

文章编号: 1000-8055(2004)01-0023-07

基于知识规则的发动机磨损故障 诊断专家系统

陈 果, 左洪福

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对某型发动机试车状态的磨损故障诊断问题, 运用了两种最常用的滑油分析技术——铁谱分析和光谱分析, 同时结合发动机试车台监测数据, 对该型发动机试车过程中的磨损故障进行专家诊断。首先依据领域专家的经验, 通过分析得到了各种分析方法的诊断专家知识, 并将其转换为基于 if-then 的知识规则存放于知识库中; 其次, 依据各种分析方法的标准磨损界限值, 将原始数据进行了预处理, 统一转换成故障征兆的字符表达式; 最后, 根据应用正向推理机得到磨损故障的诊断结果。

关键词: 航空、航天推进系统; 发动机; 磨损; 故障诊断; 专家系统

中图分类号: V 263. 6; TH 117. 1

文献标识码: A

Expert Systems of Engine Wear Fault Diagnosis Based on Knowledge Rule

CHEN Guo, ZUO Hong-fu

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The paper is aimed at engine wear fault diagnosis of certain military aircraft during ground testing. Two common oil analysis methods, namely Ferrography analysis and Spectrometric analysis, as well as engine testing monitoring method, are applied to diagnosing the military engine wear faults using Expert System (ES) method. Firstly, according to expert diagnosis experience, the knowledge rules based on IF-THEN format of each method are obtained. Secondly, by wear criterion values of each method, the original symptoms are transformed into character expressions. Finally, the diagnosis results are achieved through forward chaining method.

Key words: aerospace propulsion system; engine; wear; fault diagnosis;
Expert System (ES)

众所周知, 由于油样分析方法对磨损检测的灵敏性和有效性, 而磨损是机械零件失效的主要形式和原因, 因此该方法目前已成为机械故障诊断的主要技术手段之一^[1]。根据工作原理和检测手段的不同, 目前油样分析方法可分为铁谱分析

法、光谱分析法、颗粒计数分析法及理化分析法等。虽然利用一种方法有时可以判断机器故障, 但在许多情况下得出的诊断结果并不准确可靠。因为从诊断学角度来看, 任何一种诊断信息都是模糊的不精确的。任何一种诊断对象, 单用一方面信

收稿日期: 2003- 04- 13; 修订日期: 2003- 07- 03

基金项目: 南京航空航天大学人才基金资助项目(S0293- 071); 南京航空航天大学民航科研基金资助项目(Y0202- MH)

作者简介: 陈果(1972-), 男, 四川武胜人, 南京航空航天大学民航学院副教授, 主要从事油样分析技术, 磨损故障诊断, 数据融合, 图像处理与模式识别, 信号分析与处理等研究

息来反映其状态行为都是不完整的,只有从多方面获得关于同一对象的多维信息,并加以综合利用,才能对机器进行更可靠、更准确的监测与诊断。因此本文将建立多种分析方法的基于知识的专家系统,对同一油样分别进行诊断,以期实现磨损故障的全面准确地诊断。

1 基于知识的专家系统

基于知识的专家系统^[2]一般由知识库、推理机、人机接口、知识获取子系统、解释子系统、全局数据库组成。其工作原理为:在知识库创建和维护阶段,知识获取子系统在领域专家和知识工程师(在知识自动获取的情况下,可以脱离他们,然而到目前为止,专家系统的知识自动获取能力是很弱的)的指导下,将专家知识、诊断对象的结构知识等存放于知识库中或对知识库进行维护(增加、删除和修改);在诊断阶段,用户通过过程的需要,把知识库的征兆信息传送给推理机,推理机根据诊断过程的需要,对知识库中的各条知识及全局数据库中的各项事实进行搜索或继续向用户索要征兆信息,最后,诊断结果也通过人机接口返回给用户;如需要,解释子系统可调用知识库中的知识和全局数据库中的事实对诊断结果和诊断过程中用户提出的问题作出合理的解释。

