

不确定信息表示与融合技术

王晓丹 宋亚飞 史朝辉 编著



科学出版社

不确定信息表示与融合技术

王晓丹 宋亚飞 史朝辉 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍不确定信息表示与融合的基本理论与若干技术, 主要内容包括绪论、模糊集理论基础、直觉模糊集理论基础、证据理论、基于直觉模糊集的不确定信息描述、冲突证据的加权平均组合方法、基于可靠性评估的证据组合方法、区间不确定信息融合方法、时域不确定信息融合方法。整体内容力求系统性和实用性, 部分内容体现了当前该领域的最新研究成果。

本书可供信息处理与融合、决策科学等专业高年级本科生、研究生及教师学习和参考, 也可供理工类、经管类等相关领域的科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

不确定信息表示与融合技术/王晓丹, 宋亚飞, 史朝辉编著. —北京: 科学出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-03-055231-0

I. ①不… II. ①王… ②宋… ③史… III. ①信息处理—研究 ②信息融合—研究 IV. ①G202

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 274144 号

责任编辑: 杨 丹 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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2018 年 1 月第一次印刷 印张: 13 3/4

字数: 277 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



王晓丹，博士，空军工程大学教授、博士生导师。主要研究方向：模式识别、机器学习、信息融合。空军高层次科技人才，第三届军队院校计算机教学协作联席会委员，享受三秦人才津贴。国家自然科学基金评审专家，陕西省信号处理学会理事，陕西省计算机学会人工智能与模式识别专业委员会委员，陕西省科技计划项目评审专家。主持完成国家自然科学基金项目2项，国防预研、军内科研项目等多项。在国内外重要学术刊物和国际、国内学术会议上发表学术论文150余篇，被SCI、EI等收录80余篇，出版著作、教材3部。获得军队优秀教学成果三等奖。获军队院校育才奖银奖2次，荣立三等功2次。

前 言

随着科学技术的发展,信息在人们生活中越来越重要,人们对信息概念的理解也不断加深。不确定性是信息的固有属性。通过融合的手段在不同信息层次上将关系复杂的多源信息去伪、合并和重构,进而得到更加准确、完备的信息,减小观测事物的不确定性,这种信息处理方法就是多传感器信息融合。随着研究的深入,信息融合已发展成为与计算机科学、现代信息处理技术、信号处理、自动控制理论、概率统计及人工智能等多学科密切相关的前沿学科。

虽然证据理论、贝叶斯理论、模糊集理论、可能性理论、粗糙集、随机集等理论的发展不断丰富了不确定信息的表示、处理、融合方法,但由于单一方法的局限性,信息融合中新问题的解决将越来越依赖于多种理论、方法的结合。从对不确定信息处理方法进行的对比性分析结果中可知,证据理论和模糊集理论相结合基本上可以处理所有不确定信息。直觉模糊集作为模糊集的一种推广形式,在不确定信息的表达和处理方面比模糊集更具优势,且具有很好的结合性,因此证据理论和直觉模糊集相结合将更有利于不确定信息的处理和融合,可以为决策层融合提供新的不确定信息表示、处理及融合方法,具有重要的理论意义和应用价值。

本书包含了作者近年的研究工作成果,如针对冲突证据的组合、证据可靠性评估、区间不确定信息融合及时域不确定信息融合等问题。本书以决策层目标融合识别为背景,提出了相应解决方案和方法。

本书的部分内容借鉴引用了国内外专家和学者的最新研究成果,同时本书的出版得到了作者所在单位空军工程大学防空反导学院领导和同事、科学出版社相关领导和责任编辑的关心与支持,在此一并向他们致以崇高的敬意和诚挚的谢意。

感谢国家自然科学基金项目(61273275、60975026、61573375)对本书出版的资助支持。

限于作者水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请广大读者批评指正,邮件可发送至 afeu_w@163.com 或 afeu_wang@163.com。

