

摘要

传感器网络作为新兴的测控网络技术是能够自主实现数据采集融合和传输应用的智能网络应用系统。传感器网络是逻辑上的信息世界与真实的物理世界紧密结合,从而真正实现“无处不在的计算(普适计算)”模式。传感器网络技术是一项涉及多门前沿学科发展的综合性技术,在基础理论和工程技术两个层面向科技工作者提出了大量的挑战性研究课题,比如如何实现传感器网络在温室系统中的自动监控问题已经引起众多研究者的兴趣。

针对传感器网络在温室自动监控中的应用,本文研究了传感器网络中大量不确定数据信息的数据融合结构和算法。在分析 D-S 证据理论和专家系统等算法的基础上,提出了适用于传感器网络系统的二级融合模型,给出了基于这些算法的混合算法。本文中详细介绍了该模型和混合算法的设计实现。

在此基础上,本文设计实现了一个温室自动监控系统模型。在数据融合的过程中,局部融合中心首先对数据的有效性进行甄别,并对有效数据进行优化;系统级融合中心采用专家系统算法的思想组建了系统的识别框架,D-S 证据理论中的基本概率分配函数赋值由专家系统完成。环境参数经局部融合中心优化后其结果送入系统融合中心融合,全局融合最后送入专家知识库进行规则匹配,并给出控制策略。通过对温室环境参数的实时采集和融合,可以获得精确的监测结果,专家系统的介入使得温室控制系统的智能性得到了进一步的提高。实验表明,这种方法提高了监控系统对温室环境参数监控的准确性、系统的鲁棒性以及实用性。

关键字: 传感器网络, 数据融合, 温室控制, 专家系统, D-S 理论

ABSTRACT

Sensor Networks(SN) as the new measurement and controlling technology, it is the smart network system which can implement the data collection, data confusion and transfer application. SN combines the logical information word and true physics world. It can achieve the “Pervasive Computing or Ubiquitous Computing” mode in deed. SN is a synthesis technology which refers a lot of knowledge, and brings out many study question of basic theory and engineering technology. Such as how wireless sensor networks to achieve greenhouse automatic monitoring system has already attracted attention in the interest of many researchers.

For wireless sensor networks in a greenhouse automatic monitoring of applications, This thesis studies the wireless sensor network data fusion structure and algorithm which are based on a large number of uncertain data. Based on the analysis of D-S evidence theory , expert system and other algorithms, this thesis presents two-level fusion model which is applicable to wireless sensor networks, proposed for wireless sensor network system integration of two models and give the hybrid algorithm based on these algorithms. This thesis detailed the design and implementation of the data fusion model and the hybrid algorithm.

On this basis, this thesis designed and implemented a greenhouse automatic monitoring system model. First of all, local fusion center screen the effectiveness of data and optimize effective data at the process of data fusion; system-level fusion center use the principles of expert system to identify the formation of a systematic framework, the basic probability assignment function value of D-S evidence theory is given by expert system’s knowledge. Environmental parameters optimized by the local fusion center, its results transmitted to the system-level fusion center for integration, finally the results of overall integration sent to the expert system rule matching, and give control strategy. Through collecting real-time information of the greenhouse environment parameters and fusing data, we can get precise results to regulate all kinds of parameters of greenhouse in time, and expert system intervention makes greenhouse intelligent control system has been further improve. As a result, we can improve decision-making

ABSTRACT

veracity of greenhouse parameter-regulate, Experiments show that this hybrid algorithm improve the system robustness and practicality.

Keywords: SN, Data fusion, Greenhouse Control, Expert system, D-S theory

图目录

图 2-1 传感器网络的形成过程.....	8
图 2-2 传感器网络体系结构.....	9
图 2-3 传感器节点的基本构成.....	10
图 2-4 传感器网络软件结构图.....	11
图 3-1 传感器数据融合示意图.....	18
图 3-2 数据融合技术分类.....	20
图 3-3 数据融合的结构示意图.....	26
图 3-4 基于 Bayes 推理的数据融合.....	28
图 3-5 证据区间示意图.....	31
图 3-6 D-S 方法的推理结构图.....	33
图 3-7 D-S 证据推理在多传感器融合中的应用过程.....	33
图 3-8 专家系统结构图.....	34
图 4-1 基于加权模糊的推理过程.....	42
图 4-2 数据融合处理过程.....	47
图 5-1 传感器网络整体构架.....	52
图 5-2 评测预警系统结构图.....	53
图 5-3 系统执行过程图.....	54
图 5-4 融合结构图.....	55
图 5-5 专家系统软件结构框图.....	56
图 5-6 技术支持处理过程.....	61
图 5-7 异常处理过程.....	62

表目录

表 4-1 证据集合及可信度分配函数.....	39
表 4-2 组合结果比较.....	40
表 4-3 温度采样数据.....	45
表 5-1 温度采集记录.....	50
表 5-2 温度相融矩阵表.....	50
表 5-3 归一化后的温度相融矩阵表.....	51
表 5-4 蒲公英温室环境参数记录.....	51
表 5-5 湿度、温度与光照度的基本概率分配值.....	58
表 5-6 规则制定样表.....	59
表 5-7 调控措施表.....	59
表 5-8 湿度与温度融合.....	63
表 5-9 光照度与温度融合.....	63
表 5-10 补光设施列表.....	64

缩略语目录

英文缩写	英文全称	中文释义
SN	Sensor Network	传感器网络
VLSI	Very Large Scale Integrated circuits	超大规模集成电路
QoS	Quality of Service	服务质量
GPS	Global Positioning System	全球定位系统

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

签名：黄小红 日期：2009年5月27日

关于论文使用授权的说明

本学位论文作者完全了解电子科技大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权电子科技大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签名：黄小红 导师签名：元柄
日期：2009年5月27日

第一章 引言

1.1 传感器网络及其应用

1.1.1 传感器网络概述

“后 PC 时代”的到来使得计算机的设计冲破了传统的设计思想，计算机的设计目标开始向低功耗、微型化、分布式等方向变化，随着半导体芯片制作工艺的迅速发展和 VLSI 设计的普及化，如今将功能完整的计算机系统集成到一块芯片已经成为可能；微型计算机的计算处理能力也随着无线通信技术和分布式计算技术的成熟有了很大的提高；传感器的体积也随着传感技术和微电技术的进步开始向微型化发展。传感器网络这一全新的信息获取和处理模式就是在这些技术的高度集成下形成的。同时传感器网络也被列为 21 世纪最有影响力的 21 项技术和改变世界的 10 大技术之一^[1]。

由大量传感器节点通过无线通信等关键技术自组织构成的传感器网络，不仅能够实现数据的采集量化，而且还具有数据融合以及传输应用等功能。因此，传感器网络被认为是信息技术发展的一个新领域，其在军事和民用领域均有着非常广阔的应用前景，如军事侦察、空间探索、环境监测、医疗监护、交通监控等。

由于自然环境和传感器自身的原因，传感器网络中难免会出现不准确数据或者冗余数据。不准确的数据可能是由于传感器损坏或者是特殊外界环境的影响；为了得到尽可能可信的数据，网络中会用多个传感器节点从各个角度测试同一个对象，因此冗余数据的产生是在所难免的，也是必须的。如何区分这些准确数据，如何从这些冗余数据中获得更加准确的消息涉及传感器网络的数据处理问题成为研究者们研究的主要问题之一。对于不准确数据的甄别主要是通过测试数据的相似性来判断，同一性质的测试数据在正常条件下相似度很高，而非正常数据与正常数据的差别就很大，因此那些与群体差别最大的数据一般情况下就是非正常数据。而对于冗余数据的处理的方法也比较多，数据融合技术研究已成为传感器网络研究的基本研究课题之一。

1.1.2 传感器网络的应用

随着通信技术的发展、计算成本的下降及处理器的微型化,传感器网络在军事、空间探索、环境监测和预报、智能家电等领域有着广阔的应用前景和研究价值。随着传感器网络的广泛应用和深入研究,传感器网络在人类生活的各个领域都得到普遍的应用。

1. 军事应用

由于传感器网络具有可快速部署、自组织性、隐蔽性强和容错性高等特点,因此很快被应用到了军事上。军事作战中,在公共地带部署传感器网络,或者直接利用飞机和炮弹将传感器节点播撒到敌军阵地范围内,这样可以近距离且隐蔽的收集战场信息,实现对敌军情况的监控、战场的实时监控、目标的及时定位、战场评估、核攻击的监测等功能,以便迅速的获取作战的第一手资料。传感器网络通过分析采样数据,可以得到很准确的目标定位,从而为火控和制导系统提供精确的数据。传感器网络已成为 C^4ISRT (command, control, communication, computing, intelligence, surveillance, reconnaissance and targeting)系统必不可少的一部分^[3-4],世界各国在军事上均投入了大量的人力和财力进行研究。

2. 医疗护理

传感器网络在医疗界也有广阔的应用前景,传感器网络在医疗方面的主要应用有跟踪和监控医生和患者的行动,监测人体的各种生理数据,或用于管理药房的药物等。医生可以在病人身上安装特殊用途(如心率监测设备)的传感器节点,病人的病情可以通过传感器网络随时得到监护,可以及时发现异常并迅速抢救。传感器网络可以用来采集人体的生理征兆(如呼吸、血压、心跳等),所搜集的数据将被用于了解人体的活动机理或者用于研制新药,攻克疑难病症。人工视网膜就是一项比较成功的生物医学应用项目,在这个项目中利用传感器的无线通信满足反馈控制的需要,有利于人工视网膜进行图像的识别和确认。

3. 环境监测和预报系统

在现代化的农业管理中,传感器也发挥了很大的作用。传感器网络可以用于精细化农业生产和管理^[5-10]如:监控农作物灌溉情况,土壤和空气的质量,在畜牧业方面可以用传感器网络进行动物饲养管理中。在大自然的环境监测中,可利用传感器网络进行气象和地理研究、洪水监测等。在野生动物的研究方面,利用传感器网络跟踪鸟类、小型动物和昆虫进行种群研究等^[11]。基于传感器网络的ALERT系统中利用多种不同质的传感器监测降雨、江河水位和土壤水分,并依靠监测信

息来判断洪水爆发的可能性。传感器网络还可以运用到森林环境监测中，森林中可以随机的播撒大量传感器节点，在平常状态下，传感器节点定期报告森林环境数据，当有火灾发生时，传感器节点通过协同合作可以在短时间内将火源的地点、火势的大小等信息传递给监控系统^[12]，通过对这些有利数据的分析，消防人员可以迅速找到火源，及时控制火情。

4. 温室控制

传感器网络在温室控制中也有着广泛的应用，西方国家在现代温室测控技术上起步早。上世纪六十年代，西方国家已开始农业生产运用生产型的高级温室应用；设施农业中已普遍使用微电子技术，温室测控与日常管理实现了计算机网络自动化的管理。

国外现代化温室的内部设施的发展也是比较完备的，并形成了一定的标准。计算机能够集中化控制温室内的多种环境参数，利用传感器节点能够实现对温室内的温度、湿度、光照度、营养液浓度等环境因子的检测，进而实现各个调控机构的自动运行，如可定时浇灌的灌溉系统，湿帘与风扇配套的降温系统，由热水锅炉或热风机组成的加温系统，无级调节的天窗通风系统，以及适用于温室作业的农业机械等。计算机对这些系统的控制已经是基于环境模型的监督控制或基于专家系统的人工智能控制，而不是简单的、独立的、静态的直接数字控制，有些温控系统可以为温室的管理者提供包括作物种植的经济分析、病虫害防治、温室在内的管理与决策系统信息。

我国在温室控制系统方面的研究起步较晚^[13]，七十年代以来，国内开始发展以塑料大棚、节能日光温室为主的设施农业，促进了农村经济的快速发展，蔬菜季节性短缺及地域性差异的矛盾也得到了缓和。同时从国外引进了现代化温室进行实验研究。引进的温室与我国传统温室相比，其空间大，便于进行机械作业，生产率与资源利用率都有所提高，为我国温室发展起到了很好的推动作用。

总之，传感器网络是继 Internet 之后的 IT 技术热点，具有广阔的应用前景^[14]，将对 21 世纪人类的活动产生重大的影响，研究传感器网络的意义重大而深远。

1.2 传感器网络关键技术

传感器网络作为新兴的研究领域，已经成为信息领域的研究热点，由于其涉及到多个交叉学科，因此有着较多的技术需要研究，下面仅列出部分关键技术^[15-17]。

1. 网络的拓扑控制技术

拓扑控制是传感器网络研究的核心技术之一。对于无线自组织传感器网络而言，通过拓扑控制自动生成的网络拓扑结构的性能良好与否直接关系到路由协议和 MAX 协议效率的高低，如果网络拓扑结构良好还可为时间同步、数据融合和目标定位等多方面奠定良好的基础，同时有利于节省节点能量达到延长网络生存期的目的。

目前，拓扑控制研究的主要问题是如何在满足网络覆盖度和连通度的前提下，使用功率控制方法和骨干网节点选择，去除传感器节点间多余的无线通信链路，使生成的网络拓扑结构具有高效的数据转发性^[2]。节点功率控制和层次型拓扑结构控制是网络拓扑控制考虑的两个方面。功率控制机制在满足网络连通度的前提下，减少传感器节点的发送功率，平衡节点单跳可达的邻居数目；相关的主要算法有 CBTC 和 LMST 等基于邻近图的近似算法，COMPOW 等统一功率分配算法，LINT/LILT 等基于节点度数的算法。层次型网络拓扑控制机制采用分簇原理，簇头节点由某些节点充当，再由这些簇头节点形成一个具有处理并转发数据功能的骨干网，这样可以暂时关闭其他非骨干网节点的通信模块以达到节省能源的目的；目前主要的算法有 TopDisc 成簇算法，改进的 GAF 虚拟地理网格分簇算法，以及 LEACH 等自组织成簇算法。

2. 网络协议技术

传感器网络协议的任务是把各独立的节点形成一个多跳的数据传输网络。由于传感器节点的存储能力、计算能力以及通信能量都比较低，而且其携带的能源也非常有限，这些导致传感器网络中运行的网络协议不能太复杂，而每个传感器节点也只能获取局部网络的拓扑信息。同时，由于网络资源在不断的随着环境在变化，使得传感器网络的拓扑结构也具有动态变化性。面对这些问题，网络协议的设计需要考虑更多的问题，也对其提出了更高的要求。数据链路层协议和网络层协议是传感器网络目前研究的重点。数据链路层的介质访问控制主要用来构建底层的基础机构，同时控制传感器节点的工作模式和通信过程；网络层的路由协议决定了监测数据的传输路径。

传感器网络作为应用型的网络，当应用需求不同时，需要根据应用的类型或应用目标环境的特征而定制网络协议，目前，任何一个协议都不可能高效地适应在所有不同的应用环境中。

3. 时间同步技术

时间同步是传感器网络系统完成协同工作的一个关键技术。如在测量移动机器

人的速度时，工作人员需要计算不同传感器检测事件的时间差，在声源判定时也需要确定节点间的时间同步。GPS 系统在配备了固定且高成本的接收机后才能够以纳秒级精度与世界标准时间 UTC 保持同步，但是 GPS 系统在室内、火山或海洋等有掩体的环境中无法发挥作用；NTP 协议因结构相对比较稳定且链路连接很少失败，因此被广泛的应用在 Internet 上，但其只适合应用在有线网络系统中。因此，它们都不适用传感器网络。

4. 数据管理技术

从数据存储的角度分析，传感器网络是以分布式数据库的方式进行网络数据管理的。传感器网络的用户不需要了解数据管理实现的细节，而只需要了解数据查询的逻辑结构，因此采用数据库的存储方式可以把存储在网络中的数据的逻辑视图和网络中的实现相分离，这样就把实现很好的隐藏起来，只展示用户关心的数据。虽然对网络中的数据进行抽象处理会在一定程度上降低系统执行的效率，但该方法可以使传感器网络的易用性得到显著的增强。目前最具有代表性的传感器网络数据管理系统有美国加州大学伯克利分校的 TinyDB 系统和 Cornell 大学的 Cougar 系统。

虽然从某种角度可以将传感器网络视为一种分布式数据库，但是传感器网络的数据管理与传统的分布式数据库存在着很大的差别。首先，传感器节点不仅能量有限，而且容易失效，数据管理系统在保证有效的数据管理服务的同时，也要保证节点的低能耗。再次，传感器网络中节点众多，节点产生的数据流是有限的，这样的话，数据就无法通过传统的分布式数据库的数据管理技术进行分析处理。此外，传感器网络一般会采用随机抽样或连续的方式进行数据查询，这也使得传统分布式数据库的数据管理技术不能用在传感器网络的数据管理中。传感器网络的数据管理系统主要分为集中式、半分布式、分布式和层次式，目前半分布式结构是研究工作中的重点。传感器网络中主要采用网络外部存储、本地存储以及以数据为中心的数据存储方式。与其他两种存储方式相比，以数据为中心的存储方式可以在能量消耗和通信效率两个方面获得很好的折中效果，以数据为中心的存储方式的常用方法是基于地理散列表的方法。

5. 数据融合技术

由于传感器节点的易失效性，传感器网络需要数据融合技术对多份数据进行综合分析，提取有效数据，提高信息的准确度。同时传感器网络存在能力约束性，减少传输的数据量也就是在节省网络的能量，因此各传感器节点可以利用本地计算和存储能力处理数据的融合，剔除冗余数据达到节省能源的目的。

传感器网络的多个协议层都可以使用数据融合技术达到一定的应用目的。在网络层中，如果将路由协议和数据融合技术相结合，可以达到减少数据传输量的目的；在应用层可以利用分布式数据库技术对接收的数据进行筛选和甄别，从而达到融合的目的；此外，在不损失时间性能和信息的完整性的前提下，通过减少 MAC 层的头部开销和发送冲突达到节省网络能量的目的。

研究者对数据关联、目标状态估计和目标识别等数据融合中的关键问题的研究由来已久。在 1974 年，Bar-Shalom 推广概率数据关联算法并导出联合概率数据关联算法，同年，Singer、Sea 等提出了“全邻”最优滤波算法。另外，整数规划法、模糊关联法、高斯和法等都是比较优秀的的数据关联算法。目标状态估计包括机动目标状态和非机动目标状态估计，由于大多实体的运动在实际环境中具有机动性，因此，很多研究者也开始重视对机动目标跟踪算法的研究。Singer 提出了加速度时间相关模型用以描述目标的机动运动状态。后来，Mosse 等针对加速度时间相关模型的零均值的不足提出了相关高斯噪声模型，该模型引入了非零加速度分量，具有随机开关均值的特征。随后，有研究者提出了交互多模型算法，该算法在描述目标的运动变化规律时采用多个不同机动特性进行综合计算处理。目标识别主要被应用在战场态势、威胁估计，以及对目标进行身份估计等场合。目标识别算法总体上分为基于物理模型的、基于特征推理的和基于认识模型的方法。其中基于特征推理的识别算法主要有贝叶斯推理、D-S 证据推理、模糊逻辑推理等。

传感器网络相对于传统网络有更明显的节点失效性以及数据丢失性等缺点，数据融合技术在大幅度降低数据冗余性的同时，也可能丢失更多的信息，因此也降低了网络的鲁棒性。因此，数据融合技术的设计只有面向应用需求而特别设计时，才能在传感器网络设计中获得最大的收益。

1.3 论文研究内容

传感器网络的数据融合问题作为传感器网络比较基础的课题，对其的研究是非常有必要的。且在不同的应用环境下，传感器网络在数据融合方面的侧重点都不同。因此，本文的数据融合研究也是针对温室监控领域展开的，本文对温室监控中的传感器网络数据融合问题进行了较为深入的研究，主要做了以下工作：

(1) 本文首先对传感器网络的发展、关键技术以及应用领域做了详细的研究，了解了传感器网络在温室中的应用情况，认真分析了温室环境中的环境参数和相

互之间的关系。

(2) 文章介绍了传感器网络中数据融合三类主要算法, 即: 基于统计和估计的算法, 基于信息论的融合算法和基于认识模型的算法。本文还主要介绍了基于统计和估计算法的 Bayes 方法和 D-S 证据理论方法, 以及基于认知模型的专家系统方法。

(3) 本文针对 D-S 理论组合规则的局限和不足, 考虑到温室环境的特殊性, 采用了一种改进的证据组合算法辅以专家系统进行决策级融合, 以适应实际环境中可能出现的各种异常情况。

