

基于 OWL 本体和 SWRL 规则的导弹智能故障诊断研究

李剑峰¹, 肖明清¹, 唐希浪¹, 张磊²

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038; 2. 国防大学 联合勤务学院, 北京 100858)

摘要: 针对复杂航空装备诊断知识缺乏、诊断效率低和知识共享性差等问题, 以某型红外弹为例, 提出一种基于 OWL 本体和 SWRL 规则的导弹智能故障诊断方法; 首先以导弹 FMECA 结果作为知识源, 通过基于 ATML 语法的 OWL 逻辑描述语言建立导弹本体模型, 完成故障模式和故障原因本体之间的映射; 其次采用语义网络规则语言 SWRL 描述知识库规则, 建立本体知识单元之间类、属性和实例的对应关系, 最后通过 Racer 推理机对导弹知识库进行故障诊断推理, 获取故障诊断优先级顺序; 推理结果表明, 该方法能够解决复杂航空装备专家诊断系统中的知识表示困难、缺乏自动语义推理、重用共享性差等问题, 获得最优的故障诊断路径的同时减少了故障排查步骤, 从而实现了故障原因的快速定位, 提高了复杂航空装备专家诊断系统的诊断效率和可靠性。

关键词: OWL 本体; SWRL; FMECA; 规则推理; 故障定位

Research on Intelligent Fault Diagnosis of Missile Based on OWL Ontology and SWRL Rules

Li Jianfeng¹, Xiao Mingqing¹, Tang Xilang¹, Zhang Lei²

(1. College of Aeronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. College of Joint Service, National Defense University, Beijing 100858, China)

Abstract: Aiming at the problems of lack of diagnostic knowledge, low diagnostic efficiency and bad sharing of complicated aviation equipment, an example of infrared missile is taken and an intelligent fault diagnosis method of missiles based on OWL ontology and SWRL rules is put forward. Firstly, FMECA results of the missile are regarded as knowledge source. The ontology model of the missile is constructed by OWL description language based on ATML grammar, which is used to realize the mapping between fault modes and fault causes ontology. Then semantic network rule language SWRL is adapted to describe rules of knowledge base, which builds the relationship among class, property and instance. Finally, Racer inference engine is used for fault diagnosis and reasoning of knowledge base, and fault diagnosis priority is received. Reasoning results show that this method can solve the problems of difficulty of knowledge representation, lack of auto semantic reasoning, bad sharing and reuse of complicated aviation equipment effectively. The best path of fault diagnosis is received and the steps of fault check is reduced, which realize the quick positioning of fault causes and improve expert system diagnosis efficiency and reliability of complicated aviation equipment.

Keywords: Key words: OWL ontology; SWRL; FMECA; rule-based reasoning; fault location

0 引言

随着航空装备服役环境与运行工况愈加复杂多变, 其发生故障的几率逐渐增大, 维护和保障费用也越来越高^[1], 因此对装备系统进行准确、有效的故障诊断成为确保装备安全可靠运行, 降低维护成本的重要途径^[2]。目前导弹的故障诊断主要针对异常测试信号, 采用传统的专家诊断系统和现场人工判断相结合的方式, 但该方法存在诊断知识库不完备, 知识推理不确定度大, 推理速度慢、效率低等缺点, 一旦推理出错, 将难以实现准确的故障定位和诊断

决策。因此, 如何研究设计一种能够准确高效的辨识、诊断导弹故障的智能诊断系统已经得到广泛关注^[3-9]。

基于 FMECA (故障模式、影响、危害分析) 知识工程的故障诊断是导弹维修保障的一个重要发展方向。FMECA 包含导弹各组件的全部故障信息^[10], 是可靠的知识源, 它是在知识层面上对导弹结构和故障模式进行推理分析的一种智能诊断技术, 通过采集的导弹故障信号, 找出单点故障^[11], 并按各故障模式对导弹造成的影响程度及其发生的概率, 来确定对应故障模式危害性。但由于各个专家对导弹故障机理和规则的描述缺乏统一的术语, 造成诊断知识通用性差, 知识难以共享和重用。

