基于语义网络的副翼作动器综合故障诊断方法

孙锦文[1,2],马　剑[1,2],丁　宇[1,2],刘清竹[1,2],王景霖[3],吴英建[3]

(1. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院,北京 100191;
2. 可靠性与环境工程技术国防科技重点实验室,北京 100191;
3. 故障诊断与健康管理技术航空科技重点实验室,上海 201601)

摘　要:为了实现飞机典型机电系统故障诊断知识集成共享与利用,提出了一种基于语义网络的副翼作动器综合故障诊断方法。首先利用 FMECA 方法对副翼作动器进行故障机理分析,然后基于语义网络理论,对副翼作动器在产品域、测试域、诊断域进行本体的构建及相关分析,并使用 OWL 语言实现了本体的机器可读,从而获得副翼作动器的故障诊断知识模型构建,在此基础上再进行系统故障的综合推理。该方法初步实现了副翼作动器故障诊断基于语义网络理论的知识库构建,验证了模型的故障推理能力,可以有效解决副翼作动器的综合故障诊断问题。

关键词:语义网络;副翼作动器;FMECA;本体;综合诊断

中图分类号: TP277　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-3767(2017)05-0052-08

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2017.05.008

Integrated Fault Diagnosis of Aileron Actuator Based on Semantic Network

SUN Jinwen [1,2], MA Jian[1,2], DING Yu[1,2], LIU Qingzhu[1,2], WANG Jinglin[3], WU Yingjian[3]

(1. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Science & Technology Laboratory on Reliability & Environmental Engineering, Beijing 100191, China;
3. Key Laboratory of Aviation Technology for Fault Diagnosis and Health Management Research, Shanghai 201601, China)

Abstract: In order to realize the integration and sharing of the fault diagnosis knowledge of typical aircraft electromechanical systems, this paper presents an integrated fault diagnosis method of aileron actuator based on semantic network. Firstly, the failure mechanism of aileron actuator was analyzed by FMECA (failure mode, effects and criticality analysis) method. Then the ontology construction and correlation analysis of product domain, test domain and diagnosis domain were carried out based on the theory of semantic network. And the fault diagnosis knowledge model of the aileron actuator was constructed by using the OWL language to express the ontology of the aileron actuator in computer. On this basis, the system faults were further synthesized. By establishing the fault diagnosis knowledge model of the aileron actuator based on the semantic network theory and verifying the fault reasoning ability of the model, the proposed method can effectively solve the integrated fault diagnosis problem of the aileron actuator.

Key words: semantic network; aileron actuator; FMECA; ontology; integrated diagnosis

作为飞机的典型机电系统之一,飞机副翼作动器发挥着核心功能作用,一旦发生故障将造成整个系统的性能衰退甚至失效、影响巨大,因此对其开展有效的故障诊断十分重要[1]。随着副翼作动器系统的发展,系统结构变得越来越复杂,故障的复杂程度不断增大,不确定性因素不断增多,在多源测试诊断信息下进行综合诊断已成为故障诊断的一个瓶颈问题。

收稿日期:2017-01-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51575021);国防技术基础项目(Z1320113B002);航空科学基金项目(20153351022)

作者简介:孙锦文(1995—),男,湖北松滋人,硕士研究生,主要从事故障诊断与健康管理的研究,本文通信作者.
E-mail:sunjinwen@buaa.edu.cn

综合诊断是一种通过综合自动和人工测试、维修辅助手段、技术信息、人员和培训等要素，来提高产品的诊断能力的方法[2]。对产品而言，其测试和故障诊断能力是由测试诊断设备和技术方法所决定的，需要在其全寿命周期及部署和使用过程中构成诊断能力的因素综合集成和优化配置，以达到最优的总体诊断能力。

