

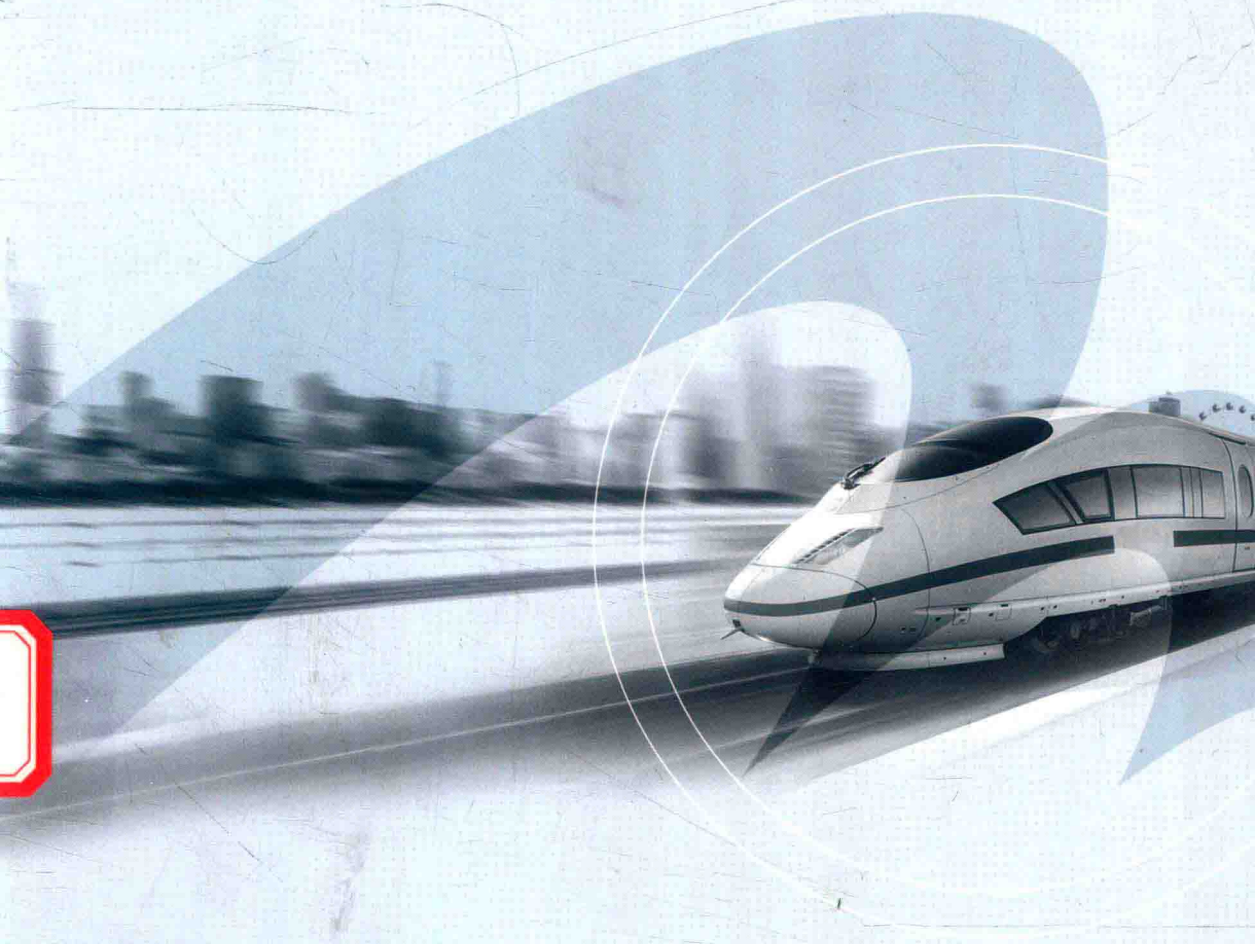


交融世界，通达古今——轨道交通系列学术专著

轨道交通安全智能融合技术

GUIDAO JIAOTONG ANQUAN ZHINENG RONGHE JISHU

◎ 岳建海 胡准庆 编著



北京交通大学出版社
<http://www.bjtu.com.cn>

轨道交通安全智能 融合技术

岳建海 胡准庆 编著



首次扫描二维码安装加阅 App，安装成功并注册后，点击
“扫一扫加入我的书架”，即可获取本书更丰富资源。

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书主要介绍多传感器信息融合技术的基本概念、理论和方法,以及在轨道车辆中的应用。全书包括信息融合概述、信息融合中的数学基础、信息融合系统功能和结构模型、信息融合的数据支持、基于统计的信息融合、目标跟踪融合、城市轨道交通的信息融合技术、铁道车辆的信息融合技术。

本书可作为高等学校铁道机车车辆专业和载运工具运用工程专业用书,也可作为轨道车辆行业各级管理人员、检验人员和维修工人的专业参考书和职业教育、技术培训用书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通安全智能融合技术 / 岳建海, 胡准庆编著. —北京: 北京交通大学出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5121-3075-3