作 者

2017 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 信息与信息融合	1
1.2 信息融合模型	2
1.3 信息融合的应用及发展	8
1.4 不确定信息处理方法及发展	10
1.4.1 不确定信息处理方法综述	10
1.4.2 证据理论研究进展	12
第 2 章 模糊集理论基础	17
2.1 引言	17
2.2 模糊集及基本运算	18
2.2.1 模糊集的定义	18
2.2.2 模糊集的表示方法	21
2.2.3 典型隶属度函数	23
2.2.4 模糊集的基本运算	26
2.3 模糊集的分解定理	29
2.3.1 α 截集	29
2.3.2 支撑集和核	31
2.3.3 数乘模糊集	32
2.3.4 分解定理	32
2.4 模糊度与贴近度	34
2.4.1 模糊度	34
2.4.2 贴近度	40
2.5 模糊关系及其运算	41
2.5.1 模糊关系	41
2.5.2 模糊关系合成运算	43
2.6 扩张原理与模糊数	45
2.6.1 扩张原理	45
2.6.2 凸模糊集与模糊数	48

第 3 章 直觉模糊集理论基础	53
3.1 引言	53
3.2 直觉模糊集及其基本运算	54
3.2.1 直觉模糊集的定义	54
3.2.2 直觉模糊集基本运算	55
3.2.3 直觉模糊集的截集	58
3.3 直觉模糊数及其扩展运算	58
3.3.1 直觉模糊数	58
3.3.2 直觉模糊数扩展运算	59
3.4 直觉模糊关系及其合成运算	60
3.4.1 直觉模糊关系	60
3.4.2 直觉模糊关系合成运算	62
第 4 章 证据理论	66
4.1 引言	66
4.2 证据理论的数学基础	67
4.2.1 概率模型	67
4.2.2 上下概率模型	68
4.2.3 Dempster 模型	69
4.3 D-S 证据理论基础	71
4.3.1 基本概念	72
4.3.2 证据更新规则	75
4.3.3 证据理论中的决策	78
4.4 证据理论遇到的主要问题	80
4.4.1 Zadeh 悖论	80
4.4.2 “一票否决”问题	82
4.4.3 “焦元爆炸”问题	83
4.4.4 Dempster 组合规则改进方法	83
第 5 章 基于直觉模糊集的不确定信息描述	85
5.1 引言	85
5.2 直觉模糊集与证据理论	85
5.3 基于可能度的直觉模糊数排序	86
5.3.1 计分函数法	86
5.3.2 基于可能度的直觉模糊数排序方法	88
5.4 基于证据组合的直觉模糊集成运算	91
5.4.1 加权集成运算规则	91

5.4.2	基于证据组合的直觉模糊集成运算规则	94
5.5	直觉模糊不确定性测度	96
5.5.1	直觉模糊熵	97
5.5.2	非精确度度量	102
5.5.3	广义不确定性测度	106
第 6 章	冲突证据的加权平均组合方法	112
6.1	引言	112
6.2	基于证据相关系数的冲突度量	112
6.2.1	现有冲突度量方法分析	112
6.2.2	基于相关系数的冲突度量方法	119
6.3	基于信任度和虚假度的证据组合	124
6.3.1	证据信任度与证据虚假度	124
6.3.2	基于信任度和虚假度的证据组合方法	126
6.3.3	数值算例与分析	127
第 7 章	基于可靠性评估的证据组合方法	132
7.1	引言	132
7.2	证据折扣运算及其扩展	133
7.2.1	Shafer 折扣准则	133
7.2.2	广义证据折扣运算	134
7.3	基于直觉模糊多属性决策的证据可靠性评估	136
7.3.1	证据理论与直觉模糊多属性决策模型	137
7.3.2	基于 IFMCDM 的证据可靠性评估方法	138
7.3.3	数值算例与分析	140
第 8 章	区间不确定信息融合方法	148
8.1	引言	148
8.2	区间证据理论基础	148
8.2.1	区间证据理论中的信任量化函数	148
8.2.2	区间数之间的运算	150
8.2.3	区间 BPA 概率转换方法	152
8.3	区间证据理论中的不确定性度量	155
8.3.1	证据理论中的不确定性度量	155
8.3.2	区间 BPA 的不确定性度量	157
8.3.3	数值算例与分析	161
8.4	基于直觉模糊集区间证据组合	165
8.4.1	现有区间证据组合方法	165

8.4.2	基于直觉模糊集的区间证据组合方法	169
8.4.3	数值算例与分析	172
第 9 章	时域不确定信息融合方法	177
9.1	引言	177
9.2	基于证据理论的时空信息融合	177
9.3	基于实时可靠度的时域证据组合	181
9.3.1	马尔可夫性及证据折扣	182
9.3.2	基于实时可靠度的时域证据组合方法	183
9.3.3	数值仿真与分析	186
9.4	基于复合可靠度的时域证据组合	188
9.4.1	时域证据相对可靠性评估	188
9.4.2	基于复合可靠度的时域证据组合方法	190
9.4.3	数值算例与分析	192
参考文献		201

