

面向发射过程的安全决策应用技术研究

李 伟

(重庆交通大学信息科学与工程学院, 重庆 400074)

摘要: 在传统安控系统中, 受设备测量系统误差和弹道跟踪系统误差的影响, 测量所得的弹道参数精度不高, 导致常有误报警发生。针对上述问题, 在分析原有安控方法的基础上, 采用智能决策方式, 融合安全控制知识处理技术, 提出基于知识的安控决策实现方法。仿真运行结果表明, 该方法具有准确率高、易扩展等优点, 能够提高安控决策的可信度和真实性。

关键词: 安全控制; 知识处理; 安全决策

Research on Safety Decision Application Technology in Launch Process

LI Wei

(College of Information Science & Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

【Abstract】 In the traditional systems of safety control, precision of trajectory parameter is not high and this often results in fake alarms which is due to the systemic error in measurement and trajectory track. Aiming at these problems, based on analyzing the characteristics, the method adopts the intelligent decision way and contains the technology of dealing with safety knowledge, a realization method of making some knowledge-based intelligent decision for the safety control is proposed. Simulational experiment results show that the method is more accurate and extensible, and improves the certainty and authenticity of the safety decision.

【Key words】 safety control; knowledge processing; safety decision

1 概述

火箭发射是一项尖端科技试验任务, 存在较大的风险, 其安控系统实施的关键在于提供及时和精确的安全控制信息, 并基于这些信息做出相应的安全控制决策, 确定性安判规则并没有反映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, 对安全控制决策所需信息的精度和可靠性而言, 是无法满足其实际需要的。采用可靠高效的安控技术和系统, 可更加准确和科学地实现对发射过程安全性的全方位测量与预测, 提前感知或迅速、准确地获取发射警情信息, 从而有效地进行安全控制决策。

2 安全控制流程决策

运行信息系统、决策系统和执行系统是构成监控管理系统的 3 大要素, 通信系统是联系并协调上述系统运行的枢纽, 安全控制决策流程如下:

(1) 运行信息系统中存储有由各外测设备获得的位置和速度信息、相关遥测信息等。根据上述信息, 经过处理得到安控决策子系统能够处理的数据形式, 获得当前运行的弹道、落点和压力等属性。

(2) 通过当前飞行状况, 基于特定安控需求, 运用系统中存储的飞行安控知识以及各种计算模型(如设备误差模型、可信度分配模型等), 通过定量的模型数值计算和定性的知识推理, 产生飞行安控决策。

(3) 安控人员通过人机接口, 结合自身主观决策, 产生最终的执行方案。

3 安控模块设计

安全控制决策系统本质上是一个融合飞行状态检测、弹

道选优、数据处理和安全事件处理决策的计算机决策支持系统, 通过将发射安全控制中的知识和经验、弹道数据处理的一些方法和测量误差分析的一些基本思想等综合起来, 构成系统的知识库和模型库。再将安全控制时的思路和人工智能技术结合起来, 构成系统的推理机构, 根据实时飞行的状态, 分析获得的弹道数据信息和其他相关的知识与模型, 给出参考的安全相关信息, 通过集成推理机调用控制方案, 安控系统^[1-2]框架结构如图 1 所示。

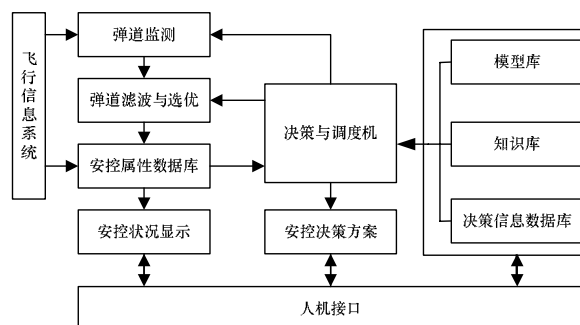


图 1 安全控制智能决策系统

安控系统结构如下:

(1) 弹道监测: 通过同飞行信息系统的交互, 获得飞行实时弹道各种原始数据(如外测的位置和速度、遥测的压力等)。

基金项目: 国家部委预研基金资助项目

作者简介: 李 伟(1976 -), 男, 副教授, 主研方向: 智能控制, 知识工程

收稿日期: 2009-12-10 **E-mail:** lwscen@163.com

(2)弹道滤波和选优：根据测量设备和弹道数据的实际情况，结合相应的优化处理方法和模型，从多条测量弹道中选出最能反映飞行实际情况的最佳弹道。

(3)安控属性数据库：管理从飞行信息系统、弹道数据处理等前端数据处理系统的获得数据，包括外测、遥测和压力等3大类，其取值是动态变化的，为安控提供有关原始数据。

(4)决策信息数据库：存储每一个决策的相关信息，包括决策时间、推理流程等，保存历史信息，便于人员查询和分析决策情况。

(5)安控状况显示：该模块将检测的安全状况，同飞行信息系统送来的理论弹道、时空坐标和安全管道相结合，实时地显现出该时刻安全状况，便于安控人员直观地掌握飞行安全情况，做出自己的决策。

