

多源动态系统融合估计

潘 泉 王小旭 徐林峰 梁彦 周 林 著



科学出版社

多源动态系统融合估计

潘 泉 王小旭 徐林峰 梁 彦 周 林 著



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书针对目标跟踪在国防应用中的迫切需求,围绕多传感器多信源下目标跟踪中涉及的时空配准、多速率、状态约束、多模态、非线性、状态与模型参数耦合、传感器管理等相关问题,开展动态系统估计、辨识与融合的理论研究,包括多源信息空间配准的系统偏差在线估计、多源信息时间配准的多速率估计、状态约束动态系统建模与估计、状态演化多模态的马尔可夫跳变系统估计、非线性动态系统的确定采样型高斯估计、基于期望最大化的联合估计与辨识及基于事件驱动的单传感器量测管理。

本书可作为高等院校控制科学与工程类专业本科生和研究生的参考书,也可作为自动控制、导航、信息处理、系统工程及航空、航天、航海、工业过程控制等相关专业研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多源动态系统融合估计/潘泉等著. —北京: 科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-056872-4

I. ①多… II. ①潘… III. ①目标跟踪-动态系统-系统分析
IV. ①TN953

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 048935 号

责任编辑: 李 萍 赵鹏利 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2018 年 3 月第一次印刷 印张: 20

字数: 403 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

动态随机系统估计、辨识与融合是研究目标跟踪的基础理论技术。本书紧密围绕目标跟踪在国防应用中的迫切需求,从多传感器网络化的角度入手,系统总结和论述作者在时空配准、多速率、状态约束、多模态、非线性、状态与模型参数耦合、传感器管理等方面的研究成果。本书研究工作进一步丰富和发展了估计理论与信息融合理论,探索了多源动态系统融合估计及应用的一些研究新热点,是目前动态系统估计与多源信息融合领域的一般性和基础性研究成果,并面向目标跟踪实际应用进行了大量仿真验证。

全书共 8 章。第 1 章为绪论,包括多源信息融合的定义、功能模型、系统结构和融合级别等基础知识,以及多源融合估计的一般性框架、基本方法和基础问题等;第 2 章为系统偏差在线估计,提出未知输入驱动下的系统偏差广义建模策略,设计解耦滤波器,有效解决了在无任何先验知识时突变系统偏差估计问题;第 3 章为多速率估计,重点研究量测缺失下多速率最小方差滤波和最小方差观测器的建模及多速率残差生成器的建模,通过把量测缺失引起的不确定性表征为估计误差系统的输入型扰动,揭示了多速率、传感器模型、因果约束、量测缺失概率和滤波性能的内在联系,并给出了量测缺失下多速率建模与估计方法在目标跟踪的有效实现;第 4 章为状态约束动态系统建模与估计,分析线性等式约束下状态的线性最小均方误差估计,论证投影法与基于含约束动态模型的状态估计在数学上等价的充分条件,讨论线性等式约束的扩展形式;第 5 章为状态演化多模态的马尔可夫跳变系统估计,从马尔可夫跳变系统建模与估计方法入手,研究复杂特性与目标运动多模态耦合下的机动目标跟踪技术,设计随机参数跳变、多步随机延迟、有色噪声和非线性等马尔可夫系统的最小均方误差估计;第 6 章为非线性动态系统的确定采样型高斯估计,从状态后验概率演化角度入手,系统论证线性系统卡尔曼估计是贝叶斯估计的最优解析闭环解,揭示高斯估计为解决非线性动态系统估计问题提供了一般性和通用型的最优理论框架,确定采样型估计仅是高斯估计框架发展而来的一类次优解或执行特例等,综述目前高斯估计的确定采样型经典实现和新发展;第 7 章为基于期望最大化的联合估计与辨识,提出在期望最大化算法统一框架下处理联合跟踪与辨识问题的新观点,概述各种期望最大化算法在联合跟踪领域的理论发展现状,并给出了基于期望最大化算法的目标跟踪应用实例,最后对期望最大化算法在联合跟踪领域的未来研究重点进行了展望;第 8 章为基于事件驱动的传感器量测管理,论述事件驱动的基本思想,概述事件触发机制,并推导