第1章 绪 论

1.1 信息与信息融合

1948年, Shannon在《通信的数学理论》一书中, 从信源角度给出了信息的定义: 信息是对事物运动状态或存在方式的不确定性描述。1964年, 控制论的创始人维纳将信息定义为人们在对客观世界的适应过程中与其交换的内容。

在过去的半个多世纪里, 信息科学不断发展完善, 信息的范畴也不断拓宽, 同时, 信息的定义也更加具体。Losee^[1]将其定义为过程或函数赋予特征或变量的数值, 认为在返回值中蕴含着相关的信息。事物本身固有的信息称为原始信息。为了理解事物的本原, 人们必须对事物进行观测, 通过观测得到的信息称为观测信息。观测信息在一定程度上反映了事物的原始信息, 人们对事物的认识就是建立在事物观测信息的基础上。

但是, 事物本身构造和运动规律的不同、观测者的观测能力受限、信息在传播中可能会受到干扰等因素, 都会导致观测信息与原始信息之间存在偏差。因此, 观测信息有时并不能准确地反映事物的本原, 不确定性 (uncertainty) 是事物的固有属性^[2]。

为了降低事物的不确定性, 人们通常会花大量的时间用于信息的收集。对事物不同来源的观测信息可以以文字、符号、语音、图像等形式存在, 它们之间具有独立、竞争、互补、合作等关系。通过融合的手段可在不同信息层次上将关系复杂的多源信息去伪、合并和重构, 进而得到更加准确、完备的信息, 减小观测事物的不确定性, 这种信息处理方法便是多传感器信息融合。

多传感器信息融合通常可简称为数据融合或信息融合, 就是通过适当的融合策略或算法, 实现具有相关性和互补性的多源信息的有效综合与利用, 以期得到一个比单一来源信息更准确、更可靠的结果。多源信息的互补集成可以用于不确定性环境中的辅助决策, 其中也包含对自然界中人和动物事物认知机理的探索^[3]。

信息融合最早应用于指挥自动化系统中, 在信息融合中, 多源信息是被加工的对象, 协调优化和综合处理是核心。多源信息是对被观测系统各种属性或特征、背景或环境信息给出的定量表示或定性描述。环境的复杂性、传感器或观测者本身的局限性、信息获取技术或方法的不完善等, 通常会引起这些信息表现出不确定、不

精确、不完全等特征。从军事意义上来说,信息融合技术涉及对多源数据和信息的联合 (association)、相关 (correlation) 以及合并 (combination) 等处理过程,其目的是获得多源信息的统一表现形式,进而对目标的位置、状态、身份等信息进行精确估计,最终实现对战场态势和威胁的综合评估。

信息融合技术在军事系统中被广泛应用,这主要是由于:通过信息融合,各种传感器可以实现性能上的互补,综合来自不同类型传感器的信息可以获得更为可靠准确的信息,提升系统的稳定性,增强其可靠性和抗干扰能力,扩展系统在时空域的覆盖范围,提高系统对空间目标的分辨力,从而对复杂环境中的目标信息进行更加精确的估计。

信息融合是一个比较复杂的系统概念,很难给出一个统一、全面而又准确的定义。

美国国防部三军实验室理事联席会 (Joint Directors of Laboratories, JDL) 从军事应用角度对信息融合进行了定义,即信息融合是将来自多传感器和信息源的数据与信息加以联合、相关和组合,以获得精确的位置估计和身份估计,以及对战场情况和威胁及其重要程度进行适时完整评价的过程^[4]。

Waltz 等^[5]对 JDL 给出的定义进行了修订,用状态估计代替了位置估计,认为信息融合是一种多层次、多方面的处理过程,该过程对多源信息进行检测、结合、相关、估计和组合,以得到精确的状态估计和身份估计,以及完整及时的态势评估和威胁评估。

Hall 等^[6]提出,信息融合是将来自多个同类或异类传感器的信息进行相关处理,并通过对处理后的信息进行融合,以获取比任意单一传感器更加准确信息的方式。

从信息融合的目的出发,可以认为它是对自动或半自动信息处理方法的研究,这些方法可将不同信源和不同要点的信息转换为统一的表示形式,并对它们进行实时的综合处理^[7]。

