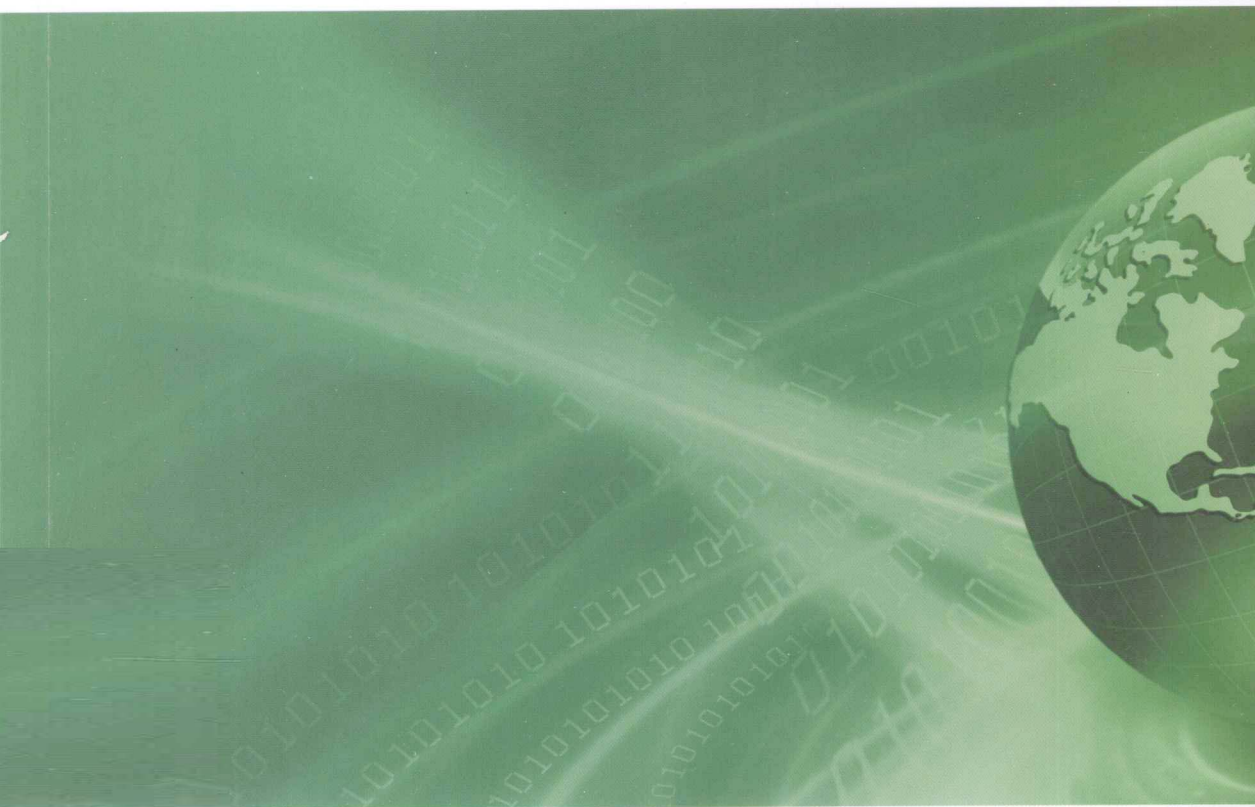


沈怀荣 杨 露 周伟静 著
彭 颖 余国浩

信息融合故障诊断技术



 科学出版社

信息融合故障诊断技术

沈怀荣 杨 露 周伟静 著
彭 颖 余国浩

科学出版社

内 容 简 介

信息采集、分发、传输、处理、应用等软硬件技术的深入发展,为充分利用数据的相关性、冗余性和互补性进行大型复杂系统的多源信息融合故障诊断提供了理论和技术基础。本书在多年信息融合故障诊断技术研究与应用实践的基础上,以运载火箭和战略导弹控制系统的快速故障诊断为应用背景,分析总结并给出特征层和决策层信息融合方法、故障分析关键技术以及系统实现案例等。本书内容主要包括故障信息仿真技术、故障特征提取技术、故障特征信息融合技术、故障决策信息融合技术、信息融合故障诊断平台设计与实现技术等。

本书适用于从事大型复杂系统信息融合故障诊断系统设计、系统测试分析建模、故障诊断与应用等的工程技术人员,也可供相关专业高年级本科生或研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

