

液体火箭发动机诊断知识挖掘系统设计

袁晓峰, 许化龙, 徐志高

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘 要: 基于对液体火箭发动机的试验与故障诊断现状分析, 设计了液体火箭发动机故障诊断知识挖掘系统 DKMS, 以实现试车数据的全面管理和故障诊断知识的高效提取。该系统采用 C/S 结构, 分为数据采集子系统、试车数据管理子系统和诊断知识挖掘子系统三大部分。DKMS 系统的设计为克服发动机故障诊断知识获取的瓶颈提供了一条新的途径。

关键词: 火箭发动机; 故障诊断; 数据挖掘

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2008) 03-0044-06

Design of diagnostic knowledge mining system for liquid propellant rocket engine

Yuan Xiaofeng, Xu Hualong, Xu Zhigao

(Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: Based on the review of the tests and fault diagnosis situation of the liquid propellant rocket engine, a diagnostic knowledge mining system (DKMS) is designed for ameliorating both the fire-test data management and diagnostic knowledge acquirement. The system, based on the client/server architecture, consists of a data sampling subsystem, a fire-test management subsystem and a diagnostic knowledge mining subsystem. In fact, the DKMS provides a new approach for overcoming the bottleneck in diagnosis knowledge acquirement of the rocket engine.

Key words: rocket engine, fault diagnosis, data mining

1 引言

近年来, 液体火箭发动机的故障诊断在理论

和应用研究方面取得了诸多进展, 基于门限检测及信号处理的方法、基于模型的方法和基于知识的方法相继提出。其中, 基于知识的诊断方法, 以神经网络和专家系统等理论和方法为代表, 融

收稿日期: 2008-03-11; 修回日期: 2008-04-21。

作者简介: 袁晓峰 (1975—), 男, 博士生, 工程师, 主要研究领域为数据挖掘与故障诊断。

合了人工智能领域的最新成果。它能够充分利用数据信息和专家经验知识,具有传统诊断方法无法比拟的优势,因此被认为是故障诊断技术的重要发展方向^[1]。然而,此类方法仍存在一些亟待解决的问题,诸如自动获取知识能力差、数据需求量大等。这些问题表现为专家系统方法、故障树方法等,不同程度地存在知识获取“瓶颈”和知识难以维护等问题。进一步分析可知,这些问题的实质是大规模数据背景下的诊断知识获取问题。

液体火箭发动机故障诊断知识的获取与试车数据的管理密切相关。没有对试车数据的全面、高效管理,就很难充分挖掘这些数据的潜力,建立在数据基础之上的故障诊断知识获取也难以实现。由于发动机试验的特殊性,其试车数据呈现出以下特点。数据采集设备性能的提高直接导致每次试车获得的数据量增加,随着历史数据的不断累积,试车数据量激增;发动机的工作状态参量众多且在试验中涉及的采集设备类型繁杂,因此试车数据格式难以统一;从试验安全考虑,通常试车现场的各种仪器设备远离试验后期分析现场,这造成试车数据的空间分散性。这些特点对试车数据的管理和应用是一个极大的挑战。例如,如何全面的管理这些庞杂的历史数据,如何从中找出具有某个故障特征的曲线用以比较分析,如何发现故障间的关联性等,对于这些问题手工处理难以胜任,又缺乏有效的软件支撑,直接影响试验信息、专家经验、以及诊断知识的获取,因此受到诸多研究者的关注,如文献[2]和[3]分别从不同的角度进行了论述。值得注意的是,在发动机试验之外的其它领域,建立在高效数据管理基础之上的诊断知识挖掘已有一些成功案例^[4-6],如加拿大 IRG (Integrated Reasoning Group) 实验室开发了飞机零件和设备的故障诊断与预测系统 ADM (Aerospace Data Miner); 2001 年美国田纳西大学研制的旋转机械轴承的故障诊断系统,这些案例为发动机故障诊断知识的挖掘提供了有益的启发和借鉴。

