

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 数据融合的起源和发展	(1)
1.2 数据融合的定义	(2)
1.3 数据融合技术的研究方向和意义	(4)
1.4 数据融合的基本原理	(5)
1.5 数据融合的处理模型	(6)
1.6 数据融合的级别	(8)
1.7 数据融合系统的实现技术	(11)
1.8 数据融合技术与船舶自动化	(14)
第 2 章 多传感器系统的描述	(19)
2.1 实际传感器系统的描述	(19)
2.2 多传感器系统的性能描述	(23)
2.3 多传感器目标检测的基本理论	(27)
2.4 基于信息论的多传感器数据融合方法	(34)
2.5 基于认识模型的多传感器数据融合方法	(39)
第 3 章 数据融合系统的体系结构	(46)
3.1 数据融合系统的一般功能模型	(46)
3.2 数据融合系统的顶层模型	(50)
3.3 数据融合系统的通用处理结构	(55)
3.4 实际数据融合系统的功能结构	(58)
3.5 数据融合系统体系结构的设计过程	(60)
3.6 数据融合中数据处理系统的体系结构	(64)

3.7	数据融合中的并行处理	(68)
3.8	数据融合系统的性能分析	(73)
第4章	态势评估、威胁估计及态势数据库	(78)
4.1	态势评估和威胁估计的基本功能	(78)
4.2	态势评估和威胁估计的应用成果实例	(81)
4.3	态势评估和威胁估计的实现方法	(87)
4.4	态势评估和威胁估计演示器(SATE)	(98)
4.5	数据融合系统中的态势数据库	(102)
4.6	黑板结构和知识库系统	(110)
第5章	多传感器多目标跟踪的一般理论	(115)
5.1	多传感器多目标跟踪的基本思想	(115)
5.2	数据关联的概念和方法	(117)
5.3	分布式多目标跟踪的基础	(124)
5.4	分布式多目标跟踪的方法	(133)
第6章	多传感器技术的应用	(141)
6.1	多传感器系统的状态监控和故障诊断	(141)
6.2	火灾识别的气体多传感器系统	(144)
6.3	采用多传感器的在线水质监测系统	(150)
6.4	具有多传感器的汽车电子系统	(155)
6.5	数据融合技术在无损检测中的应用	(162)
第7章	船舶自动化的现状和发展	(166)
7.1	船舶微机控制技术发展的特点	(166)
7.2	船舶柴油机主机遥控系统	(169)
7.3	船舶机舱集中监测和报警系统	(193)
7.4	采用现场总线技术的机舱监测报警系统	(201)
7.5	船舶自动化的发展趋势和方向	(207)

第 8 章 数据融合技术与船舶自动化	(225)
8.1 用数据融合技术实现船舶信息综合处理	(225)
8.2 采用数据融合技术的航海避碰决策支持系统 ...	(228)
8.3 数据融合技术在故障智能诊断中的应用	(234)
8.4 用数据融合技术实现岸船一体化的控制	(246)
8.5 数据融合技术在船舶安全控制系统中的应用 ...	(259)
参考文献	(265)

第1章 概 论

1.1 数据融合的起源和发展

起始于 20 世纪的自动化技术给人类带来了革命性的变化,大规模集成电路(LSI)和计算机网络技术又极大地推进了科学技术的发展。进入 21 世纪后,以信息技术为代表的新技术将会给人类带来更加翻天覆地的变化。数据融合技术是在面向各种复杂应用背景的多传感器信息系统大量涌现的时代背景下产生和发展的。开始数据融合是针对一个系统中使用多个和/或多种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。20 世纪 70 年代初,美国海军研究部门发现,利用计算机技术对多个独立的连续声呐信号进行融合分析后,能够准确地探测出敌方潜艇的位置。这一发现对现代战争无疑产生了重大影响。美国在 C³I(command, control, communication and intelligence)系统中首次提出数据整合意义的融合一词^[1],于是数据融合首先在军事领域里受到青睐。美国 1984 年成立了数据融合专家组(DFS),专门组织和指导相关的研究,并相继研究开发了几十个军事信息融合系统,用于目标识别和战场管理。这些系统经使用后,证明了信息融合的有效性和实用性。美国从 20 世纪 80 年代开始采用信息融合技术开发研制用于目标跟踪识别、态势评估和威胁估计的战略和战术监视系统,典型代表有 TCAC(战术指挥控制系统)、INCA(多平台多传感器跟踪信息相关处理系统)、TOP(海军战争状态分析显示系统)、DAGR(辅助空中作战命令分析专家系统)、TATR(空中目标确定