信息融合故障诊断技术/沈怀荣等著. —北京:科学出版社, 2013
ISBN 978-7-03-037791-3

I. ①信… II. ①沈… III. ①信息融合—故障诊断—研究 IV. ①G202

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 124120 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:宣慧
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张:21 3/4

字数:422 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

信息融合故障诊断技术是在信号处理、模式识别、人工智能等领域中信息融合技术基础上发展起来的一门综合性的新型故障诊断技术。信息融合是一种信息的自动综合处理方法,通常分为数据层融合、特征层融合和决策层融合三个层次。数据层融合是对传感器原始数据进行处理,特征层融合是对数据加工后的特征信息进行处理,决策层融合是对多种渠道的决策信息进行处理。对于航天运载火箭、战略导弹等大型复杂系统,无论是地面测试还是飞行试验,可获得的系统参数和各种状态信息既多且繁,如何从这些数据中快速发现故障特征,迅速判断决策故障的种类、性质和位置,长期以来一直是相关技术人员和指挥决策人员十分艰巨且又具挑战性的任务。充分利用数据的相关性、冗余性和互补性进行多元信息融合故障诊断,无疑将会大大推进大型复杂系统故障诊断技术的进步。信息融合故障诊断技术不仅可用于大型武器装备系统的故障诊断,亦可用于民用领域如核电站、复杂动力等大系统的故障诊断。

本书以运载火箭为应用背景,进行深入分析和系统总结,从特征层和决策层信息融合角度,理论与实践相结合,重点突破艰深的理论方法和技术应用,深入浅出地为相关研究和使用人员提供基本的方法、技巧、途径及应用实例。本书是在作者多年信息融合故障诊断技术研究与实践的基础上形成的,其中还包括了一些首次公布的理论方法与技术研究成果。

本书共分7章。第1章概述了故障信息融合诊断的目的、概念、国内外几种典型的信息融合理论研究及发展现状。第2章从解决复杂系统故障分析仿真信息源角度给出故障信息仿真方法,介绍了故障信息建模技术与仿真实现方法。第3章研究了故障特征提取方法,包括故障特征分类、小波变换和希尔伯特-黄变换的提取方法。第4章介绍了故障特征信息融合技术,讨论了神经网络、过程神经网络和支持向量机三种信息融合方法及方法的组合应用。第5章研究了D-S证据理论及用于决策层故障信息融合诊断的技术。第6章探讨了贝叶斯网络理论及决策层故障信息融合诊断技术。第7章从工程应用角度给出了信息融合故障诊断平台的设计技术与实现方法。

本书的作者主要有:第1章由沈怀荣、杨露、周伟静、余国浩和彭颖撰写,第2章由周伟静撰写,第3章由杨露撰写,第4章由杨露和余国浩撰写,第5章由彭颖撰写,第6章由杨露和彭颖撰写,第7章由杨露、周伟静和彭颖撰写。沈怀荣对全书进行了内容设计、统稿并修改定稿。在本书撰写过程中还得到周海刚、马永一

等的帮助,吸收了他们参与完成研究工作的成果及解决问题的智慧。在此一并向他们及对本书给予支持的同志表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免会有疏漏之处,在此恳望读者批评指正。

作 者

2013年1月18日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 故障信息融合诊断的目的	1
1.2 故障信息融合诊断的策略	3
1.3 故障信息融合诊断技术的发展	4
1.3.1 信息融合技术	4
1.3.2 故障诊断技术	8
1.3.3 希尔伯特-黄变换	12
1.3.4 过程神经网络	15
1.3.5 支持向量机	17
1.3.6 证据理论	22
1.3.7 贝叶斯网络	24
参考文献	28
第 2 章 故障信息仿真技术	42
2.1 基于混合自动机的故障描述模型	43
2.1.1 混合自动机理论概述	43
2.1.2 基于混合自动机的故障描述	44
2.1.3 故障描述模型的建立	45
2.2 基于 Simulink/Stateflow 的故障仿真实现	55
2.2.1 平台姿态测量系统故障描述模型实现	55
2.2.2 速率陀螺组合故障描述模型实现	57
2.2.3 伺服机构故障描述模型实现	58
2.2.4 箭载计算机仿真模型	60
2.2.5 箭体动力学仿真模型	62
2.2.6 力及力矩仿真模型	64
2.2.7 故障仿真案例	67
参考文献	77
第 3 章 故障特征提取技术	78
3.1 被测量及特征分析	78
3.1.1 故障特征分类	79

