

柴油机磨损状态监测及故障诊断 专家系统知识库建立的研究

黄碧华 裘崇伟

(东风汽车工程研究院摩擦磨损试验室 湖北十堰 442001)

谢友柏

(西安交通大学润滑理论与轴承研究所 西安 710049)

摘要 实践表明,为了确保机器的安全运行,避免突发性故障,对其实施磨损状态监测和故障诊断是十分必要的。尽管铁谱技术和光谱技术等在这方面的应用都比较成功,然而它们也各有其局限性。为了把机器的磨损状态监测和故障诊断技术推向更高的科学水平,在摩擦学系统的系统工程思想指导下,针对柴油机的“拉缸”和“拉瓦”故障,并且根据故障发生之前润滑油结构变化的各种信息,利用专家系统开发工具 EXSYS,建立了基于铁谱技术和光谱技术的柴油机磨损状态监测及故障诊断专家系统 FDEXSYS(V1.0)知识库。对该专家系统的测试和实际运行结果表明,所建立的知识库可以比较全面而可靠地描述柴油机的磨损状态及故障前兆,因而能够提醒用户适时采取有效措施以防止故障的发生。不仅如此,所述专家系统知识的获取方法、知识的分类表示及匹配方法等研究,对建立其它摩擦学系统的故障诊断专家系统都具有参考意义。

关键词 柴油机, 磨损状态监测, 故障诊断, 专家系统, 知识库

1 前言

如果将柴油机看作为一个摩擦学大系统^[1],那么缸套活塞环系统和曲轴轴瓦系统就是这个大系统中比较典型而复杂的两个摩擦学子系统。不言而喻,以摩擦学系统的系统工程思想为指导^[2,3],是研究提高这两个摩擦学子系统的磨损状态监测和故障诊断技术水平的重要途径。在工程实际中的使用考察结果表明,“拉缸”和“拉瓦”分别是对这两个子系统危害比较大的摩擦学故障形式。

为了使机器安全运行,避免突发性故障,除了在设计过程中需要解决的问题以外,由于摩擦学系统具有明显的时变特征,在设计阶段一般很难对机器的制造、安装、运行和维修之后的各种变化作出全面而可靠的估计,因而对机器实施磨损状态监测和故障诊断具有至关重要的实际意义。

目前,国内外在工程实际中应用于机械的磨损状态监测和故障诊断的技术很多,其中以铁谱技术和光谱技术都比较成熟^[4-6]。

基于以上所述,本文针对柴油机的“拉缸”和“拉瓦”故障,并且根据故障发生之前润滑

1993-05-11 收到初稿,1994-06-18 收到修改稿

本文通讯联系人黄碧华(现已调到南京航空航天大学机械工程系工作 邮政编码 210016。本文作者排名顺序实际为黄碧华、谢友柏、裘崇伟)

油结构变化的各种信息来建立 FDEXSYS (V1.0) 专家系统知识库。所用柴油机磨损状态和故障前兆的知识, 主要是来自于铁谱分析技术、光谱分析技术和润滑油的性能指标测定技术等。虽然这些技术分别应用于柴油机的磨损状态监测和故障诊断都具有一定的效果, 但因其各有局限性, 所以只有将它们配合使用, 才能比较全面而准确地获取柴油机磨损状态和故障前兆的信息。

在柴油机的运行过程中, 润滑油是循环流动于各个摩擦学子系统之间的一个元素, 它携带着这些子系统中有关元素的摩擦学状态的信息。与大系统中的其它各个固体元素相比, 润滑油可以比较容易地在不停机与不解体的情况下取出并进行分析, 通过测量其结构变化而得到有关摩擦学状态的信息。所谓润滑油的结构变化, 除了润滑油本身的成分和性能之变化以外, 更主要的是指润滑油中所含磨屑的各种变化, 例如磨屑的形态和表面特征, 以及磨屑的成分和尺寸大小等。