和拦截武器选择专家系统)、AMSUI(自动多传感器部队识别系统)、TRWDS(目标获取和武器输送系统)等。这些以目标识别和态势评估为主开发出来的系统被称为第一代信息融合系统^[2]。80年代末期,美国和其重要盟国又致力研究为数据融合设计的混合式传感器和处理器,被称为第二代信息融合系统。主要有美国军队开发的ASAS(全源信息分析系统)、LENSCE(战术陆军和空军指挥员自动情报保障系统)、ENSCS(敌军态势分析系统)等,英国军队开发的WAVELL(莱茵河英军机动指挥控制系统)、ZKBS(舰船多传感器数据融合系统)、ZFFF(飞机的敌/我/中识别系统)、AIDD(炮兵智能数据融合示范系统)等。这些系统在实际战争(如海湾战争、科索沃战争)中发挥了重要的作用。海湾战争结束后,美国将通信局改为信息局,在C³I系统中加入计算机,建立了以数据融合中心为核心的C⁴I系统。美国国防部把数据融合技术列为对国防至关重要的21项技术之一,近年来每年用于数据融合技术的研究费用都达上亿美元。

除了在军事领域的应用外,数据融合引起了世界各国学者的广泛关注。1994年IEEE首次举办了多传感器融合和集成国际会议,被称为MFI'94,之后又相继举办了MFI'96, MFI'99和MFI'2001会议。从这些会议文献中可以看出,近年来,数据融合技术研究的发展速度很快,其研究成果除应用在军事领域外,已迅速扩展到自动控制、目标识别、交通管制、生产过程监控、导航、遥感、基于环境的复杂机械维护、机器人等多种领域。从近年的研究成果和应用情况可以看出,数据融合技术具有十分巨大的应用潜力和研究价值。

1.2 数据融合的定义

近年来,融合一词几乎在各种领域被广泛地使用,如何给数据

融合下一个准确的定义,目前还没有统一和权威的认定,这主要是由数据融合研究内容的广泛性和多样性造成的。现已给出的数据融合的定义都是功能性的,这里介绍两种提法。一是美国国防部JDL(joint directors of laboratories)从军事应用的角度将数据融合定义为这样一种过程,即把许多传感器和各种信息源的数据和信息加以联合(association)、相关(correlation)和组合(combination),以获得精确的位置估计(position estimation)、身份估计(identity estimation)和完整评价^[3]。这一定义对数据融合进行的功能描述包含两个层次:低层次的位置估计;高层次的态势评估(situation assessment)和威胁估计(threat assessment)。二是国外有些学者把数据融合定义为:利用计算机技术对按时序获得的若干传感器的观察信息,根据一定准则加以分析、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。按照这一定义,多传感器系统是数据融合的硬件基础,多源信息是数据融合的加工对象,优化和综合处理是数据融合的核心。

综合上述两种(当然不止上面两种)定义可以看出,融合都是针对多传感器系统和多源信息的数据,进行综合处理后得到更准确、更可信的结果。这一综合处理的过程有各种提法和名称,如多传感器或多源相关、多源合成、多传感器混合、信息集成、信息融合、数据融合等。“融合”这一术语逐渐被人们认可,于是目前信息融合和数据融合成为较标准的提法。

