

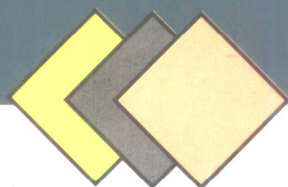
● 智能科学与非线性科学丛书

# 数据融合理论与应用

shu ju rong he  
li lun yu  
ying yong

康耀红 著

西安电子科技大学出版社



# 数据融合理论与应用

康耀红 著

西安电子科技大学出版社

1997

# 前 言

数据融合(Data Fusion)这一概念是70年代提出来的,当时并未引起人们的足够重视。随着科学技术的迅猛发展,军事、工业领域中不断增长的复杂度使得军事指挥人员或工业控制环境面临数据频仍、信息超载的问题,需要新的技术途径对过多的信息进行消化、解释和评估。人们越来越认识到数据融合的重要性。在世界上几次局部战争中,数据融合显示了强大的威力。特别是在海湾战争中,多国部队的C<sup>3</sup>I融合系统发挥的作用已引起全世界的普遍关注。目前世界上各主要军事大国都在竞相投入大量的人力、财力进行研究,从而使数据融合技术的研究或应用成为实现对多源信息进行有效处理的一个非常活跃的领域。

数据融合是研究军事领域中对多源信息进行处理的理论、技术和方法的一门综合性横断学科。它的产生、形成与发展,是现代科学技术,特别是高新技术迅猛发展的产物。这门学科已孕育了一大批专业文献。这些文献根据不同的原理涉及到不同的学科领域,并且按照具体的军事应用范围而被不断地完善和推广,使得数据融合成为许多学科的综合和应用。

数据融合系统涉及到与现代战争有关的军事理论、武器系统、人文地理和气象知识等复杂因素,目前对于数据融合的研究都是根据问题的种类来建立各自直观认识的原理,并在此基础上形成融合方案。国际上关于此项技术还没有形成一套完整的理论与方法。这就迫使人们反复考察数据融合的各个功能要素及相互关系,并给以最佳的描述与说明,以改进和扩充现有的理论和方法。

Waltz 和 Llinas 的专著《多传感器数据融合》全面论述了多传感器数据融合的概念、功能模型和研究方法,并综合报导了这一领域的最新研究成果和动态。这本专著受到数据融合领域学者的高度评价,并被广泛引用。机电部28所的赵宗贵等教师已将该书翻译成中文在国内出版,这一工作对于我国数据融合研究的发展起到了十分重要的推动作用。但是,Waltz 和 Llinas 的专著没有对论述的深度进行一般的追求,使得进行具体研究工作的读者无法通过该书获得更进一步的所需要的研究细节;Hall 的专著《多传感器数据融合的数学基础》只是对数据融合的数学基础作了一般的论述,因而同样缺乏关于具体研究细节的论述;Bar-Shalom 和 Fortmann 的专著《跟踪与数据关联》和由 Bar-Shalom 主编的连续出版物《多传感器多目标跟踪:方法与进展》则综合报导了数据融合在目标跟踪领域的新思想、新方法和新进展,但没有涉及身份识别、态势评估和威胁估计等研究领域。

基于这样一种研究现状,本书以国际上目前和今后对多传感器数据融合研究的中心为基本出发点,通过对各种多传感器目标检测理论、目标跟踪和自动识别算法以及态势评估和威胁估计模型的深入研究,对那些在不久的将来可能影响到数据融合领域的新理论和新技术(如条件事件代数、规划识别理论等)进行深入的探讨,试图形成数据融合技术的理论

体系或框架，以期能对我国该技术的研究人员提供有益的帮助。

鉴于数据融合领域各部分发展的不平衡，以及数据融合问题的复杂特点，本书不可能完满地、一劳永逸地澄清所讨论范围内的众多理论问题和方法。特别是在理论上还很薄弱的部分，如态势评估、威胁估计等方面还有待于进一步地深入研究。本书所有的概念和定理都尽力给予详尽的解释和证明。许多有趣的但不是基本的问题也给以较短的说明，此外还不断提出一些未解决的问题。书中还融合了作者的一些最新研究成果，如第二章、第三章和第八章都是作者独立的研究成果。

本书每章末都附有补记。这主要是为了对该章内容作补充说明，特别是对有关的理论作简要的介绍和评价，以满足部分研究者的特殊需要。

作为我国第一本系统介绍和全面研究多传感器数据融合理论与技术的书，要写的内容很多，为使篇幅不致太长，在其形成过程中，作者所面临的最大困难是对数百篇文献的加工和取舍。虽然作者已尽了一切力所能及的努力，但由于时间紧迫，书中一定存在一些不足之处，恳请广大同行和读者予以批评指正。

我衷心感谢我的博士导师蔡希尧教授，蔡教师是我国研究传感器系统的先驱者之一。正是由于我参加了他所主持的 C<sup>3</sup>I 研究项目，才得以涉足数据融合研究领域。在本书的写作过程中，蔡教师提出许多宝贵的建议，使我受益非浅。

