

气门磨损失效分析专家系统知识库的构建与推理研究*

赵运才^{1,2}

(1. 中南大学机电工程学院 湖南长沙 410083; 2. 江西理工大学机电工程学院 江西赣州 341000)

摘要: 在讨论气门磨损失效形式和影响因素的基础上, 建立了发动机气门磨损失效分析专家系统的知识库, 提出了气门磨损失效分析专家系统的知识库结构——树状结构、知识获取与表示方法, 给出了采用数据库技术构造的知识库体系与推理机制。在气门磨损失效分析专家系统中, 要提高产生式系统的可理解性, 应当通过对规则的适当划分, 将规则组织成易于管理的功能模块。将故障树分析法和基于产生式规则的失效诊断专家系统有机地结合起来, 能很好的解决基于产生式规则的专家系统最突出的弱点, 即知识获取难的问题。为了更快、更准寻找到气门磨损失效的影响因素, 采用最好优先搜索法。

关键词: 气门; 磨损失效; 知识库; 推理机制

中图分类号: TQ171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254 - 0150 (2006) 10 - 033 - 3

The Constructing of a Knowledge Base of Expert System for Wearing Failure Analysis of Valve in Engine and its Reasoning Study

Zhao Yuncai^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: Based on discussing the wearing failure form of valve and the influence factors, the knowledge base of expert system for wearing failure analysis of valve in engine was established. The structure of knowledge base of expert system for wearing failure analysis of valve was put forward, including tree-structure, knowledge acquisition and representation method, the technology of data base was adopted to build the knowledge base system and reasoning mechanism in the expert system for wearing failure analysis of valve. The tactics of best-first search was used to quickly and precisely search influence factors of wearing failure of valve. In order to raise the comprehension of production system, rules should be properly divided and be organized to function model which is easily managed. Fault tree-analysis is combined with expert system for fault diagnosis based on production rules, which can well solve the prominent deficiency which is the problem of knowledge acquisition of expert system based on production rules.

Keywords: valve; wear failure; knowledge base; reasoning mechanism

发动机气门是影响发动机可靠性、安全性的关键零部件之一, 其工作条件十分恶劣, 除承受高温燃气的腐蚀外, 还要承受气缸内的爆发压力、气门弹簧作用下的落座力、堆焊层的热应力、阀盘的热应力的综合作用, 同时还缺乏必要的润滑, 其主要失效形式是磨损。由于磨损和损坏直接影响发动机的输出功率、工作性能和服役寿命, 因此深入研究发动机气门门座副的摩擦磨损特性, 正确确定其磨损失效影响因素, 从而指导气门门座副的优化设计是很有必要的。

传统的方法是根据气门失效零件表象分析、裂纹分析、成分分析以及应力分析, 运用摩擦学的基本原理和个人工作经验确定气门的磨损失效影响因素, 然而, 由于气门的磨损失效实际上是一个动态的复杂系统, 涉及失效因素的广泛性, 失效内容的交叉性^[1-2], 如何对大量观察、测试而获得的数据进行综合分析, 从众多的潜在因素中找出失效的根本原因, 仅仅基于常规的摩擦学原理和个人工作经验难以获得准确的气门的磨损失效影响因素。专家系统作为一种基于知识的智能系统, 自 20 世纪 80 年代初期进入商业应用以来, 得到巨大发展。今天, 它已被广泛应用到产品设计、复杂工业生产过程控制、工程、商业以及其它领域。鉴于它所表现出来的在层次结构、控制方法、知识表达上的灵活性, 在故障诊断分析、零件失效分析等方面得到了成功的应用。在此, 本文作者

*基金项目: 中南大学博士后基金和湖南省教育厅中青年基金项目 (04B035)。

收稿日期: 2006 - 01 - 09

作者简介: 赵运才 (1964—) 男, 博士后, 教授, 主要从事机械零件失效机理及控制技术研究。E-mail: zaoyuncaie tang.com。

根据发动机气门磨损失效的特点，提出将故障树分析法和基于产生式规则的诊断专家系统有机地结合起来，构建气门磨损失效专家系统的知识库。

对于任一规格的发动机气门的失效分析，总是希望最终得出其磨损失效形式和失效原因，从而提出改进措施。为此，本文作者首先以气门为对象，通过各种手段对其进行分析，从各个方面获取磨损失效信息，然后将各种失效信息按照一定的方法进行处理，建立逻辑推理模型。

