

# 基于 MAS 的飞机健康管理专家系统设计

## Design of Aircraft Health Management Expert Based on MAS

(空军工程大学) 雷 鸣 李学仁 刘林刚  
LEI Ming LI Xue-ren LIU Lin-gan

**摘要:** 针对地面机务维护的需要,设计实现了基于 MAS(Multi-Agent System, MAS)的飞机健康管理专家系统。系统分析了飞机健康管理专家系统的方案,采用 3 层 Browser/Server 体系结构,将基于案例推理和基于规则的不确定性推理的预测方法引入飞机健康管理专家系统,详细介绍了系统功能及关键技术的实现。地面机务维护部门使用结果表明飞机健康专家系统达到了减少地面维护时间和增加飞机使用寿命的目的。

**关键词:** MAS; 飞机健康管理; 案例推理; 不确定性推理

**中图分类号:** TP182; TP206+.3

**文献标识码:** A

**Abstract:** Aimed at the actuality need of ground maintenance, aircraft health management expert system was designed based on Multi-Agent system. The project was analysis in detail. Three layers Browser/Server architecture was adopted, the method based on the rule-based uncertainty reasoning and case-based reasoning in the field of aircraft health management system were also accepted in the system. The function and the main implementation technique of the system were described in detail. The result declared that the system we designed had got the aim to cut down maintenance time and lengthen the life-span of aircraft.

**Key words:** MAS; Aircraft health management; Case-based reasoning; Uncertainly reasoning

### 引言

飞机的健康(或飞机的健康水平)可定义为飞机及其子系统的整体状态,而状态是其系统、子系统以及部件在执行其设计功能时所表现出的能力的描述。健康管理的内容一般包括状态监测、故障诊断、故障预测和决策等四个方面。在此领域,国外已经研发了一些应用系统,而我国在飞机健康管理研究方面起步较晚,开发出来的大部分系统基本上还属于实验型。因此,如何利用飞行数据客观地评定机载设备的当前状态,加强飞机健康管理的智能化研究具有紧迫性和必要性。

飞行故障具有不均匀性、渐进性和并存性等特点,其故障原因与征兆之间的因果关系错综复杂,而且在监测、预测过程中存在着许多并行和协作机制。传统的故障预测系统面临专家知识更新操作不便,软件结构难以扩充等问题。随着计算机网络的迅猛发展,面向网络的分布式软件结构显现出强大的优势。人工智能领域的 MAS 技术作为分析、设计和实现复杂软件系统的新方法,可以改善传统系统的不足,使系统具有智能化、自学习和可扩展性等特点,为飞机健康管理专家系统的实现提供了技术手段。

## 1 飞机健康管理专家系统的框架和功能

### 1.1 系统框架

基于 MAS 的飞机健康管理专家系统采用 3 层 Browser/Server 体系结构,如图 1 所示。其中:

(1)用户层采用浏览器,使之成为“瘦客户端”,机务维护人员只需浏览器而无须安装 JADE(Java Agent Development Framework)就可访问系统资源;

(2)中间层使用 Tomcat 作为 Web 服务器,同时,系统采用 JADE 作为多 Agent 系统的开发环境,JSP 与 JADE 之间的通信

雷 鸣: 硕士

采用文献中所介绍的方式。系统采用两种方式进行推理:一个是基于案例的推理,通过与历史案例的匹配来分析当前飞行数据,预测可能出现的故障及故障出现的概率,同时也给出相应的对策;另一个是基于规则的推理,它将利用各专业对应 Agent 模拟人的分析、推理、组织和协调能力,进行故障预测,预测可能产生的后果并给出相应的对策;

(3)信息系统层使用 SQL Server2000 作后台服务器,目的是与现有系统的兼容,同时知识库将存放各 Agent 公用的知识,包括对历史飞行数据进行数据挖掘所得到的规则与案例。数据库存储各机型近些年导致飞行事故和飞行事故征候的历史飞行数据,同时实时接收机载飞行参数采集系统发送的信息,这是实现飞机健康管理的基础。

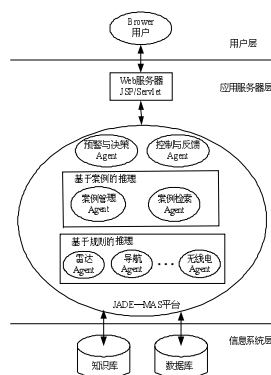


图 1 基于 MAS 的飞机健康管理专家系统体系结构

### 1.2 系统功能

整个系统的功能主要由多个 Agent 完成,其中导航 Agent,无线电 Agent,雷达 Agent 等构成了基于规则的推理,它们分别负责对机载导航系统、无线电系统、雷达系统等有关的诱因进行分析和推理,预测该子系统或部件可能出现的故障以及剩余