随着信息融合技术在非军事领域的研究和推广,融合的对象也从传感器数据发展为与观测对象相关的全部信息。信息融合一般可定义为^[8]:通过计算机技术,按时间序列对若干传感器 (包括硬传感器和软传感器) 获得的观测信息依据一定准则进行自动分析和优化综合,为决策和估计任务提供依据的信息处理过程。

随着对信息融合技术研究的深入,信息融合已发展成为与计算机科学、现代信息处理技术、信号处理、自动控制理论、概率统计及人工智能等多学科密切相关的前沿学科。

1.2 信息融合模型

信息融合模型是信息融合系统搭建、开发、维护、推广、分析等工作的基础,

关于信息融合模型的研究一般是针对特定应用领域,根据分析角度的不同,可以将信息融合模型分为结构模型和功能模型^[9]。

1. 结构模型

信息融合的结构模型主要研究信息融合系统的内部结构、模块接口、控制与数据流、人机交互等内容,不同的抽象层次对应不同的结构模型。

构建一个信息融合系统,首先必须考虑信息融合的体系结构设计,任何一个信息融合系统都需要考虑以下三个问题:

(1) 在融合系统中选择何种传感器、传感器采用的组合形式,系统输入-输出形式的设定。

(2) 对需要处理的信息结构和形式进行剔选,确保通过融合系统后信息的准确度有所提高。

(3) 对融合系统进行合理的设计,降低系统计算量,提高系统的运算速度和反应时间。

检测级、位置级、属性级结构模型是最常见的信息融合结构模型。检测级结构模型是信息融合系统中最基础的融合结构模型,主要分为并行结构、分散结构、串行结构和树状结构等。位置级结构模型主要分为集中式结构、分布式结构和混合式结构等。属性级结构模型应用较为广泛,例如,军事领域中的目标识别,利用多传感器信息融合技术对目标进行分类识别,就是将关于目标属性的多传感器观测数据通过融合识别算法进行融合和综合分类,从而获得比任何单一传感器更准确的目标属性估计和判决。

根据各传感器输出信息抽象层次的不同,可以将属性级结构模型划分为三个层次^[3]:数据层融合(融合在特征提取之前进行)、特征层融合(融合在特征提取之后进行)和决策层融合(融合在各传感器给出独立属性判决之后进行)。

1) 数据层融合

数据层融合结构如图 1.1 所示,在这种融合结构中,首先对从各传感器获取的观测数据进行关联和配准,然后进行融合,再对融合后的数据进行特征提取和属性判决等后续处理。数据层融合是最低层次的融合,能够提供较多的细节信息,信息损失最少。通常,数据层融合要求多源数据来自于同类型即同质传感器(如若干个红外)或是相同量级的传感器(如红外和可见光图像传感器),并且存在对系统的数据处理能力和通信带宽等资源的要求较高、容易受环境因素的影响、对参与融合的数据的配准关系要求较苛刻等局限性。

2) 特征层融合

特征层融合结构如图 1.2 所示。特征层融合先从各传感器单独观测数据中提取出具有代表性的特征(如目标的雷达散射截面积(RCS)、速度、方向等),再将提

取出的特征信息进行相应的融合处理。为保证参与特征融合的特征矢量源于同一目标，融合中心先对各特征矢量进行关联处理，再对特征进行融合，最后基于融合结果进行后续处理。特征层融合属于中间层次的融合，可以允许参与融合的各传感器是异质传感器，具有较强的灵活性，因此应用范围较广泛。特征层融合对系统的数据处理和通信能力要求相对较低，但是融合的精度也因为信息损失有所下降。