其特点为:(1) 启发性——领域专家的专业知识无严谨的理论依据,难于保证其普遍正确;(2) 透明性——能向用户解释其推理过程,还能回答用户提出的一些关于它自身的问题;(3) 灵活性——知识库知识的修改、补充是专家系统的瓶颈。

基于知识的专家系统的优点是应用广泛,技术成熟。其主要缺点是知识获取的瓶颈问题,知识库是核心,其知识的多少与知识水平的高低直接关系到诊断的准确性。下面将以某型军用发动机为例,首先建立各种诊断方法的知识库。

2 发动机磨损故障的各种诊断方法的知识库

2.1 磨损故障诊断的征兆信息来源

发动机磨损故障诊断主要针对其关键运动部件(齿轮、轴承及密封件)的磨损故障诊断。信息源限定主要来源于铁谱分析、光谱分析及发动机试车台监测数据三种。其原始数据分别为:

(1) 铁谱数据:正常滑动磨粒百分比;球状磨

粒百分比;层状磨粒百分比;切削磨粒百分比;严重滑动磨粒百分比;疲劳剥块百分比;红色氧化物磨粒百分比;黑色氧化物磨粒百分比。

(2) 光谱数据:根据发动机油路部件摩擦副(齿轮、轴承等)的材质成分分析,选取如下 9 种元素的含量作为原始数据:即 Fe 元素浓度;Cr 元素浓度;Ni 元素浓度;Mo 元素浓度;Cu 元素浓度;V 元素浓度;Zn 元素浓度;Al 元素浓度;Ti 元素浓度。

(3) 试车台监测数据:滑油箱内压强;滑油增压泵出口压强;后腔滑油温度;滑油消耗率。

2.2 各种诊断方法的诊断知识规则

在基于规则的诊断专家系统中:包括铁谱诊断专家系统、光谱诊断专家系统及试车台数据诊断专家系统。其中“知识库”和“标准库”是核心。知识库中的知识表示方法采用应用最为广泛的 IF-THEN 产生式规则法。

2.2.1 铁谱诊断知识规则

由于铁谱诊断知识通常基于分析人员的经验^[3],因此需要将这些经验性的知识转化为规则存入数据库以形成知识库。通过研究,总结出如下知识规则:

- R1: if 各类磨粒均少量, then 系统正常(置信度: 1.0);
- R2: if 球状磨粒大量, then 滚动轴承疲劳(置信度: 0.5);
- R3: if 层状磨粒大量, then 滚动轴承疲劳(置信度: 0.6);
- R4: if 疲劳剥块大量, then 滚动轴承疲劳(置信度: 0.8);
- R5: if 球状磨粒大量 and 层状磨粒大量, then 滚动轴承疲劳(置信度: 0.7);
- R6: if 球状磨粒大量 and 疲劳剥块大量, then 滚动轴承疲劳(置信度: 0.85);
- R7: if 层状磨粒大量 and 疲劳剥块大量, then 滚动轴承疲劳(置信度: 0.9);
- R8: if 球状磨粒大量 and 层状磨粒大量 and 疲劳剥块大量, then 滚动轴承疲劳(置信度: 0.95);
- R9: if 疲劳剥块大量, then 齿轮过载疲劳(置信度: 0.8);
- R10: if 严重滑动磨粒大量 then 齿轮胶合(置信度: 0.8);
- R11: if 严重滑动磨粒大量 and 切削磨粒大量,

then 齿轮擦伤(置信度: 0.8);

R 12: if 切削磨粒大量, then 润滑油中混入杂质
(置信度: 0.8);

R 13: if 红色氧化物磨粒大量, then 润滑油中混入
水份(置信度: 0.8);

R 14: if 黑色氧化物磨粒大量, then 润滑不良(置
信度: 0.8)。

其中, 各类磨粒大量与少量, 是根据其百分比
是否超过给定的阈值, 而阈值标准应该针对具体
机器, 通过大量实验获取。规则的置信度是通过经
验得到, 反映了规则的相对可信性。