使用寿命。案例管理 Agent 和案例检索 Agent 构成了基于案例的推理,其中案例管理 Agent 用于案例的学习、修改以及案例的收集与汇总,案例检索 Agent 则负责建立案例索引和执行案例的检索与推理功能。预警与决策 Agent 根据以上各 Agent 得出的结果进行综合分析,做出决策,向飞行员及地面机务人员告警并给出相应预控对策。同时对这些信息进行分析和统计,将一些定性指标利用模糊综合评判法转化为定量指标,设置两级警戒值:弱预警和强预警。控制与反馈 Agent 实行反馈监督,其目的是为了使日常观察到的各种安全隐患及时得到及时控制,且在飞行结束后反馈于系统及部件的健康指数(HI, health index, 值域为[0, 1])系统完全工作正常,不存在故障时其健康指数为 1;系统完全损坏(系统全部的功能独立的子系统全部损坏),健康指数为 0;系统性能下降,健康指数介于 0.1 之间。

## 2 关键技术的实现

### 2.1 各专业对应 Agent 的实现

各专业对应 Agent 的结构基本相同,都是通过扩展 JADE 中的 JessAgent 实现,因此每个 Agent 都是一个专家系统。JessAgent 是 JADE 中的第三方软件,旨在为用户提供一种通过 Agent 方便访问 Jess(The Expert System Shell for the Java Platform)的接口。各专业对应 Agent 利用 Jess 提供的推理引擎,实现不确定性推理,另外以上每个 Agent 有各自的知识库,存储各自领域的知识,这样做的目的是为了利用 MAS 解决传统专家系统知识在存储容量和运行速度的矛盾,通过 Agent 的通信解决分散知识的整合与协同,提高系统的速度、智能性以及灵活性。

### 2.2 基于案例的推理

由于飞机故障产生原因的复杂性决定了常规性的故障预测方法无法完全满足其需求,同时过去的经验和教训能够为预防同类型的事故提供非常有效的帮助,因此本系统引入了基于案例推理的故障预测方法,它首先对已发生的、导致飞行事故和飞行事故征候的故障案例进行总结和学习,并存入案例库中,然后当出现新案例时,检索并匹配案例库的内容,找出相似度最大的案例,如果相似度大于设定的阈值,就发出预警信号同时给出对策。由于这种方法较好地模拟了专家的联想、类比、归纳和记忆等思维能力,因此获得较好的预警效果。

#### 2.2.1 案例的表示方法

采用三元组的方法描述飞机故障案例: Aircraft\_Fault\_Case=(Causation, Fault, Measure),这里的 3 个参数代表 3 个描述域:

(1)Causation 是诱因特征描述域,它对案例中故障产生的诱因从无线电、雷达、导航等专业分别进行描述;

(2)Fault 是可能产生故障的描述域,用来设置预警阈值和故障发生情况;

(3)Measure 是对策的描述域,包括经验教训和应对措施。

以上三元组采用面向对象方法实现。

#### 2.2.2 案例的检索方法

案例的检索与选择是基于案例推理系统中的关键步骤。本系统采用发展较为成熟、应用最为广泛的最近邻搜索策略。设案例集是  $C = \{C_i | i \in \{1, 2, \dots, m\}\}$ , 这里  $C_i = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in}\}$  是第  $i$  个案例,  $C_{ij}$  是  $C_i$  的第  $j$  个属性。又设是  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  新案例,  $X_j$  是  $X$  的第  $j$  个属性,则  $C_i$  和  $X$  的综合相似度计算公式是:  $Sim(C_i, X) = \sum_{j=1}^n sim(c_{ij}, x_j) w_j$ , 其中  $Sim(C_i, X)$  表示第  $i$  个历史案例  $C_i$  与新案例  $X$  的综合相似度,  $w_j$  为第  $j$  个属性在参与匹配检索的属性中所占的权重,且所有的权重之和为 1,本系统通过专家评价

法结合层次分析法确定权重,  $sim(c_{ij}, x_j)$  表示历史案例  $C_i$  的第  $j$  个属性与新案例  $X$  的第  $j$  个属性的相似度,其计算公式依据属性变量的类型而分别采用如下方法:

(1)属性变量是字符串型,则:  $sim(c_{ij}, x_j) = \begin{cases} 1 & \text{当属性值相等} \\ 0 & \text{当属性值不相等} \end{cases}$ ;

(2)属性变量是连续数值型,则:  $sim(c_{ij}, x_j) = 1 - \frac{|c_{ij} - x_j|}{\max(|x_j - y_j|)}$ , 其中  $x_j$  的取值范围是案例库中所有案例的第  $j$  个属性值;