有鉴于此,本文设计了液体火箭发动机的故障诊断知识挖掘系统 DKMS,其目的是实现试车数据从采集、入库到应用的全面管理和故障诊断

知识的高效提取,以解决发动机故障诊断知识获取的瓶颈问题。

2 系统设计概述

获取故障诊断知识的前提是充足的试验数据。有了充分的数据,再结合先进诊断方法才能取得好的诊断效果。发动机试验是一项高成本的复杂工程,在试车中既要压强、推力、转速、温度、应变、振动、角度、位移等各种参量进行采集,又要对环境温度、湿度、气压等环境影响因素进行监测。因此,必须对试车中的各种数据进行全面系统的管理,以确保数据的完整性。这一点必须在系统设计中予以重视。

试车现场的数据采集主控计算机与试验数据分析计算机在空间分布上处于不同的地点,因此必须通过技术手段使试车数据能够方便、快捷、安全地传送到数据中心,以供及时分析处理。同时,试车数据必须保证能够被设计、试验等不同部门共享。因此,DKMS 系统采用了 C/S 结构,将数据采集主控计算机、数据库服务器、数据挖掘应用客户端均接入局域网。数据采集主控计算机除了负责数据的采集和控制外,还负责将数据采集设备获得的数据通过网络提交到数据库服务器,以供网络内部的授权客户端共享。

DKMS 系统包括数据采集子系统、试车数据管理子系统和诊断知识挖掘子系统三大部分。

(1) 数据采集子系统负责数据采集、设备参数的配置和采集过程的控制。由于数据采集程序是采集设备的出厂标准配置,所以这部分不作开发。该子系统中需要做的工作是编写原始数据提交程序,将数据采集主控计算机中保存的现场试车数据提交到数据库服务器。

(2) 试车数据管理子系统负责试车数据的存储、查询、权限设定等数据库全面管理。其中涉及的工作主要是试车数据库的设计。

(3) 诊断知识挖掘子系统负责发动机故障诊断知识管理和挖掘。其中涉及的主要工作包括特征匹配算法、关联规则挖掘算法、诊断参量优化算法和贝叶斯网络推理算法的编程实现、数据预

处理程序的编写、以及诊断知识库的设计等。

3 软件设计

本节依照前面提到的数据采集子系统、试车数据管理子系统和诊断知识挖掘子系统三大部分进行论述。对于数据采集子系统由于其原始数据提交的程序相对简单，这里不作介绍；对于试车数据管理子系统，重点介绍数据库的设计；对于诊断知识挖掘子系统，这里重点介绍诊断流程、模块构成等部分。DKMS 系统结构示意图如图 1 所示。

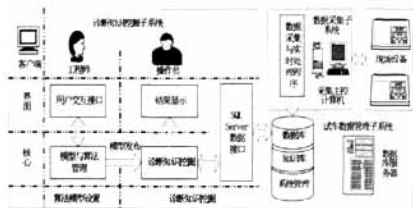


图 1 DKMS 系统结构示意图

Fig.1 Sketch map of the architecture of DKMS

3.1 数据库设计

DKMS 系统中的数据库包括两部分：一是试车数据管理子系统的试车数据库；二是诊断知识挖掘子系统的诊断知识库。二者的任务区别在于，前者负责试车数据及相关试验信息的全面管理；后者负责故障模式、故障与试验参量的关联信息、诊断规则、故障诊断模型的统一管理。

3.1.1 试车数据库设计

在试车数据库设计中，必须考虑数据的完整性。这里将试车数据分为试验任务信息、资源数据和试验数据三大部分。对从试验任务制定、执行、到试验报告生成整个试验过程的全部试验相关信息进行管理。技术分析人员可以追溯试验任务的来源、了解数据的有效性、理解数据的清晰含义，并在此基础上进行全面分析。试验任务信息包括：试验任务号、试验技术要求、规范/标准等；资源数据包括试验件信息、环境数据、仪器参数和现场视频等。试验数据包括原始数据和预处理结果等。

例如，“仪器参数”包含传感器型号、通道

号、量程、增益、采样速率、工程单位转换、触发方式等参数设置信息。试车数据保存在试车数据库中，并为每次试车试验赋予唯一的编号和相应的访问权限。

数据库的基本功能包括：(1) 检索功能，可根据试验任务、发动机类型、发动机部件、发动机型号、试车时间和采集通道等一些试车基本信息进行检索；还可以进行基于特征的高级检索，即根据故障模式进行匹配搜索，以便对相似故障模式的试验数据进行对比分析。(2) 浏览功能，以表格、图形、图片等方式浏览试车数据和相关试验信息。(3) 数据备份，按设定时间间隔进行数据备份以确保数据安全。

