

液体火箭发动机智能故障诊断

陈启智, 刘洪刚

(国防科技大学, 湖南 长沙 410073)

摘要: 液体火箭发动机运行中的可靠性与健康监控技术密切相关。故障诊断是健康监控的关键环节。本文介绍基于知识的液体火箭发动机智能故障诊断原理, 简述一种基于知识的液体火箭发动机智能故障诊断方法。

关键词: 液体火箭发动机; 智能故障诊断; 健康监控

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2006)01-0001-06

Intelligent fault diagnosis for liquid rocket engine

Chen Qizhi, Liu Honggang

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The reliability of operational liquid rocket engine is closely related to the health monitoring technology. The fault diagnosis is the critical part of health monitoring. The principle of knowledge-based intelligent fault diagnosis for liquid rocket engine is introduced and one method of knowledge-based intelligent fault diagnosis for liquid rocket engine is briefly stated.

Key words: liquid rocket engine; intelligent fault diagnosis; health monitoring

1 引言

液体火箭发动机的健康监控包括故障检测、故障诊断和故障控制。故障检测是利用由传感器测得的反映发动机当前工作状态的数据与正常工作状态的相应数据进行对比, 以判别发动机工作是否正常。故障诊断则是根据已有的异常状态信息对当前发生的故障的类型、部位、程度做出判断。故障控制是根据故障诊断对发动机的工作状

态进行控制: 调整工作参数, 或紧急关机, 或启动冗余备份, 以达到减小损失, 避免严重事故, 提高系统的可靠性、安全性的目的。可见, 故障诊断是健康监控的关键环节^[2]。

液体火箭发动机健康监控系统的研究与开发由早期的“红线报警系统”、“故障检测系统”、“安全关机系统”逐步发展到“健康监控系统”和“智能健康监控系统”^[1,4,5]。

本文简述了基于知识的液体火箭发动机智能故障诊断原理和一种智能故障诊断方法。

收稿日期: 2005-09-05; 修回日期: 2005-10-29。

作者简介: 陈启智 (1925—), 男, 教授, 研究领域为液体火箭发动机构型分析、特型分析及健康监控等。

2 基于知识的液体火箭发动机智能故障诊断原理^[1]

基于知识的液体火箭发动机智能故障诊断关键在于建立液体火箭发动机诊断知识库并利用该诊断知识库中的知识进行诊断推理。因此,需要解决的主要问题是:获取、分类、组织并表示液体火箭发动机诊断知识;基于此知识的推理理论和方法,以及诊断中对不确定性的处理等。

基于知识的智能故障诊断主要有基于浅层知识的故障诊断和基于深层知识的故障诊断。浅层知识是指专家的经验知识及相关的规则。深层知识是指系统的原理、结构、模型的动态知识和描述不确定信息的模糊知识以及相关的规则。

液体火箭发动机基于知识的故障诊断系统的发展,迄今经历了两个阶段,即基于浅层知识的故障诊断系统和基于深层知识的故障诊断系统。前者具有知识表达直观,形式统一,模块性强等优点,但专家的经验通常难于完整表示发动机的故障诊断领域知识,诊断知识集不完备。用这种方法,对知识库中未考虑到的情况不能判别,以致难以获得准确的诊断结论,有时甚至得不出诊断结论。后者利用发动机的数学模型,通过数值算法进行故障诊断,在知识的表示与组织上有较大的优越性,易于保证知识库的一致性与完备性。

当模型精度高时,一般能获得较准确的定量诊断结果。但是这种故障诊断的推理方法要求诊断对象的每一环节具有明确的输入输出表达关系,且诊断时搜索空间大,推理速度较慢。此外,由于测量信息和计算工作量的限制,基于数学模型的诊断只能估计一部分参数,以致故障诊断能力受限。

在求解液体火箭发动机故障诊断问题时,充分利用经验知识、结构知识和模型知识在故障诊断中各自的特点和优势,将经验知识与结构知识结合成为层次相对较浅的经验结构综合知识,将结构知识与模型知识结合成为层次相对较深的结构模型综合知识,并在经验知识的基础上集成定量信息形成定性定量综合知识。此外,在模型知识的基础上,将发动机试车过程中随时间变化的动态信息加以集成,形成时间模型综合知识,简称动态知识;将模糊信息加以集成,形成模糊综合知识,简称模糊知识。因此将基于浅层知识的故障诊断方法与基于深层知识的故障诊断方法综合集成起来(如图1所示),便可建立较完备的诊断知识库,以利于对故障进行快速而准确的诊断。基于上述分析,故障诊断的推理方法可先按浅层知识进行诊断推理,以求诊断问题的近似解,再以此为基础,按深层知识进行诊断推理,以获得诊断问题的准确解。