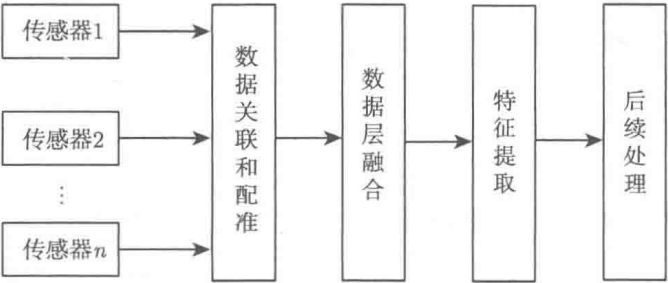


图 1.1 数据层融合结构

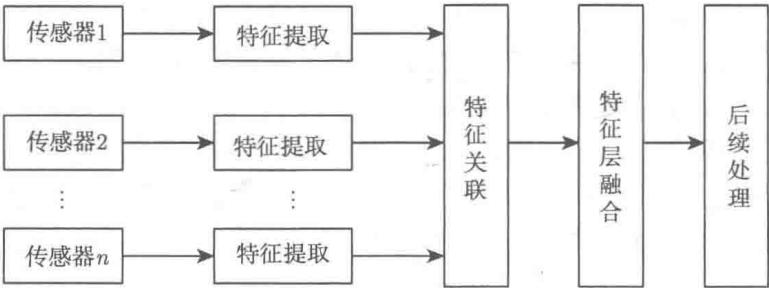


图 1.2 特征层融合结构

3) 决策层融合

决策层融合结构如图 1.3 所示。在决策层融合中，首先分别对由各同类或异类传感器获得的观测数据进行预处理、特征提取和判决，即先根据每个数据源各自的数据做出初步决策，然后融合中心对各决策结果进行融合，最后得出决策结果。同样，为保证参与决策融合的各数据源的决策结果源于同一目标，在融合中心进行决策融合之前，需要对各决策结果进行关联处理。决策层融合是最高层次的融合，参与决策融合传感器可以是同质或异质的，在信息处理方面具有较高的灵活性，具有对通信带宽的要求较低、抗干扰能力强、对传感器依赖程度低等特点，但也存在信息损失大、精度低等问题。决策层融合是所有融合过程中最重要的环节，也是国内外学者研究的重点。

通常情况下，处理越靠近信源的数据，获得的精度越高。因此，在上述三种结构中，数据层融合的处理精度要高于特征层融合的处理精度，特征层融合的处理精

度要高于决策层融合的处理精度。此外，融合结构的选择与所利用的传感器的类型、传感器所进行的预处理及系统的实现都有关系。

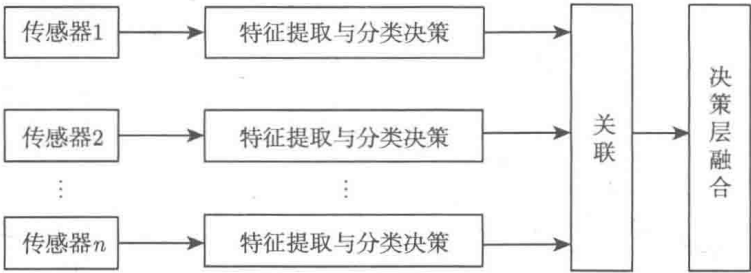


图 1.3 决策层融合结构

2. 功能模型

信息融合的功能模型从功能角度对信息融合系统进行了模块划分，经典的信息融合功能模型有 OODA 模型^[10]、瀑布模型^[11]、Omnibus 模型^[12]、JDL 模型^[3]等，其中 JDL 模型最受关注。

1) OODA 模型

OODA 模型结构如图 1.4 所示，它由观测 (observe)、定向 (orient)、决策 (decide) 和行动 (act) 四部分构成，通常被称为 OODA 环。Boyd 建立 OODA 环的主要目的是分析战斗机飞行员的获胜因素，其认为战斗中获胜的飞行员拥有最快的 OODA 环。

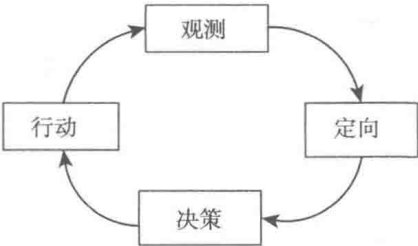


图 1.4 OODA 模型结构

2) 瀑布模型

瀑布模型由三个层次构成，如图 1.5 所示。Level 1 是数据层，完成传感器数据收集和预处理，提供目标的相关信息；Level 2 是特征层，主要进行特征提取、模式处理和特征融合；Level 3 是决策层，主要对目标的状态进行解释并完成决策。另外，为得到更好的决策，在决策输出与传感器系统之间一般存在一条反馈控制回路，提供对系统重新配置的功能。