因此, 以一种新的形式体现 FMECA 结果, 从而实现知识的共享和再使用对复杂航空装备的故障诊断具有重要

收稿日期: 2018-04-14; 修回日期: 2018-05-15。

作者简介: 李剑峰(1993-), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要从事测试系统与故障诊断方向的研究。

意义。本体作为知识的基本元素，可进行知识的类比推理，适合描述知识库的内部单元，OWL^[12]是目前国际通用的标准本体描述语言，具有较强的知识表达能力和较高的推理效率，但对于推理规则的表达却提供得远远不够^[13]。语义网络规则语言 SWRL^[14]能利用高度抽象的语法表达 OWL 本体叙述的知识，且不受平台的限制，具有很强的通用性。因此，本体语言 OWL 和规则语言 SWRL 的组合运用已成为当前知识表示和推理领域的研究热点^[15-17]。

针对复杂航空装备诊断知识缺乏、诊断效率低下和知识共享性差等问题，以某型红外弹为例，提出一种基于本体和规则的导弹智能故障诊断方法，以 FMECA 结果作为知识源，通过基于 ATML 语法的 OWL 逻辑描述语言从知识源中提取知识，并将知识以本体模型呈现，搭建诊断知识库；采用语义网络规则语言 SWRL 表示知识库规则，建立本体中各知识单元之间类、属性和实例的对应关系；最后通过 Racer 推理机对导弹知识库进行故障推理，得到了有效的故障诊断优先级，同时也实现了专家系统知识库的共享和重用。

1 导弹故障本体模型

1.1 智能故障诊断推理系统框架

由于导弹种类繁多、系统复杂，FMECA 信息难以直接共享和集成，为降低导弹故障信息提取的复杂度，需要对故障信息进行规范性处理，以提高知识的重用度。本体和规则的组合运用在知识的共享和重用方面已体现出很大的优势^[18]，本文基于 OWL 本体和 SWRL 规则对某型红外弹的 FMECA 故障信息进行描述。智能故障推理系统框架如图 1 所示。

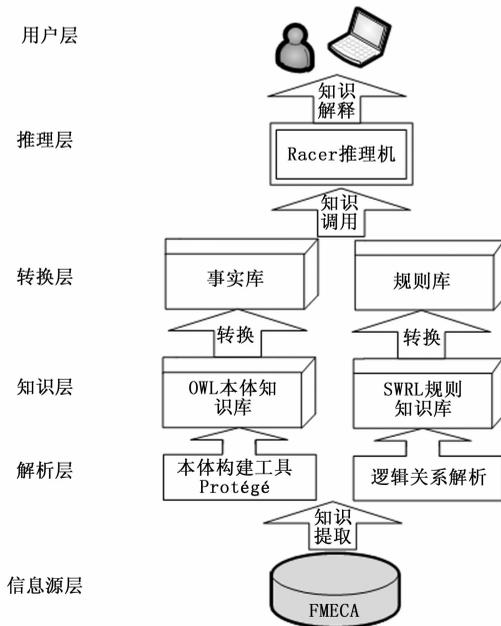


图 1 智能故障推理系统框架

导弹硬件的层级结构和各层级故障模式；通过 protégé 构建 OWL 本体知识库，同时解析本体中各知识单元之间概念和属性的对应关系，构建 SWRL 规则知识库，提取和编码不同层级结构的因果关系规则；知识库中的 OWL 本体库和 SWRL 规则库不能被引用，需要转换成推理机可接受的库语言，即事实库和规则库；Racer 推理机在规则基础上匹配事实库，自动推理可能的故障原因，并提供对应故障发生率，通过参考推理出的故障诊断优先级完成故障的快速定位。

1.2 故障诊断知识源的选择

跟踪和定位导弹故障的前提是要有能够涵盖所有故障特点的知识源，而 FMECA 故障信息恰好反映了导弹故障模式的所有类及其之间的因果联系，如表 1 所示。导弹的某一部件可能对应多种故障模式，且各故障模式能在不同层级上对不同部件产生影响，在 FMECA 分析过程中，将某型红外弹的结构分为四个层级：元件级 (Element)、部件级 (Component)、组件级 (Part) 和系统级 (System)。以某型红外弹制导系统中的红外探测器为例，定义整个导弹层级结构如图 2 所示。

