

动态贝叶斯网络在战略级兵棋中的应用

李荟铭, 李德华

(华中科技大学人工智能研究所, 武汉 430074)

摘要: 基于国际战略级兵棋推演系统的需求, 分析和建立了应用于威胁等级评估的动态贝叶斯网络 (dynamic Bayesian networks, DBN)。首先建立贝叶斯网络 (Bayesian networks, BN) 威胁评估模型, 再考虑时间因素对信息进行积累, 为降低复杂度使模型满足 Markovian 特性、内部不变、平稳特性, 最后构建出 DBN 威胁评估模型。使用 Netica 软件进行实验仿真, 实验结果证明: 相比 BN, DBN 模型更有效可靠, 适合战略级兵棋的威胁评估需求。

关键词: 信息科学与系统科学基础学科其他学科; 态势威胁评估; 动态贝叶斯网络; 战略级兵棋

中图分类号: TP27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2015)16-1744-06

Application of dynamic Bayesian networks in strategic-level wargame

LI Huiming, LI Dehua

(Institute of Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the demand of the international strategic-level wargame system, dynamic Bayesian networks (DBN) applied to situation and threat assessment were analyzed and established in this paper. Bayesian networks (BN) model of situation and threat assessment were constructed firstly, by adding the time factor to accumulate information and reducing the complexity of the networks to satisfy the Markovian property, internal invariant and stationarity, and then transformed into DBN. The Bayesian inference software Netica was used in the simulation experiments. Results show that DBN is more efficient and reliable for strategic-level wargame than BN.

Key words: other subjects of basic subject of information science and system science; situation and threat assessment; dynamic Bayesian networks; strategic-level wargame

0 引言

航空母舰战斗群 (aircraft carrier battle group, CVBG) 是一支以航空母舰为首的作战舰队。作为军事战略的重要标志, 其战略意义非常重大。平时时期, 通过军事演习、访问他国军港等活动开展外交与军事合作; 战争时期, 对敌纵深战略战术核/非核打击; 敏感时期, 通过快速部署实施军力威胁。

中国陆上邻国 15 个, 海上邻国 10 个, 是周边安全环境最复杂的国家之一。在这样的国际背景下, 计算机兵棋推演系统的研究, 以及对敌国战略层面上的异动做好及时的态势威胁评估, 是国防发展的必然趋势。目前, 国际战略兵棋推演系统已有研究, 例如有非我方 CVBG 棋子在地图活动时, 且意图不明确, 我方可通过各种手段观测巡洋舰、驱逐舰、护卫舰、核潜艇、运输船、舰载机等作战编成, 以及是

作者简介: 李荟铭 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 人工智能

通信联系人: 李德华, 教授, 主要研究方向: 人工智能. E-mail: 3141862370@qq.com

否已经展开防御态势，各武器平台火力 TNT 吨级等信息来评估态势及其对我方的威胁程度，以此及时反映给指挥员，快速而准确地采取相应对策^[1]。

威胁等级评估是态势评估中的关键部分，从认知方面来解读可定义为：根据各种战场信息以及信息之间的关联，来形成对威胁等级的主观看法的思维过程。因此，采取人工智能的方法结合专家的经验知识、历史积累进行推理是合理的方向，这里认为 BN 法与该方向的研究十分契合^[2-3]。

1 BN

BN 是描述数据变量相互之间依赖关系的有向无环图 (directed acyclic graph, DAG), 分为两部分: 1) 模型结构。以 DAG 表示模型结构属性, 节点之间的联系用有向弧表示, 通常由起因节点指向结果节点。2) 模型参数。这是每个变量的条件概率表 (conditional probability tables, CPT), 其刻画一个变量可能影响另一个变量的程度。通过数据分析获得 BN 模型的过程称为 BN 学习。模型结构已知时, 称为参数学习; 模型结构未知时, 称为结构学习。