I. ① 轨… II. ① 岳… ② 胡… III. ① 轨道交通-交通运输安全-智能控制
IV. ① U298

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 298982 号

轨道交通安全智能融合技术

GUIDAO JIAOTONG ANQUAN ZHINENG RONGHE JISHU

责任编辑: 陈跃琴 助理编辑: 陈可亮

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010-51686414 <http://www.bjtup.com.cn>

地 址: 北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印 刷 者: 北京艺堂印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185 mm×260 mm 印张: 14.5 字数: 362 千字

版 次: 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-3075-3/U·251

印 数: 1~800 册 定价: 48.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

信息融合作为一门多学科相互交叉的综合性新技术,可以在复杂的环境、信号采集受到局限、信息获取技术或方法不完善、多源信息之间存在冗余等情况下发挥强大的作用,在国民经济各领域得到越来越广泛的应用。轨道交通车辆特别是高速列车,由于运行速度快、运行环境恶劣,列车运行控制、行车安全、运行状态实时监测与故障诊断、列车故障检修的快速、高效性等问题变得更加重要。而列车运行状态监测、故障的预防和故障发生后的快速排除等问题也摆在了越来越重要的地位。如果采用单一的信息理论处理方法,描述系统故障的信息通常会出现随机、模糊等不确定性,并且随着信息采集手段的多元化,使得信息类型增多,信息形式更复杂,已有理论和方法逐渐显示出了自身的局限性。本书旨在利用信息融合理论和方法,以期克服已有方法在相应问题处理时的不足。

本书以轨道交通车辆为应用背景,深入分析了信息融合理论、技术和应用。采用理论与实践相结合的方法,突破艰深的理论和技术应用,深入浅出地介绍了信息融合的基本方法、应用技巧、应用途径及应用案例。首先介绍了信息融合的数学基础知识,建立了信息融合系统结构和功能模型;然后对模型数据进行了分析和估算;最后介绍了信息融合技术在轨道交通车辆中的应用。

本书共分为8章。第1章概述了信息融合的发展历史与现状、信息融合的主要方法、信息融合的应用案例、信息融合技术的发展前景。第2章介绍了信息融合中的数学基础,包括粗糙集与证据理论、模糊集合理论基础、贝叶斯统计方法、 H_∞ 滤波理论、灰色系统理论。第3章介绍了信息融合系统功能和结构模型,主要分析了信息融合系统的功能模型和结构模型,对信息融合的级别、信息融合系统的通用处理结构、信息融合的六级功能分类模型也做了介绍。第4章讨论了信息融合的数据支持,从多传感器信息融合时的数据准备开始,到数据关联的过程和步骤、数据关联的方法、多传感器联合概率数据关联都进行了分析说明。第5章分析了基于统计的信息融合,包括参数估计的基本概念与方法、总体参数的点估计、正态总体均值的区间估计、一般总体均值和成数的大样本区间估计、正态总体方差的区间估计、样本容量的确定,最后对信息融合方法进行了简单介绍。第6章研究了目标跟踪融合,分析了运动跟踪、多传感器多模型概率数据关联算法、基于交互式多模型方法的目标跟踪。第7章介绍了城市轨道交通的信息融合技术,主要分析了城市轨道交通的综合监控系统、城市轨道交通的列车定位技术、多传感器信息融合技术的轨道交通车站设备故障诊断、信息融合技术在地铁中央空调风机故障诊断中的应用、基于数据融合的城市轨道交通线网指挥中心综合信息平台等内容。第8章分析了铁道车辆的信息融合技术,介绍了车辆定位系统的信息融合技术、铁路5T系统的信息融合技术,研究了高速列车远程诊断与虚拟维护系统

的信息融合技术。

本书由岳建海编著，胡准庆参编。其中第1章、第7章、第8章由岳建海编写，第2~6章由岳建海和胡准庆共同编写。

由于水平所限，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请广大读者提出批评和建议，以便将来更好地修改、完善本书。

目 录

第1章 信息融合概述	1
1.1 信息融合的发展历史与现状	1
1.2 多传感器系统的特点与控制结构	2
1.3 信息融合的主要方法	4
1.3.1 信息融合的主要模型	4
1.3.2 信息融合的主要算法	6
1.3.3 当前的研究热点	8
1.4 信息融合的应用案例	8
1.4.1 信息融合在轨道交通领域中的应用	8
1.4.2 其他典型的应用	11
1.5 信息融合技术的发展前景	12
第2章 信息融合中的数学基础	14
2.1 粗糙集与证据理论	14
2.1.1 粗糙集理论基础	15
2.1.2 证据理论基础	19
2.2 模糊集合理论基础	23
2.2.1 多传感器融合数据有效性模糊处理技术	23
2.2.2 多传感器融合数据有效性模糊评判实现	26
2.3 贝叶斯统计方法	29
2.3.1 贝叶斯公式	29
2.3.2 先验分布	30
2.3.3 贝叶斯估计	31
2.3.4 贝叶斯决策	32
2.4 H_{∞} 滤波理论	33
2.4.1 H_{∞} 滤波技术基础	33
2.4.2 系统 H_{∞} 控制标准设计问题	36
2.4.3 连续系统 H_{∞} 滤波问题的描述	37
2.4.4 离散系统 H_{∞} 滤波问题的描述	38
2.4.5 H_{∞} 滤波器同卡尔曼滤波器的比较	39
2.5 灰色系统理论	40
2.5.1 灰色系统的概念与基本原理	40
2.5.2 序列算子与灰色序列生成	41