3.1.2 诊断知识库设计

除了知识的质量和数量外，知识的组织方式对诊断推理也有很大影响。因此，诊断知识库的设计是否合理直接影响到故障诊断的效率和效果，它是 DKMS 系统设计的重要内容。诊断知识库是发动机诊断问题求解知识的集合，它主要包括诊断参量和规则两部分。其中，诊断规则既包括数据挖掘算法发现的新知识，又包括领域专家的启发性经验知识，还包括二者融合后得到的诊断知识。这些诊断知识体现了故障现象与故障性质、原因之间的内在联系。因此，进行诊断知识库设计时要紧密结合诊断对象的特点，并与诊断知识挖掘模块的设计综合考虑，使三者能够紧密融合。它一般表现为：根据对发动机主要故障模式的分析和归类，确定知识库基本架构；根据挖掘结果的表现形式，例如参量值与故障之间的因果联系、故障之间的关联性等，确定知识库中表格的具体形式和表格间的关联。当然，这种划分不是绝对的，在设计中需要针对具体问题灵活处理。

根据试车资料统计分析，液体发动机主要故障模式有 12 种，包括接头泄漏、启动器异常、热燃气泄漏、涡轮摩擦力矩增大、涡轮叶片断裂、轴承损坏、导管破裂、涡轮泵端面密封泄漏、阀门泄漏、调节器偏差、管道小孔阻塞和阀门工作异常^[7]。从中可归纳出涡轮泵、推力室、启动器、发生器、密封件和管路等 6 类故障。因此，分别针对上述 6 类故障的知识库进行诊断知识库设计。

表 1 诊断参量表示例
Tab.1 Illustration of diagnostic parameters

ID	对象名	参 量 名	类型	数目	转换后参量值
FDD1	FG-10	a ₁₁ , a ₁₃ , a ₁₅ , a ₁₈ , a ₁₉ , a ₂₀ , a ₂₁	整型	7	1,0,1,-1,0,-1,-1
...

表 2 诊断规则表示例
Tab.2 Illustration of diagnostic-rule

ID	规则名	参量名	运算符	参量值	故障	R	注释
1	OA71	a ₁₁ , a ₁₃ , a ₁₅ , a ₁₈ , a ₁₉ , a ₂₀ , a ₂₁	AND	1,0,1,-1,1,0,-1	ONB	1	...
2	OA72	a ₁₁ , a ₁₃ , a ₁₅ , a ₁₈ , a ₁₉ , a ₂₀ , a ₂₁	AND	1,0,1,-1,1,0,-1	ONB	1	...
3	OA73	a ₁₁ , a ₁₃ , a ₁₅ , a ₁₈ , a ₁₉ , a ₂₀ , a ₂₁	AND	1,-1,1,-1,1,0,-1	OVF	0.3	*
...

从知识的逻辑表示角度，诊断系统知识库中只存在规则和诊断参量两种谓词。从数据的关系模型的角度，知识库中存在两种关系并体现为诊断参量表和诊断规则表，如表 1 和 2 所示 (R 为置信度)。诊断参量表中定义了六个字段，其中 ID 号、对象、参量名、参量类型、参量的数目和转换后的参量值。规则表中的每一条规则都在特定的知识库中，例如氧化剂喷注器阻塞故障对应的规则存于管路故障知识库。由于其拥有的规则不止一条，故定义规则名。属性名和关系运算符属性值构成了规则的前提，故障名即是前提得出的结论。

上面提到的 6 类故障知识库建立体现了“分而治之”的诊断思想，由这 6 类故障诊断知识可以分析主要故障之间的关联性，从而为贝叶斯诊断网络 (Bayesian Networks) 的构建和条件概率的设定提供了重要的依据。贝叶斯诊断网络描述了整个发动机中各个部件故障之间的因果联系，体现了从整个系统高度进行故障分析的诊断思想。因此，必须针对贝叶斯诊断网络设计知识库，简称 BN 诊断知识库。BN 诊断知识库由结构信息表、条件概率表和规则三个部分组成。其中，前两部分记录了贝叶斯诊断网络的全部信息，规则部分记录了由推理得到的用户感兴趣的推理规

