一种快速推理技术在发射决策系统中的应用

李清东 刘成瑞 任 章

(西北工业大学 航海学院，西安 710072) (北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191)

摘 要：发射决策系统是在测试发射段对运载火箭进行故障诊断的专家系统，发射决策系统的推理技术需要适应运载火箭测试项目繁多，测试数据量庞大、更新快速，可供诊断的时间有限等特点.快速推理技术分为事实匹配和规则匹配2个环节，借鉴Rete匹配算法的设计思想，提出了事实匹配网络结构，提出规则和黑板的向量表示方法，定义向量与运算实现规则匹配，构建规则匹配网络完成规则匹配.在某型号运载火箭发射决策系统中的应用结果表明，快速推理法推理速度快，推理结果准确，程序实现占用系统资源少，满足实时性要求.

关 键 词：诊断；推理机；专家系统；运载火箭

中图分类号：TP 182 **文 章 编 号**：1001-5965(2008)10-1228-04

Fast inference algorithm of launching decision-making expert system for launch vehicle

Li Qingdong

(Marine Engineering College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Liu Chengrui Ren Zhang

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The launching decision-making system is an expert system which can diagnose the faults of the launch vehicle during the pre-launch testing and give the auxiliary repair strategy and launch decision. In order to achieve the quick fault diagnosis, the launching decision-making expert system should use a fast inference algorithm because there are massive test data need to be processed and the time for diagnosis is quite short. Therefore, a fast inference algorithm including the fact-matching and rule-matching was presented. The fact-matching network was borrowed ideas from the rete algorithm. And the rule-matching network was performed based on the vectors calculation. Finally, a fast inference algorithm suitable for pre-launch FDD (fault detection and diagnosis) of launch vehicle was given. The presented algorithm has been applied in a distributed FDD expert system for a real of launch vehicle. Preliminary results indicate that the algorithm reasons more quickly and more accurately with less system resource consumption, and can meet the real-time requirements.

Key words: diagnosis; inference engines; expert system; rockets

发射决策系统是在运载火箭测试发射段进行全箭故障诊断，根据诊断结果提出决策信息的专家系统.发射决策系统在某型号运载火箭上初步应用表明，在运载火箭发射前进行测点检测，故障模式分析，利用领域知识进行故障诊断，并给出发射的决策信息，是减少发射事故、提高发射安全的有效手段[1].推理技术是发射决策系统的核心技术.发射决策系统所要获取的测试信息种类繁多，数据更新快速，这就为进行推理留下的时间有限.发射决策系统必须采用一种更加快速的推理技

收稿日期：2007-10-26

基金项目：空间智能控制技术国防科技重点实验室基金资助项目(SIC07030201)

作者简介：李清东(1978—)，男，辽宁沈阳人，博士生，muziqingdong@126.com.

术,以适应运载火箭测试的大数据量、时间紧迫的要求.

在文献[2]研究工作的基础上,分析现有推理方法不足,借鉴 Rete 算法[3]思想,提出向量规则、黑板表示和向量与运算方法,构建事实匹配网络和规则匹配网络.通过利用某型号运载火箭故障诊断规则进行比较测试,验证了本算法运行准确可靠,推理速度、内存开销符合系统设计要求.同等情况下,本算法推理用时优于 Rete 算法.

1　运载火箭发射前的测试

运载火箭测试发射段的测试流程是按照测试执行命令顺序逐步进行,一个"执行命令"就构成了一个测试子项,其中包含了一定数量的事实和诊断规则.以往测试数据由人工参照报表进行判读,报表主要包括参数报表(表 1)和故障模式报表(表 2)2 种类型.

表 1　参数报表

执行命令	引起变化的参数	参数类型	变化结果	检测结果	参数编号
二级气脱	后端计算机气脱指示灯	状态量	由灭变亮	正常	C_1
	氢箱压力	模拟量	压力迅速降为 0	正常	A_6

表 2　故障模式报表

执行命令	逻辑前提	异常参数	故障定位	故障说明	措施建议
二级气脱	$A_1 \sim A_6$ 正常	$A_7 \sim A_{10}$ 异常	继电器柜或继电器失效	略	略

主要的测试数据是:动力系统和控制系统的状态数据、模拟数据.由表 1 和表 2 可知,表 1 完成的是事实匹配过程,如表 1 中的 C_1 状态量是"由灭变亮",即由 0 变为 1 的,则事实"C_1 正常"得到满足.表 1 中类型为模拟量的参数,"变化结果"存在模糊的描述,例如"压力迅速降为 0",无法直接通过参数比较来确定参数变化是否属于正常情况,因此在事实匹配中需要引入模糊逻辑.

