

排烟风机信息融合故障诊断 方法与系统研究

阳小燕 周雄 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

排烟风机信息融合故障诊断 方法与系统研究

阳小燕 周 雄 编著

北 京

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书综合运用信息融合理论、提升小波信号预处理及特征提取方法、盲源分离故障诊断方法、BP-ART2 神经网络故障诊断、多专家协同诊断等先进理论和算法,对多传感器信息在多层结构上进行多诊断方法的信息融合,并在理论研究的基础上,开发了排烟风机运行状态监测与故障诊断微机集中式和 DSP 分布式两种监测与故障诊断系统,实现了排烟风机的有效故障诊断。

本书可供从事排烟风机或大型旋转机械状态监测、故障诊断等方面理论研究和系统开发的学者与相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

排烟风机信息融合故障诊断方法与系统研究/阳小燕,
周雄编著. —北京:冶金工业出版社,2013.8

ISBN 978-7-5024-6419-6

I. ①排… II. ①阳… ②周… III. ①烟气排放—
风机—故障诊断—研究 IV. ①TH4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 241985 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 陈慰萍 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6419-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京首善印刷厂印刷

2013 年 8 月第 1 版,2013 年 8 月第 1 次印刷

148mm×210mm;5.125 印张;151 千字;154 页

25.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)



前 言

排烟风机广泛应用于冶金、建筑、化工、发电等大型企业，是国民经济建设中不可缺少的关键设备。排烟风机的运行环境恶劣，在其状态检测、故障特征分析以及故障诊断时存在更多的复杂性与不确定性，因此，对其故障诊断方法的研究具有重要意义。本书研究了信息融合理论、提升小波信号预处理及特征提取方法、盲源分离故障诊断方法、BP-ART2 神经网络故障诊断、多专家协同诊断理论等先进理论和算法，对多传感器信息在多层结构上进行多诊断方法的信息融合，并在理论研究的基础上，开发了排烟风机运行状态监测与故障诊断微机集中式和 DSP 分布式两种监测与故障诊断系统，实现排烟风机有效的故障诊断。

本书可作为从事排烟风机或大型旋转机械状态监测、故障诊断等方面理论研究、系统开发、设备维护的学者与相关工程技术人员参考书。

项目在研究与开发过程中，得到了研究团队的大力支持，在此感谢中南大学刘义伦教授、周国荣教授，湖南科技大学李学军教授、王广斌博士，武汉科技大学金晓宏教授，重庆科技学院唐一科教授。此外，作者在编写过程中，参阅了大量的有关文献，在此向有关人士一并致谢。

由于编者水平所限，书中的错误与不妥之处，敬请各位读者批评指正，更望各位同行不吝赐教。

编著者
2013 年 8 月

符号说明

- FFT——Fast Fourier Transform, 傅里叶变换
- STFT——Short-Time Fourier Transform, 短时傅里叶变换
- MRA——Multi Resolution Analysis, 多分辨率分析
- WT——Wavelet Transform, 小波变换
- LS——Lifting Scheme, 提升格式
- LWT——Lifting Wavelet Transform, 提升小波变换
- ANN——Artificial Neural Networks, 人工智能神经网络
- BP——Back Propagation, 反馈神经网络
- ART——Adaptive Resonance Theory, 自适应共振理论
- ES——Expert System, 专家系统
- BSS——Blind Sources Separation, 盲源分离
- ICA——Independent Component Analysis, 独立分量分析
- PCA——Principal Components Analysis, 主成分分析
- SVD——Singular Value Decomposition, 奇异值分析
- D-S——Dempster-Shafer Evidential Theory, D-S 证据推理
- DSP——Digital Signal Processor, 数字信号处理器
- CPLD——Complex Programmable Logic Device, 可编程逻辑器
- CAN——Controller Area Network, CAN 总线网络

