

基金项目：“内  
科学研究项目（N



JIYU XINXI RONGHE DE  
CHAIYOUJI GUZHANG  
ZHENDUAN FANGFA YANJIU

# 基于信息融合的 柴油机故障诊断方法研究

刘 罡◎著

 吉林大学出版社

# 基于信息融合的 柴油机故障诊断方法研究

刘 罡 著

吉林大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

基于信息融合的柴油机故障诊断方法研究 / 刘罡著

— 长春 : 吉林大学出版社, 2016.9

ISBN 978 - 7 - 5677 - 7884 - 9

I. ①基… II. ①刘… III. ①柴油机 - 故障诊断 - 研究 IV. ①TK428

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 243500 号

书 名 : 基于信息融合的柴油机故障诊断方法研究

作 者 : 刘 罡 著

责任编辑:朱进 责任校对:丁鑫 贺迪

吉林大学出版社出版、发行

开本:787 × 1092 毫米 1/16

印张:13 字数:208 千字

ISBN 978 - 7 - 5677 - 7884 - 9

封面设计:美印图文

北京龙跃印务有限公司 印刷

2017年1月第1版

2017年1月第1次印刷

定价:42.00 元

版权所有 翻印必究

社址:长春市明德路501号 邮编:130021

发行部电话:0431 - 89580028/29

网址:<http://www.jlup.com.cn>

E-mail:[jlup@mail.jlu.edu.cn](mailto:jlup@mail.jlu.edu.cn)

## 前 言

随着工业化的繁荣,机械设备监测及故障诊断技术备受重视。柴油机作为典型的动力机械,既有往复运动,又有旋转运动,而且内部结构复杂,单一的传感器很难准确实现故障诊断,因此要用多个传感器的信息融合实现故障诊断。本文针对柴油机故障诊断关键技术问题,开展了基于信息融合的诊断方法研究,可有效地对多传感器的信息进行融合,从而解决了柴油机故障的检测、预测和决策分析问题。本文主要工作如下:

一、建立柴油机故障与多传感器监测信息的对应关系。采用幅域分析法对典型信号进行特征提取,并与其他可监测信息共同构成判断故障类型的特征变量。针对特征变量重要性的差异对分类的影响,采用主客观融合加权法对特征变量进行融合加权。

二、针对柴油机监测信息的复杂性,在特征变量相关性模糊时,经典的马氏距离及欧氏距离均无法有效计算故障特征的问题,本文给出了融合距离的度量方法,并结合田口方法,提出了柴油机故障诊断的融合距离田口方法。该方法将多个传感器的数据进行优选及有效融合,并在融合距离这一度量标准下生成故障聚类,根据融合距离的阈值进行了柴油机故障的检测,仿真结果验证了该方法的有效性。其中,当特征变量存在强相关问题时,用 Moore-Penrose 广义逆矩阵计算马氏距离,解决了特征变量之间的强相关性导致马氏距离无法计算的问题。

三、针对马氏距离在聚类分析中对于特征变量重要性差异对分类的影响考虑不足,本文给出了加权马氏距离的概念,并结合田口方法,提出了柴油机故障诊断的加权马氏田口方法。该方法将多个传感器的数据进行优选及有效融合,并在加权马氏距离这一度量标准下生成故障聚类,根据故障聚类的阈值进行了故障检测和故障预测,仿真结果验证了该方法的有效性。

四、将神经网络及 Dempster-Shafer 证据理论引入到决策层融合诊断中,

将多传感器的故障诊断结果进行融合,可有效进行故障的决策融合分析。针对证据合成的独立性前提和证据的相关性问题,提出了相关证据的合成方法,排除了相关信息重复使用对证据合成的影响,使得相关证据合成结果更加合理准确,解决了相关证据的决策层融合问题,仿真结果验证了该方法的有效性。

五、针对多传感器证据出现冲突时,经典的 Dempster-Shafer 证据理论无法有效合成的问题,本文提出了冲突证据的加权分配合成方法,建立了可信度函数及证据冲突函数,并将冲突的证据信息加以利用,以免造成证据的浪费,解决了冲突证据的决策融合问题。冲突证据的合成改善了问题传感器给检测结果带来的干扰信息,使得融合结果更加的可靠,仿真结果验证了该方法的有效性。