1 气门磨损失效形式分析

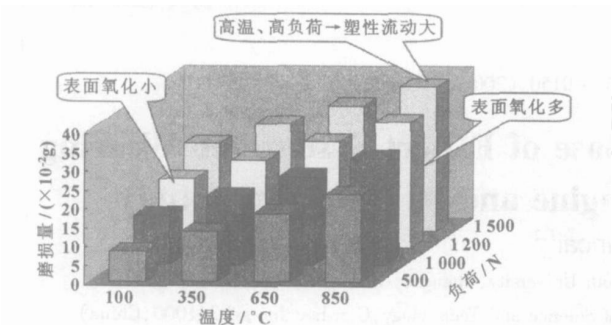


图 1 温度、负荷对气门磨损的影响

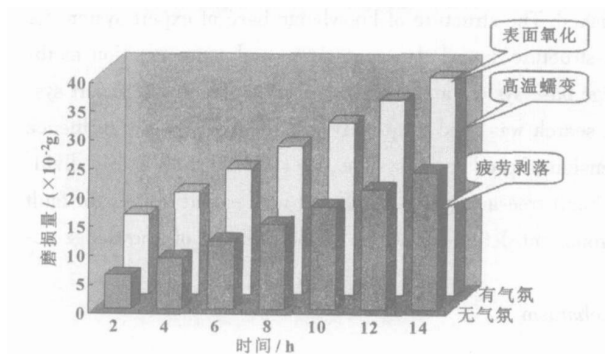


图 2 腐蚀气氛、冲击频数对气门磨损的影响

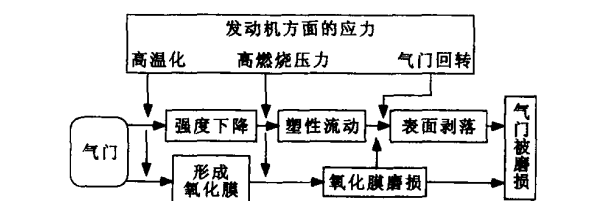


图 3 推断气门的磨损机制

气门门座的磨损失效型式通常有 4 种：接触疲劳磨损、高温腐蚀磨损、磨粒磨损和高温蠕变。在发动机气门门座副强化模拟试验机上进行的磨损试验和对气门的研究结果^[3-4]如图 1、2 所示，表明随着温度的上升，气门对门座的冲击载荷的增大，腐蚀气氛的加入，气门磨损加剧，出现氧化膜磨损、腐蚀磨损和高温蠕变等。图 3 是根据磨损试验结果推断的气

门磨损机制。

2 专家系统知识库的构建

在气门磨损失效分析专家系统中，由气门磨损失效表面形貌特征和微观组织特征，来确定气门磨损失效的影响因素，分析中使用较多的经验知识，因此，研究知识的规则表示是很有意义的^[5-6]。但随着产生式规则数量的增加，系统设计者难以理解规则间的相互作用，究其原因，在于每条规则的自含性使得知识表示的粒度过于细微。因此，要提高产生式系统的可理解性，就应当通过对规则的适当划分，将规则组织成易于管理的功能模块。由于框架系统具有成块知识的良好特性，因此，将两者进行有机地结合，可以为产生式系统的开发、调试和管理提供有益的帮助，从而可以提高专家系统的问题求解效率。

基于产生式规则的专家系统具有表达直观、形式统一、模块性强和推理机制简单等特点。基于产生式规则的专家系统最突出的弱点是知识获取的“瓶颈”问题，将故障树分析法和基于产生式规则的诊断专家系统有机地结合起来，能很好的解决该问题^[7-8]。