(4) 在实际的数据融合过程中, 采用的数据融合结构是在基于 D-S 证据理论和专家系统结合的混合算法下, 首先用专家系统的知识库为 D-S 算法构造识别框架及基本概率分配赋值, 然后将监测结果送入专家系统, 按照领域专家的知识 and 经验做出合理决策, 调节温室环境, 为作物创造一个最佳的生长环境。

1.4 论文组织结构

本论文分为六章, 其中:

第 1 章: 叙述了传感器网络产生背景, 同时介绍了传感器网络主要应用领域和国内外研究现状, 并对本论文的主要研究工作和论文组织结构进行了说明。

第 2 章: 介绍了传感器网络相关技术, 包括传感器网络的体系结构、传感器网络的特点, 以及传感器网络的性能评价指标。

第 3 章: 介绍了数据融合的相关技术, 对数据融合常用的方法进行了分类, 并研究了传感器网络中数据融合技术的相关问题, 最后介绍了 Bayes 推理、D-S 证据理论以及专家系统三种算法。

第 4 章: 在对 D-S 理论的规则合成的局限性和不足进行分析的前提下, 提出一种改进 D-S 证据理论方法, 因应用环境的特殊性, 专家系统的推理机是基于加权模糊推理实现的, 最后介绍了适用于温室控制系统的两级数据融合混合算法。

第 5 章: 介绍了试验的环境, 提出了系统的总体结构及系统执行流程, 重点介绍了数据融合模块的设计, 数据融合模块中主要介绍了融合的结构和专家系统中三个子模块的设计和执行情况。最后对试验结果进行了分析, 得出混合算法在本系统中的运行情况。

第 6 章: 总结了论文所做的工作, 并对未来工作进行了展望。

第二章 传感器网络相关技术

2.1 传感器网络的结构体系

2.1.1 传感器网络的形成方式

随着应用环境的不同,传感器节点的安置方式也有所不同。一般有两种安置节点的方式:第一种方式是在某种人能够到达的特定环境中,为了达到某种目的按照一定要求或规律人为的进行传感器节点的配置,且预先设定传感器节点的信息传输路径,如本文中的温室控制系统就是按照这种方式安置传感器节点;第二种方式是在人不能很好控制的环境下(如森林、敌方战场或火山区等)按照一定的概率随机的抛洒传感器节点到目标区域内,抛洒传感器节点的方式可以是飞机空投或炮弹播撒等。第一种组网方式和一般的传感器网络比较相似,差异很小,而第二种组网方式具有随机性和不确定性,且节点通过自组织的方式构成网络,体现了传感器网络的自组织特点,是传感器网络的典型代表。

传感器网络的自组织形成过程如图 2-1 所示。第一个步骤是根据传感器网络的实际应用环境抛洒传感器节点,抛洒的方式可以是用人工作业或空投的方式;第二个步骤是当传感器节点被送到目标区域后进入自检启动程序,并唤醒自己,正常启动的节点再向周围发出探测信号,并记录探测到的邻居节点;第三个步骤是传感器节点根据自己探测到的邻节点情况按照组网算法的规律形成网络;第四步,在传感器节点形成网络后,节点在根据需要进行数据传输时只需根据路由算法选择最优的路径即可。

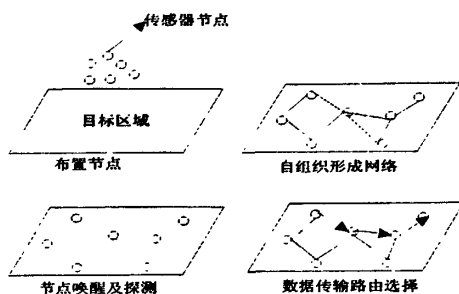


图 2-1 传感器网络的形成过程

2.1.2 网络结构体系

传感器网络是由很多传感器节点以自组织的方式构成的便捷的无线通信网络系统。传感器使用的特殊环境要求传感器网络的体系设计过程必须将传感器设计成低功耗、微型、便宜、且具有感知环境的能力，传感器具备计算机的基本处理能力的同时还配备无线传输等装置。传感器的感知装置主要是检测目标环境中的有用的环境因子（如湿度、火源、光源等），并用无线传输设备将收集到的经过简单运算处理的数据传送到网络基站，这样工作人员就可以通过分析基站的数据信息知道目标环境的变化趋势，给出相应的解决方案。

图 2-2 描述了传感器网络的基本体系结构，最底层是实际监测环境中部署的传感器节点，这些节点自组织形成网络后进行目标区域内的数据收集工作，然后这些信息被发送到基站，基站主要完成数据的收发和网络状态的监控，基站再将数据发送到连入 internet 的数据服务器进行数据的应用层处理。

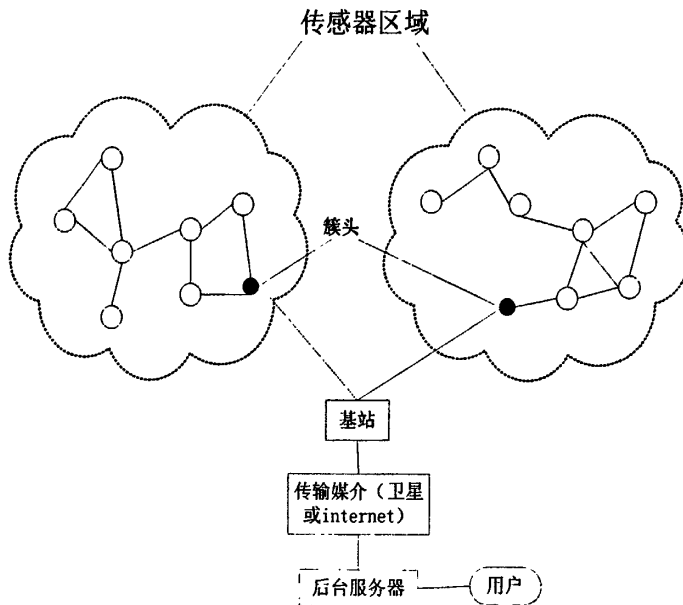


图 2-2 传感器网络体系结构

每个传感器区域都有一个网关（通常由基站来充当网关的角色）负责收集传感器节点发送来的数据，而传感器节点在自组织形成网络的同时并不知道与相邻节点的相对位置，数据则通过这个通信网络发送到基站。基站收集到的数据在通过 Internet、卫星或其它传输媒介传送到后方的服务器做进一步的处理，同时服务器

可以向基站发号施令。

2.1.3 节点构成

传感器节点是传感器网络中最基本的网络设备，可以说没有传感器节点的存在就没有所谓的传感器网络，节点主要完成信息的采集、传输、预处理等工作，这使得传感器节点的设计十分重要。节点的设计根据需求的不同，设计也会有所不同。但是节点的基本功能是相通的，节点功能一般包括四个组成部分：电源、数据传输、数据采集和数据处理。由传感器节点的组成也可以把节点理解成为一个微型的嵌入式系统。目前市面上的嵌入式处理器芯片很多，节点可以选用的处理器芯片有 Motorola 的 68HC16、ARM 公司的 ARM7 和 Intel 的 8086 等，如果要求处理器具有比较复杂的任务调度与管理功能的话，可以选用 Ucos-II、嵌入式 Linux 和 TinyOS 等^[18]。

传感器节点的物理组成主要分四个子系统，描述如下：

- (1) 能源供应子系统，主要包括电源和交直流转换器；
- (2) 传感器子系统，包括一组传感器和激励装置；
- (3) 通信子系统，其主要功能是作为无线通信短距离收发的电路；
- (4) 计算子系统，由微处理器或微控制器组成，主要功能是控制传感器、执行通信协议和处理传感数据的算法。

图 2-3 描述了传感器节点的基本构成，一般而言，包括传感器、ADC、CPU 及存储器、通信模块、控制模块及电源（能量）等。在实际应用中，节点的控制模块在某些情况下是可以省掉的，图 2-3 中虚线框内部分是无控制作用的节点组成。节点的模块间必须协同才能成功的完成任务，且节点由这些模块组装成的体积相当于火柴盒大小甚至更小。

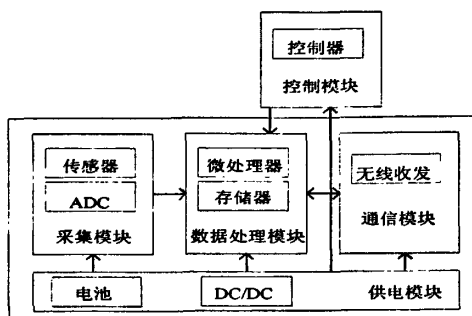


图 2-3 传感器节点的基本构成

传感器网络的节点设计主要有两种方法：一种是采用 MEMS 和集成电路技术，设计包含微处理器、通信电路、传感器等模块的高度集成化传感器节点，如 Smart Dust、WINS 等；另一种方法是利用市场上可以获得的商业元器件组装传感器节点，如围绕 TinyOS 项目设计的系列硬件平台。

2.1.4 传感器网络软件结构

传感器网络的软件结构设计必须考虑为应用开发人员提供良好的服务抽象，为不同的应用提供良好的支持，同时又能够保证最有效地、自适应地利用系统资源。由于传感器网络的应用涉及到硬件设计、网络传输，以及用户接口三个方面^[19-20]，因此传感器网络的软件设计大致也要分为三个层次，即硬件管理层、中间层和应用系统。图 2-4 给出了传感器网络的软件结构。

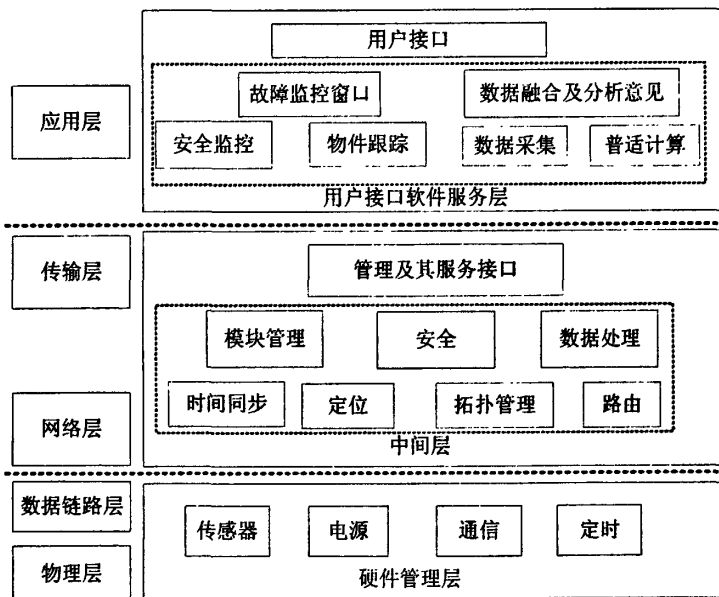


图 2-4 传感器网络软件结构图

在软件体系的层次结构中，中间层处于应用层与数据链路层之间，主要完成网络传输；而硬件管理层则主要指物理层和数据链路层。

硬件管理层提供了节点硬件的资源管理能力，主要解决与节点特性密切相关的问题。从节能、体积等要求的综合考虑，传感器节点通常将无线模块、传感器模块一体化设计，在确定的硬件特性下，传感器节点的主要功能应该包括电源(休眠)

管理、定时器管理、传感器管理以及相邻节点间的可控无线通信功能。

中间层作为应用系统和硬件管理层的桥梁，使特定应用的开发人员易于使用，同时又能充分利用节点有限的软硬件能力，在网络和系统的层次上屏蔽复杂和异构。基于领域的中间层可以进一步划分为两个必要的子层，即服务接口层以及由若干核心模块组成的中间核心模块层。这样可以在有限的资源条件下，综合考虑路由、数据处理、拓扑管理以提高处理性能和最大化节能是设。由中间层直接管理和实现网络层协议可以最有效地利用合适的网络协议实现节点间的协同计算，通过协同完成系统功能，提高可靠性，延长整个网络的生命期。

传感器网络软件实现的终极目标就是被用户所使用，而应用系统就是整个软件体系跟用户的交互窗口。应用系统根据用户需求进行系统的功能设计及功能管理，应用系统需要做的第一件事情就是告诉用户网络的运行状态，即网络的安全监测及传感器的跟踪情况，如果网络安全受到威胁（如某个小范围内的传感器失去联系），用户可以根据应用系统所给出的安全评测及时对网络进行修复工作。

无线传感器网络应用系统需要关注的另一个问题是数据融合问题，这也是本文的研究内容。在传感器网络的实际应用中，用户最关心的问题并不是传感器所采集的杂乱无章的数据，而是这些数据能够告诉用户网络监测的区域所发生的事情。因此应用系统必须为这些看似无关的数据找到一种联系，剔除其中的多余数据，找到有利用价值的信息，并通过某种方式通知用户被监控现场发生的事情。数据融合模块实际上就是系统中的一个数据处理模块，它主要的工作是删除大量数据中的冗余信息，对同质数据进行分析处理，得出某一个环境因子的变化状态，同时对异质数据进行综合的分析处理，得出整个监测环境内所有环境因子的变化趋势，从而让用户掌握整个环境状态的变化和发展趋势。数据融合模块实现的成败甚至会影响到整个网络系统的鲁棒性和实用性。因此本文的研究重点是数据融合模块中融合结构的设计和融合算法的选择问题。

2.2 传感器网络特征

传感器网络作为分布式自组织网络，其处理对象是大量的数据，因此传感器网络不仅要具有数据采集、处理及通信等功能，而且还要以数据为中心，获取信息为目的。应用及目的的不同，必然导致传感器网络与传统无线网络之间存在差异，传感器网络所具有的一些独有特征^[21]如下：

(1) 网络的规模大。某些传感器网络不仅覆盖了很大的目标区域，而且目标环境中分布的网络节点的单位密度较大，这些节点在没有其他基础硬件设备的情况下被分散到目标区域后自组织构成网络，完成传感器网络的硬件部署。

(2) 节点功能有限。传感器节点遇到的最大难点是能源有限，因为大部分节点都是采用电池供电，而节点的工作环境又比较特殊（通常不能进行人工换电池），同时节点的微型化要求也导致节点自带的能源减少。在节点设计中，如何节约能量不只是关系到节点的寿命，而且也影响到整个网络的生存期。网络设计的过程中要求节点也要具有一定的信号处理、计算、存储等能力，但是微型化、价廉等设计要求，让节点的自处理能力也受到了极大的限制。节点中的处理流程、计算处理方法、及存储原理都成为了研究的对象。此外，由于节点在传感器网络中的通信带宽窄且易变化，通信的覆盖区域一般只有几十到几百米，且通信效果还会受到外界环境（空气变化、建筑物等）的影响而变弱甚至中断，因此传感器节点的通信能力也是有限的。总之，节点的设计目标是用有限的能量和工作能力完成尽可能多的协同任务，并延长网络的生命期。

(3) 传感器网络的动态性。传感器网络的动态性主要体现在节点的随机散播，以及网络的自组织能力方面，而且在网络连通的判断方面，节点也具备自己的路由选择算法，它不仅能够计算出自己到服务器的跳数，还能计算出某个相邻节点到数据汇聚节点的最优路由。但是传感器网络监测的环境是在不断变化的，如监控对象的变化，节点的失效等原因都要求网络的拓扑结构具有动态变化性，即网络要有维护动态路由的能力。这些特点对传感器网络的各种算法（如路由算法和链路质量控制协议等）的有效性提出了挑战。

(4) 数据的高冗余性。工作环境的特殊性导致传感器网络所采集的数据中有很多的冗余信息。这种情况的产生是在所难免的，首先网络的工作环境一般都比较恶劣，恶劣的工作环境不仅会使节点遭到破坏，甚至整个网络的链接通信也会遭到破坏。因此在网络设计的过程中，必须考虑一定的节点冗余和链路冗余，甚至采集数据的冗余，以此来保证网络的正常工作。

(5) 以数据为中心。传感器网络以数据为中心表现为：在传感器网络中，人们通常不关心具体某个节点的观测数据，而只关心某个观测指标在某个区域的值，比如农业专家想要知道“监测区域的西南方向的湿度是百分之多少”，而不会关心“某个节点所监测到的湿度值是百分之多少”。一般情况下，传统网络把监测到的数据和节点的实际地址捆绑在一起，而在传感器网络中建立这种全局地址是不现实的，主要原因是网络中的节点密度高、采集的数据量大。以数据为中心的特点

要求传感器网络能够快速、有效地组织起各节点的信息并融合提取出有用信息直接传送给用户，从而必须脱离传统网络的寻址过程。因此，大型的传感器网络急需一种强有效的分布式数据流的管理、查询、分布及信息挖掘方法。

(6) 数据融合。传感器网络在数据处理过程中，通常要求数据处理中心能将多个相关传感器节点的观测数据进行融合，再传送给网络系统总控制中心，以此降低数据冗余，提高数据可读性，减轻系统负载。数据融合是在一定准则下利用计算机技术对按时序获得的多个观测信息进行自动分析、优化综合，完成所需的决策和估计任务而进行的信息处理过程。数据融合的过程就是剔除冗余信息、辨别出不可用信息的过程，传感器网络中的数据融合的核心工作是协调优化和综合处理数据。因此，数据融合可以提高系统的可靠性和容错能力，并降低信息的模糊性和系统的不确定性，为实时发现网络问题提供信息依据。

2.3 传感器网络的性能指标

目前，传感器网络的性能评价还没有形成统一标准，使其不得不借鉴于 Ad hoc 网络的评价标准。由于传感器网络的可用性受到其性能的直接影响，因此如何制定传感器网络的性能评价标准已经成为需要深入研究的问题。下面介绍几个评价传感器网络性能的常用标准，虽然这些标准还没有达到实用的程度，但具有一定的参考价值。

(1) 能源有效性

能源有效性是传感器网络的重要性能指标之一，其含义是指网络在有限的能源条件下能够处理的请求数量。但是到目前为止，传感器网络的能源有效性都没有被模型化和量化，为了其被普遍接受，需要研究者对其进行深入的研究。

(2) 生命周期

传感器网络的生命周期是指网络从开始运行到不再为用户提供有用数据所持续的时间。传感器网络生命周期受到很多因素的影响，既包括硬件方面的原因也包括软件方面的原因，这需要进一步的研究证实。在设计传感器网络的软、硬件时要充分考虑能源的有效性，以此达到最大化网络生命周期的目的。

(3) 感知精度

感知精度是指用户接收到的采集数据的精确度。网络的感知精度受到诸多因素的影响，如传感器的精度、通信协议、信息处理方法等都是影响因素。而感知精

度、能量消耗和时间延迟三者间又具有紧密的联系。在设计传感器网络的过程中，为了保证系统在低功耗的情况下最大限度地提高感知精度、降低时间延迟，研究者需要认真考虑上述三者的利弊关系。

(4) 可扩展性

传感器网络的可扩展性是指网络的传感器数量、时间延迟、感知精度、生命周期等方面的可拓展空间。为了让传感器网络能够适应环境的变化，需要其拥有可扩展性级别的机制和方法。目前，可扩展性的准确描述和标准还不存在，需要做进一步的研究。

(5) 容错性

传感器网络的容错性是指网络的自我修复能力。由于能源有限或自然环境的影响，传感器网络中的传感器节点常会出现失效的情况，而对失效传感器节点进行人工维护或替换是件非常困难的，甚至是不可完成的任务。因此，为了保证网络系统的高鲁棒性，要求传感器网络的软、硬件设计必须具备很强的容错性。系统通过自动调整或自动重构纠正网络运行时的软、硬件错误，保证网络继续正常运作。能源有效性和容错性关系密切，在设计传感器网络时要将两者的利弊关系考虑进去。

(6) 数据融合有效性

传感器网络运行时，大量的传感器在实时的采集数据，这些数据中有很大部分是多余的，重复的或者错误的。因此如何获得有效、关键的信息对传感器网络来说是非常重要的。这不仅影响到系统数据的有效性，而且也关系到系统的可靠性和鲁棒性。由于数据融合的有效性主要依赖于系统数据融合的成功设计，而数据融合的有效性和容错性之间存在着密切的关系，因此设计传感器网络时，必须考虑融合的可行性及实用性。但目前数据融合的要求与应用环境的关联性很强，不同的应用需求对数据融合的要求也不同，因此还不存在关于数据融合有效性的准确描述和标准，还需要进一步的研究。