六、提出了基于信息融合的柴油机故障综合诊断策略,并利用 Matlab/Simulink 仿真工具搭建了故障诊断仿真系统。在一个仿真系统中就可以解决柴油机故障的检测、预测和决策分析问题,不需要为每一个问题开发一种单独的解决工具。该系统的应用具有独立性,只要提供了不同状态下的数据,就能广泛应用于多元系统的分析及决策。之后,引用来自柴油机台架的真实数据进行了故障模拟仿真试验,仿真试验结果验证了所提出的诊断算法的有效性。

## 创新点

1. 针对柴油机监测信息的复杂性,在特征变量相关性模糊时,经典的马氏距离和欧氏距离均无法有效计算故障特征的问题,本文将马氏距离与欧氏距离进行了融合,提出了一种新的融合距离度量方法,用特征变量相关系数来确定权系数,并将马氏距离与欧氏距离进行了动态加权,从而兼顾了特征变量的相关性和独立性。另外,基于融合距离,结合田口方法,提出了柴油机故障诊断的融合距离田口方法,该方法可有效地提高柴油机故障特征的识别精度。

2. 针对马氏距离在聚类分析中对于特征变量重要性差异对分类的影响考虑不足,本文提出了加权马氏距离的概念,将加权马氏距离作为特征分类的度量标准,通过特征变量的无量纲化,可以实现不同传感器数据在同一度量标准下的有效融合,进而解决了分类过程中特征变量重要性差异所带来的影响。另外,基于加权马氏距离,结合田口方法,提出了柴油机故障诊断的加权马氏田口方法,该方法可有效地提高柴油机故障特征的识别精度,并能进行故障的预测。

3. 针对多传感器决策证据出现冲突时,经典的 Dempster-Shafer 证据合成理论无法有效合成的问题,本文提出了关于冲突证据的加权分配合成方法。建立了可信度函数及证据冲突函数,并将冲突的证据信息加以利用,可有效解决冲突证据的融合决策问题。冲突证据的合成改善了问题传感器给检测结果带来的干扰信息,使得融合结果更加可靠。

# 目 录

前言 .....	(1)
创新点 .....	(1)
第1章 绪论 .....	(1)
1.1 课题背景及意义 .....	(1)
1.2 信息融合技术 .....	(2)
1.3 柴油机故障诊断技术 .....	(5)
1.4 本文主要研究工作 .....	(12)
第2章 柴油机的主要故障及监测 .....	(14)
2.1 引言 .....	(14)
2.2 柴油机主要结构系统及故障 .....	(14)
2.3 柴油机的典型监测信息 .....	(20)
2.4 本章小结 .....	(22)
第3章 柴油机信号的特征提取及融合加权 .....	(23)
3.1 引言 .....	(23)
3.2 振动信号的特征提取 .....	(23)
3.3 燃油压力波形的特征提取 .....	(25)
3.4 特征变量的融合加权 .....	(26)
3.5 本章小结 .....	(33)
第4章 融合距离田口法与加权马氏田口法的故障诊断 .....	(34)
4.1 引言 .....	(34)
4.2 融合距离田口法的故障诊断 .....	(35)
4.3 加权马氏田口法的故障诊断 .....	(58)
4.4 本章小结 .....	(68)
第5章 基于相关、冲突证据合成法的故障诊断 .....	(69)

5.1	引言 .....	(69)
5.2	证据理论的基本原理 .....	(69)
5.3	基于 D-S 证据理论的柴油机故障诊断 .....	(72)
5.4	相关证据的合成 .....	(77)
5.5	冲突证据的加权分配合成 .....	(80)
5.6	本章小结 .....	(84)
<b>第 6 章 基于信息融合的柴油机故障诊断仿真系统搭建</b>		
	<b>及模拟试验分析 .....</b>	<b>(85)</b>
6.1	引言 .....	(85)
6.2	基于信息融合的柴油机故障诊断仿真系统搭建 .....	(85)
6.3	柴油机故障模拟试验仿真 .....	(94)
6.4	试验结果及分析 .....	(96)
6.5	本章小结 .....	(118)
	<b>结论 .....</b>	<b>(120)</b>
	<b>参考文献 .....</b>	<b>(122)</b>
	<b>致谢 .....</b>	<b>(136)</b>
	<b>附录 .....</b>	<b>(138)</b>