2 DBN

DBN^[4-6]在 BN 的基础上与时间信息相结合, 具备了一定的时序处理能力。研究主要讨论离散变量所构成的 DBN。现有变量集 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, $X_i[t]$ 表示变量 X_i 在 t 时刻的值, 为表述 BN 随时间展开的过程, 则需要得到 $X_i[1] \sim X_i[n]$ 上的概率分布。事实上这样的分布非常复杂, 因此, 为了能对复杂系统研究并建模, 需要做一些假设和简化条件处理, 即 DBN 满足一些特性。总结概括如下: 1) Markovian 性: 未来时刻的概率只与当前时刻有关而与过去时刻无关, 即满足 $P(X[t+1] | X[1], X[2], \dots, X[t]) = P(X[t+1] | X[t])$; 2) 每一时间片内网络结构一致平稳; 3) 相邻时间的条件概率过程是平稳的, 即 $P(X[t+1] | X[t])$ 与时间 t 无关, 可以得到不同时间片之间的转移概率。

基于上述特性, DBN 由两部分组成: 1) 初始状态 $X[0]$ 上定义的联合概率分布, 称之为先验网络 B_0 , 如图 1a 所示; 2) 变量 $X[t]$ 与 $X[t+1]$ 上定义的转移概率 $P(X[t+1] | X[t])$ (对所有 t 成立), 称之为转移网络 B_{-} , 如图 1b 所示。

因此, DBN 可以由二元组表示: $DBN = \langle B_0, B_{-} \rangle$. B_{-} 中转移条件概率为

$$P_{B_{-}}(X[t+1] | X[t]) = \prod_{i=1}^n P_{B_{-}}(X_i[t+1] | Pa(X_i[t+1])),$$

其中, $X_i[t]$ 为第 i 个变量 t 时刻取值; $Pa(X_i[t])$ 为其父节点。整个变量集联合概率为

$$P(X[0], X[1], \dots, X[T]) = P(X[0]) \prod_{t=0}^{T-1} P_{B_{-}}(X[t+1] | X[t]).$$

3 态势威胁等级评估的 DBN 模型

抽象化国际战略兵棋推演系统中, 敌方指挥员下一 CVBG 棋子在敏感范围活动, 并在某时刻做出越界行为且展开防御态势的情景下, 利用基于 DBN 模型对其威胁等级进行评估, 判断敌方处

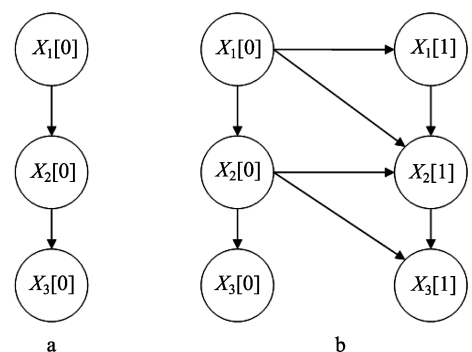


图 1 DBN

Fig. 1 DBN

a—先验网络; b—转移网络

a-Prior network; b-Transfer network

于各种态势的可能性分别为多少。研究中采取的因素：威胁等级 (threat level, TL); 意图威胁 (intent, In); 距离 (range, Range), 活动范围可能出现在第一岛链, 第二岛链, 第三岛链; 战斗群编成规模 (military organizational establishment, MOE), 规模完备或者多航母特混舰队, 中等规模, 精简; 防御系统能力 (defensive system, DS), 预警, 拦截, 反潜反突破、通信等各系统综合评价; 综合火力 (firepower, FI), 武器平台, 巡航弹, 弹道式导弹, 舰载机携带导弹等性能及数量综合评估^[7]。模型中变量的状态集合如下。

TL= (高, 中, 低); In= (高, 低); MOE= (特混, 完备, 精简); Range=[第一岛链 (1st), 第二岛链 (2nd), 第三岛链 (3rd)]; DS= (高, 中, 低); FI= (高, 中, 低)。

目前, DBN 有 2 种常用的构造方式: 数据分析寻找最优以及专家知识人工构造^[8-11]。由于战场信息的保密性, 不公开大量数据, 通常用后者。这里采用的 BN 模型如图 2 所示。

由前一时刻的结果 (即所评估的威胁等级) 作为下一时刻 BN 模型的先验概率 (即证据), 采用前向递归参数学习机制^[12]。这里采用 DBN 模型, 如图 3 所示。