(6)知识库：描述发射安全控制的知识和专家的经验，包括安全属性参数、原子事实和安全控制规则3个部分。

(7)模型库：主要存放弹道数据分析和优化、测量设备误差模型和设备可信度分析3个方面的数学模型。

(8)决策和调度机：由定性的知识推理机和模型运算构成。知识推理采用搜索树完成，在安全决策过程中，推理机根据安全属性数据，通过单向或双向搜索选用适当的规则，最终提出各种安全控制决策方案。

(9)人机接口：它贯穿在整个决策、控制和分析过程中，操作者通过它可以操作知识库和模型库，查询相关数据和决策信息，辅助安判人员做出最终的决策。

4 安控知识处理

安控模块以数据库、模型库和知识库的形式，实现了安全控制管理的各种定量的计算模型和经验性的安全控制策略知识，体现了基于知识的智能决策支持特点。

4.1 安控知识形式

安控知识主要包括安全属性参数、原子事实和安全控制规则3个部分。安全属性参数是反映飞行状态的基本参数，如落点、射程、速度、压力等。原子事实是具有确定信息的一个判断、关系表达式或指令，用以描述规则的一个条件或结论，是组成规则的基本单位。规则是将若干规则元按一定方式和次序相关联而形成的一个知识单元，代表了领域专家启发性经验知识，体现了安全控制的原则和规律。

在系统中，安控规则知识是用产生式规则表示，其一般形式为

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

其中， $E_i(i=1,2,\dots,n)$ 和 H 分别是规则的前提条件和结论； ω_i ($0 < \omega_i < 1$)是规则子条件 $E_i(i=1,2,\dots,n)$ 的权值， $\sum \omega_i=1$ ； $\text{CF}(H,E)$ ($0 < \text{CF}(H, E) < 1$)是规则的可信度； λ ($0 < \lambda < 1$)是规则可否应用的阈值，只有满足 $\text{CF}(E) > \lambda$ 时，相应规则才会被应用，上述表达方式比较符合人们自然的逻辑推理方式。例如： $\text{IF}(W_{Y1} \text{连续报警超界 } N3 \text{次})(1.0) \text{ THEN } (W_Y \text{报警})(1.0, 0.60)$ 。

在系统中，各原始安全控制测量信息即为初始证据，考虑到飞行数据测量的误差性和安全属性数据计算的复杂性，在设计初步阶段主要采用专家评定等方法进行初始证据可信度 $\text{CF}(E)$ ($0 < \text{CF}(E) < 1$) 的确定。

4.2 安控知识获取方法

目前，大多数安全决策系统是通过领域专家决策经验采用规则形式加以描述，将待决策对象的行为征兆与潜在危险联系起来模拟领域专家的安全决策行为，实现对特定危险

的安全决策工作。在实际分析过程中，同一危险现象也有可能引起不同的行为征兆集合，如何从现有分散的事实中快速、准确地获取最优安控知识规则，从而完成安全决策是安控知识获取所要解决的问题。

基于信息熵的免疫算法^[3]用于安控知识获取，是将每个可能安控规则看作是抗体群中的一个抗体，采用合适的编码方式，利用信息熵作为反映单个抗体(规则)与单个安全决策经验事例相似度的指标，通过免疫算子对抗体群进行操作，经过不断迭代，逐步朝更优解方向进化，最终得到满足要求的抗体(最优安控知识)^[4]。

根据待决策对象的危险报警类别，确定危险报警现象 H_i 及数目 m ，构成一个危险报警现象集合 H ：

$$H = \{H_i\}, i=1,2,\dots,m$$

其中， H_i 对应有危险报警症状 E_j 及数目 n ，构成一个危险报警症状集合 E ：

$$E = \{E_j\}, j=1,2,\dots,n$$

其中， E_j 对应有属性值 O_k ，构成一个属性值集合 O ：

$$O = \{O_k\}, k=1,2,\dots,s$$

对某一危险报警现象 $H_i \in H$ ，安全决策经验事例共有 g 个，作为 H_i 的正规则，表示为

$$R_{p_i} = (E_{p_1}, E_{p_2}, \dots, E_{p_n}), i=1,2,\dots,g$$

其余事例共有 r 个，作为 H_i 的反规则，表示为

$$R_{n_i} = (E_{n_1}, E_{n_2}, \dots, E_{n_n}), i=1,2,\dots,r$$

假设抗体 K 为可能的安控知识，则分别计算抗体 K 与 R_{p_i} 的相似度 $A(K, R_{p_i})$ ，与 R_{n_i} 的相似度 $A(K, R_{n_i})$ ，就可获得抗体 K 同所有经验事例的匹配度计算函数：

$$AFI(K) = (1 + \sum_1^g A(K, R_{p_i})) / (1 + \sum_1^r A(K, R_{n_i})) \quad (1)$$