表 1 FMECA 报告

编号	概念信息	编号	概念信息
1	部件名称	7	终端影响
2	部件功能	8	工作时间
3	故障模式	9	检测方法
4	故障原因	10	维修措施
5	本层级影响	11	故障概率
6	高一级影响	12	故障失效比

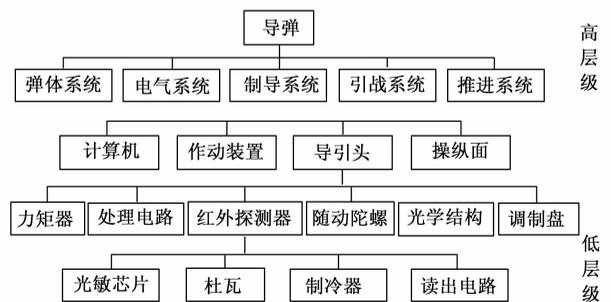


图 2 导弹的层级结构

当某一层级上的部件出现故障时，产生的故障影响将会从低层级向高层级纵向传播，同一层级的部件故障也会横向传播。不同层级故障模式、影响、原因的传播关系如图 3 所示。在 FMECA 知识架构中，每一层级的故障模式、故障影响、故障原因都有着对应的关系；低层级中的某种故障模式是高一级某些故障模式产生的原因，低层级中某种故障模式产生的高级影响是触发高一级的某种故障模式。FMECA 的知识架构较好地反映了故障层级间的联系，适合作为导弹故障诊断的知识库。

以某型红外弹的 FMECA 故障信息作为知识源，确定

2 导弹故障本体建模

导弹故障诊断领域本体是整个智能系统的概念基础, 是规则构建的前提。鉴于篇幅的局限性, 本文构建的本体主要从某型红外弹制导系统入手。

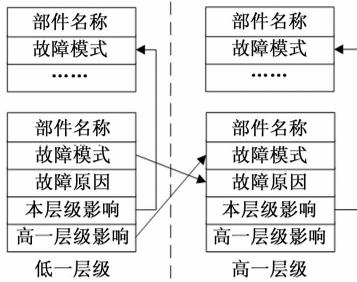


图 3 相邻层级 FMECA 传播关系

2.1 本体概念的定义

制导系统是导弹故障发生率最高的系统^[19], 制导系统故障的出现会严重影响导弹的安全稳定和作战性能。在定义制导系统本体概念时, 从其主要的硬件组成出发, 采用由顶向下法^[20]建立制导系统的概念层次。本体的概念通常也被称为类, 以图 2 定义的某型导弹制导系统层级结构为依据, 将 FMECA 报告中的制导系统部件名称分为计算机、导引头、作动装置、操纵面 4 个类, 各类中又包含各个子类。具体的分类如图 4 所示。

2.2 FMECA 本体对象属性构建

作为本体模型的重要组成部分, 对象属性 (Object property) 用一组谓词形式定义本体类 (Class) 之间的内在联系。针对导弹这一研究对象, 其对象属性主要根据导弹

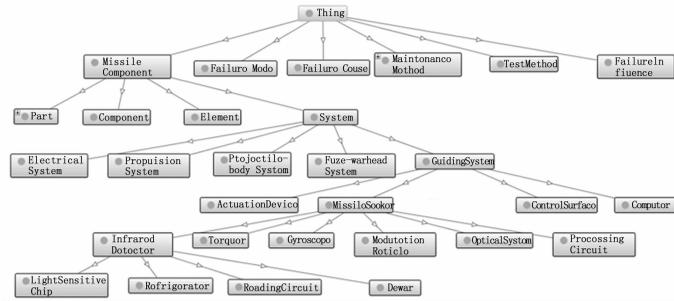


图 4 制导系统类层次分类

的故障信号来建立各失效层级的隶属关系, SWRL 故障诊断规则的属性以 $M(x, y)$ 定义, 其中 M 代表各失效层级隶属关系的谓词, x 和 y 是两个变量, 代表的不同的类 (Class)。例如, 为了描述本体类型中类别 A 与类别 B 的从属关系, 用谓词 $BelongsTo$ 来定义表示类别 A 是类别 B 的一个子类, 即 $BelongsTo(A, B)$ 。所有的对象属性如表 2 所示。