3.1.2 确定性信号及特征分析	80
3.1.3 随机信号及特征分析	81
3.2 基于小波变换的特征提取方法	83
3.2.1 基本原理	83
3.2.2 故障特征提取	86
3.2.3 存在的问题	91
3.3 基于希尔伯特-黄变换的特征提取方法	95
3.3.1 基本原理及方法	95
3.3.2 故障特征提取及比较	97
3.3.3 存在的问题	104
3.3.4 分离终止条件的比较分析	107
3.3.5 含直流分量的包络分段计算方法	108
3.3.6 希尔伯特-黄变换在故障诊断中的应用	111
参考文献	119
第4章 故障特征信息融合技术	121
4.1 基于神经网络的融合方法	121
4.1.1 神经元模型	121
4.1.2 前馈神经网络	122
4.1.3 存在的问题	123
4.2 基于过程神经网络的融合方法	124
4.2.1 过程神经元模型	124
4.2.2 前馈过程神经网络	125
4.2.3 融合诊断的过程神经网络模型	127
4.2.4 时间累积运算的比较分析	130
4.2.5 同精度解的存在性研究	131
4.2.6 网络训练收敛性分析	136
4.2.7 网络初始化方法改进	137
4.2.8 网络学习算法改进	138
4.3 神经网络与过程神经网络的比较	140
4.3.1 一维时变信号的辨识问题	140
4.3.2 多维时变信号的故障识别问题	146
4.3.3 方法适用性分析	148
4.4 基于支持向量机的融合方法	151
4.4.1 最优超平面的构造	151
4.4.2 SVM 分类算法推导	153

4.4.3	核函数	154
4.4.4	SVM 工作原理	155
4.4.5	SVM 融合诊断流程	156
4.5	故障特征信息融合诊断应用	157
4.5.1	基于希尔伯特-黄变换和过程神经网络的融合诊断	158
4.5.2	基于频谱和过程神经网络的融合诊断	166
4.5.3	基于希尔伯特-黄变换和支持向量机的融合诊断	174
	参考文献	182
第 5 章	基于 D-S 证据理论的故障决策信息融合方法	184
5.1	D-S 证据理论与故障诊断	184
5.1.1	证据理论基本概念	184
5.1.2	证据分类	187
5.1.3	证据理论决策级融合诊断及关键问题	187
5.1.4	证据理论决策级融合诊断模型	190
5.2	证据冲突衡量方法	192
5.2.1	典型冲突衡量方法分析	192
5.2.2	修正证据距离	199
5.2.3	基于合取冲突和修正证据距离的二元组冲突衡量方法	206
5.2.4	二元函数冲突程度衡量方法及其 Dempster 规则使用判据	209
5.3	证据聚类方法	212
5.3.1	典型证据聚类方法分析	213
5.3.2	基于主元和凝聚层次聚类的证据聚类算法	217
5.3.3	算例验证	223
5.4	证据合成方法	228
5.4.1	Dempster 规则悖论分析	229
5.4.2	基于焦元冲突分配的证据序贯合成方法	235
5.4.3	基于焦元冲突分配的证据均值合成方法	237
5.4.4	基于主元的证据折扣方法	238
5.4.5	基于分类的证据折扣方法	240
5.4.6	合成方法比较	247
	参考文献	248
第 6 章	基于贝叶斯网络的故障决策信息融合方法	252
6.1	贝叶斯网络理论	252
6.1.1	概率论及概率推理	252
6.1.2	贝叶斯网络	254

