

多源信息融合的基本理论及其在载人航天任务中的应用

周彬^{1,2} 孙军¹ 孙妍妍¹

(1 北京航天飞行控制中心 2 西安交通大学电信工程学院)

摘要 多源信息融合是一门崭新的系统科学方法,也是目前理论研究的热点之一。首先介绍了多源信息融合的基本理论、应用领域及其理论特点等问题,并就其在工程实际中应用时需要解决的系统模型建立、融合结构选择、基本假设处理等问题进行了探讨和分析,最后给出了多源信息融合理论在载人航天任务中应用的基本思路与建议。

关键词 多源信息融合 载人航天任务 理论 应用

1 引言

多源信息融合是现代信息技术与多学科交叉、综合、延拓而产生的新的系统科学研究方法,由于其在军事和民用领域已经展现出的有效与广阔的理论和应用前景,而备受国内外学者和众多应用领域专家的高度关注。

由于航天任务特别是载人航天任务的特殊复杂性、高度安全性以及显著数据冗余等特点,其中的定轨、定姿、状态监视以及指挥决策等问题都非常适合采用多源信息融合的理论和方法,以提高数据处理的精度和决策判断的准确性。

然而到目前为止,多源信息融合在载人航天任务中的应用还比较少见、很不成熟。本文对该理论的若干应用问题进行探讨和分析,提出该理论在载人航天中的应用思路。

2 多源信息融合理论简介

在不同的研究时期和应用领域,信息融合有着不同的定义与内涵。但是,从信息融合的基本思想、研究内容、理论基础以及应用范围等方面分析,我们可以做如下归纳:所谓信息融合,就是将来自同一被观测对象的多源数据或信息,根据一定的准则或算法加以联合(Association)、相关(Correlation)和组合(Combination)等综合化处理,以获得该对象关于位置、状态、身份、性质等属性的更精确的处理结果或估计判断,为用户提供快速、准确、可靠的决策信息

和评估信息。实际上,信息融合不仅仅是一种理论,更重要的是一种思想和方法。

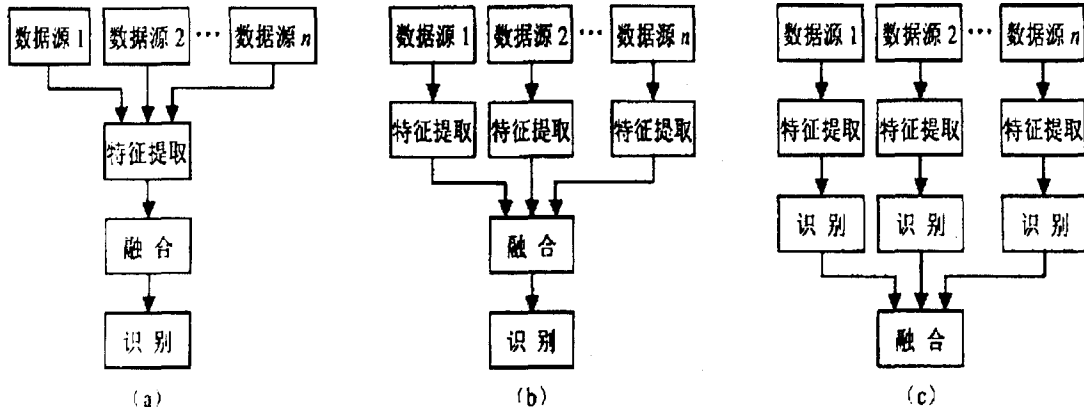
显然,信息融合理论涉及到以下基本要素:各种传感器是信息融合的基础,多源信息是信息融合的加工对象,优化准则和处理方法是信息融合的核心。

从信息源方面来讲,现代传感器技术可以提供丰富的数据或信息,它们可能具有不同的特征:离散的或连续的、实时的或非实时的、时变的或非时变的、精确的或模糊的、确定的或随机的、相互支持的或相互冲突的等。针对不同特征和不同类型的信息,需要采用不同的方法进行融合处理。

优化准则取决于所要解决的问题类型,比如:采用信息融合进行跟踪与定位,一般的准则是要求位置误差最小;信息融合用于目标识别,则要求识别率最高;信息融合用于故障诊断,一般要求诊断准确率最高。

具体的信息融合方法和算法依据应用领域和问题特点千差万别,不一而足。但是,从基本的融合模式或过程来看,普遍为学者们所接受的是所谓3层融合结构,即信息融合可以在问题的数据层、特征层和决策层来解决,见图1所示。