在本书写作过程中，作者得到了西安电子科技大学研究生部主任焦李成教授的支持和帮助，在此表示衷心的感谢。同时还要感谢机电部 28 所的赵宗贵、耿立贤、何松、孔祥忠诸位教师，以及作者中学时代的党润民、康耀生教师，本书是在他们的热情关心和鼓励下完成的。最后衷心感谢本书责任编辑徐德源先生。

康耀红

1997年3月

# 目 录

## 前言

## 第一章 概论

1.1 数据融合的目的和应用 .....	1
1.2 数据融合的理论基础 .....	3
1.2.1 数据融合的一般处理模型 .....	3
1.2.2 数据融合的概念与结构分类 .....	5
1.3 数据融合的实现技术 .....	13
1.3.1 目标跟踪 .....	13
1.3.2 目标识别 .....	17
1.3.3 态势评估和威胁估计(STA) .....	19
1.4 数据融合的研究现状和如何推动我国数据融合研究的进展 .....	24
1.4.1 理论研究应着眼未来、强调创新 .....	25
1.4.2 技术研究应面向世界、追求突破 .....	26
1.4.3 人才培养应面向教育 .....	27
1.4.4 加强学术交流,全方位协调发展 .....	27
补记 .....	27
参考文献 .....	27

## 第二章 多传感器目标检测的基本理论

2.1 问题描述 .....	30
2.2 贝叶斯方法 .....	32
2.3 Neyman-Pearson 方法 .....	35
2.4 系统检测率和系统虚警率 .....	36
2.5 同类传感器情形下的讨论 .....	40
补记 .....	42
参考文献 .....	44

## 第三章 多传感器目标检测的性能评估

3.1 传感器检测的基本特性 .....	46
3.2 传感器检测性能分析 .....	48
3.3 传感器的检测性能评估 .....	49
补记 .....	53
参考文献 .....	5

## 第四章 目标跟踪与数据关联概论

4.1 多目标跟踪的基本思想 .....	54
4.2 数据关联的概念与方法 .....	55
4.2.1 “最近邻”方法 .....	56
4.2.2 “全邻”最优滤波器 .....	57
4.2.3 概率数据关联滤波器 .....	57
4.2.4 多模型方法 .....	57
4.2.5 相互作用多模型—概率数据关联滤波器 .....	58
4.2.6 联合概率数据关联滤波器 .....	58
4.2.7 多假设方法 .....	59
4.2.8 航迹分裂方法 .....	59
4.2.9 分布式多传感器多目标跟踪与数据关联的一般理论 .....	59
4.2.10 基于神经网络的多目标数据关联方法 .....	59
补记 .....	60
参考文献 .....	60

## 第五章 相互作用多模型—概率数据关联算法

5.1 概率数据关联滤波器 .....	62
5.1.1 预备知识 .....	62
5.1.2 概率数据关联滤波器的基本思想 .....	63
5.1.3 关联概率 $\beta_i(k)$ 的计算 .....	65
5.1.4 协方差 $P(k k)$ 的计算 .....	68
5.2 多模型算法(Multiple-Model Approach) .....	70
5.3 相互作用多模型—概率数据关联算法 .....	73
5.4 多传感器相互作用多模型—概率数据关联算法 .....	75
5.4.1 多传感器概率数据关联滤波器 .....	75
5.4.2 多传感器多模型—概率数据关联滤波器 .....	77
5.5 目标运动模型(Target Motion Models) .....	79
5.5.1 基本理论 .....	79
5.5.2 几个典型的目标运动模型 .....	82
补记 .....	85
参考文献 .....	85

## 第六章 联合概率数据关联和多假设滤波器

6.1 联合概率数据关联算法 .....	87
6.1.1 联合概率数据关联算法的基本思想 .....	87
6.1.2 联合事件的概率计算 .....	92
6.1.3 协方差计算 .....	93
6.1.4 $n=1$ 时 JPDA 和 PDA 等价性证明 .....	95
6.2 多假设滤波器 .....	96
6.2.1 假设的产生和假设树的形成 .....	96

6.2.2 假设估计 .....	101
6.2.3 假设管理 .....	103
补记 .....	104
参考文献 .....	104

## 第七章 多传感器多目标跟踪的一般理论

7.1 分布式多传感器多目标跟踪的基本思想与功能结构 .....	106
7.2 单目标分布式跟踪 .....	107
7.2.1 中心估计 .....	107
7.2.2 分布式估计 .....	111
7.3 多假设多目标跟踪 .....	116
7.3.1 航迹和假设 .....	116
7.3.2 递归假设估计 .....	116
7.3.3 成批假设估计 .....	118
7.4 分布式多目标跟踪 .....	119
7.4.1 等级多目标跟踪 .....	119
7.4.2 分布式多目标跟踪 .....	124
补记 .....	126
参考文献 .....	126