表 2 实现的是规则匹配的过程,通过使用表 1 中得到的事实,可以进行故障匹配.表 2 中的每行,至少可以提取出一条规则.一个"执行命令"中包含的事实只在该测试子项中使用,与测试子项以外的规则没有联系.综上所述,运载火箭发射决策规则的特点是:事实、规则数量庞大;规则结构相对简单,经过少量的循环匹配,即可完成推理过程;事实匹配需要考虑模糊逻辑.

发射决策系统根据已有的测试流程和故障模式报表进行设计.

2　Rete 推理算法的不足

推理算法是解决多模式/多对象的匹配问题,是提高产生式专家系统效率的瓶颈问题[4].Rete 算法是通用型的高速匹配算法.Rete 算法被提出以后,出现很多基于该算法的改进方案[5-7],反映出以下不足:

1) Rete 算法以空间换时间的特点,使得规则与事实数量增加时,系统资源消耗随之增大.系统资源开销过大,将严重影响运算速度.

2) 在 Rete 算法中,如果事实变化频繁,会产生大量的标牌和栈操作,影响运算速度,降低运算效率.

Rete 算法在应用运载火箭发射决策时,难以提高效率.可以借鉴 Rete 算法,针对 Rete 算法中的不足进行改进,提高运算速度,从而提高决策系统的效率.

3　快速推理设计

快速推理技术核心就是对 Rete 算法中事实和规则匹配的重新设计,通过事实匹配、规则匹配 2 个环节实现推理过程.

3.1　设计思想

事实匹配是对测试参数进行征兆提取,在黑板中记录事实被满足的情况;规则匹配需要完成黑板与规则前提条件的匹配,某项规则匹配成功时激发该规则的活动,即表 2 中"故障定位"、"故障说明"、"措施建议"的内容.

事实匹配的过程借鉴了 Rete 算法 α 网络的结构,规则匹配中引入了向量算法,本算法与Rete 算法的不同之处在于:

1) 本算法在 α 网络中保存了代表事实满足情况的布尔值,如测试参数通过 α 网络,则相应的 α 结点赋值为"1",未通过的置"0";

2) 对模拟参数设置模糊事实匹配函数;

3) 将与某测试子项相关的 α 结点同该测试子项的黑板相连接,一个测试子项对于一个黑板;

4) 规则匹配网络:将黑板向量和测试子项中各规则向量进行逻辑与运算,实现规则匹配过程.

图 1 是算法实现示意图,规则 1、规则 2 分别是 IF$[F_1, F_3, F_4]$THEN(J_1),IF$[F_2, F_4, F_5]$THEN(J_2).该测试子项包括 5 项事实和 2 条规则.初始状态 α 结点值均为 0,假设系统接收到的测试参数通过 α 网络,使得事实 F_1, F_3, F_4, F_5 得到满足,则对应的 α 结点的布尔值变为 1,并修改

黑板的数据.黑板中的向量值置为[1,0,1,1,1],黑板发生更新,则规则匹配网络激活.根据规则1和规则2的前件内容,规则匹配网络中的规则结点的向量分别为[1,0,1,1,0],[0,1,0,1,1].匹配结果是规则1匹配成功,其后件被激活.

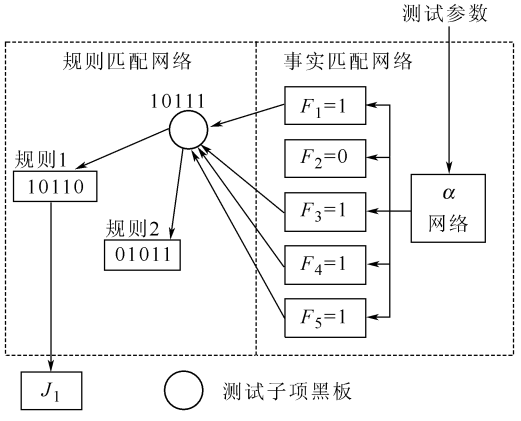

图1 算法示意图

3.2 事实匹配

事实匹配过程是α网络搜索过程,系统获得测试参数后,根据参数所属的子系统和测试子项,通过图2所示的α网络,找到参数对应的α结点.