以上性能指标不仅可以作为传感器网络的评价指标，而且还可以作为传感器网络设计的优化目标，因此这些都是研究者们需要进一步研究的问题。

2.4 小结

本章以传感器网络相关技术为重点介绍。从传感器网络的形成、网络的硬件组

成和软件结构三方面阐述了传感器网络的体系架构，然后总结出传感器网络的特征及性能评价指标，并对其做了一定的分析。

第三章 数据融合技术

3.1 数据融合的基本概念

20世纪70年代出现数据融合(Data Fusion)技术,到80年代后,数据融合技术开始发展起来并逐步受到人们的重视。现在,研究者们希望利用计算机技术来模拟人类信息处理的过程,而数据融合的处理过程就是研究者的研究成果之一。目前,无论是在军用传感器网络还是民用传感器网络中,都引入了数据融合概念,使得传感器网络中的数据融合技术得到了人们的普遍关注,数据融合的应用范围也越来越广泛^[22-24]。

数据融合技术最早的应用领域是军事领域,其中美国军方对其的研究最早,美国国防部JDL(Join Directors of Laboratories)从军事应用的角度将数据融合定义为^[25-27]:将来自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),以便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。由定义可知,在军事领域中,数据融合是一个处理探测、互联、相关、估计以及组织多源信息和数据的多层次多方面过程,其目标是获得准确的状态和身份估计、完整而及时的战场态势和威胁估计。定义指出数据融合的核心是将来自多个传感器的采集数据进行多级别、多层次、多方面的处理,从而产生新的有价值的信息,任何单个传感器系统都无法获得的这种新信息。

数据融合技术的应用领域非常广泛且具有针对性,可以认为数据融合技术是针对系统中使用多种传感器(同构传感器/异构传感器)采集数据的问题而展开的关于信息处理的新的研究技术。根据国内外现有的研究成果,广义的数据融合可以被定义为^[26]:充分利用不同时间和不同空间的多个传感器采集的数据信息,利用数学计算方法和计算机技术,按照一定的数据处理规则对这些信息进行分析、综合、支配和利用,获取对被测对象的一致描述与解释,进而实现相应的决策与评估的信息处理过程。因此,可以认为数据融合的基础是传感器系统,数据融合的处理对象是多源化的信息,而数据融合的核心工作就是综合处理和协调优化传感器系统采集的多源信息^[28]。

综上所述，传感器网络系统中的数据融合技术的功能主要是：对网络中的同质和异质的信息进行分析、综合处理，从而得出更加准确可信的结论及形态估计值。传感器数据融合的简要示意图如图 3-1 所示^[29]，可以看出数据的融合是分级处理的，即数据的融合处理是有层次的，这样可以增强系统的可靠性和鲁棒性，而且传感器间存在的互补数据可以提高单个传感器的性能。一般而言，传感器融合系统具有如下优点^[30]：

- (1) 扩展时间上和空间上的观测范围；
- (2) 增强数据的可信度；
- (3) 提高系统的可靠性和鲁棒性；
- (4) 提高系统的分辨能力。

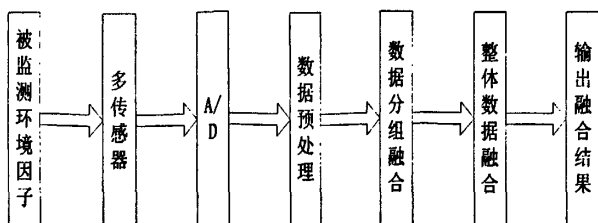


图 3-1 传感器数据融合示意图

3.2 数据融合的相关技术

传感器网络中的数据融合需要考虑很多关于数据处理方面的问题，针对不同的处理过程，数据融合技术需要考虑的问题也不同。数据融合的主要技术有数据转换、数据相关、数据库和融合计算等，其核心技术是融合计算，下面对它们做比较详细的介绍。

数据转换：由于传感器输出的环境记录、数据格式不一致，因此需要将这些数据数据转换成相同的描述和形式，融合中心才将这些多源数据做相关处理。数据转换的任务不仅是转换不同层次的信息，而且还要转换对被测对象描述的相似之处和不同之处，其中对对象的不一致描述也可能出现在同层信息中。时间性与空间性的存在，要求数据融合在进行融合处理时利用坐标变换进行数据的转换，但是坐标变换的非线性所产生的误差不仅直接影响数据的质量和时空校准的准确性，而且还会影响融合处理的质量。

数据相关：在数据融合处理过程中，为了保证数据的一致性描述，传感器测量

信息的不确定性和由于环境干扰而引起的信息相关二义性是数据相关要解决的核心问题，这其中包括了控制和降低相关计算的复杂度，并完成开发相关处理、融合处理和系统模拟算法与模型等研究工作。

态势数据库：态势数据库按实时的要求不同分为非实时数据库和实时数据库，非实时数据库存储各传感器的历史数据、融合计算的历史信息以及有关目标环境的辅助信息。系统要求态势数据库在功能上具备容量大、搜索快、开放互连性好的特性，在需求上具有良好的用户接口。实时数据库把当前各传感器的监测结果及时提供给融合中心，为融合计算准备各种所需的数据。融合处理的最终态势或决策分析结果以及融合处理的中间结果也存储在实时数据库中。

融合计算：作为数据融合的核心技术，融合计算存在与数据融合的各个层次中，其主要分为如下四个方面的计算处理：

- (5) 对传感器的监测数据进行验证、分析、补充、取舍、修订和状态跟踪估计。
- (6) 分析和综合新发现的不相关监测数据。
- (7) 生成综合态势，并实时地根据传感器的观测数据通过融合计算，对综合态势进行修正。
- (8) 态势决策分析等。

3.3 数据融合方法分类

随着信息化的全球发展，数据的产生和获得随着成熟的数据库技术和自动数据采集工具的发展变得越来越容易，但从大量数据中获取有用信息的能力并没有得到相应程度的提高。这种局面产生的原因有两种：一方面是传感器所采集的数据的数量级一般在 G 级甚至 T 级，不但无法进行人工分析，有时甚至连现有的计算机和软件系统也无能为力。二是数据比较分散，系统获得的数据通常来自不同质的传感器，数据间关系也不明确，进行综合分析比较困难。因此数据融合是针对数据的分散性而产生，在处理海量数据的同时获取有用知识的技术，且应用针对性很强。但数据融合处理技术需要建立在已知模型之上。

从检测、分类和识别三个应用方面来看，数据融合技术可以归纳为物理模型、基于特征的推理模型以及基于感知的模型，具体描述如图 3-2 所示^[31]。

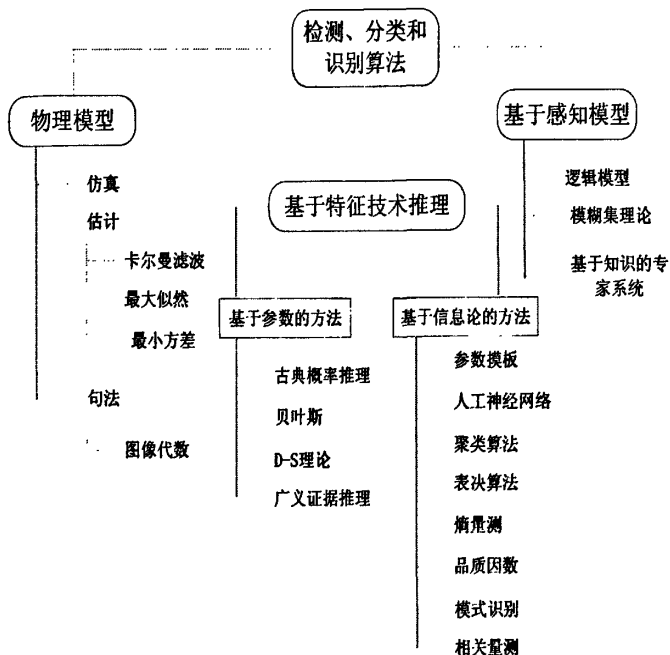


图 3-2 数据融合技术分类

3.3.1 基于物理模型的方法

物体的一些比较容易且准确测量或者计算得到的属性可以通过物理模型来反应^[32]，这些属性可能与物体的体积有关，与物体的温度或者物体表面的粗糙度等特性有关。基于物理模型的目标识别和分类算法的主要思想是：通过匹配实际采样数据与各物理模型或预先存储的目标信息来实现的。在物理模型中用到的技术包括仿真、估计及句法的方法，其中估计方法又分为卡尔曼滤波、极大似然估计与最小方差逼近方法。

3.3.2 基于特征的推理方法

作为数据融合中比较常用的基于特征的推理方法，它的实现原理是：把数据映射到识别空间，然后对识别空间中的数据进行分析处理。这些数据的组成主要是物体的特征数据或者物体的统计信息等。基于特征的推理方法可以分为基于参数和基于信息论技术的方法。

1. 基于参数的方法

基于参数的方法可以在没有物理模型的支撑下直接把参数数据（例如统计信息）映射到识别空间中。古典概率推理、Bayes 推理、D-S 证据理论方法和广义证据处理方法等都是比较典型的基于参数的特征推理方法。

古典概率推理 在既定的假设条件下，古典概率推理给出了来源于某物体或事件的观测值的概率。这种方法存在的局限性是：

- (1) 很难得到用于分类物体或事件的观测量的概率密度函数；
- (2) 一次只能评估两个假设事件；
- (3) 在多变量数据情况下，会加大计算的复杂性；
- (4) 作为先验知识的先验似然函数无法直接应用。

Bayes 推理 此方法解决了古典概率推理无法解决的一些问题。Bayes 推理得到新的似然函数的方法是使用新的观测数据来更新假设事件中旧的似然函数^[31,33]。该方法同样适用于两个假设事件的情况^[34]。Bayes 方法存在的局限性主要表现在：

- (1) 很难确定先验的似然函数；
- (2) 要求各假设事件具有互斥性；
- (3) 当潜在具有多个假设事件且条件相互依赖时，计算会变得很复杂；
- (4) 不能解决广义的不确定问题。

D-S 证据理论 它是 Bayes 理论的推广。该方法将不确定性引入到分配给某一命题（例如事件属于某一类）以及包括该命题的联合命题（并命题）支持度。任何不能直接分配给该命题或其反命题的支持度都将分配给由所有命题组成的假设空间^[34]（即不确定）。当原子命题互斥且没有把信度分配给假设空间时，D-S 方法的结果与 Bayes 方法推理的结果相同。D-S 方法的缺点是在每个传感器中都要为每个命题分配合适的概率分配函数值。

2. 基于信息论技术的方法

基于信息论技术的方法的概念是大同小异，是将参数数据映射或转换到识别空间中，即通过观测空间中参数的相似来反映识别空间中的相似性，但是观测数据的某些方面的识别函数不能直接的建立起来。基于信息论技术的方法中采用的技术有参数模板匹配、人工神经网络法、聚类算法、表决算法、熵量测技术、品质因数、模式识别以及相关量测等技术。

参数模板匹配 是把在一个事件内获得的多传感器数据与多个信息源按照预先准备好的条件进行匹配，然后判断观测量是否包含支持某一现象的证据。参数模板匹配法可以用于对某一事件的检测、态势估计以及简单的目标识别等。

人工神经网络 是一套硬件或软件系统，其中包括了许多神经元（任务处理单

元),这些神经元对输入数据的处理方式和生物神经系统中的神经元的工作原理很相似。该系统经过训练后,把输入数据映射到正确的输出分类的转换工作由神经元来完成。

聚类算法 主要功能是将信息自动的归类到不同的类别,这些类别分为自然集合和人为集合,所谓人为集合即按照人的意图把具有某一特性的事物归为一类,让集合具有一定的意义。聚类算法用度量准则来说明任意两个特征向量之间的靠近程度。一般的聚类算法有五个操作过程:

- (1) 选择样本数据,它们来源于观测数据;
- (2) 用人为定义的变量集或特征向量表示样本实体;
- (3) 计算数据的相似性;
- (4) 依据数据相似度原则产生数据聚集类;
- (5) 确定聚类结果的有效性。

由于聚类分析方法具有启发性,因此使用这类算法得到的结果可能存在误差。通常情况下,影响聚类结果的因素有数据的规范化的程度、度量尺度的大小及算法的选择,甚至输入数据的次序也会成为影响因素。因此,聚类分析方法可以通过应用有效性和可重复性进行判断,以此得到有价值的聚类结果。

表决算法 该方法的融合思想是把多传感器的检测和分类结果进行融合。该算法把各传感器的判决看作是表决过程中的一票,表决的决策规则可以是少数服从多数或者决策树的原则等。同时,在布尔理论的支持下,可以把每个传感器的判决采用加权的方法得到其他判决函数。

模式识别 主要解决数据描述与分类问题。模式识别主要有三类基本方法,第一种方法是基于决策理论(或统计理论)的,第二种方法则是基于结构学(或句法规则)的。第三种方法是基于人工神经网络的。在统计模式识别中,主要是从输入数据中提取特征值,再把特征值分配到某一类中。例如由属性状态组成的特征向量,其统计模型就表示与某一类对应的属性状态、概率密度函数或者概率集。结构模式识别主要用在结构信息上,也就是说模式的重要信息体现在特征的相互关联上,而不是体现在具体的数字上。结构信息可以用形式上定义好的语言的句法来抽取,从而评价是否具有一致的模式。一般的结构模式算法在处理复杂模式时,可以将其转换成简单子模式或原子模式进行等级描述。第三种方法是神经网络计算,就如文中所说的,它进行模式分类的方式是模仿生物神经系统处理事件的方式。

3.3.3 基于感知模型的方法

基于感知的数据融合模型中使用到的常见方法包含逻辑模板、基于知识的系统以及模糊集理论。此类方法试图通过模拟人处理问题的过程来实现策略的自动制定^[35]。下面对该类模型的方法做一个简要介绍：

(1) 逻辑模板

模板是指那些事先确定或存储在系统中的模式，主要用来匹配观测数据，进而确定事物的身份或者评估态势的发展。为了实现监测模式和存储模式的实时匹配可以使用参数模板，参数模板间的组合利用逻辑模板完成，如布尔关系。考虑到观测数据和用来定义模式的逻辑关系的不确定性，模式匹配技术中可以引入模糊逻辑方法解决它们的不确定性问题。

(2) 模糊集理论

为了成功的把系统状态变量映射为控制量、分类或其他类型的输出数据，模糊集理论在数学运算的过程中引入了不精确知识（或不确定边界）的定义。运用模糊关联记忆可以把命题归属到某一个集合并赋予一个在 $[0,1]$ 区间内的隶属度。模糊集理论的闪光点允许知识或者身份边界的不确定性，因而它具有十分广泛的应用，例如身份识别、目标跟踪、以及工业过程控制等。与神经网络相比，神经网络需要累计输入输出，而模糊系统只累计输出，不累计输入个数。

(3) 基于知识的专家系统

基于知识的专家系统是将规则或领域专家知识结合起来实现对目标的自动识别。专家系统可以在人工推理不能进行的情况下运用领域专家的知识进行辅助推理。基于知识的专家系统一般包括以下四个组成部分：

- 1) 知识库，包括基本事实、算法和启发式规则等；
- 2) 推理机制，完成输入数据与知识库中规则的匹配过程；
- 3) 全局数据库，包含动态数据；
- 4) 人机界面，用户与专家系统的交流平台。

基于知识的专家系统的运作原理是由推理机制运用数据、事实和规则在知识库中进行搜索，最后得到推理结果。

3.4 传感器网络应用中的数据融合

传感器网络技术运用到实际的监测系统时,在提高系统性能的同时也暴露出了许多的问题。这些问题已经形成了一个新的研究领域,即研究者所提及的多传感器集成和数据融合^[36]。虽然对两者的研究起步比较晚,但是已有了很多研究成果,其中传感器数据融合的研究成为领域研究的热点,在应用方面受到了广泛重视。相对于国外的研究而言,国内在数据融合方面的研究还处于起步阶段,介绍数据融合方面的文献也较少^[23,37-38]。此外,由于研究的问题比较多,而且解决问题的方法的选择面比较广,使得多传感器数据融合成为一个复杂的信息处理过程,因此,有必要详细的介绍一下数据融合技术目前的研究情况。

3.4.1 数据融合的问题描述

传感器网络系统通过大量传感器(同构或者异构)获得更多种类和数量的传感数据,通过处理这些数据得到的信息可以更加全面的描述被监测环境的变化,从输入输出的角度来看,可以把传感器网络看作为多入多出的系统。这些因素导致数据融合成为整个网络处理过程中一个重要的组成部分。

大量的不确定信息存在于传感器数据融合过程中。首先,传感器在测量数据的过程中都会存在一定的误差,误差产生的原因可能是传感器本身的问题,如传感器故障;也有可能是环境中的不确定性,如噪声。因此,从这些测量数据中获得的信息必然具有一定的不确定性,即随机性比较大。其次,由系统以往的行为总结得到的验前信息不仅可以是人工产生的,而且也可以是系统产生的,同样具有一定的模糊性。以上信息都称为不确定信息。除此以外,信息的损失也会导致在数据处理的过程中产生不确定信息。这些不确定信息就理所当然的成为了数据融合的研究对象,融合处理的目标就是降低信息的不确定性,提高对环境描述的准确性。研究表明,多传感器系统经融合处理得到的结果比单传感器系统得到的结果更准确,同时信息冗余使整个传感器系统的鲁棒性得到了提高^[38]。

(1) 信息描述空间的不同

每个传感器在多传感器系统中得到的信息都是某一个环境特征在该传感器感知空间中的特征数据。各传感器的物理特性以及被放置的空间位置不同将导致所采集的信息的描述空间也存在差异,所以造成对这些信息的融合处理比较困难。

为了顺利的进行融合处理，在融合处理前需要将这些信息映射到一个共同的参考描述空间中后再进行融合处理，最后得到该空间中环境特征的一致描述。例如，物体的位置信息可以用视觉传感器获得，也可以用超声波传感器获得，但它们所参考的坐标系是不一样的，因此在融合前必须将它们转换到同一个参考坐标系中。要注意的是，不确定信息给这个问题的解决带来了许多困难。

(2) 数据关联与时间同步问题

进行数据融合时必须保证每个传感器得到的信息是同一时刻对同一目标的描述。这体现在两个方面，首先是数据关联(Data Association)^[23]，即每个传感器采集的数据描述的必须是对同一目标，比如描述同一物体的温度。其次是同步问题，各传感器在时间上需要保持同步。同步问题在动态工作环境中表现得尤为突出。文献[39]在解决时变观测(Time-variant observation)的同步问题时采用得是序列方法。

(3) 验前信息

验前信息也是数据融合要研究的内容。数据融合的各个阶段都会用到它，对数据融合起着重要的作用。因此，如何将验前信息与数据融合有机地结合在一起，以及如何在动态环境下获得、更新验前信息都是需要研究的问题。专家系统和数据挖掘技术的思想为解决这些问题提供了很好的思路^[40]。

(4) 融合方法

处理不确定信息是数据融合的本质工作，其在处理不确定信息的时需要数学工具的支撑。在处理数据融合问题时，首先要将不确定信息用具体的数学形式表示，然后再用相应的数学理论来处理。由此可见，不同的数据融合方法对不确定信息表示的方式也不同。例如，基于概率统计的数据融合方法主要用来处理随机信息；而基于模糊逻辑的数据融合方法则用于模糊信息的分析。虽然同质的不确定信息给数据处理造成了一定的困难，但是数据融合技术面临的更大的困难是多种不同质的不确定信息的融合。此外，不同的应用环境对数据融合方法的要求也是不同的，即如何让数据融合方法适用于动态与未知环境也是研究者需要解决的问题。

(5) 融合结构

传感器网络中的数据融合具有明显的层次结构，信息在处理的过程中会变得越来越抽象，高层信息可以看成是从多个低层信息中抽象出来的。层次结构为数据融合提供灵活性的同时也带来了一些不可避免的问题，如信息损失等。