则。通过不断更新网络完成知识积累，从而改善诊断效果。对于复杂系统，贝叶斯网络方法在诊断速度、诊断结果准确性方面优于故障树诊断方法，并且可在输入不完备的情况下，完成系统的故障诊断。

诊断知识库的功能包括挖掘结果与专家经验知识的存储、诊断参量表和诊断规则表中关键字段的检索、规则的可视化、规则的维护与管理等。诊断知识的获取与知识库的建立工作不是一次性完成的，必须在实践中不断积累经验，通过诊断知识的挖掘不断地完善已有的知识体系，最终提高诊断系统的效能。

3.2 诊断知识挖掘子系统设计

DKMS 系统中，诊断知识挖掘的过程由挖掘目标设定、数据预处理、挖掘算法选择、诊断知识挖掘、挖掘结果可视化和解释评估六个步骤组成，如图 2 所示。

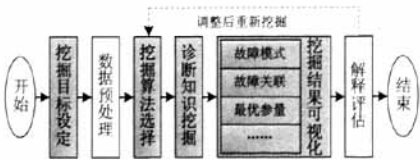


图 2 发动机诊断知识挖掘的过程
Fig.2 Procedure of diagnostic knowledge mining

软件设计中,该挖掘过程主要通过诊断知识挖掘子系统的三个功能模块实现,即数据预处理模块、挖掘算法及其管理模块、及挖掘结果评估模块。图2中深色的框图,即挖掘目标设定、挖掘算法选择、诊断知识挖掘和挖掘结果可视化,这四个步骤通过挖掘算法及其管理模块实现。

3.2.1 数据预处理模块

该模块主要完成对数据选择与处理,从而为数据挖掘做准备,它包括以下子模块:

(1) 数据选择子模块,其完成从试车数据库选择指定通道的试车数据;(2) 滤波处理子模块,对数据进行滤波平滑处理,如五点三次滤波,去除噪声对挖掘结果的影响;(3) 数据变换子模块,其实现数据从时域到频域的变换,或按照给定的函数、阈值进行变换,满足特定需求。

3.2.2 挖掘算法及其管理模块

挖掘算法及其管理模块需要完成挖掘算法设计,以及挖掘算法的选择、算法参数设定以及挖掘结果可视化等算法管理功能的设计。限于篇幅,此处对挖掘算法设计不做展开介绍。依据挖掘算法将该模块分为四个子模块,下面对各子模块的基本功能进行说明。

(1) 特征匹配子模块。该子模块采用基于序变换的时间序列匹配算法,从试车数据库中挖掘与指定故障特征曲线相似的历史试车数据,以供技术人员进行分析比对。该模块需要对序模式的长度、灵敏度、相似性度量函数进行选择 and 设定。将挖掘得到的故障数据段以曲线显示,相似程度以数值的形式表示。

(2) 关联规则挖掘子模块。该子模块采用 Separate-E 算法^[9],实现对试车数据库中诊断参量间量值变化模式的挖掘,其挖掘的对象既可以是正常试车数据也可以是故障试车数据。该模块需要完成约束条件、支持度的设定等初始配置;将挖掘到的关联规则以符号列表的形式表示。

(3) 贝叶斯网络推理子模块。该子模块涉及贝叶斯网络的构建、表示和推理。该模块需要完成贝叶斯诊断网络拓扑模型的构建、条件概率的设定、以及推理算法精度的设定等工作,将推理结果以数值形式表示。

(4) 诊断参量优化子模块。该子模块采用最小代价模糊决策模型,实现对故障诊断参量的优化和诊断决策表的约简。该模块需要完成诊断参量的选择、决策约简算法参量选择、诊断参量权值的设定等。将约简后的决策表以表格的形式显示,诊断所需最小代价以数值形式表示。

3.2.3 挖掘结果评估模块

通过对挖掘结果的分析 and 评估确定其是否作为诊断知识保存在知识库中。在挖掘结果的评估中,技术人员将本次挖掘结果进行分析、与已有的诊断知识进行比较 and 综合,确定是否达到了预定的挖掘目的、是否需要调整数据范围或挖掘算法参数进行重新挖掘(如图2虚线所示)。在此,技术人员的专业水平和经验起着重要的作用。