## 第八章 多目标跟踪系统的性能评估

8.1 航迹分类 .....	129
8.2 跟踪评估指标 .....	129
8.3 混合评价指标的设计 .....	130
8.4 一般评价模型 .....	131
补记 .....	134
参考文献 .....	135

## 第九章 身份识别

9.1 基于 Bayes 统计理论的身份识别 .....	136
9.1.1 古典概率理论及其在身份识别中的应用 .....	136
9.1.2 基于 Bayes 统计理论的身份识别 .....	138
9.2 基于 Dempster-Shafer 证据理论的身份识别 .....	141
9.2.1 基本理论 .....	141
9.2.2 单传感器多测量周期可信度分配的融合 .....	143
9.2.3 多传感器多测量周期可信度分配的融合 .....	143
9.3 面向对象的数据融合算法及其神经网络实现 <sup>[7]</sup> .....	148
9.3.1 分类和跟踪处理模型 .....	148
9.3.2 数据融合算法 .....	149
9.3.3 融合算法的神经网络实现 .....	150
补记 .....	152
参考文献 .....	153

## 第十章 态势评估和威胁估计的基本理论

10.1 指挥、控制和通信系统的基础理论 .....	154
10.1.1 兰切斯特(Lanchester)战斗模型 .....	155
10.1.2 指挥、控制和通信模型 .....	155
10.2 军事问题的一般求解模型 .....	156
10.2.1 状态转移模型 .....	156
10.2.2 SHOR 模型 .....	158
补记 .....	159
参考文献 .....	159

## 第十一章 条件事件代数理论

11.1 问题提出 .....	160
11.1.1 逻辑与概率表示不相容 .....	160
11.1.2 Simpson 悖论 <sup>[5,6]</sup> .....	161
11.2 条件事件代数的定义及其性质 .....	163
11.2.1 布尔代数 .....	163
11.2.2 Lewis 定理 .....	163
11.2.3 GNW(Goodman-Nguyen-Walker)条件事件代数 .....	164
11.2.4 条件事件代数的运算性质 .....	165
补记 .....	167
参考文献 .....	167

## 第十二章 规划识别理论及其应用

12.1 基本概念 .....	168
12.1.1 规划识别理论概述 .....	168
12.1.2 规划识别与规划(Planning) .....	170
12.1.3 规划识别与态势评估 .....	170
12.2 真实环境下的规划识别的要求 .....	171
12.2.1 真实环境的特点 .....	171
12.2.2 动态性问题 .....	172
12.3 锁孔式规划识别的研究 .....	173
12.3.1 规划识别模型 .....	173
12.3.2 规划识别中认知属性的分析 .....	174
12.3.3 真实环境下规划识别逻辑完备性分析 .....	175
12.3.4 真实环境下的规划识别过程模型 .....	175
12.3.5 FIND 过程的研究与设计 .....	176
12.3.6 监测过程的策略 .....	178
12.4 预测式规划识别的理论研究与实现 .....	179
12.4.1 预测式规划识别与态势评估 .....	179
12.4.2 Bayes 概率理论和 D-S 推理 .....	179
12.4.3 Bayes 因果网络 .....	180



12.4.4 预测与 Bayes 因果网络 .....	182
12.5 真实环境下的规划识别模型及其性能分析 .....	184
12.5.1 综合模型 .....	184
12.5.2 综合模型性能分析 .....	185
补记 .....	187
参考文献 .....	188

# 第一章

## 概 论

**本**章主要阐述数据融合的意义、理论基础、实现技术和研究现状，提供有关数据融合研究领域的一个概观。数据融合涉及到多个学科和大量的细节，已公开发表的一大批参考文献是本章内容的最好注释。一些重要的部分将在随后的章节中详细论述。

### 1.1 数据融合的目的和应用

现代战略监视和自主武器系统的性能及部署速度都要求开发全新的数据处理技术。现代战争威胁的多样化和复杂化导致对传统的数据和信号处理系统提出了更高的要求。先进的作战管理系统在控制日益增多的复杂武器系统时，必须从大量的可移动的和活动的传感器台站收集数据并加以融合。为了满足实时防御系统的要求，需要对数据进行迅速有效的处理，但传统的数据处理常常做不到这一点。特别是，当所需要检测的目标信号淹没在大量噪声及不相关信号与杂波中时，应用人工方法对微弱目标信号进行实时检测和提取已不可能。因此，需要开发对多源信息进行有效融合处理的新型理论和技术。