(3)属性变量是离散数值型,则:  $sim(c_{ij}, x_j) = 1 - \frac{|c_{ij} - x_j|}{\max_j}$ , 其中  $\max_j$  是案例库中所有案例的第  $j$  个属性取到的最大值。当计算得到的案例综合相似度超过了预警阈值,说明案例库中存在与新案例极为相似的案例,则发出预警信息并向飞行员及地面维护人员提交可能产生的故障及应对措施的报告。

### 2.2.3 案例的修改与学习

案例库中的初始案例来源于近 20 年来国内外与飞机故障有关的所有机型飞行事故和飞行事故征候,在系统运行过程中,还需要不断学习、积累,以便案例库更加丰富、完整。案例的学习是指当有新的故障发生时,按照案例表示方法描述此故障,并检索案例库中是否有类似的案例,如果有,则可综合这些类似的案例,使之内容更丰富,描述更准确,如果没有,则说明此案例具有新的特征,需要加入;案例的修改是当某新案例检索到了相似的案例后,系统发出了预警信息和相关对策,但是根据反馈的信息,没有取得良好的效果,则需要调整案例中 Fault 和 Measure 两个域的内容以适应新形势,解决新问题。

### 2.3 不确定性推理的实现

#### 2.3.1 不确定性推理模型

对待一般规则  $A \xrightarrow{f(A,B)} B$ , 使用确定性因子描述规则强度,定义为  $CF(B, A)$ , 若前提  $A$  为真,部分支持结论  $B$ , 则  $0 < CF(B, A) < 1$ , 反之,  $-1 < CF(B, A) < 0$ , 若前提与结论无关,则  $CF(B, A) = 0$ , 在实际应用中,规则强度的值由领域专家主观给出。当某证据  $A$  肯定为真,为假或对其一无所知时,分别取  $CF(A) = 1, -1$  或  $0$ ; 当证据  $A$  以某种程度为真时,  $0 < CF(A) < 1$ , 反之,  $-1 < CF(A) < 0$ 。原始证据的确定性因子由用户在系统运行时提供,非原始证据的确定因子由如下不确定性推理算法得出:

(1)若已知规则强度  $CF(B, A)$  和前提可信度  $CF(A)$ , 则结论  $B$  的可信度为:  $CF(B) = CF(B, A) * CF(A)$

(2)  $CF(A) = CF(A_1 \text{ AND } A_2 \text{ AND } \dots \text{ AND } A_n)$   
 $= \min\{CF(A_1), CF(A_2), \dots, CF(A_n)\}$

(3)若系统中有两个规则得到同样的结论(设  $CF_1(B)$ ,  $CF_2(B)$  表示从不同的规则得出的某个结论的两个可信度),则该结论的可信度是:

(1)当  $CF_1(B)$  和  $CF_2(B) \geq 0$  时:

$$CF(B) = CF_1(B) + CF_2(B) - CF_1(B) * CF_2(B)$$

(2)当  $CF_1(B)$  和  $CF_2(B) \leq 0$  时:

$$CF(B) = CF_1(B) + CF_2(B) + CF_1(B) * CF_2(B)$$

(3)否则:  $CF(B) = CF_1(B) + CF_2(B)$

若有多个规则得到同样的结论,则可反复使用如上公式。

#### 2.3.2 不确定性推理在 JessAgent 中的实现

为了在 Jess 中实现不确定性推理,系统采用 JavaBean 的形式将事实和结论封装成类,对类的成员的操作不以成员方法的形式完成,而是以规则后件的形式完成,例如对于可信度的计算。定义的 JavaBean 类中 CausationBean 存储各种诱因, ConclusionBean 存储故障类型和相应对策,其中 CausationBean 如下:



```
import java.io.Serializable;
public class CausationBean implements Serializable
{
    private String m_name = ""; //诱因名
    private float m_cf=0; //可信度
    public float getCf() {return m_cf;}
    public void setCf(float f) {m_cf=f;}
    public String getName() {return m_name;}
    public void setName(String s) {m_name=s;}
}
```

### 3 结束语

研究并提出了基于 MAS 的飞机健康管理专家系统方案,开发了飞机健康管理专家系统,并已经投入某机场地面维护中使用。该系统改变了以往飞机地面维护过程中只依靠人工操作的现状,减少了机务维护时间和维护费用,使机务维护工作更加科学化、智能化。