目 录

1 绪论	1
1.1 机械故障诊断的发展与现状	1
1.1.1 国内外研究现状	2
1.1.2 故障诊断技术的发展趋势	3
1.2 故障诊断方法与技术概述	4
1.2.1 信息融合故障诊断	4
1.2.2 信号预处理技术	10
1.2.3 神经网络故障诊断	13
1.2.4 盲源分离故障诊断	17
1.2.5 故障诊断专家系统	19
1.3 本书的研究意义与应用前景	21
1.4 本书的主要内容与结构安排	22
2 自适应提升小波信号处理方法研究	25
2.1 排烟风机信号预处理问题的提出	25
2.2 小波去噪阈值函数设计	26
2.2.1 现有阈值函数分析	26
2.2.2 本书设计的改进阈值函数	27
2.2.3 阈值函数去噪性能比较	28
2.3 提升小波自适应去噪算法研究	32
2.3.1 信号局部特征的时域估计方法设计	33
2.3.2 基于信号局部特征的小波函数选择	34
2.3.3 信号突变点的平滑递变阶次提升小波函数设计	37
2.3.4 基于信号局部特征的自适应小波阈值选择	39
2.3.5 仿真与实验	39
2.4 信号频域特征的小波消混校正方法设计	40

2.4.1	小波分析的频域特征提取	40
2.4.2	小波分解中频率混淆的校正方法设计	41
2.4.3	消除小波分析频率混淆算法设计	43
2.4.4	小波混频改进算法应用	45
2.5	本章小结	47
3	动态故障源数估计的自适应盲源分离方法研究	48
3.1	数据层融合诊断问题的提出	48
3.2	动态故障源的源数估计算法研究	49
3.2.1	现有信号源数估计方法	49
3.2.2	基于拓展四阶累积量矩阵与奇异值分解的 源数估计算法研究	53
3.2.3	拓展四阶累积量矩阵源数估计实验	56
3.3	基于动态故障源数估计的自适应盲源分离算法研究	59
3.3.1	基于主元分析的超定盲源分离算法	59
3.3.2	基于稀疏元分析的欠定盲源分离算法	60
3.3.3	自适应盲源分离算法	63
3.4	盲源分离实验分析	65
3.5	本章小结	67
4	综合 BP 与 ART2 网络的改进型神经网络故障 诊断方法研究	69
4.1	神经网络故障诊断的不足	69
4.2	改进型 BP-ART2 神经网络设计	70
4.2.1	引入非线性映射的 BP-ART2 神经网络结构设计	70
4.2.2	ART2 神经网络自适应警戒参数与聚类设计	72
4.3	改进型 BP-ART2 神经网络故障诊断系统的计算方法	74
4.3.1	参数及权值初始化	74
4.3.2	训练过程的计算步骤	74
4.3.3	诊断过程计算步骤	76
4.4	实验分析	76

4.5 本章小结	79
5 黑板型多专家机电融合故障诊断方法研究	81
5.1 多专家诊断问题的提出	81
5.2 排烟风机故障诊断的黑板型多专家融合系统结构设计	82
5.3 黑板型多专家机电融合诊断方法研究	86
5.3.1 排烟风机机电融合诊断方法研究	86
5.3.2 多专家机电信息融合诊断算法	97
5.4 实验与诊断	99
5.5 本章小结	102
6 多传感器与多诊断方法的决策融合诊断	104
6.1 排烟风机全局决策融合诊断结构设计	104
6.2 多传感器加权激励融合诊断方法研究	105
6.2.1 多传感器之间的相关加权系数设计	106
6.2.2 不同位置传感器在融合诊断中的权重设计	107
6.2.3 多传感器加权系数的激励	108
6.2.4 多传感器两两加权激励的综合融合	108
6.2.5 多传感器加权激励融合诊断步骤	108
6.3 多诊断方法局部诊断结果的决策融合设计	109
6.3.1 决策融合规则	109
6.3.2 排烟风机故障诊断决策融合算法设计	110
6.4 决策融合实验与诊断	111
6.4.1 对两两传感器加权激励融合	111
6.4.2 多局部诊断方法的决策融合	113
6.5 本章小结	114
7 排烟风机状态监测与故障诊断系统设计	116
7.1 排烟风机监测点与传感器设置	116
7.2 微机集中监测式与 DSP 分布式监测系统硬件设计	118
7.2.1 微机集中监测与故障诊断系统	118

7.2.2 DSP 分布式实时监测与故障诊断系统	120
7.3 排烟风机监测与故障诊断系统软件设计	126
7.3.1 微机集中监测系统数据采集软件设计	126
7.3.2 DSP 分布式监测系统软件设计	129
7.3.3 上位机监测与管理软件设计	132
7.4 系统调试与现场应用实例	133
7.4.1 系统分析、设计与调试	133
7.4.2 现场应用实例	138
7.5 本章小结	143
参考文献	145

