

多传感器最优估计 理论及其应用

闫莉萍 夏元清 刘宝生 付梦印◎著



科学出版社

多传感器最优估计理论 及其应用

闫莉萍 夏元清 刘宝生 付梦印 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是关于多传感器数据融合最优估计理论及其应用的一部专著,主要汇集了作者近十几年来在多传感器数据融合、多速率系统滤波、最优估计理论、组合导航等方面的代表性研究成果。本书涉及的理论和方法有:Kalman 滤波及其各种改进算法,异步多速率线性系统、非线性系统的滤波与融合方法,观测数据存在不可靠、随机丢包等故障条件下的数据融合状态估计方法,噪声相关环境下的数据融合方法,以及对上述各种情况鲁棒的组合导航算法等。

本书可作为控制科学与工程、信息与通信工程等专业研究生的教学参考书,同时对从事多源信息融合技术研究、目标跟踪与导航算法设计与开发的广大科研工作者和工程技术人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

多传感器最优估计理论及其应用/闫莉萍等著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-042716-8

I. ①多… II. ①闫… III. ①传感器—估计理论—最佳化理论 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第292476号

责任编辑:张海娜 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京源海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

*

2015年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:24 1/2

字数:493 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

多传感器数据融合是从 20 世纪 70 年代起迅速发展起来的科学技术。随着科学技术的全面、快速发展,由最初的以战争为背景,发展到包括工业过程监视、工业机器人、遥感、毒品检查、病人照顾系统、金融系统、船舶避碰与交通管制系统等民用应用的各个方面。多传感器最优估计理论是多传感器数据融合领域一个很重要的研究部分。在该领域,国内外发表了大量有价值的学术论文,并出版了不少专著。

近些年来,随着计算机和网络技术的快速发展,传统的数据融合方法面临许多新的问题和挑战。由网络传输引起的数据异步、随机丢包等问题,激发了许多科研工作者在这方面开展研究工作。包括智能车和机器人在内的无人移动平台导航技术的发展,对组合导航算法有了更高的要求。这方面的工作存在一定的难度,内容较新,专著很少。例如,在最优估计理论方面,大部分专著和教材以 Kalman 滤波为主,主要涉及单传感器或者同速率多传感器的融合估计问题,并且在模型方面,主要针对线性系统模型开展研究工作。在异步、多速率传感器数据融合的最优估计以及非线性系统数据融合最优估计方面,国内外的论文相对来说很少,专著中有涉及的则更少。在导航领域,大部分专著和教材围绕某种特定的导航系统展开,在最新的数据融合算法如何有效地应用于组合导航系统方面,则很少有专著涉及。作者长期从事多传感器数据融合最优估计理论、组合导航算法等方面的研究工作,对多传感器最优估计和导航有比较深入的了解。近年来在相关领域,特别是在异步、多速率传感器的数据融合和最优估计方面,也有一部分研究成果获得了国内外同行专家的认可,并获得成功的推广和应用。作者深切地感受到有必要编写一部重点介绍多传感器最优估计理论及其应用的专著,遂有此书。

本书紧密围绕多传感器数据融合状态估计基本理论和方法及其应用进行展开。全书分 16 章。第 1 章为绪论,概述了多传感器最优估计理论的概念、模型结构、研究现状、代表性的研究方法及存在的主要问题,以及组合导航系统的历史与研究现状。第 2 章重点介绍了 Kalman 滤波的基本方程及其推导,并简要介绍了 Kalman 预测、平滑与扩展 Kalman 滤波方法。第 3 章在标准 Kalman 滤波基础上,推导出了变速率、非均匀采样系统的最优 Kalman 滤波算法。第 4 章在对离散小波变换和多尺度分析基本思想进行概述的基础上,介绍了多尺度 Kalman 滤波,并给出了一种基于多尺度测量预处理的多传感器最优估计方法。第 5 章主要介绍了不同传感器以不同采样速率均匀采样情况下的数据融合与最优估计问题。第 6 章在第 5 章

