

文章编号:1000-582X(2010)10-118-05

不确定推理模型的火箭安全决策系统

李 娅^{1,2}, 张建勋¹, 杨 欣²

(1. 重庆理工大学 计算机科学与工程学院, 重庆 400050; 2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘 要:针对火箭飞行过程和测量环境的复杂性及飞行特点的先验知识和规则的不确定性,提出了一个基于不确定推理算法的火箭安全控制方案。根据安判参数的特点,对其进行了分类,给出了专家系统知识的不确定表示和处理方法,并且结合安控决策规则和决策过程的特征,对推理控制策略进行了分析,并对冲突消解策略、搜索策略提出了相应的算法,给出了不确定匹配原则和可行度的传递方法,构建了与/或决策网和基于规则的通用不确定推理模型。实验和仿真表明该系统能迅速准确的获取火箭发射的各种警情,大大提高了火箭飞行安全控制决策的可靠性和真实性,对火箭的飞行状态进行有效的管理。

关键词:专家系统;不确定性分析;安全系统;决策推理;不确定匹配

中图分类号:TP273.2

文献标志码:A

Uncertain reasoning model for the rocket safety decision system

LI Ya^{1,2}, ZHANG Jian-xun¹, YANG Xin²

(1. College of Computer Science & Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, P. R. China; 2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In view of the complexity of the measuring environment and uncertainty of the a prior knowledge for rocket aviation, a rocket safety control system based on uncertainty reasoning is proposed. The uncertain representation and processing of the knowledge in expert systems are established according to the characteristics of the parameters. Following the characteristics of the decision rules and decision procedure, the reasoning control strategy is studied and the method for conflict resolving strategy and searching strategy is proposed. Then, the uncertain matching rules and the feasibility degree delivering method are expressed, and the decision-making network and the rule-based uncertainty reasoning model were constructed. Simulation experiments show that this system can acquire the craft launching information quickly and accurately, which greatly improves the reliability and authenticity of safety control decision for rocket aviation, and can control the rocket aviating state effectively.

Key words: expert systems; uncertainty analysis; safety systems; decision-making inference; uncertain match

火箭飞行安全控制系统(rocket safety control system, RSCS)由地面安全分系统和火箭安全分系统组成,结合这两个分系统对火箭的飞行状态进行监视、判断,并发出相应的指令^[1]。其具体的判断过

程是:根据可靠性最高的 1 条弹道进行落点计算,将得出的计算值与预先贮存在计算机内的理论数据和管道进行比较,得出相应飞行状态,即正常、报警和炸毁指令。

收稿日期:2010-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60673196)

作者简介:李 娅(1979-),女,重庆理工大学讲师,主要从事人工智能,专家系统方向研究,(Tel)13883700702;
(E-mail)ly_ppx@cqu.edu.cn.

在火箭飞行安全控制问题上,有许多关于火箭飞行特点的先验知识和规则。而传统的火箭飞行安全控制算法主要是依据事先给定的确定性安全控制规则,通过简单的布尔逻辑运算,与理论数据和管道进行比较得出安控决策,由于这种方法无法反映火箭飞行过程中的复杂性和各种因素的干扰,难以给出实际各种安控信息的重要性、精确性程度和安控规则的优先程度,所形成的安控决策可信度和可靠度低,不能对火箭飞行过程进行有效的安全控制,欠缺实际应用意义^[2]。所以要提高火箭飞行过程的安全控制决策的可靠性,就要从安控规则和推理算法的角度入手,来体现各种实际重要的安控信息,提高火箭飞行过程精确性的描述程度,合理科学的规划安控规则的优先级。笔者提出了一种新的基于不确定性推理算法的专家系统,给出了知识的不确定性表示和处理方法,以及不确定性匹配原则,建立了冲突消解策略和搜索策略。通过对历史数据和仿真数据的实验表明,该方法能迅速准确的获取火箭发射的各种警情,确定其影响范围,更加有效的辅助安控军官做出决策^[3]。

1 推理控制策略的选择

推理过程是一个思维的过程,即求解问题的过程。问题求解的质量不仅依赖于所采用的求解的方法,而且还依赖于求解问题的策略,即推理的控制策略。推理的控制策略主要包括推理方式、冲突消解策略和搜索策略等^[4-6]。