6.1.3 贝叶斯网络推理	255
6.1.4 贝叶斯网络学习	258
6.2 基于贝叶斯网络的故障诊断	260
6.2.1 贝叶斯诊断网络的表达方式	261
6.2.2 贝叶斯诊断网络的数学描述	262
6.2.3 贝叶斯诊断网络的面向对象表达	264
6.2.4 贝叶斯诊断网络的建模方法	270
6.3 案例仿真	277
6.3.1 伺服阀案例分析及建模	278
6.3.2 伺服阀单故障现象仿真与分析	282
6.3.3 伺服阀多故障现象仿真与分析	284
6.3.4 贝叶斯诊断网络算法蒙特卡罗仿真验证试验	287
6.3.5 贝叶斯诊断网络特性总结	288
参考文献	289
第7章 信息融合故障诊断平台设计与实现	292
7.1 信息融合故障诊断平台设计	292
7.1.1 开发环境	292
7.1.2 功能设计	292
7.1.3 软件模块	294
7.1.4 系统流程	295
7.2 信息源模拟软件设计与实现	298
7.2.1 功能设计	298
7.2.2 接口设计	298
7.2.3 软件介绍	299
7.3 特征提取与融合软件设计与实现	302
7.3.1 功能设计	302
7.3.2 接口设计	307
7.3.3 软件介绍	309
7.4 决策融合诊断软件设计与实现	316
7.4.1 功能设计	316
7.4.2 接口设计	316
7.4.3 软件介绍	316
7.5 故障管理统计软件设计与实现	318
7.5.1 功能设计	318
7.5.2 数据结构	319

7.5.3 接口设计	320
7.5.4 软件介绍	320
7.6 信息融合故障诊断平台案例仿真	323
7.6.1 仿真案例	323
7.6.2 诊断准确度统计	333
参考文献	334

第 1 章 绪 论

信息融合技术最早产生于雷达目标识别问题(1973 年),是 20 世纪 80 年代形成和发展起来的一种自动化信息综合处理技术。进入 20 世纪 90 年代,信息融合技术的研究在国内外受到高度重视,美国国防部把信息融合列为重点研究的 20 项关键技术之一。目前信息融合比较确切的定义可概括为^[1]利用计算机技术对按时序获得的多源的观测信息在一定准则下加以自动分析、综合以完成所需的决策和估计任务而进行的信息处理过程。信息融合按对信息处理的层次可划分为数据层信息融合、特征层信息融合和决策层信息融合。数据层信息融合主要是指直接对传感器观测到的未经预处理的原始信息进行的处理或分析过程。特征层信息融合是在对原始信息预处理和特征提取之后进行的信息融合。决策层信息融合通常是指对特征层融合基础上得到的综合信息进行信息处理判断,为指挥控制提供简明直观的决策信息。因此,信息融合就是为了某一目的对来自多源的数据和信息进行组合或综合的处理过程,以得到比单一信息源更精确、更可靠的状态估计或推理决策信息。

故障诊断过程实际上是一个完整的信息运动过程^[2]。从系统的物理信号、相关知识和历史背景中感知、获取系统的功能、行为、结构及各种信息,通过数学变换、参数或状态估计以及人机的智能协作等方式对这些信息进行必要的处理,再用智能活动等再生出新的信息,并依据这些信息对系统故障进行预测、定位、定量和定因,从而便于采取各种措施保护系统安全运转、恢复系统有序运行。因此,故障诊断其实也是一个多源信息融合的过程。将信息融合技术应用于故障诊断能充分利用多元数据的冗余性、互补性和计算机的高速运算能力,得出更准确、可靠的故障诊断结果。

1.1 故障信息融合诊断的目的

运载火箭在发射前,一般要在技术阵地和发射阵地进行大量测试,一旦发现异常,往往需花费很长时间解决,甚至要推迟发射任务。在飞行阶段,还需要通过遥测、外测手段测量数百个甚至是上千个参数,供技术人员监控和事后分析。由于测量参数多,数据量大,目前难以对运载火箭飞行时的故障状态进行实时评估,大多采用事后分析的方法。我国最先进的 CZ-2F 火箭,由于航天员座舱安全需要,专门研制了一套故障检测系统,以控制座舱自动逃逸。为了提高故障诊断速

度,该故障检测系统主要采用门限值判别法进行故障诊断与监控,初步解决了发射初段航天员的安全问题。该项技术为运载火箭和战略导弹故障快速诊断提供了一个应用范例,但为了提高整个运载火箭的安全、可靠和及时性,还必须要进一步发展、研究先进的故障诊断技术。

运载火箭测试发射周期之所以比较长,一是因为需要长时间多工序测试,通过对单元、分系统、系统的多次测试过程来保证使用可靠性;二是因为测试数据多,判读时间长,发现异常后故障的查找和定位则需更长时间,缺少快速可靠的状态评估和故障诊断技术的支撑;三是因为大多数情况下要根据故障现象和故障结果进行维修,缺少相应的快速维修体系,一旦出现严重故障,排除故障和故障归零的周期比较长,有的甚至需要延迟和中断试验计划,协调生产单位解决故障问题。在运载火箭各个组成部分中,控制系统是运载火箭的关键系统,也是故障的高发部位,故障模式复杂多样,对控制系统故障实现准确、快速的诊断是一个难点,应给予高度的重视,本书研究探讨的信息融合故障诊断技术和大多数案例也主要是针对火箭控制系统进行的。