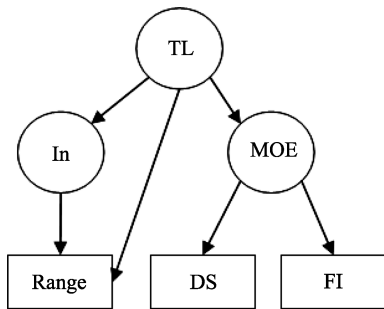


图 2 BN 的威胁等级评估模型

Fig. 2 BN model of situation and threat assessment

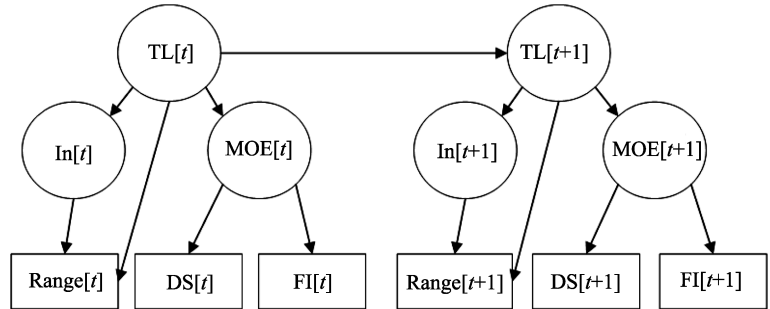


图 3 DBN 的威胁等级评估模型

Fig. 3 DBN model of situation and threat assessment

领域专家对网络中关联节点之间因果关系的看法、专业知识以及经验积累通过条件概率反映在模型中。模型中推理的具体概率规则如下。

如果威胁等级 TL 为高, 则 In 为高, 低的可能性分别为 80%, 20%; 威胁等级 TL 为中, 则 In 为高, 低的可能性分别为 50%, 50%; 如果威胁等级 TL 为低, 则 In 为高, 低的可能性分别为 30%, 70%。

如果威胁等级 TL, In 为高, 则 Range 为 1st, 2nd, 3rd 的可能性分别为 65%, 30%, 5%; 如果威胁等级 TL 为高, In 为低, 则 Range 为 1st, 2nd, 3rd 的可能性分别为 55%, 25%, 20%; 如果威胁等级 TL 为中, In 为高, 则 Range 为 1st, 2nd, 3rd 的可能性分别为 35%, 50%, 15%; 如果威胁等级 TL 为中, In 为低, 则 Range 为 1st, 2nd, 3rd 的可能性分别为 30%, 50%, 20%; 如果威胁等级 TL 为低, In 为高, 则 Range 为 1st, 2nd, 3rd 的可能性分别为 10%, 20%, 70%; 如果威胁等级 TL, In 为低, 则 Range 为 1st, 2nd, 3rd 的可能性分别为 5%, 20%, 75%。

如果 TL 为高, 则 MOE 为高, 中, 低的可能性分别为 50%, 30%, 20%; 如果 TL 为中, 则 MOE 为高, 中, 低的可能性分别为 30%, 50%, 20%; 如果 TL 为低, 则 MOE 为高, 中, 低的可能性分别为 20%, 20%, 60%。

如果 MOE 为高, 则 DS 为高, 中, 低的可能性分别为 60%, 30%, 10%; 如果 MOE 为中, 则 DS 为高, 中, 低的可能性分别为 30%, 50%, 20%; 如果 MOE 为低, 则 DS 为高, 中, 低的可能性分别为 15%, 35%, 50%。

如果 MOE 为高，则 FI 为高，中，低的可能性分别为 70%，20%，10%；如果 MOE 为中，则 FI 为高，中，低的可能性分别为 50%，30%，20%；如果 MOE 为低，则 FI 为高，中，低的可能性分别为 30%，30%，40%。