的基础上,考虑了网络传输等因素可能导致的数据随机丢包的问题,基于线性系统模型,给出了随机丢包和传感器故障情况下,多速率传感器的数据融合和最优估计算法。第7章针对一类时不变线性动态系统,在不同传感器以不同采样率异步对同一目标进行观测的情况下,基于多尺度系统理论进行系统建模,并给出了尺度递归融合估计算法、两种分布式融合估计算法及一种混合式数据融合估计算法。第8章在第7章的基础上,考虑了随机丢包对估计结果的影响,推导出一种分布式数据融合估计方法,在传感器以一定速率丢包的情况下,依然能保证状态估计结果具有较好的性能。第9章针对一类时变单模型线性动态系统的异步多速率数据融合问题,推导出两种有代表性的状态估计方法,即基于速率归一化和联邦 Kalman 滤波的分布式融合估计算法,以及异步多速率数据的顺序式融合估计算法。第10章在第9章问题描述的基础上,考虑了随机丢包和传感器故障对估计结果的影响,给出了一种判断观测数据是否可靠的准则,并基于该准则修正了分布式融合估计算法。前面所有章节都没有考虑传感器噪声的相关性问题,第11~13章不仅考虑了传感器噪声之间的相关性,而且考虑了传感器噪声与动态系统噪声之间的相关性。第11章针对一类时变线性系统,在不同传感器以同采样率对同一目标进行测量的情况下,推导出了集中式、分布式和顺序式融合估计算法,并对各种算法的性能进行了比较分析。第12章研究了噪声相关环境下的多速率传感器融合估计问题。第13章比第11、12章具有更实际的意义,所考虑的传感器之间噪声相关的统计特性未知。第14章和第15章是非线性系统的多传感器最优估计问题研究。其中,第14章将经典的非线性滤波方法 Sigma 点 Kalman 滤波 (SPKF) 和强跟踪滤波 (STF) 推广到对异步、多速率传感器的融合估计中,同时将两种算法结合,给出了一种新的非线性滤波方法: Sigma 点强跟踪滤波 (SPSTF) 算法,并用于异步、多速率传感器数据融合,给出了更精确的状态估计结果。第15章在传感器以一定概率丢包的情况下,对 SPKF 算法进行了改进,提高了估计结果的鲁棒性和可靠性。最后,第16章是多传感器最优估计理论在导航系统中的应用,在噪声统计特性未知的情况下,将 Sage-Husa (SH) 自适应滤波和 STF 结合起来,给出了一种新的滤波方法,并通过导航系统仿真实例验证了算法的有效性。

本书关于异步多速率线性系统数据融合方面的部分研究工作是在清华大学周东华教授的指导下完成的。作为本书第一作者和第三作者的博士指导教师,周东华教授为其成长付出了辛勤的汗水。还要衷心感谢闫莉萍博士的硕士指导老师、现杭州电子科技大学文成林教授的栽培,以及美国新奥尔良大学的李晓榕教授在闫莉萍博士公派访美期间及之后的工作中所给予的很多有益的指导和帮助。学生刘玉蕾和陈良红分别参与了本书第12章和第13章的部分仿真工作。研究生朱翠、姜露和彭晶晶分别参加了本书部分章节的文字录入或参考文献的整理工作。北京邮电大学的肖波副教授参与了本书部分章节的修改和校对等工作。在此一并致谢。

本书的部分研究内容得到了国家自然科学基金 (61004139, 61225015, 61031001, 91120003)、北京市自然科学基金 (4132042)、北京高等学校杰出英才计划 (YETP1212)、北京理工大学基础研究基金 (20130642005)、北京理工大学科研基地创新计划、北京理工大学优秀青年教师基金等项目的支持。本书的出版得到北京理工大学自动化学院的领导,特别是王军政院长(书记)的大力支持。在出版经费方面,得到北京自动化学会青年科技人才出版学术专著计划,以及北京理工大学自动化学院学科发展计划的资助。值此书出版之际,作者在此对给予支持和资助的单位和个人表示衷心的感谢!