2 2 2 光谱诊断知识规则

光谱诊断通常根据检测出的金属类型及其浓
度, 并依据其是否超过磨损界限值来判别含该类
金属的摩擦副是否磨损过量。但是合适的磨损界
限值应该根据实际的机器摩擦副结构及类型, 并
且需要通过大量的实验来加以确定, 通常比较困
难。根据该型发动机的具体结构和摩擦副的材质,
如表 1 所示, 选择 Fe, Cr, Ni, Mo, V, Cu, Zn, Al 及
Ti 九种元素进行诊断依据。

光谱诊断知识规则总结如下。其中, 规则中的
置信度通过表 1 中归一化后的数值得到, 它反映
了当某种或某几种元素不正常时, 诊断出发生严
重磨损的部位的相对可信性。其中元素含量是否
正常, 需要与各元素的磨损界限值相比较得到, 而
磨损界限值需要通过大量的检测实验才能得到。

R 1: if 各金属含量均正常, then 系统磨损正常(置

信度: 1.0);

R 2: if Fe 含量不正常, then 轴承滚道及滚珠严重
磨损(置信度: 0.93);

R 3: if Fe 含量不正常, then 齿轮严重磨损(置信
度: 1.0);

R 4: if Fe 含量不正常, then 附件及中心传动轴承
保持架严重磨损(置信度: 0.72);

R 5: if Cr 含量不正常, then 附件及中心传动轴承
保持架严重磨损(置信度: 1.0);

R 6: if Ni 含量不正常, then 附件及中心传动轴承
保持架严重磨损(置信度: 1.0);

R 7: if Mo 含量不正常, then 轴承滚道及滚珠严
重磨损(置信度: 1.0);

R 8: if V 含量不正常, then 轴承滚道及滚珠严重
磨损(置信度: 1.0);

R 9: if V 含量不正常, then 齿轮严重磨损(置信
度: 0.75);

R 10: if Cu 含量不正常, then 附件传动轴承保持
架严重磨损(置信度: 0.73);

R 11: if Cu 含量不正常, then 高低压支点、电机及
中心传动轴承保持架严重磨损(置信度:
1.0);

R 12: if Zn 含量不正常, then 附件传动轴承保持
架严重磨损(置信度: 1.0);

R 13: if Al 含量不正常, then 高低压支点、电机及
中心传动轴承保持架严重磨损(置信度:
1.0);

表 1 某型发动机摩擦副材料的元素含量比较(括号中为归一化后的值)

元 素	Fe/%	Cr/%	Ni/%	Mo/%	V /%	Cu/%	Zn/%	Al/%	Ti/%
Cr4Mo4V (轴承滚道及滚珠)	88.8 (0.93)	4.0 (0.22)	0.20 (0.02)	4.25 (1)	1.0 (1.0)	0.20 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
2Cr3WMoV-1 (齿轮)	94.2 (1.0)	3.0 (0.17)	0.3 (0.03)	0.45 (0.11)	0.75 (0.75)	0.00 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
1Cr18Ni9Ti(附件及 中心传动轴承保持架)	68.9 (0.72)	18.0 (1)	9.5 (1)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0 (0)	0 (0)	0.65 (1)
H62 (附件传动轴承保持架)	0.15 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	62 (0.73)	37.2 (1)	0 (0)	0 (0)
QA 10(高低压支点、电机 及中心传动轴承保持架)	3 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	84.5 (1)	0.5 (0)	9.5 (1)	0 (0)

- R 14: if Fe 含量不正常 and Mo 含量不正常, then 轴承滚道及滚珠严重磨损(置信度: 0.93);
- R 15: if Fe 含量不正常 and Mo 含量不正常 and V 含量不正常, then 轴承滚道及滚珠严重磨损(置信度: 0.93);
- R 16: if Fe 含量不正常 and V 含量不正常, then 齿轮严重磨损(置信度: 0.75);
- R 17: if Fe 含量不正常 and Cr 含量不正常, then 附件及中心传动轴保持架严重磨损(置信度: 0.72);
- R 18: if Fe 含量不正常 and Ni 含量不正常, then 附件及中心传动轴保持架严重磨损(置信度: 0.72);
- R 19: if Fe 含量不正常 and Ti 含量不正常, then 附件及中心传动轴保持架严重磨损(置信度: 1.0);
- R 20: if Cr 含量不正常 and Ni 含量不正常, then 附件及中心传动轴保持架严重磨损(置信度: 1.0);
- R 21: if Cr 含量不正常 and Ti 含量不正常, then 附件及中心传动轴保持架严重磨损(置信度: 1.0);
- R 22: if Ni 含量不正常 and Ti 含量不正常, then 附件及中心传动轴保持架严重磨损(置信度: 1.0);
- R 23: if Fe 含量不正常 and Cr 含量不正常 and Ni