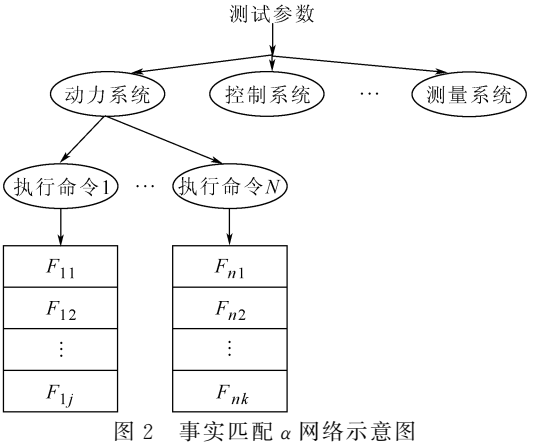

图2 事实匹配α网络示意图

在α结点中,保存对参数匹配的条件和函数,如参数满足条件,则代表对应一个事实得到满足,α结点赋值为1.

假设表1所示"二级气脱"为图2中的执行命令1,状态参数"后端计算机气脱指示灯"可对应"F_{11}","F_{11}中保存参数匹配条件:状态参数由0变为1.如该参数满足由0变为1,则"后端计算机气脱指示灯正常"事实被激活,F_{11}将中保存布尔值1,否则其布尔值为0.

设模拟参数"氢箱压力"对应"F_{12}",其匹配过程需要考虑参数变化和参数采样时间之间的模糊关系.通过建立模糊函数,计算隶属度,设定隶属度的门限制,以此确定参数变化是否符合"变化结果"的语言描述.

3.3 向量算法

产生式规则i可表示为"IF THEN"形式:

$$\mathrm{IF}[F_1,\cdots,F_n]\ \mathrm{THEN}(J_k) \tag{1}$$

当规则前件事实$F_1,\cdots,F_n$均得到满足,则可得到规则后件J_k.

定义1 设测试子项中,规则集合、事实集合分别为$R=\{r_1,r_2,\cdots,r_n\}$,$F=\{F_1,F_2,\cdots,F_m\}$.定义事实与布尔值的乘法运算:

$$\left.\begin{aligned}F_i\cdot 1&=F_i\\F_i\cdot 0&=0\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

则规则r_i的前件事实集合$F_r(r_i)\subset F$,$r_i\in R$,可用向量Hadamard乘积来描述,向量Hadamard乘积符号以"∘"表示:

$$\left.\begin{aligned}F_r(r_i)=\{&F_i\mid F_i\in[(F_1,F_2,\cdots,F_m)\circ\\&\boldsymbol{A}_i]\text{的非0分量}\}\\\beta^n=\{&(a_1,a_2,\cdots,a_m)\mid a_i=1\text{ or }0,\\&i=1,2,\cdots,m\}\qquad \boldsymbol{A}_i\in\beta^n\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

称$\boldsymbol{A}_i$为规则r_i的前件事实向量.

黑板事实集合$F_b\subset F$,可以描述为

$$F_b=\{F_j\mid F_j\in[(F_1,F_2,\cdots,F_m)\circ\boldsymbol{B}]\text{的非0分量}\}$$
$$\boldsymbol{B}\in\beta^n \tag{4}$$

称$\boldsymbol{B}$为黑板向量.

定义2 向量与运算:设$\boldsymbol{A},\boldsymbol{B},\boldsymbol{C}\in\beta^n$,定义

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{A}\&\boldsymbol{B}=(a_1\&b_1,a_2\&b_2,\cdots,a_m\&b_m) \tag{5}$$

定理1 $\boldsymbol{A}_i$为规则r_i的前件事实向量,$\boldsymbol{B}$为黑板向量,如

$$\boldsymbol{B}\&\boldsymbol{A}_i=\boldsymbol{A}_i \tag{6}$$

成立,则规则r_i匹配成功.