2.3 FMECA 规则构建

SWRL 语义网络规则语言能在 OWL 本体描述语言的基础上, 高度抽象的表示 FMECA 本体知识库规则, 通过 XML 编码嵌入到 OWL 文本中, 以此方便计算机识别, 具有很强的通用性。在 OWL 中, 也可以通过不断嵌套子类及通过对象属性来表示规则, 但对于复杂系统而言, SWRL 能够依据 OWL 类和属性对诊断规则进行更为清晰准确的描述, 具有强大的推理能力。例如:

$FailureMode(?x) \wedge hasHappened(?x, true) \wedge System(?y) \wedge FailureMode(?y) \wedge HigherInfluenceIs(?y, ?x) \rightarrow hasHappened(?y, true) \wedge PartLevelCausesIs(?x, ?y)$

表 2 FMECA 本体对象属性

Object property	Domain	Domain	Note
LocalInfluenceIs	FailureMode	FailureMode	Description of failure mode and its local influence
HigherInfluenceIs	FailureMode	FailureMode	Description of failure mode and its higher influence in the next level
EndInfluenceIs	FailureMode	FailureMode	Description of failure mode and its end influence
SameLevelOf	MissileComponent	MissileComponent	Description of components in the same level
BelongsTo	MissileComponent	MissileComponent	Description of one component and its sub-component
SystemLevelCauseIs	FailureMode	FailureMode	Description of failure mode and its cause in the system level
PartLevelCauseIs	FailureMode	FailureMode	Description of failure mode and its cause in the part level
ComponentLevelCauseIs	FailureMode	FailureMode	Description of failure mode and its cause in the component level
ElementLevelCauseIs	FailureMode	FailureMode	Description of failure mode and its cause in the element level
HappenedAt	FailureMode	MissileComponent	Description of failure mode and the location it happens
FailureLocationIs	FailureMode	MissileComponent	Description of failure mode and the location it happens in the element level
TestedBy	FailureMode	TestMethod	Description of failure mode and its test method
MaintenanceOf	MaintenanceMethod	FailureMode	Description of maintenance method and failure mode

表 3 FMECA 本体 SWRL 规则

Rule name	Rule
Rule-1	FailureMode(? x) ^ hasHappened(? x, true) ^ System(? y) ^ FailureMode(? y) ^ LocalInfluenceIs(? y, ? x) ^ hasHappened(? y, true) → SystemLevelCauseIs(? x, ? y)
Rule-2	FailureMode(? x) ^ hasHappened(? x, true) ^ System(? y) ^ FailureMode(? y) ^ HigherInfluenceIs(? y, ? x) ^ hasHappened(? y, true) → ComponentLevelCauseIs(? x, ? y)
Rule-3	FailureMode(? x) ^ hasHappened(? x, true) ^ Part(? y) ^ FailureMode(? y) ^ LocalInfluenceIs(? y, ? x) ^ hasHappened(? y, true) → PartLevelCauseIs(? x, ? y)
Rule-4	FailureMode(? x) ^ hasHappened(? x, true) ^ Part(? y) ^ FailureMode(? y) ^ HigherInfluenceIs(? y, ? x) ^ hasHappened(? y, true) → ComponentLevelCauseIs(? x, ? y)
Rule-5	FailureMode(? x) ^ hasHappened(? x, true) ^ Component(? y) ^ FailureMode(? y) ^ HigherInfluenceIs(? y, ? x) ^ hasHappened(? y, true) → ComponentLevelCauseIs(? x, ? y)
Rule-6	FailureMode(? x) ^ hasHappened(? x, true) ^ Component(? y) ^ FailureMode(? y) ^ HigherInfluenceIs(? y, ? x) ^ hasHappened(? y, true) → ElementLevelCauseIs(? x, ? y)
Rule-7	MissileComponent(? x) ^ MissileComponent(? y) ^ BelongsTo(? x, ? y) ^ MissileComponent(? z) ^ BelongsTo(? y, ? z) → BelongsTo(? x, ? z)
Rule-8	MissileComponent(? x) ^ MissileComponent(? y) ^ SameLevelOf(? x, ? y) ^ MissileComponent(? z) ^ SameLevelOf(? y, ? z) → SameLevelOf(? x, ? z)
Rule-9	FailureMode(? x) ^ hasHappened(? x, true) ^ Element(? y) ^ HappenedAt(? x, ? y) → FailureLocationIs(? x, ? y)