1 绪 论

1.1 机械故障诊断的发展与现状

随着科学技术的发展,机械设备越来越复杂,自动化水平越来越高,设备在现代工业生产中的作用和影响越来越大。设备在运行中一旦发生故障或失效,轻则会造成一定程度的经济损失,重则会导致灾难性的人员伤亡和恶劣的社会影响。

历史上由于设备发生故障而造成的灾难性事故很多^[1~6]。在国外,1972年日本关西电力公司南海电厂3号机组600MW汽轮发电机因振动幅度过大引起严重的断轴毁机事件;1979年美国三里岛核电站由于错误判断和操作,导致核反应堆堆芯严重损坏,放射性物质泄漏,造成了几十亿美元的经济损失;1984年印度博帕尔的碳化物公司农药厂毒气泄漏,造成2000多人死亡、20多万人受害的空前工业灾难;1986年美国挑战者号航天飞机在发射升空后由于火箭系统出现故障,飞机爆炸失事,机毁人亡,损失达12亿美元;1986年苏联切尔诺贝利核电站爆炸,泄漏放射性物质,造成2000余人死亡,数万居民背井离乡,损失达30亿美元,核污染后果至今犹存。1992年德国Wilmersdorf电厂一台83.6MW的发电机发生事故,并引起氢气爆炸造成火灾,直接经济损失2000万马克。在国内,1985年大同电厂、1988年秦岭电厂发电机组先后发生事故,直接经济损失高达1亿元人民币;1990年荆门炼油厂烟机转子开裂报废,损失达1000万元以上;1998年华北电网出现同时5台200MW以上的大型汽轮发电机组由于振动原因导致停机检修的事件,造成严重影响华北地区工业生产的紧急局面;2005年中石油吉林石化公司双苯厂发生爆炸,导致松花江水质污染,严重威胁沿江人们的生活。这些血泪教训促使人们在故障诊断方面进行了大量的研究,形成了机械设备故障诊断的新兴研究领域。

国内外许多研究资料表明,开展故障诊断工作所取得的经济效益非常显著。日本采用故障诊断技术之后,事故率减少了75%,维修费用降低了25%~50%;英国对2000多个大型企业开展了故障诊断工作之后,每年节省维修费用3亿英镑,而用于故障诊断的费用仅为0.5亿英镑;在我国,冶金行业每年用于设备维修的费用达250亿元,若推广故障诊断技术,则每年可以减少事故50%~70%,节约维修费用10%~30%。据专家统计分析,开展故障诊断技术工作的投入产出比约为1:17。因此,对现代生产企业中的大型关键设备开展故障诊断工作,及时处理设备运行中出现的故障,保障企业安全可靠地生产,不仅可以取得巨大的经济效益,而且还具有深远的社会意义。

1.1.1 国内外研究现状

自20世纪60年代开始,国外很多机构和学者就开始对故障诊断进行广泛的研究^[7~19]。1967年美国国家宇航局(NASA)成立美国机械故障预防小组MFPG(Mechanical Fault Prevention Group)。70年代英国成立了机械健康监测中心(Mechanical Health Monitoring Center),该中心在20世纪80年代在发展和推广设备诊断技术方面做了大量工作,起到了积极作用。20世纪80年代,曼彻斯特大学的沃福森工业维修公司(WIMU)开始故障诊断技术的研究。具有工厂实践经验的涡轮机械故障机理的权威John Sohre于1968年发表的论文《高速涡轮机械运行问题的起因和治理》,清晰简洁地描述了典型的机械故障征兆及其可能成因,并将典型的故障划分为9类37种。日本的故障诊断专家白木万博自20世纪60年代以来发表了大量的故障诊断文章,积累了丰富的现场故障处理经验,并进行了理论分析。自20世纪90年代以来,Bently公司在转子动力学、旋转机械的故障机理以及振动监测方面研究比较深入。IRD公司的故障预防性维修技术、瑞典SPM仪器公司的轴承监测装置、丹麦B&K公司的回转机械监测仪和声发射技术、挪威的船舶诊断技术、德国ALLIANTECHNIC研究所的故障机理分析等处于国际领先地位。大量面向大型机械设备状态监测与故障诊断的商品化系统不断研发成功,如美国GE公司研