由于作者水平和研究工作的局限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2014 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景与意义	1
1.2 多传感器数据融合的体系结构	2
1.2.1 多传感器数据融合的定义	2
1.2.2 多传感器数据融合的原理与体系结构	3
1.2.3 多传感器数据融合的优缺点	7
1.3 多传感器数据融合估计算法分类综述	8
1.3.1 采样率系统	9
1.3.2 单采样率多传感器数据融合状态估计算法	11
1.3.3 多采样率多传感器数据融合状态估计算法	14
1.3.4 异步多传感器数据融合估计算法	19
1.3.5 噪声相关环境下的数据融合估计算法	20
1.3.6 网络环境下的滤波和融合问题	22
1.3.7 非线性系统数据融合估计算法	27
1.4 组合导航系统与方法概述	30
1.5 当前研究热点、难点与未来的研究方向	33
1.6 本书的主要内容及章节安排	34
1.7 本章小结	35
第 2 章 随机离散动态系统的 Kalman 滤波	36
2.1 问题的提出	36
2.2 最优均方估计	37
2.2.1 最优均方估计的定义	37
2.2.2 线性最优均方估计	38
2.3 Kalman 最优滤波基本方程	40
2.3.1 系统描述	40
2.3.2 离散时间 Kalman 滤波基本方程	42
2.3.3 离散时间 Kalman 滤波基本方程的直观推导	44
2.3.4 离散时间 Kalman 滤波基本方程的投影法证明	48
2.4 Kalman 最优预测基本方程	52

2.4.1	状态的预测估计	52
2.4.2	状态预测估计的修正	53
2.4.3	最优增益阵	54
2.4.4	误差的无偏性及误差方差阵	55
2.4.5	离散系统 Kalman 最优预测基本方程	56
2.5	Kalman 最优平滑基本方程	57
2.5.1	固定区间最优平滑	58
2.5.2	固定点最优平滑	58
2.5.3	固定滞后最优平滑	60
2.6	扩展 Kalman 滤波	61
2.6.1	围绕标称轨道线性化滤波方法	62
2.6.2	围绕滤波值线性化滤波方法	65
2.7	本章小结	67
第 3 章	变速率非均匀采样系统的 Kalman 滤波	68
3.1	引言	68
3.2	问题描述	68
3.3	非均匀采样系统的 Kalman 滤波算法	70
3.4	算法性能分析	78
3.5	仿真实例	80
3.6	本章小结	83
第 4 章	多尺度 Kalman 滤波及基于多尺度测量预处理的数据融合	84
4.1	引言	84
4.2	小波分析概述	85
4.2.1	小波变换的定义与基本性质	85
4.2.2	多尺度分析	88
4.2.3	Mallat 算法	92
4.3	多尺度 Kalman 滤波	96
4.4	基于多尺度测量预处理的数据融合	100
4.4.1	系统描述	100
4.4.2	信号的多尺度表示	101
4.4.3	基于小波变换的多尺度测量预处理	102
4.4.4	基于多传感器多尺度测量预处理的信号去噪方法	103
4.5	仿真实例	104
4.6	本章小结	107

第 5 章 基于线性系统的多速率传感器数据融合估计	108
5.1 引言	108
5.2 问题描述	108
5.3 线性动态系统的多速率多传感器数据融合估计	110
5.3.1 基于状态分块的融合估计算法	110
5.3.2 两种分布式数据融合状态估计算法	114
5.4 仿真实例	121
5.5 本章小结	124
第 6 章 随机丢包情况下多速率传感器鲁棒融合估计	125
6.1 引言	125
6.2 问题描述	125
6.3 基于不完全观测数据的多速率传感器融合估计算法	126
6.3.1 模型约简	126
6.3.2 融合算法	130
6.4 仿真实例	131
6.5 本章小结	136
第 7 章 时不变线性系统的异步多速率传感器数据融合估计	137
7.1 引言	137
7.2 问题描述	138
7.3 尺度递归融合估计算法	139
7.3.1 多尺度状态空间模型	139
7.3.2 尺度递归状态融合估计算法	141
7.4 基于混合式结构的融合估计算法	150
7.5 两种分布式融合估计算法	155
7.5.1 递归联邦分布式融合估计	156
7.5.2 有反馈分布式融合估计	160
7.6 仿真实例	164
7.6.1 尺度递归融合估计算法仿真	164
7.6.2 混合式融合估计算法仿真	168
7.6.3 分布式融合估计算法仿真	170
7.7 本章小结	175
第 8 章 时不变系统异步多速率间歇数据的鲁棒融合估计	176
8.1 引言	176
8.2 问题描述	176
8.3 随机丢包下的异步多速率传感器数据融合算法	177