其实,人类的大脑就是一个最高级、最典型的信息融合处理器。它根据人的眼、耳、鼻、舌、身等器官所感知到的关于某个对象的多源信息进行综合处理,从而得出关于该对象的准确识别和判断。因此,信息融合理论的高级阶段就是要模仿甚至代替人脑的信息综合处理功能,这不仅是现代信息处理技术的发展方向,也是仿生学研究和发展的方向之一。



(a)数据层融合 (b)特征层融合 (c)决策层融合

图 1 多源信息融合的三个层次

3 多源信息融合理论解决问题的特点及其应用领域

3.1 多源信息融合理论解决问题的特点

多源信息融合作为一种新的思想、理论和方法，其解决问题的特点可以概括如下：

(1) 信息融合能够应用的前提是必须拥有来自同一被观测对象的冗余数据，这种冗余可以是指多种数据类型，也可以指同一数据类型的多个传感器数据，还可以指同一传感器的多时段数据；

(2) 信息融合的理论基础是利用数据或信息之间的互补性，因此，参与融合的数据或者信息之间必须存在着本质上的内在联系或者相关性，反映的是同一对象某方面的同一种属性；

(3) 信息融合的目的是为了获得关于被观测对象某种属性的更精确的估计，这种“精确”都是基于某种优化准则而言的。同样的问题，优化准则不同，将得出不同的结论。因此，优化准则的选取显得尤为重要；

(4) 信息融合的关键在于融合方法，应该根据不同的问题特点选择适宜的融合结构、模式和算法。

3.2 多源信息融合理论的主要应用领域

近年来，随着计算机技术和网络通信技术的飞速发展，以及二者之间日趋紧密的相互促进，加之军事应用领域的 C⁴I 系统和信息系统的迫切需要，信息融合技术取得了惊人的发展，包括对多种目标的探测、识别、跟踪以及关于战场监视、态势和威胁评估等。同时，信息融合的应用领域不断扩展，从开始诞生的军事领域，逐渐向其它领域渗透，如：智能机器人与智能车辆领域、医学图象处理与诊断、气象预报、地球科学、农业应用领域、现代制造领域和经济商业领域

等等。

4 信息融合理论在工程实际中应用时需要解决的主要问题

作为一种新兴的思想和理论，信息融合有其自身的特点和规律，因而在实际运用时需要解决一些特定的应用问题，才能最大限度地发挥其优势和效能。

基于对信息融合理论的认识，作者认为在工程实际中应用信息融合理论时需要着重解决好下列问题：

- (1) 系统模型的建立
- (2) 融合结构的选择
- (3) 基本假设的处理
- (4) 融合算法的选用
- (5) 计算初值的确定

4.1 系统模型的建立

目前为止，几乎任何一个问题的解决都还依赖于系统的模型，所以系统模型的重要性是不言而喻的。信息融合理论解决问题时要求系统模型是数学可描述的，即系统可以用显式数学解析式予以表达。

系统模型一般可以从以下几个方面来划分：线性的与非线性的；时变的与时不变的；离散的与连续的；随机的与确定的。

目前为止，信息融合理论所对应的主要是线性的、离散的、随机的系统模型，其一般形式为：

$$\begin{cases} \text{运动方程: } x_{k+1} = \Phi_k x_k + \Gamma_k w_k \\ \text{量测方程: } z_k = H_k^{(j)} x_k + v_k^{(j)} \quad j=1,2,\dots,m \end{cases}$$

其中，

$x_k \in R^n$ 为系统的状态向量；

$\Phi_k \in R^{n \times n}$ 为系统的状态转移矩阵；

$\Gamma_k \in R^{m \times m}$ 为系统的过程噪声分布矩阵;
 $w_k \in R^r$ 为系统的过程噪声向量;
 $z^{(j)}_k \in R^m$ 为某个传感器的量测向量;
 $H^{(j)}_k \in R^{m \times n}$ 为某个传感器的量测矩阵;
 $v^{(j)}_k \in R^m$ 为某个传感器的量测噪声向量;
 $j=1,2,\dots,M$ 表示有 M 个传感器(测站)。

当模型中的状态转移矩阵、过程噪声分布矩阵、量测矩阵、过程噪声向量以及量测噪声向量都变成常量时,系统退化为一个时不变系统,所以该模型同时适用于时变和时不变两种情况。