值得一提的是,在各种文献中,经常有数据融合(data fusion)和信息融合(information fusion)两种提法。根据数据和信息的定义,信息比数据更具有概括性,但在实际中,因为习惯上的原因,使用数据融合提法的较多,在这种情况下,数据的含义被扩展了,实际上使用信息应更为确切。本书中对数据融合和信息融合这两个术语在使用中将不加区别。

1.3 数据融合技术的研究方向和意义

随着电子信息技术的迅猛发展,新的军事技术革命正在形成。从近十几年的世界形势可以看出,美国称王称霸的资本是其强大的军事实力。在现在和未来战争中,夺取信息优势是取得战役乃至战争胜利的关键。数据融合恰恰是解决这一瓶颈问题的有效技术,不仅在军事领域,在其他各种领域,数据融合理论和技术都具有重大的应用价值。因此,近年来,数据融合技术是一个十分引人注目的研究方向,开展这一方面的研究具有特别重要的意义。

数据融合技术有一个非常明显的特点,就是它不仅仅是单一学科的技术,它的综合性非常强。数据融合几乎与当今所有新的研究方向有交叉并汇集了这些研究领域里的成果,如数学、计算机、信息技术、生物工程、专家决策理论、人工智能、神经网络、数据库技术等。

数据融合技术经历了一个快速发展的时期,但由于产生的时间较短等各种因素的影响,数据融合技术的理论和体系都存在着很多不足之处,如尚未形成完整的理论框架和模型,融合处理过程中信息的一致性、二义性以及融合系统的容错性和稳健性等关键技术尚未解决等。概括起来,数据融合技术今后的研究和发展方向是:

- ①建立完整的数据融合基础理论;
- ②融合算法和模型的研究;
- ③数据融合系统体系结构和数据库技术的研究;
- ④融合推理过程中状态估计和决策方法的研究;
- ⑤并行处理方法与实现技术的研究;
- ⑥数据融合系统工程化设计方法等。

数据融合技术在我国已引起各个方面的广泛重视,国防科工

委于1995年组织了我国第一次数据融合的专门研讨会。近年来,参与研究的人不断增加,每年有上百篇学术论文发表,并在一些领域应用此技术解决实际问题。但从总体上看,我国在数据融合领域的研究还处于起步阶段,除军事领域外,具体应用大部分还停留在模拟和仿真阶段。因此,开展数据融合技术的研究任重而道远。我们应该充分认识到数据融合技术研究的重大意义,面向世界,着眼未来,在各行业中结合各自特点深入进行数据融合技术的研究,推动我国的科技进步。

1.4 数据融合的基本原理

数据融合是对多源信息的综合处理过程,它利用的是人类或其他逻辑思维系统中常用的基本功能,如人在自然界运用人体各个器官如眼、耳、鼻、四肢等(相当于传感器)感受到环境信息(声音、景物、气味、触觉等),再将这些信息组合起来,通过大脑思维器官和先前积累的知识去进行分析判断,从而得出结论。这一过程实际上是一个相当复杂的处理过程,数据融合的原理实质就是模仿人脑综合处理复杂问题的过程。各种传感器的信息可能具有不同的特征,如实时的或非实时的,快速变化的或缓慢变化的,确定的或模糊的,相关的或互补的,也有互相矛盾的。数据融合就是要充分利用这些信息资源,通过对传感器得来的及其他已经掌握的信息合理使用和支配,对空间或时间上冗余或互补的信息依据某种准则进行组合,以获得被测对象的一致性解释或描述。数据融合技术的基本目标是利用多传感器系统的优势,推导出更多的信息,提高多传感器系统的功效。

多传感器数据融合系统与单传感器信号处理或低层次的多传感器数据处理相比较,单传感器信号处理或低层次的多传感器数据处理都是对人脑信息处理方式的低水平模仿,它们不能像多传