其中， $\sum_1^g A(K, R_{p_i})$ 和 $\sum_1^r A(K, R_{n_i})$ 分别对应抗体 K 代表该知识对正反事例的适合度，式(1)作为安控知识获取的优化目标函数，即抗原。

在文献[5]协同进化模型基础上，结合基本免疫算法，建立安控知识获取的免疫协同进化(Immune Co-Evolution, ICE)框架。免疫协同进化计算的主要构成要素是各个免疫细胞群体、免疫细胞的进化算法和细胞种群调节机制等，进化采用基本免疫算法，免疫协同进化可以形式化描述如下：

$$ICE = (CP, CPIA, CPN, CN)$$

其中， CP 为免疫细胞种群； $CPIA = \{IA_1, IA_2, \dots, IA_{CPN}\}$ ， IA_i 表示第 i 个进化细胞种群的免疫进化算法， $IA_i = \{s_i, g_i, p_i, f_i, d_i\}, i=1,2,\dots$ ， s_i 表示第 i 个进化细胞种群的选择策略， g_i 表示第 i 个进化细胞种群的进化操作算子，包括细胞克隆、克隆抑制等， p_i 表示第 i 个进化细胞种群的进化操作算子的执行概率， f_i 表示第 i 个进化细胞种群的亲合度函数， d_i 表示第 i 个进化细胞种群的浓度函数； CPN 为免疫细胞种群数； $CN = \{CN_1, CN_2, \dots, CN_{CPN}\}$ ， CN_i 表示第 i 个进化细胞种群的所含个体的数量。

若 $CP(k) = \{CP_1^k, CP_2^k, \dots, CP_{CPN}^k\}$ 表示协同进化的当前免疫细胞群体， $CP_i^k = \{C_{i,1}^k, C_{i,2}^k, \dots, C_{i,CN_i}^k\}$ 表示第 i 个进化细胞的当前群体，则免疫协同进化中从第 $k-1$ 代进化到第 k 代可以表示为

$$CPIA: CP(k-1) \rightarrow CP(k), k=1,2,\dots$$

细胞群的进化过程可以表示为

CP(0) → CP(1) → CP(2) → …

则安控知识获取就转化为寻找同抗原亲合度最佳的抗体。在抗体群中,使目标函数 $AFI(K)$ 值最大的抗体 K 所代表知识最适合所有给定的正反危险报警事例,就是所要获取的最佳安控知识。

5 安全决策流程

5.1 安控决策网的形成

根据安控决策知识的表示形式^[6]可建立安控决策网络,以表 1 “ W_y 告警”知识模型建立的决策网络如图 2 所示,彼此关系可用逻辑与门“AND”和逻辑或门“OR”代表。

表 1 安控决策知识表

编号	前提 1	前提 2	结论
1	$W_1(0.75)$	$W_2(0.25)$	$W_{y1}(0.90, 0.70)$
2	$W_1(0.60)$	$W_4(0.40)$	$W_{y1}(0.80, 0.50)$
3	$W_2(0.45)$	$W_3(0.55)$	$W_{y1}(0.70, 0.60)$
4	$W_2(0.65)$	$W_4(0.35)$	$W_{y2}(0.85, 0.70)$
5	$W_2(0.70)$	$W_3(0.30)$	$W_{y3}(0.90, 0.80)$
6	$W_{y1}(1.00)$	-	$W_y(1.00, 0.60)$
7	$W_{y2}(1.00)$	-	$W_y(0.80, 0.60)$
8	$W_{y3}(1.00)$	-	$W_y(0.90, 0.80)$

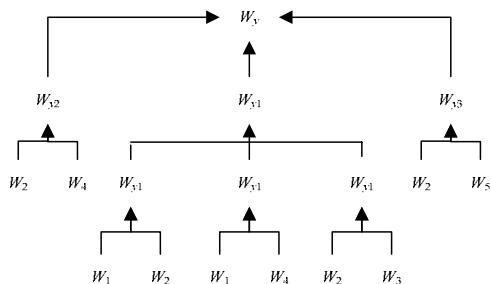


图 2 “ W_y 告警”决策网络

用决策网络所表示的知识更为直观,所需节点数目、观测证据节点以及安控决策规则数目等较为清楚。

5.2 安控决策流程

安控决策流程如下:

Step1 $T=k$ 安控决策开始时,将初始证据(数目不确定,由系统判断生成)加入 BASIC_FACT_LIST。

Step2 若 BASIC_FACT_LIST 为空,则转入 Step9。

Step3 $I=1$, 获取 CURRENT_RULE=DEDUCE_RULE_LIST.FIRST。

Step4 用 SEARCHNEWFACT(CURRENT_RULE, BASIC_FACT_LIST)函数,获取新证据,并将新证据加入 BASIC_FACT_LIST。

Step5 若 BASIC_FACT_LIST 中元素个数变化,则转入 Step3。

Step6 若 CURRENT_RULE 不是最后一个安全规则,则 $I=I+1$, CURRENT_RULE=DEDUCE_RULE_LIST.NEXT, 转入 Step 4。

Step7 使用 GETDEDUCERESULT(EXPECTED_RESULT_LIST, BASIC_FACT_LIST)函数获取安控决策,存入 EXPECTED_RESULT_LIST。

Step8 清空 BASIC_FACT_LIST。

Step9 $T=k$ 安控决策结束。

其中,

CURRENT_RULE 为当前正在执行的安控规则;

DEDUCE_RULE_LIST 为安控规则链表;

BASIC_FACT_LIST 为已有证据链表;

EXPECTED_RESULT_LIST 为期望结论链表;

SEARCHNEWFACT(RULE,FACTS)为在已有证据链表中搜索规则的前提条件,若匹配成功,则将新证据加入已有证据链表;

GETDEDUCERESULT(EXPECTED_FACTS,FACTS)为返回推理的结论。

由上述流程可以看出,某一时刻的安控决策过程将在完成了全部的相关安控规则搜索后,结束本次流程。

5.3 仿真结果

以 Visual C++6.0 作为开发平台,安控系统仿真运行界面主要包括 3 个部分:飞行曲线,飞行数据和安判决策。

在某次仿真运行中,当运行到 98.850 时刻,经过实时数据处理后,得到如下安控证据:

W_1 连续报警超界 N_3 次,可信度 $CF(E_1)=0.80$;

W_4 连续报警超界 N_3 次,可信度 $CF(E_4)=0.50$ 。

同时有如下安控知识存在:

IF(W_1 连续报警超界 N_3 次)(0.6) AND (W_4 连续报警超界 N_3 次)(0.4) TNEN(W_{y1} 报警)(0.8, 0.50)

则根据已获得证据计算可得:

$$CF(E)=\sum\omega_i\times CF(E_i)=0.8\times 0.6+0.5\times 0.4=0.68>\lambda=0.5$$

可推出相应结论 $H:W_{y1}$ 报警,该结论可信度为

$$CF(H)=\min(CF(H, E), CF(E))=0.68$$

接下来应用到另一条安控知识:

IF(W_{y1} 连续报警超界 N_3 次)(1.0) TNEN(W_y 报警)(1.0, 0.60)

则决策流程得到的最终危险报警结论为:在 98.850 时刻,出现 W_y 报警的可信性为 68%,如图 3 所示,实现了预定功能,达到了系统设计要。

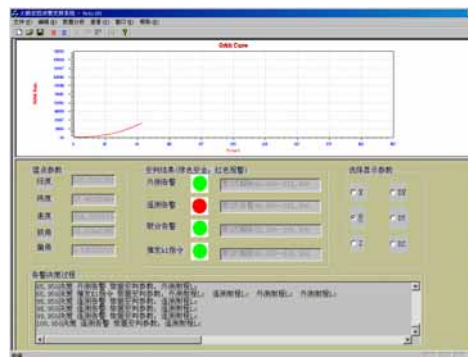


图 3 安控决策仿真运行界面

6 结束语

本文在分析原有安控方法的基础上,为了提高安全决策的可信性和科学性,研究了基于知识的智能安控决策实现技术,仿真原型系统能较好地完成预期功能。在后续的工作中,将围绕设备误差模型、安控决策评价等方面开展工作,以进一步改进和完善系统。

参考文献

- [1] 高洪深. 决策支持系统(DSS)——理论·方法·案例[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [2] Xia Qijun, Rao Ming. Knowledge Architecture and System Design for Intelligent Operation Support Systems[J]. Expert System with Applications, 1999, 17(2): 115-127.
- [3] 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2002.

(下转第 249 页)