制的用于内燃电力机车故障排除的专家系统 DELTA；美国西屋电器公司（West House Electronic Corporation）的汽轮发电机组智能化故障诊断系统；美国 Bently 公司的数据管理系统 Data Manager 2000、状态监测系统 Machine Condition Manager 2000 和趋势分析系统 Trendmaster 2000；美国 Rockwell Automation Entek 公司的机器保护和诊断系统 XM 系列和 Emonitor 软件系列产品；法国 C. G. E 研究中心 Marcoussis 实验室开发的旋转机故障诊断专家系统 DIVA；荷兰 Philips 公司的状态监测系统 R3000；丹麦 B&K 公司推出的状态监测与故障诊断系统 B&K3450-CONPASS；日本 Mitsubishi 公司研制的机械状态监测与振动诊断专家系统 NHNS；荷兰菲利普公司的 RMS700 系列 TSI 等。

我国在故障诊断技术方面的研究开展得比较晚，它是在 20 世纪 70 年代在引进国外先进技术的基础上，通过消化、吸收、创新发展起来的。其发展过程经历了 3 个阶段：第一阶段是 20 世纪 70 年代初期到 80 年代初期，当时主要是在引进和消化吸收先进技术的基础上，研究各种机械设备的故障机理、诊断方法以及简便的监测与诊断技术，进入初步实践阶段。第二阶段为 20 世纪 80 年代，此阶段主要是总结经验，探索新的诊断理论和方法，开发研制自己的在线监测与故障诊断装置。第三阶段是 20 世纪 80 年代后期至今，在此阶段形成了具有我国特色的故障诊断理论。近年来有很多工矿企业、科研单位和大院校积极开展设备诊断技术的理论研究、生产应用等工作，研制出满足工程需求的监测诊断系统和设备，开发出专用的诊断软件^[20~30]，如：西安交通大学的 RMDS 系统和 RD-20 系统、华中科技大学研制开发的基于知识的发动机诊断系统 KBSED、哈尔滨工业大学研制开发的大型旋转机械故障诊断系统 ETHYLENE、清华大学研制的旋转机械故障诊断系统、西北工业大学的 MD3905 系统、重庆大学 CDMS 系统、郑州工学院的 MMDS2000 系统、北京英华达公司的 EN8000 系统、深圳创为实公司的 S8000 系统、北京伊麦特公司开发的 EMD6000 系列等。

1.1.2 故障诊断技术的发展趋势

机械故障诊断技术不断与前沿科学相结合，不断提高传感器与检

测仪器的性能,发展信号分析与故障诊断水平,实现故障诊断的集成化与智能化。

(1) 随着新的信号处理方法在设备故障诊断领域中的应用,克服传统傅里叶变换的信号分析技术对信号平稳性能的限制,采用新的信号处理方法如小波变换、提升小波变换、高阶统计量分析等,更好地对非线性、时变、非平稳信号进行去噪处理,更好地提取信号特征信息。

(2) 多传感器信息融合。现代大生产要求对设备进行全方位、多角度的监测与维护,以便对设备的运行状态有整体的、全方面的了解,因此,在进行设备故障诊断时,采用多个传感器同时对设备的各个部位进行监测,并按照一定的方法将这些信息进行融合,从而提高系统故障诊断率。对排烟风机而言,机械与电气信息融合、振动与温度等工艺参数信息融合、时域与频域信息融合、不同空间位置测点的信息融合可以更有效地提高系统的故障诊断性能。

(3) 现代智能诊断方法的融合。现代智能方法如神经网络、专家系统、盲源分离等在设备故障诊断技术中已得到广泛的应用。随着各种信号处理方法的不断发展,设备状态的智能监测和设备故障的智能诊断成为故障诊断技术发展的目标。

本书针对排烟风机的结构特点以及恶劣运行环境的干扰,从多传感器信息融合的多个层面上开展多诊断方法的综合故障诊断,研究信号预处理方法、多传感器的信息融合诊断以及多种诊断方法的综合诊断,从而提高恶劣环境下的排烟风机故障诊断的准确性。

1.2 故障诊断方法与技术概述

1.2.1 信息融合故障诊断

1.2.1.1 国内外研究现状

信息融合是近年来目标识别和故障诊断等领域的研究热点。信息融合是充分利用不同时间与空间的多种信息资源,采用计算机技术对按时序获得的观测信息在一定准则下加以自动分析、综合、支配和使用,获得对被测对象的一致性解释与描述,以完成所需的决策和估计