在火箭飞行安全控制专家系统(rocket safety control expert system, RSCES)中,根据各种参数和规则的特点,采用了 3 个工作区来表示各种知识。分别是: 1) 参数区记录不同时刻不同参数的取值; 2) 规则元区用来描述规则的一个条件或结论,是组成规则的基本单位; 3) 规则区(动态数据库),采用产生式表示规则的方法,存放中间事实与推理结论。根据这 3 个工作区的结构特点,采用了面向对象的正向推理机制,即从已知的事实出发,向结论方向进行推导,直到推出正确的结论。大体过程是:推理控制模块根据动态数据库的变化,适时激活、匹配知识库中的知识,修改和更新数据库中的信息,推动解一步步构造出来(正向推理)。知识库中规则的调用是动态的而且实时的。求解问题根据动态数据库的现状和知识库中的知识,通过搜索和匹配来完成的,因而可进行多次反馈、综合判断,提高系统的灵活性和应变决策能力^[7-9]。其具体的推理过程如图 1 所示。

推理过程中系统不断地用当前已知事实与知识

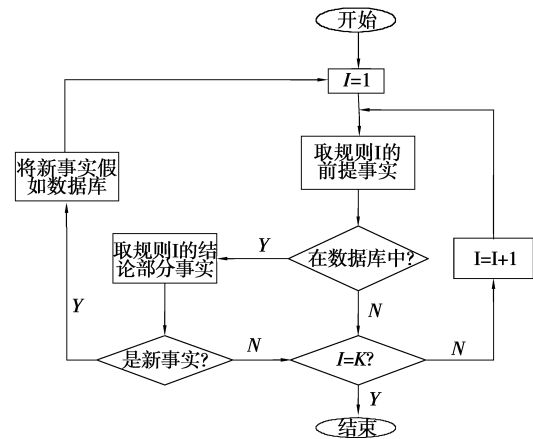


图 1 推理机制流程图

库中的知识进行匹配,可能同时有多条知识的前提条件被满足,即这些知识都匹配成功,形成冲突,具体选择哪一条规则执行成为冲突解决策略的主要内容。由于 RSCES 中,采用的是基于产生式的不确定知识表示方法,由知识专家给每条规则 1 个置信度 CF (certainty factor),对于所有符合匹配要求的规则根据置信度的大小来决定规则匹配的优先级。

搜索是人工智能中的一个基本问题,是推理不可分割的一部分,直接关系到专家系统的性能与运行效率。根据在 RSCES 中规则的特殊性,主要采用了宽度优先搜索,与一般的宽度优先搜索又不太一样。它是由下至上逐层进行的,在对上一层的任一结点进行搜索之前,必须搜索完本层地所有结点。

2 不确定推理模型

2.1 知识的不确定表示

在 RSCES 中,安控决策知识常常不能用常规的准确的数据度量,或者说不能精确地描述,这种不确定的模糊的知识表示和处理方法多种多样。采用基于产生式的不确定性知识表示方法,其表示形式如下

$$R: \text{IF } E_1(\omega_1) \text{ AND } E_2(\omega_2) \text{ AND } \dots \text{ AND } E_n(\omega_n) \\ \text{THEN } H(CF(H, E), \lambda), \quad (1)$$

其中 E_i ($i=1, 2, \dots, n$) 是规则的前提条件, H 是结论;

ω_i ($i=1, 2, \dots, n$) 是规则子条件 E_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的权值, $\sum \omega_i = 1$; $CF(H, E)$ ($0 < CF(H, E) \leq 1$) 是规则的可信度; λ ($0 < \lambda \leq 1$) 是规则可否应用的阈值,只有当前提条件 E 的可信度 $CF(E)$ 达到或超过这个限度,即 $CF(E) \geq \lambda$ 时,相应的规则才会被应用,上述表示方式比较符合人们自然的逻辑

推理方式^[10]。例如

IF (外测落点连续报警超界 60 次) (1.0)