上述规则表示的语义是：
If

```

FailureMode(? x) ^ hasHappened(? x, true)
//当故障模式 x 发生
System(? y) ^ FailureMode(? y)
//故障模式 y 属于系统层级
HigherInfluenceIs(? y, ? x)
//故障模式 y 的高一级故障影响是 x
Then
If
hasHappened(? y, true)
//当故障模式 y 发生
Then
PartLevelCauseIs(? x, ? y)
//故障模式 x 的组件级故障原因是 y
End

```

SWRL 具体规则表示如表 3 所示。

3 基于本体和规则的导弹故障推理实现

通过查阅某型红外弹的 FMECA 故障研究报告，该型导弹制导系统常见故障模式有 32 种。以 OWL 语言作为故障知识的描述语言，以 SWRL 语言作为故障规则的构建语言，通过 Protégé 软件搭建某型红外弹智能故障诊断系统平台，其本体模型如图 5 所示。模型中建立故障模式、故障原因、故障影响、导弹部件、故障检测方法、维修策略六个大类，各类再划分为各个子类，添加对应子类的实例 (Instances)，通过对象属性建立类与类之间的联系，并根据数据类型属性添加各实例数据类型。以故障模式中的杜瓦故障为例，杜瓦损坏属于 (BelongsTo) 红外探测器故障模式，属于 (BelongsTo) 导引头故障模式，属于 (Belongs-

To) 制导系统故障模式。FMECA 类关系描述如 6 图示。

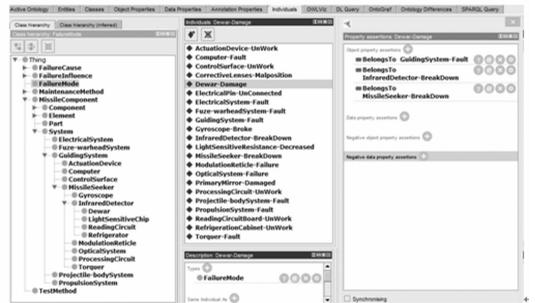


图 5 某型红外弹本体模型

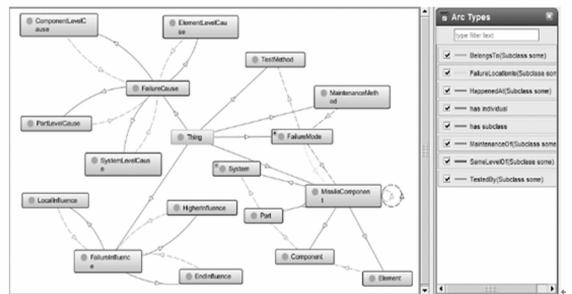


图 6 基于 OWL 本体的 FMECA 类关系描述

以导弹红外探测器中的光敏电阻故障为例，图 7 反映出了光敏电阻在故障出现时产生的本级影响、高一级影响和末端层级影响的关系图。Racer 推理机采用的是由上至下的故障搜索定位法，通过已建立的 FMECA 类关系，当采集到的导弹信号异常时，推理出导弹某一故障模式发生时，各种可能的故障原因及其概率，从而找到最优的诊断顺序，减少故障排查的步骤和时间，从而实现故障的快速定位。以导弹红外探测器故障报警为例，Racer 推理机推