上面提到的五点需要解决的问题中，有些是在特殊的应用条件下提出来的。然而作为传感器网络数据融合的本质问题，无论是理论研究还是实际应用，数据融

合方法都是传感器网络数据融合技术所研究的重点。

3.4.2 数据融合中融合方法和融合结构的关系

数据融合结构是数据融合方法研究的重点之一。随着传感器数据融合研究的深入和应用的广泛，数据融合势必会成为一个更加复杂的信息处理过程，随着融合中使用的算法增多，结构的复杂性也会增加。数据融合结构与算法如何在实际应用中有机的结合在一起，为整个融合系统提供更有效的融合策略，这也是传感器网络的数据融合技术所要深入研究的问题。目前的数据融合算法都存在各自的优缺点，如何将这此算法有效的组织在一起，使其构成更有效的数据融合方法并为数据融合系统服务，这是数据融合结构需要考虑的问题。数据融合方法面临的另外一个难题是动态与未知环境下的融合问题^[43]。因此，为了提高数据融合系统的鲁棒性和自适应性，不仅需要性能更好的数据融合算法，而且需要更加灵活的数据融合结构。数据融合的一般结构如图 3-3 所示：

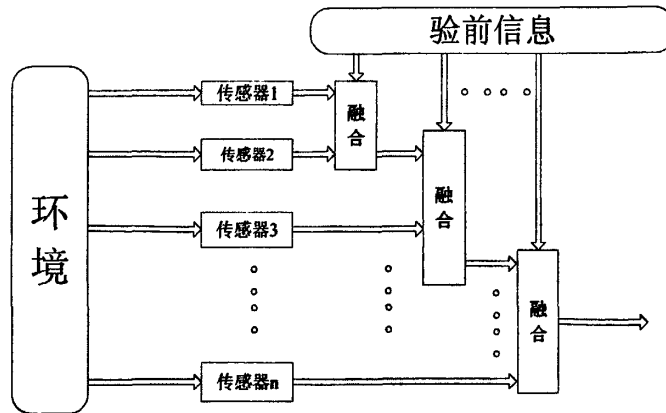


图 3-3 数据融合的结构示意图

图 3-3 描述了数据融合的简单结构，其融合结构模型分类标准有多种，其中一种分类标准是根据数据处理过程的分辨率进行分类。这种分类方法把融合结构分为像素级、特征级和决策级三级融合，它们所处的层次是依次提高。另外一种分类标准是根据传感器数据在到达融合处理中心前被处理的程度进行分类。这种分类方法将数据融合结构分为传感器级数据融合，中央级数据融合和混合式数据融合。其中传感器级数据融合主要是单个传感器对自己所采集的数据进行的处理；中央级数据融合是对同质数据的融合处理；而混合式数据融合是对不同质信息的融合处理，以此判断环境的总体变化。

国外研究者对数据融合的研究起步比较早,并取得了一定的成就。文献[44]中介绍了一种常见的数据融合结构,其融合层次分为三层,分别是数据层、特征层和决策层。在数据层,采集到的同质数据发送到数据融合中心进行融合处理,它处理的是同质数据,即传感器监测的是同一对象的同一性质,因此计算结果比较准确;在特征层,主要对原始数据进行特征信息提取,然后将提取结构发送到数据融合中心做进一步的处理。与数据层相比,虽然信息完整性,处理结果的准确性有所下降,但是节省了带宽;在决策层,首先在同构传感器之间进行局部决策,然后进行局部决策结果的融合,最后得到全局的决策结果。在决策层,信息的压缩强度最大,信息融合结果的准确性也最差,但此时占用的系统资源变小,而且融合对象是异构的传感器。因此,决策层的主要作用是从全局把握监测目标的变化。上面介绍的融合结构只是针对一般的情况,实际应用中,融合结构需要根据具体应用而有所变化,目前,这方面的研究也得到了密切关注^[44]。

3.5 主要算法研究

3.5.1 基于 Bayes 推理的数据融合

1. Bayes 推理的概念

英国学者 Thomas Bayes 在 1763 年提出 Bayes 推理^[45],在两百多年的时间里,它向我们展示了其强大的生命力和广阔的应用前景。Bayes 推理的思想是:当有新的测量达到时,用后验密度代替给定假设的先验密度。与经典推理最大的区别是:Bayes 推理不仅能够变换似然函数,而且还可以用在多种假设的情况中。

Bayes 推理的概念:给定一个似然估计后,如果又增加一个证据或称为测量,则可以更新旧的(关于目标属性的)似然估计。可以将该思想理解为,当新证据(测量值)的到来时,用后验密度代替给定假设的先验密度。下面介绍 Bayes 运用在多假设的情况。

设有 n 个互斥的穷举假设(即存在具有属性 i 的一个目标)事件为 A_1, A_2, \dots, A_n , 其中的一个事件(或事实)用 B 表示, Bayes 公式的形式如(3-1)所示:

$$P(A_i | B) = \frac{P(B | A_i)P(A_i)}{\sum_{j=1}^n P(B | A_j)P(A_j)} \quad (3-1)$$

$$\text{且 } \sum_{i=1}^n P(A_i) = 1$$

$$\sum_{i=1}^n P(B|A_i)P(A_i) = \sum_{i=1}^n P(B, A_i) = P(B) \quad (3-2)$$

事件 A_1, A_2, \dots, A_n 出现的可能性用 $P(A_i)$ 表示, $P(A_i)$ 是实验前就已存在的事实 A_i 为真的先验概率。 $P(B|A_i)$ 表示证据 B 在给定 A_i 为真的条件下被观测到的概率值。 $P(A_i|B)$ 表示假设 A_i 在给定证据 B (目标 i 存在) 的条件下为真的后验概率。 B 的先验分布密度用 $P(B)$ 表示。

2. Bayes 推理在数据融合中的应用

传感器测量的数据可以用 Bayes 推理方法进行融合计算出给定假设为真的后验概率。假设有 n 个传感器 (同类或不同类) 检测同一个目标。系统需要识别该目标的 m 个属性, 即有命题 $A_i, i=1, 2, \dots, m$ 或 m 个假设。在实现过程中, Bayes 融合算法进行多级处理。第一步是传感器级处理, 把要识别的目标属性和按目标信息特征分类获取的监测数据进行联系并分类, 最后给出依赖于检测数据和传感器的分类算法的关于目标属性的说明 $B_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。第二步是计算似然函数, 在各假设为真的条件下, 计算每个传感器的证据的似然函数。第三步是计算后验概率, 利用 Bayes 公式计算各个假设在多测量证据下为真的后验概率。第四步是判定逻辑处理, 即给出属性的最终判定结论。Bayes 算法融合过程如图 3-4 所示:

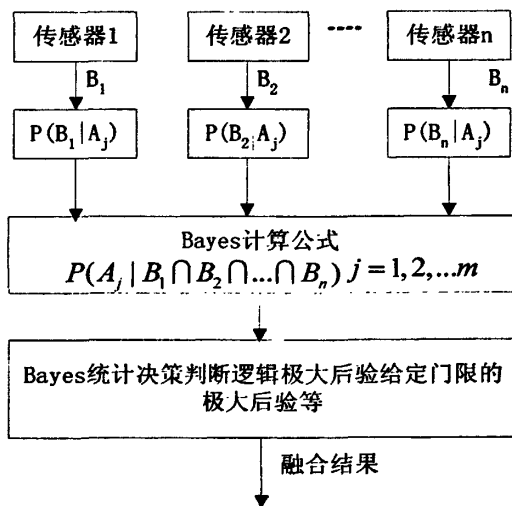


图 3-4 基于 Bayes 推理的数据融合

第三步中分两个步骤计算目标身份的融合概率。首先，计算出 n 个证据在诸假设 A_i 条件下的联合似然函数， B_1, B_2, \dots, B_n 相互独立，即每个传感器独立检测时，此时联合似然函数为

$$P(B_1, B_2, \dots, B_n | A_j) = P(B_1 | A_j)P(B_2 | A_j) \dots P(B_n | A_j) \quad (3-3)$$

然后，计算假设的后验概率在 n 个证据条件下的值，如公式(3-4)，

$$P(A_j | B_1, B_2, \dots, B_n) = \frac{P(B_1, B_2, \dots, B_n | A_j)P(A_j)}{P(B_1, B_2, \dots, B_n)} \quad (3-4)$$

第四步通常是采用极大后验判定逻辑，按照判定门限选取或直接选取具有最大后验联合概率的目标属性。求满足下述条件的假设 A_k

$$P(A_k | B_1, B_2, \dots, B_n) = \max P(A_k | B_1, B_2, \dots, B_n) \quad (1 \leq k \leq m) \quad (3-5)$$

作为判定结果。在某些情况下，最大后验概率的假设也要进行门限判定，判定的规则如下：设判决门限为 P_0 ，若

$$P(A_k | B_1, B_2, \dots, B_n) \geq P_0 \quad (3-6)$$

则接受 A_k ，否则拒绝判断，等待下一观测数据的到来，形成新的证据，再进行上述判定过程。

在使用 Bayes 方法时，各传感器对各个假设事件的似然函数 $P(B/A_i)$ 和各假设事件 A_i 的先验概率 $P(A_i)$ 都需要事先计算出来。当各假设事件 A_i 发生的可能性在先验知识中不足时，应将各 $P(A_i)$ 的值设置为相同，即无差别对待事件 A_i 。

3. Bayes 推理方法的优缺点

Bayes 推理方法在不确定推理最早被使用，它的主要优点是理论基础比较坚实，其推理过程的数学性质容易理解，而且计算所耗费的时间量只算中等工作量。当然 Bayes 推理也存在一定的不足，其主要缺点有：

(1) 概率分配具有独立性，这给系统的计算带来了很大的困难，甚至使计算是不切实际的。

(2) 很难获取先验知识和条件概率；而且领域专家给出的概率具有主观性，很难使其前后一致，系统需要在领域专家和计算机共同协助下花费大量的时间来验证概率的一致性。

(3) 在系统中增加或删除一个规则时, 所有的概率需要重新计算, 否则无法保证系统的一致性和相关性, 而且不利于规则库及时更新。

(4) Bayes 方法要求识别框架具有统一性, 由于证据只能在同层次中组合, 所以当强行组合不同层次的证据, 由于强行分配先验概率等原因, 可能导致错误的结论。

3.5.2 基于 D-S 证据理论的数据融合

1. D-S 证据理论原理

设变量 X 的所有可能的集合是 θ , 集合中的所有元素互斥, 那么我们可以称集合 θ 是 D-S 证据理论^[45]的辨识框架, 它是 D-S 理论中最基础的概念。辨识框架^[46-47] 是一个互不相容事件的完备集合, 即传感器监测的所有目标的总集, 其可以被看作是数据融合领域的平台数据库。需要注意的是, θ 只是某些问题的可能答案的集合, 这些答案中只有一个正确。D-S 理论与贝叶斯推理不同的是: D-S 理论计算 2^θ 中的元素, 而贝叶斯计算 θ 中的元素。在概率理论中, \bar{A} 被看作事件 A 的补集。D-S 理论抛弃了这一概念, 而是将命题信任度概念引入其中, D-S 理论认为命题 A 和命题 \bar{A} 的信任度之和可以小于 1。

既然 D-S 理论将集合看作是命题, 那么在求解命题的不确定性时就是在求集合的不确定性。为此, D-S 理论中引入了三种基本函数概念, 即基本概率分配函数、信任函数和似然函数。

基本概率分配函数: 在 D-S 中我们将 m 记作基本概率分配函数, 当辨识框架中的元素互斥时, m 对命题 A 的赋值 $m(A)$ 表示为从 2^θ 到 $[0,1]$ 的映射, 即 $m: 2^\theta \rightarrow [0,1]$, 约束条件如下:

$$\begin{cases} m(\phi) = 0 \\ \sum_{A \subseteq 2^\theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (3-7)$$

公式中 ϕ 表示空集。 $m(\phi) = 0$ 表示对空集的支持度为零。 $m(A)$ 表示对事件 A 的支持度。由(3-7)式可以看出, 所有子集 θ 的集合 2^θ 中的全部元素的支持度之和为 1。这相当于概率论中对事件 A 出现的概率赋值。

信度函数: 表示对某一命题的信任度, 记作 Bel , 其约束条件如下:

$$\begin{cases} Bel(\phi) = 0 \\ Bel(\theta) = 1 & \forall A \subseteq \theta \\ Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \end{cases} \quad (3-8)$$

由公式(3-8)可以看出，命题 A 的信任度可用 $Bel(A)$ 表示。它的全部信任度是其子集的基本概率赋值之和，因此 Bel 函数也是命题的下限函数，表示命题的全部信度。

似真函数：在 D-S 理论中表示对命题的非假的信度，表示对命题可能成立的一个不确定性信度，被称为信度的上限值。用 Pl 表示，它满足如下条件：

$$Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) \quad (3-9)$$

由公式(3-9)可以看出，当证据绝对支持 A 时， $Pl(A) = 1$ ；当证据反对 A 时， $Pl(A) = 0$ 。图 3-5 描述了这三个函数的关系。

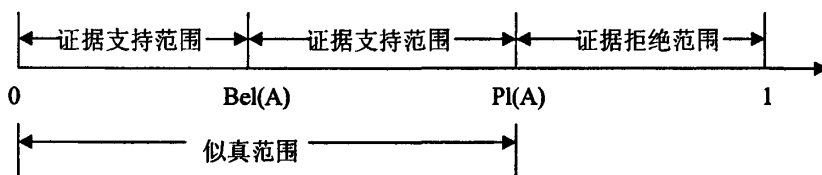


图 3-5 证据区间示意图

从图 3-5 可知， $[0, Pl(A)]$ 为似真区间， $[0, Bel(A)]$ 为证据支持区间， $[Bel(A), Pl(A)]$ 表示既不支持也不拒绝命题 A ，称其为信任度区间或中性证据区间。当 $Bel(A) = Pl(A) = P(A)$ 时即信度区间为零，证据推理和 Bayes 推理是相同的；如果信任度区间为 $[1, 1]$ ，则表示整个区间都支持证据，这时对命题 A 的支持程度最大；如果整个 $[0, 1]$ 区间都为信任度区间，这种极限情况表示子集 A 是没有利用价值的信息。一般情况下，证据理论中的三个函数满足如下条件：

$$Bel(A) \leq P(A) \leq Pl(A) \quad (3-10)$$

2. D-S 理论的组合规则

D-S 理论中的 Dempster 组合规则与贝叶斯方法相似，即提供组合多个独立信息源信息的方法，只是在 D-S 理论中使用多源信息的基本概率分配函数的正交和来计算组合规则的综合作用作为输出，正交合运算用 \oplus 表示。

假设 $A \subseteq \theta$ ，且 $m(A) \neq 0$ ，称 A 为信任函数 Bel 的焦点。而信任函数 Bel 的的

核用其全部焦元的并集表示。设辨识框架 θ 上的两个基本概率赋值是 m_1, m_2 ，设 B_1, B_2, \dots, B_k 是 Bel_1 的焦元， C_1, C_2, \dots, C_n 是 Bel_2 的焦元， $m(A) = m_1 \oplus m_2$ 表示利用正交和规则计算命题 A 的信度值，组合输出为：

$$m(A) = \frac{\sum_{i,j: B_i \cap C_j = A} m_1(B_i) m_2(C_j)}{K} \quad m(A) \neq 0 \quad (3-11)$$

其中 $K = 1 - \sum_{i,j: B_i \cap C_j = \emptyset} m_1(B_i) m_2(C_j)$ ，它是一个归一化常数。当 $K=0$ 时， $m(A)$ 无法计算，因为 $m_1 \oplus m_2$ 无意义，表示 m_1 和 m_2 冲突；当 $K \neq 0$ ， $m(A)$ 表示 m_1 和 m_2 的综合概率赋值，它也是一个基本概率赋值，并且有 $\sum_{A \subseteq \theta} m(A) = 1$ 。

上述组合方法可以推广到多个基本概率赋值函数的情况，如对 $m_1, m_2 \dots m_n$ 进行组合计算命题 A 的可信度，即 $m(A) = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$ ，组合后得到的综合概率赋值为：

$$m(A) = \frac{\sum_{\cap A_i = A} \prod_{1 \leq j \leq n} m_j(A_j)}{K} \quad A \neq \emptyset \quad (3-12)$$

其中 $K = 1 - \sum_{\cap A_i = \emptyset} \prod_{1 \leq j \leq n} m_j(A_j)$ 。

3. D-S 证据理论推理过程

D-S 证据理论的推理过程自上而下可以分为三级，图 3-6 描述了 D-S 理论的推理过程。

第一级是更新，在传感器网络系统运行过程中，传感器的采样数据不可避免的会存在随机误差，因此来自同一传感器的连续报告必须按时间标准独立出来，这种考虑比单一报告的可靠性要高很多。因此，在进行推理和传感器数据融合之前必须完成对传感器的监测数据的组合或更新。

第二级是推断，该阶段需要完成的工作对传感器的监测结果进行推断，将其扩展成目标报告。推断的理论依据是：目标报告是由一定的传感器报告以某种可信度在逻辑上产生的。

第三级是目标合成，该处理层的工作是把来自独立传感器的监测数据融合为一个总的输出结果 (ID)。

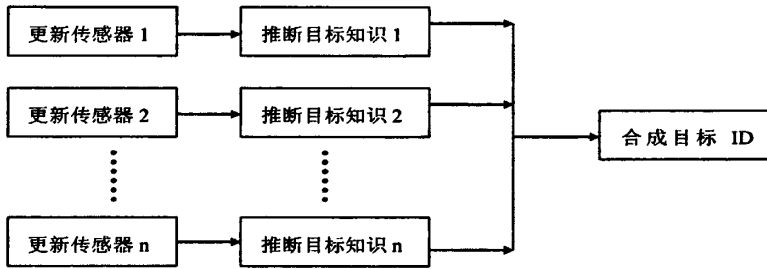


图 3-6 D-S 方法的推理结构图

4. D-S 证据推理在传感器网络融合中的应用

D-S 证据推理在传感器网络系统中的融合应用过程如图 3-7 所示。

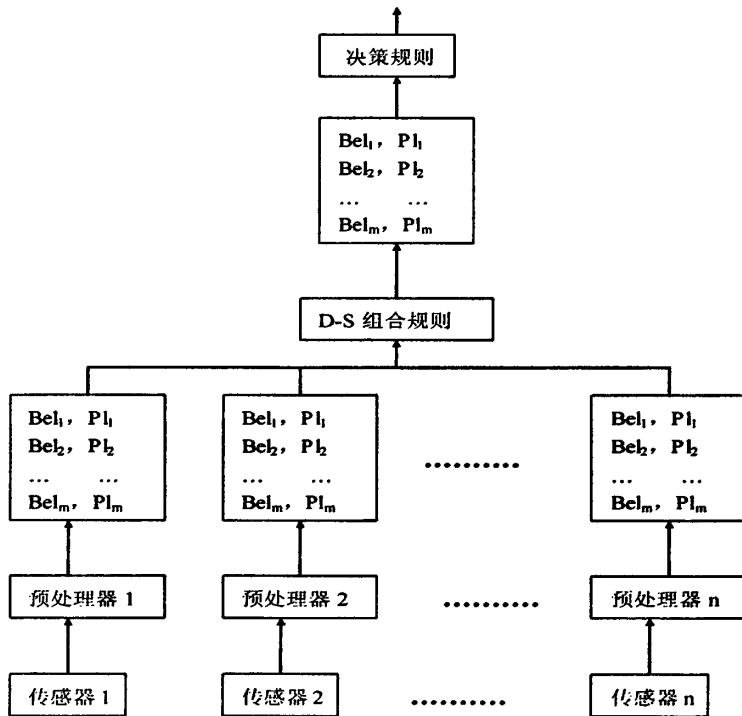


图 3-7 D-S 证据推理在多传感器融合中的应用过程

各证据的基本概率赋值函数 m_i ，信任度函数 Bel_i 以及似然函数 Pl_i 需要先计算出来；然后再计算证据联合作用下的基本概率赋值函数 m 、信任度函数 Bel 以及似然函数 Pl ，这需要 D-S 组合规则的参与，最后根据计算出的结果和预设的决策规则给出最终判断，判断原则如下^[48]：

- (1) 判定的目标类型必须具有最大的测度函数分配值;
- (2) 判定的目标类型与其它类型的测度函数分配值之差要大于某一阈值 (阈值由专家根据实际应用设定);
- (3) 判定的目标类型测度函数分配值应大于不确定性测度函数分配值 $m(\theta)$;
- (4) 不确定性测度函数分配值 $m(\theta)$ 小于某一阈值 (阈值由专家根据实际情况设定)。

3.5.3 专家系统

1. 专家系统的基本概念

专家系统(expert system)是人工智能研究的一个重要分支,其目标是让计算机在各个领域中起到人类专家的作用。它具有适应性强,成本低,响应快的特点,已被成功用于医疗诊断、化学分析、工程设计、军事决策等领域,大大提高了系统的工作效率和质量。