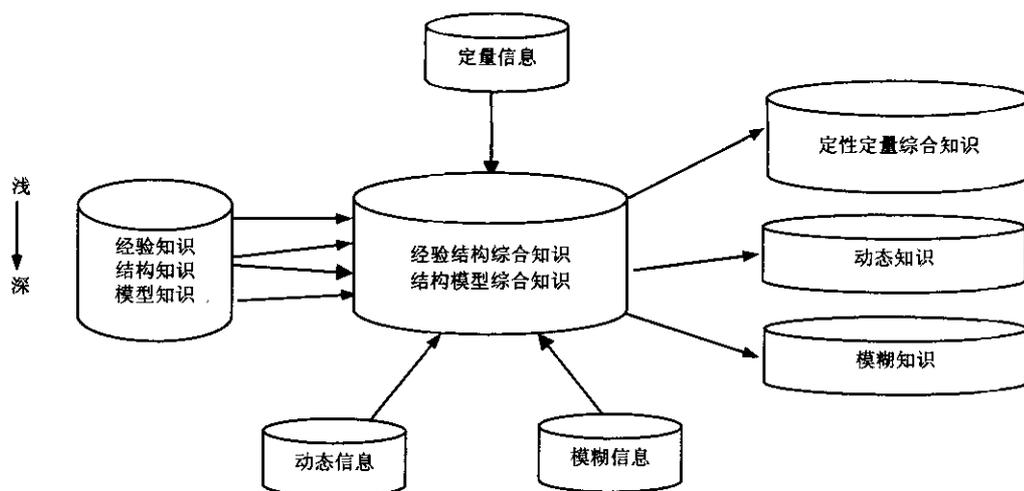


图1 故障诊断知识的综合与集成

Fig.1 Synthesis and integration of fault diagnosis knowledge

3 涡轮泵式液体火箭发动机智能故障诊断^[1]

依据上述建立故障诊断知识库和故障诊断推理的原理，对某涡轮泵式液体火箭发动机的运行进行故障诊断。

首先，将该液体火箭发动机从结构上分解为发动机级、子系统级和元部件级三个层次。发动机故障系由某（或某些）元部件的故障引起。按照发动机的这种层次结构，上层故障为下层故障的症状，下层故障则是上层故障的原因。这种层次结构准确描述了发动机的结构知识，反映了故障的分级和传播特点，为浅层知识和深层知识的综合与集成化表示提供了有利条件。

利用符号有向图（Signed Directed Graph, SDG）对各元部件的数学模型进行定性分析，形成包含液体火箭发动机诊断知识的 SDG 表示和定性诊断规则库。SDG 是一种基于图论描述诊断对象定性知识的有向图表示模型，可对诊断对象的结构和因果等知识进行较直观的描述，具有系统

化描述过程行为的能力^[3]。

在已建立的定性诊断知识的基础上，通过集成测量参数的定量信息，形成液体火箭发动机定量诊断知识库。为了在发动机试车过程中进行故障检测与诊断，以及对测量参数等信息和诊断知识中的不确定性进行处理，通过集成试车过程中的动态信息和模糊信息，形成液体火箭发动机故障诊断的动态诊断知识库和模糊诊断知识库。

另一方面，利用定性偏差模型（Qualitative Deviation Model, QDM）建立发动机故障诊断的定性约束模型和模型诊断知识库。QDM 是一种通过以定性偏差的形式建立系统的诊断知识的定性模型。对诊断对象的各部件，以该部件的数学模型为基础，可建立相应的 QDM，组成模型诊断知识库。