为了对副翼作动器进行有效的综合故障诊断，首先需要利用 FMECA(failure mode, effects and criticality analysis, 故障模式、影响与危害性分析)方法对其故障模式和故障机理有较全面的知识库构建。由于综合诊断需要以规范的格式对诊断信息进行统一标准的描述，以实现信息的交换和相互协作的需求，这需要建立规范的知识表示管理系统。目前，较为成熟的知识表示方法主要有产生式规则和框架知识表示方法，但仅适用于表示孤立的、简单的事实或固定的、典型的概念与行为，对于复杂知识构成的表示并不适用。语义网络可以有效解决这个问题，是一种可以用来模拟人心理活动的思维模型知识表示方法[3]。本体是一种语义网络方法，主要思想是将知识以网络的形式来表达，运用网络间的关系来实现相互关联。为了将综合诊断过程中的异类信息进行规范化表达，通过本体的方法构建诊断信息的描述模型，首先针对副翼作动器进行产品域、测试域、诊断域的本体构建，然后利用 OWL(ontology web language, 本体网络语言)实现诊断知识库的机器可读。

本研究首先利用 FMECA 方法对副翼作动器的故障机理及影响进行分析，然后基于目前已存在的诊断经验利用本体方法来进行建模，建立起基于知识对象节点的知识库，最后利用故障样本学习方法来完成副翼作动器故障诊断的推理部分，从而有效实现了副翼作动器的综合故障诊断。

1 基于语义网络的综合故障诊断方法

基于语义网络的综合故障诊断方法如图 1 所示。首先根据 FMECA 方法对产品的故障机理进行全面分析，整理出故障机理分析表，然后利用语义网络中的本体论方法，对产品的产品域、测试域和诊断域的故障诊断知识库进行构建，并运用 OWL 语言对所构建的本体进行了描述，最后利用基于知识库的故障样本学习方法推理出最终可能的故障原因。

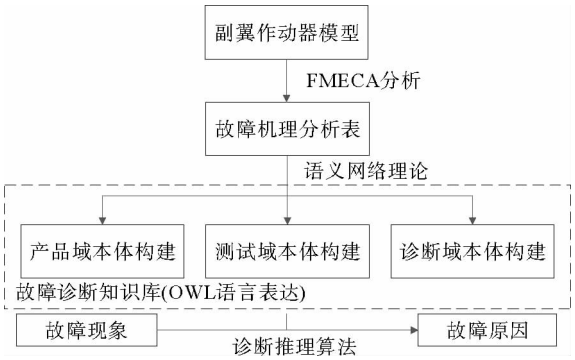

图 1 基于语义网络的综合故障诊断方法

Fig. 1 Integrated fault diagnosis based on semantic network

1.1 基于 FMECA 的故障机理分析

FMECA 方法是针对产品梳理出其所有可能的故障，并通过对故障模式的分析，确定每种故障模式对产品的影响，找出其中的单点故障，并按照故障模式的严酷度及其发生概率确定其危害性。对一个产品而言，其故障征兆、故障模式、故障影响以及监控参数之间具有多对多的映射关系，根据产品的 FMECA 分析确定重要的监控参数和故障模式等。

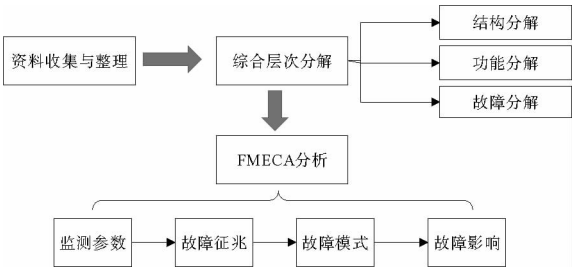

图 2 产品 FMECA 分析流程

Fig. 2 Flow chart of FMECA method

如图 2 所示，分析产品的故障机理时，首先通过对其故障记录和设备使用手册的梳理与研究，对产品系统进行综合层次分解，主要分为：结构分解、功能分解和故障分解。在综合层次分解的基础上进行 FMECA 分析，主要进行以下分析：故障征兆、故障模式和故障影响。