专家系统是指在特定领域内,拥有专家的知识 and 生产经验,并利用这些知识和经验来解决相应问题的智能程序。与一般应用程序不同的是,专家系统将问题求解所需的知识单独分开组成知识库,利用推理机制像领域专家一样能利用人类专家可用的知识和经验来解决该领域的问题。

2. 专家系统的体系结构

专家系统通常由六部分组成:综合数据库、知识库、推理机、解释器(也称解释机制)、知识获取、人机接口。专家系统的结构如图 3-8 所示^[49-53]。

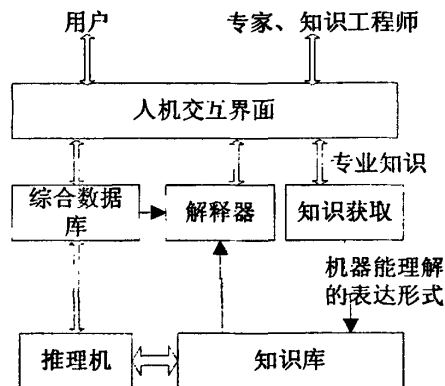


图 3-8 专家系统结构图

综合数据库和知识库，用于存储特定领域的专家知识，它是专家系统的重要组成部分，由元知识，事实性知识和启发性知识组成。元知识是调度和管理知识的知识，给出了知识最基本的内容，并处于知识的最底层；事实性知识是领域中共有的知识，建立了概念之间的最基本的联系；启发性知识是领域专家的经验知识，从普遍意义上解释，它由事实组成，建立了事实间的联系。综合数据库存储着与领域问题相关的数据、事实、推理程序中产生的中间状态以及结论等。知识库是关于某个领域或特定问题的专家知识的集合，为用户提供专家的知识和经验。

知识获取，它为修改知识库中的知识以及知识扩充提供支持，这样可以使专家系统适应变化，还能提高解决问题的能力。

推理机，其工作原理是按照一定的策略，根据用户提出的问题或输入的相关信息，按照领域专家预先设定的意图进行推理，推理方式有正向推理、反向推理和正反向混合推理三种。

正向推理是指在遵循一定的策略的前提下从原始的数据出发，对照知识库中的知识形式，得到结果的推理方法。它的推理方式是由数据得到结论，因此又称其为数据驱动策略；具体推理过程如下：

- (1) 规则库中的规则和数据库中的事实进行匹配，并得到匹配的规则集合；
- (2) 在这个规则集合中选择一条规则作为启用规则（冲突解决）；
- (3) 执行启用规则，将启用规则后件送入数据库；
- (4) 反复前三个过程直到符合条件为止。

反向推理的推理过程是先提出结论或假设，然后寻找使这个结论或假设成立的条件，这种由结论或假设到数据的推理方法也称为目标驱动策略，反向推理实现起来比较容易，而且能提高系统的运行效率。推理过程如下：

- (1) 规则后件与事实进行匹配，得到一个规则集合。
- (2) 从这个规则集合中选择一条使用。
- (3) 把规则的前件作为子目标，反复执行，直到各子目标与事实成功匹配。

正反向混合推理是根据数据库中的数据信息，首先由正向推理让系统提出假设，然后用逆向推理方法找出支持该假设的条件，反复执行该过程，直到达到要求为止。

人机接口是连接用户和专家系统的桥梁，它有时包括解释程序，解释程序的责任是回答用户提出的各种问题，例如与系统运行有关的问题。人机接口主要功能有启动专家系统、控制工作状态、查询解释信息。

3. 基于规则扩展的知识表示方法

由于知识所确定的范围很广泛，计算机通常无法把它们完全表示出来，一般而言，计算机中能表示的知识都具有统一的结构模式和有限一致的符号，并且这些结构模式和符号能够组成一个合理的体系。在知识库系统中知识的表示形式采用“概念—事实—规则”三层知识体系。

实现知识在计算机中的表示和利用是人工智能包括推理决策系统的一个重要目标。知识处理与一般的数据处理或数值计算不同，知识表示模式的恰当与否不仅与知识是否有效存储有关，而且系统的知识获取能力以及知识运用效率也受其影响。目前，知识表示的主要方法有基于框架表示法、判定表示法、逻辑表示法、过程表示法、规则的产生式表示法等。

农业科研中知识类型比较复杂，其中既有确定的、结构化的易于表示的确定知识，又有不确定的不容易表示的模糊知识，因此，在温室控制系统的组建过程中，选择合适的知识表示方法非常重要。下面将详细介绍一种基于规则扩展的知识表示方法。

基于规则的推理决策系统的表示形式为：IF 前提条件 THEN 结论

以上表示可以看出产生式规则可以投影为“IF（某个条件成立或者情形存在），THEN（某个结论成立或者某个操作可取）”的语义。针对农业领域中知识的模糊性，我们用一个可信度因子(简称信度或 CF)来表示证据或者结论的可信度，这样可以用信度来模糊化前提条件，知识或规则的不确定性用规则强度来描述，并为规则设置阈值，用以激活规则。基于模糊的产生式规则表示如下：

$$\text{IF 条件 } \{p\} \text{ THEN 结论 } \{c\} \text{ WITH } s \quad (3-13)$$

在公式(3-13)中， p 表示原始证据的可信度或称为前件，专家在编辑规则时就给出，用户给出系统运行中需要的事实和证据的可信度 CF。它是证据为真的可信度的估计值，用 $[-1, 0]$ 、 $[0, 1]$ 区间上的一个数值表示。如果估计值在 $[0, 1]$ 区间上，分别用 0 和 1 表示完全假和完全真这两种极端情况；当 $CF < 0.5$ 时为假，用 $CF = 0.5$ 表示真假不定，当 $CF > 0.5$ 时为真。如果估计值在 $[-1, 0]$ 区间上，则反之。 c 由不确定性推理的传播算法给出，表示结论的可信度。 s 由专家给出，表示规则强度，指证据对结论的支持程度，即证据为真的可靠性程度，它实际上是规则正确性程度的估计值，用 $[0, 1]$ 区间的一个数值表示。

针对多证据 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ 单结论(或假设) c 的情况，其产生式规则表示如下：

$$\text{IF } P_1\{k_1\} \text{ AND } P_2\{k_2\} \text{ AND } \dots \text{ AND } P_i\{k_i\} \text{ THEN } c \text{ WITH } s \quad (3-14)$$

$$\text{IF } P_1\{k_1\} \text{ OR } P_2\{k_2\} \text{ OR } \dots \text{ OR } P_i\{k_i\} \text{ THEN } c \text{ WITH } s \quad (3-15)$$

(3-14)、(3-15)中列举了由 AND 和 OR 联结证据的情况。公式中 $k_i(i=1,2,\dots,n)$ 为证据可信度因子, s 为规则强度。

3.6 小结

本章介绍了数据融合相关技术。首先从军事和民用两个方面介绍了数据融合技术的概念, 然后从检测、分类和识别这三方面归纳介绍数据融合技术的分类情况, 并重点介绍了两种常用的数据融合算法即 Bayes 推理和 D-S 证据理论, 最后介绍了专家系统的基本概念和理论知识, 其中详细介绍了专家系统的体系结构和知识的表示方法。

第四章 传感器网络数据融合混合算法

4.1 D-S 算法改进

1. D-S 证据理论组合公式的失效分析

为了证明 D-S 证据理论组合公式的不足, 现假设有两个证据源(传感器数据源)导出的基本可信度分配函数, 利用 D-S 理论的组合规则求出在这两个证据共同作用下所产生的基本可信度分配函数。

案例一: 假设两个传感器反映的对象都是 A , 并且两者的基本可信度分配函数为 $m_1(A)=0.7$, $m_1(\Theta)=0.3$, $m_2(A)=0.8$, $m_2(\Theta)=0.2$ 。采用 D-S 规则进行组合, 其计算结果为 $m(A)=0.94$, $m(\Theta)=0.06$, 由此可以看出经 D-S 证据推理融合计算后, 对象 A 的支持度得到了增强, 且 $m(A)=1-m(\Theta)$ 。

案例二: 假设传感器 1 对对象 A 的支持度是 0.9, 传感器 2 对对象 B 的支持度是 0.8, 即 $m_1(A)=0.9$, $m_1(\Theta)=0.1$, $m_2(B)=0.8$, $m_2(\Theta)=0.2$, 式中, 对象 A 和对象 B 互斥, 用规则进行组合后, 其计算结果为 $m(A)=0.643$, $m(B)=0.286$, $m(\Theta)=0.071$, 由融合结果可以判断, 信度低的对象报告影响了信度高的对象报告。

案例三: 上述两个传感器对对象 A 和 B 的支持度如果变成 $m_1(A)=1.0$, $m_2(B)=1.0$ 时, 则 $K=0$, 即组合公式中的分母项为 0, 导致 D-S 证据理论规则无法对其进行组合。由此可以看出, D-S 规则无法处理完全不一致的证据。

案例四: 考虑焦元子集大小不同的情况下, D-S 证据理论的合成效果。

第一种情况: 现在假设有两个焦元 A 和 B , 焦元 $A=\{a\}$, 焦元 $B=\{ac\}$, $m_1(A)=0.8$, $m_2(B)=0.7$, 经规则组合的结果是: $m(A)=0.8$, $m(B)=0.14$, $m(\Theta)=0.06$ 。

第二种情况: 设焦元 $A=\{a\}$, 焦元 $B=\{abcde\}$, $m_1(A)=0.8$, $m_2(B)=0.7$, 经规则组合的结果是: $m(A)=0.8$, $m(B)=0.14$, $m(\Theta)=0.06$ 。

由上述两种情况可以看出, D-S 证据理论规则不能区分焦元子集的大小。

2. D-S 组合公式改进措施

虽然 D-S 规则的证据聚焦能力很好, 而且证据在经过它处理后, 概率赋值函数会向 Θ 中更小的子集偏移, 但是它不能处理焦元不一致的极限情况, 也不能区分证据所在子集的大小, 因此本文将考虑将 D-S 规则的组合方式改为按不同的权重

聚焦，改进方法描述如下，定义：

$$R = \frac{\|A_i \cap B_j\|}{\|A_i\| + \|B_j\| - \|A_i \cap B_j\|} \quad (4-1)$$

其中， $\|\cdot\|$ 表示集合的基数，即集合大小。

$$k = \sum_{A_i \cap B_j \neq \emptyset} m_1(A_i)m_2(B_j) \quad (4-2)$$

假设有两个证据 m_1 和 m_2 ，其联合公式如下：

$$\text{当 } k=1 \text{ 时, } m(A \cup B) = m_1(A) \times m_2(B) \quad (4-3)$$

当 $k \neq 1$ ，有 $\forall A_i \cap B_j \neq \emptyset (A_i \subseteq \Theta, B_j \subseteq \Theta)$ ，有

$$m(A_i) = \frac{m_1^2(A_i) \times m_2(B_j) \times (1-R)}{(1-k) \times (m_1(A_i) + m_2(B_j))} \quad (4-4)$$

$$m(B_j) = \frac{m_1(A_i) \times m_2^2(B_j) \times (1-R)}{(1-k) \times (m_1(A_i) + m_2(B_j))} \quad (4-5)$$

$$m(A_i \cap B_j) = \frac{m_1(A_i) \times m_2(B_j) \times R}{(1-k)} \quad (4-6)$$

R 在公式中表示向下聚焦的系数，向下聚焦的程度由 R 依据所联合集合的基数的大小来确定，这样可以防止在大子集上（携带的确定性因子不多于子集）的基本可信度分配函数会聚焦到小子集上（携带的确定性因子较多），公式通过 $(1-R)$ 和比例因子确定保留在原有焦点上的信度值的大小。用上述公式计算出的同属于一个集合的信度值应予以合并。表 4-1 给出了证据组合的基本可信度分配函数与子集。

表 4-1 证据集合及可信度分配函数

焦点	a	b	c	d	ab	$abcd$
m_1	*	*	*	*	*	1.0
m_2	1.0	*	*	*	*	*
m_3	*	1.0	*	*	*	*
m_4	*	*	0.9	0.1	*	*
m_5	*	*	*	*	1.0	*

修正后的合成公式的计算结果如表 4-2 所示，其中主要列举了两个信度函数联合的几种典型情况。组合后 $m_{1\oplus 2}$ 与 m_2 相比，可以看出 $m_{1\oplus 2}$ 对 $\{a\}$ 的支持度变小，可以看出组合后防止了携带确定性因素少的证据过多的聚焦到携带确定性因素多的子集。因为 $m_{1\oplus 2}$ 是不重要的信度函数 m_1 和完全支持 a 的信度函数 m_2 合成的结果。而焦点 m_2 和 m_5 组合后 $m_{2\oplus 5}$ 对 $\{a\}$ 的支持比 $m_{1\oplus 2}$ 对 $\{a\}$ 的支持大，这充分说明改进的合成方法可以根据子集的大小确定聚焦的权重。 m_3 给出了对不一致问题解决的最好的答案，在 m_2 完全支持焦点 $\{a\}$ 和 m_3 完全支持焦点 $\{b\}$ 的情况下，组合后 $m_{2\oplus 3}$ 是完全支持焦点 $\{ab\}$ 的。同时，改进后的组合规则同时也保留了原有组合规则的一般特性，可以参见 $m_{4\oplus 4}$ 和 $m_{5\oplus 5}$ 的计算结果。

表 4-2 组合结果比较

焦点	a	ab	c	d	ab	$abcd$
$m_{1\oplus 2}$	0.625	*	*	*	*	0.375
$m_{2\oplus 5}$	0.75	0.25	*	*	*	*
$m_{2\oplus 3}$	*	1.0	*	*	*	*
$m_{4\oplus 4}$	*	*	0.988	0.012	*	*
$m_{5\oplus 5}$	*	*	*	*	1.0	*

4.2 专家系统中基于加权模糊推理机的实现

因为农业领域问题的复杂性和模糊性具有特殊的环境背景，所以模糊推理被使用到了决策系统中。农业领域中问题的模糊性主要有四个方面的特点：

- (1) 环境判断具有模糊性：如农业特定环境中的温度的高低、湿度的大小、光照度的强弱等；
- (2) 环境判断值的准确程度具有模糊性：如土壤中碱解氮含量、酸碱度等；
- (3) 领域专家的知识具有模糊性：如根据农业特定环境中的环境因子的值判断得到环境状态；
- (4) 农业专家的推理过程及结论具有模糊性。

针对农业领域中问题的特殊性，下面详细介绍专家系统中基于加权模糊逻辑的

推理机的实现过程。

设系统中的模糊产生式规则表示成： $P \rightarrow Q, CF, T$ 。产生式的左边 P 表示一组前提或条件，右边的 Q 表示结论或者动作， CF 是规则的置信度，其取值范围(0,1)， T 是规则被满足的阈值，其中前提 P 和结论（动作） Q 都具有模糊性。该规则的含义是：“如果前提 P 在特定条件下被满足则可以一定真度推出结论 Q ，其中规则的可信度记为 CF ”。

因此，在推理的过程中规则的匹配过程不是“完全意义上的相同”，而是定义在某种意义范围内的“模糊匹配”。模糊数据对象之间的差别可以用类似于定义语义距离的词来度量，当任意两个模板之间以某种方式匹配后的，其匹配程度的系数值达到了预先规定的要求就算匹配成功，从而允许使用相应的某条产生式规则。

为了达到上述要求，系统中使用模糊逻辑公式来表示产生式中的前提（或条件）以此将前提（或条件）模糊化，匹配原则定义如下：

当前提（或条件）逻辑公式的各个子式能与已知的知识以某种模糊方式匹配，将其匹配程度换算成真度，再将其依次作为前提（或条件）的匹配程度。从这个角度来看，模糊逻辑表示的蕴含式与该处理方法的差别不明显，在一定程度上可以认为用模糊匹配的方法来计算前提（或条件）的真度，但是该方法容易实现。

假设产生式为 $P \rightarrow Q, CF, T$ ，当 P 为一个模糊逻辑公式时，逐层匹配顺序如下：

- (1) 先检查已知知识中是否有知识与整个 P 匹配，若存在匹配的知识，则前提 P 的匹配程度用此已知知识的真度代替。否则将 P 进一步分解成子式。
- (2) 先检查已知知识中是否有知识与各子式匹配，如果存在匹配的知识，则该子式的真度用此已知知识的真度代替，然后依据既定的逻辑公式计算整个逻辑式 P 的真度，并将其作为前提 P 的匹配程度。如果不存在匹配的知识，则将子式进一步分解为子子式，继续匹配，如此循环直到分解成不能再分解的原子式。需要注意的是：整个匹配过程中的匹配动作仍然是完全一致的意思，这主要是因为已知知识都有真度，所以前提 P 的匹配度可用逻辑公式计算得到复合真度代替。

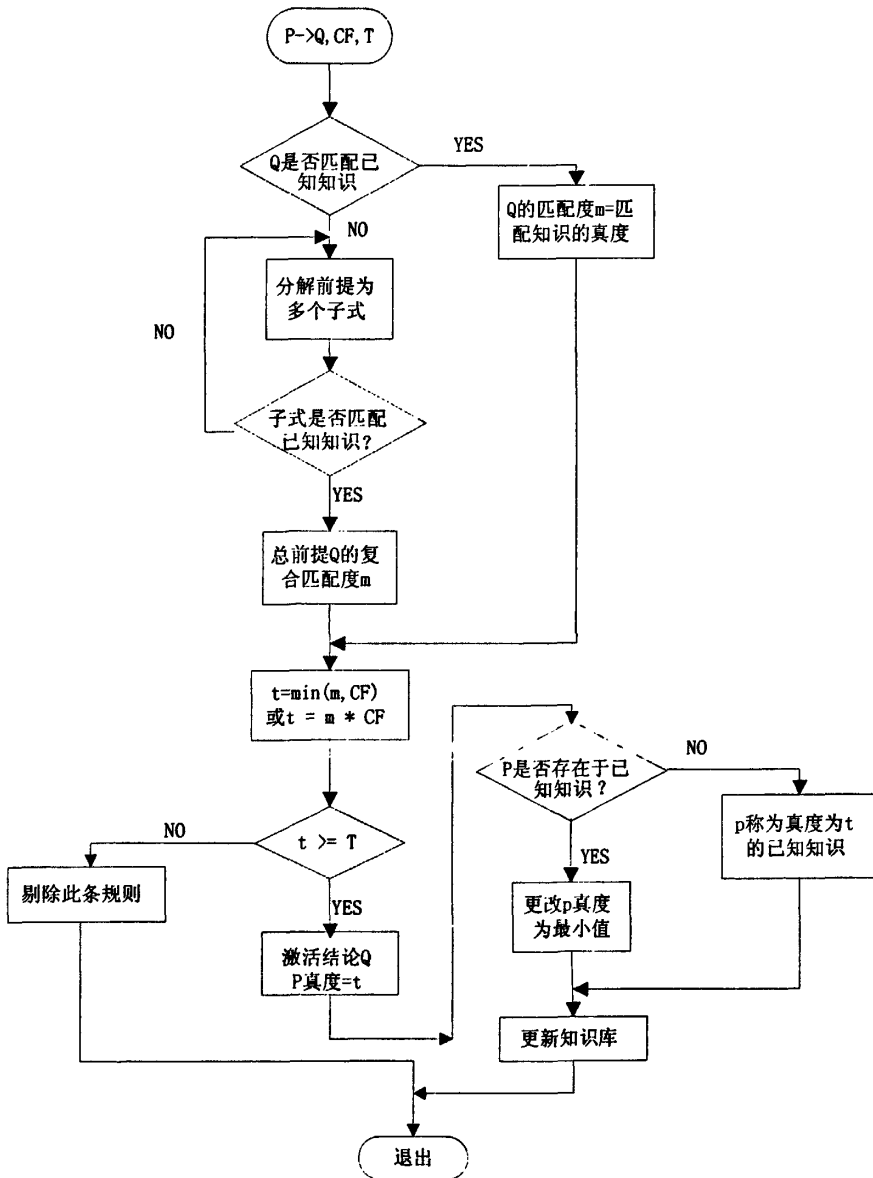


图 4-1 基于加权模糊的推理过程

按照上述方法计算后，假设对 P 求得的匹配度为 m ，且令 $t=m*CF$ ，或者 $t=\min(m, CF)$ 等，当 $t \geq T$ 时，规则可以被激活，即可以以强 t 执行动作 Q ，或者推出结论 Q ，其真度是 t 。如果已知知识集中没有 Q ，则将它加入已知知识集中作为新产生的已知知识。若 Q 存在于已知知识集合中，将新推出的真度与已知知识集中 Q 的真度进行比较，如果新真度小，则将原真度用新真度替代，否则原真度