这样，便可构成该发动机的诊断知识库，其示意图如图 2。按照发动机的层次结构，液体火箭发动机的故障诊断知识库包括元部件故障诊断知识库和子系统故障诊断知识库。

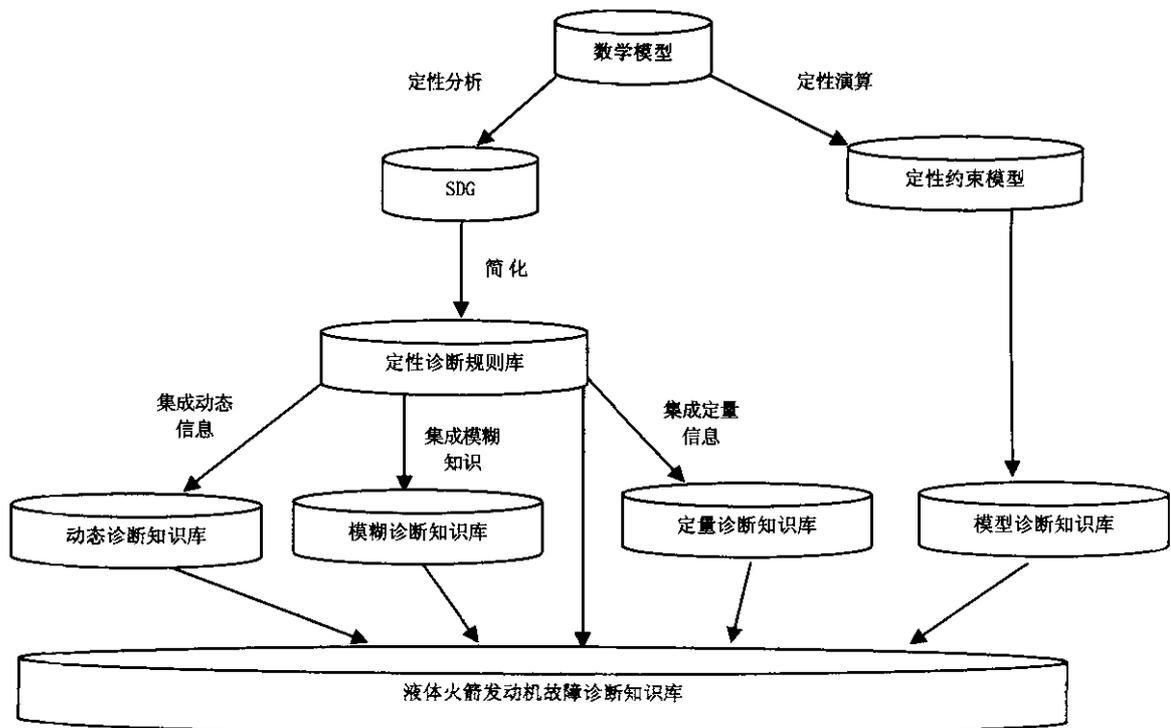


图 2 故障诊断知识库的组成

Fig.2 Composition of fault diagnosis knowledge base

故障诊断推理是根据发动机所表现的异常状态,运用适当的推理方法,按照发动机的层次结构自顶向下诊断,可诊断出最底层元部件的故障原因。上述液体火箭发动机故障诊断知识库具有多层次和多类别的特点,该故障诊断知识库包括各类知识源:基于专家经验的规划库,基于发动机教学模型的模型库,基于模糊信息的模糊知识,基于发动机试车过程中的动态信息的动态知识。因此,基于不同的知识源,采用了综合诊断推理方法,即综合运用基于规则的推理方法(Rule-Based Reasoning, RBR),基于模型的推理方法(Model-Based Reasoning, MBR),基于模糊逻辑推理方法(Fuzzy Logic-Based Reasoning, FBR),和基于动态知识推理方法(Dynamic Knowledge-Based Reasoning, DBR)。这种故障诊断推理结构如图3所示。

对于发动机试车过程中的故障检测与诊断,用DBR进行诊断推理。对于发动机试车数据的事后故障分析,先用RBR得出诊断问题的初步近似解,然后在RBR推理结果不准确或不能进行诊断推理的情况下用MBR进行深层推理。对于诊断中的模糊性问题则用FBR进行诊断推理。具体的故

障诊断流程如图4所示。

上述智能故障诊断方法在某涡轮泵式液体火箭发动机的热试车数据和故障仿真实例上进行了验证:在Test(I)-39试车中发生过涡轮泵故障;在Test(II)-6试车中发生过燃气发生器故障;在Test(II)-7试车中发生过涡轮泵故障及燃气发生器故障。

在Test(I)-39试车时,监测参数的变化为361s开始燃烧室压力低于正常值,375s开始氧化剂流量、燃料流量和涡轮泵转速低于正常值,经智能故障诊断系统检测,故障报警时刻为375s,诊断推理归结为371s涡轮泵发生故障。实际情况是试车后分解发动机发现涡轮转子I级叶片脱落3片,I级叶冠脱落5个。