2.5.3 灰色系统预测	47
第3章 信息融合系统功能和结构模型	49
3.1 概述	49
3.2 信息融合系统的功能模型	52
3.3 信息融合系统的结构模型	53
3.3.1 检测级融合	54
3.3.2 位置级融合	54
3.3.3 态势评估	54
3.3.4 威胁估计	55
3.4 信息融合的级别	56
3.5 信息融合系统的通用处理结构	58
3.6 信息融合的六级功能分类模型	60
第4章 信息融合的数据支持	63
4.1 多传感器信息融合时的数据准备	63
4.1.1 预处理	63
4.1.2 修正系统误差	63
4.1.3 坐标变换或空间配准	64
4.1.4 时间同步或对准	64
4.1.5 量纲对准	65
4.2 数据关联	65
4.3 数据关联的过程和步骤	66
4.3.1 多传感器数据关联	66
4.3.2 数据关联过程	68
4.3.3 数据关联的一般步骤	68
4.4 数据关联的方法	70
4.5 多传感器联合概率数据关联	77
4.5.1 概率数据关联滤波器	78
4.5.2 多传感器概率数据关联算法	82
第5章 基于统计的信息融合	84
5.1 参数估计的基本概念与方法	84
5.1.1 参数估计的基本概念	84
5.1.2 估计问题	85
5.1.3 估计的偏差和无偏性	86
5.1.4 估计的方差和克拉美-劳不等式	87
5.1.5 估计的有效性	89
5.1.6 充分估计	90
5.1.7 估计的一致性	91
5.1.8 估计的其他性质	91
5.2 总体参数的点估计	92

5.2.1	矩估计	92
5.2.2	极大似然估计	93
5.2.3	点估计的评价标准	94
5.3	正态总体均值的区间估计	96
5.3.1	总体参数区间估计的概念和基本思想	96
5.3.2	单正态总体均值的区间估计	97
5.3.3	两正态总体均值之差的区间估计	101
5.3.4	单侧区间估计问题	103
5.4	一般总体均值和成数的大样本区间估计	105
5.4.1	非正态总体均值的大样本区间估计	106
5.4.2	总体成数(比例)的大样本区间估计	107
5.4.3	单侧区间估计	109
5.5	正态总体方差的区间估计	110
5.5.1	单正态总体方差的区间估计	110
5.5.2	两正态总体方差之比的区间估计	112
5.6	样本容量的确定	114
5.6.1	总体均值估计的必要样本容量	114
5.6.2	总体成数估计的必要样本容量	115
5.7	信息融合方法	116
5.7.1	贝叶斯信息融合方法	116
5.7.2	模糊信息融合方法	117
5.7.3	神经网络信息融合方法	118
5.7.4	D-S 证据理论信息融合方法	125
第6章	目标跟踪融合	133
6.1	概述	133
6.1.1	目标检测跟踪的含义	133
6.1.2	信息获取技术	134
6.1.3	基本概念与术语	135
6.1.4	目标探测与识别的信息链	136
6.1.5	目标检测方法的基本概念	137
6.1.6	目标跟踪方法涉及的基本问题	137
6.2	运动跟踪	140
6.2.1	卡尔曼滤波	140
6.2.2	基于预测的运动跟踪	141
6.3	多传感器多模型概率数据关联算法	143
6.3.1	多模型算法	145
6.3.2	相互作用多模型-概率数据关联算法	147
6.3.3	多传感器多模型-概率数据关联滤波器	149
6.4	基于交互式多模型方法的目标跟踪	152

6.4.1	目标建模	152
6.4.2	交互多模算法原理	152
6.4.3	案例分析	154
第7章	城市轨道交通的信息融合技术	160
7.1	概述	160
7.2	城市轨道交通的综合监控系统	162
7.2.1	综合监控系统的技术现状	163
7.2.2	综合监控系统的技术发展方向	166
7.2.3	新一代城市轨道交通综合信息管理系统	169
7.3	城市轨道交通的列车定位技术	170
7.3.1	轨旁定位技术	171
7.3.2	车载列车定位技术	174
7.3.3	基于多传感器融合的列车测速定位方法	175
7.4	多传感器信息融合技术下的轨道交通车站设备故障诊断	178
7.4.1	轨道交通车站设备	178
7.4.2	多传感器信息融合技术在故障诊断中的应用	179
7.5	信息融合技术下的地铁中央空调风机故障诊断	180
7.5.1	神经网络信息融合故障诊断技术	180
7.5.2	信息融合技术在故障诊断中的应用	181
7.5.3	地铁中央空调风机故障诊断系统建立	182
7.6	基于数据融合的城市轨道交通线网指挥中心综合信息平台	184
7.6.1	网络化运营需求分析	184
7.6.2	线网指挥中心综合信息平台的构建	185
7.6.3	综合信息平台的关键技术	186
第8章	铁道车辆的信息融合技术	188
8.1	概述	188
8.2	车辆定位系统的信息融合技术	190
8.2.1	GPS 航位推算系统	190
8.2.2	DAB-GSM 融合定位系统	193
8.2.3	GPS/DR/MM 组合定位系统	194
8.3	铁路 5T 系统的信息融合技术	198
8.3.1	5T 系统简介	198
8.3.2	5T 数据接入和信息融合设计	206
8.4	高速列车远程诊断与虚拟维护系统的信息融合技术	209
8.4.1	系统概述	210
8.4.2	技术方案	216
8.4.3	系统建立与主要功能	221
参考文献		223