感器数据融合系统那样充分有效地利用多传感器的资源。多传感器系统可以在更大程度上获得被测目标和环境的信息量。

多传感器数据融合与经典信号处理方法之间也存在本质的区别,其中的关键是数据融合所处理的多传感器信息具有更复杂的结构层次,并且能在不同的信息层次上出现,如数据层、特征层、决策层等。

Waltz E 和 Llinas J 对数据融合提出了如下两点认识^[1]:

①数据融合可以广泛应用于对 C³I 系统有核心意义的基本人工处理;

②数据融合有公共的理论基础,它与具体的应用无关,所以顺理成章地自成学科。

Waltz E 和 Llinas J 的著作 Multisensor Data Fusion 已在我国翻译出版,成为我国很多研究人员的重要参考文献。Waltz E 和 Llinas J 提出的这两点认识为数据融合的研究提供了一个参考框架。它的含义是强调数据融合的公共基础理论不依赖于它的具体应用,只有形成完善合理的融合处理模型和功能结构,才能使数据融合学科走向成熟。因此,我们在研究中应更注重数据融合的公共基础理论与方法的深入研究,突出它的特点和关键。

1.5 数据融合的处理模型

1988 年 White 针对一般的军事指挥系统,提出了一个著名的数据融合处理模型^[3],该模型把数据融合分为 3 级:

第一级:融合的位置和标志估计;

第二级:敌我军事态势评估;

第三级:敌我兵力威胁估计。

数据融合处理模型如图 1-1 所示。

从图中可以看出,一级处理主要是对数据进行关联、校准、跟

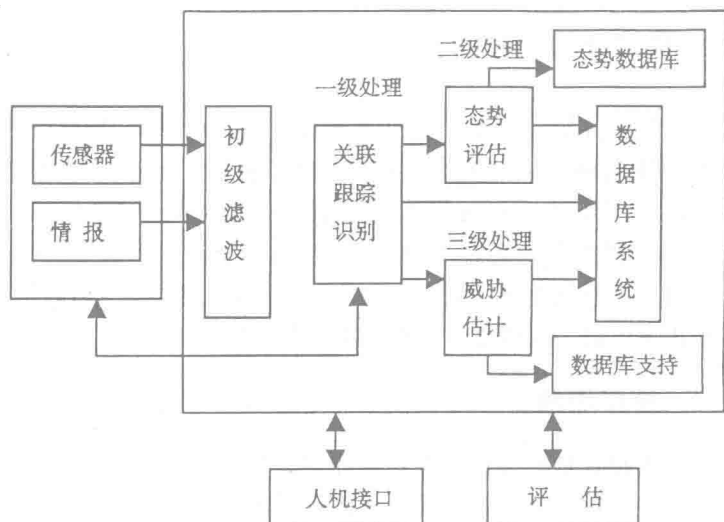


图 1-1 数据融合处理模型

踪、识别等,二级处理侧重态势评估,三级处理进行威胁估计,经过三级处理后产生最后的评估结果。White 提出的这个处理模型强调数据融合处理过程中的各个步骤,而不强调计算机上的结构形式。当处理从一级推移到三级时,模型强调推理层次,经过这些层次,融合的结果大部分从一些特殊的情况归结到一般情况。数据融合过程基本上按照这一模型的框架逐步细化。

由于数据融合对于多源信息处理过程是多层次的,因此,系统要求在融合过程中的每一个环节,有用的信息应得到充分的发挥,这样才能使融合结果准确有利。而且,在局部起作用的信息,应与其他部分的作用有机承接起来,也就是说有效数据不应在进入系统其他过程时被削弱,即系统各个部分应和谐和统一。

1.6 数据融合的级别

在数据融合初期研究中,根据数据抽象的3个层次,将融合分为3级,即像素级融合、特征级融合、决策级融合。近年来有些研究人员认为,应扩展成目标提炼、态势分析、威胁估计和过程精炼4级,还有的研究人员认为,应从融合层次、融合的技术和方法、融合的关键技术进行更细的划分。这些提法尚未得到统一,因此,本书仍采用大家较一致接受的三级层次进行介绍。