基于事件驱动的状态估计框架。

本书获得如下基金项目资助：国家自然科学基金重大项目 (61790552)、国家自然科学基金重点项目 (61135001)、国家自然科学基金面上项目 (61573287) 和青年项目 (61203234)。本书的完成离不开团队各位老师和研究生的支持与帮助，特别感谢兰华、耿航、杨衍波、宋宝和李朝凤等在本书写作过程中无私付出的辛勤劳动，感谢麻争娅和刘孟然等研究生在校勘书稿中所做的工作！

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 多源信息融合概况	4
1.2.1 定义	4
1.2.2 功能模型	5
1.2.3 系统结构	9
1.2.4 融合级别	12
1.3 多源动态系统融合估计概述	14
1.3.1 一般性框架	15
1.3.2 发展现状	18
参考文献	23
第 2 章 系统偏差在线估计	26
2.1 引言	26
2.2 未知输入驱动下的系统偏差估计	30
2.2.1 系统偏差的广义建模	30
2.2.2 伪量测模型	32
2.2.3 解耦滤波器的设计	33
2.2.4 仿真分析	37
2.3 基于粒子群优化的系统偏差估计	43
2.3.1 概率数据关联	45
2.3.2 群体智能算法	45
2.3.3 粒子群目标函数的构造	47
2.3.4 系统偏差估计策略	49
2.3.5 仿真分析	53
2.4 本章小结	58
参考文献	59
附录	62
第 3 章 多速率估计	65
3.1 引言	66

3.1.1	网络控制系统的多速率估计	66
3.1.2	多速率多传感器系统建模与估计	67
3.1.3	多速率多传感器系统故障检测	68
3.2	量测缺失下多速率多传感器系统建模与估计	70
3.2.1	问题描述	70
3.2.2	LMMSE 意义下多速率滤波器设计	72
3.2.3	仿真分析	79
3.3	未知扰动下多速率多传感器系统故障检测	81
3.3.1	问题描述	82
3.3.2	多速率残差生成器	83
3.3.3	左特征向量解耦残差	85
3.3.4	残差评价	87
3.3.5	仿真分析	87
3.4	噪声与扰动并存下多速率多传感器系统故障检测	92
3.4.1	问题描述	92
3.4.2	多速率最优观测器设计	93
3.4.3	多速率残差	98
3.4.4	仿真分析	99
3.5	本章小结	104
	参考文献	104
	附录	107
第 4 章	状态约束动态系统建模与估计	114
4.1	引言	115
4.2	问题描述	117
4.3	线性等式约束下动态系统的数学建模	119
4.3.1	状态空间分解	119
4.3.2	模型构建	120
4.3.3	模型构建的几何解释	122
4.3.4	隐含线性等式约束的模型性质	123
4.4	线性等式约束下的系统状态估计	124
4.4.1	线性等式约束滤波	125
4.4.2	伪量测法	129
4.4.3	估计投影法	130
4.5	线性等式约束下动态系统模型的扩展形式	131
4.6	仿真分析	132

4.6.1 基于道路信息的地面目标跟踪	132
4.6.2 编队飞行目标的跟踪问题	136
4.7 本章小结	138
参考文献	139
第 5 章 状态演化多模态的马尔可夫跳变系统估计	142
5.1 引言	143
5.2 随机参数马尔可夫跳变系统的 LMMSE 估计	144
5.2.1 系统建模	144
5.2.2 估计框架设计	146
5.2.3 仿真分析	151
5.3 有色噪声非线性马尔可夫跳变系统的高斯估计	157
5.3.1 系统建模	158
5.3.2 估计框架设计	159
5.3.3 仿真分析	163
5.4 多步随机延迟马尔可夫跳变系统的 LMMSE 估计	165
5.4.1 系统建模	165
5.4.2 估计框架设计	167
5.4.3 仿真分析	175
5.5 本章小结	181
参考文献	182
附录	184
第 6 章 非线性动态系统的确定采样型高斯估计	192
6.1 引言	192
6.2 贝叶斯估计	196
6.2.1 最优滤波	197
6.2.2 最优平滑	199
6.3 线性动态系统的贝叶斯估计解析实现	200
6.3.1 Kalman 滤波	203
6.3.2 Kalman 平滑	207
6.4 非线性动态系统的贝叶斯估计近似实现	209
6.4.1 高斯滤波	210
6.4.2 高斯平滑	212
6.4.3 高斯混合估计	216
6.5 高斯估计的一般性及确定采样实现	221
6.6 噪声时空相关的确定采样高斯估计	223