在传统测试系统中,状态检测可以测量判断参数值是否在允许范围内、状态是否正确,并以某种方式提示操作人员。在广泛应用计算机技术的自动化测试系统中,做到“越限报警,故障判读”的状态检测已经很普遍。但对故障部位、故障机理、故障性质和影响程度作出准确深入的判断仍较困难。传统测试系统中的状态检测并不能称为故障诊断系统,只是故障诊断系统的一个组成部分^[3]。把快速故障诊断技术纳入航天装备的测试领域,建立智能化、实用化的故障诊断系统,是国内外行业专家们多年探索和研究的课题。

在运载火箭故障诊断领域,我国研究者相继做了大量研究工作,如在火箭液压系统故障诊断中,研究了基于振动、压力、温度和油液的综合诊断方法;在火箭动力系统故障诊断中,研究了脉冲型和阶跃型瞬态故障的检测与诊断问题;开展了火箭发动机健康监控技术研究、航天测控系统及运载火箭飞行安全控制技术研究等;在 CZ-2F 火箭中,由于航天员座舱逃逸控制的需要,还专门研制了一套故障检测系统。但总的来说,目前我国在航天武器试验中的故障诊断能力还较低,测试过程中发现故障的手段主要是对测试数据进行阈值判别,测量的数值超差则认为出现故障。这样的判别方法简单直观,虽能够及时发现已经出现的故障,但可能忽略一些存在的故障隐患,延误了及时发现和排除故障的时间,甚至可能使火箭带着问题上天,引发难以估计的后果。由于火箭控制系统的复杂性,单一方法无法解决所有的故障诊断问题,单一信息也难以充分表征系统状态,因而,将信息融合技术引入故障诊断,实现多源信息融合以得到比单一信息源更精确、更可靠的状态估计或推理决策。

综上所述,以运载火箭控制系统为应用背景,研究可以推广应用到大型复杂

装备的信息融合故障诊断方法,可以为战装备状态快速评估和故障诊断定位提供技术支撑,有助于解决长期困扰的准确、快速诊断故障难题,对运载火箭和战略导弹的快速发射及维修都具有重要的作用和价值。

1.2 故障信息融合诊断的策略

运载火箭控制系统故障诊断涉及因素广泛,测试过程中信号繁多,既有箭上设备(安装在运载火箭内),又有地面设备,这给故障的诊断与定位带来了很多不便。当出现故障时,很多情况需要首先判断是箭上设备的问题还是地面测试设备的问题,而这两种情况下处理问题的方法和手段不尽相同。本书的研究重点是对箭上的控制系统故障进行诊断与定位,对于地面测试设备的故障诊断与定位,考虑到可采用冗余热备份、使用前保障、在地面有多种措施保证等因素,暂不纳入研究内容。

通常,信息融合主要分为三个层次,即数据层融合、特征层融合和决策层融合。数据层融合是对采集的原始数据进行的,也称为传感器级的信息融合;特征层融合是对数据加工处理后得到的信息特征进行融合;而决策层融合是针对来源于不同渠道的结果或决策信息进行的融合。这三种融合方法可以根据情况进行独立使用或组合使用。图 1.1 所示的信息融合网络拓扑结构是最具一般性的情况,图中共包括八种信息融合模型。用于火箭控制系统信息融合故障诊断网络拓扑图可以根据故障模式特点及系统结构形式并依此进行优化选择。图 1.2 给出本