信息融合概述

1.1 信息融合的发展历史与现状

随着传感器技术的迅速发展,各种面向复杂应用背景的多传感器信息系统大量涌现,在一个系统中装配的传感器在数量上和种类上也越来越多,因此需要有效地处理各种各样的、大量的传感器信息。在这些系统中,信息表现形式的多样性、信息容量及信息的处理速度等要求已经大大超出人脑的信息综合能力。处理各种各样的传感器信息,意味着增加了待处理的信息量,很可能会涉及各传感器数据组之间数据的矛盾和不协调。在这样的情况下,多传感器信息融合技术(multi-sensor information fusion, MIF)应运而生。“融合”是指采集并集成各种信息源、多媒体和多格式信息,从而生成完整、准确、及时和有效的综合信息的过程。信息融合(information fusion)是针对一个系统中使用多种(多个或多类)传感器这一特定问题而展开的一种信息处理的新研究方向,它充分利用不同时间与空间的多传感器信息资源,采用计算机技术对按时序获得的多传感器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,使系统获得比它的各组成部分更优越的性能。

其实,信息融合是人类的一个基本功能,人类可以非常自如地把自己身体中的眼、耳、鼻、舌、皮肤等各个感官所感受到的信息综合起来,并使用先验知识去感知、识别和理解周围的事物和环境。

信息融合技术研究如何加工、协同利用信息,并使不同形式的信息相互补充,以获得对同一事物或目标更客观、更本质认识的信息综合处理技术。经过融合后的系统信息具有冗余性、互补性、实时性等特点。根据信息融合的定义,信息融合技术包括以下方面的核心内容:

① 信息融合是在几个层次上完成对多源信息处理的过程,其中每一个层次都具有不同级别的信息抽象;

② 信息融合包括探测、互联、相关、估计及信息组合;

③ 信息融合的结果包括较低层次上的状态估计和身份估计,以及较高层次上的整个战术态势估计。

因此,多传感器是信息融合的硬件基础,多源信息是信息融合的加工对象,协调优化和综合处理是信息融合技术的核心。

信息融合的基本目标是通过信息组合而不是出现在输入信息中的任何个别元素,推导出

更多的信息，这是最佳协同作用的结果，即利用多个传感器共同操作的优势，提高传感器系统的有效性。用于融合的信息既可以是未经处理的原始数据，也可以是经过处理的数据，处理后的数据既可以是描述某个过程的参数或状态估计，也可以是支持某个命题的证据或赞成某个假设的决策。在融合过程中，需要对这些性质不同、变化多样的信息进行复合推理，以改进分类器的决策能力。

信息融合起初被称为数据融合（data fusion），起源于 1973 年美国国防部资助开发的声呐信号处理系统。在 20 世纪 90 年代，随着信息技术的广泛发展，具有更广义化概念的“信息融合”被提出来。在美国研发成功声呐信号处理系统之后，信息融合技术在军事应用中受到了越来越广泛的青睐。20 世纪 80 年代，为了满足军事领域中作战的需要，多传感器数据融合 MSDF（multi-sensor data fusion）技术应运而生。1988 年，美国将 C³I（command, control, communication and intelligence）系统中的数据融合技术列为国防部重点开发的二十项关键技术之一。由于信息融合技术在海湾战争中表现出的巨大潜力，在战争结束后，美国国防部又在 C³I 系统中加入计算机（computer），开发了以信息融合为中心的 C⁴I 系统。此外，英国陆军开发了炮兵智能信息融合系统（AIDD）和机动与控制系统（WAVELL）。欧洲五国（葡萄牙、意大利、爱尔兰、希腊、西班牙）还制定了联合开展多传感器信号与知识综合系统（SKIDS）的研究计划。法国也研发了多平台态势感知演示验证系统（TSMPPF）。军事领域是信息融合的诞生地，也是信息融合技术应用最为成功的地方。特别是在伊拉克战争和阿富汗战争中，美国军方的信息融合系统都发挥了重要作用。当前，信息融合技术在军事中的应用研究已经从低层的目标检测、识别和跟踪转向了态势评估和威胁估计等高层应用。20 世纪 90 年代以来，传感器技术和计算机技术的迅速发展大大推动了信息融合技术的研究，信息融合技术的应用领域也从军用迅速扩展到了民用。目前，信息融合技术已在许多民用领域取得成效。这些领域主要包括机器人和智能仪器系统、智能制造系统、战场任务与无人驾驶飞机、航天应用、目标检测与跟踪、图像分析与处理、惯性导航、模式识别等。