这个模型不仅应用广泛,而且形式上很完美。但是,实际使用时却还有下列问题必须解决:

- (1) 选择系统中的哪些参数作为状态变量的元素,即确定状态向量;
- (2) 根据测量设备的测量参数确定量测变量的元素,即确定量测向量;
- (3) 根据系统的运动规律或者实践经验确定状态转移矩阵以及相应的过程噪声分布矩阵和过程噪声向量的具体形式;
- (4) 根据测量设备的测量参数与状态参数之间的函数关系确定量测矩阵的具体形式,并且根据测量设备的测量精度、测量环境和实践经验确定量测噪声向量的具体形式;

做完上述工作,才能得到对应于一个实际问题的系统模型。另外,如果实际系统是非线性的,一般需要进行线性化。如果实际系统是连续的,需要进行离散化。

4.2 融合结构的选择

在传统的信息融合理论中,有 3 种基本的融合结构:

- (1) 集中式融合结构
- (2) 分布式融合结构
- (3) 混合式融合结构

各种融合结构如图 2、图 3 和图 4 所示。

一般认为(理论上也已经证明)集中式融合的效果是最好的。

由于我们所面对的问题中,在通信信道容量方面是足够的,各个测站把所有数据传到控制中心并不困难,所以一般都可以选择集中式融合结构。

4.3 基本假设的处理

信息融合的每一种算法,无一例外地都做了一些假设。一方面是为了抓住主要矛盾研究共性问题与普遍规律,另一方面也是为了使得出的算法更加

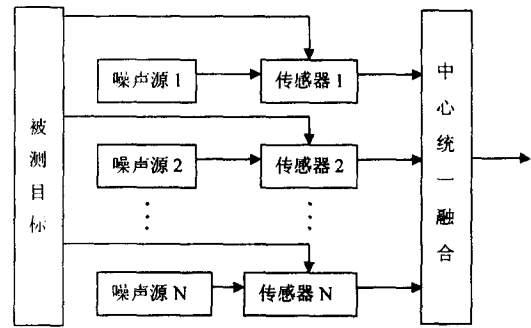


图 2 集中式融合结构图

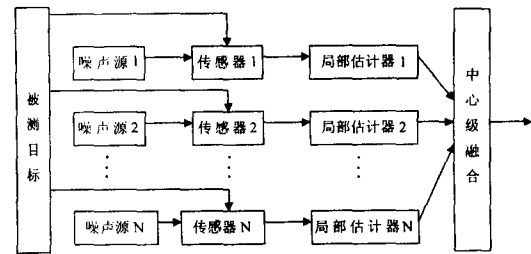


图 3 分布式融合结构图

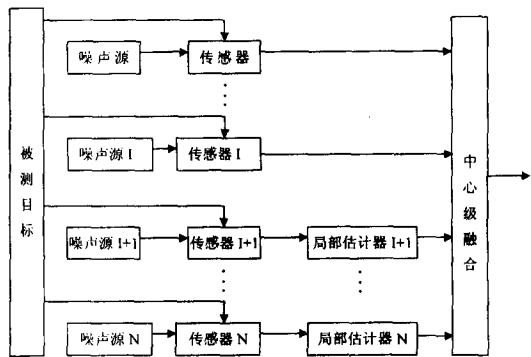


图 4 混合式融合结构图

简洁、通用。然而实际情况往往与这些假设不完全相符。为此,有两种基本的方法:

(1) 根据实际情况和实践经验改造原来的问题描述,使之符合算法的假设条件。

一般要进行一些合理的取舍,忽略一些对结果和精度影响不大的因素,然后应用算法进行试算,看结果是否满意。有时需要进行多轮循环。

(2) 根据具体问题和需要改进算法,使之符合本问题的实际情况。

一般第二种方法比较难,需要一定的理论功底方可完成。但如果具备这种能力,建议采用方法(2)。

4.4 融合算法的选用

具体的融合算法的选用,与上述的系统模型、融合结构、基本假设都有关系。

一般就一个问题的一种情况而言,往往也存在

多个可选的算法。如果这些算法都给出了各自在理论上可以达到的精度(或误差)指标,则选择理论精度最好的一到两个算法试用。否则,就采用各个算法一一试算,比较并选择效果最好的一个。