创新观点:将案例推理和基于规则的不确定性推理的预测方法引入飞机健康管理系统,大大减少了地面维护时间。

项目经济效益约 1500 万元。

#### 参考文献

- [1]Donald L.Simon. An overview of the NASA aviation safety program propulsion health monitoring element[R].AIAA-2000-3624
  - [2]Nikhil M. Vichare, Michael G. Pecht. Prognostics and Health Management of Electronics [J].IEEE transactions on components and packaging technologies, 2006,29(1):222-229.
  - [3]Azzam H, Beaven F, Hebden T, et al. Fusion and Decision Making Techniques for Structural Prognostic Health Management[A]. Proceedings of the 2005 IEEE Aerospace Conference [C].2005: 3763-3774.
  - [4]李文钊.飞行器健康监控技术实验室方案及验证模型[D].西安:西北工业大学硕士学位论文,2004,4.
  - [5]肖小锋,蔡金燕,梁玉英.基于多 Agent 的监测与诊断系统功能模型[J]微计算机信息 2006,3-1: 212-214.
  - [6]Berre D L, Fourdrinoy O. Using JADE with Java Server Pages (JSP)[Z].http://jade.tilab.com/doc/tutorials/jsp/JADE4JSP.html.
  - [7]Jaw L C, Friend L. ICEMS: a platform for advanced condition-based health management [A]. Proceedings of the 2001 IEEE Aerospace conference[C].2002-06:3021-3026.
  - [8]de Mantaras R L. Case-based reasoning [M]//Paliouras G, Karkaletsis V, Spyropoulos C D. Machine Learning and Its Application: Advanced Lectures. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2001:127-145.
  - [9]周青,彭为.经典罗集中的不确定性及其支持度[J]计算机学报,2006,29(10):1882-1888.
- 作者简介:雷鸣(1985-),男(畲族),江西人。空军工程大学工程学院,硕士,主要研究方向:飞机机载设备故障诊断、预测与健康管理;李学仁(1963-),男,山西人,空军工程大学工程学院,教授,主要研究方向:飞机机载设备故障诊断、预测与健康管理;刘林刚(1976-),男,山西人,空军工程大学工程学院,硕士,主要研究方向:飞机状态监控技术研究。

**Biography:** LEI Ming(1985-),male(She), Jiang Xi Province, Air Force Engineering University, master, Research area: fault diagnosis, forecast and PHM for aircraft devices.

(710038 陕西 西安 空军工程大学工程学院) 雷 鸣 李学仁 刘林刚

(College of Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China) LEI Ming LI Xue-ren LIU Lin-gan

通讯地址:(710038 陕西省西安市空军工程大学工程学院三系十三队) 雷 鸣

(收稿日期:2008.12.15)(修稿日期:2009.01.13)

#### (上接第 32 页)

够更准确地反映蠕虫数据包产生的流量。为了清晰地比较改进前后的区别,本文提出了一个理想的假设模型,并在该模型下,分别采用两种路由策略进行了模拟实验。实验结果表明,在假设条件下,原有路由策略与改进后路由策略产生的蠕虫数据包的比例符合我们的估计。

本文作者创新点:针对当前蠕虫模拟时,模拟器会将无效 IP 地址扫描包在发送端直接丢弃的问题,提出了改进路由策略的方法,并实现了对模拟器 GTNetS 路由策略的改进。

#### 参考文献

- [1]王琦,吴冰,云晓春.分布式蠕虫蜜罐部署策略分析[J].微计算机信息,2007,1-3:65.
- [2]GTNetS -Home [EB/OL]. http://www.ece.gatech.edu/research/labs/MANIACS/GTNetS/index.html
- [3]George F. Riley. The Georgia Tech Network Simulator [A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on Models, methods and tools for reproducible network research[C]. Karlsruhe Germany, 2003.
- [4]George F. Riley, Monirul I. Sharif, Wenke Lee. Simulating Internet worms [A]. Proceedings of IEEE Computer Society's 12th Annual International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems [C]. United States, 2004.

作者简介:曲晶莹 1984-),女,黑龙江富裕人,汉族,哈尔滨工业大学计算机学院,硕士研究生,研究方向:网络模拟;余翔湛(1973-),男,哈尔滨工业大学计算机学院,博士,副教授;主要研究方向:计算机网络,信息安全;徐锐(1983-),男,哈尔滨工业大学计算机学院,硕士研究生;研究方向:网络模拟。

**Biography:** QU Jing-Ying (1984 - ), Female, born in Heilongjiang Province, Department of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology. Master. Main research field: network simulation.

(150001 哈尔滨 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院) 曲晶莹 徐 锐

(150001 哈尔滨 哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院,网络与信息安全研究中心) 余翔湛

(Department of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China) QU Jing-Ying XU Rui

(Research Center of Computer Network and Information Security Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China) YU Xiang-Zhan

通讯地址:(150001 哈尔滨工业大学 A03 公寓 1044 寝室) 曲晶莹

(收稿日期:2008.12.15)(修稿日期:2009.01.13)