理出的各故障原因所占概率权重和 FMECA 实际故障结果如表 4 所示。

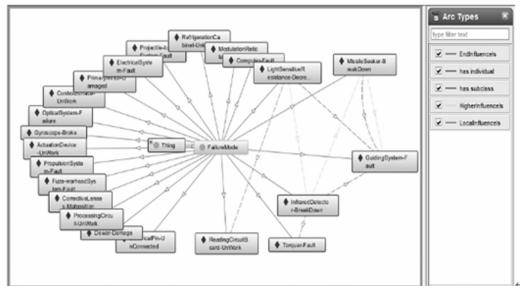


图 7 光敏电阻故障时的类关系描述

表 4 红外探测器故障数据

故障现象	故障原因	故障失效比 α_i	FMECA 结果
红外探测器故障报警	斯特林制冷机氦气泄漏	18.49%	19.67%
	斯特林制冷机推移活塞磨损	15.07%	16.49%
	斯特林制冷机表面粉尘污染	13.35%	14.04%
	芯片崩裂导致探测器开路	11.29%	10.42%
	杜瓦密封故障	9.37%	9.46%
	直线电机支撑弹簧弹性疲劳	7.68%	6.58%
	光敏元性能退化	6.63%	6.29%
	钢柱互联失效	5.57%	5.43%
	焦平面钝化层失效	5.01%	4.98%
	探测器电应力失效	4.46%	4.02%
	焊点与金层电接触不良	3.08%	2.62%

对各故障原因的故障失效比从大到小排序, 可获取最优的诊断顺序。从 Racer 推理机推理结果可以看出, 斯特林制冷机作为该型红外探测器关键组件, 其内部组件发生故障是导致红外探测器故障报警的主要原因, 由斯特林制冷机造成的红外探测器失效的故障失效比高达 46.91%, 且与 FMECA 的 50.02% 实际结果基本相吻合。且根据推理诊断优先级可得, 氦气泄漏、推移活塞磨损和粉尘污染是在开展故障定位的最优诊断路径。因此, 在部队导弹日常维护过程中, 对斯特林制冷机内部重要部件进行及时有效的检测是提升导弹红外探测器工作可靠性的重要途径。

将上述红外探测器故障报警时的推理结果与 FMECA 实际结果进行对比, 发现 Racer 推理机推理结果与 FMECA 实际结果基本相符合, 可见采用基于本体和规则的导弹智能诊断方法可以减少导弹的故障排查步骤, 从而实现对故障原因的快速定位。此外, 通过 OWL 本体描述语言和 SWRL 规则描述语言对 FMECA 结果进行规范性处理, 实现了知识的共享和重用。

4 结论

针对复杂航空装备诊断知识缺乏、故障定位效率低、知识重用和共享性差等问题, 以某型红外弹为例, 提出一种基于 OWL 本体和 SWRL 规则的导弹智能故障诊断方法。

通过提取 FMECA 知识, 构建了导弹的 OWL 本体模型, 实现了故障模式和故障原因本体之间的映射, 采用语义网络规则语言 SWRL 描述知识库规则, 建立了本体知识单元之间类、属性和实例的对应关系, 解决了现有的复杂航空装备故障诊断系统缺乏自动语义推理的问题。推理结果表明, 该方法有效解决了复杂航空装备故障诊断系统中的知识表示困难和知识共享重用性差的问题, 获得了最优的故障诊断路径并减少了故障排查的步骤, 实现了故障原因的快速定位, 提高了现有复杂航空装备专家诊断系统的诊断效率和能力。

参考文献:

- [1] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理综述 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (3): 481-495.
- [2] 彭喜元, 庞景月, 彭宇, 等. 航天器遥测数据异常检测综述 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (9): 1929-1945.
- [3] 张政, 袁宇浩, 简丹丹. 机电装备信号系统故障诊断自愈的应用研究 [J]. 计算机仿真, 2015, 32 (4): 450-454.
- [4] 祁涛, 张彦斌, 姚人前. 神经网络技术在智能 BIT 故障诊断系统中的应用 [J]. 火力与指挥控制, 2016 (6): 125-128.
- [5] 孙伟超, 李文海, 李文峰. 融合粗糙集与 D-S 证据理论的航空装备故障诊断 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41 (10): 1902-1909.
- [6] 郭涛, 于海涛, 肖鲁, 等. 概率神经网络在武器装备故障诊断中的应用 [J]. 兵工自动化, 2015, 34 (6): 10-13.
- [7] 郑锐, 张琳, 汤煜, 等. 基于小波变换与 SVM 的复杂装备故障诊断研究 [J]. 火力指挥与控制, 2016, 41 (6): 104-107.
- [8] Yang Z X, Wang X B, Zhong J H. Representational Learning for Fault Diagnosis of Wind Turbine Equipment: A Multi-Layered Extreme Learning Machines Approach [J]. Energies, 2016, 9 (6): 379.
- [9] 李娟莉, 杨兆建. 基于本体的矿井提升机故障诊断方法 [J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33 (6): 993-997.
- [10] Snooke N, Price C. Automated FMEA based diagnostic symptom generation [J]. Advanced Engineering Informatics, 2012, 26 (4): 870-888.
- [11] 夏震宇, 杨波. 基于改进 FMECA 的装备故障风险定量评估 [J]. 兵器装备工程学报, 2010, 31 (9): 16-19.
- [12] I Horrocks, P F Patel-Schneider, F Harmelen Van. From SMIQ and RDF to OWL: the making of a Web Ontology Language [J]. Web Semantics Science Services & Agents on the World Wide Web, 2003, 1 (1): 7-26.
- [13] Ian Horrocks, Peter F. Patel-Schneider, Harold Boley, Said Tabet, Benjamin Grosz & Mike Dean. SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and Rule ML [Z]. <http://www.w3.org/Submission/SWRL/>, 2004-5.
- [14] 王若梅, 彭丽仪, 王众, 等. 基于 SWRL 规则的简单对象本体关联方法研究与实现 [J]. 计算机科学, 2009, 36 (3): 126-128.

[15] 周 亮, 黄志球, 黄传林. 故障树领域本体及 SWRL 规则的构建方法研究 [J]. 计算机科学, 2015, 42 (8): 198 - 202.

[16] 樊康乐. 基于 OWL 的知识库系统基准程序的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.

[17] 都业宏, 连素杰, 赵学刚. 基于云模型和 SWRL 预测兵器试验故障的研究 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (5): 1175 - 1180.

[18] SIMPERL E. Reusing ontologies on the semantic web: a feasibility study [J]. Data & Knowledge Engineering, 2009, 68 (10): 905 - 925.

[19] 汤永寿, 林鸿生, 陈 春, 等. 制导与引信 [Z]. 上海航天技术研究院第八〇二研究所, 2014, 35 (1): 12 - 17.

[20] 廖 瑛, 梁加红, 吴洪波, 等. 组合诊断技术及其在导弹故障诊断上的应用研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25 (s8): 537 - 540.

(上接第 43 页)

表 1 DFNN、KPCA-DFNN、KPCA-DFNN 预测值误差对比

算法	KPCA-DFNN		PCA-DFNN		DFNN	
	RMSE	MAD	RMSE	MAD	RMSE	MAD
主导变量						
基质浓度	0.1815	0.1398	0.1932	0.1368	0.2639	0.1931
菌体浓度	0.0933	0.0705	0.1607	0.0882	0.2305	0.1527
相对酶活	0.5829	0.4542	0.7248	0.5364	1.3204	0.8702

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |t(i) - y(i)| \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y(i) - t(i))^2}{n}} \quad (17)$$

其中: n 是数据对的数目, $t(i)$ 和 $y(i)$ 是第 i 个期望输出与实际输出。

另外, 为了更清晰地描述 DFNN、KPCA-DFNN、KPCA-DFNN 的预测能力, 图 4 中给出了这三种建模方法预测误差。

从表 1 和图 4 中可以看出, 基于 KPCA-DFNN 的建模得到基质浓度、菌体浓度和相对酶活的预测误差要比 DFNN 和 PCA-DFNN 小得多, 这进一步表明, 即使在同样的训练数据和测试数据的条件下, KPCA-DFNN 的预测效果比 DFNN 和 PCA-DFNN 好。既基于 KPCA-DFNN 在发酵样本预测中具有显著的作用。