4.5 计算初值的确定

确定计算初值是应用一个信息融合算法的最后一项准备工作。

有的算法对初值不敏感,但大多数算法对初值都比较敏感,信息融合中的多数算法也不例外。特别是对于迭代型算法,初值对其收敛性以及收敛的速度等都有较大的影响。

确定初值有以下几种基本的方法:

- (1) 直接取第一点数据所对应的状态作为初值。
- (2) 取前几个点数据所对应的状态,然后按照某种方法(例如最小二乘法等)进行平均,以此平均值作为初值。
- (3) 如果数据较多,则可以分段使用算法,以前一段的终值作为后一段的初值。
- (4) 如果有理论值,也可以理论值作为初值。

5 基于多源信息融合的载人航天器飞行控制状态监控

根据信息融合的基本理论以及载人航天飞行控制状态监控的特点,将多源信息融合的基本理论应用到载人航天器状态监控问题之中。本节对这一应用的基本思路和方法进行阐述。

由于载人航天器存在着大量的冗余数据,比如:同一时段多个测站的遥测和外测数据;同一时刻的航天器多个通道(多路)的遥测数据;同一通道的不同区域上的备份数据;不同分系的指向同一特征事件的不同数据(如对于飞船分离,同时存在着数管和 GNC 的相关数据)等等。因此,载人航天器的数据冗余是一个普遍现象,对于这种数据基础上的状态监控问题,非常适合采用多源信息融合的思想和方法。

载人航天器飞行控制状态监控系统,必定是一个多层次、多方面、多方法的系统,因此在其构建和研发中,需要借鉴信息融合的思想,并充分运用各种人工智能的方法。信息融合的理论和方法应用在载人航天器飞行控制状态监控中,主要在以下 3 个层次上发挥作用:

(1) 数据层融合

数据层融合主要解决数据本身存在的问题,包括数据的真实性、稳定性、连续性问题,起到数据预处理

的作用。比如可以通过信息融合来剔除野值、对测量噪声进行滤波以得到参数的更加精确的估计等。

(2) 特征层融合

特征层融合主要利用数据层融合得到的比较准确的数据,解决从参数到特征状态以及由特征状态到特征事件的融合判断问题,包括怎样利用多种不同的数据源来进行特征状态和特征事件的融合判断,怎样利用不同分系统的数据源来进行特征状态和特征事件的融合判断等。特征层融合问题属于决策融合问题。

(3) 决策层融合

决策层融合主要利用特征层融合得到的结果,对航天器的特征状态以及由特征状态从全局的高度上进行综合判断,以得到关于特征状态和特征事件的最终的、权威的结论,并对下一步控制操作提供决策建议。

在不同的层次上,采用不同的数据处理方法和不同的逻辑处理方法,实现对飞行控制状态的不同层次上的把握,在决策层融合各个层次的处理结果以得出最终的飞行控制状态监控结论并对控制操作提供决策建议。

这样一个基于多源信息融合的载人航天器飞行控制状态监控的基本模型可以用图 5 表示。

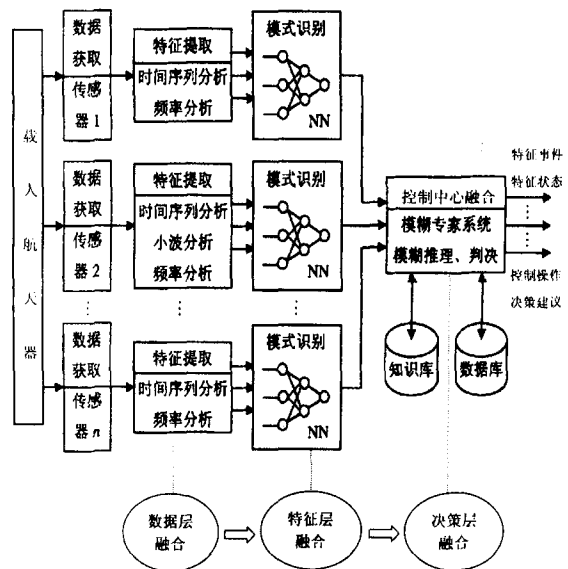


图 5 基于多源信息融合的载人航天飞行控制状态监控模型

6 结束语

多源信息融合是一门崭新的系统科学,其思想、理论和方法都在迅速发展之中。本文仅就该理论日

(下转第 28 页)