用于建立柴油机磨损状态监测及故障诊断专家系统知识库的原始信息或领域知识通常都是分散与模糊的。因此, 对领域知识的获取、分析和精选, 以及对知识分类表示和各类知识的合理匹配等研究, 进而将它们转换为专家系统知识库中的知识, 并将其表达成计算机能够接受的形式, 这些都是本文研究工作的重要内容。

2 FDEXSYS(V1.0)专家系统知识的获取

一般地说, 专家系统的性能和水平主要决定于它所拥有的与应用领域有关的知识数量和质量, 其所拥有的知识越多, 质量越高, 解决问题的能力也就越强。在开发专家系统的过程中于选取合适的开发工具之后, 建造系统的主要任务便是对应用领域中的专门知识进行筛选和整理, 并且将其存入开发工具的知识库中。这是一种人工的知识获取过程, 也可以称之为知识工程师和领域专家建立知识库的过程。在通常情况下, 这一过程是开发专家系统的一个非常重要而又相当困难的环节, 需要知识工程师和领域专家通过理解和研究应用领域中专家的经验来完成。

为了获取 FDEXSYS(V1.0) 专家系统知识, 首先就应当确定所要开发的专家系统的题目, 寻找该领域中有资格的专家以及原始领域知识的来源, 接着再收集领域知识并对其进行整理与分析研究, 把那些确有价值而又尚不能为开发专家系统直接利用的知识精选出来。应当指出, 进行此项工作的关键是要充分重视所获知识的可靠性和完整性, 以确保专家系统具备真正的专家能力和专家水平。

本文通过下述途径获取领域知识:

a. 由于在本文研究的两个摩擦学子系统和与此二者有关的其它子系统及环境中, 许多固体元素在结构上都具有直接的联系关系, 而且循环流动的润滑油又可以将各个固体元素间接地联系起来, 于是在各种摩擦学行为之间表现出明显的关联性, 从而致使一种故障可能具有多种表现形式, 而一种表现形式又可能产生于多种故障。因此, 根据系统观点建立了柴油机的“拉缸”和“拉瓦”故障树, 并且对这两种故障进行了深入系统的分析, 明确了表达诊断知识的内容及其相互关系。

b. 弄清对铁谱技术和光谱技术等监测结果进行解释的知识, 并将“拉缸”和“拉瓦”故障机理及磨损状态变化与润滑油的结构变化联系起来, 进而再将领域知识进行分类与模块化表示, 以使其易于实现用计算机语言表达。

c. 对领域专家已经取得的经验和实验数据进行分析与研究,并且归纳整理有关故障诊断的知识.

为了使获取的领域知识能够被开发工具所接受,需要将其转换成专家系统知识库中推理规则所采用的表达形式.在将领域知识转换为推理规则的过程中,除了应当研究专家系统或开发工具的推理策略以外,更重要的还在于对领域知识进行精选,以使编辑出的推理规则能够全面、可靠而简练地描述磨损状态的变化和故障前兆.

3 FDEXSYS(V1.0)专家系统知识库的建立

3.1 领域知识的分类表示

通过对领域知识获取的研究,并且根据 EXSYS 专家系统开发工具的要求,将领域知识按照“量词”和“变量”进行分类表示.每一个“量词”或“变量”都可以带有一个或者多个它的“值”.本文把获取的领域知识利用 5 个“量词”和 4 个“变量”进行分类表示.

5 个“量词”及其“值”

- 润滑油中金属元素的种类:共设铜、铁、铝等 8 个值;
- 磨屑的成分:共设铸铁和轴承合金等 10 个值;
- 磨屑的表面特征:共设划痕和氧化色等 6 个值;
- 磨屑的形态特征:共设切削状和球形状等 5 个值;
- 柴油机的运行阶段:共设磨合期和使用期两个值.

4 个“变量”及其“值”

- 异常磨屑尺寸:设定 3 种尺寸范围;
- 润滑油中金属元素含量:设定两种数值范围;
- 磨损烈度指数 I_s :设定 4 种数值范围;
- 润滑油性能指标:共 3 项指标各设定 3 种评定范围.