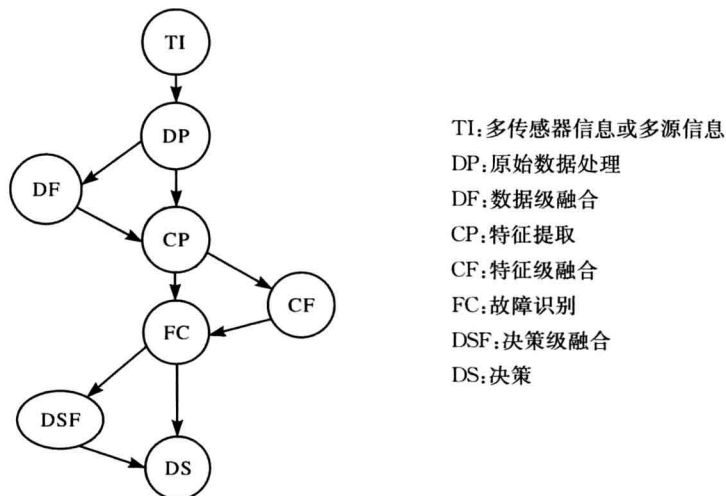


图 1.1 信息融合网络拓扑结构示意图

书遵循的故障信息融合诊断策略。首先对原始信号进行处理,按接口要求进行信号转换、剔除异常值、统计分析等,然后逐级通过数据融合和特征融合进行融合处理。在数据层融合中对信号进行小波分析、希尔伯特-黄变换等,提取特征数据,进行简单的初步判断,得到特征信息,送入特征层融合,运用人工智能方法如神经网络、支持向量机等进行诊断,得出更高级的判断结果。数据融合和特征融合的结果同时发送至决策层进行融合,该层综合运用专家知识、历史故障知识、Dempster-Shafer 证据理论、贝叶斯网络等,进行最终级别的融合,得出决策融合结果作为辅助决策信息,供操作人员根据经验和故障评价准则进行最后决策,采用故障隔离、降额使用或其他措施。

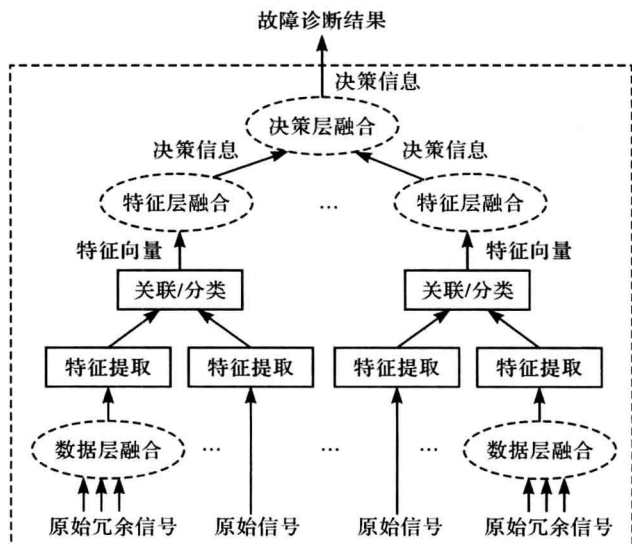


图 1.2 故障信息融合诊断策略

1.3 故障信息融合诊断技术的发展

1.3.1 信息融合技术

信息融合技术是一种自动化信息综合处理技术,最早产生于雷达目标识别问题。1973 年在美国国防部资助开发的声呐信号识别系统中首次提出了数据融合技术。1988 年美国国防部将其列为 20 世纪 90 年代重点研究的 20 项关键技术之一。至此,信息融合技术经历了 20 世纪 80 年代初、90 年代初和 90 年代末三次研究热潮。信息融合的早期研究大多着重于增强计算能力和有效融合数据的具体方法,且主要以军事应用为背景,因而很长时期内信息融合技术一直处于封闭状

态。随着研究的深入和应用领域的扩大,相关研究及成果才逐渐公开于各种学术会议和文献中,使各领域的研究人员日益认识到信息融合技术的重要性,开展了相关的应用研究,并总结出了行之有效的工程实现方法。信息融合技术的研究主要包括信息融合模型和信息融合算法^[4],信息融合模型决定了系统的框架和模式,信息融合算法决定了融合的具体算法和处理过程。

信息融合系统的结构目前尚没有形成统一的分类形式。Dasarathy^[5]指出传感器融合模型主要分为数据层融合、特征层融合和决策层融合,他根据输入输出特性,给出了三种融合系统结构:柔性系统结构、自改善系统结构以及有限决策输入融合结构。Hall 等^[6]根据 JDL 功能模型给出了集中式融合、自主式融合和混合式融合等三种融合系统结构。Blum 等^[7]将信息融合结构分为并行拓扑结构、串行拓扑结构、树状拓扑结构和分散式拓扑结构。