THEN (外测告警)(0.8,0.7)。

应用规则元的表示形式,即

IF S_{20} (1.0) THEN S_w (0.8,0.7);

系统中,不仅给出了前提可信度 $CF(E)$ 、规则可信度 $CF(H,E)$ 和结论可信度 $CF(H,e)$,还给出了证据可信度 $CF(e)$ 、条件可信度 $CF(E,e)$,结果可信度 $CF(h)$ 和假设可信度 $CF(H)$,其中 $CF(E)$ 和 $CF(H)$ 是根据经验统计出来得,一般有领域专家在模糊规则中直接给出。由这些知识的不确定表示,给出了 RSCES 的不确定推理模型,如图 2 所示。

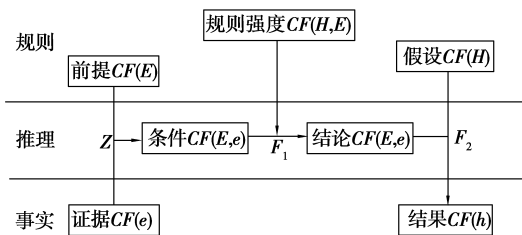


图 2 RSCES 不确定推理模型

2.2 知识的不确定性处理

规则可信度 CF 的值是由领域专家根据经验在模糊规则中给出的,而由于不同专家对同一规则可能存在多个可信度值。如 n 个专家给出 n 个 CF ,则按升序排序,有 $CF_1 < CF_2 \dots < CF_N$ 。在这里, CF_1 受 CF_2 的正影响, CF_2 受 CF_1 的负影响,又同时受 CF_3 的正影响,以此类推,起影响值可按下式计算

$$S = \begin{cases} d/2 & , (d \leq 0.5); \\ (1-d)/2 & , (d > 0.5), \end{cases}$$

其中 d 是相邻近相互影响的 CF 的差的绝对值,1 个 CF 所受的总影响值 S 总,由它所受到的正影响 $S+$ 减去负影响 $S-$,即 $S_{总} = S+ - S-$ 。这样修正后的 CF 为原来的 CF 与 S 总的和,即

$$CF' = CF + S_{总}。$$

综合考虑各可信度值 CF ,可得到 1 组协调后的可信度 CF' ,最后利用这组协调后的可信度,则可求出规则的最终的可信度 CF ,即

$$CF = (\sum_{i=1}^n CF'_i) / N。$$

这样得到的可信度值就综合考虑了各专家的意见,使推理结论更接近实际,更具有接近人类思维的特点^[11-12]。

2.3 不确定性匹配算法

所谓匹配(有时也称模式匹配)是指对 2 个知识

模式的比较与耦合,即检查这 2 个知识结构是否完全一致或近似一致,若按匹配时 2 个模式的相似程度划分,匹配可分为确定性匹配和不确定性匹配 2 种情况。确定性匹配是指 2 个模式完全一致,也称完全匹配或精确匹配,不确定性匹配是指 2 个模式不完全一致,但总体上来说,它们的近似程度又在规定的限度内^[13-15]。下面讨论规则的不确定性匹配。

在 RSCES 中,为了由给定的初始证据推出相应的结论,首先必须从知识库中选出可与证据匹配的生成式规则。数据库中的事实有 2 个来源:一是系统所提供的初始证据,另一个是由前面推理规则得出的结论(中间证据)。

这里,设不确定性规则的表示形式如式(1)所示。其中,前提命题 E_1, E_2, \dots, E_n 的不确定性分别为 $CF(E_1), CF(E_2), \dots, CF(E_n)$;相应的证据为 e_1, e_2, \dots, e_n ;不确定性分别为 $CF(e_1), CF(e_2), \dots, CF(e_n)$ 。具体的匹配算法如下

1) 求出各个子前提与相应证据之间的距离 d_i

$$d_i(E, e) = \{ [CF(E_i) - CF(e_i)] \vee 0 \} \times \omega_i, \\ i = 1, 2, \dots, n。$$