在 FDEXSYS(V1.0)专家系统知识库中,“量词”及其“值”均用文字描述,而“变量”及其“值”则都用数学表达式描述.

对各个“变量”所设定的数值范围都是通过总结大量的专家经验和实际监测结果而完成的,在专家系统投入使用之后还可以不断地进行调整.针对不同的监测对象,具体数值的设定也不相同.例如,就汽车柴油机而言,在磨损烈度指数 $I_s > 2000$ 的情况下就有可能发生故障,然而对于大功率的电站柴油机来说却未必如此.此外,当机器处于不同的运行阶段时,其 I_s 值的设定也不相同.本文所建知识库中的“量词”和“变量”及它们的“值”都是针对汽车柴油机设定的.

在对获取的领域知识进行分类表示之后,就可以分析讨论如何根据各类知识编辑每条具体的推理规则.

3.2 知识匹配推理网络与推理规则

根据系统的观点,润滑油结构的异常变化是受多种因素影响的结果.如前所述,由于摩擦学系统的复杂性及其内部结构上的关联性,致使一种故障可能具有多种表现形式,而一种表现形式又可能产生于多种故障.因此,不能只用某一“量词”或“变量”及其“值”来确认磨损状态或故障前兆,而应当综合多方面的知识系统地进行判断.在 FDEXSYS(V1.0)专家系统知识库中,每一条推理规则的条件部分(IF 语句)都使用了多个“量词”或“变量”及

其“值”,由此推理出“拉缸”或“拉瓦”的结果(THEN 语句). 例如:

RULE NUMBER: 17

IF: THE PARTICLE COMPOSITION IS OF BABBIT ALLOY AND THE PARTICLE MORPHOLOGY IS LIKE THAT OF THE CUTTING WEAR

THEN: LW — PROBABILITY=8/10

在规则 17 中,有两个“变量”,即“THE PARTICLE COMPOSITION”和“THE PARTICLE MORPHOLOGY”,它们的值分别为“BABBIT ALLOY”和“LIKE THAT OF THE CUTTING WEAR”. 只有根据这两个“变量”及其“值”组成的事实才能够推理出“拉瓦”(LW)的可能性为 8/10. 那么,各个“量词”或“变量”如何组合才能够推理出可靠的结果呢? 这是一个知识的匹配组合问题,需要通过知识获取过程的研究来解决.

图 1 为 FDEXSYS(V1.0)专家系统的知识匹配推理网络,图 2—6 为各类知识合理匹配

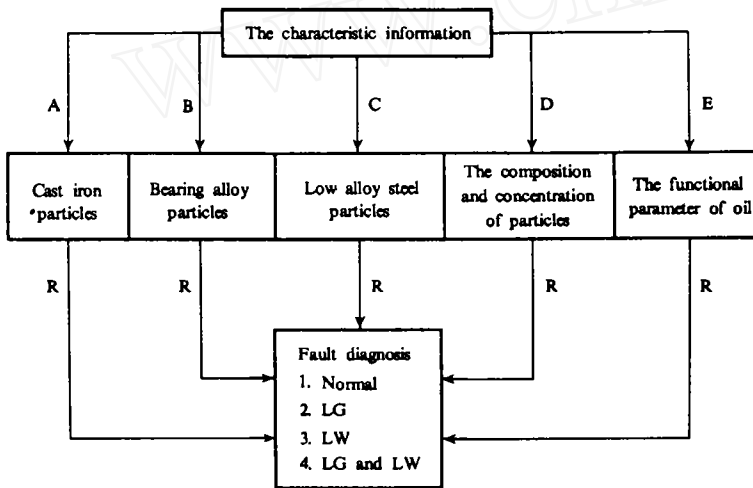


Fig. 1 The knowledge of an expert system FDEXSYS match inference network

图 1 FDEXSYS(V1.0)专家系统的知识匹配推理网络

之后分别编辑出的每条具体知识(铸铁磨粒、轴承合金磨粒、低合金钢磨粒、润滑油中金属元素的种类及含量和润滑油性能指标)的推理规则. 各图中的 A、B、C、D、E 分别代表输入到 FDEXSYS(V1.0)专家系统中的特征信息知识, R 代表每条规则输出的信息. 在规则被激活之后,它输出的信息就是专家系统的最终推理结果的依据.