在未来战争中，电磁环境将异常复杂，无论是空战、海战还是陆战以至于陆、海、空相结合的立体战争，都将日益依赖于各种传感器设备。在实战中，传感器将受到各种欺骗和干扰，检测目标的数量日益增多，运动速度越来越快，而且多数目标采用隐身技术和低空/超低空突防技术，使传感器难以捕获和跟踪。这种现状使得数据融合(Data Fusion)作为一种特殊的作战手段已渗透到几乎所有军事部门和各个作战领域，数据融合已不仅是高技术战争的先导，而且贯穿于战役的全过程，深刻地影响着战争的进程和结局。

目前，要给出数据融合这门学科的一般概念是非常困难的，这种困难是由所研究的内容的广泛性和多样性带来的。自从海湾战争以来，致力于数据融合研究的人数和这一领域著作的数量都显著地增加了。这门学科每年都在以大量的新成果丰富自己，获得越来越多的内容。

已经给出的数据融合概念的定义都是功能性的。美国国防部 JDL (Joint Directors of Laboratories)<sup>[1]</sup> 从军事应用的角度将数据融合定义为这样的一种过程, 即把来自许多传感器和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) 和身份估计 (Identity Estimation), 以及对战场情况和威胁及其重要程度进行适时的完整评价。这一定义基本上是对数据融合技术所期望达到的功能的描述, 包括低层次上的位置和身份估计, 以及高层次上的态势评估 (Situation Assessment) 和威胁估计 (Threat Assessment)。

Edward Waltz 和 James Llinas 在文献[2]中对上述定义进行了补充和修改, 用状态估计代替位置估计, 并加上了检测 (Detection) 功能, 从而给出了如下定义: 数据融合是一种多层次的、多方面的处理过程, 这个过程是对多源数据进行检测、结合、相关、估计和组合以达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估计。

关于数据融合研究的范围现在尚无定论, 以军事应用为目标的数据融合技术也可用于工业和农业, 诸如城市规划, 资源管理, 气候、作物及地质分析等。因此, 从人们在数据融合范围内所进行的研究或活动来看, 数据融合可以广义地概述为这样的一种过程, 即把来自多传感器的数据和信息, 根据既定的规则, 分析、结合为一个全面的情报, 并在此基础上为用户提供需求信息, 诸如: 决策、任务、航迹 (Track) 等<sup>[3,4]</sup>。简单地说, 数据融合的基本目的就是通过组合, 可以比从任何单个输入数据元素获得更多的信息。

数据融合系统的开发受现代战争需求的驱动。现代战争的许多因素要求及时地提供精确、易于理解的信息来取代大量的原始信息。因此, 模拟人的思维方式, 提高处理速度、容量或改善处理精度是形成数据融合的重要原因。

随着科学技术的发展, 现代武器的速度、射程、命中精度、杀伤力和机动性等战术技术性能大大提高, 战争的范围正向外层空间扩展, 战争的突然性大大增加, 作战的方式常常是诸兵种协同行动, 因此, 原来的指挥体制、方式和手段远远不能适应现代战争的这些要求。于是, 世界各国在大力发展武器系统的同时, 非常重视 C<sup>3</sup>I (Command, Control, Communication and Intelligence) 系统。C<sup>3</sup>I 系统是一种用于军事目的的信息系统, 是指挥人员对部队进行管理、实施指挥控制所使用的以计算机为核心技术的人机系统。

数据融合在军事 C<sup>3</sup>I 中的应用范围列举如下:

- (1) 使用单一的武器平台或分布式传感器网络的广域监视系统;
- (2) 采用多传感器发现、跟踪和指挥导航的火力控制系统;
- (3) 收集情报系统 (态势和威胁估计);
- (4) 敌情指示和预警系统;
- (5) 使用传感器的自主式武器;
- (6) 军事力量的指挥和控制。

多传感器数据融合在解决探测、跟踪和识别问题方面, 具有如下的性能裨益:

- (1) 生存能力强——在有若干传感器不能利用或受到干扰, 或某个目标/事件不在覆盖范围时, 总会有一种传感器可以提供信息;
- (2) 扩展了空间覆盖范围——通过多个交叠覆盖的传感器作用区域, 扩展了空间覆盖范围, 一种传感器可以探测其它传感器探测不到的地方;
- (3) 扩展了时间覆盖范围——用多个传感器的协同作用提高检测概率, 某个传感器可

以探测其它传感器不能顾及的目标/事件；

- (4) 提高了可信度——一种或多种传感器对同一目标/事件加以确认；
- (5) 降低了信息的模糊度——多传感器的联合信息降低了目标/事件的不确定性；
- (6) 改进了探测性能——对目标/事件的多种测量的有效融合，提高了探测的有效性；
- (7) 提高了空间分辨率——多传感器孔径可以获得比任何单一传感器更高的分辨率；
- (8) 增加了测量空间维数——系统不易受到敌方行动或自然现象的破坏。

与单传感器相比，多传感器系统的复杂性大大增加，由此会产生一些不利因素，如提高成本，降低系统可靠性，增加设备物理因素(尺寸、重量、功耗)，以及因辐射而增大系统被敌方探测的概率等。在执行每项具体任务时，必须将多传感器的性能裨益与由此而带来的不利因素进行权衡。