信息融合算法有许多种,特别是随着新技术的出现,融合算法不断向智能化方向发展。虽然不同文献对融合算法分类^[8,9]不同,但信息融合用到的一些经典数学方法已得到广大学者的肯定,如贝叶斯方法、Dempster-Shafer 证据理论、神经网络、模糊推理等。融合算法选择问题很大程度上依赖于信息融合系统的传感器数据、推理性质和应用背景等。

1. 国外研究现状

美国在信息融合技术的研究方面一直处于世界领先地位,开发了一系列 C⁴ISR 系统及 IW 系统。Hall 等^[6]指出以人工智能、模式识别、统计估计等技术为基础的多传感器数据融合技术已在美国国防领域,如自动目标识别、战场监视、自主飞行器导航与控制等,以及复杂机械监测、医疗诊断、智能建筑等非国防领域得到了广泛应用。据统计,1991 年美国已有 54 个数据融合系统引入到军用电子系统中,其中 87% 的数据融合系统已有试验样机、试验床或进入实用阶段。到目前为止,美国、俄罗斯、英国等国家已研制出上百种军用信息融合系统,比较典型的有美国的 MCS(陆军机动控制系统)、NTDS(海军战术数据系统)、J-STARS(联合监视/目标攻击雷达系统)、GNCST(全球网络中心监视与瞄准系统)等;俄罗斯的 EANKAA(贝加尔战术 C³I)、YHNBEPCAA(战役战术 C³I)等;英国的 AIDD(炮兵情报信息融合系统)、Wavell 机动和控制系统等。

在信息融合技术的应用研究过程中,从实际需要出发,出现了多种改进的信息融合方法。2006 年英国 BAE 系统公司开发了“分布式数据融合”技术,在传统的集中式数据融合中,所有信息在一个中心节点完成综合和融合,一旦中心节点遭到攻击,就会破坏整个系统,但分布式数据融合技术的综合和融合可在网络中的任何节点上进行,若一个节点脱离网络,其他部分仍会继续工作并共享、综合和融合信息。Jin 等^[10]以移动式机器人导航为研究背景,针对传统传感器数据融合

方法只融合当前数据,需要靠增加传感器数量提高测量精度的问题,提出了空间与时间传感器融合(STSF)方案,将先前时刻的数据集传递并融合到当前数据集,获取了更精确的测量结果。Mirjalily 等^[11]针对分布式检测系统中检测器的误警率、漏检率及验前概率等统计量未知或随时间变化的情况,研究了盲自适应决策融合,提出了一种基于局部决策未知概率与联合概率解析关系的递归算法,实现对未知统计量的在线近似,参与对各局部检测器的二元决策融合。Petrovic 等^[12]提出了基于斜度的多决策信号级图像融合方法,将多输入视觉信息转化为单一的无干扰无丢失的融合图像。

其他针对特定对象的信息融合方法应用研究有,Freire 等^[13]针对移动式机器人控制问题,研究了控制信号的融合方法;Chroust 等^[14]研究了机器人运动与结构估计中视觉数据与 6 自由度惯性数据的融合方法;Graovac^[15]研究了捷联惯性导航系统和动态视觉导航系统的导航数据融合方法;Schutz 等^[16]将信息融合应用于空中预警系统的目标识别及雷达观测;Mitchell 等^[17]在远距离精确测量中对多个激光跟踪仪的测量数据进行融合,提高测量精度;Ko 等^[18]采用支持向量机的连续融合方法实现人脸识别;Sarigiannis 等^[19]将信息融合应用于空气质量与影响人体健康的潜在因素的评估;Greiwe 等^[20]采用多传感器遥感数据融合实现城市土地覆盖分类;Jain 等^[21]采用基于知识的模糊传感器融合方法,对 CCD 相机、光学译码器及超声波位移传感器获取的信息进行融合,确定产品加工质量。