由图 1—6 可以看出,建立知识匹配推理网络和推理规则,是对领域知识分类之后的进一步模块化表示. 这种表示方法不仅有助于建立知识库时推理规则的编辑,使其能够全面地描述系统所要解决的问题,而且也便于知识库的不断修改与扩充.

在 FDEXSYS(V1.0)专家系统中,推理规则采用产生式表示法: IF—THEN—ELSE. 其中, ELSE 部分可以省去. 例如:

RULE NUMBER: 3

IF: THE PARTICLE COMPOSITION CONTAINS Fe AND [Fe CONCENTRATION] \geq 70 μ g/mL

THEN: LG — PROBABILITY=8/10 LW — PROBABILITY=6/10

IF 语句系由“量词”或“变量”及其“值”所组成,而 THEN 语句则是由决策(推理结果)以及与之相对应的概率值所组成.在 FDEXSYS(V1.0)专家系统中已经有“拉缸”(LG)和“拉瓦”(LW)这样两个决策.

决策的概率值也可以称为置信因子,其作用是表明规则中条件为真时决策正确的可信程度.每条规则中决策的概率值都是通过对知识获取过程的研究确定的.这是一个经验值,在测试和使用专家系统的过程中,还可以对其不断地进行调整以使之更趋合理.在 FDEXSYS(V1.0)专家系统运行之后输出的结果菜单中,决策概率值是由 EXSYS 开发工具提供的概率系统根据被激活规则中决策的概率值统计计算所得.