随着电子信息技术的迅猛发展和它在军事领域中的广泛应用，新的军事技术革命正在形成。未来战争将是作战体系间的综合对抗，在很大程度上表现为信息战的形式。而建立具有合成作战的指挥能力和智能化的决策指挥能力的指挥控制系统的瓶颈是数据融合技术，因为夺取信息优势是取得战役乃至战争胜利的关键。因此，关于多传感器数据融合理论和技术的研究对于我国国防建设具有重要的战略意义和社会效益。另外，军事电子信息系统是典型的信息系统，这类系统对多传感器数据融合所提出的技术要求都具有非常普遍的意义。因此，关于多传感器数据融合理论和技术的研究成果还可以通过转化，扩展到有类似特征的民用信息系统中，例如，大型经济信息系统、决策支持系统、交通管制系统、工业仿真系统、金融形势分析系统等，因而可进一步获得更广泛的经济和社会效益。

## 1.2 数据融合的理论基础

开展基础理论的研究应首先弄清数据融合系统是由哪些基本要素组成的，并认识这些要素组成数据融合系统的方式和有关规律，以建立不同种类数据融合过程的标准的、统一的模式，用统一的术语和度量标准去解释基础过程。我们注意到，在数据融合的各个领域，有许多理论观点正在逐步完善并获得公认，这将有利于研究人员之间更好地合作，同时也更有利于更好地引入数学和其它已有的支撑技术。

### 1.2.1 数据融合的一般处理模型

Edward Waltz 和 James Llinas 在文献[2]中提出了对数据融合的两点认识：

- (1) 数据融合可广泛地应用于对 C<sup>3</sup>I 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。

基于这两点认识，Edward Waltz 和 James Llinas 努力为数据融合的研究者提供一个公共参考框架，其要点是开发一个数据融合的一般处理模型及相应的分类和专用词汇，为进一步给出数据融合的一些论点和文体提供一个公共参考。他们的著作已在我国翻译出版并成为许多研究者的重要参考文献。

形成详细合理的处理模型和功能结构是数据融合学科逐渐成熟的一个标志。这样的模型可以为重要的通信载体服务，人们可通过通信载体来探讨和评估该模型的设计概念、算

法和工作策略。这些模型也可以辅助数据融合中共性的东西发展成公共的功能模块或处理标准，以及重要的、能够辅助交互操作的多服务系统。

为了建立公共的语言和概念，White<sup>[5]</sup>给出了一个著名的一般处理模型，其基本思想如图 1.1 所示，它把数据融合分为 3 级：

- (1) 一级——融合的位置和标识估计；
- (2) 二级——敌我军事态势估计；
- (3) 三级——敌方兵力威胁估计。

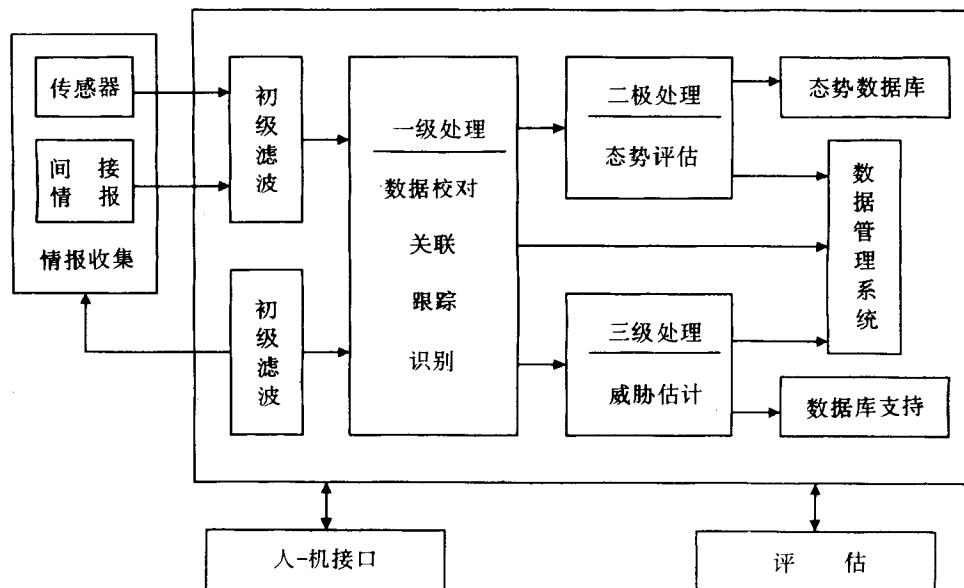


图 1.1 数据融合处理模型

这个模型已成为我国学者研究数据融合的基本出发点。将数据融合分为 3 个级别，确定了处理流中人为的逻辑分割。这些级的建立，也部分地得到了有关数据处理过程的共同术语。该模型强调信息产品，即数据融合处理中的各个步骤，而不强调计算机上的结构形式。当处理从一级移到三级时，该模型也强调推理层次，经过这些层次，融合产品的大部分将从很特殊的情况推广到较一般的情况。在本章的随后几节里，我们将看到数据融合过程是如何按照这一模型被逐步细化并形成一个基本框架的。

