)	0.821
F(在轨运行: 满足)	0.990	C(敌情: 弱)	0.779
B(我情: 好)	0.925	D(空间环境: 稳定)	0.967
G(电子干扰等级: 中)	0.530	A(整体态势: 发射)	0.963

由上表可以看出，随着各显节点证据的输入，我情态势处于良好状态置信度为 92.5%；敌方威胁程度处于弱等级置信度为 77.9%；空间环境处于稳定状态置信度为 96.7%；任务整体态势处于发射状态置信度由原先的 80%提升至 96.3%，表明此次航天应急发射任务成功执行的概率超过以往的先验概率，可以选择发射。

5 结束语

笔者利用贝叶斯网络对航天任务不确定性态势融合进行研究，利用置信度更新方法对网络中隐节点的态势进行求解，并以航天应急发射案例验证了该方法的有效性。结果表明，该研究可支持航天指挥员在空间战场中做出正确的指挥决策。

参考文献:

- [1] 李婷婷, 刁联旺, 王晓璇. 智能态势认知面临的挑战及对策[J]. 指挥信息系统与技术, 2018, 9(5): 31-36.
- [2] 宋元, 章新华. 战场态势估计的理论体系研究[J]. 指挥控制与仿真, 2004(1): 43-47.
- [3] 陈斌. 面向空中战场的态势评估关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [4] 陈宏. 网络安全态势感知层次化建模与要素提取研究[J]. 电子技术与软件工程, 2019, 168(22): 196-197.
- [5] 耿文东, 杜小平, 李智, 等. 空间态势感知导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 156-158, 231-233.
- [6] 强立, 杨凡德. 基于角色的态势产品生成控制方法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(10): 1-6, 17.
- [7] 张一博, 黄志良, 孙裔申, 等. 一种基于主题的态势产品生成和分发方法: CN105447085B[P]. 2019.
- [8] 栾恩杰. 关于航天未来发展的几点思考[J]. 国防科技工业, 2020, 243(9): 26-31.