1.6.1 像素级融合

像素级融合是直接在采集到的原始数据层上进行融合,也就是说对各种传感器的原始数据未经过处理就进行综合和分析。这是低层次的融合,它类似成像装置通过对若干像素的模糊图像进行识别和处理而得到目标图像。其原理如图1-2所示。

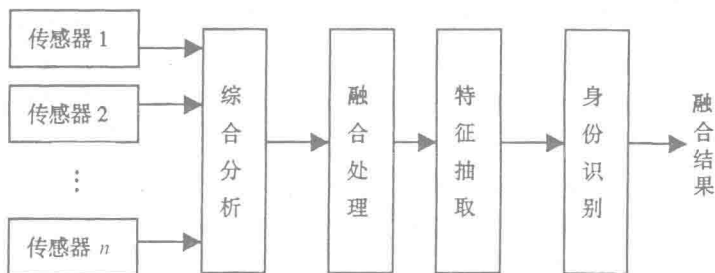


图 1-2 像素级融合原理

这种融合虽然是低层次的,但它有明显的优缺点。它的优点是能够尽可能多地保持和使用现场原始数据,充分利用所提供的细微信息。它的主要缺点是:

- ①待处理的传感器数据量太大,处理时间长,代价大,实时性

差;

②对传感器信息的不完全性、不确定性和不稳定性等缺点没有较强的纠错能力;

③要求传感器间信息要精确到一个像素级,故要求信息来自同质传感器;

④数据通信量大,抗干扰性能差。

像素级融合通常应用于图像复合、图像分析和理解、同类雷达波形的合成、数据融合中的卡尔曼滤波等。

1.6.2 特征级融合

特征级融合属于中间层次的融合,它先对来自传感器的原始信息进行特征提取,然后对特征信息进行综合分析和处理。其原理如图 1-3 所示。

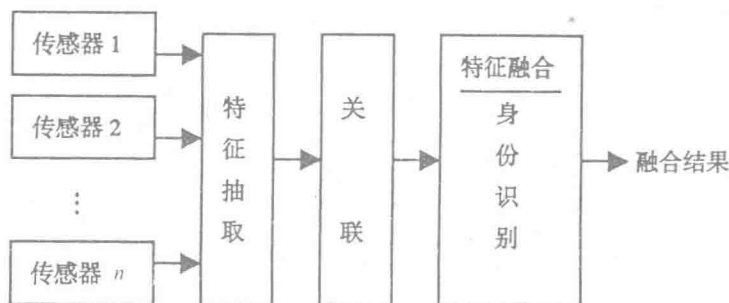


图 1-3 特征级融合原理

特征级融合的优点是可以对观测信息进行压缩,有利于实时处理,提取的特征信息可以供决策分析使用。目前特征级融合可划分为特征级目标状态融合和特征级目标特性融合两大类。

特征级目标状态融合主要应用于多传感器多目标跟踪领域。系统首先对传感器数据进行预处理以完成数据校准,然后实现参数相关和状态向量估计。特征级目标特征融合是特征层联合识

别,在融合前先对特征进行相关处理,把特征向量分成有意义的组合。这里融合方法采用的是模式识别的相关技术。

1.6.3 决策级融合

决策级融合是一种高层次融合,融合的结果为指挥控制决策提供依据。因此,决策级融合需要根据具体需求,充分利用特征级融合所提取的测量对象的各种特征信息,采用相应的技术予以实现。决策级融合是三级融合的最终结果,直接关系到决策的效果,所以是非常重要的环节。

决策级融合的主要优点有:

- ①灵活性高;
- ②系统对信息传输带宽要求不高;
- ③能有效地反映环境或目标各个侧面的不同类型信息;
- ④系统容错性好,抗干扰能力强;
- ⑤对传感器依赖小,传感器可以是同质的,也可以是异质的。