4 结束语

在对试车数据进行全面管理的基础上,充分挖掘试车数据中潜在的故障发生规律并建立诊断模型有着重要的现实意义。正是基于这种现实需求,设计了 DKMS 系统。作为试车数据管理和应用的平台,DKMS 系统既能够提高对试车数据的分析处理能力,又能够提高发动机故障诊断知识的获取能力。因此,DKMS 系统的建立和应用必将对液体火箭发动机试验工作产生积极的影响。目前,基于 SQL Server 7.0 和 VC 6.0 开发的 DKMS 原型系统已实现了上述设计中的主要功能,但仍有一些工程实际问题需进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘洪刚,吴建军,陈启智.基于混合知识模型和混合推理策略的液体发动机智能故障诊断[J].推进技术,2003,24(3): 194-197.
- [2] 张振鹏.液体火箭发动机故障检测与诊断中的基础问题研究[J].推进技术,2002,23(5): 353-359.
- [3] 胡小平,张丽娟,王艳梅,等.液体火箭发动机故障检测和诊断中数据挖掘策略的分析[J].国防科技大学学报,2005,27(3): 1-5.

(下转第16页)

表 1 推进剂的温升计算结果
Tab.1 The calculated results of temperature rise

泵别	0.1MPa 时推 进剂沸点/℃	0.15MPa 时推 进剂沸点/℃	扬程 Δp /MPa	泵效率	20℃比热容 /(J/kg·K)	温升/℃
氧化剂泵	21.15	30	7	0.30	1515	8
燃料泵	63.10	—	7	0.32	2733	7

作正常，性能稳定，与调整值吻合。

5 发动机试车验证

游机涡轮泵带动一个燃烧室进行了验证性试车，发动机工作中涡轮泵工作正常，性能稳定，与调整值吻合。

6 结论

(1) 泵全流量试验表明，在小流量下效率偏低，净正抽吸压头 *NPSH* 值增大。但泵性能稳定，且泵温升不会造成推进剂的汽化，泵能够正常工作。

(2) 验证性试车的涡轮工况与额定点差别不是很大，涡轮效率可以采用原有的计算方法，涡轮出口压力能够保证稳定工作。

(3) 验证性发动机试车结果表明，涡轮泵工

参考文献：

[1] 阿列玛索夫 B E. 火箭发动机原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.

[2] 黄智勇, 李晶旻, 黄红. 高工况涡轮泵轴系状态对工作可靠性的影响[J]. 火箭推进, 2007, 33(1): 32-35.

[3] 沃尔科夫 E B. 火箭发动机静、动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1978.

[4] 奥夫夏尼科夫 B B. 高转速叶片泵[M]. 北京: 机械工业出版社, 1975.

[5] 莫什金 E K. 液体火箭发动机动力学过程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1964.

[6] 严俊峰, 陈炜. 基于遗传算法的低比转速高速泵优化设计[J]. 火箭推进, 2006, 32(3): 1-7.

(编辑：马 杰)

(上接第 48 页)

[4] Letouneau S, Famili A, Matwin S. Data Mining for Prediction of Aircraft Component Failure[J]. IEEE Intelligence Systems: Special Issue on Data Mining. Amsterdam, Netherlands, August: Fall, 1999: 59-56.

[5] Blair J, Shirkhodaie A. Diagnosis and Prognosis of Bearing Using Data Mining and Numerical Visualiztion Techniques [C]. Proceedings of the 33rd Southeastern Symposium on System Theory. Athens Ohio U.S.A 2001: 395-399.

[6] 杨文献, 姜节胜. 基于数据挖掘的柴油机气门故障诊断技

术研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10): 25-29.

[7] 张育林, 吴建军, 朱恒伟, 等. 液体火箭发动机健康监控技术[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1998.

[8] Yuan Xiaofeng, Xu Hualong, Chen Shuhong. An Improvement on the Constrained Association Rule Mining Algorithm [C]. Proceedings of the 1st International Conference on Digital Information Management, Bangalore India: Dec, 2006: 205-208.

(编辑：陈红霞)