根据上述推理规则，得到条件概率矩阵，如表 1、表 2 所示。

表 1 推理条件概率矩阵

Tab. 1 Conditional probability matrix

TL	$P(In TL)$		$P(MOE TL)$			MOE	$P(DS MOE)$			$P(FI MOE)$		
	高	低	高	中	低		高	中	低	高	中	低
高	0.80	0.20	0.50	0.30	0.20	高	0.60	0.30	0.10	0.70	0.20	0.10
中	0.50	0.50	0.30	0.50	0.20	中	0.30	0.50	0.20	0.50	0.30	0.20
低	0.30	0.70	0.20	0.20	0.60	低	0.15	0.35	0.50	0.30	0.30	0.40

表 2 推理条件概率矩阵

Tab. 2 Conditional probability matrix

TL	In	$P(Range TL, In)$		
		1st	2nd	3rd
高	高	0.65	0.30	0.50
高	低	0.55	0.25	0.20
中	高	0.35	0.50	0.15
中	低	0.30	0.50	0.20
低	高	0.10	0.20	0.70
低	低	0.05	0.20	0.75

4 实例仿真

采用 DBN 前向递归参数学习机制，使用 Netica (<http://www.norsys.com/>) 贝叶斯仿真建模软件（加拿大公司 Norsys 研发）。观测变量为：Range, DS, FI, 不同时刻 T 时观测数据即所获得证据，如表 3 所示。

表 3 不同时刻由观测所得数据

Tab. 3 Observation data of different times

T	Range			DS			FI		
	(1st	2nd	3rd)	(高	中	低)	(高	中	低)
时刻 0	(0	0.50	0.50)	(0.30	0.40	0.30)	(0.30	0.40	0.30)
时刻 1	(0	0.70	0.30)	(0.40	0.30	0.30)	(0.40	0.30	0.30)
时刻 2	(0.10	0.80	0.10)	(0.50	0.30	0.20)	(0.50	0.25	0.25)
时刻 3	(0.80	0.20	0)	(0.70	0.20	0.10)	(0.50	0.40	0.10)

数据表明：时刻 0 由于信息缺乏而态势不明，时刻 1~时刻 3 的数据表明对方逐步逼近距离，且慢慢展开防御态势，同时有一定高威胁的武器被侦查到，尤其时刻 3 的趋势较为明显。

利用上述数据可以通过 DBN 推理计算出各时刻的威胁等级，利用 Netica 仿真实验，静态 BN 模型

为对比组, DBN 模型为实验组。时刻 0~时刻 3 的实验结果如表 4、表 5 所示。

表 4 静态 BN 对比组结果

Tab. 4 Results of static BN

<i>T</i>	TL(高 中 低)
时刻 0	(18.50 34.30 47.20)
时刻 1	(23.90 41.20 34.90)
时刻 2	(31.60 50.90 17.50)
时刻 3	(59.40 33.90 6.71)

表 5 DBN 实验组结果

Tab. 5 Results of DBN

<i>T</i>	TL(高 中 低)
时刻 0	(18.50 34.30 47.20)
时刻 1	(12.60 40.40 47.00)
时刻 2	(12.80 56.90 30.20)
时刻 3	(26.30 66.70 7.01)

虽然后者已经有了向高威胁态势逼近的趋势, 但似乎静态 BN 模型的结果更符合事实; 虽然符合变化趋势, 但时刻 2、时刻 3 的突然陡峰不能排除是侦查失真或错误, 战略层面上的决策失误则代价十分巨大, 这时往往需要更可靠的或多次评估来验证。因此, 由于态势趋于紧张加快观测频率用更多数据来支持。那么后续数据, 时刻 4~时刻 6 观测所得的数据应接近时刻 3 的数据(为方便比较直接用相同时刻 3 时数据)。再通过 Netica 仿真得对比数据, 如表 6 所示。

表 6 BN 与 DBN 组结果对比数据

Tab. 6 Experimental comparison data of BN and DBN

<i>T</i>	BN-TL(高 中 低)	DBN-TL(高 中 低)
时刻 4	(59.40 33.90 6.71)	(40.30 58.40 1.22)
时刻 5	(59.40 33.90 6.71)	(54.60 45.20 0.19)
时刻 6	(59.40 33.90 6.71)	(67.90 32.10 0.03)
扣除时刻 0, 1	(59.40 33.90 6.71)	(68.40 31.00 0.55)