8.4 仿真实例	188
8.4.1 圆周运动的机动目标跟踪	188
8.4.2 目标跟踪系统的状态估计	192
8.5 本章小结	196
第 9 章 时变线性系统的异步多速率传感器数据融合估计	197
9.1 引言	197
9.2 问题描述	197
9.3 基于速率归一化和联邦 Kalman 滤波的分布式融合估计	198
9.3.1 异步多速率系统的速率归一化数学建模	199
9.3.2 基于联邦 Kalman 滤波的数据融合估计	203
9.4 异步多速率数据的顺序式融合估计	205
9.5 仿真实例	211
9.5.1 基于联邦 Kalman 滤波的融合估计算法仿真	211
9.5.2 顺序式融合估计算法仿真	217
9.6 本章小结	219
第 10 章 异步多速率传感器线性系统的建模与容错融合估计	220
10.1 引言	220
10.2 问题描述	222
10.3 最优状态估计算法	223
10.3.1 异步多速率多传感器系统建模	223
10.3.2 无故障情况下的数据融合估计	226
10.3.3 存在不可靠观测情况下的状态容错融合估计算法	229
10.4 状态容错融合估计算法的性能分析	230
10.5 仿真实例	233
10.6 本章小结	241
第 11 章 相关噪声环境下的多传感器数据融合	243
11.1 引言	243
11.2 问题描述	243
11.3 最优融合算法	244
11.3.1 最优集中式融合	244
11.3.2 最优顺序式融合	244
11.3.3 最优分布式融合	247
11.4 仿真实例	251
11.5 本章小结	255

第 12 章 相关噪声环境下多速率传感器融合估计	257
12.1 引言	257
12.2 问题描述	258
12.3 序贯式融合估计算法	259
12.4 分布式融合估计算法	267
12.5 仿真实例	274
12.5.1 序贯式融合估计算法仿真	274
12.5.2 分布式融合估计算法仿真	278
12.6 本章小结	282
第 13 章 噪声统计特性未知情况下的多源信息融合估计	283
13.1 引言	283
13.2 相关多源信息融合估计算法简述	283
13.2.1 广义凸组合融合算法	283
13.2.2 基于集合论的松弛切比雪夫中心协方差交叉算法	286
13.2.3 基于信息论的快速协方差交叉算法	288
13.2.4 容错广义凸组合融合算法	292
13.3 两种改进的多源信息融合估计算法	296
13.3.1 改进的松弛切比雪夫协方差交叉融合算法	296
13.3.2 改进的快速协方差交叉算法	298
13.4 仿真实例	299
13.4.1 Kalman 滤波算法得到局部估计值	299
13.4.2 RCC-CI、IT-FCI、DCI 仿真分析	300
13.4.3 FGCC、CI/CU 仿真分析	305
13.4.4 改进算法的仿真分析	308
13.5 本章小结	310
第 14 章 非线性系统异步多速率传感器数据融合估计	312
14.1 引言	312
14.2 问题描述	313
14.3 状态融合估计算法	314
14.3.1 基于 SPKF 方法估计非线性时变系统的状态	315
14.3.2 基于 STF 方法估计非线性时变系统的状态	320
14.3.3 非线性系统状态估计新算法: SPSTF	324
14.4 仿真实例	331
14.5 本章小结	339

第 15 章	非线性系统异步多速率传感器数据容错融合估计	340
15.1	引言	340
15.2	问题描述	341
15.3	异步多速率传感器数据容错融合估计算法	342
15.4	仿真实例	348
15.5	本章小结	356
第 16 章	多传感器最优估计理论在导航系统中的应用	357
16.1	引言	357
16.2	组合导航系统模型	357
16.3	多速率系统的鲁棒 Kalman 滤波及在导航系统中的应用	361
16.4	仿真实例	365
16.5	本章小结	367
参考文献		368