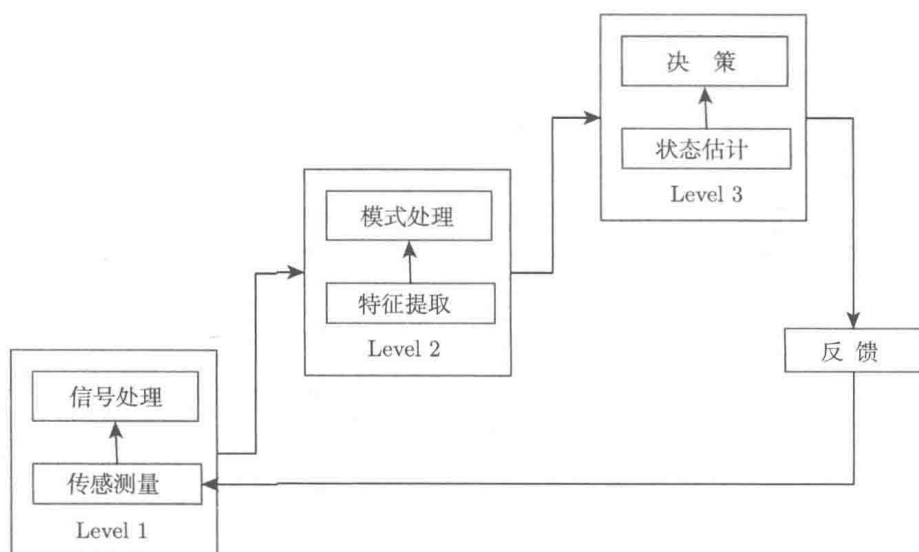


图 1.5 瀑布模型结构

3) Omnibus 模型

Omnibus 模型综合了 OODA 模型和瀑布模型的优点，结构如图 1.6 所示。Omnibus 模型使用了瀑布模型中的基本处理过程，并加强了循环反馈功能。

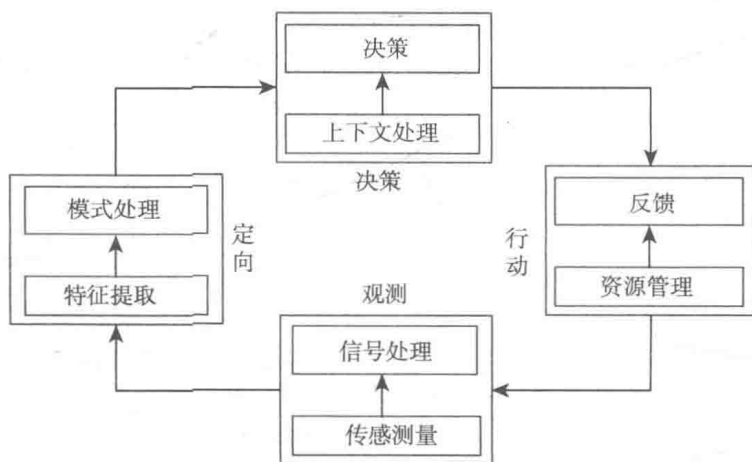


图 1.6 Omnibus 模型结构

4) JDL 模型

JDL 模型最早提出时是为了促进信息融合系统理论的研究人员、设计人员、使用人员之间更好地沟通交流。JDL 模型描述信息融合，将信息融合过程分为数据预处理、目标评估、态势估计、威胁估计、过程评估和认知优化几个部分。

随着信息融合应用的不断广泛和深入，JDL 模型应用范围不断拓展，文献 [13]