1.2 基于语义网络的综合故障诊断知识库构建

在综合诊断问题中，诊断信息的来源是多方面的。为了将综合诊断过程中的异类信息进行规范化表达，基于本体论的理论方法，构建诊断信息的描述模型，实现诊断知识的机器可读。

语义网络常常用作知识表示的一种形式，Simmon 于 1970 年正式提出“语义网络”的概念，并讨论了其和一阶谓词逻辑的关系。

本体是实现语义网络的一种具体方法，是“共享概念模型的明确的形式化规范说明”，研究的是特定领域知识对象分类，对象属性和对象间的关系[4-5]。本体的核心意义在于提供一种明确定义的形式化的共识，有5个基本元素：类或概念、属性、实例、关系、公理。类一般采用框架结构来定义，包括其名称、自然语言描述以及与其他类之间的关系集合；属性是指对类的性质或特征的描述；实例是指考察的对象；关系是指在领域中概念间的相互作用；公理是指类和属性定义上的规则[6]。

目前，主要的本体描述语言有可扩展标示语言（extensive markup language，XML）、资源描述语言（resource description framework，RDF）、OWL 等[7]。其中，OWL 本体描述语言以描述逻辑为基础，语法简洁通用，并且具有良好的语义和推理支持，因此采用 OWL 语言为本体描述语言。

1.2.1 基于键合图模型的产品域本体建造方法

产品域是指与产品自身结构相关的数据来源。通过分析领域内的知识对象及其属性和关系，基于产品域的特点，结合本体的继承及相关定义扩展，可以实现综合故障诊断基础上的产品域知识体系构建。

键合图模型可以用于建立系统动态模型，以简单的形式直观表现出系统内各组成部分的物理结构以及系统中存在的动态影响因素等[8]。基于键合图模型构建产品域本体，首先需要基于产品的物理边界将其结构分解为相对独立的功能单元，然后再面向不同的功能单元建立模型。产品功能单元的分解是基于实际需求的多级重复过程，以利于实现本体知识的描述。

1.2.2 基于 TOP-DOWN 模型的测试域本体建造方法

测试域是指与产品状态观测相关的数据来源，主要涉及产品的测试需求、测试操作、试验分析等信息。副翼作动器的故障机理较为复杂，采用基于 TOP-DOWN 模型的测试域本体构建方法，自上而下分解产品的故障机理，在分解出的更小的知识单元上构建本体模型，然后再将这些本体模型进行集成以构建完整的测试域。测试域中的知识对象包括构成产品测试能力的操作手段及其可用状态，以及所关心的状态表征指标等。运用基于 TOP-DOWN 模型的知识分解方法，可以深入产品内部研究故障机理和特性，适合于综合诊断的需要。

1.2.3 基于故障树模型的诊断域本体建造方法

诊断域是指与产品综合诊断方法相关的数据来源，包括产品的故障模式、故障原因、维护记录等信息。

故障树模型能够基于故障事件进行逻辑推理分析，弄清各潜在因素对故障发生的影响途径及程度。基于故障树模型构建诊断域本体，能够有助于增加对故障传播的认识，并表达诊断域知识对象的内在联系[9]。在诊断域本体的建造过程中，首先需要将故障树中的基本事件表达为本体模型的底层知识对象，并将各基本事件的先验概率赋值为知识对象的状态取值可信度。然后将故障树中的逻辑门也表达为知识对象，并将逻辑门的输出事件赋值给对象的状态取值。将本体模型的知识对象节点按照故障树中的连接关系进行连接，并将连接节点的有向边的方向与逻辑门的输入输出关系对应。最后还需要将逻辑门的逻辑关系运用条件概率形式表达为本体模型中知识节点的推理关系。