- 含量不正常, then 附件及中心传动轴保持架严重磨损(置信度: 0.72);
- R 24: if Fe 含量不正常 and Cr 含量不正常 and Ti 含量不正常, then 附件及中心传动轴保持架严重磨损(置信度: 0.72);
- R 25: if Cr 含量不正常 and Ni 含量不正常 and Ti 含量不正常, then 附件及中心传动轴保持架严重磨损(置信度: 0.72);
- R 26: if Cu 含量不正常 and Zn 含量不正常, then 附件传动轴保持架严重磨损(置信度: 0.73);
- R 27: if Cu 含量不正常 and Al 含量不正常, then 高低压支点、电机及中心传动轴保持架严重磨损(置信度: 1.0)。

2 2 3 试车台数据诊断知识规则

试车台数据诊断,一方面需要通过各监测数据的标准阈值来判别是否有监测参数超标,另一方面需要通过超标的监测参数来确定出故障的原因。表 2 为某型发动机试车台监测参数的标准阈值;图 1 为根据试车台数据进行诊断的故障网络图。

根据图 1 的网络图,通过分析,试车台数据诊断的专家知识规则总结如下。其中规则的置信度由网络关系得出,如有 N 个征兆对应一个故障原因,则当此 N 个征兆同时存在时,得出的故障原

试车台监测数据异常

发动机故障原因

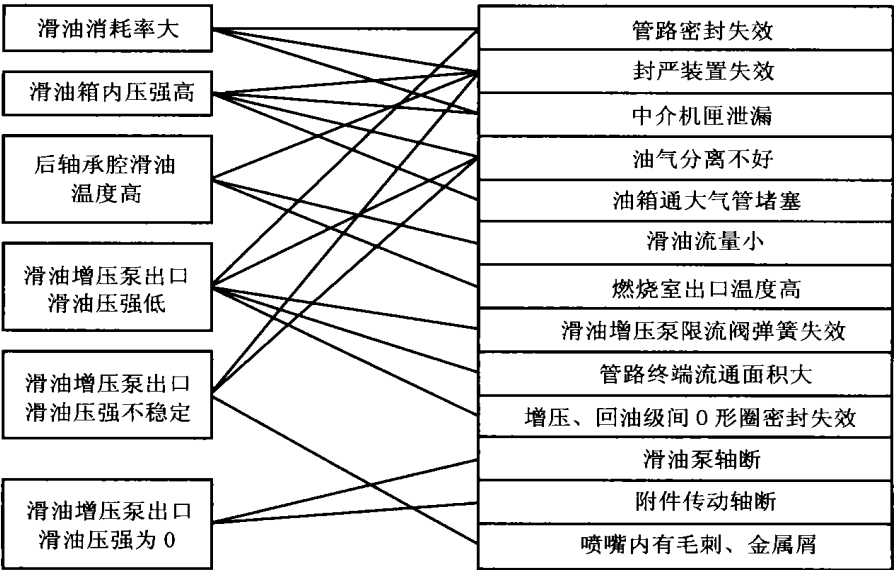


图 1 试车台数据异常与发动机故障之间的关系

Fig 1 The relation between test-drive monitoring data abnormality and engine faults

因的置信度确定为 1, 而每个征兆出现时, 得出故障原因的置信度为 $1/N$ 。

表 2 某型发动机试车台监测数据的正常值范围
Table 2 The normal value range for certain military engine test drive monitoring data

试车台监测参数	正常值范围
滑油箱内压强/M Pa	- 0.02~0.02
滑油增压泵出口滑油压强/M Pa	0.25~1.2
滑油增压泵出口滑油温度/°C	- 50~200
后轴承腔出口滑油温度/°C	< 240
滑油消耗率/(l/h)	< 0.12