Test(II)-6试车时,监测参数的变化为91s开始涡轮泵转速低于正常值,109s开始氧化剂流量、燃料流量和燃烧室氧喷前压力低于正常值,经智能故障诊断系统检测,故障报警时刻为109s,诊断推理归结为105s燃气发生器发生故障。实际情况是试车后分解发动机发现燃气发生器燃料进口管路在加强肋处开裂,氧化剂入口接管咀断裂,涡轮转子I级叶片有裂纹,II级叶片脱落6片。

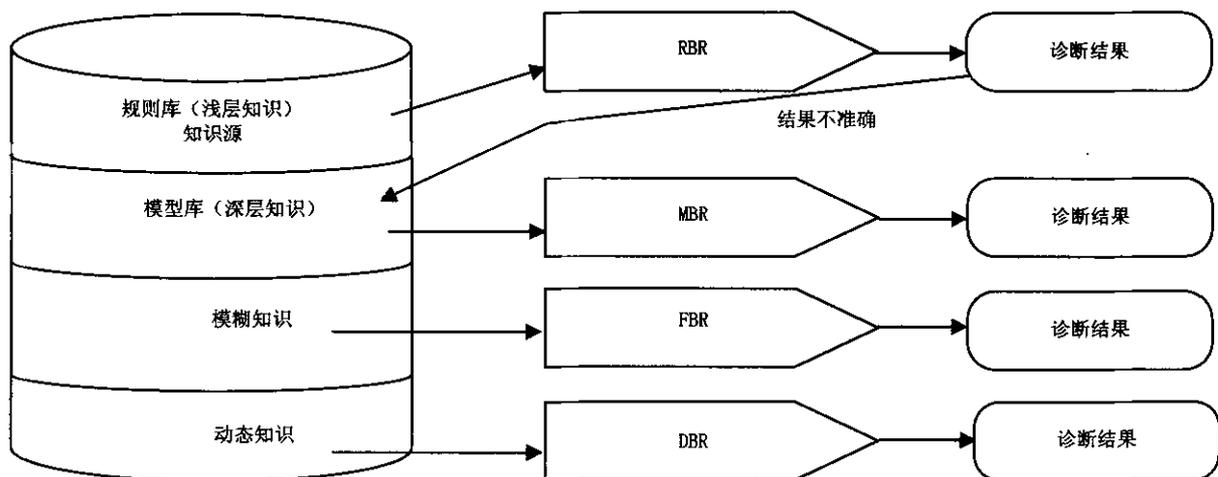


图3 综合诊断推理结构

Fig.3 Structure of integrated diagnosis reasoning

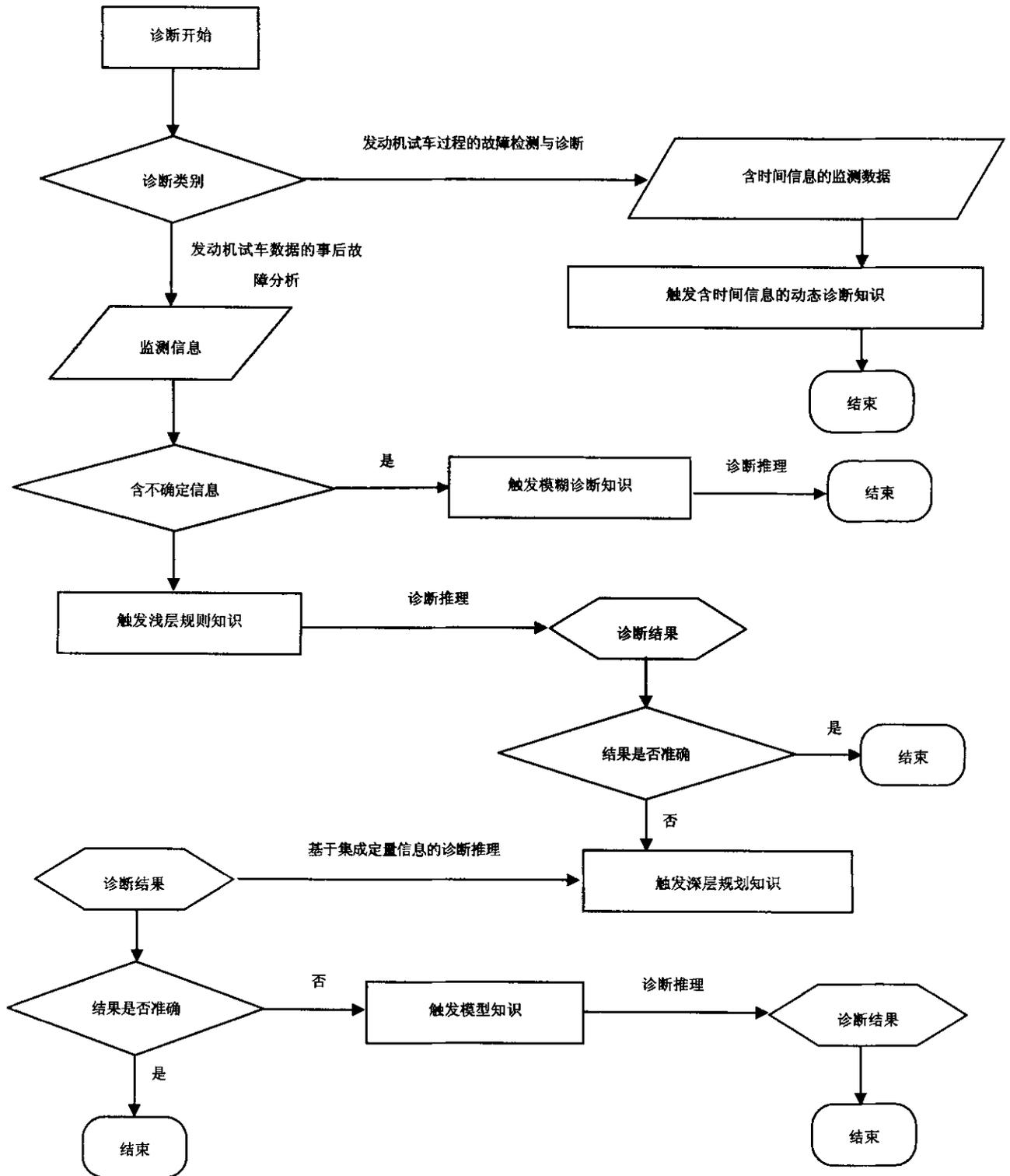


图 4 发动机故障诊断流程图

Fig.4 Flow chart of fault diagnosis for liquid rocket engine

Test(II)-7试车时,监测参数的变化为80s开始燃烧室氧喷前压力低于正常值,81s开始燃料流量低于正常值,103s开始涡轮泵转速和氧化剂流量低于正常值,经智能故障诊断系统检测,故障报警时刻为103s,诊断推理归结为涡轮泵与燃气发生器发生故障。实际情况是试车后分解发动机发现涡轮子I级叶冠脱落4个,II级叶片脱落7片,燃气发生器燃料进口管加强肋有多处裂纹,氧化剂接管咀损坏,氧化剂过滤网烧熔。

验证结果表明,这一方法能有效进行故障检测,故障诊断能力较强,能判断和定位故障源。可以说,集成定性、定量等多种知识,综合系统的浅层知识和深层知识的智能故障诊断方法是对液体火箭发动机进行故障检测和诊断的一条有效途径。

4 结束语

基于知识的液体火箭发动机智能故障诊断是一种可行的故障诊断方法。但由于运行中的液体火箭发动机是一个复杂的动态系统,要实现可靠的实时故障诊断,还需在诊断知识的获取、表示、推理方面进行智能故障诊断软件系统的开发,以

及大量的发动机热试车和其他运行中验证等方面作进一步的工作。

智能故障诊断涉及诊断对象、传感器、计算机、自动控制、人工智能、算法研究、知识工程等众多学科和相关技术。要实现可靠、准确、快速的故障诊断,离不开这些学科和相关技术的发展与结合。

参考文献:

- [1] 刘洪刚.液体火箭发动机智能故障诊断理论与策略研究[D].国防科技大学研究生院,2002,3.
- [2] 陈启智.液体火箭发动机故障检测与诊断研究的若干进展[J].宇航学报,2003(1).
- [3] William Maul, et al. Qualitative model-based diagnostics for rocket system[R]. AIAA93-1779.
- [4] Carl F. Lorenzo and Walter C Merrill. An intelligent control system for rocket engines: need, vision and issues[J]. IEEE Control systems, Jan,1991.
- [5] Nemeth E, et al. An advanced intelligent control system framework[R]. AIAA92-3162.

(编辑:侯早)