不变。推理过程如图 4-1 所示。

一条推理规则的前提（或条件）中各个前提（或条件）所包含的信息量等在实际的问题解决过程中都可能不相同。所以每项前提（或条件）都有一个权重值(w)，当前提（或条件）的真度(t)大于前提（或条件）的阈值(T)时，执行结论(Q)，假设某条规则的 $CF=0.80$ ，则结论 Q 的真度可以表示成 $t \wedge CF$ ， \wedge 表示交运算。在运用中采用加权模糊逻辑公式来表示这类现实知识是非常合适的。推理规则在这种情况下形式是：

$$\omega_1 \times p_1, \omega_2 \times p_2, \dots, \omega_n \times p_n \rightarrow Q, CF, T \quad (4-7)$$

其中 $P_j(j=1,2,\dots,n)$ 与 Q 表示模糊逻辑谓词，其取值范围为 $[0,1]$ ；子前提（或条件） P_j 的权重系数是 $\Omega_j: \omega_j \geq 0(j=1,2,\dots,n)$ ，其中有 $\sum \omega_j = 1$ ，它们的和为 1；规则的置信度 CF 的取值范围是 $(0,1]$ ，即 $CF: 0 < CF \leq 1$ ；规则的阈值 T 的取值范围是 $(0,1]$ ，即 $T: 0 < T \leq 1$ 。权重系数、置信度和阈值的真值一般由经验专家给出，因此具有主观性。

综上所述，规则可以定义为：前提（或条件）的真度 $t = \sum \omega_j \times T(P_j)$ ，当 $t \geq T$ 时，该规则就可以被激活，否则不使用该规则。其中 $T(P_j)$ 为 $P_j(j=1, 2, \dots, n)$ 的真度；规则使用的结果是推出结论 Q ，其真度表示为 $T(Q)$ ， $T(Q) = t \wedge CF$ ， \wedge 可以表示某种“交运算”，可以取极小和乘法等方法计算，在本系统中使用乘法运算作为交运算。因而有：

前提（或条件）的真度 > 结论的真度

综上所述，系统的推理过程是基于主观不充分置信的决策推理。

4.3 混合算法

数据融合的混合算法主要分成了两级，第一个级的数据融合是局部融合中心，为了提高传感器工作的可靠性，任意一个传感器的输出，都以该传感器在一定时间内按时间先后顺序对同一对象进行数据采集，剔除该段时间内某些传感器的失效平均数据，并将有效该对象的有效数据的融合数据作为监测的结果，第二级的数据融合是全局融合中心，以一定空间内的多种传感器的监测结果的数据融合值作为依据，利用多种传感器的监测结果进行数据融合，将传感器的空间性考虑进去，将不同质的传感器测量的数据进行融合，得出融合空间的综合环境情况。第

一级融合主要是对数据进行数量级的降级，第二级融合主要是对不同质融合结果的综合评价，该融合方法可以提高融合系统的执行效率。本系统的数据融合算法如下：

1. 局部融合中心算法

文中局部数据融合中心采用了包括有效数据优化与失效数据剔除两个工作重点。

(1) 基于相融矩阵的失效数据剔除方法：

当多个同质传感器测量同一环境参数时，假设在同一时间内第 i 个传感器和第 j 个传感器所采集到的数据为 T_i 、 T_j ，且 T_i 、 T_j 数据相关联。为反映 T_i 、 T_j 之间的偏差大小，引进相融距离测度 d_{ij} 。 d_{ij} 的值越大，表示 i 、 j 两个传感器的观测值相差越大，否则偏差就越小。因而称 d_{ij} 为 i 、 j 两个传感器的融合度。 d_{ij} 的计算公式如下：

$$d_{ij} = |Q_i - Q_j| \quad (4-8)$$

公式中 Q_i 是 T_i 的方差。即

$$Q_i = |T_i - \bar{T}|^2 \quad (4-9)$$

若有 m 个传感器测量同一个目标，融合度 d_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, m$) 的集合构成一个矩阵 D_m ：

$$D_m = \begin{bmatrix} d_{11}, d_{12}, \dots, d_{1m} \\ d_{21}, d_{22}, \dots, d_{2m} \\ \dots\dots\dots \\ d_{m1}, d_{m2}, \dots, d_{mm} \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

D_m 是 m 个传感器所测数据的数据融合度矩阵

用 m 个传感器测量同一目标参数时，根据经验或多次试验的结果，给出 d_{ij} 的有界线值 β_{ij} (β_{ij} 的值一般情况下由多次试验或专家给出)，其中 ($i, j=1, 2, \dots, m$) 并设

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & d_{ij} > \beta_{ij} \\ 1, & d_{ij} < \beta_{ij} \end{cases} \quad (4-11)$$

$$\text{则 } R_m = \begin{bmatrix} r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1m} \\ r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2m} \\ \dots\dots\dots \\ r_{m1}, r_{m2}, \dots, r_{mm} \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

式中 R_m 为多传感器相融矩阵。

若 $r_{ij} = 0$, 则认为第 i 个传感器与第 j 个传感器相融性差, 或称它们相互不支持。若 $r_{ij} = 1$ 则认为第 i 个传感器和第 j 个传感器相融性好, 称第 i 个传感器和第 j 个传感器相互支持。如果一个传感器只被少数传感器支持, 则这个传感器的数据为失效数据, 应把这样的数据剔除。若这个传感器的读数长期失效, 应考虑检查该传感器是否故障。其余传感器为有效传感器, 其集合为融合集 T , 有效传感器的个数 L 为有效融合数。

(2) 有效数据的融合

设 m 个传感器测量同一个环境参数, 其融合数为 L ($L \leq m$), 融合集为 T , T 的最佳融合数据为:

$$T' = \frac{\sum_{i=1}^L T_i}{L} \quad (4-13)$$

假设现有 10 个温度传感器在 20 分钟内进行了单独测量, 得到的测量均值如表 4-3 所示。

表 4-3 温度采样数据

传感器序号	观测值 T_i	传感器序号	观测值 T_i
1	15.0	6	12.8
2	14.8	7	12.5
3	14.6	8	15.4
4	14.5	9	15.2
5	14.4	10	18

由公式(4-8)和公式(4-9)计算两两传感器的融合度, 并组成多传感器融合度矩阵:

$$D_{10} = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.072 & 0.064 & 0.030 & 0.024 & 3.608 & 4.850 & 0.384 & 0.152 & 10.680 \\ 0.072 & 0.000 & 0.008 & 0.042 & 0.096 & 3.680 & 4.922 & 0.456 & 0.224 & 10.752 \\ 0.064 & 0.008 & 0.000 & 0.034 & 0.088 & 3.672 & 4.914 & 0.448 & 0.216 & 10.744 \\ 0.030 & 0.042 & 0.034 & 0.000 & 0.054 & 3.638 & 4.880 & 0.414 & 0.182 & 10.710 \\ 0.024 & 0.096 & 0.088 & 0.054 & 0.000 & 3.584 & 4.826 & 0.360 & 0.128 & 10.656 \\ 3.608 & 3.680 & 3.672 & 3.638 & 3.584 & 0.000 & 1.242 & 3.224 & 3.456 & 7.072 \\ 4.850 & 4.922 & 4.914 & 4.880 & 4.826 & 1.242 & 0.000 & 4.466 & 4.398 & 5.830 \\ 0.384 & 0.456 & 0.448 & 0.414 & 0.360 & 3.224 & 4.466 & 0.000 & 0.232 & 10.296 \\ 0.152 & 0.224 & 0.216 & 0.182 & 0.128 & 3.456 & 4.398 & 0.232 & 0.000 & 10.528 \\ 10.680 & 10.752 & 10.744 & 10.710 & 10.656 & 7.072 & 5.830 & 10.296 & 10.528 & 0.000 \end{bmatrix}$$

取 $\beta_{ij}=0.5$ 则由公式(4-11)得出

$$R_{10} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

取至少 7 个支持度的传感器测量数据为有效数据, 最佳融合数 $L=7$, 则, 融合集是 $\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7\}$

用公式(4-13)求被测数据的最优融合数据为:

$$T' = \frac{\sum_{i=1}^L T_i}{L} = 14.843^\circ\text{C}$$

结果表明, 与参考文献[55]中用 Bayes 公式计算出的融合数据 14.836°C 的误差为 0.009°C , 虽然计算结果与参考文献[55]存在 0.001 级别的偏差, 但是温室环境中的温度误差只需要控制在 0.1°C 内就足以满足植物生长要求, 因此上述方法的精度在完全可以满足温室控制的需要, 文中介绍的方法与文献[55]中的方法相比较其最大特点是计算简单, 只是简单的四则运算, 从而为系统节约了更多的时间来进行第二级的融合计算, 确保了系统的实时性。

2. 全局融合中心

本文采用了一种上节介绍的改进 D-S 证据理论和专家系统共同协作作为系统级融合算法。

全局融合中心将局部融合中心的融合信息作为证据，每个局部融合中心提供一组命题，对应决策： x_1, x_2, \dots, x_n ，并建立一个相应的信度函数，这样，传感器信息融合实质上就成为在同一识别框架下，将不同的证据体合并成一个新的证据体的过程，然后将新的证据体送入专家知识库进行规则匹配，并给出控制策略。全局融合中心的决策规则如前所述。

混合算法把网络中的数据进行两级融合的主要好处是可以降低数据数量级，减轻融合负担，提高系统的融合效率。第一级局部融合主要是对同质的数据进行融合，剔除失效的信息，并对有效信息进行优化，及归一化有效数据。第二级全局融合是通过 D-S 证据理论进行的，主要是对不同质的数据信息进行融合，得到各种环境现象的概率分布值。数据融合处理过程如图 4-2 所示。

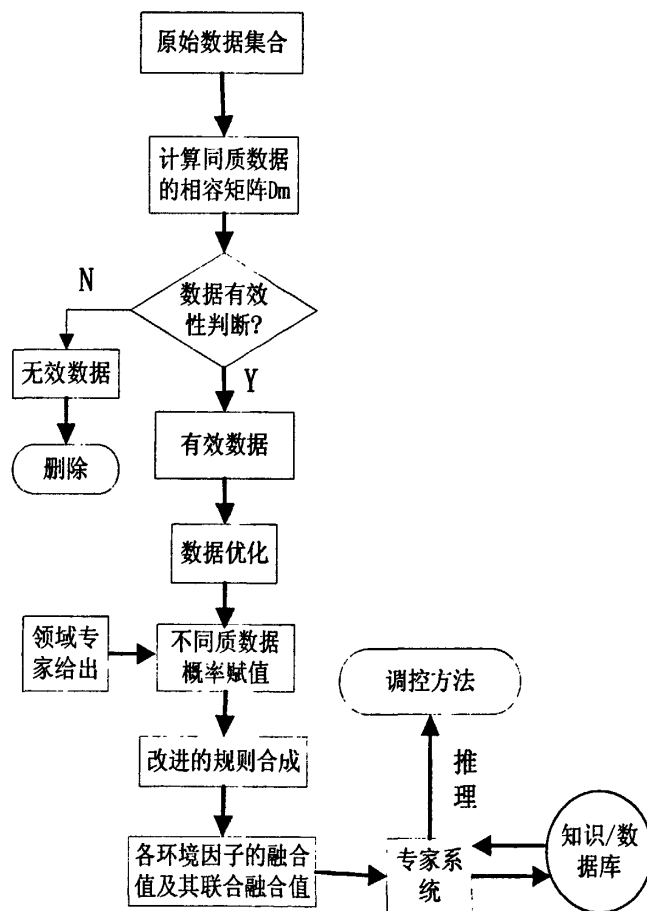


图 4-2 数据融合处理过程

4.4 小结

本章首先对 D-S 证据理论的信度合成方法的失效性进行了分析,并提出了一种改进的 D-S 理论的信度合成方法。由于农业领域的特殊性,本文中专家系统的推理机的原理是加权模糊方法。最后介绍了基于相融矩阵和改进的 D-S 证据理论的两级数据融合的混合算法,该算法减少了同质数据的冗余度,对异质数据进行融合,异质数据的融合结果送入专家系统后,经专家系统推理发现异常原因并给出解决方案。

第五章 温室控制系统中融合模型的设计

5.1 试验环境

本文主要是在 VC++ 的开发环境下模拟温室环境的监测系统，仿真过程中主要考虑对三个环境因子进行融合，即温度、湿度和光照度。这三个环境参数是对温室环境影响最大的，也是作物最敏感的。下面对这三个环境因子在作物中所起的作用做一个简要介绍。

1. 温度条件

在影响农作物生长环境的条件中，温度对作物的影响最为明显，每一种农作物都有三个温度点，即最高温度、最适宜温度和最低温度。农作物种类不同对温度的要求也随之不同，对于同一种农作物不同生长期也有不同的温度要求。

由于昼夜的交替作用，适宜作物进行光合作用的温度一般都比适宜生长温度高，同时作物生长过程也适应这种昼热夜凉的气候变化，因此，温度周期的作用和光周期的作用关系很密切。

2. 湿度条件

温室中的湿度包括空气中的水分和土壤中的水分，湿度与光照、湿度与温度的关系都比较密切。当温度升高时，空气的相对湿度会下降；反之则增大。而相对湿度大小会影响作物的光合作用，因为光合作用强时需要的水分就更多。可见，温度比较高，光照度比较强时，需要更大的湿度才有利于作物光合作用的顺利进行。

3. 光照条件

由于作物光合作用受到光照的直接影响，因此，光照也会影响作物的生长和产量等。由于光合作用的主要能源是可见光，因此光质的好坏也会影响农作物的生长。因为不同波段在不同光照强度下的作用有所不同，在弱光范围（光饱和点以下）内，相同的条件下，光能所含量子的数量因波长越长而越多。所以红橙光比蓝紫光的光和效能高。在太阳散射光中，红光和黄光占 50% 到 60% 左右，而在太阳直射光中，其最多占 37%。由此可见，散射光对在弱光中生长的农作物的效用比直射光的大。在光饱和点以上，作物的光合作用已经不受光量子数量的影响，所以作物

的光合作用不受可见光范围内的光波长影响。

假设温室中分别用了 10 个传感器来测量温度、湿度、光照度,表 5-1 列出 16:00 到 16:15 之间传感器在 15 分钟内测量的温度均值,表 5-1 的数据作为局部融合的试验数据样例。

表 5-1 温度采集记录

传感器序号	温度值	传感器序号	温度值
T1	21.6	T6	21.4
T2	21.8	T7	21.5
T3	22.1	T8	21.0
T4	24.0	T9	20.9
T5	21.2	T10	21.1

根据局部融合算法可得到温度传感器 T1 到温度传感器 T10 的相融矩阵 D_m 的结果如表 5-2 所示:

表 5-2 温度相融矩阵表

D_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0.016	0.190	5.472	0.208	0.064	0.022	0.432	0.574	0.310
2	0.016	0	0.174	5.456	0.192	0.048	0.006	0.416	0.558	0.294
3	0.190	0.174	0	5.282	0.018	0.126	0.168	0.242	0.384	0.120
4	5.472	5.456	5.282	0	5.264	5.408	5.450	5.040	4.898	5.162
5	0.208	0.192	0.018	5.264	0	0.144	0.186	0.224	0.336	0.102
6	0.064	0.048	0.126	5.408	0.144	0	0.042	0.368	0.510	0.246
7	0.022	0.006	0.168	5.450	0.186	0.042	0	0.410	0.552	0.288
8	0.432	0.416	0.242	5.040	0.224	0.368	0.410	0	0.142	0.122
9	0.574	0.558	0.384	4.898	0.336	0.510	0.552	0.142	0	0.264
10	0.310	0.294	0.120	5.162	0.102	0.246	0.288	0.122	0.264	0

由于我们要将温度的测量差异保持在 1 度以内,因此可以取 $\beta_{ij}=0.5$,则可得出归一化后的相融矩阵如表 5-3 所示:

表 5-3 归一化后的温度相融矩阵表

R _{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
5	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1

取至少 7 个支持度的传感器测量数据为有效数据, 最佳融合数 $L=9$, 则融合集 T 是 {T1, T2, T3, T5, T6, T8, T9}, 由融合集 T 可知, 4 号传感器的数据不被多数传感器所支持, 因此需要将其数据剔除, 所以最优的融合数据为

$$T' = \frac{\sum_{i=1}^L T_i}{L} = 21.4$$

系统所用的环境因子数据来源于四川省丹棱县张场大棚中药种植公司在 07 年 12 月 3 日 14:30 到 16:30 对种植蒲公英的温室环境参数温度、湿度和光照度变化的记录, 如表 5-4 所示:

表 5-4 蒲公英温室环境参数记录

日期	时间	温度℃	湿度%	光照度(W/m ²)
12.03	14:30	25	60.5	392
12.03	14:45	25.5	63	372
12.03	15:00	25	63	328
12.03	15:15	24.5	64	304
12.03	15:30	23	67	264
12.03	15:45	22.5	70	220
12.03	16:00	22.5	71	184
12.03	16:15	21.4	74	140
12.03	16:30	18	76.5	96

5.2 系统总体结构

本文提出的环境监控模型主要是针对草本中药材种植，其系统架构模型基于传感器网络知识而建立，其中环境数据主要是模拟输入产生。传感器网络整体架构可划分为三部分：传感器采集、网络传输和评测预警。其组织结构模型图如图 5-1 所示。

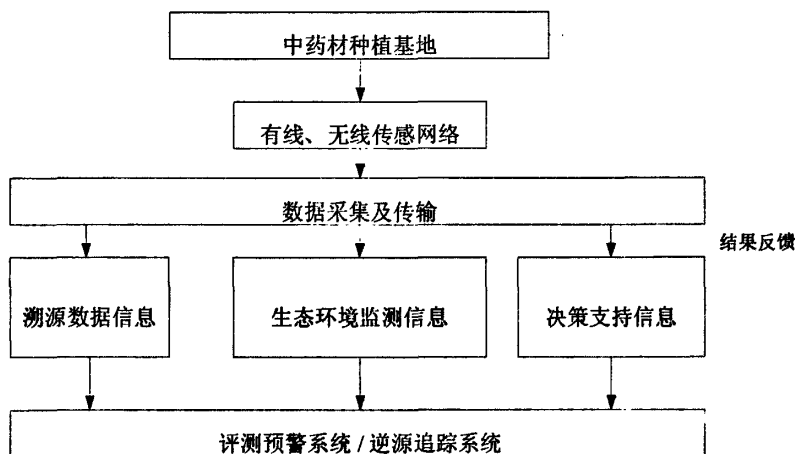


图 5-1 传感器网络整体构架

传感器采集部分主要负责温度、湿度和光照度等相关成分信息的检测，传感器所采集数据通过有线或无线网络传输将数据局送到传感器网络数据融合中心。传感器的设计和数据采集方式主要由硬件设计人员完成。

网络传输部分主要负责将采集数据传输到评测预警服务器。它包括两类网络：有线数据传输网络和传感器网络。通过有线数据传输网络实现数据的聚集传输，主要是负责实现基站与评测预警服务器的通信；通过传感器网络实现采样数据的传输，主要负责实现传感器与基站之间的通信。

评测预警服务器对接收到的采集数据进行分析 and 预警处理。根据相应的预警策略判断是否进行安全报警。评测预警部分主要包括采集数据收发模块、采集信息数据库、数据融合处理模块、采集信息特征数据库、预警策略数据库和预警模块。其结构如图 5-2 所示。