和文献 [14] 对 JDL 模型进行了不断的改进与扩展, 扩展后的 JDL 模型结构如图 1.7 所示。

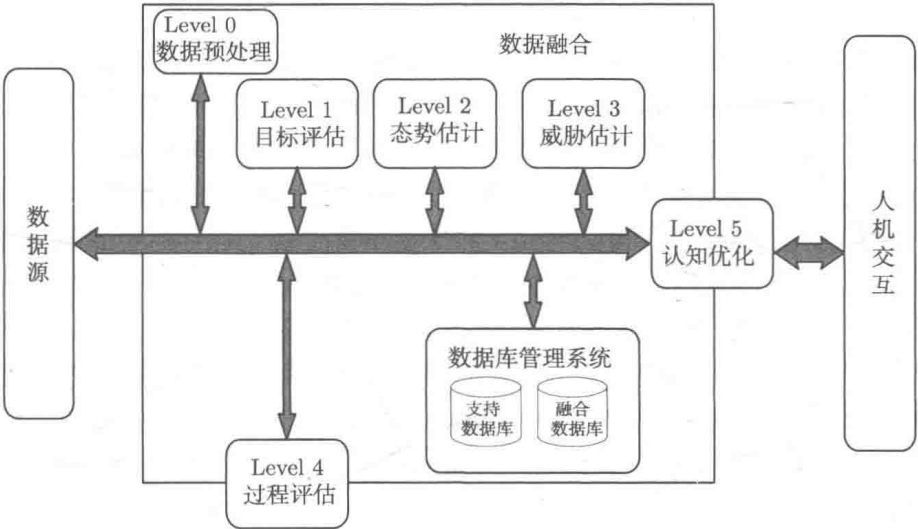


图 1.7 JDL 模型结构

JDL 模型在融合前首先对来自各数据源的数据进行预处理, 然后基于各阶段所处理信息的抽象程度以及面向任务的不同完成各级信息融合。一级融合 (Level 1) 主要是基于目标属性特征进行目标识别; 二级融合 (Level 2) 是基于目标信息进行态势评估; 三级融合 (Level 3) 是在态势综合评估的基础上进行威胁分析; 四级融合 (Level 4) 主要针对融合过程进行优化; 五级融合 (Level 5) 是以自适应为目标的认知优化。在该模型中还包括其他辅助功能, 如数据库管理、人机交互等。JDL 模型中各部分的具体功能如下。

(1)数据预处理 (data preprocessing): 对传感器提供的数据进行预处理, 如图像处理、信号处理、数据矫正、数据滤波等。

(2)目标评估 (object assessment): 主要对不同传感器提供的数据进行抽取和合成, 完成对实体速度、加速度、运动方向、位置等属性的估计或预测, 以实现对其目标身份的估计。

(3)态势估计 (situation assessment): 使用自动推理、人工智能相关方法描述实体或目标之间的关系, 或它们与环境之间的关系。

(4)威胁估计 (threat assessment): 对当前所处环境中的威胁因素进行预测, 并对采取某种行动的风险和效果进行预测。

(5)过程评估 (process assessment): 通过建立指标体系, 根据特定任务目标对融合过程进行综合评价, 指导融合过程的自适应调整 and 资源的优化配置, 提高融合系统的性能。

(6) 认知优化 (cognitive optimization): 主要关注融合系统与用户之间的交互, 通过改善融合结果的表现方式将融合后的关键信息提供给用户, 从而改善决策形成过程。

Waltz等^[5]将 JDL 模型划分为低层信息融合(low-level information fusion, LLIF)和高层信息融合 (high-level information fusion, HLIF) 两部分。高层信息融合中的不确定性分为两个层次: 第一个层次的不确定性包括信源不确定性 (source uncertainty) 和内容不确定性 (content uncertainty) 两部分; 第二个层次的不确定性包括相关不确定性 (correlation uncertainty) 和证据不确定性 (evidential uncertainty) 两部分。第二个层次的不确定性是高层信息融合中所特有的, 相关不确定性是分析事物间关系时所产生的, 而证据不确定性表示最终结论的不确定性, 它的大小与其他三种不确定性都有关系。所以高层信息融合中信息的不确定性问题非常严重。

上述功能模型虽然在结构上有较大差异, 但是分块分层的思想基本一致, 都是将比较复杂的系统划分成若干完成特定功能的子模块。不同功能模型的模块间具有一定的对应关系, 如表 1.1 所示。

表 1.1 信息融合不同功能模型模块间的对应关系^[15]

项目	OODA 模型	瀑布模型	Omnibus 模型	JDL 模型
行动	行动	—	—	—
决策	决策	决策	决策	Level 4
威胁估计	定向	—	—	Level 3
状态估计	定向	状态估计	上下文处理	Level 2
信息处理	定向	模式处理 特征提取	模式处理 特征提取	Level 1
信号处理	观测	信号处理	信号处理	Level 0
传感测量	观测	传感测量	传感测量	—

1.3 信息融合的应用及发展

1959 年, 苏联数学家 Kolmogorov 首次提出信息集成定理, 即任意系统中由单维信息集成的多维信息的信息量大于任意单维信息的信息量。20 世纪 60 年代, Richardson 在对比研究系统增加传感器与不增加传感器两种情况下的性能时发现, 系统性能不会随传感器的增加而降低, 这从理论上为信息集成定理提供了正面支撑。

国外对信息融合技术的应用可追溯到 1973 年美国开展的多声呐信号融合潜艇探测系统, 随后开发的战场管理与目标检测 (BETA) 系统进一步展示了信息融合技术的魅力。信息融合技术在一些实际军事系统中的成功应用, 使其受到军事专家