第1章 绪 论

1.1 背景与意义

随着科学技术的发展,人类已经进入信息时代,信息时代的明显特征之一是信息爆炸。同时,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多传感器系统大量涌现。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要求信息处理的及时性等,都要求提出对多源信息进行有效融合处理的新型理论和技术^[1]。为了应对这种局面,信息融合应运而生。多源信息融合是一个新兴的研究领域,是针对一个系统使用多种传感器这一特定问题而展开的一种关于数据处理的研究。多传感器数据融合技术是近些年来发展起来的一门实践性较强的应用技术,是多学科交叉的新技术,涉及信号处理、概率统计、信息论、模式识别、人工智能、模糊数学等领域^[2]。

将航行载体从起始点引导到目的地的技术或方法称为导航^[3]。导航所需的基本导航参数有载体的即时位置、速度、航向和姿态等。测量导航参数的设备称为导航系统。飞机常用的导航系统有:惯性导航系统(inertial navigation system, INS)、GPS(global positioning system)导航系统、多普勒(Doppler)导航系统(DVS)、双曲线无线电导航系统等^[3-5]。随着现代战争中信息化、网络化程度的提高,海陆空天一体化的主体战争已经形成。导航已从确定武器平台自身位置,并将其引领到目的地的单一功能扩展成为信息战的一部分,导航定位信息已在C4ISR系统中发挥着重要作用。各级指挥机关和控制部门,各种海、陆、空、天武器装备,都有赖于导航定位信息的支持。随着科技的进步,特别是现代战争的需求,对导航系统的精度、可靠性、实时性、自主性及性价比要求越来越高,单一的导航系统难以满足要求。20世纪80年代以来,随着科学技术的迅速发展,可供运载体装备的导航系统越来越多。但是,任何一种导航方法都存在实用性问题,每个系统的固有误差以及物理上的限制,都将影响到该导航设备的广泛应用。如果将这些具有互补性和非相似性的导航系统组合起来,就可以相互取长补短,充分利用各子系统的信息,提高导航精度,扩大使用范围。对于各子系统测量的相同信息源,也可使测量值冗余,从而提高整个导航系统的可靠性^[1, 2, 6]。

近年来,随着传感器技术、信号检测与处理以及计算机应用技术的发展,信息

融合技术的应用更加广泛。除了在各种武器平台上应用外,在许多民用领域,如工业过程监视、工业机器人、遥感、毒品检查、病人照顾系统、金融系统、船舶避碰与空中交通管制系统等方面也得到了广泛的应用。世界各主要发达国家都将其列为重点、优先发展的技术之一。事实上,在被测量(或被识别)的目标具有多种属性或多种不确定因素的干扰时,使用多传感器协调完成共同的检测任务便是必然的选择^[2]。因此对多传感器信息融合的研究具有广泛的理论意义和应用价值。

多传感器最优估计指的是将传统的估计理论与数据融合理论进行有机结合,综合利用多个传感器的观测信息得到对目标状态的最优估计。研究在估计未知量的过程中,如何最佳利用多个数据集中所包含的有用信息是其核心^[7]。针对多传感器最优估计问题,在不同传感器以相同采样速率同步获取数据情况下,针对线性单模型动态系统,国内外已经有不少的研究成果。然而,实际应用问题中,不同传感器往往以不同采样率获取数据,并且由于网络、各种干扰等的影响,获取的数据往往是非同步的,甚至是不均匀的。针对这一问题,相对来说成果较少。作者近些年来在这方面开展了一系列研究工作。本书在介绍经典最优 Kalman 滤波基础上,将重点介绍作者近些年来研究给出的各种实用的最优估计方法,同时对其在导航方面的应用进行简要介绍。

1.2 多传感器数据融合的体系结构

1.2.1 多传感器数据融合的定义

数据融合也称为信息融合 (information fusion)。关于什么是信息融合,迄今为止,国内外有多种不同的定义。

美国国防部 JDL(Joint Directors of Laboratories) 从军事应用的角度将信息融合定义为这样一个过程: 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), 对战场情况和威胁及其重要程度进行适时的完整评价^[2]。这一定义基本上是对信息融合技术所期望达到的功能描述, 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)。该定义从军事应用的目标出发, 但是也适用于其他领域。

Edward 等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、多方面的处理过程, 这个过程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^[8]。