6.6.1 噪声相关	223
6.6.2 有色量测噪声	228
6.7 高斯估计的通用性	239
6.8 仿真分析	240
6.9 本章小结	242
参考文献	242
附录	246
第 7 章 基于期望最大化的联合估计与辨识	248
7.1 引言	248
7.2 贝叶斯联合跟踪问题	251
7.3 联合跟踪的期望最大化解决框架	252
7.3.1 EM 算法	252
7.3.2 EM 算法的收敛性	256
7.3.3 EM 算法的初始化	256
7.3.4 EM 算法的扩展	257
7.3.5 EM 算法的其他方面	258
7.3.6 EM 算法的性能特点	258
7.4 联合跟踪的期望最大化算法研究概况	259
7.4.1 单传感器目标跟踪	261
7.4.2 多传感器多目标跟踪	263
7.4.3 传感器网络分布式目标跟踪	264
7.4.4 其他联合跟踪方法	265
7.5 OTHR 多路径目标跟踪	266
7.5.1 问题描述	266
7.5.2 目标-量测关联与量测-模式关联的辨识	267
7.5.3 仿真分析	269
7.6 量测偏差下的目标跟踪	272
7.6.1 问题描述	272
7.6.2 量测偏差辨识	272
7.6.3 仿真分析	276
7.7 本章小结	277
参考文献	278
第 8 章 基于事件驱动传感器量测管理	285
8.1 引言	285
8.2 事件驱动触发机制概述	287

8.2.1 确定性事件触发	288
8.2.2 随机事件触发	289
8.3 基于事件驱动的状态估计	291
8.3.1 基于确定性事件触发机制的状态估计	291
8.3.2 基于随机事件触发机制的状态估计	297
8.4 仿真分析	303
8.5 性能分析	305
8.6 本章小结	307
参考文献	307

第1章 绪 论

1.1 引 言

多源信息融合 (multi-source information fusion) 的研究最早可追溯到第二次世界大战末期, 当时出现了一个综合利用雷达和光学两种信息的系统, 但此时多源信息融合并未成为一门独立的学科。之后, 1964 年 Sittler 发表了数据互联的研究论文^[1]。而真正的多源信息融合理论和技术研究工作始于 1973 年美国开展的多声呐信号融合系统的研究, 包括可自动探测出敌方潜艇位置的信息融合系统及随后开发的战场管理和目标检测系统, 进一步证实了信息融合的可行性和有效性, 这些尝试的成功促进了多源信息融合学科的形成和发展。20 世纪 70 年代末, 基于多源信息综合意义的融合开始出现于各类公开出版的技术文献中。随后, 经过从 20 世纪 80 年代初到现在持久的研究热潮, 多源信息融合理论和技术进一步得到了飞速发展, 多源信息融合逐渐作为一门独立的学科, 被成功应用于军事指挥自动化系统、战略预警与防御、多目标跟踪与识别、精确制导武器等军事领域, 并逐渐辐射到遥感监测、医学诊断、电子商务、无线通信、工业过程监控和故障诊断等众多民用领域^[2-5]。

随着当代科学技术的飞速发展, 人类已经进入信息极度丰富的时代, 信息时代的明显特征之一是信息爆炸。随着社会信息化程度的不断提高, 传感器性能获得了很大提高, 面向各种应用背景的不同尺度、不同模态多传感器系统大量涌现, 信息来源多样异构。现代战争威胁的多样化和复杂化对传统数据或信息处理系统也提出了更高的要求。此外, 信息表现形式的多样性、信息数量的巨大性、信息关系的复杂性以及信息处理的及时性等, 都进一步需要对多源信息进行有效融合处理的新型理论和技术, 促进多源信息融合逐渐向多学科交叉方向发展, 涉及信号处理、概率统计、信息论、模式识别、人工智能和模糊数学等领域^[6]。