故障树是一种逆归定义的数据结构，特别适用于存贮具有层次性的结构数据。在计算机中利用故障树技术进行事故树分析，可以实现建树、定性定量分析计算，到最后输出控制途径；同时故障树技术是一种图解技术，用数理逻辑符号把造成失效的各种原因，按其内在联系的规律，有机地联系起来，从而可根据逻辑图确定系统失效原因的各种可能组合方式和发生概率，进行失效概率预测和失效诊断。

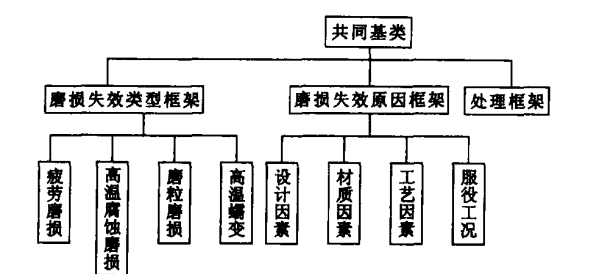


图 4 发动机气门磨损失效分析框架组结构

由于气门磨损失效分析故障树所确立知识模型的层次性，可以按照其层次结构分别建立失效类别框架、失效原因框架及处理框架来表示零件的失效知识。通过故障树建立的专家系统知识库，故障树的每一个层次可作为一个知识框架，每条个性知识用产生式规则表示，规则的前提条件和结论均采用 Frame、Slots、Value 和 Predicate 等 4 元组表示。其中：Frame 是框架类型名；Slots 是槽名；Value 是槽值；Predicate 表示该条件与证据和匹配方式或结论的操作符，

包括“是”、“非”、“有”、“无”、“>”、“<”、“=”等。

气门磨损失效分析框架组结构如图 4 所示。

其主要框架知识 (举例) 可表示如下:

Frame1 磨损失效类别框架

父框架: 共同基类

子框架: 接触疲劳磨损, 高温腐蚀磨损, 磨粒磨损, 高温蠕变

表面形貌特征: 接触疲劳磨损 有贝纹线; 高温腐蚀 烧蚀; 磨粒磨损 混晶微裂纹 微犁沟; 高温蠕变 塑性滑移

Frame11 接触疲劳磨损框架

父框架: 磨损失效类别框架

子框架: 无

表面形貌特征: 有贝纹线

失效原因 (动作): 调用失效原因框架

输出失效类别 (动作): 调用处理框架

由此, 故障树根结点和叶结点之间的联系就很清晰地表达出来了。然后, 再根据不同的规则, 位于上层树的叶结点分别进入下层不同的细化的树。通过这样的知识表示法, 表达出了各个框架之间的联系, 从而也表达出框架父结点和子结点之间的联系, 于是, 整个知识库的知识就能用计算机语言按照失效分析框架组结构的层次进行组织和管理。

这样, 整个知识库的知识就能用计算机语言编程输入计算机, 最后建立起计算机专家系统知识库。

通过建立故障树, 根据规则的特征和解释专家使用规则的过程, 用未知的候选结构作为根结点, 反复用规则作用于非终结点而形成了记载过程的推理树。将这种推理树用于专家系统的推理机制中, 就能使计算机模仿人类故障专家分析和解决问题。

由于正向推理是从原始数据出发, 按一定的策略, 运用知识库中的专家知识推断出结论, 符合零件失效原因推理的基本特征, 故气门磨损失效分析专家系统选用正向推理方法。

同时由于气门磨损失效分析框架组结构是以最小割集为基础的, 最小割集描绘处于失效状态所必须改进的基本故障, 它们之间的关系可用逻辑与门“AND”和逻辑或门“OR”来建立, 因此, 在基于分析框架组结构的推理机制中, 问题的求解过程或状态空间自然地可以用一个与/或框架来表示, 即采用与/或框架的启发式搜索策略。为了更快、更准寻找到气门磨损失效的影响因素, 采用最好优先搜索法。