间的相对运动要求。

1.5 控制系统实现

对接机构综合试验台采用分布式控制方案（亦称集散型控制），即：

- 各分系统自身的控制与实现由各分系统的控制计算机完成。
- 各分系统通过高速的通信网络(以太网)与中央控制台连接。
- 由中央控制台实现对接试验全过程的集中管理,包括操作控制、状态监视、安全报警、数据处理。
- 回路控制采用实时分布式计算方案。
- 模型采取实时分布式并行计算,包括模型计算单元和运动模拟器伺服控制单元,实时响应要求为 1ms。
- 对接机构作为参与半物理仿真试验的实际产品,对其输入输出信号的测量和控制也是整个系统实时性必须考虑的,实际系统将对接机构的测控计算机也纳入实时分布式并行计算环境。

实时分布式计算环境采用加拿大 OPAL-RT 公

司的 RT-Lab 软件,实时操作系统则采用主流的 QNX,控制器之间的通讯采用高速的 IEEE 1394。整个系统的开发采取快速控制原型技术建立控制对象及控制器模型,并对整个控制系统进行离线、在线试验,以验证控制系统软、硬件方案的可行性。

采用 RTLab 后,控制系统见图 8。

结束语

本文介绍了对接机构综合试验台半物理仿真试验的工作原理与实施方案。该方案采用了快速原型技术和 RT-Lab 实时分布式仿真计算等先进手段,初步研制结果表明这种方法简便可行。 ◇

参考资料

- [1] 姜汉文,曲广吉,刘济生.空间对接机构.航空工业出版社,1992.
- [2] 洪嘉振.计算多体系统动力学.高等教育出版社.
- [3] 张崇峰,肖余之.空间对接过程的仿真研究.航天控制,1998,3.
- [4] 萨莉.对接综合试验台轨迹规划算法研究.
- [5] S Ghofranian,M Schmidt,J McManamen,J Schliesing,T Briscoe. Space Shuttle Docking to Mir Mission. AIAA95-1196-Cp.

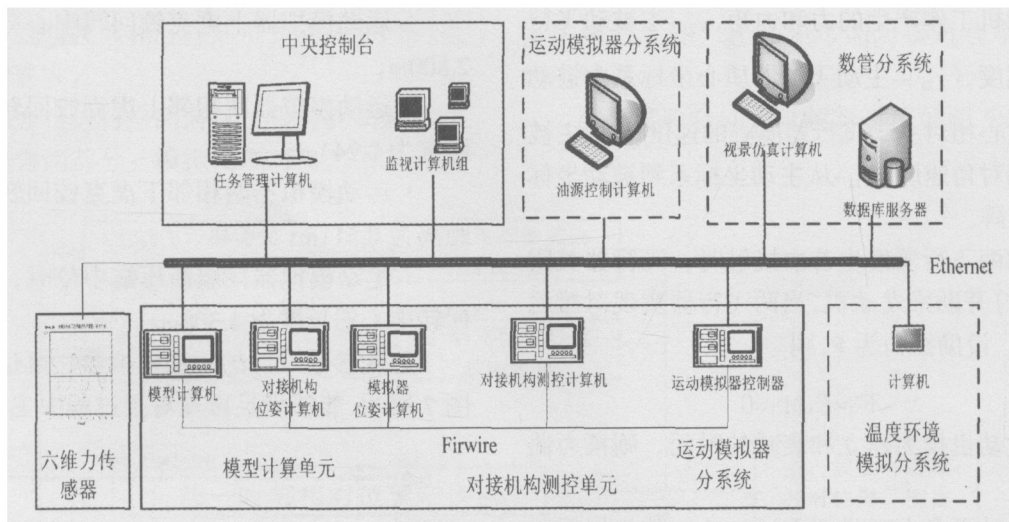


图 8 控制系统示意图

(上接第 47 页)

前发展的状态对其进行了初步的介绍,并根据作者的理解对其应用问题进行了探讨和阐述。

载人航天器是一个典型的复杂大系统,其飞行控制状态监控不可能用一种方法来完成,而必须综合运用多种诊断方法,取长补短,构造一种多理论、多方法融合的飞行控制状态监控框架和结构,才能很好地完成。本文提出的基于多源信息融合的载人

航天器飞行控制状态监控方法,就是一种新的思路,也是一次既有理论价值又有实践意义的探索。 ◇

参考文献

- [1] 韩崇昭等著.多源信息融合.北京:清华大学出版社,2006.3.
- [2] 韩崇昭,朱洪艳.多传感信息融合与自动化.自动化学报,2002.12,28 卷,增刊.