我国对信息融合理论和技术的研究起步较晚，也是从军事领域和智能机器人的研究开始。20 世纪 90 年代以后，信息融合的研究在我国逐渐形成高潮。不仅一些机构和个人召开了关于数据融合的会议，出版了关于信息融合的专著和译著，国家自然科学基金和国家“863 计划”也将其列入重点支持项目。目前已有许多高校和研究机构正积极开展这方面的研究工作，也分别在军用和民用方面取得了一些成果。但是在信息融合模型、结构、算法等理论方面的原创性成果较少，与世界先进水平还有一定的差距。

1.2 多传感器系统的特点与控制结构

1. 多传感器系统的特点

传感器网络是将大量具有通信和计算能力的微小传感器节点，密集布设在预定的监控区域，形成的智能自治测控网络系统，能够监测、感知和采集各种环境信息或监测对象的信息。传感器网络具有重要的科研价值和广泛的应用前景，它的出现引起了全世界的广泛关注，被公认为是将对 21 世纪产生巨大影响的技术之一。

微电子技术的迅速发展，使得将多种传感器集成一体，制造小型化、低成本、多功能的

传感器成为可能。大量的微电子传感器节点只有通过低功耗的无线电通信技术联成网络才能发挥整体的综合作用。

在通信方式上,无线电、红外、声波等多种无线通信技术的发展为微传感器通信提供了多种选择,并且相应机构也制定了短距离无线电通信标准。

由于传感器节点数量众多,布设一般采用随机投放的方式,传感器节点的位置不能预先确定;在任意时刻,节点间通过无线信道联结,自组织网络拓扑结构;传感器节点间具有很强的协同能力,通过局部的数据采集、预处理及节点间的数据交互来完成全局任务。传感器网络是一种无中心节点的全分布系统。由于大量传感器节点是密集布设的,传感器节点间的距离很短。因此,多跳、对等通信方式比传统的单跳、主从通信方式更适合在传感器网络中使用,由于每跳的距离较短,收发器可以在较低的能量级别上工作。另外,多跳通信方式可以有效地避免在长距离信号传输过程中遇到的信号衰减和干扰等问题。此类传感器系统具有以下显著特点:

- ① 无中心和自组织性;
- ② 动态变化的网络拓扑;
- ③ 受限的传输带宽;
- ④ 节点的能力有限;
- ⑤ 多跳路由;
- ⑥ 安全性差;
- ⑦ 网络的扩展性不强。

2. 多传感器系统的控制结构

集中式结构是以中心处理单元为核心的结构模式,融合中心处理单元直接与各个传感器或它们的处理器联结,其结构有三种,如下所示。

(1) 传感器层融合结构

各传感器都有自己独立的信号处理单元,分别完成特征提取、目标分类与跟踪,然后将目标信息提供给中心处理单元进行融合处理(包括联结、相关、跟踪、评估、分类和嵌入)。由于每个传感器都有各自独立的信号处理单元,从而减少了融合处理的负担,传感器可任意增减而不必改变原来的结构和融合算法。

(2) 中心层融合结构

各传感器的原始数据经滤波、放大和整形等初步处理后直接送入中心处理单元进行信息融合。由于取消了各传感器的信号处理单元,使得结构更为简单,提高了系统的可靠性,降低了成本,同时可对不同传感器的数据进行优化处理,提高了信息的利用率和效率。但中央处理单元的负担过重,对于不同的目标、任务和传感器,融合算法也不同,从而降低了系统的适应能力。

(3) 混合式融合结构

该结构兼有上述两种结构的功能和特点,传感器数据既可直接送入中心处理单元,也可以先经过各自的信号处理单元加工后再送到中央处理器进行融合。该结构的适应性比前两种更强,但显然结构也最复杂。

前述三种结构中的融合(中心)处理单元都是直接与各个传感器或它们的处理器联结,

属于集中式融合结构。在分布式多传感器系统结构中, 分布式融合结构的中心处理单元(全局数据融合中心)不是与传感器直接联结, 而是与局部(本地)信息融合单元相联, 局部数据融合单元融合本地传感器的数据。该结构的优点是组合方便灵活, 可根据需要将系统分成不同层次和不同方式的融合, 每一层次具有自己独立的融合结果, 同时又是全局融合的一个组成部分。但它显然保留了集中式融合结构的某些缺点, 需要两种不同的融合算法, 一个面对传感器数据, 另一个面对局部融合结果。