决策级融合原理如图 1-4 所示。

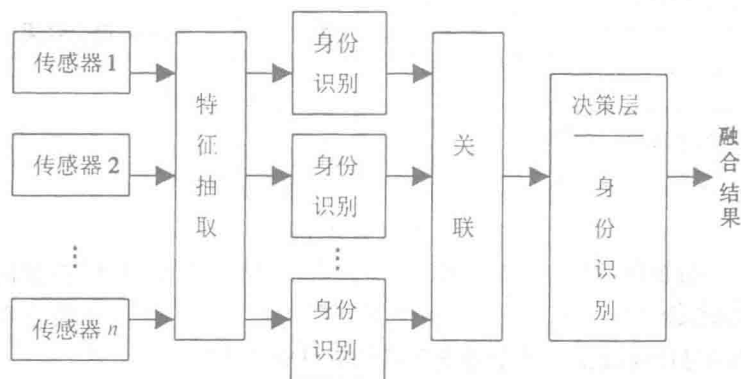


图 1-4 决策级融合原理

但是,由于决策级融合首先要求对传感器信息进行预处理以获得各自的判定结果,而预处理较复杂,因此,决策级融合代价相对较高。

1.7 数据融合系统的实现技术

数据融合作为一种信息综合和处理技术,是很多传统和新兴学科的集成和发展。融合过程中采用的信息表示和处理方法,大都来自数字通信、信号处理、模式识别、决策理论、计算机技术、人工智能和神经网络等领域,其中相关技术、估计理论、识别技术是实现信息融合系统功能的基本关键技术。本节重点对这3项实现技术进行简要介绍。

1.7.1 相关技术

在对多传感器或多源信息进行分析处理时,一个重点研究内容是信息的相关性。根据判别原则,要把信息分为不同的集合,每个集合中的信息应与同一源(目标或事件)关联。解决相关问题的技术和算法主要有最大似然法、最近邻法则、最优差别、统计关联、联合统计关联等。相关技术的最主要用途是目标跟踪。

多传感器系统目标跟踪的难点是目标的高度机动性和杂波的严重干扰问题。在可用算法中,有代表性的是概率数据关联算法(PDAF)和多模型算法(MMF),以及由此导出的多模型-概率数据关联算法(IMMPDAF)。

Bar-Shalom 于 1975 年提出的概率数据关联滤波器的模型

$$x(k/k) = \sum_{i=1}^{m(k)} x_i(k/k) \beta_i(k)$$

Blom 于 1984 年提出的多模型滤波器^[4](基于 Kalman 滤波器)的模型

$$x(k/k) = E(x(k)/Z^k) = \sum_{i=1}^r E(x(k)/M_i, Z^k) \mu_i(k)$$

以及 Bar-Shalom 和 Blom 于 1988 年联合研究提出的多模型-概率数据关联滤波器的模型

$$x(k/k) = \sum_{i=1}^r x_i(k/k) \beta_i(k)$$

这些算法目前较广泛地应用在多传感器的数据相关性研究中。

1.7.2 估计理论

数据融合技术中,在低层次实现数据压缩、提炼后,主要是在高层次上实行态势评估和威胁估计(STA),这中间需要汇集很多知识和推理,其中估计理论是必不可少的。统计估计很早就被人类所使用,如几百年前,人们将之应用于对太空星系的推测上。1795 年 Gauss 提出了最小二乘法,引入了使用带有估计误差的多个观测数据的概念。1912 年 Fisher 在最大似然估计法中运用观测结果的概率密度函数,使估计的概率密度函数的对数值最大。20 世纪 40 年代,Kolmogorov 和 Winer 对统计概念进行了完善,用于连续或离散的测量序列中。直到 20 世纪 70 年代,统计估计器发展成为实用的递推估计器——卡尔曼滤波器。为改进多传感器多目标系统的估计方法,引入了非线性的处理。估计理论的应用范围包括几何定位、跟踪和测向。计算机软件能够根据几千次观测数据估计出多变量构成的状态向量。