1.2.4 三个域之间的本体关系

通过以上建造方法，建立起产品域、测试域、诊断域这三大领域的本体模型，依据领域专家的思维方式，运用知识对象的外部推理行为来表达三个领域之间的推理关系，如图3所示。

其中，属性关系如下：

is-a：产品域、测试域、诊断域是产品的子域；

diag-to-test：发现某种故障现象时所采用的检测方法；

test-to-pro：采用具体的检测方法时作用的对象。

1.3 副翼作动器诊断推理方法

在已经建立起副翼作动器综合故障诊断知识库的基础上，基于知识的推理在计算机中的实现是知识系

统中不可缺少的组成部分。具体的综合诊断问题知识推理实现，采用故障样本学习的方法。基于之前的本体构建方法，知识节点的推理模型可由有向无环图的形式表达，假设无缺失数据的情况下，可估算每个对象节点的条件概率。

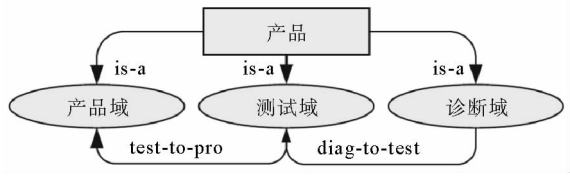

图 3　产品域、测试域、诊断域的关系

Fig. 3　Relationship of product domain, test domain and diagnosis domain

对于知识对象节点 O_i，假设存在 t_i 个直接源节点（即存在 t_i 个对象节点通过有向边直接指向 O_i）。以 $\boldsymbol{V}_i$ 表示源节点所组成的向量，并以 v_i 表示向量 $\boldsymbol{V}_i$ 的取值，以 o_i 表示节点 O_i 的取值。每个节点的取值有故障和正常两种状态，根据对象节点的采样统计信息，可以估算节点的条件概率如下：

$$P(O_i,\boldsymbol{V}_i) = P(O_i,\boldsymbol{V}_i)/P(\boldsymbol{V}_i) = \frac{P(O_i = o_i,\boldsymbol{V}_i = v_i)}{P(\boldsymbol{V}_i = v_i)}。\tag{1}$$

2　案例分析

2.1　副翼作动器工作原理

副翼作动器由电子放大器、直接驱动阀 DDV1、直接驱动阀 DDV2、作动筒 ACT、位移传感器 DDV_LVDT 和 RAM_LVDT 等组成，其工作原理如图 4 所示。

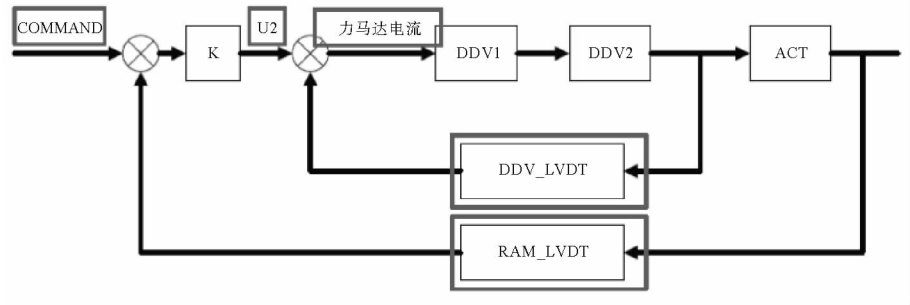

图 4　副翼作动器工作原理图

Fig. 4　Working principle diagram of aileron actuator

副翼作动器的运行原理：输入指令通过电子放大器放大，经直接驱动阀 DDV1 和 DDV2，使作动筒动作。本实验有两个反馈回路，一是在直接驱动阀 DDV2 处有一个位移传感器，将信号反馈给直接驱动阀 DDV1，形成内回路；另一个是在作动筒后面有一个位移传感器，将作动筒的位置信号反馈给输入信号端，形成外反馈，检测整个副翼作动器系统是否有故障。