由于数据融合是对多源信息进行阶梯状的、多层的处理过程，所以我们对一个数据融合系统应该提出这样的要求：该系统所实施的每一个融合过程，在其每一个环节上，各种数据所携带的有用的信息量都应发挥到最大的程度，使得融合结果对系统用户有利；而且，每一数据所携带的有用信息量在其所处的局部过程中所起的作用，应该与其它部分的作用有机地承接在一起，以至于当一个局部过程十分紧密地接近于感觉经验的时候，由此产生的有效数据的作用不致在进入系统的其它过程时被减弱，即系统的各个部分达到了和谐与统一。

### 1.2.2 数据融合的概念与结构分类

实现数据融合系统的结构化是许多有远见的研究人员一直关注的问题之一,这项工作将推动数据融合学科不断走向成熟。将融合处理结构化的工作在 80 年代中期已经开始进行,当时人们意识到需有通用的处理结构以改善研究人员之间的交流。按照 Reiner<sup>[6]</sup>的观点,将跟踪器—相关器功能结构分为集中式、自主式和混合式 3 种类型;同时, Yannoni<sup>[7]</sup>又提出了“测量集级”融合、“航迹文件”融合和“公共孔径”融合的分类概念;稍后, Blackman<sup>[8,9]</sup>也评价了一个类似的结构集,称为中心法、传感器法和组合法。上述分类思想反映了一级数据融合中加工原始数据、加工预处理过的局部融合数据,以及将两者相结合的方法。对于单纯的自动目标识别(ATR)问题, Pemberton<sup>[10]</sup>等人提供了一个类似的体系结构分类,给出的 3 种类型分别是后置预处理器自动目标识别、特征级自动目标识别和混合自动目标识别。上述分类思想被往后的研究者不断推敲和深化,逐渐趋于成熟。

下面分别介绍目标跟踪与目标识别的概念与结构分类。

#### 1.2.2.1 目标跟踪

##### 一、概述

动态目标处理需要对目标位置进行连续的或按时间采样的离散测量,并且要有估计目标运动行为的能力,以预测连续的传感器范围内目标的下一个位置。该处理需要将每个新的传感器数据集合与目标航迹的预测位置反复进行关联,以确定哪一个传感器检测是当前的检测或是新目标或是虚警。相对简单的应用包括单传感器—单目标跟踪和单传感器—多目标跟踪。许多复杂的多目标跟踪问题包含多传感器,它们具有不同的目标视角、测量几何形状、精度、分辨率和视野。尽管通过考虑空间之外的参数可使不同传感器观测中固有的属性数据能够辅助这种关联处理,但是这些传感器中任何特性的不同将会使测量的关联问题复杂化,一个通用的递推关联和跟踪功能如图 1.2 所示。

图 1.2 显示了怎样完成不同的功能处理以产生目标航迹文件,其中数据关联和关联控制是两种最基本的功能。如图 1.2 所示,关联功能完成一个基于  $m$  个假设的  $m$  维判定(相关)处理,即将每个到来的观测与既定的判定准则相比较。这些准则包括  $n$  个已有航迹的判定准则、新航迹检测准则和虚警准则。判定的结果,将在下述集合中做出选择,用以分配新的观测:

- (1) 一个已有的航迹或为进行估计更新的航迹(航迹的“维持”或“继续”);
- (2) 一个新的目标,以起始一条新的航迹;
- (3) 虚警。

将一个新观测分配给一条已有的航迹是按照跟踪门规则进行的。跟踪门(或关联区域)是跟踪空间中的一块子空间,中心位于被跟踪目标的预测状态,其大小由接收正确回波的概率来确定。若新观测满足某目标的跟踪门规则,则新观测被分配给该目标航迹;当新观测不落入任何已有航迹的跟踪门内时,此观测可能为新的目标或虚警,由此可建立新的目标航迹或摒弃虚警目标。数据关联还要最后确定最合理的观测/航迹配对。随后的状态估计用来预测每条航迹在下一个观测周期中的状态。这些预测的航迹状态被反馈,以便与下一步的观测进行关联。