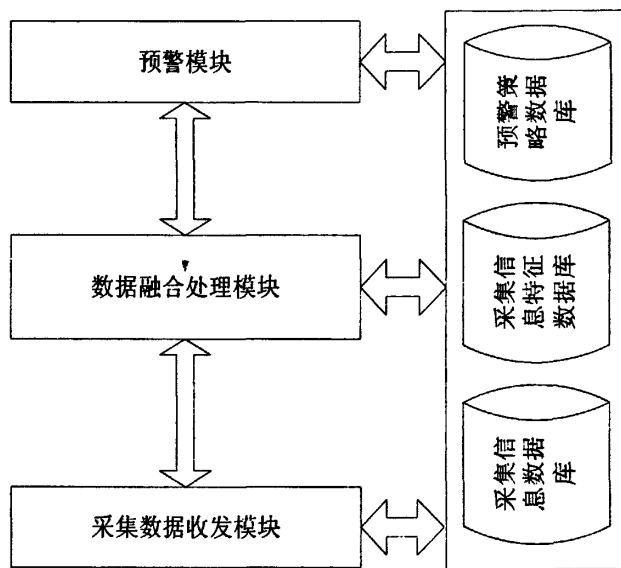


图 5-2 评测预警系统结构图

整个系统的执行过程如图 5-3 所示，其中原始数据库用于存放传感器采集到的有效数据；融合数据库即采集信息特征数据库，用于存放有效数据经过优化后的结果，即融合在一定区域的同质数据，得到具有代表性的数据（环境因子的信息特征）；规则库属于专家系统的一部分，主要存储了由环境因子能够推导出一定环境状态的规则，这些规则由领域专家给出，最初状态的规则库中只有简单的一些规则，随着时间的推移，规则库中的规则可以增加（由领域专家根据温室监控中所发生的情况或新的温控设施的引进而及时更新规则库）；故障数据库，存放所有测试结果异常点的测试数据和系统的故障情况，异常点的测试数据包括异常点的时间、传感器的位置、采集到的数据以及与其他同区域同质的有效数据的具体差异等信息，系统的故障情况主要指传感器或网络故障现象，这部分由硬件专家给出，本文中只作了解；技术策略数据库即预警策略数据库中主要是存放的一些关于环境异常现象的处理方法集，技术策略数据库主要包括了环境因子异常时所要启动的相对应的调控设施方法集和系统故障时具体的排除故障的方法集。

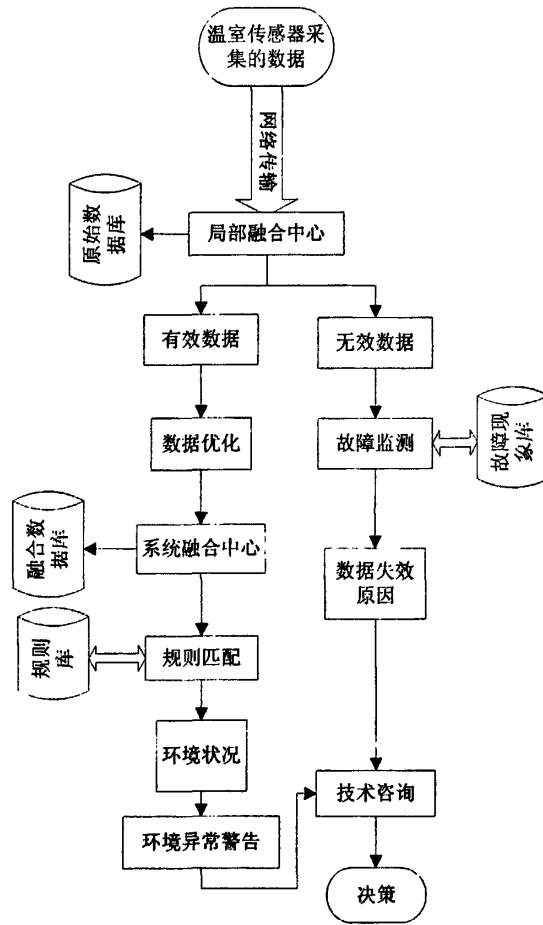


图 5-3 系统执行过程图

5.3 数据融合模块的设计

5.3.1 数据融合结构

为了适应温室控制系统监测对象的环境特殊性，本文提出一种基于两级融合模型的传感器网络的体系架构，融合结构如图 5-4 所示。

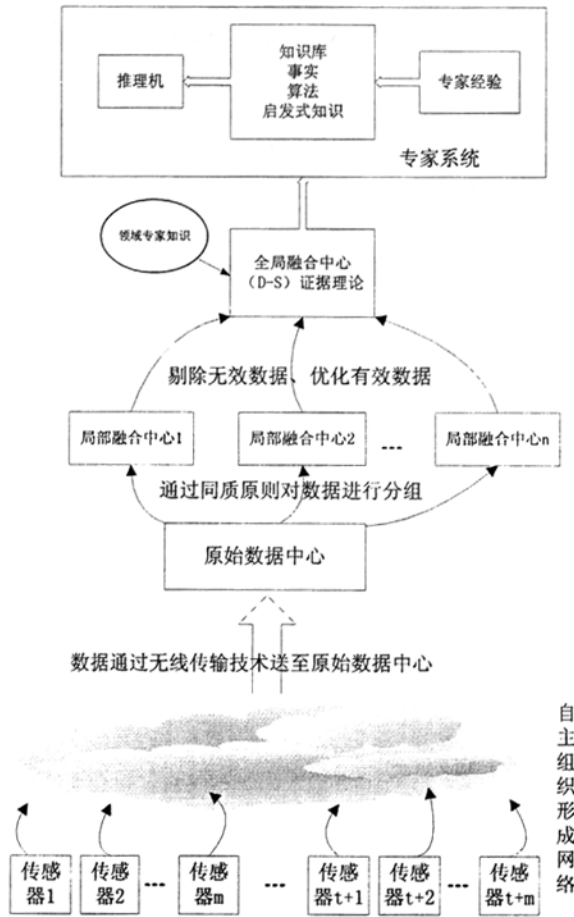


图 5-4 融合结构图

在时间和空间上，局部融合中心利用相融矩阵算法对来自同类传感器群的同质数据进行数据融合。在时间上，对不同时间监测的数据进行融合（即对单个传感器在规定时间内采集的数据进行融合），这样可以得到较全面的准确的测量数据，同时减少了数据的传输量。在空间上，为了防止某些失效传感器对整个测试数据的影响，本文利用相融矩阵算法对同一区域内的多个同质数据进行融合，剔除失效数据，只保留有效数据进行数据优化，这样可以获得更加准确的结果。

全局融合中心的主要作用是将来自多个局部融合节点的异质数据进行组合、关联，形成全局决策。该级融合过程中，利用改进的 D-S 证据推理对温室中的环境参数（温度、湿度、光照度）进行数据融合。由领域专家根据环境因子可能出现的情况给出融合中心的识别框架，为了满足 D-S 证据理论的初始条件，需要领域专家为经局部融合的异质数据分配基本概率函数赋值。数据经过改进的 D-S 理论

证据组合规则融合后，将结果送入专家系统的知识库，依据农业专家的知识 and 经验进行推理，尽可能精确的判断出温室的环境现状，并结合领域专家为专家系统设定的解决方案，采用适当的措施对环境参数进行调节，从而为作物生长创造一个最佳的生长环境。

5.3.2 专家系统子模块

5.3.2.1 模块结构图

1. 专家系统的软件结构

为便于管理和编程实现，软件分为三个子系统：

(1) 技术支持子系统。对环境异常或者节点异常处理后的结果进行技术咨询，方便用户查询异常处理常用技术，同时领域专家可以对技术知识进行修正和添加。

(2) 故障处理子系统。对监控系统在监测温室环境的过程中出现的异常现象进行判断，并为技术咨询子系统提供所需要的数据。

(3) 测试数据管理子系统。主要提供了三方面信息的系统处理功能。一是为用户提供温室控制技术和管理技术的相关知识；二是存储详细的作物特性数据，农业专家在作物的生长过程中可随时查询或修正作物的生长特点；三是温室控制系统中的环境异常点的详细记录情况，为系统的常规检测提供参考信息。

这三个子系统相互关联又相互独立，整体结构如图 5-5 所示。

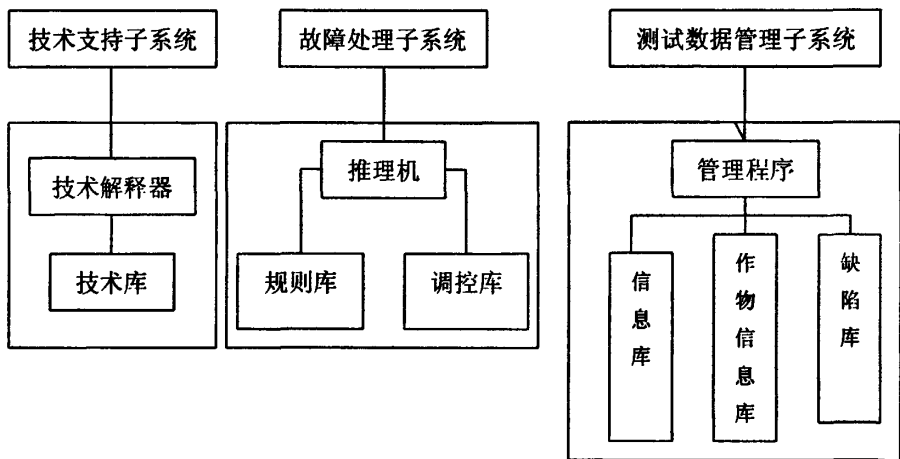


图 5-5 专家系统软件结构框图

图 5-5 中技术库给出温室环境控制技术和节点失效技术支持等有关知识；信息库中存放有温室环境控制技术知识和温室管理的相关知识，供温室管理人员学习；温室中各分区的农作物品种、特性等原始数据存放在作物信息库中，该数据库中存储了作物对环境的具体要求，以及环境参数间的关系等事实数据；缺陷库存放系统所产生的故障的所有信息以及结果异常点的测试的原始数据。

2. 推理机

温室环境控制专家系统模仿领域专家的思维方式，采用正则推理机制，即由规则库引导和分等级的推理模式。系统将经证据理论融合过的异质数据的融合结果传送给专家系统，再由专家系统根据分析结果来确定环境的是否异常，若异常，则提出应采取的措施。

3. 知识库

知识库是温室环境监控专家系统设计的核心，是实现监控系统自动化管理的关键技术，它包含了规则库、作物信息知识库、推理知识库和技术支持库等。为了使知识库在运行中不断完善，系统允许领域专家对这些数据库进行修改和填充。

知识库的核心是规则库。融合结论的识别、异常诊断和异常处理决策等过程都需要规则库的参与。规则库主要包含了两大部分：

- (1) 负责为全局数据融合中心构建识别框架，并设定基本概率分配函数赋值规则。
- (2) 对融合结果进行异常诊断，并给出调控方案。

5.3.2.2 规则的制定

专家系统中推理规则的制定非常的重要，这关系到系统的有效性及系统的智能性。考虑到由于农业领域中的问题的复杂性和模糊性具有特殊的环境背景，专家系统中的推理机使用基于加权模糊逻辑的方法实现。假设我们在环境中监测温度、湿度、和光照度三个环境因子。当全局融合中心融合后的结果可以告诉我们这三种环境的状态，专家的规则制定也围绕这三者进行，并由专家给出。

1. 识别框架构造规则构造和基本概率分配函数赋值

蒲公英属于生长在干湿适中环境中的阳性植物，其对关照度有比较高的要求，光照是否充足关系到其产量的高低和质量的好坏^[54]。本文中的环境参数数据来源于温室蒲公英栽培 12 月份的记录，如表 5-4 所示，由于蒲公英对生长环境有特殊的要求，且在冬季，温室中的温度和关照度普遍偏低，及湿度偏高，系统设计的

过程中，结合领域专家的经验知识，组建的识别框架构造如下：

$\Theta = \{A, B, C, D, E\}$ ，具体焦元的子集如下：

$A = \{\text{适宜, 即温度:}18-25^{\circ}\text{C, 湿度:}60\%-75\%, \text{光照度:}370-550\text{w/m}^2\}$

$B = \{\text{温度偏低}\}$

$C = \{\text{温度偏低, 湿度偏高}\}$

$D = \{\text{温度偏低, 光照不足}\}$

$E = \{\text{温度偏低, 湿度偏高, 光照不足}\}$

由于温度分别和湿度、光照度的关系最紧密，因此根据两两配合原则，系统中将温度和湿度，温度和光照度配合进行融合计算，假设两种配合中的两组证据体为 m_1, m_2 ，则

$$m(X) = \begin{cases} m(A), X = A \\ m(B), X = B \\ m(C), X = C \\ m(D), X = D \\ m(E), X = E \\ 1 - m(A) - m(B) - m(C) - m(D) - m(E), X = \Theta \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (5-1)$$

本文利用表 5-4 中 16:15 的环境参数进行 D-S 证据理论对异质数据的融合实验。按照三个环境参数间的相互影响，根据领域专家的知识，表 5-5 给出了环境参数的基本概率分配赋值。

表 5-5 湿度、温度与光照度的基本概率分配值

	A	B	C	D	E	Θ
湿度	0.362	0.053	0.426	0.036	0.102	0.021
温度	0.658	0.115	0.032	0.126	0.056	0.013
光照度	0.065	0.119	0.024	0.723	0.058	0.011

2. 规则的制定

在进行规则制定时，首先根据融合的环境参数将规则分成多种大类，这些大类由三个环境因子的组合构成。然后在根据这三个环境因子的概率及对应融合识别框架中融合概率最大的元素的概率由推理机计算出证据的可信度，并根据可信度得出相应的结论。

表 5-6 规则制定样表

编号	规则类型	模糊产生式规则
1	(f: 温度偏低) B	If 温度{ w_1 }AND B{1} then 调控 1
2	(g: 湿度偏高) C	If 湿度{ w_1 }AND 温度{ w_2 } then 调控 2
3	(h: 光照不足) D	If 光照{ w_1 }AND 温度{ w_2 } then 调控 3
4	(i: 温度偏低, 光照不足) D	If 温度{ w_1 }AND 光照{ w_2 } then 调控 4
5	(j: 温度偏低, 光照不足, 湿度偏高) E	If 温度{ w_1 }AND 光照{ w_2 }AND 湿度{ w_3 } then 调控 5
6	(k: 适宜)	正常

表 5-6 中的调控措施是指融合结果进入规则库后满足某个规则后, 所适用的基本的调控策略, 而这个调控策略会根据各条件对结论的支持度是否大于阈值来判断采用此类调控措施中的哪条具体的温室调控措施。其中假设规则信度 CF 的值等于表 5-6 中规则类型中的识别子式综合融合值的一半。部分调控措施如表 5-7 所示。

表 5-7 调控措施表

编号	计算 T 值	措施选择
1	$T = w_1 * CF + 1 * CF$ 因为 B 中无其他条件	$T \leq 0.5$ 选择缓慢加温措施
		$T > 0.5$ 选择加温快的措施
2	$T = w_1 * CF + w_2 * CF$	$T \leq 0.5$ 选择不会增加温度的降湿措施 $T > 0.5$ 降温措施可适当增温 (1-3 度)
3	$T = w_1 * CF + w_2 * CF$	$T \leq 0.5$ 选择增加热量小的补光设备 $T > 0.5$ 补光设备可适当增温 (1-3 度)
4	$T = w_1 * CF + w_2 * CF$	$T \leq 0.5$ 选择增温性能好的补光设备 $T > 0.5$ 选择强补光设备和增温快的设备共同合作
5	$T = w_1 * CF + w_2 * CF + w_3 * CF$	$T \leq 0.6$ 选可增温的补光设备和除湿性一般的设备 $T > 0.6$ 三项设备都起用效果比较快的
6	正常	恒控设备运行, 其他设备停止

5.3.2.3 实现流程

1. 技术支持处理功能

技术支持模块 该部分主要完成对环境异常或节点异常处理的技术咨询工作，为用户创建一个能方便查询异常处理常用技术的技术平台，并且领域专家可以根据实地实际发生的新的异常情况对技术库进行更新。本模块的功能主要分成了以下两个模块。

第一个功能是环境因子异常处理技术支持。在环境异常实时监测的过程中，传感器采集的数据经过系统融合处理后，如果发现有环境异常的情况发生并给出进入技术咨询所需要的决策类型后，系统将决策类型作为诱因触发技术咨询子系统。技术咨询处理模块将决策类型与技术库中的类型匹配，查找相应的环境调节方案集，如果得到相应的解决办法则告知用户，如果其为新的异常则由领域专家给出解决方案，并及时更新技术库。

第二个功能是节点异常或系统异常处理技术支持。当出现异常节点时，系统根据异常的类型查询与异常情况相匹配的解决方案，并告知用户；如果没有与之相匹配的解决方案，则产生一个新的异常类型，并告知领域专家，由领域专家对新异常的处理方法给出最佳的解决方案，并将其记录到技术库中。在系统的正常维护期间，用户和领域专家可以查看相关技术库，只有领域专家可以对技术库做定期的检查更新工作。技术支持处理过程如图 5-6 所示，图 5-6 中的调节环境方法集可以随着温室控制系统中引入新的调控设备而更新，硬件故障解决方法集都是可以根据不同故障的出现，由相应的专家给出故障解决方法，并将方法写入硬件故障解决方法集中。

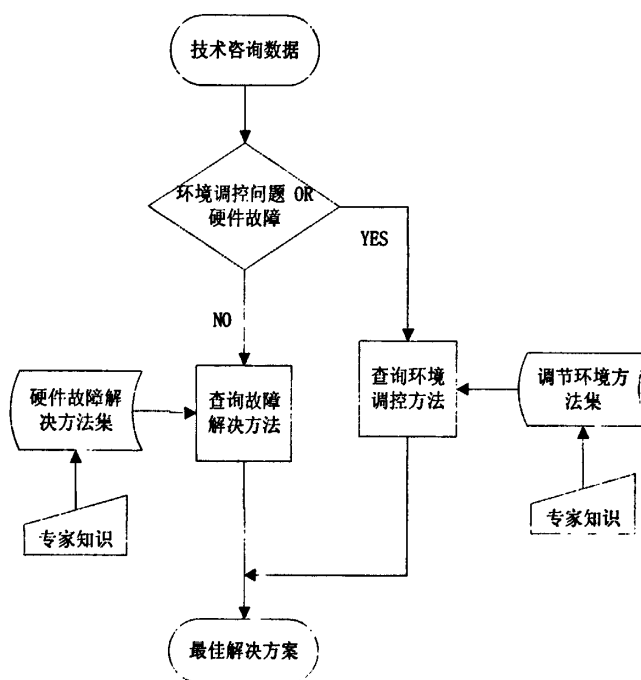


图 5-6 技术支持处理过程

2. 异常处理流程

异常处理的功能主要是处理环境异常。传感器采集到的环境因子数据经系统融合中心融合后的结果传送给专家系统，在融合结果正常的情况下，如果温室中有改变环境状况的紧急设备处于开启状态，则通知用户停止温室中所有的紧急设备，只运行平衡环境的基础设备，以保持温室的良好环境；如果温室中只是开启了基础的恒控设备，则无需通知用户。如果环境因子数据表明温室环境出现异常，则将相应融合结果送入专家系统进行推理决策，进入规则库查找对应规则，如果有匹配的规则，则得到起主导作用的异常因子和调控方案，将调控方案送入技术咨询子系统得出具体的解决措施。如果没有匹配的规则，则通知领域专家，领域专家给出调控方案，并更新规则库，技术咨询子系统中的技术库由技术专家更新。如果温室现行的温控措施与给出的最新解决措施不同，则通知用户关闭现行的温控措施，运行最新的温控解决措施。异常处理流程如图 5-7 所示。