实验获取的测点数据有：输入指令 COM，DDV_LVDT 输出信号 DDV2_X，RAM_LVDT 输出信号 ACT_X，DDV 力马达电流 I_{FM}，DDV 输入指令 U_2 等。

2.2　副翼作动器的故障机理分析

通过对副翼作动器进行 FMECA 分析，梳理出其主要结构有直接驱动阀 1、直接驱动阀 2、位移传感器等，通过对故障现象采用相应的检测方法，梳理出故障原因，整理得到故障模式分析表格。表 1 为副翼作动器直接驱动阀 1 的故障机理分析简表。

2.3 副翼作动器综合故障诊断知识库构建

2.3.1　副翼作动器的产品域

副翼作动器包括直接驱动阀 1、直接驱动阀 2、位移传感器、电子放大器、执行机构等。其中直接驱动阀 1 又包括力马达线圈、DDV1 阀芯、刃边 1 等。基于键合图模型建造产品域，详细写出了关于综合诊断时要

用到的组成部件，以后在有需要时还可以加入各个部件的性质，副翼作动器的产品域网络构建如图 5 所示。

表 1　副翼作动器直接驱动阀 1 故障机理分析简表

Tab. 1　Simplified table of fault mechanism analysis of direct drive valve 1

故障位置	故障模式	故障原因	故障影响
直接驱动阀 1	力马达线圈断路	力马达线圈线路断开	力马达无功率输出，阀芯位置始终处于中位
	堵塞	油液污染	系统零偏增大，频响下降，系统不稳定
	阀芯卡死	油液污染或滑阀变形	直接驱动阀输出恒定流量，系统压力降低
	阀泄漏	刃边磨损或径向主阀芯磨损	阀零偏增大，系统增益下降，压力降低，流体噪声增大
	零偏超差	调零不准	直接驱动阀 1 在零位时出现偏差

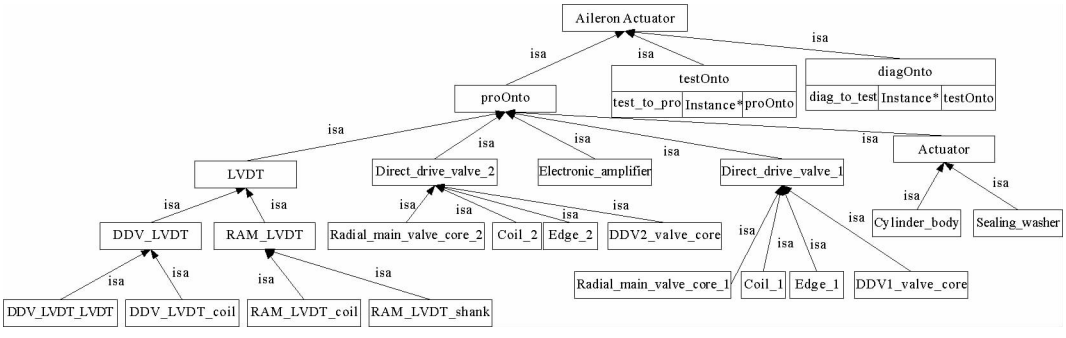

图 5　副翼作动器产品域网络构建图

Fig. 5　Network construction diagram of aileron actuator's product domain

2.3.2　副翼作动器的测试域

副翼作动器测试域包括 DDV1 功率测试、DDV1 零偏电流测试、DDV1 流量测试等，其中 DDV1 功率测试对应的产品域是直接驱动阀 1。基于 TOP-DOWN 模型建造测试域，详细写出了关于综合诊断时测试域的子类及子类的属性，表 2 展示了直接驱动阀 1 的测试域。

表 2　直接驱动阀 1 的测试域构建

Tab. 2　Test domain construction of direct drive valve 1

Parent Onto	Name	Indicator	Prod Onto
副翼作动器测试域	DDV1 功率测试	DDV1 功率	直接驱动阀 1
	DDV1 零偏电流测试	DDV1 零偏电流	
	DDV1 流量测试	DDV1 流量	
	…	…	…