# 第1章 绪 论

## 1.1 课题背景及意义

柴油机是一种典型的动力机械,在大型轮船、机械设备、动力牵引、发电及石油开采等领域<sup>[1]</sup>得到普遍应用。伴随工业自动化时代的到来,柴油机的性能不断得到完善,降低了能耗及生产成本,提高了生产率。但是,当其中某一部分产生故障时,就可能造成巨大的经济损失,甚至危及生命。1988年秦岭电厂的200MW柴油机发电机组出现严重断轴导致毁机事件<sup>[2]</sup>。另外,主柴油机系统是整个船舶的命脉,也是船舶机电系统和故障最多的部位。舰船若失去主动力,就意味着失去了战斗力。近年来,舰船主动力系统的重特大事故偶有发生,936舰和909舰(12PA6柴油机)曾发生连杆断裂,525舰和570舰(16PA6STC柴油机)曲轴出现事故,都造成了巨大的经济损失<sup>[3]</sup>。若能够预先发现故障并进行维修,便可以避免这些事故的发生。因此,有必要对柴油机的故障诊断技术进行深入研究,及时准确地发现故障,避免事故的发生和更大程度的经济损失。柴油机故障诊断依据历史监测信息,对当前的状态进行处理及分析,可解决故障的定量和定性诊断问题,并能对异常情况进行故障预测<sup>[4]</sup>。柴油机状态监测与维修经历了事后维修和定时检测阶段,并发展到了视情维修和智能维修<sup>[5]</sup>阶段。可见在柴油机运行初期发现和预测故障具有重要意义<sup>[6]</sup>。由于柴油机结构的复杂性,以及柴油机故障表现形式的复杂性,使得单一的传感器很难有效进行故障诊断,这就要用到多传感器的信息融合技术。因此,本文提出了基于信息融合的柴油机故障诊断方法研究,通过对多个传感器获得的信息进行融合处理,最终实现柴油机的故障诊断。具体原因如下:

(1) 柴油机结构复杂,运动部件多,运动形式复杂。各系统及部件之间

的关系复杂,相互影响。因此,柴油机出现异常时会表现出复杂的故障现象,柴油机故障具有不确定性、模糊性和多故障并发性<sup>[7]</sup>。而且,柴油机型号多,共性难以总结,适用于某一型号柴油机的监测方法和诊断结果,在另一型号上就有可能不适用。以上这些原因都导致单一传感器的监测结果不可靠。传感器一旦失灵或者有误差,就可能带来严重的后果。信息融合技术可充分利用各个传感器的信息进行综合判断,扩大了覆盖范围,从而增加了诊断的可信度,并能实现视情维修,减少了维修成本。

(2)柴油机运行中表现出的信息较多,例如振动噪声、气缸压力、燃油压力、转速、扭矩、功率和油液信息等<sup>[8]</sup>。这些信息都可以通过专门的传感器监测出来。丰富的监测信息必然会对诊断提供帮助。这样,便可深入挖掘柴油机的性能状态。另外,分布式的传感器系统降低了对单一传感器的性能依赖。在降低造价、减少监测成本的同时,提高了诊断的准确性和有效性。

综上所述,在柴油机故障诊断中,有必要引进信息融合技术。

## 1.2 信息融合技术

### 1.2.1 信息融合的概述

随着科技的进步,传感器的性能获得明显的改善,大量传感器开始涌入丰富的监测领域<sup>[9]</sup>。与此同时,多传感器信息融合技术作为一门新兴的学科得到了人们普遍的关注。信息融合的思想来源于人类和其他生物系统认知自然的过程。“盲人摸象”的故事告诉我们,单凭一种感官获得的信息难以对客观世界进行全面正确的认知。古人也曾说过:“兼听则明,偏信则暗”。人类和动物就是通过听觉、视觉、嗅觉、味觉、触觉等多种感官来获得多样的信息,然后经过大脑的处理形成一个完整的认知结论<sup>[10]</sup>,这其实就是一个适应力、学习力极强的信息融合系统。信息融合将多源信息进行综合分析,从而得到更为可靠的结果<sup>[11]</sup>。信息融合在有些书籍和资料中也叫数据融合,但由于信息不仅包括数据,同时也包括知识、信号、图像、波形、声音等其他信息,所以在这里用信息融合更为合理。