上述多传感器系统的控制结构的共同点是都有一个中心融合单元, 不管它是集中式的还是分布式的。在无中心的融合结构中, 每一个节点都与传感器或其他节点联结, 输入传感器的测量值和其他节点的融合结果, 并输出本节点的融合结果。由于取消了中心融合单元, 系统输出不再只依赖于中心融合单元, 而是可从任何一个节点输出, 任何一个传感器或节点出错或损坏对整个系统不会产生太大影响。但该结构的通信和融合算法比较复杂, 这是它的不足。该结构中的节点可与其他所有节点联结, 也可以只与部分节点联结。三级并行结构, 分别由“信号级融合”“证据级融合”和“动力学级融合”三级并行构成。这是一种多传感器交互作用的分级感知与控制的多传感器机器人系统结构, 该结构源于“小脑模型计算机”, 它由一个逐级上升的“传感处理”层和逐级下降的“任务分解”控制层, 以及每一层的“世界模型”构成, 曾应用在装配机器人系统中。

1.3 信息融合的主要方法

利用多个传感器所获取的关于对象和环境的全面、完整信息, 主要体现在融合算法上。因此, 多传感器系统的核心问题是选择合适的融合算法。对于多传感器系统来说, 信息具有多样性和复杂性, 因此, 对信息融合方法的基本要求是具有鲁棒性和并行处理能力。此外, 还有方法的运算速度和精度, 与前续预处理系统和后续信息识别系统的接口性能, 与不同技术和方法的协调能力, 对信息样本的要求等。一般情况下, 基于非线性的数学方法, 如果它具有容错性、自适应性、联想记忆和并行处理能力, 则都可以用来作为融合方法。多传感器数据融合虽然未形成完整的理论体系和有效的融合算法, 但在不少应用领域根据各自的具体应用背景, 已经提出了许多成熟并且有效的融合方法。

1.3.1 信息融合的主要模型

近 20 年来, 人们提出了多种信息融合模型, 其共同点或中心思想是在信息融合过程中进行多级处理。现有系统模型大致可以分为两大类: ① 功能型模型, 主要根据节点顺序构建; ② 数据型模型, 主要根据数据提取加以构建。在 20 世纪 80 年代, 比较典型的功能型模型主要有 UK 情报环和 Boyd 控制回路(OODA 环, 即观察、定位、决策、行动, observe-orient-decide-act), 典型的数据型模型则为 JDL 模型, 20 世纪 90 年代又发展了 Dasarathy 模型和综合几种模型提出的新混合模型。下面简单对上述典型模型进行介绍。

1. 情报环

情报处理包括信息处理和信息融合。目前已有许多情报原则, 包括中心控制避免情报被复制; 实时性确保情报实时应用; 系统地开发保证系统输出被适当应用; 保证情报源和处理

方式的客观性;信息可达性;情报需求改变时能够做出响应;保护信息源不受破坏;对处理过程和情报收集策略不断回顾,随时加以修正。这些也是该模型的优点,而缺点是应用范围有限。

UK 情报环把信息处理作为一个环状结构来描述。它包括 4 个阶段:① 采集,包括传感器和人工信息源等初始情报数据;② 整理,关联并集合相关的情报报告,在此阶段会进行一些数据合并和压缩处理,并将得到的结果进行简单打包,以便在融合的下一阶段使用;③ 评估,在该阶段融合并分析情报数据,同时分析者还直接给情报采集分派任务;④ 分发,在此阶段把融合情报发送给用户,通常是军事指挥官,以便决策行动,包括下一步的采集工作。

2. JDL 模型

1984 年,美国国防部成立了数据融合联合指挥实验室,该实验室提出了他们的 JDL 模型,经过逐步改进和推广使用,该模型已成为美国国防信息融合系统的一种实际标准。JDL 模型把数据融合分为 3 级:第 1 级处理为目标优化、定位和识别;第 2 级处理为态势评估,根据第 1 级处理提供的信息构建态势图;第 3 级处理为威胁评估,根据可能采取的行动来解释第 2 级处理结果,并分析采取各种行动的优缺点。过程优化实际是一个反复过程,可以称为第 4 级,它在整个融合过程中监控系统性能,识别并增加潜在的信息源,以及传感器的最优部署。其他的辅助支持系统包括数据管理系统存储和检索、预处理数据及人机界面等。

3. Boyd 控制环

Boyd 控制环(OODA 环),即观察—定位—决策—行动环,它首先应用于军事指挥处理,现在已经大量应用于信息融合。可以看出,Boyd 控制回路使得问题的反馈迭代特性显得十分明显。它包括 4 个处理阶段:① 观察,获取目标信息,相当于 JDL 的第 1 级和情报环的采集阶段;② 定位,确定大方向,认清态势,相当于 JDL 的第 2 级和第 3 级,以及情报环的采集和整理阶段;③ 决策,制订反应计划,相当于 JDL 的第 4 级过程优化和情报环的分发行为,还有诸如后勤管理和计划编制等;④ 行动,执行计划,和上述模型都不相同的是,只有该环节在实用中考虑了决策效能问题。OODA 环的优点是它使各个阶段构成了一个闭环,表明了数据融合的循环性。可以看出,随着融合阶段不断递进,传递到下一级融合阶段的数据量不断减少。OODA 模型的不足之处在于,决策和行动阶段对 OODA 环的其他阶段的影响能力欠缺,并且各个阶段是顺序执行的。