到目前为止,实现 STA 还缺乏理论基础,实行起来困难不小。从方法论的角度,实现 STA 可以遵照以下原则:

- ①需求驱动原则:将 STA 看做是由需求驱动的分层处理;
- ②混合方法原则:根据 STA 的功能要求,使用单一的方法是无法实现的,因此要采用多种方法,混合起来使用;
- ③依赖关系原则:通过分析 STA 要素间的关系,以获得模型

化的数学函数、事件顺序等;

④层次关系原则:对融合的产品进行上下级关系分析,逐级进行识别和推论。

国外研究成果表明,在数据融合评估中,采用人工智能的相关技术十分有效,因为数据融合与人工智能有许多思想是相互重叠的。从目前应用情况看,人工智能中的规划和路径识别理论、基于知识的方法等被比较广泛地使用,因此,在进行数据融合技术研究中,应借鉴和了解这些相关理论和技术。

1.7.3 识别技术

目标识别技术有许多种,从概念上可以分为3种类型:物理模型识别技术、参数分类识别技术、认识模型识别技术。

(1) 物理模型识别技术

物理模型识别技术是根据可观测信息(数据、信号、时间域或频域数据等)的特征,建立预测模型,再与实际数据或预先存储的目标特征(一个先验的目标特征文件)进行比较来估计目标的特征。

建立一个预测实体特征的物理模型是非常困难的,它只能利用经典技术和先验知识。由于建立预测物理模型的计算工作量很大,因此,该方法虽然有一定的理论研究意义,但应用价值却很有限。目前仅在少数军事作战系统中被采用。

(2) 参数分类识别技术

参数分类识别技术不利用实体的物理模型,而是通过参数的特征属性对目标进行分类。参数分类识别技术可分为统计算法和信息论技术两种。统计算法有经典推理、Bayes方法、D-S方法等。应用信息论技术的方法有参数模板法、聚类分析法、人工神经网络、表决法、熵法等。

(3) 认识模型识别技术

基于认识的方法是模仿人类的推理过程进行识别,即模仿人类处理信息的方法得出分类结果。基于认识的方法包括两个方面,即表示知识的技术和推理方法。这类技术包括专家系统、逻辑模板、模糊集合论和品质因数(FOM)法等。

本节上面提到的这些技术和方法,是数据融合系统的最基本的实现技术,具体内容将在以后章节中予以详细介绍。

1.8 数据融合技术与船舶自动化

1.8.1 船舶自动化的发展过程

船舶是人类历史最悠久的一种运输工具。回顾船舶发展的历史,可以看出,科学技术的每次进步都推动了船舶的发展。12世纪中国指南针的发明,带动了船上磁罗经导航和天文定位。1798年瓦特发明蒸汽机,给船舶动力带来彻底变化。1837年莫尔斯发明电报,使船舶通信和联络进入现代化。20世纪50年代,航运发达国家为了提高船舶的安全性,降低航运成本,提出了船舶自动化的概念,当时自动化的主要措施是实行机舱动力装置的集合。1961年日本首先在机舱设立集中控制室,安装隔音和空调设备,一人值班就可实现对动力装置的监视和控制。这是船舶自动化的第一代产品,使得万吨级远洋货船人员定额由50余人减少到30余人。第二代产品是20世纪60年代中期出现的“无人机舱”。所谓无人机舱,就是利用自动化设备代替轮机人员值班期间的操作管理,实际上是定期无人值班。这时船员人数减少到20余人。60年代末期,出现了采用计算机控制的自动化船舶,即第三代自动化船。其特点是自动化已经不仅仅局限于机舱,而是在导航、货物装卸、报务等各方面实现全面自动化。日本1969年建造的“星光丸”