何友等在其专著《多传感器信息融合及应用》中指出: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^[1]。韩崇昭等在其著作《多源信息融合》中写到: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^[7]。

总之,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,以达到更好地了解对象的目的^[2]。

1.2.2 多传感器数据融合的原理与体系结构

多传感器信息融合是人类和其他生物系统中普遍存在的一种基本现象,实际上是对人脑综合处理复杂问题的一种功能模拟。按照信息抽象的功能层次,信息融合可分为五级:检测级融合、位置级融合(状态估计)、属性级融合(目标识别)、态势评估与威胁估计,信息融合各功能模块的系统流程示意图如图 1.1 所示^[9-11]。

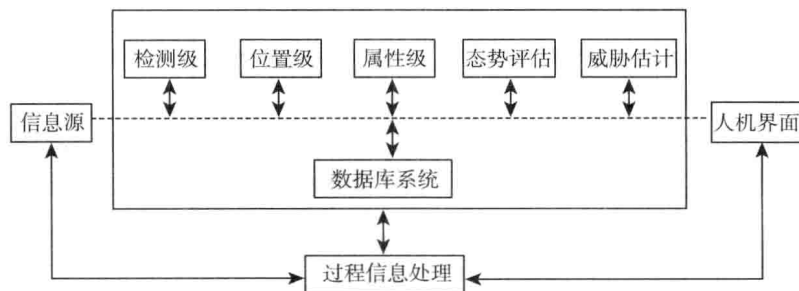


图 1.1 信息融合系统功能框图

1. 检测级融合

检测级融合是直接多传感器分布检测系统中检测判决和信号层上进行的融合。它最初仅应用在军事指挥、控制和通信中,现在它的应用已拓广到气象预报、医疗诊断和组织管理决策等诸多领域。检测级融合的结构模型主要有四种,即并行结构、分散式结构、串行结构和树状结构,如图 1.2 所示^[1, 10]。

2. 位置级融合

位置级融合是直接传感器的观测数据或传感器的状态估计上进行的融合,包括时间和空间上的融合,是跟踪级的融合,属于中间层次,也是最重要的融合之一^[1]。近年来,国内外对这一级的融合研究得最多,以美国 MIT 的 Willsky 教授及其研究小组为代表的多尺度系统估计理论研究为其中一个很重要的分支^[12-16]。本书关于状态融合估计算法的研究也是以此为基础进行的,下文将会给出更详细的阐述。

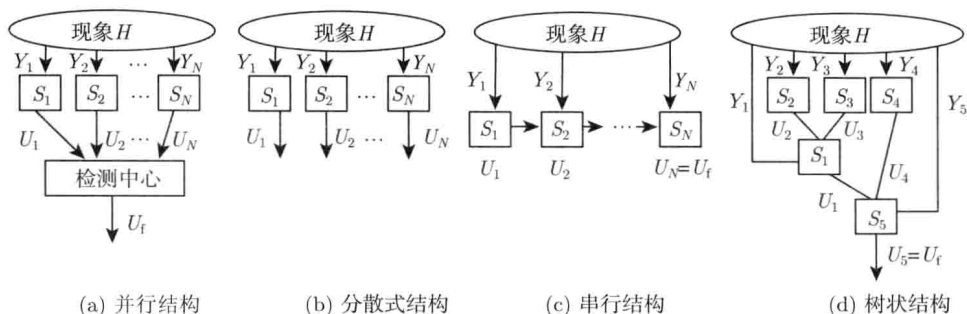


图 1.2 检测级融合结构示意图

对单传感器跟踪系统而言，主要是按时间先后对目标在不同时间的观测值即检测报告进行融合，如边扫描边跟踪雷达系统，红外和声纳等传感器的多目标跟踪与估计技术都属于这类性质的融合。在多传感器跟踪系统中，主要有集中式、分布式、混合式和多级式等几种融合结构^[1, 9]。

在集中式多传感器跟踪系统中，首先按照对目标观测的时间先后对测量点迹进行时间融合，然后对各个传感器在同一时刻对同一目标的观测进行空间融合，它包括多传感器融合跟踪与状态估计的全过程。这类系统常见的有多雷达综合跟踪和多传感器海上监视与跟踪系统。集中式融合结构示意图如图 1.3 所示^[9]。