多源信息融合理论和技术在实际工程中应用广泛。在军事领域, 远程预警系统是一种典型的以信息融合技术为基础的大尺度感知系统, 其任务是在远程、超远距离上对弹道导弹、战略轰炸机等威胁目标进行监视与探测, 以便早期发现并组织拦截威胁目标, 其感知平台 (如远程预警雷达、预警卫星和预警机等) 在很大跨度的时间、空间和频谱上进行探测和协作, 被探测目标具有高机动、高速度、强隐身和强干扰对抗等特性, 环境背景复杂多变, 并受季节、天气、大气、电离层、等离子体、光照、时间、地形和视角等多种因素的影响。远程预警系统需要综合利用多个

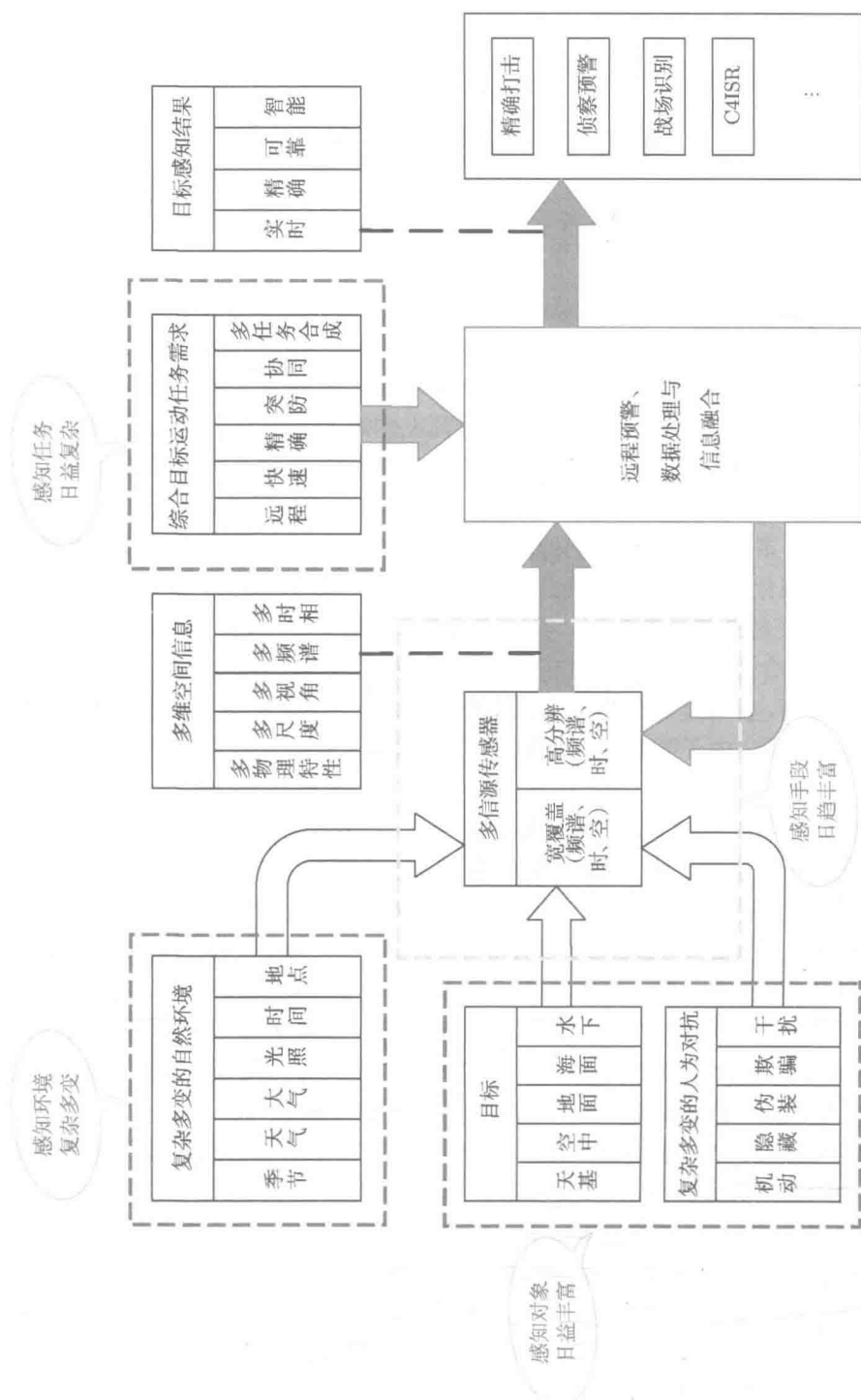


图 1.1 远程预警系统协同探测与处理结构示意图

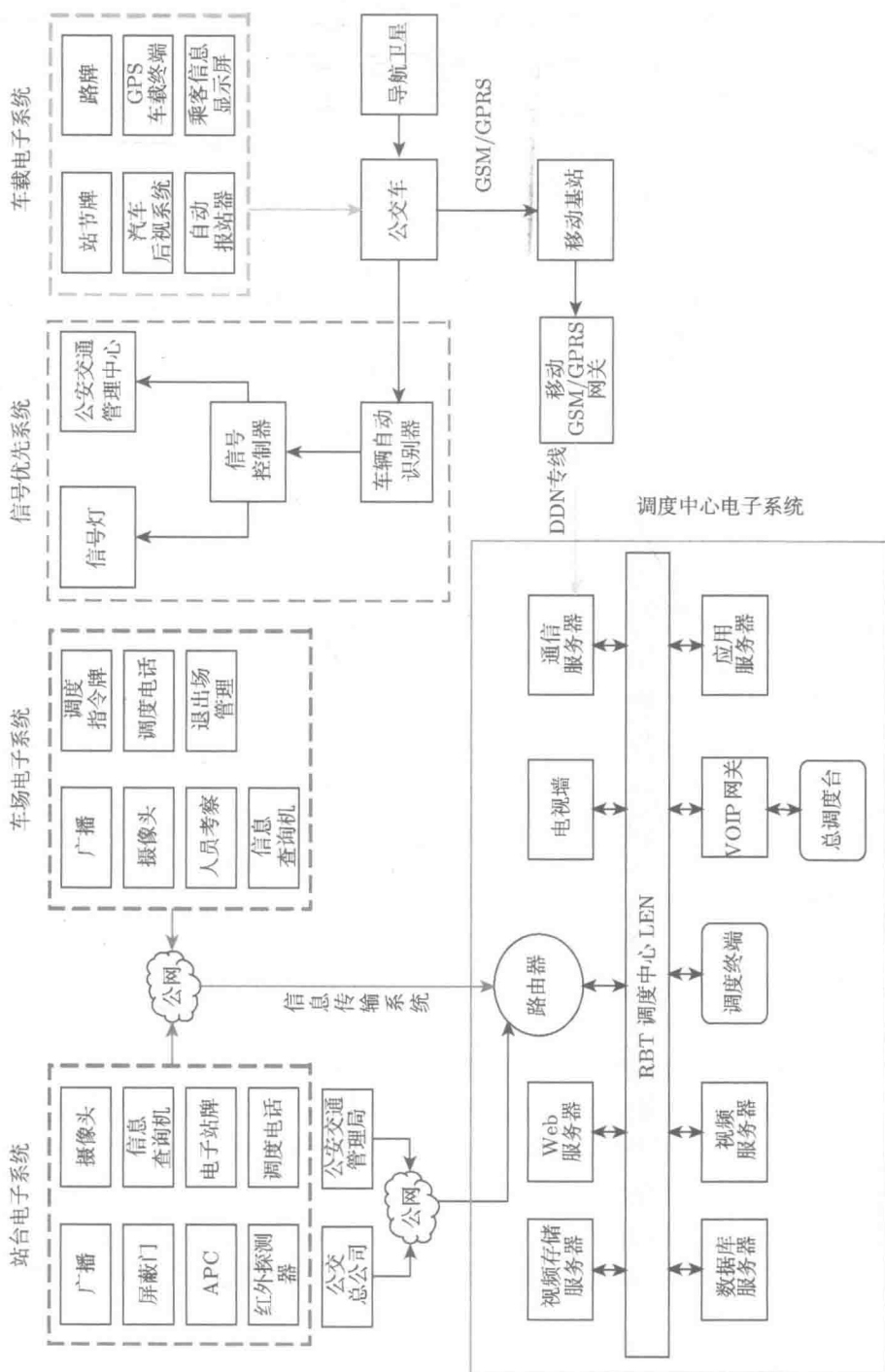


图1.2 智能交通系统协同探测与处理结构示意图

传感器的观测信息,实时估计目标的运动状态,辨识目标的身份、类别、态势、威胁和环境参数。远程预警系统协同探测与处理结构示意图如图 1.1 所示。在民用领域,智能交通系统通过对关键基础理论模型的研究,有效地运用信息、通信、自动控制和系统集成等技术,实现了大范围内实时、准确和高效的交通运输管理。该系统利用摄像头、射频识别技术、电磁感应等传感器进行组网协作实现车辆识别和运动状态估计,提供道路车辆的流量、路况、违章、突发事故和调度等信息。智能交通系统协同探测与处理结构示意图如图 1.2 所示。