2.3.3　副翼作动器的诊断域

副翼作动器的诊断域包括作动筒响应速度慢、作动筒位置不准确等。其中作动筒响应速度慢对应的诊断域是力马达无功率输出，直接驱动阀 1 零偏电流增大，直接驱动阀 1 输出恒定流量等。基于故障树模型建造诊断域，可以详细写出综合诊断时诊断域的子类及子类的属性，包括故障现象、故障原因等，如表 3 和表 4 所示。

表 3　副翼作动器典型故障现象诊断域构建

Tab. 3　Diagnosis domain construction of aileron actuator's typical faults

Parent	Name	Object
作动筒响应速度慢	直接驱动阀 1 故障	力马达无功率输出 DDV1 零偏电流增大 直接驱动阀 1 输出恒定流量
	直接驱动阀 2 故障	DDV2 零偏增大 直接驱动阀 2 输出恒定流量
	DDV 位移传感器故障	DDV_LVDT 无输出信号 DDV 位移偏差
	作动筒故障	运行部件速度变慢,系统压力降低
作动筒位置不准确	RAM 位移传感器故障	RAM_LVDT 无输出信号 RAM 位移偏差
	作动筒故障	运动部件速度变慢,系统压力降低
	电子放大器故障	放大倍数显著减小

表 4　直接驱动阀 1 故障的诊断域构建

Tab. 4　Diagnosis domain construction of direct drive valve 1 fault

Parent	Name	Object	TestOnto	ProOnto
直接驱动阀 1 故障	力马达无功率输出	DDV1 阀芯始终处于中位	DDV1 功率测试	DDV1
	DDV1 零偏电流增大	DDV1 堵塞 系统压力降低 2	DDV1 零偏电流测试	
	直接驱动阀 1 输出恒定流量	系统压力降低 1	DDV1 流量测试	

2.4　基于 OWL 语言的副翼作动器诊断案例编码

OWL 中本体的结构有:命名空间、本体头部和数据集成与隐私。网络本体由个体、属性和类组成,其中个体代表感兴趣的对象,属性代表个体之间的二元关系,类表示一些个体的集合。

用 OWL 语言对语义网络表达的飞机副翼作动器诊断案例进行了编写,下面是截取的一个案例的 OWL 语言编写程序:

```
<rdf:RDF                                                    //命名空间
xmlns=http://www.owl-ontologies.com/Ontology.owl#
<owl:Ontology rdf:about="Fault Diagnosis of Aileron Actuator"/>      //本体头部
<owl:Class rdf:ID="main_spool_wear ">                        //定义类:主阀芯磨损
<rdfs:subClassOf>                                           //这个类是阀泄露的子类
<owl:Class rdf:ID="valve_leakage"/>
</rdfs:subClassOf>
</owl:Class>
<owl:Class rdf:ID="DDV1_Power_test">                         //定义类:DDV1 功率测试
<rdfs:subClassOf>
<owl:Restriction>
<owl:allValuesFrom>                                         /* DDV1 功率测试
```

```
<owl:Class rdf:ID="Force_Motor"/>                          只对应于产品域的
</owl:allValuesFrom>                                       直接驱动阀力马达线圈 * /
<owl:onProperty>
<owl:ObjectProperty rdf:ID="test_to_pro"/>
</owl:onProperty>
</owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<rdfs:subClassOf>
<owl:Class rdf:ID="test-opeation"/>                        // DDV1 功率测试是测试域的子类
</rdfs:subClassOf>
<rdfs:comment
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"     /* DDV1 功率测试
></rdfs:comment>                                           对应的数据属性类型是
</owl:Class>                                               string * /
```