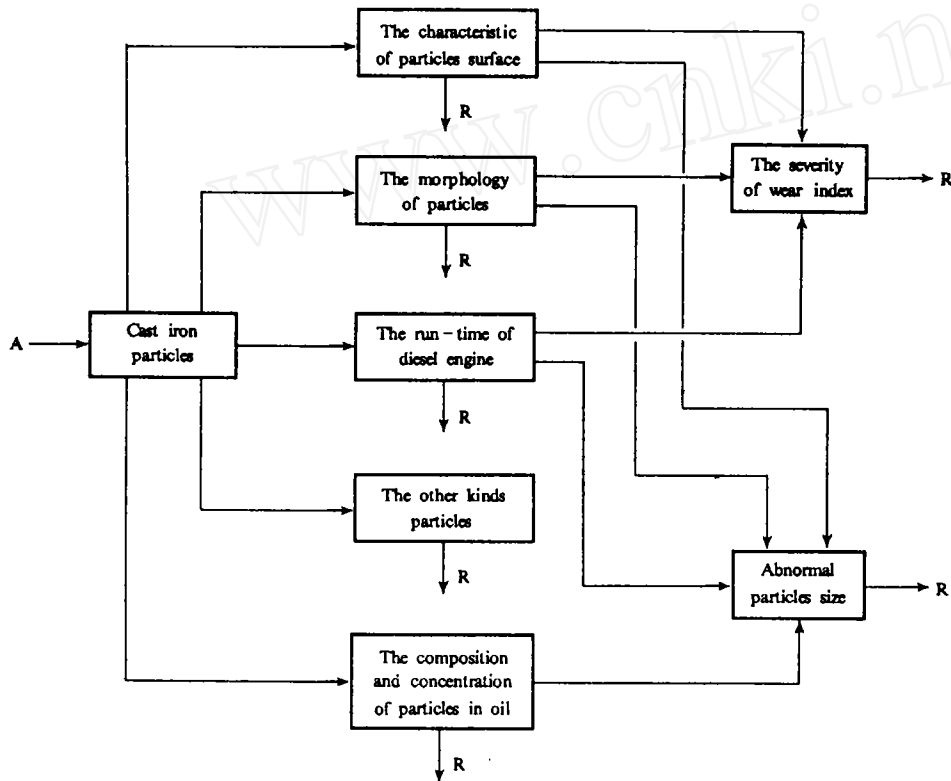


Fig. 2 The inference rule of the cast iron particles

图2 各类知识合理匹配后铸铁磨粒的推理规则

在对各类知识合理匹配之后,再将分别编辑好的每条具体知识的推理规则输入到开发工具 EXSYS 中建立了 FDEXSYS(V1.0)专家系统知识库.目前, FDEXSYS(V1.0)专家系统知识库中总共贮存有 73 条规则.

本专家系统在运行之前要向用户寻问其给系统输入的特征信息或数据,然后它再依此进行推理给出相应的结果.在这个专家系统中,用户需要回答的问题是知识库中 5 个“量词”及其“值”的选择,以及某些“变量”数据的输入.

作者曾经对某车用柴油发动机进行了状态监测,获得的信息有:

- a. 润滑油中的磨粒,即铸铁磨粒、污染颗粒、摩擦聚合物和铁的黑色氧化物;

- b. 磨粒的形态，即切削状、大块状和黑色团状；
- c. 磨粒的表面特征，即草黄回火色和高温氧化特征；
- d. 柴油机处于使用期而不是磨合期；
- e. 光谱分析得到润滑油中铁和铬的含量分别为 70 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 和 89 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ；
- f. 异常磨粒的尺寸 $>60\mu\text{m}$ ；
- g. 磨损烈度指数 $I_w = 2000$ ；
- h. 润滑油的污染度在三级范围，腐蚀度在二级范围，粘度在二级范围。

将所获得的这些信息输入到FDEXSYS(V1.0)专家系统以后，得到了如下所列的运行

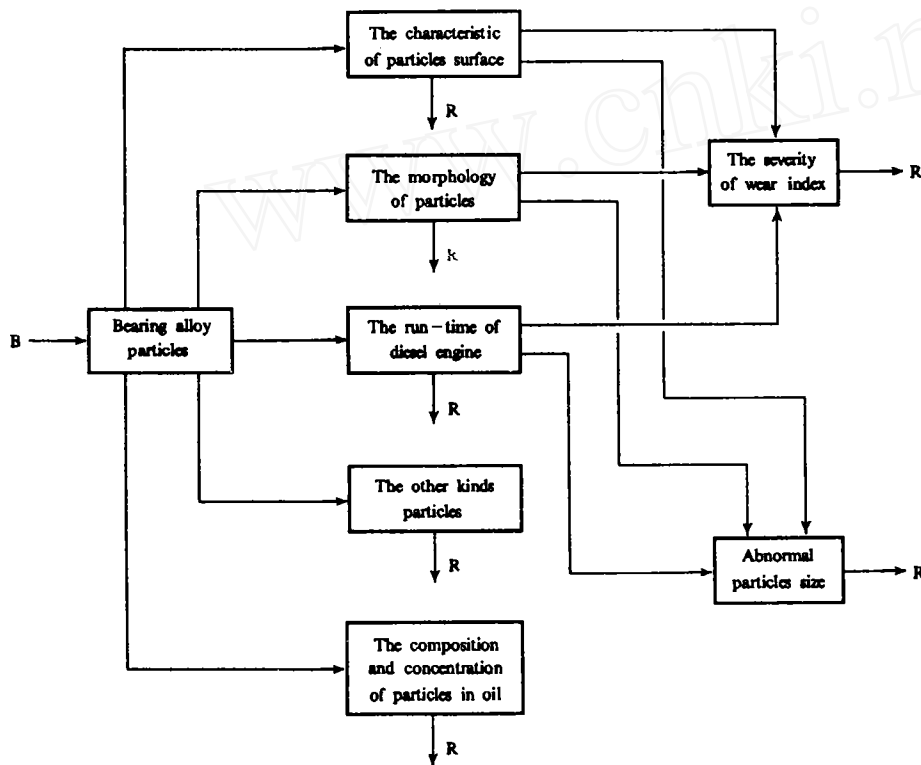


Fig. 3 The inference rule of the bearing alloy particles
图 3 各类知识合理匹配后轴承合金磨粒的推理规则