多传感器信息融合与经典的单传感器信息处理方法有着本质的区别,各种传感器提供的信息具有不同特征<sup>[12-13]</sup>,通过对传感器的合理配置,充分利用各个传感器的信息,最大程度上地获取被测目标或环境的有效信息。

按照融合的顺序,信息融合技术分为三个层次的融合<sup>[14]</sup>。

### (1) 数据层融合

为了尽可能多的保留原始信息,各传感器测得的数据不经过预处理,直接进行融合分析。这一层的融合信息损失小,融合精度高,但是计算量大,实时性和抗干扰能力差,属于低层次的融合<sup>[16]</sup>。如图 1-1 所示为数据层融合的结构图。

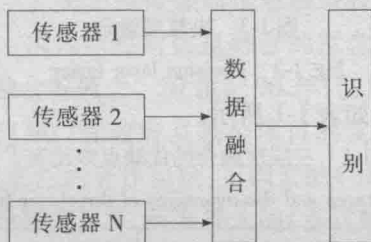


图 1-1 数据层融合

Fig. 1-1 Data layer fusion

### (2) 特征层融合

将多传感器信息进行特征提取,用特征信息代替传感器的测量数据进行融合<sup>[11]</sup>。特点是实时性优于数据层融合,实现了信息的压缩,但精度不如数据层融合<sup>[16]</sup>。如图 1-2 所示为特征层融合的结构图。

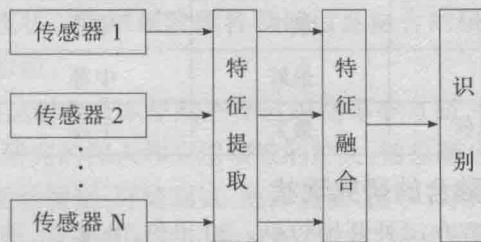


图 1-2 特征层融合

Fig. 1-2 Characteristics layer fusion

### (3) 决策层融合

对多传感器的数据进行处理,获得更高层次的决策和推论。最后进行决策级的融合,属于高层次的融合方式。各传感器在融合之前已完成分类及决策。融合过程只需按照可信度及指定的规则进行最优决策。这一层的容错性和实时性都很好,但信息量损失严重,精度低<sup>[17]</sup>。决策层融合如图 1-3 所示。

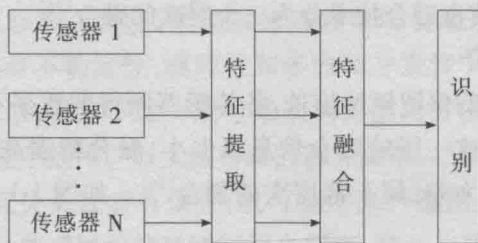


图 1-3 决策层融合

Fig. 1-3 Decision layer fusion

三层融合的优缺点如表 1-1 所示。

表 1-1 三层次融合的优缺点对比表<sup>[18]</sup>

Tab. 1-1 The advantages and disadvantages of threelayer fusion contrast table

	数据层融合	特征层融合	决策层融合
处理信息量	最大	中等	最小
信息量损失	最小	中等	最大
抗干扰能力	最差	中等	最好
容错能力	最差	中等	最好
算法难度	最难	中等	最易
融合前处理量	最小	中等	最大
融合能力	最好	中等	最差
对传感器的依赖性	最大	中等	最小

### 1.2.2 信息融合的研究现状

信息融合的研究在国外开始较早。20 世纪 70 年代,美国研究部门对多个独立的声呐信号进行融合,可自动实现潜艇位置的检测,对现代战争及和平具有重要的意义<sup>[19]</sup>。美国先后研制了几十个军用信息融合系统,典型的的就是战场管理和目标检测系统,它的产生更加验证了信息融合的有效性<sup>[20]</sup>。基于这些研究,信息融合理论技术备受青睐。美国国防部于 1988 年将信息融合列为重点研究的二十项关键技术之一<sup>[9,21]</sup>。为促进国际交流,1998 年美国成立了国际信息融合学会<sup>[11]</sup>,每年举办一次信息融合国际学术大会。为了对该领域的研究成果进行总结,美国创建了国际信息融合学会的会刊<sup>[22]</sup>,1985 年前后共有二十多部关于信息融合的专著<sup>[23]</sup>出版。Llinas 和