- R 1: if 所有试车台数据均正常, then 发动机试车正常(置信度: 1.0);
- R 2: if 滑油消耗率偏高, then 管路密封失效(置信度: 0.5);
- R 3: if 滑油消耗率偏高 and 滑油增压泵出口滑油压强偏低, then 管路密封失效(置信度: 1.0);
- R 4: if 滑油增压泵出口滑油压强偏低, then 管路密封失效(置信度: 0.5);
- R 5: if 滑油消耗率偏高, then 封严装置失效(置信度: 0.25);
- R 6: if 滑油消耗率偏高 and 滑油箱内压强偏高, then 封严装置失效(置信度: 0.5);
- R 7: if 滑油消耗率偏高 and 滑油箱内压强偏高 and 后轴承腔滑油温度偏高, then 封严装置失效(置信度: 0.75);
- R 8: if 滑油消耗率偏高 and 滑油箱内压强偏高 and 后轴承腔滑油温度偏高 and 滑油增压泵出口滑油压强不稳定, then 封严装置失效(置信度: 1.0);
- R 9: if 滑油箱内压强偏高, then 封严装置失效(置信度: 0.25);
- R 10: if 滑油箱内压强偏高 and 后轴承腔滑油温度偏高, then 封严装置失效(置信度: 0.5);
- R 11: if 滑油箱内压强偏高 and 后轴承腔滑油温度偏高 and 滑油增压泵出口滑油压强不稳定, then 封严装置失效(置信度: 0.75);
- R 12: if 后轴承腔滑油温度偏高, then 封严装置失效(置信度: 0.25);
- R 13: if 后轴承腔滑油温度偏高 and 滑油增压泵

- 出口滑油压强不稳定, then 封严装置失效(置信度: 0.5);
- R 14: if 滑油增压泵出口滑油压强不稳定, then 封严装置失效(置信度: 0.25);
- R 15: if 滑油消耗率偏高, then 中介机匣泄漏(置信度: 0.5);
- R 16: if 滑油消耗率偏高 and 滑油箱内压强偏高, then 中介机匣泄漏(置信度: 1.0); R 17: if 滑油箱内压强偏高, then 中介机匣泄漏(置信度: 0.5);
- R 18: if 滑油箱内压强偏高, then 油气分离不好(置信度: 0.33);
- R 19: if 滑油箱内压强偏高 and 滑油增压泵出口滑油压强偏低, then 油气分离不好(置信度: 0.66);
- R 20: if 滑油箱内压强偏高 and 滑油增压泵出口滑油压强偏低 and 滑油增压泵出口滑油压强不稳定, then 油气分离不好(置信度: 1.0);
- R 21: if 滑油增压泵出口滑油压强偏低, then 油气分离不好(置信度: 0.33);
- R 22: if 滑油增压泵出口滑油压强偏低 and 滑油增压泵出口滑油压强不稳定, then 油气分离不好(置信度: 0.66);
- R 23: if 滑油增压泵出口滑油压强不稳定, then 油气分离不好(置信度: 0.33);
- R 24: if 滑油箱内压强偏高, then 滑油箱通大气管堵塞(置信度: 1.0);
- R 25: if 后轴承腔滑油温度偏高, then 滑油流量小(置信度: 1.0);
- R 26: if 后轴承腔滑油温度偏高, then 燃烧室出口温度高(置信度: 1.0);
- R 27: if 滑油增压泵出口滑油压强偏低, then 滑油增压泵限流阀弹簧失效(置信度: 1.0);
- R 28: if 滑油增压泵出口滑油压强偏低, then 管路终端流通面积大(置信度: 1.0);
- R 29: if 滑油增压泵出口滑油压强偏低, then 增压、回油级间 O 形密封圈失效(置信度: 1.0)。R 30: if 滑油增压泵出口滑油压强为零, then 滑油泵轴断(置信度: 1.0);
- R 31: if 滑油增压泵出口滑油压强为零, then 附件传动轴断(置信度: 1.0);
- R 32: if 滑油增压泵出口滑油压强不稳定, then 喷嘴有毛刺、金属屑(置信度: 1.0)。