有知识搜索是利用已知信息和某些控制性知识, 对将要搜索的结点的搜索路径进行预先估计, 从中选

择最有希望达到的结点进行优先搜索, 以避免无效搜索, 提高推理速度。若利用可靠度函数事先能优选采用哪个规则集进行优先搜索, 则能减少搜索时间, 提高搜索效率。基于这种理论, 建立可靠度函数^[9]。

用信任度 $MB(h, e)$ 和不信任度 $MD(h, e)$ 作为对证据与假设信任程度的 2 个基本测量单位, 其中, $MB(h, e)$ 表示证据 e 下假设 h 信任度的增加量, $MD(h, e)$ 表示 e 下假设 h 不信任度的增加量, 二者均为 $[0, 1]$ 上的实数, 它们可以表示为:

$$MB(h, e) = \begin{cases} 1 & P(h) = 1 \\ \frac{\max(P(h/e), P(h)) - P(h)}{1 - P(h)} & \text{其它} \end{cases}$$

$$MD(h, e) = \begin{cases} 1 & P(h) = 0 \\ \frac{\min(P(h/e), P(h)) - P(h)}{-P(h)} & \text{其它} \end{cases}$$

其中, $P(h)$ 为假定 h 的先验概率, $P(h/e)$ 为证据 e 下假定 h 的条件概率。在气门磨损失效分析专家系统中, 可将 MB, MD 组合成一个单一的量, 即可信度:

$$CF(h, e) = MB(h, e) - MD(h, e)$$

由 MB 与 MD 的形式化定义, $CF(h, e)$ 可以显示地表示为:

$$CF(h, e) = \begin{cases} 1 & P(h) = 1 \\ \frac{P(h/e) - P(h)}{1 - P(h)} & P(h/e) > P(h) \\ \frac{P(h/e) - P(h)}{P(h)} & P(h/e) < P(h) \\ 1 & P(h) = 0 \end{cases}$$

因此, 利用关系数据库的特点, 可以快速地修改及浏览知识库, 方便专家检查和更新知识库中的知识, 可以很容易地实现知识库、推理机及应用程序的分离, 同时从失效树顶事件开始, 经过逻辑严密的逐级分析, 凡是能够引起该失效的原因都能找到, 并针对该原因相应提供专家意见。

3 结论

(1) 气门门座的磨损失效型式通常有 4 种: 接触疲劳磨损、高温腐蚀磨损、磨粒磨损和高温蠕变。

(2) 在气门磨损失效分析专家系统中, 要提高产生式系统的可理解性, 应当通过对规则的适当划分, 将规则组织成易于管理的功能模块。

(3) 将故障树分析法和基于产生式规则的失效诊断专家系统有机地结合起来, 能很好的解决基于产生式规则的专家系统最突出的弱点, 即知识获取难的问题。

(4) 为了更快、更准寻找到气门磨损失效的影响因素, 采用最好优先搜索法。 (下转第 38 页)

链节的联接牢固度, 增强其抗微动损伤的能力。

(2) 增加套筒与内链板, 销轴与外链板的过盈配合量, 这些措施均可以增大链节的联结牢固度, 减小微动损伤。

(3) 通过对销轴、套筒和链板进行表面处理, 使材料表面获得特殊的成分, 组织结构和性能, 以提高其耐磨性和抗疲劳性能。对销轴进行 850 ~ 900 奥氏体化和 360 ~ 400 等温淬火, 得到下贝氏体; 对套筒进行 920 ~ 940 时的 C - N 共渗、820 ~ 840 淬火及 150 ~ 180 回火, 套筒表层得到 C - N 化合物、回火马氏体及碳化物, 套筒心部得到低碳马氏体 (渗层过渡区良好); 对链板进行 860 ~ 880 奥氏体化、310 ~ 330 等温淬火及 200 左右回火, 得到下贝氏体、碳化物、回火马氏体, 适量的下贝氏体组织可以提高材料的疲劳强度。这些工艺措施可以使销轴、套筒和链板的疲劳强度得到提高, 进而提升了抗微动疲劳裂纹的能力。