4. 扩展 OODA 模型

扩展 OODA 模型是加拿大的洛克西德马丁公司开发的一种信息融合系统结构。该种结构已经在加拿大哈利法克斯导弹护卫舰上使用。该模型综合了上述各种模型的优点,同时又给并发和可能相互影响的信息融合过程提供了一种机理。用于决策的数据融合系统被分解为一组有意义的高层功能集合,这些功能按照构成 OODA 模型的观察、定位、决策和行动 4 个阶段进行检测评估。每个功能还可以依照 OODA 的各个阶段进一步分解和评估。该模型具有较好的特性,即环境只在观测阶段给各个功能提供信息输入,而各个功能都依照行动阶段的功能行事。此外,观察、定位和决策阶段的功能仅直接按顺序影响其下各自一阶段的功能,但行动阶段不仅影响环境,而且直接影响 OODA 模型中其他各个阶段的瀑布模型。

5. Dasarathy 模型

Dasarathy 模型包括 5 个融合级别，如表 1-1 所示。综上所述可以看出，JDL 模型对中层功能划分清楚，而 Boyd 控制回路则详细解释了高层处理。情报环涵盖了所有处理级别，但是并没有详细描述。而 Dasarathy 模型是根据融合任务或功能加以构建，因此可以有效地描述各级融合行为。

表 1-1 Dasarathy 模型的融合级别

输入	输出	描述
数据	数据	数据级融合
数据	特征	特征选择和特征提取
特征	特征	特征级融合
特征	决策	模式识别和模式处理
决策	决策	决策级融合

6. 混合模型

混合模型综合了情报环的循环特性和 Boyd 控制回路的反馈迭代特性，同时应用了瀑布模型中的定义，每个定义又都与 JDL 和 Dasarathy 模型的每个级别相联系。在混合模型中可以很清楚地看到反馈。该模型保留了 Boyd 控制回路结构，从而明确了信息融合处理中的循环特性，模型中 4 个主要处理任务的描述取得了较好的重现精度。另外，在模型中也可较为容易地查找融合行为的发生位置。

1.3.2 信息融合的主要算法

多传感器数据融合的常用算法基本上可以概括为随机和人工智能两大类，随机类算法有加权平均法、卡尔曼滤波法、多贝叶斯估计法、证据推理法、产生式规则等；而人工智能类算法则有模糊逻辑理论、神经网络、粗集理论、专家系统等。可以预见，神经网络和人工智能等新概念、新技术在多传感器数据融合中将起到越来越重要的作用。

1. 加权平均法

信号级融合方法最简单、最直观的方法是加权平均法，该方法将一组传感器提供的冗余信息进行加权平均，结果作为融合值，该方法是一种直接对数据源进行操作的方法。

2. 卡尔曼滤波法

卡尔曼滤波主要用于融合低层次实时动态多传感器冗余数据。该方法用测量模型的统计特性递推，决定统计意义下的最优融合和数据估计。如果系统具有线性动力学模型，且系统与传感器的误差符合高斯白噪声模型，则卡尔曼滤波将为融合数据提供唯一统计意义下的最优估计。卡尔曼滤波的递推特性使系统处理不需要大量的数据存储和计算。但是，采用单一的卡尔曼滤波器对多传感器组合系统进行数据统计时，存在很多严重的问题，例如：① 在组合信息大量冗余的情况下，计算量将以滤波器维数的三次方剧增，实时性不能满足；② 传感器子系统的增加使故障随之增加，在某一系统出现故障而没有来得及被检测出时，故障会污染整个系统，使可靠性降低。

3. 多贝叶斯估计法

贝叶斯估计为数据融合提供了一种手段,是融合静态环境中多传感器高层信息的常用方法。它使传感器信息依据概率原则进行组合,测量不确定性以条件概率表示,当传感器组的观测坐标一致时,可以直接对传感器的数据进行融合,但大多数情况下,传感器测量数据要以间接方式采用贝叶斯估计进行数据融合。多贝叶斯估计将每一个传感器作为一个贝叶斯估计,将各个单独物体的关联概率分布合成一个联合的、后验的概率分布函数,通过使联合分布函数的似然函数为最小,提供多传感器信息的最终融合值,融合信息与环境的一个先验模型提供整个环境的一个特征描述。

4. 证据推理法

证据推理(D-S推理)是贝叶斯推理的扩充,其3个基本要点是:基本概率赋值函数、信任函数和似然函数。D-S方法的推理结构是自上而下的,分3级。第1级为目标合成,其作用是把来自独立传感器的观测结果合成为一个总的输出结果;第2级为推断,其作用是获得传感器的观测结果并进行推断,将传感器观测结果扩展成目标报告,这种推理的基础是一定的传感器报告以某种可信度在逻辑上会产生可信的某些目标报告;第3级为更新,各种传感器一般都存在随机误差,所以,在时间上充分独立地来自同一传感器的一组连续报告比任何单一报告都可靠。因此,在推理和多传感器合成之前,要先组合(更新)传感器的观测数据。产生式规则采用符号表示目标特征和相应传感器信息之间的联系,与每一个规则相联系的置信因子表示它的不确定性程度。当在同一个逻辑推理过程中,两个或多个规则形成一个联合规则时,可以产生融合。应用产生式规则进行融合的主要问题是每个规则的置信因子的定义与系统中其他规则的置信因子相关,如果系统中引入新的传感器,需要加入相应的附加规则。