2.5 副翼作动器诊断推理方法案例

基于前面的知识库构建，对副翼作动器的典型故障现象——作动筒位置不准确进行初步推理分析，得到如图 6 所示的故障原因分析知识节点图。

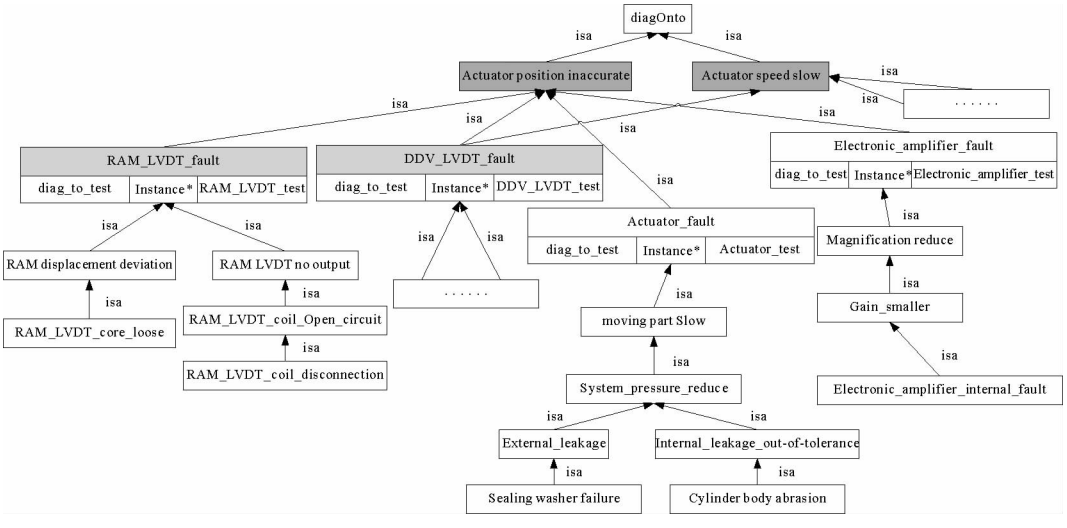

图 6 作动筒位置不准确故障原因分析图

Fig. 6 Fault analysis of inaccurate position of actuator cylinder

从图 6 的知识节点图中截取得到如图 7 所示的有向无环图，节点的状态取值都为 state = {normal, fault}，其相应的 200 组历史数据的采样信息，如表 5 所示。

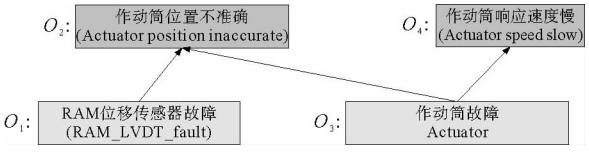

图 7 知识对象节点连接实例

Fig. 7 Instance of knowledge object node connection

根据统计信息，可以估算得到节点 O_1、O_3 的状态取值可信度为：

$$belief_1 = \{P(o_1 = \text{normal}), P(o_1 = \text{fault})\} = \{0.64, 0.36\}; \tag{2}$$

$$belief_2 = \{P(o_3 = \text{normal}), P(o_3 = \text{fault})\} = \{0.95, 0.05\}。 \tag{3}$$

然后，可根据节点 O_2、O_4 的不同状态取值来计算出相应概率，如 $o_2 = \text{fault}$，$o_3 = \text{fault}$，$o_4 = \text{normal}$ 的

状态概率为：$\{P(o_2 = \text{fault}), P(o_3 = \text{fault}), P(o_4 = \text{normal})\} = 0.03$ 。 (4)

根据式(1)，可估算出节点 O_2、O_4 至 O_3 的条件连接关系，即条件概率

$$P(o_3 = \text{fault} \mid o_2 = \text{fault}, o_4 = \text{normal}) = \frac{P(o_2 = \text{fault}, o_3 = \text{fault}, o_4 = \text{normal})}{P(o_2 = \text{fault}, o_4 = \text{normal})} = 0.071 \text{ 。} \quad (5)$$