3 结论

(1) 汽车发动机链条套筒与内链板, 销轴与外链板之间存在微动磨损, 其主要的磨损机制为粘着磨

损、疲劳磨损和磨粒磨损。

(2) 通过对链板孔采用挤孔工艺, 增加套筒与内链板, 销轴与外链板的过盈配合量以及改进链板、销轴和套筒的工艺来提高其疲劳强度, 增加抗微动损伤的能力。

参考文献

- 【1】R B Waterhouse. Fretting Fatigue [M]. London: Applied Science, 1981.
 - 【2】D E Taylor, R B Waterhouse. Wear, fretting and fretting fatigue. In: R B Waterhouse, D Kirk (Eds.) Metal Behavior and Surface Engineering [M]. IIT-International, Goumay-sur-Mame, 1989: 13 - 35.
 - 【3】株式会社椿本. チェーン [M]. 东京: 工业调查会, 1995.
 - 【4】WIS Product Catalog. Precision chain systems for drive and conveyor purposes [M]. Munich: [s n], 2002.
 - 【5】张栋, 钟培道, 陶春虎, 等. 失效分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
 - 【6】周仲荣, Le ' o Vincent. 微动磨损 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
 - 【7】周仲荣, 等. 复合微动磨损 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
-
- (上接第 35 页)
- ### 参考文献
- 【1】王琳, 刘佐民. 发动机排气门失效机理研究的国内外概况 [J]. 武汉工业大学学报, 2000, 22 (5): 83 - 88.
Wang Lin, Liu Zuomin. The present situation of the failure mechanism of engine exhaust valves in the world [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2000, 22 (5): 83 - 88.
 - 【2】Zhao R, Barber G C, et al. Wear Mechanism Analysis of Engine Exhaust Valve Seats with a Laboratory Simulator [J]. Tribology Transactions, 1997, 40 (2): 209 - 218.
 - 【3】赵运才, 李颂文, 刘竞生. 发动机气门座副磨损失效机理实验研究 [J]. 摩擦学学报, 2000, 20 (5): 386 - 389.
Zhao Yuncai, Li Songwen, Liu Jingsheng. Experimental study on wear failure of gas-valve/valve-seat in engine [J]. Tribology, 2000, 20 (5): 386 - 389.
 - 【4】赵运才. 发动机气门摩擦磨损特性实验研究 [J]. 湖南科技大学学报, 1999, 14 (3): 26 - 29.
Zhao Yuncai. Experimental study on characteristic of tribology to the engine gas-valve [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology, 1999, 143 (3): 26 - 29.
 - 【5】郭江华, 侯警光, 陈国钧. 船舶柴油机故障诊断技术研究 [J]. 中国航海, 2005 (4): 75 - 79.
Guo Jianghua, Hou Xinguang, Chen Guojun. Research on fault diagnosis technology of marine diesel engine [J]. Navigation of China, 2005 (4): 75 - 79.
 - 【6】刘道华, 乔春平, 原思聪. 专家系统中知识的关系化表示方法 [J]. 信阳师范学院学报, 2005, 18 (4): 491 - 494.
Liu Daohua, Qiao Chunping, Yuan Sicong. The expression method of relation knowledge in the expert system [J]. Journal of Xinyang Normal University, 2005, 18 (4): 491 - 494.
 - 【7】胡友林, 李友荣. 基于模糊推理的风机故障诊断专家系统 [J]. 机械与电子, 2005 (8): 49 - 52.
Hu Youlin, Li Yourong. A fault diagnosis expert system for fan based on fuzzy reasoning [J]. Machine and Electron, 2005 (8): 49 - 52.
 - 【8】陈炜, 吴志良. 故障诊断专家系统结合故障树技术的结构研究 [J]. 航海技术, 2005 (6): 43 - 45.
Chen Wei, Wu Zhiliang. Research on fault diagnosis technology with structure of diagnosis tree technology [J]. Navigation Technology, 2005 (6): 43 - 45.
 - 【9】叶明. 汽车零部件失效分析专家系统及断口图像处理与识别研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.