由表 6 可以看出, BN 对比组数据与时刻 3 的结果相同, 可能性最高的态势为高威胁等级, 可能性停留在 59.40%; DBN 实验组则是有趋势地逼近更优、更符合事实的结果, 可能性最高的态势为高威胁等

级, 可能性最后达到了 67.90%, 低威胁等级的可能性趋近于 0。其中, 最后一组数据为优化结果, 消除了时间相对较远的时刻 0、时刻 1 影响时的 TL 评估结果, 这里认为时刻 0, 时刻 1 观测所得数据已经“过期”, 即对时刻 6 时的威胁等级影响不大, 优化后结果为高威胁等级可能性是 68.40%。

5 结论

研究提出 BN 法在兵器推演系统中的应用, 并介绍了 DBN, 在此基础上针对战略级兵棋中海军相关情景构建了对态势威胁等级评估的模型, 并进行了实验仿真, 用静态 BN 和 DBN 两组结果进行对比。数据表明: DBN 加入了时间因素, 对信息进行了积累, 在大量数据支撑下展现出更高的准确性和可靠性, 进一步说明基于 DBN 的态势威胁等级评估模型适用于战略级兵棋中。

[参考文献] (References)

- [1] 高程. 周边环境变动对中国崛起的挑战[J]. 国际问题研究, 2013 (5): 33-45.
GAO C. Surrounding environment changes: challenges to China's rise[J]. International Studies, 2013(5): 33-45. (in Chinese)
- [2] MIAO A X, ZACHARIAS G L, SHIH-PING K. A computational situation assessment model for nuclear power plant operations[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part A: Systems & Humans, 1997, 27(6): 728-742.
- [3] 王双成, 苑森淼, 王辉. 基于贝叶斯网络的马尔科夫毯预测学习[J]. 模式识别与人工智能, 2004, 17 (1): 17-21.
WANG S C, YUAN S M, WANG H. Learning Markov blanket prediction based on Bayesian network[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2004, 17(1): 17-21. (in Chinese)
- [4] 肖秦琨, 高嵩, 高晓光. 动态贝叶斯网络推理学习理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

- XIAO Q K, G S, GAO X G. Dynamic Bayesian network inference learning theory and applications[M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [5] 柴慧敏, 王宝树. 动态贝叶斯网络在战术态势估计中的应用[J]. 计算机应用研究, 2011, 28 (6): 2151-2153.
CHAI H M, WANG B S. Application of dynamic Bayesian networks in tactical situation assessment[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(6): 2151-2153. (in Chinese)
- [6] GUO H P, WILLIAM H. A survey of algorithms for real-time Bayesian network inference[OL]. [2015-07-08]. <http://www.aaai.org/Papers/Workshops/2002/WS-02-15/WS02-15-001.pdf>.
- [7] 肖秦琨. 基于贝叶斯网络的海上目标识别[J]. 微机发展, 2005, 15 (10): 152-154.
XIAO Q K. Identify object on sea based on Bayesian network[J]. Microcomputer Development, 2005, 15(10): 152-154. (in Chinese)
- [8] HECKERMAN D, GEIGER D, CHICKERING D M. Learning Bayesian networks: the combination of knowledge and statistical data[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 197-243.
- [9] HECKERMAN D. Bayesian networks for data mining[J]. Data Mining & Knowledge Discovery, 1997, 1(1): 79-119.
- [10] 肖秦琨, 高嵩, 高晓光. 基于贝叶斯优化构建 DBN 结构优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29 (10): 1234-1239.
XIAO Q K, GAO S, GAO X G. Constructing DBN structure based on BOA[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(10): 1234-1239. (in Chinese)
- [11] GUO W Q, GAO X G, XIAO Q K. Bayesian optimization algorithm for learning structure of dynamic Bayesian networks form incomplete data[C]//Chinese Control and Decision Conference. New York: IEEE, 2008: 2088-2093.
- [12] 任佳, 高晓光. 贝叶斯网络参数学习及对无人机的决策支持[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
REN J, GAO X G. Bayesian network parameter learning and decision support for UAVs[M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2012. (in Chinese)