

# 信息融合理论

## 在惯性/天文/GPS 组合导航系统中的应用

The Application of Information Fusion Theory  
in INS/CNS/GPS Integrated Navigation System

肖顺祥 孙建峰 著

国防工业出版社

3 3 1 7 9 8 0 5

V324  
02

# 信息融合理论在惯性/天文/GPS 组合导航系统中的应用

申功勋 孙建峰 著



国防工业出版社

· 北京 ·



C0331204

## 图书在版编目(CIP)数据

信息融合理论在惯性/天文/GPS 组合导航系统中的应用/申功勋,孙建峰著. —北京:国防工业出版社,1998.1

ISBN 7-118-01774-4

I. 信… II. ①申… ②孙… III. 信息理论-应用-航空导航 IV. V 324

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 11129 号

**国防工业出版社** 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 6¼ 156 千字

1998 年 1 月第 1 版 1998 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:14.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

HK49/20

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

## 国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

|           |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|
| 名誉主任委员    | 怀国模 |     |     |
| 主任委员      | 黄 宁 |     |     |
| 副主任委员     | 殷鹤龄 | 高景德 | 陈芳允 |
|           | 曾 铎 |     |     |
| 秘 书 长     | 刘琯德 |     |     |
| 委 员       | 尤子平 | 朱森元 | 朵英贤 |
| (按姓氏笔划为序) | 刘 仁 | 何庆芝 | 何国伟 |
|           | 何新贵 | 宋家树 | 张汝果 |
|           | 范学虹 | 胡万忱 | 柯有安 |
|           | 侯 迁 | 侯正明 | 莫梧生 |
|           | 崔尔杰 |     |     |

# 前 言

本书主要研究导航多传感器信息融合技术及其在远程战略导弹制导系统中的应用问题,以及天文导航与制导系统的关键传感器——星体跟踪器的设计技术。具体内容涉及信息融合理论,分散化滤波技术,故障检测技术,弹道导弹组合制导技术,传感器技术,以及仿真技术。全文以惯性/天文/GPS (INS/CNS/GPS; Inertial Navigation System/Celestial Navigation System/Global Positioning System)组合制导系统为中心,以远程弹道导弹应用为工程应用对象,立足于现有技术 & 国内外导航与制导技术的发展趋势,面向 21 世纪的导航与制导技术,进行了深入的理论与工程系统研究。

全文共分三章。

第一章的内容为:(1)综述了主要的导航信息融合方法,以分散化滤波方法为重点,分析、介绍了现有方法的特点及不足之处;(2)对二级结构的分散化滤波,最优融合方法进行了研究,提出了基于状态空间分类的定制多传感器分散化滤波方法,并推导了非线性连续系统的滤波算法,还给出了线性离散系统的基于测量空间的分散化滤波,最优融合方法,并在理论上证明了这一方法的最优性条件,以及应用方法;(3)提出了基于多信息源融合的可视化融合导航系统方案,论述了该系统的组成、体系结构、综合显示器及系统的主要功能要求。

第二章的内容为:(1)进行了适用于弹道导弹的空间稳定惯性测量基准的误差分析,提出了利用双星体跟踪器进行导航星跟踪来观测平台失调误差角的批处理方法,以及可用于弹道导弹组合制导系统的动态载波相位伪距差分系统方法;(2)讨论了弹道导弹组合制导系统的组合模式,提出了适合于弹道导弹精确制导的

INS/CNS/GPS 组合制导系统方案及双轴平台惯性/天文组合结构模式,对系统配置、误差模型、组合系统的分散化最优融合设计、容错结构方案以及弹道导弹组合制导工作序列等进行了深入研究;(3)对弹道导弹制导系统的工具误差进行了分析,介绍了惯性/天文组合的最佳估计系数方法,根据建立的 INS/CNS/GPS 组合系统分散化滤波、故障隔离算法,进行了数值仿真,对比分析了开环 INS/CNS 最佳估计系数方法同 INS/CNS/GPS 组合的系统性能。

由于国内涉及天文导航及星体跟踪器设计的资料极少,根据作者长期从事这一领域的教学与科研工作,第三章中总结了以下内容:(1)进行了天文导航关键硬件设备——星体跟踪器的总体设计方法的研究,论述了星体可获性、视场与灵敏度、视场与精度之间的相互制约关系;(2)进行了星体跟踪器的系统分析研究,分析了星体跟踪器的工作模式,对比分析了电荷耦合器件(CCD)与电荷注入器件(CID)两类敏感元件的性能,介绍了 CCD 星体跟踪器光学系统的设计方法,还从系统设计的角度给出了大阵列 CCD 星体跟踪器所能达到的性能指标;(3)提供了三种不同类型的得到实用的星体跟踪器。