向量$\boldsymbol{B}$中,1代表黑板中此事实存在,0为不存在;$\boldsymbol{A}_i$中1代表规则前件中包含此事实,0为此事实与该规则无关.式(6)成立时,则存在:规则前件事实在黑板中(1&1=1);规则与某事实不相关(0&0=0、1&0=0).如存在0&1=0的情况,代表规则前件事实在黑板中不存在,式(6)不成立.

计算机内存的位可以存储1和0,用位向量可以表示定义1中的$\boldsymbol{A}_i$,$\boldsymbol{B}$向量,位向量中的特定位和特定事实一一对应.由此,可将规则匹配转化成位向量与运算.

以图1来举例说明算法过程,图1中有5个事实,存在规则2:IF[F_2,F_4,F_5] THEN(J_2).规则2的前件事实向量为[0,1,0,1,1].黑板向量为[1,0,1,1,1],位与运算过程如图3所示.运算结果中F_4,F_5位置数值与规则2一致;F_2位置数值与规则2不同.与运算结果与前件向量不等,

则规则匹配失败,规则 2 前件事实 F_2 没有得到满足.

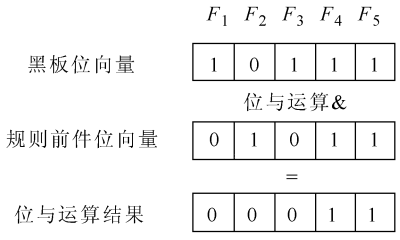

图 3　位向量逻辑算法

4　实验结果

本推理算法实现的主要流程是:

1) 读取测试参数前进行初始化:①提取规则中所包含的事实,建立 α 网络;②以位向量的形式将规则前件载入规则匹配网络;③建立各测试子项黑板,连接相关 α 网络和规则.

2) 诊断开始,读取测试参数:①测试参数通过 α 网络,对 α 结点进行赋值;②α 结点赋值变化时,α 结点同黑板的连接被激活,黑板中的位向量对应位值被修改;③黑板更新后,与规则的连接被激活,进行位向量计算,如匹配成功,则取消该规则与黑板的连接,并触发该规则的活动:根据规则后件内容,对 α 结点进行修改,记录规则的结论.

3) 黑板无更新时,推理结束,提交推理结果.

使用 Windows API 获取高精度时间函数可以计算出本推理算法的时间开销. 使用某型号运载火箭分布式故障诊断规则,对本算法时间开销进行测试.

测试结果表明如表 3 所示,相同情况下,本算法推理用时少于 Rete 算法.

表 3　算法推理运算速度比较

模拟诊断规模			运算用时/ms	
测试数据量	产生事实数量	规则数量	Rete 算法	本算法
117	73	100	1.697	0.035
1028	691	1000	12.124	0.093

5　结 束 语

快速推理技术在某型号运载火箭发射决策系统中得到应用测试,其推理结果准确、运算速度快,满足系统实时诊断要求. 向量算法适合于"IF THEN"型规则表示的确定性推理,可以结合分级推理思想,实现重要规则先匹配、先激活.

参考文献 (References)

[1] 张庆振,李清东,任章. 基于故障模式分析的运载火箭发射决策系统推理技术研究[J]. 航天控制,2006, 24(3): 81－83
Zhang Qingzhen, Li Qingdong, Ren Zhang. Inference engine design for launching decision-making expert system[J]. Aerospace Control, 2006, 24(3): 81－83(in Chinese)

[2] 刘成瑞,张庆振,任章. 基于分布式专家系统的运载火箭故障诊断技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(8): 930－932
Liu Chengrui, Zhang Qingzhen, Ren Zhang. Fault diagnosis technology of launch vehicle based on distributed expert system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(8): 930－932(in Chinese)

[3] Forqy C L. Rete: a fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem[J]. Artificial Intelligence, 1982, 19(1): 17－37

[4] Giarratano J C, Riley G D. Expert systems: principles and programming[M]. 3rd Edition. Boston: PWS Publishing Company, 1998

[5] Kuo S, Moldovan D. The state of the art in parallel production systems[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 1992, 15(1): 1－26

[6] Aref M M, Tayyib M A. Lana-match algorithm: a parallel version of the Rete-match algorithm[J]. Parallel Computing, 1998, 24(7):763－775

[7] Jagadish H V, Mendelzon A O, Mumik I S. Managing conflicts between rules[J]. Journal of Computer and System Science, 1999, 58(1):13－28

(责任编辑:吴　琼)