1.2 多源信息融合概况

1.2.1 定义

目前,在信息融合领域,人们经常提及与信息融合类似的称谓,如数据融合和传感器融合等。实际上,这几个概念之间既有差别又密切相关。一般来说,数据融合是主要针对各类型数据形式化表达的信息融合;当需要融合的信息是传感器的量测数据时,数据融合也可以称为传感器融合。信息融合包含数据融合和传感器融合,信息融合较数据融合和传感器融合更加宽泛,其融合的信息除了数据之外,还可以扩大到图像、音频、符号、知识和情报等其他信息。目前在大多数研究中,对这几个概念已经不再进行明确区分,但信息融合更通用化,因此本书统一采用信息融合这一概念。

尽管人们对多源信息融合的研究已经有很长的历史,但信息融合是一门新兴的交叉学科,所涉及的内容具有广泛性和多样性,各行各业会按自己的理解给出不同的定义,且在不同的历史时期人们所关注的焦点不同,因此要给出信息融合统一和公认的定义很困难。目前能被大多数研究者接受的信息融合的定义,是由美国三军组织实验室理事联合会 (Joint Directors of Laboratories, JDL) 提出来的^[7-10],在不同的时期 JDL 从军事应用的角度给出了以下几种信息融合定义。

定义 1.1 JDL 早期定义:对来自单源和多源的数据和信息进行关联、相关和组合,以获得目标精确的位置和身份估计,完整、及时地评估战场态势和威胁。