结果菜单：

Values based on 0--10 system		VALUE
1	LG	9
2	LW	6

由此可以清楚地看出，发生“拉缸(LG)”故障的概率是“9/10”，而发生“拉瓦(LW)”故障的概率则是“6/10”。实际拆检过程中发现，这台车用柴油机已经发生“拉缸”，但还没有看到明显的“拉瓦”现象。而专家系统运行结果显示该机已有即将发生“拉瓦”的前兆，这就提醒用户应当采取有效措施，以防止“拉瓦”故障的发生。

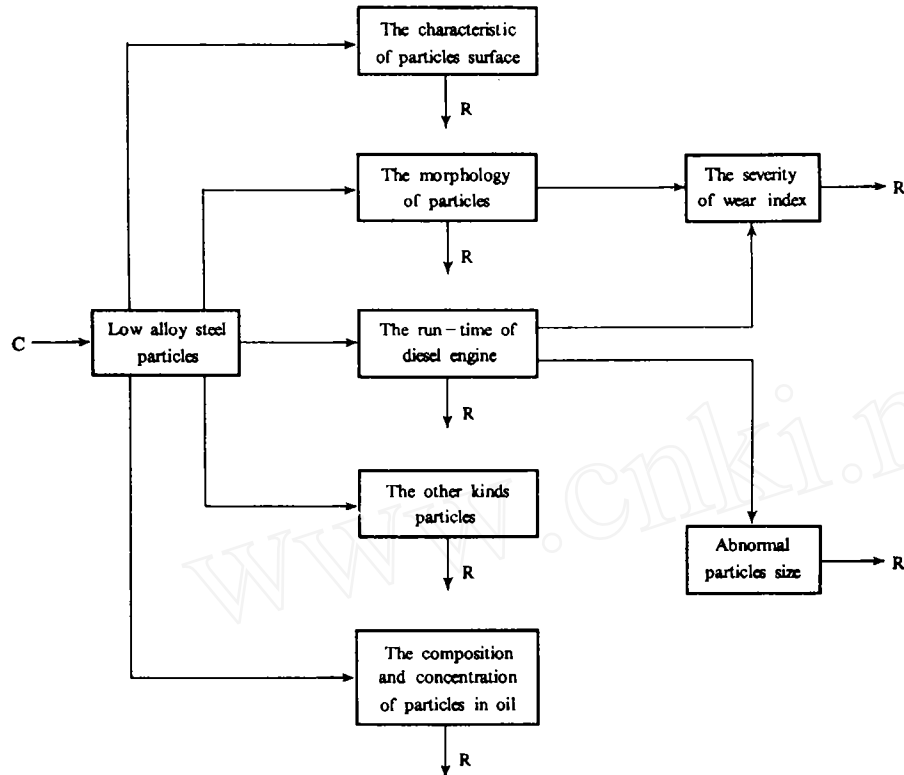


Fig. 1 The inference rule of the low alloy steel particles
图 4 各类知识合理匹配后低合金钢磨粒的推理规则