5. 其他方法

模糊逻辑是多值逻辑,通过指定一个0到1之间的实数表示真实度,相当于隐含算子的前提,允许将多个传感器信息融合过程中的不确定性直接表示在推理过程中。如果采用某种系统化的方法对融合过程中的不确定性进行推理建模,则可以产生一致性模糊推理。与概率统计方法相比,逻辑推理存在许多优点,它在一定程度上克服了概率论所面临的问题,它对信息的表示和处理更加接近人类的思维方式,它一般比较适合于在高层次上的应用(如决策)。但是,逻辑推理本身还不够成熟和系统化。此外,由于逻辑推理对信息的描述存在很大的主观性,所以,信息的表示和处理缺乏客观性。模糊集合理论对于数据融合的实际价值在于它外延到模糊逻辑,模糊逻辑是一种多值逻辑,隶属度可视为一个数据真值的不精确表示。在MSF过程中,存在的不确定性可以直接用模糊逻辑表示,然后,使用多值逻辑推理,根据模糊集合理论的各种演算对各种命题进行合并,进而实现数据融合。

神经网络具有很强的容错性,以及自学习、自组织及自适应能力,能够模拟复杂的非线性映射。神经网络的这些特性和强大的非线性处理能力,恰好满足了多传感器数据融合技术处理的要求。在多传感器系统中,各信息源所提供的环境信息都具有一定程度的不确定性,对这些不确定性信息的融合过程实际上是一个不确定性推理过程。神经网络根据当前系统所接受的样本相似性确定分类标准,这种确定方法主要表现在网络的权值分布上。同时,可以采用神经网络特定的学习算法来获取知识,得到不确定性推理机制。利用神经网络的信号处理能力和自动推理功能,即可实现多传感器数据融合。

常用的数据融合方法及特性如表1-2所示。通常使用的方法依具体的应用而定,由于各种方法之间的互补性,实际上常将两种或两种以上的方法组合,进行多传感器数据融合。

表 1-2 常用的数据融合方法及特性

融合方法	运行环境	信息类型	信息表示	不确定性	融合技术	适用范围
加权平均	动态	冗余	原始读数值		加权平均	低层数据融合
卡尔曼滤波	动态	冗余	概率分布	高斯噪声	系统模型滤波	低层数据融合
贝叶斯估计	静态	冗余	概率分布	高斯噪声	贝叶斯估计	高层数据融合
统计决策理论	静态	冗余	概率分布	高斯噪声	极值决策	高层数据融合
证据推理	静态	冗余互补	命题	逻辑推理		高层数据融合
模糊推理	静态	冗余互补	命题	隶属度	逻辑推理	高层数据融合
神经网络	动/静态	冗余互补	神经元输入	学习误差	神经网络	低/高层数据融合
产生式规则	动/静态	冗余互补	命题	置信因子	逻辑推理	高层数据融合

1.3.3 当前的研究热点

尽管信息融合在军事领域的地位始终突出，但是随着信息融合技术的发展，其应用领域得以迅速扩展。信息融合已成为现代信息处理的一种通用工具和思维模式。目前以模糊理论、神经网络、证据推理等为代表的所谓的智能方法占有相当大的比例，原因是这些方法兼有对问题描述的非建模优势和语言化描述与综合优势。从整体上看，近年来，随着人工智能技术的发展，信息融合技术有朝着智能化、集成化发展的趋势，一般研究动向包括：

- ① 研究并完善实用的算法分类和层次划分方法；
- ② 研究并发展实用的融合系统测试和评估方法；
- ③ 建立系统设计和算法选择的工程指导方针；
- ④ 编撰信息融合辞典，规范领域术语和定义；
- ⑤ 发展并完善 JDL 模型，以解决现有 JDL 所不能处理的多图像融合及合成传感器（complex meta sensors）等问题；
- ⑥ 分布式信息融合方法也受到越来越多学者的关注。

1.4 信息融合的应用案例

随着多传感器数据融合技术的发展，应用的领域也在不断扩大，多传感器融合技术已成功地应用于众多的研究领域。多传感器数据融合作为一种可消除系统的不确定因素、提供准确的观测结果和综合信息的智能化数据处理技术，已在军事、工业监控、智能检测、机器人、图像分析、目标检测与跟踪、自动目标识别、生物医学工程、智能交通系统等领域获得了普遍关注和广泛应用。

1.4.1 信息融合在轨道交通领域中的应用

1. 信息融合在轨道交通车辆故障诊断中的应用

轨道交通车辆故障诊断系统综合了机械、电子、自动控制、信号处理、网络和计算机等多种技术，车辆一旦发生故障，将会危及人员生命财产安全，经济和社会损失惨重。传统的