定义 1.2 JDL 修正定义:信息融合就是一种多层次、多方面的处理过程,主要完成对多源数据的自动检测、关联、相关、组合和估计等处理,从而提高状态和身份估计的精度以及对战场态势和威胁的重要程度进行适时完整的评价。

定义 1.3 JDL 当前定义:信息融合是一个数据或信息综合过程,用于估计和预测实体状态。

从 JDL 对信息融合定义的演变过程可以看出,JDL 始终把信息融合看作是一个信息综合过程,但信息融合所适用的范围却越来越宽,如将对目标位置和身份的

估计推广到更广义的状态估计。另外,信息融合的定义越来越简化,但包含的内容越来越宽。

除了强调信息融合是一个过程外,一些学者也从信息融合实现的功能和目的方面对其进行了定义。

定义 1.4 Hall 等^[5]的定义:信息融合是组合来自多个传感器的数据和相关信息,以获得比单个独立传感器更详细更精确的推理。

定义 1.5 Wald^[11]的定义:信息融合是一个用来表示如何组合或联合来自不同传感器数据的方法和工具的通用框架,其目的是获得更高质量的信息。

定义 1.6 Li^[12]的定义:信息融合是为了某一目的,对来自多个实体的信息进行组合。

定义 1.7 何友等^[2]的定义:信息融合就是将来自多个传感器或多源的信息进行综合处理,从而得到更为准确、可靠的结论。

定义 1.8 韩崇昭等^[3]的定义:信息融合就是一种多层次、多方面的处理过程,包括对多源数据进行检测、相关、组合和估计,从而提高状态和身份估计的精度,以及对战场态势和威胁的重要程度进行适时完整的评价。