任务,使系统获得比各组成部分更优越的性能^[31~34]。1973年美国提出“数据融合”概念,引起各军事强国的重视。美国国防部在20世纪70年代开始组织融合技术的研究,1984年成立了数据融合专家组(DFS),指导、组织并协调该技术的系统性研究。1988年,美国国防部将信息融合技术列为20世纪90年代重点开发的20项关键技术之一,并取得了一定的研究成果,开发了一系列C³I系统^[35~41]。20世纪80年代,英、法、德等国在这方面的研究工作也十分活跃,英国陆军开发了炮兵智能信息融合系统(AIDD)、机动和控制系统(WAVELL)等,并提出研制“海军知识库作战指挥系统”,并于1987年与联邦德国等欧洲五国制定了联合开展“具有决策控制的多传感器信号与知识综合系统(SKIDS)”的研究计划;汤姆逊公司将信息融合技术应用于MARTHA防空指挥控制系统中;德国在“豹2”坦克的改进计划中采用信息融合、人工智能等关键技术。在1991年海湾战争中,美国和多国部队使用的陆军机动控制系统(MCS)、海军战术数据系统(NTDS)、联合监视、目标攻击雷达系统(J-STARS)等是在机动平台上安装多类传感器数据融合系统并成功应用的实例。因此,在海湾战争结束后美国国防部更加重视信息自动综合处理技术的研究,在C³I中增加了计算机,建立以信息融合中心为核心的C⁴I,该技术已在1999年的科索沃战争和2002年的阿富汗战争中相继发挥了重大的作用。各国的军方、跨国公司、科研院所纷纷建立了各自的实验系统,如波音公司建立的传感器数据融合分析实验台,用于开发和评估环境、仿真、跟踪、显示、分析;George Masson大学模块融合实验系统,对公共环境中不同多传感器融合方法进行比较,开发传感器融合管理算法。

在学术方面,美国于1984年成立了数据融合专家组,从1988年起美国三军每年联合召开一次信息融合学术会议,并通过SPIE发表有关论文;从1998年开始,由NASA艾姆斯氏试验研究中心、美国陆军研究部、IEEE信号处理学会、IEEE控制系统学会、IEEE宇航和电子系统学会每年召开一次信息融合国际会议,使全世界有关学者都能及时了解和掌握信息融合技术发展的新动向,促进了信息融合技术的发展。从20世纪70年代开始,很多学者致力于研究多传感器数

据融合的理论、方法以及应用,形成了一系列系统的融合结构、算法,在战场多传感器信息融合、目标识别以及工业应用如故障诊断等方面取得了很好的成果^[36~43],如 E. L. Waltz、P. Grossmann 研究了多传感器融合理论, R. C. Luo 研究了多传感器集成融合与智能系统设计, D. L. Hall、R. Mamlook 研究了多传感器融合算法。

我国在这方面的研究起步较晚,直到 20 世纪 80 年代初才开始信息融合理论与应用的研究。国防科工委在“八五”6A 预研项目中设立“C³I 数据汇集技术研究”课题,而后各国防工业研究所和科研院校纷纷起步,开始广泛开展对信息融合在军事和工业中的研究。20 世纪 80 年代末至 90 年初掀起了信息融合的研究高潮,在理论和应用研究上取得一定的成果^[42~53]。例如,戴箴研究了 C³I 中的多传感器数据融合技术;赵宗贵、耿立贤等研究了三军联合作战 C³I 中的数据融合方法;杨杰、陆正刚等研究了多传感器数据融合的目标识别和跟踪。在机械故障诊断领域,屈梁生、袁小勇、张彦铎、晋风华、李录平、谭逢友等人研究了多传感器信息融合在机械故障诊断中的应用;陈进、伍星等人研究了信息融合在机械设备早期故障的识别诊断的应用。

1.2.1.2 信息融合的层次结构

多传感器数据融合分为三个层次:数据层、特征层和决策层。

(1) 数据层融合。如图 1-1 所示,数据层融合首先对各传感器的原始测量信息进行正确地关联和配准,然后进行融合以获取品质更高的信息,继而基于融合传感器数据进行特征提取和身份估计。数据层融合包括多传感器系统上反映的直接数据以及必要的预处理过程,如信号滤波、各种谱分析、小波分析等。

数据层融合目标识别的层次最低,信息损失最少,在数据关联和配准正确的情况下,准确性最高。但它也有很大的局限性:

1) 处理的信息量最大,相对于其他层次的融合,对通信带宽和

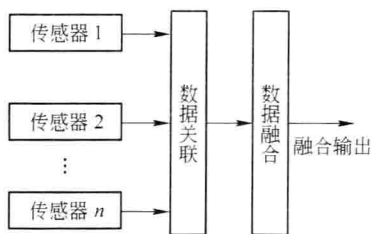


图 1-1 数据层信息融合结构

计算机等资源的要求较高。

2) 处理的对象是原始数据,而不是本质信息,因此受环境等因素的影响较大。

3) 数据层融合对参与融合的数据配准关系要求较高。

(2) 特征层融合。如图 1-2 所示,在特征层融合目标识别中,各传感器观测同一个目标并进行特征提取以获得来自每个传感器的特征向量,然后融合特征向量

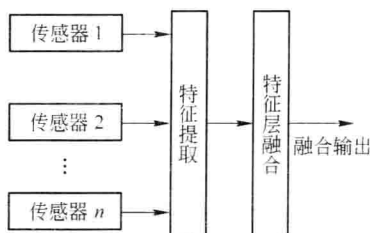


图 1-2 特征层信息融合结构

并根据获得的联合特征矢量来估计识别。特征层融合包括对数据层融合的结果进行有效的决策,对应各种故障的一般诊断方法。

特征层融合识别是数据层融合与决策层融合的折中形式,对数据配准要求不如数据层融合那样严格,信息损失、对通信带宽和计算机等资源的要求处于数据层融合和决策层融合之间,既保留了足够数量的重要信息,又实现了可观的信息压缩,参与融合的传感器可以是异质传感器,具有较大的灵活性。

(3) 决策层融合。如图 1-3 所示,决策层融合是各传感器都完成变换以便获得独立的目标估计,然后再对来自每个传感器的属性分类进行融合,融合中心对各传感器识别结果进行融合前同样需要进行关联处理,以保证参与融合的结果来自同一个目标。决策层融合对同一目标不同类型的传感器数据进行处理,包括特征提取、识别,然后通过关联处理、决策层融合判决,从而获得联合推断结果。

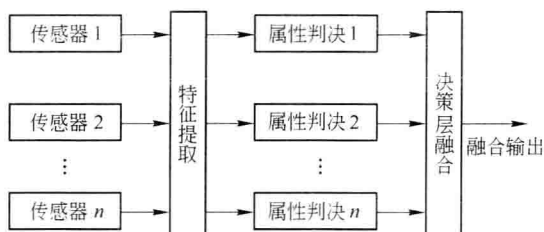


图 1-3 决策层信息融合结构

决策层融合是最高层次的融合,对信息处理具有很高的灵活性,能有效地反映环境或目标各个侧面的不同类型信息。决策层融合对传感器的依赖性小,参与融合的传感器可以是同质的,也可以是异质的,而且可以处理异步信息,但相对来说,决策层融合的信息损失量最大。

在信息融合的三个层次中,数据层的融合精度最高,决策层的融合精度最低,但数据层的融合由于要处理大量的数据对系统的实时性有影响。在实际的融合诊断系统中,根据实际应用的需要,综合考虑,选择其中一种或者混合式的融合结构。

在本书中,作者从各个层次研究排烟风机信息融合故障诊断的方法,从不同层次和侧面分析信号,从而提高系统诊断准确性。在数据预处理采用基于时域的提升小波信号处理方法,在数据融合层采用盲源分离方法实现多故障的时域诊断;在特征融合层采用改进的 ART 神经网络故障诊断方法和黑板型多专家机电融合故障诊断方法;在决策融合层采用多传感器加权激励融合诊断与多诊断方法的决策融合。通过在多个融合层次采用多种融合方法进行故障诊断,从而提高系统的故障诊断率。

1.2.1.3 信息融合方法

数据层融合方法主要有加权平均、卡尔曼滤波、贝叶斯估计、统计决策、小波变换、遗传算法等;特征层融合方法主要有簇算法、模式识别、统计分析、神经网络、小波变换等;决策层融合方法主要有贝叶斯估计、D-S 证据推理理论、聚类分析、模糊集合论、神经网络和产生式规则等。

(1) 加权平均是最简单、最直观的融合多传感器底层数据的方法。它将一组传感器提供的冗余信息进行加权平均,将结果作为信息融合值^[54]。

(2) 卡尔曼滤波采用测量模型的统计特性递推决定在统计意义下是最优的融合数据估计。如果系统具有线性的动力学模型,且系统噪声和传感器噪声是高斯分布白噪声模型,则卡尔曼滤波为融合数据提供唯一的统计意义下的最优估计。

(3) 贝叶斯估计是融合静态环境中多传感器底层信息的一种常