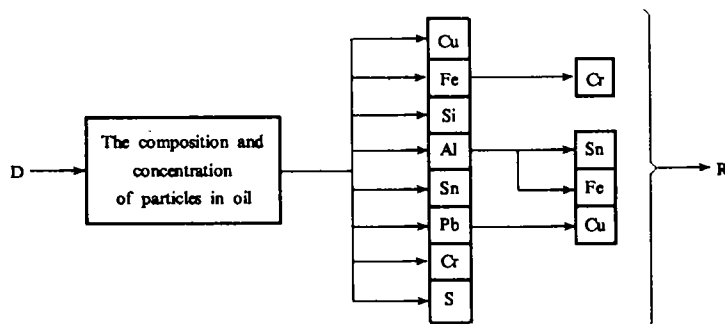


Fig. 5 The inference rule of the composition and concentration of particles in oil
图 5 各类知识合理匹配后润滑油中金属元素种类及含量的推理规则

4 结束语

通过对 FDEXSYS(V1.0)专家系统的测试和实际运行结果表明,本文建立的知识库可以比较全面而可靠地描述柴油机的磨损状态及故障前兆,显示了该系统研制方法的可行性和有效性. 本文所述专家系统知识的获取方法、知识的分类表示及匹配方法等研究,对建立其它摩擦学系统的故障诊断专家系统都具有参考意义. 目前,虽然 FDEXSYS(V1.0)专家系统知识库还是一个雏型,但它毕竟具有一定的学习功能. 只要对知识库中的知识不断

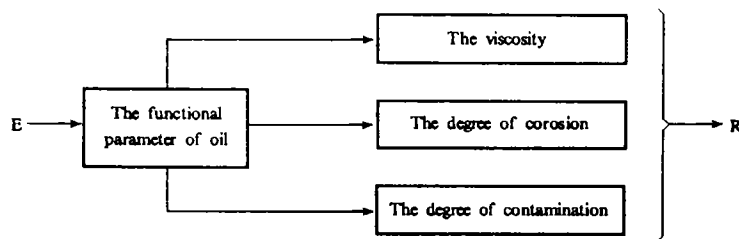


Fig. 6 The inference rule of the functional parameter of oil

图6 各类知识合理匹配后润滑油性能指标的推理规则

地进行充实、修改和完善，其预报故障的确报率就必将得到进一步的提高。

参 考 文 献

- [1] 黄碧华. 柴油机磨损状态监测及故障诊断专家系统的研制: [学位论文]. 西安: 西安交通大学润滑理论及轴承研究所, 1992.
- [2] 谢友柏. 摩擦学系统的系统工程. 润滑与密封, 1988, (6): 1-10.
- [3] 谢友柏. 全国第一次摩擦学设计学术会议论文集, 沈阳, 1991. 10-21.
- [4] Hofman M N, Johrson J H. The development of ferrography as a laboratory wear measurement method for the study of engine operating condition or diesel engine wear. *Wear*, 1977, 44: 183-199.
- [5] Jons M H. Wear debris associated with diesel engine operation. *Wear*, 1983, 90: 75-88.
- [6] Jons M H. Ferrography applied to diesel engine oil analysis. *Wear*, 1979, 56: 93-103.

Research of Building a Knowledge Base of Expert System for Wear State Monitoring and Fault Diagnosis of Diesel Engine

Huang Bihua Qiu Chongwei

(Tribology Laboratory Dong Feng Automotive Engineering Institute Shi'yan 442001 China)

Xie Youbai

(Theory of Lubrication and Bearing Institute Xi'an Jiaotong University Xi'an 710049 China)

Abstract For a machine to operate safely and avoid fault, it is necessary for wear state monitoring and fault diagnosis of diesel engine. Though the ferrograph and spectrograph technology have been used for wear state monitoring and fault diagnosis successfully, they have limitation. Following the principle of tribo-systems and system engineering, and according to the structural change of lubricant oil before the fault, a knowledge base of customized expert system FDEXSYS (V1.0) based on ferrograph and spectrograph for wear state monitoring and "LG" or "LW" fault diagnosis of diesel engine has been developed by employing the expert system developing tools EXSYS, and then the wear state and fault of diesel engine is described by the knowledge base of expert system that has been tested with many practical causes.

Key words diesel engine, wear state monitoring, fault diagnosis, expert system, knowledge base