Waltz 的专著《多传感器数据融合》<sup>[24]</sup>及 Hall 的专著《多传感器数据融合中的数学技术》<sup>[13]</sup>系统详细地论述了信息融合理论。D. L. Hall 和 J. Llinas 的《多传感器数据融合手册》<sup>[9,25]</sup>对常用的数据融合算法进行了汇总和概括。Bar - Shalom 主编出版的《多传感器多目标方法与进展》<sup>[26]</sup>全面记录了信息融合在多目标跟踪方面的新思想。

信息融合的研究在国内开始较晚。20 世纪 80 年代,国内开始投入多目标跟踪技术的探索<sup>[11,27]</sup>。关于多传感器信息融合技术研究的报道<sup>[28]</sup>直到 80 年代末才陆续出现。国内当时对信息融合的概念理解不同,提出了数据合成、数据汇集、数据融合等概念。20 世纪 90 年代,信息融合才在国内得到高度重视。高校和研究部门在政府及基金项目的支持下,开始从事这一技术的研究<sup>[29]</sup>。具有代表性的著作包括:王国宏的《分布式检测、跟踪及异类传感器数据关联与引导研究》<sup>[30]</sup>、何友等人的《雷达数据处理及应用》<sup>[31]</sup>、张永生等人的《天基多源遥感信息融合》<sup>[32]</sup>、韩崇昭的《多源信息融合》<sup>[33]</sup>、胡来招的《无源定位》<sup>[34]</sup>等。信息融合在 20 世纪 90 年代中期已变成多方重视的关键技术,出现了态势评估<sup>[35]</sup>与威胁估计<sup>[36]</sup>、目标识别<sup>[37]</sup>与决策信息融合<sup>[38]</sup>、分布信息融合<sup>[39]</sup>、多传感器跟踪与定位<sup>[40]</sup>、分布检测融合<sup>[41]</sup>等热门领域的理论及应用研究。国内先后研制了大量有初步融合能力的信息融合系统和多目标跟踪系统。1995 年 5 月,我国国防科工委组织在长沙召开了有关信息融合的第一次研讨会,会上透漏了诸多问题,这次会议反映了我国信息融合的研究现状。我国现阶段各领域信息融合的研究进展缓慢,研究水平还处于初级阶段。

综上所述,信息融合技术早期主要运用在军事方面,技术长期处于封闭的状态<sup>[42]</sup>。随着研究的深入和应用领域的扩大,信息融合技术在工业控制、机器人<sup>[37]</sup>、空中交通管制、环境测试、海洋监视、医学和图像处理等领域也得到了发展<sup>[43]</sup>。但是,大量资料显示信息融合在故障诊断中的应用只是近几年的事情,尤其是在柴油机的故障诊断中,这方面的论文还比较少。可见,基于多传感器信息融合技术的柴油机故障诊断方法研究还处于初级阶段,具有很广阔的发展空间。

## 1.3 柴油机故障诊断技术

### 1.3.1 柴油机故障诊断的研究内容

柴油机故障诊断技术经历了几十年的研究发展。研究内容主要包括信

号的监测、信号的特征提取、故障诊断分析和故障处理及决策几个方面。具体如下:

### (1) 信号的监测

按照监测手段和获取信息的方式分为状态参数监测、油液监测、噪声监测和振动监测。

#### ① 状态参数监测

状态参数的变化直接反应了柴油机工作状态的变化。柴油机的主要状态指标有转速、功率、扭矩、油耗率、温度和压力等。柴油机的瞬时转速可用于监测柴油机各气缸工作的均衡性。柴油机缸内的其他压力直接反映了柴油机燃烧的状况和动力性能的好坏,通过气缸压力的变化可对柴油机各缸的工作状态进行评价。柴油机的排放参数也是判断柴油机燃烧情况的重要指标。状态参数比较直观,获取信息最为原始。当出现参数异常时,可通过调节参数恢复柴油机的正常工作。缺点是容易受到监测环境和测试条件的影响,如果引起异常的原因是零部件的损坏,则需要专家根据参数来判断故障出现的部位。

#### ② 油液监测

柴油机在运行中,即使各个运动副都处于优良的润滑状态,也无法避免产生磨损和摩擦热。温度的上升不但使得润滑油性能下降,而且融入了很多的磨损产物,即金属磨粒。因此,这些残留在润滑油中的金属磨粒就成了摩擦副运转的状态信息,定期对其中的金属磨粒的成分和含量进行分析,就可以对设备内部磨损部位和磨损程度做出判断。当今采用的方法主要有光谱分析、铁谱分析、红外光谱、油品分析、颗粒计数器法等。油液监测是一种有效、直观的监测方法。油液分析法适用于以磨损为主要失效形式的故障诊断。