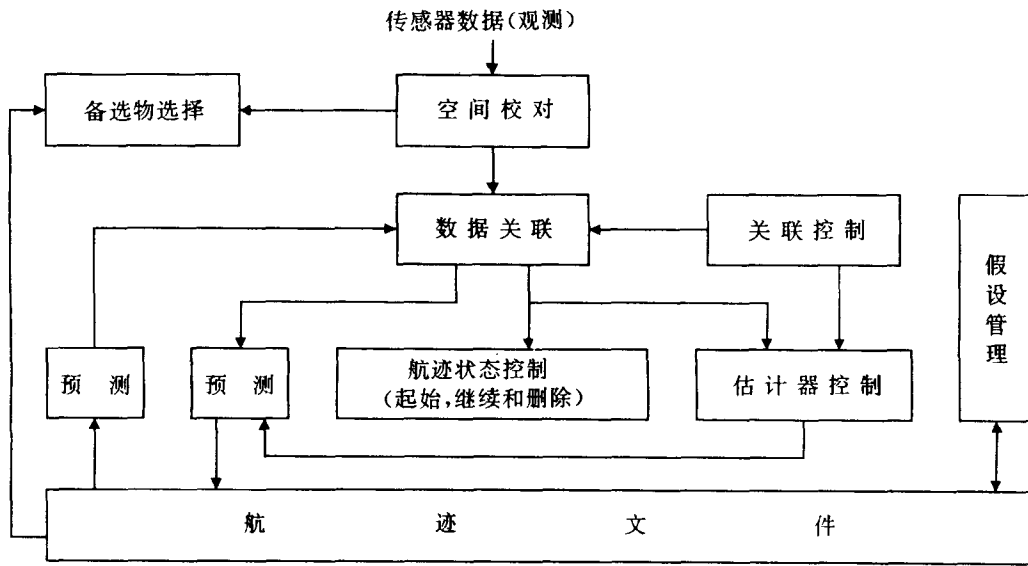


图 1.2 递推关联和跟踪功能

### 二、多目标跟踪的功能要素

多目标跟踪的功能要素包括数据关联与状态估计、跟踪维持、跟踪起始与跟踪终结、漏报与虚警等，现简述如下。

#### 1. 数据关联与状态估计

数据关联包括计算所有假设的得分和使用关联门限把每个校准时间的备选航迹与新的传感器航迹进行比较，将落入门限之内和门限之外的观测分配给各自的现有航迹或起始一条新航迹。如图 1.3 所示，由传感器接收到的观测数据首先用于更新已建立的航迹，关联准则用于确定观测/航迹配对是否合理或者正确，数据关联将最后确定观测、航迹配对；然后根据跟踪维持方法(包括机动辨识及自适应滤波与预测)估计出每条航迹的真实状态。在跟踪空间中，那些不与已经建立的航迹相关的观测可能来自新的目标或是虚警，由跟踪起始方法可以辨别其真伪，并相应地建立新的档案；当某些目标逃离跟踪空间后，由跟踪终结方法可消除多余的目标档案，以减轻不必要的计算负载。

在实际的多目标跟踪环境中，会出现这样的情况：要么多个观测位于同一跟踪门内，要么单个观测位于多个跟踪门的交集内。一般用两种方法解决此类问题。第一种方法是“最近邻”方法<sup>[11,37]</sup>，即选择使统计距离最小或残差概率最大的回波作为目标回波；第二种方法是“全邻”方法<sup>[12]</sup>，该方法考虑落入跟踪门内的所有回波，根据相关情况计算出各概率加权系数以及跟踪门内各回波的加权和，即等效回波，然后用各等效回波更新多个目标的状态。此方法对密集多目标环境有较好的应用价值，受到众多研究者的重视，其典型的代表是相互作用多模型—概率数据互联方法<sup>[13,14]</sup>、联合概率数据互联方法<sup>[15]</sup>和多假设方法<sup>[16]</sup>。