本书内容涉及当前国内外导航及控制学科方面的最新研究与应用的前沿问题和技术尖端,作者力求在学术思想上新颖,内容上实用,可供从事导航和制导领域的广大科技工作者参考,也可作为导航与控制专业教学参考资料。

由于内容较新及作者水平有限,书中难免存在缺点和不足之处,恳请读者批评指正。

著 者

1997 年 2 月

# 目 录

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 绪 论 .....                             | (1)   |
| 第一章 导航多传感器信息融合方法研究 .....              | (3)   |
| 1.1 导航信息融合方法综述 .....                  | (3)   |
| 1.1.1 前言 .....                        | (3)   |
| 1.1.2 导航多传感器信息融合 .....                | (5)   |
| 1.1.3 分散化滤波 .....                     | (6)   |
| 1.1.4 信息联合滤波 .....                    | (12)  |
| 1.2 组合导航最优估计融合方法 .....                | (16)  |
| 1.2.1 定制多传感器的估计融合方法 .....             | (16)  |
| 1.2.2 线性系统最优估计融合方法 .....              | (22)  |
| 1.3 多信息源融合导航系统 .....                  | (29)  |
| 1.3.1 组合导航融合信息系统组成 .....              | (30)  |
| 1.3.2 组合导航融合信息系统体系结构 .....            | (31)  |
| 第二章 惯性/天文/GPS 组合制导系统研究 .....          | (37)  |
| 2.1 惯性测量基准误差分析 .....                  | (37)  |
| 2.1.1 空间稳定惯性测量基准系统 .....              | (38)  |
| 2.1.2 天文导航系统对惯性基准误差的观测 .....          | (42)  |
| 2.1.3 全球定位系统对惯性测量基准的辅助 .....          | (54)  |
| 2.2 弹道导弹 INS/CNS/GPS 精确制导系统 .....     | (63)  |
| 2.2.1 精确制导技术 .....                    | (63)  |
| 2.2.2 INS/CNS/GPS 组合制导结构方案 .....      | (67)  |
| 2.2.3 INS/CNS/GPS 组合制导信息融合 .....      | (82)  |
| 2.2.4 弹道导弹 INS/CNS/GPS 组合制导工作序列 ..... | (91)  |
| 2.3 弹道导弹精确制导误差分析 .....                | (93)  |
| 2.3.1 INS/CNS 组合制导工具误差分析 .....        | (93)  |
| 2.3.2 INS/CNS/GPS 精确制导系统数值仿真 .....    | (102) |

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 2.3.3 组合制导仿真结果对比及结论 .....             | (123) |
| <b>第三章 天文导航关键设备——星体跟踪器的总体设计</b> ..... | (127) |
| 3.1 星体跟踪器研制概述 .....                   | (127) |
| 3.1.1 星体可获性分析 .....                   | (128) |
| 3.1.2 视场及灵敏度的选择 .....                 | (130) |
| 3.1.3 视场与精度的选择 .....                  | (134) |
| 3.2 星体跟踪器系统分析 .....                   | (135) |
| 3.2.1 星体跟踪器工作模式 .....                 | (135) |
| 3.2.2 敏感元件 CCD、CID 性能分析 .....         | (141) |
| 3.2.3 CCD 星体跟踪器光学系统设计 .....           | (151) |
| 3.2.4 系统技术指标分析 .....                  | (155) |
| 3.3 系统测试及标定 .....                     | (158) |
| 3.3.1 测试设备 .....                      | (158) |
| 3.3.2 稳定度、精度等测试 .....                 | (159) |
| 3.4 三种实用的星体跟踪器 .....                  | (163) |
| 3.4.1 用计算机直接算出在视场中星像坐标的星体跟踪器 .....    | (163) |
| 3.4.2 红外星体跟踪器 .....                   | (173) |
| 3.4.3 一种微机控制的电荷耦合器件(CCD)星体跟踪器 .....   | (180) |
| <b>附录</b> .....                       | (184) |
| <b>参考文献</b> .....                     | (187) |