#### ③ 噪声监测

柴油机运转时的噪声比较多,包括机构件振动声,如机箱盖振动噪声;包括摩擦产生的噪声,如轴承、齿轮等摩擦副发出的声音;包括气流声,如燃烧噪声、排气管噪声等。噪声信号一般采用噪声听诊器或者专门的噪声检测仪进行采集。该方法受到试验条件的限制,对测试环境要求严格,对大功率柴油机和大型机械的声信号监测诊断研究并不多见。

#### ④ 振动监测

振动是柴油机在运转过程中必然产生的现象。振动信号包含了丰富的

设备运行状态信息,柴油机工作性能的变化可以通过振动信号表现出来。并且,振动信号的采集和分析不影响柴油机的正常运转,不用拆卸机器,通过柴油机缸盖表面的振动信号便可识别柴油机的运行状态。相比油液分析和噪声分析等监测方法,振动信息容易获得且不易受外界干扰,因此得到了广泛的使用。但是,目前振动信号的监测诊断方法还处于实验室的研究阶段,距离实际应用还有一定的距离。

可见,如果能够合理利用各种监测方法的特点,并加以融合分析,便能更加准确地探索柴油机的运行状态。

### (2) 信号的特征提取

柴油机运转时产生的信号数据往往与故障征兆存在着对应关系。然而,直接监测的信号大都是随机的信号,其中包含了大量与故障无关的信息<sup>[44]</sup>。因此,要对监测出来的信息进行特征的提取,把能够反映故障特征的信息与故障无关的信息分离开来<sup>[44]</sup>,提取出对故障分析有帮助的特征信息。特征提取的方法包括时域分析、频域分析、幅域分析、统计分析、小波分析等等。

### (3) 故障诊断分析

柴油机故障诊断分析方法分为三大类:基于模型的故障诊断、基于知识的故障诊断<sup>[45]</sup>和基于信号处理的故障诊断<sup>[46]</sup>。

#### ① 基于模型的故障诊断

在明确柴油机运转的数学模型基础上,按照数学方法对被测信号进行诊断。该方法主要分为参数估计法、状态估计法、等价空间法<sup>[47]</sup>。由于柴油机运转过程复杂多变,建立数学模型实属困难,这就大大限制了基于模型的故障诊断方法的使用效果和使用范围。

#### ② 基于知识的故障诊断

基于人工智能学科,将专家知识库运用到柴油机故障诊断中<sup>[13]</sup>,知识库是从相关资料、专业著作、长期从事该领域专家的经验中提取出来的。该方法要求知识库有自主学习能力,能根据实际需求不断修改错误知识,扩充新知识。基于知识的故障诊断包括神经网络、故障树、专家系统和模糊诊断法等<sup>[48]</sup>。

#### ③ 基于信号处理的故障诊断

基于信号处理的故障诊断是利用柴油机运转时的信号数据来进行诊断的方法。随着研究的深入和测量仪器的进步,该方法具有很强的生命力和

很高的准确性<sup>[49]</sup>。

#### (4) 故障决策及处理

根据故障决策分析结果,提出故障的处理方案。

### 1.3.2 基于信息融合的柴油机故障诊断方法综述

柴油机是一种复杂的动力设备,具有非平稳、非线性的激励和响应。它的结构复杂,运动部件多,包含众多系统。例如,进排气系统、燃烧系统、曲轴连杆机构、冷却系统、润滑系统等等<sup>[50]</sup>。各系统之间关系复杂,相互影响,单一的传感器很难准确全面的进行故障诊断,这就要采用多传感器的信息进行综合判断。信息融合故障诊断其实就是将不同传感器的监测信息进行特征提取,并把这些特征信息融合后作为不同的故障类型数据,将这些故障类型数据归入不同的故障集合中,这其实就是故障的聚类问题。如果聚类结果在故障集合中,给出诊断结果;若不在故障集合中,则要提出这些数据属于某种故障集合的可能性,即进行故障的决策分析。