即在发生作动筒位置不准确故障，且作动筒响应速度正常时，发生作动筒故障的概率是 0.071。然后可以依次算出各节点故障的概率，从而进行故障诊断推理。

表 5　采样统计信息

Tab. 5　Sampling statistics of the instance

O_1(RAM 位移传感器故障)	normal	normal	normal	fault	fault	fault	fault	normal
O_2(作动筒位置不准确)	normal	fault	normal	fault	normal	fault	fault	fault
O_3(作动筒故障)	normal	normal	normal	fault	normal	normal	normal	fault
O_4(作动筒响应速度慢)	normal	normal	fault	normal	normal	normal	fault	fault
统计数	98	18	8	6	4	60	2	4

3　结论

提出了一种基于语义网络的副翼作动器综合故障诊断方法。该方法首先利用 FMECA 对副翼作动器进行故障机理分析，然后基于语义网络理论，对副翼作动器在产品域、测试域、诊断域进行了本体的构建及相关分析，从而获得副翼作动器的故障诊断知识库构建，在此基础上最后进行综合诊断推理方法的探究，对副翼作动器进行了较完整的综合故障诊断知识库构建和诊断设计。在后续研究中，可以将该方法进一步应用于典型的机电系统中，实现系统在多源测试信息下的综合故障诊断。

参考文献：

[1]李乃鑫，陆中，周伽. 电液伺服作动器可靠性评估的贝叶斯网络方法[J]. 西北工业大学学报，2016，34(5)：915-920.
LI Naixin，LU Zhong，ZHOU Jia. Reliability assessment based on Bayesian networks for electro hydraulic servo actuator[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University，2016，34(5)：915-920.

[2]潘泉，景小宁，陈云翔. 美军新机的综合诊断技术及启示[J]. 空军工程大学学报(自然科学版)，2005，6(2)：1-3.
PAN Quan，JING Xiaoning，CHEN Yunxiang. The integrated diagnosis technique for the new operational aircraft of American and the enlightenment to us[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science)，2005，6(2)：1-3.

[3]李太福，黄茂林，谢志江. 基于语义网络的旋转机械故障诊断知识表示[J]. 重庆大学学报(自然科学版)，2001，24(6)：18-20.
LI Taifu，HUANG Maolin，XIE Zhijiang. Knowledge representation for rotative machine fault diagnosis based on semantic net[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition)，2001，24(6)：18-20.

[4]王昊，谷俊，苏新宁. 本体驱动的知识管理系统模型及其应用研究[J]. 中国图书馆学报，2013，39(2)：98-110.
WANG Hao，GU Jun，SU Xinning. Research on the model and its application of ontology-driven knowledge management system[J]. Journal of Library Science in China，2013，39(2)：98-110.

[5]FENTON W G，MCGINNITY T M，MAGUIRE L P. Fault diagnosis of electronic systems using intelligent techniques：A review[J]. IEEE Transactions on Systems，Man，and Cybernetics，Part C (Applications and Reviews)，2001，31(3)：269-281.

[6]毕鲁雁，焦宗夏，范圣韬，等. 基于本体的机载机电系统故障诊断研究[C/CD]// 全国流体传动与控制学术会议暨 2008 年中国航空学会液压与气动学术会议，2008.

[7]ANTONIOU G，HARMELEN F V. Web ontology language：OWL[M]. Handbook on Ontologies. Berlin，Heidelberg：Springer，2009：67-92.

[8]周密. 基于本体论的柴油机综合诊断研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2007：41-54.

[9]耿宏，樊建梅. 基于故障树模型的波音 777 故障诊断专家系统[J]. 自动化与仪表，2005，20(4)：1-3.
GENG Hong，FAN Jianmei. Fault diagnosis expert system for Boeing 777 based on fault tree model[J]. Automation and Instrumentation，2005，20(4)：1-3.

(责任编辑：吕海亮)