1.2.2 功能模型

功能模型是从融合过程的角度,表述信息融合系统及其子系统的主要功能和数据库的作用,以及系统工作时各组成部分之间的相互作用关系。在信息融合功能模型的发展过程中,JDL 模型及其演化版本占据十分重要的地位,是目前信息融合领域使用最为广泛、认可度最高的一类经典的功能模型,并被广泛应用于军事和民用领域^[4,13,14]。

1. JDL 模型

1984 年,美国国防部成立数据融合联合指挥实验室,提出了 JDL 模型,并逐步改进和推广使用,已成为美国国防信息融合系统的一种实际标准。最初的 JDL 模型包括第 1 级处理即目标位置/身份估计,第 2 级处理即态势评估,第 3 级处理即威胁估计,第 4 级处理即过程优化。到 1992 年,信息预处理模块又被引入 JDL 模型中,从而形成了信息融合功能模型的基本结构,如图 1.3 所示。

信息预处理功能主要指初级过滤,它自动控制进入融合系统的数据流量,即根据观测时间、报告位置、数据或传感器类型、信息的属性和特征来分选和归并数据,以控制进入融合中心的信息量。此外,信息预处理功能还将数据进行分类,并按后续处理的优先次序进行排列。

第 1 级处理为目标位置/身份估计,由数据校准、互联、跟踪和身份融合组成。数据校准将各传感器的观测值变换为公共坐标系,包括坐标变换、时间变换和单位

转换等; 互联将各传感器的数据分为一系列组, 每一组代表某一目标; 跟踪是融合各传感器信息, 获得最佳融合航迹; 身份融合是综合与身份有关的数据进行身份识别, 采用的技术主要有聚类方法、神经网络、模板法、D-S (Dempster-Shafer) 证据理论和贝叶斯 (Bayes) 推理方法等。

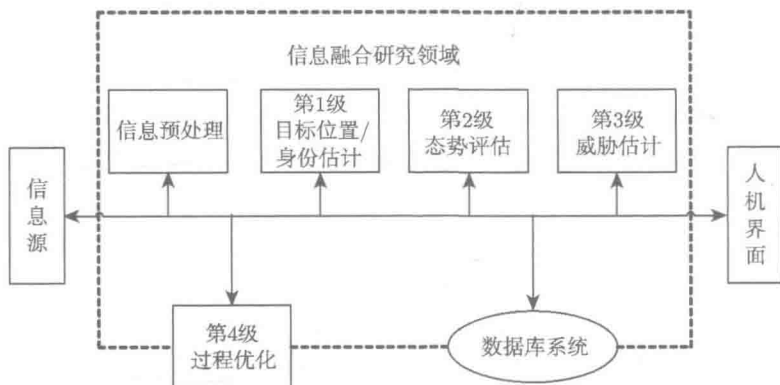


图 1.3 JDL 模型示意图

第 2 级处理为态势评估, 包括态势的提取和评估。首先, 由不完整的数据集合建立一般化的态势表示, 对前几级处理产生的兵力分布情况给出一个合理的解释。然后, 通过对复杂战场环境的正确分析与表达, 导出我方和敌方兵力的分布推断, 给出意图、行动计划和结果。