2) 求出 d_i 的最大值 $d_{max}(E, e)$

$$d_{max}(E, e) = \vee d_i, \quad i = 1, 2, \dots, n。$$

3) 用下述公式求出匹配程度 $m(E, e)$

$$m(E, e) = 1 - d_{max}(E, e)。$$

4) 若 $m(E, e) > \lambda$ 时,则认为证据和规则匹配,这时规则才可以激活,从而得到 1 个规则实例。

2.4 与或树中可信度的传递计算

采用可信度理论的不确定推理过程非常适用于用 1 棵与/或树描述的决策网络。其中,“与”结点表示用 1 条规则推断结论,该规则前提是几个证据的“与”对应着“与”结点的几个分枝;“或”结点反应的是多条规则支持同一结论的推理。若给定事实的可信度,根据规则的可信度便可自下而上地计算各层中间结点乃至结论的可信度,其方法可归纳如下

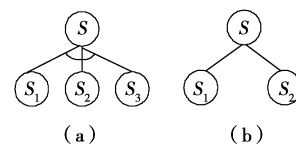


图 3 “与”、“或”结点可信度计算

1) “与”结点处的可信度

如图 3(a)所示,结点 S 处的可信度

$$CF(S, e) = CF(S, S_1 \cap S_2 \cap S_3) \cdot CF(S_1 \cap S_2$$

$\cap S_3, e$ 由于 S_1, S_2, S_3 是逻辑“与”的关系,则有 $CF(S_1 \cap S_2 \cap S_3, e) = \omega_1 \times CF(S_1, e_1) + \omega_2 \times CF(S_2, e_2) + \omega_3 \times CF(S_3, e_3)$ 设规则的可信度为 R , 即

$$R = CF(S, S_1 \cap S_2 \cap S_3)。$$

那么

$$CF(S, e) = R \times [\omega_1 \times CF(S_1, e_1) + \omega_2 \times CF(S_2, e_2) + \omega_3 \times CF(S_3, e_3)] \quad (2)$$

“或”结点处的可信度

$$CF(S, e) = CF(S, e_1 \cup e_2) = \begin{cases} CF(S, e_1) + CF(S, e_2) - CF(S, e_1) \times CF(S, e_2), CF(S, e_1) \geq 0, CF(S, e_2) \geq 0; \\ \frac{CF(S, e_1) + CF(S, e_2)}{1 - \min[CF(S, e_1), CF(S, e_2)]}, CF(S, e_1) \text{ 与 } CF(S, e_1) \text{ 异号}; \\ CF(S, e_1) + CF(S, e_2) + CF(S, e_1) \times CF(S, e_2), CF(S, e_1) < 0, CF(S, e_2) < 0. \end{cases}$$

2.5 应用举例

下面以本系统的部分安控决策为例,将上述不确定推理说明如下。设有如下一组规则知识

R_1 : IF $S_1(0.5)$ AND $S_3(0.5)$

THEN $S_{w1}(0.8, 0.6)$ $CF(S_{w1}) = 0.8。$

R_2 : IF $S_{w1}(1.0)$

THEN $S_w(0.8, 0.7)$ $CF(S_w) = 0.9。$

R_3 : IF $S_{20}(1.0)$

THEN $S_w(0.8, 0.7)$ $CF(S_w) = 0.9。$

R_4 : IF $S_7(0.75)$ AND $S_9(0.25)$

THEN $S_y(0.9, 0.6)$ $CF(S_y) = 0.9。$

R_5 : IF $S_w(0.5)$ AND $S_y(0.5)$

THEN $S_z(0.9, 0.7)$ $CF(S_z) = 0.9。$

对于上述各条规则,可以分别用 R_i, ω_i 来表示各条规则的可信度(规则强度)及规则条件 S_i 的权值。其中

$CF(e_1) = CF(e_3) = CF(e_7) = 0.8; CF(e_5) = CF(e_{20}) = 1,$ 对所给安判参数的分析,可以得到各个证据的可信度分别为