常用于柴油机故障诊断中的信息融合方法有贝叶斯理论、专家系统、聚类方法、神经网络和 D-S 证据理论等方法。

#### (1) 贝叶斯理论

贝叶斯理论是根据先验概率和条件概率来计算特定输出后验概率的推理技术<sup>[51]</sup>。贝叶斯理论假设存在一组互不相容(并且完备)的  $D$  个假设,通过贝叶斯公式推导出某种给定结论的概率。因此,在柴油机故障诊断中,贝叶斯理论可以将不同传感器的监测信息相融合。冯静利用贝叶斯理论进行信息融合时,提出一种基于最大熵距估计的多源信息融合方法<sup>[52]</sup>。仝兆景采用贝叶斯网络构建了柴油机的故障诊断模型,实现了特定工况下故障原因征兆的因果推导<sup>[53]</sup>。王鑫提出了贝叶斯与遗传神经网络相融合的柴油机故障诊断研究,并在 WD615 柴油机上进行了试验监测<sup>[54]</sup>。

贝叶斯理论可以实现故障的定量诊断。但是,使用贝叶斯理论的一个重要问题就是选择合适的先验概率和条件概率。这些数据的选择对诊断结果有很大影响,而这些前提条件通常情况下是凭经验和有限的试验数据来判断的,在实际应用中对试验要求比较高,试验成本比较大。所以,若在试验条件有限的情况下,还可以根据专家知识来决定这些值的大小<sup>[55]</sup>。

#### (2) 专家系统

专家系统是具有专业领域知识,能够像人类专家一样解决特定领域问题的一类知识系统。这样,只要利用专家知识建立不同传感器的监测信息

与柴油机的故障征兆信息之间的关系库,便可以实现故障诊断。利用的专家系统在柴油机故障诊断中已经获得了一定程度的应用。鄂加强利用多库多层次的方式建立知识库来表达柴油机故障诊断知识,预报准确率较高,取得了较强的实用性<sup>[56]</sup>。任长合针对船用 PA6 柴油机,构建了状态监测与故障诊断专家系统,并开发了友好操作界面,在 PA6 柴油机上得到了很好的应用<sup>[57]</sup>。臧军结合船舶柴油机历史数据和实时监测数据,开发了船舶柴油机故障诊断专家系统,该系统从根据推理模型,显示故障的可能原因,并提出维修建议<sup>[58]</sup>。

专家系统大大提升了故障诊断的工作效能,相当于普及了无数个人类专家。但是,目前的专家系统在知识获取和不精确推理方面还远远不如人类专家。专家系统适用于处理比较成熟常见的、固定处理模式的问题。对于柴油机这种型号多样、结构功能和故障形式复杂的系统,专家系统还不能给出统一的评判标准,知识库有待进一步的完善。针对以上问题,聚类算法、神经网络和 D-S 证据理论显示出了它们在柴油机故障诊断中的普适性优点。

### (3) 聚类方法

#### ① 马氏距离聚类法

对于故障诊断问题,实质上就是聚类问题,且考虑的是特征变量之间的关系,因此属于特征层的融合聚类问题。对于聚类问题,计算不同故障类型特征变量之间的距离是一种有效的方法。若距离在某种故障阈值之内,则诊断为该种故障。计算距离的常用的方法有欧氏距离和马氏距离。欧氏距离认为特征变量之间是完全独立的,所计算的距离是点到点的直线距离;而马氏距离的计算考虑了特征变量之间的相关性。周鑫利用欧氏距离和支持向量机理论,提出了基于欧氏距离二叉树向量机的变压器故障诊断研究,该方法具有较高的分类准确率,并能够有效地减少故障诊断时误差累积现象<sup>[59]</sup>。黄亮基于马氏距离聚类分析,提出了模拟电路故障分析与诊断的方法,验证了马氏距离仅需少量样本即可获得模拟电路各种状态的典型参数,并能进行客观有效地故障诊断<sup>[60]</sup>。王旭平针对非平稳的机缸盖振动信号,采用马氏距离判别函数进行气阀机构故障诊断,试验结果表明该方法对未知样本的识别率和分类速度都很高<sup>[61]</sup>。辛龙针对航空装备的故障判别问题,提出了一种基于马氏距离的故障预测方法,并将该法用于某型飞机火控系统的故障预测中,使得离线和在线故障预测准确率分别达到 97.77% 和