第 3 级处理为威胁估计, 包括确定我方和敌方力量的薄弱环节, 我方和敌方的编成估计、危险估计、临近事件的指示和预警估计、瞄准计算和武器分配等。

第 4 级处理为过程优化, 主要包括采集管理及系统性能评估功能。采集管理用于控制融合的数据收集, 包括传感器的选择、分配及传感器工作状态的优选和监视等。传感器的任务分配要求预测动态目标的未来位置, 计算传感器的指向角, 并规划观测和最佳资源利用。系统性能评估用于进行系统的性能评估及有效性度量。此外, 过程优化还进行各融合功能的需求分析, 以及对通信设施、武器平台等资源进行管理。

此外, 数据库管理系统也是信息融合系统的重要组成部分。

信息融合系统并没有刻意去规定数据融合级别的严格顺序, 这一点从图 1.3 可以看出, 即模型构造是以信息总线形式而不是用流程结构来表示。但是一般来讲, 系统设计者都习惯假定一个处理顺序。很明显, 在应用中需要用户来规定某种顺序, 以便解决不同级别、不同层次系统的各种问题。在 JDL 模型中, 信息融合级是按照一个有序的流程执行的。但在实际环境中, 信息融合系统的各个级别中会有大量的并发行动, 尤其在第 2 级、第 3 级和第 4 级中, 这也是 JDL 模型没能描述

清楚的地方。

2. JDL-User 模型

2002 年, Blasch 在基本的 JDL 模型基础上提出了更符合工程实际, 也更具操作性的 JDL-User 模型^[13], 如图 1.4 所示。

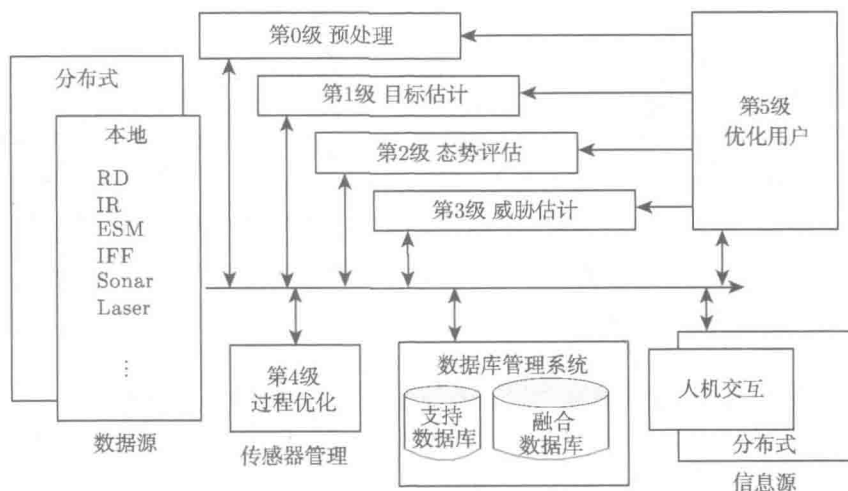


图 1.4 JDL-User 模型

在 JDL-User 模型中, 信息融合分为六级, 下面对各级别的功能进行简要介绍。

第 0 级为预处理过程, 在像素/信号级数据关联的基础上估计、预测信号/目标的状态。

第 1 级为目标估计过程, 要考虑的第一类问题包括目标状态和属性估计两个方面。在关联量测与跟踪的基础上, 估计目标的状态, 如空间位置和速度; 对传感器数据进行特征提取和处理, 估计目标的身份。其中, 目标状态估计即传统 JDL 中的位置融合。

要考虑的第二类问题是属性融合, 也称为身份融合。属性融合可分为数据级、特征级和决策级。在数据级融合中, 将每一传感器的属性观测数据进行融合, 提取特征矢量, 进一步转变成身份报告。数据级属性融合常用的方法有模板法、聚类分析、自适应神经网络等。在特征级融合中, 首先将每一传感器的属性观测数据进行特征矢量提取, 然后使用神经网络或聚类算法将这些特征矢量进行融合, 得到融合目标身份报告。决策级融合则是先将每个传感器根据各自的属性量测数据进行目标身份的初步报告, 可使用数据级和特征级的算法来完成, 再进一步应用决策级融合技术, 如经典推理、贝叶斯推理、D-S 证据推理和广义证据处理等, 将各个传感器提供的目标身份的初步报告进行融合, 完成目标身份