$CF(e_1) = 1; CF(e_3) = 0.5; CF(e_7) = 0.8;$

$CF(e_9) = -0.8; CF(e_{20}) = 1。$

根据上述规则,证据和结论构成如图 4 所示的决策网络。

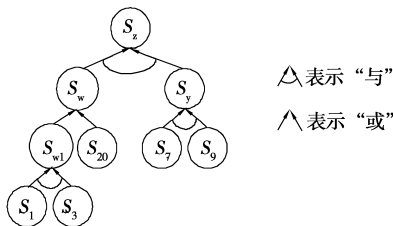


图 4 决策网络

1) 匹配程度的计算

$$d_{S_1}(S, e) = \{[CF(S_1) - CF(e_1)]V_0\} \times \omega_{S_1} = [(1 - 1)V_0] \times 0.5 = 0。$$

如图 3(b)所示,设 2 条规则的强度分别为 R_1, R_2 , 则由结论可信度计算公式得

$$CF(S, e_1) = CF(S, S_1) \times CF(S_1, e_1) = R_1 \times CF(S_1, e_1);$$

$$CF(S, e_2) = CF(S, S_2) \times CF(S_2, e_2) = R_2 \times CF(S_2, e_2),$$

其中 $CF(S, e_1), CF(S, e_2)$ 分别由推理链 $e_1 \rightarrow S_1 \rightarrow S, e_2 \rightarrow S_2 \rightarrow S$ 得可信度,由于 $e = e_1 \cup e_2$, 则 S 处的可信度

同理,可计算出

$$d_{S_3}(S, e) = 0.25; \quad d_{S_7}(S, e) = 0.15$$

$$d_{S_9}(S, e) = 0.45; \quad d_{S_{20}}(S, e) = 0。$$

2) 规则能否激活

$$m_1(S, e) = 1 - d_{1\max}(S, e) = 1 - \max(d_{S_1}, d_{S_3}) = 1 - 0.25 = 0.75 > 0.6,$$

规则 R_1 激活;

同理,可计算出

$$m_3(S, e) = 1 > 0.7, \text{ 规则 } R_3 \text{ 激活};$$

$$m_4(S, e) = 0.55 < 0.6, \text{ 规则 } R_4 \text{ 不能激活};$$

由于规则 R_4 不能激活,因此规则 R_5 也不能激活;对于规则 R_2 是否激活参见后面的分析。

3) 根据条件可信度计算得

$$CF(S_1, e_1) = CF(S_1) \times CF(e_1) = 1 \times 1 = 1。$$

同理,有

$$CF(S_3, e_3) = 0.5, CF(S_{20}, e_{20}) = 1。$$

4) 根据决策网络,由下而上,可信度计算如下

$$CF(S_{w1}, e_{w1}) = CF(S_{w1}, S_1 \cap S_3) \times CF(S_1 \cap S_3, e_{w1}) = R_1 \times [\omega_{S_1} \times CF(S_1, e_1) + \omega_{S_3} \times CF(S_3, e_3)] = 0.8 \times (0.5 \times 1 + 0.5 \times 0.5) = 0.6。$$

由于

$$CF(S_{w1}, e_{w1}) = CF(S_{w1}) \times CF(e_{w1}), \text{ 则}$$

$$CF(e_{w1}) = \frac{CF(S_{w1}, e_{w1})}{CF(S_{w1})} = \frac{0.6}{0.8} = 0.75;$$

$$d_{S_{w1}}(S, e) = \{[CF(S_{w1}) - CF(e_{w1})]V_0\} \times \omega_{S_{w1}} = [(0.8 - 0.75)V_0] \times 1.0 = 0.05,$$

$$m_2(S, e) = 1 - 0.05 = 0.95 > 0.7, \text{ 规则 } R_2 \text{ 激活}。$$

由与/或树中可信度的传播计算法则,“或”结点处的可信度应为

$$CF(S_w, e_{w1}) = CF(S_w, S_{w1}) \times CF(S_{w1}, e_{w1}) = R_2 \times CF(S_{w1}, e_{w1}) = 0.8 \times 0.6 = 0.48。$$

同理,有

$$CF(S_w, e_{20}) = CF(S_w, S_{20}) \times CF(S_{20}, e_{20}) = R_3 \times CF(S_{20}, e_{20}) = 0.8 \times 1 = 0.8.$$

则在 $e = e_{w1} \cup e_{20}$ 下, 由并行规则模型得 S_w 的可信度为

$$CF(S_w, e) = CF(S_w, e_{w1} \cup e_{20}) = CF(S_w, e_{w1}) + CF(S_w, e_{20}) - CF(S_w, e_{w1})CF(S_w, e_{20}) = 0.48 + 0.8 - 0.48 \times 0.8 = 0.896.$$

再由结果可信度计算得

$$CF(S_w) = CF(S_w, e) \times CF(S_w) = 0.896 \times 0.9 = 0.8064.$$

所以最终结果是 S_w , 即外测告警, 可信度为 0.8064.