#### 2. 跟踪维持

跟踪维持即连续保持跟踪，其目的是保证被跟踪目标可分辨且不发生误跟和失跟现

象。跟踪维持包括机动识别和自适应滤波与预测部分。

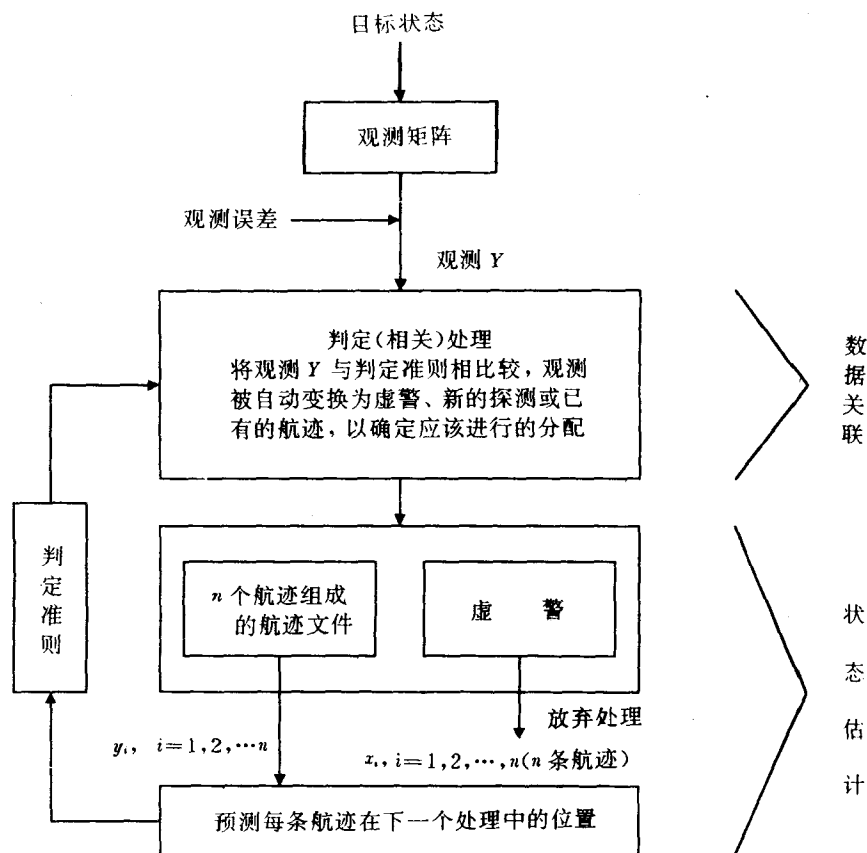


图 1.3 数据关联和状态估计

### 3. 跟踪起始

跟踪起始是一种建立新的目标档案的决策方法, 主要包括假定航迹形成、航迹初始化和航迹确定 3 个方面。一般地, 不与已知航迹相关的观测被用来形成新的假定航迹, 进而进行航迹的初始化处理。

### 4. 跟踪终结

跟踪终结是消除多余目标档案的一种决策方法, 当被跟踪目标逃离跟踪空间或者被摧毁时, 为避免不必要的存储与计算, 跟踪系统自动消除多余的目标档案, 完成跟踪终结功能。

### 5. 空间校对

把报来的传感器数据变换到一个公共空间参考点上与目标数据库或航迹文件中的其它测量进行校对。

### 6. 备选物的选择

在空间上经校对的传感器测量的位置及其属性数据用来选择目标数据库中所有与关联备选测量邻近的检测或航迹。



### 7. 关联控制

利用测量方差、测量时间或其它因素调整得分处理或关联门限的维数。

### 8. 估计器控制

在航迹估计器模型中除了稳态行为以外,还必须检测航迹行为的实际变化(如目标机动),以调整随后变化过程行为的模型参数。

## 三、跟踪系统分类

在目标状态估计与跟踪方面,融合系统可分为3大类:集中式、分布式和混合式。

### 1. 集中式

集中式将各传感器节点的数据都送至中央处理器进行融合处理(图 1.4)。此方法可以实现实时融合,其数据处理的精度高,解法灵活,缺点是对处理器要求高,可靠性较低,数据量大,故难于实现。

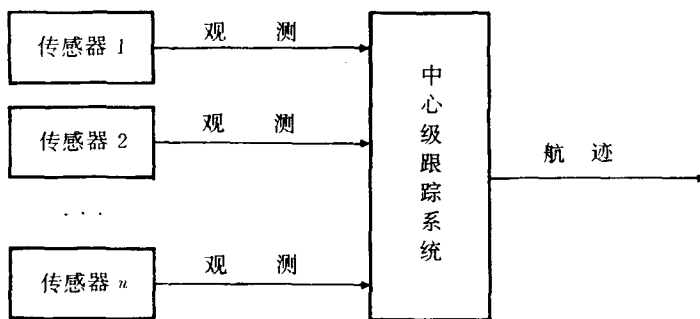


图 1.4 集中式跟踪系统

### 2. 分布式

在分布式中,各传感器利用自己的量测单独跟踪目标,将估计结果送至总站,总站再将子站的估计合成为目标的联合估计(图 1.5)。分布式对通信带宽需求低、计算速度快、可靠性和延续性好,但跟踪精度没有集中式高。

### 3. 混合式

混合式是以上两种形式的组合(图 1.6)。

多目标跟踪问题由于存在许多限制因素而复杂化,这些限制因素包括<sup>[2]</sup>:

- (1) 目标数目和目标密度;
- (2) 传感器探测性能(一般用 ROC 曲线表示,笔者在本书第三章中将基于 ROC 曲线提出另一种新的评价指标);
- (3) 目标重现率和目标动态特性;
- (4) 传感器测量精度和过程噪声;
- (5) 传感器或模型偏差;
- (6) 背景噪声源(如空域、地面杂波);
- (7) 状态估计器性能。

对于一个特定的跟踪环境,各因素之间可能相互影响。当前的研究现状是,各自根据对上述部分因素的考虑而开发各种专门的解法。这些解法可以在不同的跟踪应用中发挥作