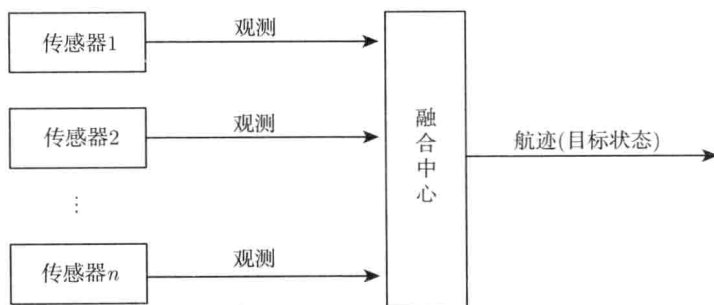


图 1.3 集中式融合结构

在分布式多传感器跟踪系统中，各传感器利用自身的测量数据单独跟踪目标，将估计结果送至融合中心（总站），融合中心再将各个子站的估计合成为目标的联合估计。一般来说，分布式估计精度没有集中式高，但是由于它对通信带宽需求低，计算速度快，可靠性和延续性好，因此，成为近年来的研究热点，分布式融合结构示意图如图 1.4 所示^[1, 9]。

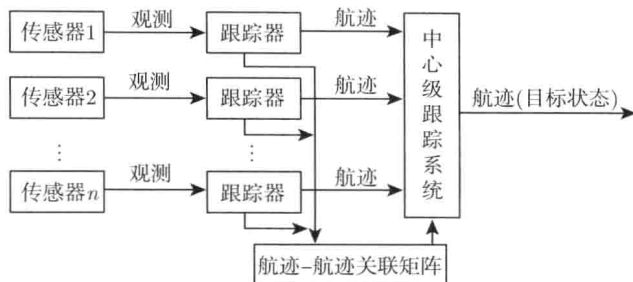


图 1.4 分布式融合结构

分布式系统一般还可以分为无反馈分布式系统、有反馈分布式系统和完全分布式系统等三种融合结构^[2]：

(1) 无反馈层次结构：各传感器节点把各自的局部估计结果全部传送到中心节点以形成全局估计，这是最常见的分布式估计系统结构。

(2) 有反馈层次结构：它与 (1) 的主要区别在于通信结构不同，即中心节点的全局估计可以反馈到各局部节点，这种结构具有容错的优点。当检测出某个局部节点的估计结果很差时，不必把它排斥于系统之外，而是利用较好的全局结果来修改局部节点的状态，这样既改善了局部节点的信息，又可继续利用该节点的信息。

(3) 完全分布式结构：在这种一般化系统结构中，各节点间由网状或链状等形式的通信方式相连接。一个节点可以享有与之相连的节点信息。这也意味着各局部节点可以不同程度地享有全局的一部分信息，从而可能在许多节点上获得较好的估计。在极端的情况下，每个节点都可以作为中心节点获得全局最优估计。

混合式位置级融合是集中式和分布式多传感器系统相结合的混合结构^[1]。传感器的检测报告和目标状态估计的航迹信息都被送入融合中心，在那里既进行时间融合也进行空间融合。由于这种结构要同时给出检测报告和航迹估计，并进行优化组合，因此需要复杂的处理逻辑。混合式结构也可以根据问题的需要，在集中式和分布式结构中进行选择变换。这种结构的通信和计算量都比其他结构要大，因为需要控制传感器同时发送探测报告和航迹估计信息，通信链路必须是双向的。另外，在融合中心除加工来自局部节点的航迹信息外，还要给出传感器送来的探测报告，使计算量成倍增加。然而，它能满足许多应用的需要。巡航导弹的控制和主、被动雷达复合制导系统都是典型的混合式结构^[1, 9]。混合式融合结构示意图如图 1.5 所示^[9]。

3. 属性级融合 (目标识别级融合)

目标识别亦称属性分类或身份估计 (身份识别)^[9]。按信息抽象程度，目标识别 (身份识别) 又可分为决策层、特征层和数据层融合三个层次。身份识别三个层次的融合结构图及其流程图分别如图 1.6 和图 1.7 所示^[9]。