3 结 论

根据安控决策规则和决策过程的特点, 对推理控制策略进行了研究, 针对基于可信度形式的知识表示, 提出了一种新的不确定推理算法, 并给出了相应的推理模型, 在实际运用中取得了较好的效果。

参考文献:

- [1] 李娅, 魏洪波, 李伟, 等. 火箭安全控制智能决策支持系统的设计与实现[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 27(12): 102-106.
LI YA, WEI HONG-BO, LI WEI, et al. Design and realize intellignet decision support system of rocket safety control[J]. Journal of Chongqing University : Natural Science Edition, 2004, 27(12): 102-106.
- [2] 李伟, 黄席樾, 魏洪波, 等. 基于知识的火箭安全控制智能决策系统[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(1): 77-80.
LI WEI, HUANG XI-YUE, WEI HONG-BO, et al. Knowledge-based intelligent decision-making system for the safety of rockets [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(1): 77-80.
- [3] BI D, WANG G L, ZHANG J. Nvel leaning feed-forward controller for accurate robot trajectory tracking [C]// Advances in Natural Computation, First International Conference. Changsha, China; IEEE, 2005, 8: 266-269.
- [4] 魏传锋, 李运泽, 王浚, 等. 航天器热故障诊断专家系统推理机的设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 1(1): 60-62.
WEI CHUAN-FENG, LI YUN-ZE, WANG JUN, et al. Design on inference engine of the spacecraft thermal fault diagnosis expert system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 2005, 31(1): 60-62.
- [5] XIAO Q, RAO M. Knowledge architecture and system design for intelligent operation support systems[J]. Expert System with Applications, 1999, 17: 115-127.
- [6] GIARRATANO J, RILEY G. Expert systems principles and programming (3 edition)[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [7] 郭茂耘, 李楠, 李尚福, 等. 基于 GIS 的光时域反射仪通信光缆故障智能决策[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(7): 78-81.
GUO MAO-YUN, LI NAN, LI SHANG-FU, et al. Intelligent diagnosis method of optical cable based on GIS and OTDR[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 23(4): 20-22.
- [8] WANG W. An intelligent system for dynamic system state forecasting[C]// Advances in Neural Networks, Second International Symposium on Neural Networks. Chongqing, China; IEEE, 2005, 5: 460-465.
- [9] ZHAO Z H, LI Y J. Reverse triple I method of fuzzy reasoning for the implication operator RL [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2007, 53: 1020-1028.
- [10] 李德毅, 杜鹁. 不确定性人工智能[M]. 北京国防工业出版社, 2005.
- [11] CHARD J, QIAND S. Semantics-preserving dimensionality reduction rough and fuzzy-rough-based approaches[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2004, 16(12): 1457-1471.
- [12] YU Q, ZENG M J, LI X X. Implementation of knowledge maintenance modules in an expert system for fault diagnosis of chemical process opration[J]. Expert System with Application, 2005, 28: 249-257.
- [13] CAO T, SANDERSON A C. Representation and analysis of uncertainty using fuzzy petri nets[J]. Journal of Intelligence & Fuzzy System, 1995, 3(1): 3-20.
- [14] DAI J, SUN Q Y. Distribution system fult diagnosis based on improved rough sets with uncertainty. [C]// 4th International Symposium on Neural Networks. Nanjing, China; IEEE, 2007, 6: 607-615.
- [15] MCDERMID J A. Structure engineering and software: certainty, uncertainty and probability[C]// Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers. [s. l.]: Journal of Aerospace Engineering, 1996, 209 (G4): 307-311.

(编辑 侯 湘)