3 发动机磨损故障诊断专家系统推理机

推理机作为专家系统的组成控制机构,能通过运用由用户提供的征兆数据,从知识库中选取相关的知识并按照一定的推理策略进行推理,直到得出相应的结论。推理机应考虑推理方法、推理方向和推理策略三方面,由于发动机磨损故障诊断的知识不多,知识库结构简单,因此本文采用精确推理方法,正向推理方向和穷尽式搜索策略。

4 应用

应用本文方法,开发了发动机磨损故障综合诊断软件 EFDES3.0,该软件包括铁谱诊断专家系统、光谱诊断专家系统及试车台数据诊断专家系统等。该软件是在 Windows 98/2000 平台下,由 VC++ 6.0 作为前台开发工具,Microsoft Access 2000 作为后台数据库支承的 Windows 应用软件。该软件功能全面、知识库的维护方便、人机界面友好。

表 3 为各种分析方法的原始数据。其中铁谱数据由南京航空航天大学发动机故障诊断研究所开发的 DMA S-II 型智能铁谱分析系统^[4]获取,光谱数据由美国 Bird 公司生产的 MOA 原子发射光谱仪获取,试车台数据由某军用发动机的试车台数据采集系统获取。

表 4 为软件 EFDES3.0 的诊断结果。从诊断结果可以看出专家系统实现了正确的推理和诊断,通过多个专家系统的同时诊断,可以从不同侧面反映出发动机磨损故障原因,从而得到综合诊断结果。由于该系统的知识库是开放的,可以对知识进行添加和删改以使其更为完善。最终使发动机磨损故障诊断准确率进一步提高。

表 3 各种分析方法的原始数据

Table 3 The original data for various analysis methods

原始征兆数据类型	原始征兆
铁谱分析	切削磨粒和严重滑动磨粒大量,其他磨粒含量均为少量。 Fe 含量不正常,其他元素含量正常。 后轴承腔滑油温度偏高。其余指标均正常。
光谱分析	
试车台监测数据	

表 4 发动机磨损故障综合诊断结果

Table 4 Engine wear faults integration diagnosis results

诊断类型	诊 断 结 果	
铁谱诊断	结论	结论 1: 齿轮胶合。(置信度: 0.80) 结论 2: 齿轮擦伤。(置信度: 0.80) 结论 3: 润滑油中混入杂质。(置信度: 0.80)
	匹配的规则	R 10, R 11, R 12
光谱诊断	结论	结论 1: 轴承滚道及滚珠严重磨损。(置信度: 0.93) 结论 2: 齿轮严重磨损。(置信度: 1.00) 结论 3: 附件及中心传动轴承保持架严重磨损。(置信度: 1.00)
	匹配的规则	R 2, R 3, R 4
试车台数据诊断	结论	诊断结论 1: 封严装置失效。(置信度: 0.25) 诊断结论 2: 滑油流量小。(置信度: 1.00) 诊断结论 3: 燃烧室出口温度高。(置信度: 1.00)
	匹配的规则	R 12, R 25, R 26

5 结 论

本文选取两种最常用的滑油分析技术——铁谱和光谱的分析结果, 同时结合发动机试车台数据, 一起作为故障诊断的征兆。运用基于知识的专家系统诊断方法, 通过建立各种分析方法的知识库和推理机, 最终实现了发动机磨损故障的专家综合诊断。并根据本文方法编制了发动机磨损故障综合诊断专家系统 EFDES3.0。随着专家系统知识的不断积累, 该系统的诊断准确率将得到进

一步提高。

参考文献:

[1] 虞和济, 韩庆大, 李沈, 等. 设备故障诊断工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 931- 949

[2] 吴今培, 肖建华. 智能故障诊断与专家系统[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1- 139

[3] Anderson D P. 磨粒图谱[M]. 金元生, 杨其明译. 北京: 机械工业出版社, 1987: 1- 14

[4] 左洪福. 发动机磨损状态监测与故障诊断技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995: 63- 149