2. 国内研究现状

自海湾战争后,数据融合概念进入我国并受到了高度重视。我国国防科学技术工业委员会在“八五”预研项目中设立了信息融合技术的相关课题,各国防工业研究所和院校纷纷起步,取得了一大批研究成果,出版了多部信息融合相关的教材及专著。1998 年申功勋等出版了专著《信息融合理论在惯性/天文/GPS 组合导航系统中的应用》^[22]。同年,刘同明等出版了专著《数据融合技术及其应用》^[23],介绍了信息融合的基本概念、分类和方法,以及在状态估计、目标识别、态势评定和威胁估计中的应用等。2001 年李山林等撰写的《信息融合技术》^[24]从理论角度对信息融合技术进行了阐述,如信息取向、不确定性、需求量、结构等。2002 年权太范出版了《信息融合神经网络-模糊推理理论与应用》^[4]。2006 年杨露菁等撰写了教材《多源信息融合理论与应用》^[25],介绍了多源检测融合原理、多源属性融合原理、数据关联、状态融合及多传感器管理等。同年,韩崇昭出版了《多源信息融合》^[26],介绍了检测融合、估计融合、异步融合、异类融合、图像融合等理论。2007 年邓自立撰写了《信息融合滤波理论及其应用》^[27]。2007 年 12 月何友等出版了《多传感器信息融合及应用(第 2 版)》^[28],在其 2000 年第 1 版^[29]基础上进行了修改,综合了多年的研究成果及大量的国内外文献资料,全面介绍了多传

传感器信息融合技术的理论、进展与最新研究成果。

信息融合技术在我国的应用研究也较广泛,主要应用领域有导航、测控、目标识别、故障诊断、工业控制、图像处理、语音识别、医学诊断、环境监测等。

在导航领域,熊智等^[30]针对量测信息输出不同步及滞后问题,设计了基于联邦滤波理论的组合滤波方案,提出了解决滞后问题的算法,有效解决了基于北斗双星定位辅助的 SAR/INS 组合导航系统中的信息融合问题。袁冬莉等^[31]研究了小型无人机组导航系统,融合了无线电定位(RP)、全球导航星系统(GNSS)、多普勒导航系统(DNS)、地形辅助导航(TAN)和景象匹配导航(SMN)等多种导航方式。张旭等^[32]研究了信息融合技术在智能车辆组合导航中的应用。穆华等^[33]研究了船用惯性/地磁导航系统的信息融合策略。

在测控领域,周海银等^[34]研究了基于多源信息融合的飞行器高精度定位方法,分析了信息权值对融合精度的影响,证明了基于参数估计的均方误差最小的异类测量数据融合处理存在最佳权值,且与测量误差的统计特性、模型结构、样本量大小有关。张雷等^[35]研究了卫星测控系统的信息融合技术,提出了具有分析决策、知识发掘和智能推理等功能的实时测控系统。郭军海等^[36]分析了信息融合技术在飞行器实时测控中的作用,探讨了飞行器实时测控信息融合的功能定义、结构模型、融合方法及工程应用的关键问题。

在目标识别领域,杨莘元等^[37]提出了基于 D-S 证据理论的红外小目标融合识别方法,对中红外和远红外成像小目标首先进行特征提取,再利用模糊 C 均值聚类方法进行基本概率分配,最后用改进的 D-S 组合公式进行融合识别。刘永祥等^[38]针对火箭防御系统,研究了基于时空信息序贯融合的目标综合识别模型,在空间域融合中利用层次分析法度量各技术途径的融合权重,在时间域融合中将 D-S 证据理论应用于融合识别结果的继承和更新。李炯等^[39]研究了基于神经网络-模糊推理的信息融合模型并应用于红外成像/毫米波复合制导目标识别,又随后研究了 D-S 理论的推广方法^[40],解决融合信息的证据冲突问题。朱志宇等^[41]针对雷达辐射源识别问题,通过灰关联分析确定基本概率赋值函数,应用修正的 D-S 证据融合策略改进了证据冲突情况下的融合算法。尹建平等^[42]针对反坦克智能雷设计中的目标主动探测,采用基于 D-S 证据理论的毫米波/红外融合探测方法,建立了扫描模型和扫描捕获准则。杨国等^[43]研究了毫米波主被动复合探测器目标识别中的基于 D-S 证据理论的时空融合方法,首先将各传感器不同高度的信息进行时间上的融合,再对多个传感器进行空间上的融合。

在故障诊断领域,李发光等^[44]研究了由自适应神经模糊推理系统构建的置信度判别器,能自适应地判别各传感器故障置信度,进而实现故障信息融合。李春香等^[45]在飞行事故调查辅助分系统研究中,基于点对象构建飞行事故分析模型,将飞行数据、话音数据、雷达数据、目击数据以及现场残骸分布等信息进行融合,