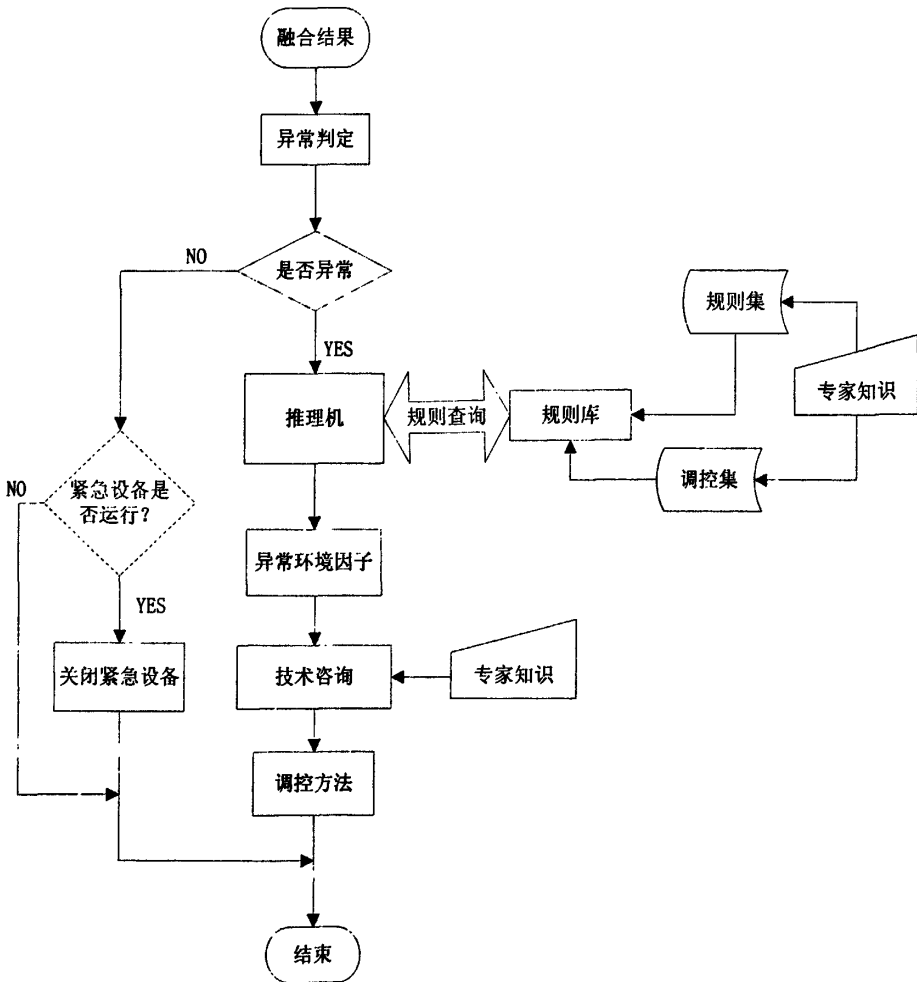


图 5-7 异常处理过程

3. 测试数据管理功能

测试数据管理模块的功能主要是包括三个数据库：管理与温室环境控制技术和管理的有关知识的管理库；与温室中各分区的农作物品种、特性等数据有关的作物信息库；与测试结果异常点的测试数据和系统的故障情况有关的缺陷库。

管理温室环境技术和管理知识，这部分主要用来存储一些管理温室控制的技术知识和管理的注意事项，供系统使用者学习；原始数据库中存放了作物的品种、特性、生长情况、及关于作物生长过程中的一些重要事件的记录，系统人员可以根据作物的实际生长情况更新原始数据库；异常库中主要记录了网络中异常点的发生时间，方式及测试的数据，以及异常发生的原因等情况，还有就是系统的运

行情况的一个记录。总的来说，测试数据管理模块就是供工作人员学习与记录日常温室情况的管理平台。这部分就不做详细介绍。

5.4 结果分析

1. 环境因子两两融合结果

在一定条件下，温室中只有一个或几个环境因子起主要作用，其对作物的环境变化起到了主导作用。在冬季的温室栽培中，作物的生长主要受到温度的影响，可以称其为主导因子，所以在融合的过程中，主要将温度与湿度和光照度分别进行融合计算。

由试验环境中给出的系统识别框架以及湿度、温度和光照度的基本概率分配值，根据前述改进的证据合成公式可得 $m(X)$ ，融合结果如表 5-8 所示：

表 5-8 湿度与温度融合

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	$m(\Theta)$
湿度	0.362	0.053	0.426	0.036	0.102	0.021
温度	0.658	0.115	0.032	0.126	0.056	0.013
融合值	0.833	0.017	0.116	0.015	0.013	0.007

同理，光照度与温度的合成结果如表 5-9 所示：

表 5-9 光照度与温度融合

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	$m(\Theta)$
光照度	0.065	0.119	0.024	0.723	0.058	0.011
温度	0.658	0.115	0.032	0.126	0.056	0.013
融合值	0.138	0.069	0.003	0.786	0.003	0.002

由表 5-8 和表 5-9 可以看出， $m(\Theta)$ 的值减少了一个数量级，这充分说明数据融合降低了数据信息的不确定性，融合结果的可信度比融合前的可信度更具有可区别性。由表 5-8 可以看出，融合后系统增强了对焦元 *A* 的可信支持，而且总的融合值的可信度比温度和湿度各自在融合前对 *A* 的支持度都大，同时增大了各焦元间的差距。由表 5-9 可以看出，融合后系统增强了对焦元 *D* 的可信度支持。由两表融合结果可以看出，由于湿度和温度的融合结果是支持焦元 *A* 的，而光照度和

温度的融合结果是支持焦元 D 的，因此可以判断，温度和湿度没有问题，而焦元 D 中包括由光照不足的因素存在，组后可以判断当前温室中的光照不充足，需要采取补光措施为作物增加光照。

2. 专家系统的控制方法

根据上述我们判断出温室中光照不足，而且满足识别框架中的 D 条款，由规则表 5-6 中我们可以查询到此现象符合规则 3 的要求，由规则 3 我们得到了调控表 5-7 中的第三条调控措施，经计算 $T=0.334$ ，由于 $T < 0.5$ ，且由于 D 项的融合结果偏大，结合调控表 5-7 措施意见可知我们要选择补光效果好但是产生热量少的补光设施。当我们查询补光措施时，补光设施如表 5-10 所示：

表 5-10 补光设施列表

补光设施	光通量 (m/W)	灯下垂直光 强度(1m)	水平距灯 1m 的光强度	光谱分布	效果
生物效能灯	70	2200lx~5000lx	4000lx	接近日光	高补光冷光源
高压钠灯	100	2200lx~3200lx	2600lx	红外光谱能量 大(热效应高)	普通补光热光源
金属卤化灯	80	2200lx~3000lx	2400lx	连续光谱，聚 焦太集中	小范围补光 冷光源

由表 5-10 可知，生物效能灯的补光效果最好，且是冷光源(补光过程中产生的热量较少)；而高压钠灯的补光效果一般，原因是钠灯的光谱能量接近红外线，所以会产生较多的热量，进而对温室的温度影响较大，且色泽比较刺眼，不利于工作人员进行室内操作；金属卤化灯是近年发展起来的，从理论上讲，其发光效率较高，但测定结果表明，其光照强度没有钠灯好，而且卤化灯的聚焦太过集中，它的光照角度大概在 30 度左右，比较适合小范围的补光。由上面的分析可以看出，应该选用生物效能灯进行补光，查询技术咨询库中的生物效能灯的使用手册，我们可以得到的使用指南是按照每 4m^2 打开一盏生物效能灯的规定，这样，即使在阴雨天或有雾的情况下，温室中的光强度都可以提高到 4000lx-5000lx。

5.5 小结

本章介绍了传感器网络系统的总体结构及系统的执行流程，并详细介绍了温室控制模型中的两级数据融合模块，对其融合的过程进行了详细的介绍。数据融合

模块中还主要介绍了数据融合的结构和专家系统中三个子模块的设计和执行情况。最后介绍了试验的模拟环境，对试验结果进行了分析，得出两级数据融合算法在本模拟系统中运行良好。

第六章 总结与展望

6.1 总结

传感器网络作为一种全新的网络，它的应用已经对人们的生活产生了重大影响。数据融合问题作为传感器网络的一个比较基础的问题，对其进行研究是很有必要的，且当传感器网络应用到不同的实际监测环境中时，系统对数据融合的要求也是有所不同，具有很强的针对性。本文在对传感器网络的数据融合问题进行研究的过程中，主要是针对温室控制中的数据融合问题进行了分析和研究，并成功的将 D-S 证据理论与专家系统相结合应用于模拟的温室控制系统中，最后通过仿真实验分析了数据融合算法，并验证其具有可用性。

(1) 简要介绍了传感器网络的起源及研究背景，分析了目前国内外在传感器网络方面的研究现状，阐述了传感器网络的相关技术，并总结了传感器网络的特点。

(2) 本文从基于物理模型、基于特征推理以及基于感知模型三个方面详细介绍了数据融合算法的分类，其中重点介绍了本文使用到的三个算法，即基于统计和估计的 Bayes 方法、基于信息论的 D-S 证据理论方法合基于认知模型的专家系统方法。详细介绍了以上三个算法的定义及推理过程。

(3) 由于温室环境的特殊性，针对 D-S 证据理论组合规则的不足，本文提出了一种基于改进的 D-S 证据信度合成方法和专家系统相结合的混合数据融合算法，本算法由专家系统为 D-S 证据理论提供识别架构及对基本概率分配赋值，最后又将检测结果返回给专家系统，并按照农业专家的知识 and 经验做出决策。使得系统能够处理实际环境中出现的异常情况，以达到为作物营造一个最佳的生长环境的目的。理论和实践证明，该融合方法有一定的可行性和有效性。

(4) 本文中的传感器网络的融合体系的融合框架是由专家系统给出的，其中专家系统由三个子模块组成，分别完成对传感器网路的不同管理工作，以提高融合数据的可靠性，在管理过程中专家系统还实现了对温室环境变化的准确判断，给出了相应的解决方案。

综上所述，本论文对对传感器网络中的数据融合问题进行了研究，尤其是对温

室控制系统中的数据融合问题进行了深入的研究，得到了一定的研究成果，基本上实现了预期的研究目的。

6.2 展望

在论文的研究过程中，查阅了国内外大量资料，认真分析了国内外专家在传感器网络数据融合方面的研究成果。但随着对该领域的研究的深入，作者发现数据融合问题还有很多问题需要做进一步的研究和探索。基于本文研究工作，我们打算从以下几个方面对本课题做进一步的研究工作：

(1) 在对识别框架的构造和基本概率分配函数赋值问题的处理上，主要是依靠领域专家的经验值，这些数值带有主观性和不确定性。今后需要进一步与领域专家进行交流，把领域专家的领域知识进行理论化、公式化表示。

(2) 在进行有效数据优化时，由于有效数据的先验概率无法有效得到，导致在实际的实验过程中采用求有效数据的均值来对数据进行优化，对于有效数据的优化还有待和领域专家进行实际的数据采集收证处理。

(3) 温室环境中影响环境的多个参数间的相互作用的模糊性较强。目前，只是对温度和湿度，温度和光照度之间的关系进行了研究，其它的环境因子间的关系还不明确。因此，对于温室中其它环境参数间相互作用的具体数学关系还有待进一步的研究。

(4) 针对温室环境的特点，以及该领域专家领域知识的模糊性，因此如何在专家系统中建立更加有效的规则进行环境控制，还有待做进一步的研究。

致谢

感谢导师桑楠教授！在三年的研究生学习过程中，无论是在学习还是生活中，您都给我很大的帮助。您在教学过程中所展示出的渊博的知识、谦逊的品德以及在科研中的求实创新精神使我深受教育。在此，我向桑楠教授对我的教育与帮助表示衷心的感谢。

感谢郭文生老师！他谆谆教人的教学作风给我留下深刻的印象。在项目的开展过程中，在他身上，我看到了一个教育工作者所需具备的敬业、拼搏、执着等科研精神。他永远是我学习的楷模。在此对他致以最美好的祝愿。

衷心感谢郝宗波老师！他平易近人的生活态度给我留下了深刻的印象。在学习和工作的过程中，他不仅是一位治学严谨的好老师，而且也是同学们生活中的好朋友。他对待工作竭尽全力，对待学生尽心尽职，是一位优秀的教育工作者。他永远是我尊敬的老师，在此对他表示最美好的祝愿。

感谢母校和所有给予我关心和帮助的人，您的关怀会继续鼓舞我在以后的道路上进步。

参考文献

- [1] Ten emerging technologies that will change the world. *Technology Review*. <http://www.techreview.com/articles/emerging0203.asp>. Feb.2003, 106(1), 20-50
- [2] Ram Ramanathan, Jason Redi. A Brief Overview of Ad Hoc Networks: Challenges and Directions. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 5(2): 19-23
- [3] Mark hewish, Litter brother is watching you: unattended ground sensors, *Jane's Int. Defense Review*. 2001, 34(6): 45-51
- [4] Ryan Y. Miyamoto, Tatsuo itoh. Retrodirective arrays for wireless communications. *IEEE Microwave Mag.* 2002, 3(1): 70-80
- [5] Qiao X, Zhang X, Wang C, et al. Application of the wireless sensor networks in agriculture. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2005, 21(SUPPL 2): 230-235
- [6] James D A, Channells J, MadhusudanRao N, et al. An embedded wireless sensor network at 433MHz for agricultural applications. in. Brisbane, Australia: International Society for Optical Engineering, Bellingham WA, WA 98227-0010, United States, vol. 2006,6035
- [7] Zhang W, Kantor G, Singh S. Integrated wireless sensor/actuator networks in an agricultural application. in. Baltimore, MD, United States: Association for Computing Machinery, New York, United States, 2004. 317
- [8] Zhang Z. Investigation of wireless sensor networks for precision agriculture. in. Ottawa, ON, Canada: American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI 49085-9659, United States, 2004. 1155-1168
- [9] Beckwith R, Teibel D, Bowen P. Report from the field: Results from an agricultural wireless sensor network.in. Tampa, FL, United States: IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA 90720-1314, United States, 2004. 470-480
- [10] Wang N, Zhang N, Wang M. Wireless sensors in agriculture and food industry-Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2006, 50(1): 1-15
- [11] 于海斌, 曾鹏等. 智能传感器网络系统. 北京: 科学出版社. 2006:300-325
- [12] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 传感器网络[J]. 软件学报, 2003. 14(7):1280-1295

- [13] 宋希强. 我国温室发展概况. 西南园艺, 2000. 28(4):45-50
- [14] 冯秀芳, 赵婵婵. 无线传感器网络的应用研究. 电脑开发与应用, 2006, 19(7): 30-33
- [15] 滕召胜, 罗隆福. 智能检测系统与数据融合. (第一版). 北京:机械工业出版社, 2002. 65-78
- [16] 彭木根, 王英杰, 王文博. 无线传感器网络体系结构和关键技术研究. 中兴通讯技术, 2005, 11(6):33-40
- [17] Jing B, Zhang J, Zhang Z-L, et al. Research on applications and core technology of distributed wireless sensor networks. Journal of Test and Measurement Technology. 2005, 19(2): 179-186.
- [18] 英春, 史美林. 自组织网络的体系结构. 通信学报, 1999, 20(9): 45-55.
- [19] Bernhard Hurler, Hans-Joachim Hof, Martina Zitterbart. Middleware for a General Architecture for Wireless Sensor Networks: The First Steps[C]. Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW), 2004, 56-60
- [20] Chien-Liang Fok, Gruija-Catalin Romna, Chenyang Lu. Rapid Development and Flexible Deployment of Adaptive Wireless Sensor Network Applications[c]. Proceedings of the 25th IEEE international Conference on Distributed Computing systems (ICDCS), 2005, 60-63
- [21] AGRE J, CLARE L. An integrated architecture for cooperative sensing networks[J]. IEEE Computer Magazine, 2000, 33(5):105-107
- [22] E. Waltz, J. Llinas. Multisensor Data Fusion. Artech House, Norwood, Massachusetts, 1990, 40-45
- [23] Hall D L. Mathematical techniques in multi-sensor data fusion [M]. Artech House, 1992, 1-6
- [24] Wen Chenglin, Zhou Donghua. Multiscale stochastic system modeling and multiscale Recursive Data fusion estimation. Chinese Journal of Electronics, 2002, 11(2):190-200.
- [25] Waltz E., Llinas J.. Multisensor data fusion[M]. London: Artech House, Inc., 1990. 98-101
- [26] Hall D L, Llinas J. An introduction to multi-sensor data fusion[J]. Proc IEEE, 1997, 85(1):1-25.
- [27] White F E. Data fusion lexicon: Data fusion subpanel of the joint directors of laboratories technical panel for C³[R]. San Diego, 1991. 68-71
- [28] 龚元明, 萧德云, 王俊杰. 多传感器数据融合技术(上), 冶金自动化, 2002, (4), 5-9
- [29] 李圣怡, 吴学忠, 范大鹏. 多传感器融合理论及在智能制造系统中的应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1998. 87-96
- [30] D.L. Hall and S. Waligora, "Orbit/altitude estimation with Land sat landmark data," in Proc. GSFC Flight Mechanics/Estimation Theory Symp., Corp., Apr. 1975, 71-73
- [31] Lwaerence A. Klein 著, 戴亚平, 刘征, 郁光辉译. 多传感器数据融合理论及应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2004, 115-130

- [32] Goodman I R Mahler R P S,Nguyen HT. Mathematics of data fusion. Norwell. MA: Kluwer Academic Publishers,1997,63-65
- [33] Bobby S. Rao and Hugh Durrant-Whyte. A decentralized Bayesian algorithm for Identification of tracked targets. IEEE trans. SMC,1993,23(6),13-16
- [34] Pearl J.Probablistic reasoning in intelligent systems: networks of Plausible inference. San Mateo, CA :Morgan Kaufmann Publishers,1988,31-35
- [35] Shalkoff R. Pattern recognition: statistical, structural, and neural approaches. New York, NY: John Wisley,1992,19-24
- [36] 王 军, 苏剑波, 席裕庚. 多传感器集成与融合概述[A]. 中国自动化学会第 15 届青年学术年会[C]. 2000, 34-36
- [37] 邵远, 何发昌, 罗志增 . 多传感器信息融合浅析[J]. 电子学报, 1994, 22 (5) :70-80
- [38] Richardson J M, Marsh K A. Fusion of multi-sensor data [J]. The International Journal of Robotics Re-search,1988,7(6),60-65
- [39] 吕涛, 徐朝农, 徐勇军 探讨传感器网络与 IPv6 的契合点 中国科技论文在线 http://www.edu.cn/HomePage/ke_yan_yu_fa_zhan/downloads/paper/20050808_02.pdf.
- [40] 郑云慧, 张桂林, 吴光焰. 一个基于知识的目标跟踪信息处理系统[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24 (2), 76-80
- [41] Luo R C, Su K L. A review of high-level multi-sensor fusion: approaches and applications[A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Multi-sensor Fusion and Integration for Intelligent Systems[C]. Taipei, Taiwan,1999,114-116
- [42] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军, 等. 不确定性信息数学处理及应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 1999, 80-99
- [43] Gao J B, Harris C J. Some remarks on Kalman filters for the multi-sensor fusion[J]. Information Fusion, 2002,3(3),91-96
- [44] Varshney P K. Multi-sensor data fusion[A]. Electronics &Communication Engineering Journal[C].1997,56-59
- [45] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用. 西安: 西安电子科技大学, 2004. 148-155
- [46] Wu YongGe, Yang JingYu, Liu Ke etc., On The Evidence Inference Theory , Information Sciences, 1996, 89, 240-259
- [47] 段新生, 证据理论与决策、人工智能, 北京, 中国人民大学出版社, 1993.3,13-34
- [48] 罗志增, 蒋静平, 基于 D-S 理论的多信息融合方法及应用[J], 电子学报, 1999, 27(9), 99-103
- [49] YangPanhong, WtiJianning, The Research and Architecture of Agriculture Expert Decision

- System, ICEMI'2003,2,1799-1805
- [50] Wick, Michael R, Expert system explanation in retrospect; a case study in the evolution of expert system explanation, Journal of Systems and Software, Oct.1992,19(2), 159-169, 162-1215
- [51] Araki, Kenji; Ohashi, Katsuhiko; Yamamoto, Ryuichi; Hirose, Yasuyuki; Yamashita, Yoshinori; Yamamoto, Ryuichi; Minagawa, Kazushi; Sakamoto, Norihiro; Yoshihara, Hiroyuki; Medical Markup Language (MML) for xml-based Hospital Information Interchange; Journal of Medical Systems, 24(3), 190-215
- [52] Joseph Giarratano, Gary Riley, Expert Systems Principles and Programming, Third Edition, Ameriana: Thomson Learning Publishing Company, 2002,142-146
- [53] Liebowitz, Jay, Strategies for successful expert system inception, management, and insitutionalization, ISA Transactions, 1992, 31(2), 9-17, 0020-0579
- [54] 周长吉, 现代温室工程, 北京, 化学工业出版社, 2003. 8, 8-31
- [55] 项新建, 基于多传感器数据融合的粮食仓库温度监测系统[J], 仪器仪表学报, 2003.10, 525-528

攻硕期间所取得的研究成果

- [1] 黄小红, 桑楠, 苏芮, 侯炜. 基于神经网络组的数据融合算法. 微计算机信息.
- [2] 教研室传感器网络项目中预警系统的设计与开发.