3 结论

为解决海洋微生物发酵过程中生物参量难以实时在线测量的问题, 文中以海洋蛋白酶发酵过程为例, 将核主元分析法 (KPCA) 与动态模糊神经网络 (DFNN) 相结合, 提出一种基于 KPCA-DFNN 的建模方法。首先确定了 X、S、P 作为海洋蛋白酶预测模型的输出变量, 同时, 通过对海洋蛋白酶发酵过程进行机理分析, 选定了 10 个影响输出变量的环境变量作为 KPCA-DFNN 模型的输入变量。用训练样本集对这些变量进行预处理后, 按照累积方差百分比大于 95%, KPCA 提取了 2 个特征主元。根据 DFNN 算法对提取后的数据进行学习训练, 建立了基于 KPCA-DFNN 的海洋蛋白酶发酵过程生物参量的软测量模型, 用测试样本集对模型进行仿真验证, 试验结果表明与 DFNN、PCA-DFNN 建模方法相比, 所建立的 KPCA-DFNN 模型具有良好的预测精度, 所得生物参量预测值的最大

RMSE 为 0.582 9, 最大 MAD 为 0.454 2, 满足发酵过程中生物参量的在线测量要求。

参考文献:

[1] 吕明生, 陈 静, 王淑君, 等. 海洋细菌低温碱性蛋白酶菌株的筛选研究 [J]. 江苏食品与发酵, 2004, (1): 7 - 10.

[2] 邹艳丽, 孙 谧, 王跃军. 海洋微生物溶菌酶的纯化与性质研究 [J]. 生物工程学报, 2005, 21 (3): 420 - 423.

[3] Gupta R, Beg Q K, Lorenz P. Bacterial alkaline proteases: molecular approaches and industrial applications [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2002, 59: 15 - 32.

[4] 郝建华, 袁 翠, 王跃军, 等. 低温碱性蛋白酶 QDAPr 的生物信息学分析及同源建模 [J]. 生物信息学, 2006, 4 (2): 62 - 64

[5] 孙 谧, 王跃军, 张云波, 等. 一株产低温碱性蛋白酶嗜冷海洋细菌 YS-9412-130 的分离和培养条件研究 [J]. 海洋水产研究, 2000, 21 (4): 1 - 5.

[6] 孙玉坤, 王 其, 嵇小辅, 等. 基于 PSO-SVM 的关键生物参数软测量方法研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2012, 3: 94 - 96.

[7] 林远艳, 王斌武, 陈乐庚. 基于 GASA 的 RBF 神经网络在木糖醇发酵过程测量中的应用 [J]. 制造业自动化, 2009, 31 (2): 101 - 104.

[8] 黄 丽, 孙玉坤, 嵇小辅, 等. 基于 tPSO-BPNN 的赖氨酸发酵软测量 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31 (10): 2317 - 2320.

[9] 林剑锋, 戚金清, 王兢. 神经网络在 SnO₂ 气敏元件浓度测量中的应用 [J]. 仪表技术与传感器, 2009 (S), 388 - 389.

[10] 孙丽萍, 陈 果, 谭真臻. 基于核主成分分析的小波尺度谱图像特征提取 [J]. 交通运输工程学报, 2009, 9 (5): 62 - 66

[11] 周林城, 杨慧中. 基于 KPCA 和最小二乘支持向量机的软测量建模 [J]. 计算机仿真, 2008, 25 (10): 94 - 97.

[12] 张 瑶. 基于动态递归模糊神经网络的微生物发酵过程软测量方法 [D]. 镇江: 江苏大学, 2010.

[13] 吴江濂, 易灵芝, 邓文浪, 等. 基于 D-FNN 的开关磁阻无位置传感器的研究 [J]. 传感器与微系统, 2011, 30 (1): 66 - 69.

[14] 张德丰, 卢清华, 周 燕. 一种新型的动态模糊神经网络算法 [J]. 控制工程, 2009, 16 (4): 464 - 471.

[15] 陶永芹, 崔杜武. 基于动态模糊神经网络算法的负荷辨识 [J]. 控制与决策, 2011, 26 (4): 519 - 523.