## 绪 论

自 1942 年德国在 V-2 火箭上第一次应用了惯性制导技术, 1954 年惯性导航系统在飞机上试飞成功, 直至 1958 年“缸鱼”号潜艇依靠惯性导航穿过北极在冰下航行 21 天, 惯性导航、制导系统(简称惯导系统)在舰船、飞机、导弹等的导航、制导中都获得了成功的应用, 从而开创了惯导时代。随着航空航天技术的发展, 对导航与制导系统的性能要求越来越高, 纯惯导系统无法满足工程应用的要求, 组合导航系统已成为当前重要的导航系统实现方案。高精度和高可靠性是组合导航系统的基本衡量指标, 由于惯导系统的位置误差是随工作时间而积累的, 但其在初始条件正确给定的条件下, 短时精度是很高的, 并且可以提供连续实时的全参数(位置、速度、姿态)导航与制导信息, 因而在组合导航与制导系统中, 往往以惯导系统作为主导航系统, 而将其它导航定位误差不随时间积累的导航系统, 如无线电导航、卫星导航、天文导航、地形及景象匹配导航等作为辅助导航系统, 利用卡尔曼滤波(Kalman Filtering)进行组合导航信息处理, 利用辅助信息观测量对组合系统的状态变量进行最优估计, 以获得高精度的导航信息。

组合系统中冗余传感器的配置以及辅助导航系统的存在, 为组合系统提供了故障检测与隔离的硬件基础, 故障检测与隔离算法对组合导航系统进行数据处理, 为系统提供故障状态信息, 构成高可靠的容错组合导航系统。

随着信息融合(Information Fusion)理论的发展, 这一新的交叉学科理论从最初对机器人系统的多传感器集成与融合, 用于处理来自多个不同或相同传感器的信号, 以获得对象的全局长期融合数据, 发展到今天从多信息源的角度出发, 进行更一般的应用对象

的研究,为信息工程的研究提供了新的理论基础与研究思路。从数学的角度看,不同的传感器的测量值组成一个测量子空间,而信息融合则是各测量子空间按照一定的法则向融合信息空间投影。而组合导航系统发展到今天,越来越多的导航传感器被用作为集成系统的局部子传感器,组合导航系统本身便构成了一个信息融合系统。对于存在多子导航系统的组合系统,在进行信息的组合方法研究时,应从信息融合的角度来进行分析。特别是在导航系统中融合了其它辅助信息源(如导航智能决策辅助,地理信息系统,电子地图,实时导航信息图形显示辅助等),利用单纯的组合导航系统设计已不能有效地组织多传感器多信息源,因此在这里我们提出可视化智能融合导航系统的概念系统方案。融合导航系统的理论及工程研究将是今后的研究方向,它要求导航系统除可靠性与高精度之外,还要具有智能辅助与可视化,这应当是第三代融合导航系统的四个追求目标。

# 第一章 导航多传感器信息融合方法研究

## 1.1 导航信息融合方法综述

### 1.1.1 前言

多传感器信息融合处理是人类和生物界信息处理的基本功能。从生物学的角度看,自然界中的生物通过其自身所具有的各种感觉器官来感知其外部生存空间的各种状况,以及环境变化,根据其所收集到的这些信息,进行“综合处理”,而对外部环境作出反应。这里的“综合处理”,便是信息的融合处理。从数学的角度看,不同的传感器的测量值组成一个测量子空间,而信息融合则是各测量子空间按照一定的法则向融合信息空间投影。

为了准确可靠地对运动载体进行预定或既定航迹的导引,导航与制导系统必须为整个系统提供足够精确和可靠的位置、速度和姿态等信息,因而精度与可靠性是衡量一个导航与制导系统的准则。在过去的几十年中,导航与制导系统从单一传感器类型系统发展到了组合导航与制导系统,将多种类型的传感器进行优化配置,性能互补,使得系统的精度和可靠性都有了很大的提高。导航与制导信息的处理方法也由围绕着单个特定传感器所获得的数据集而进行的单一系统信息处理,向多传感器多数据集信息融合的方向发展。特别是随着空间技术的发展,人类航天活动日益频繁,为了保证载人(无人)飞船控制系统运行的可靠性、安全性和精确性,导航与制导系统都采用了冗余技术,具有多套导航测量设备,例如惯性测量单元,星体跟踪器,太阳敏感器,GPS接收机等。它们不仅为系统提供冗余度,而且还能提供及时的故障隔离,系统结构重构功能。随着技术的进步和精度要求的提高,旧的导航传感器需

要被新的传感器所取代。如此众多的传感器构成的导航系统就出现了信息处理、管理和导航(制导)算法等一系列信息融合问题。

尽管信息融合是人类和生物界信息处理的基本功能,但信息融合技术的研究则是始于美国在 70 年代初期对军事 C<sup>3</sup>I(Command, Control, Communication & Information)自动数据融合的研究,当时着重于研究增强计算能力、有效联合数据的方法和改进传感器群的性能。由于融合技术所面对系统的复杂多样性,这一年轻新兴学科,其理论还很不完善,工程应用尚处于极个别的先进系统的研究之中。导航与制导系统的信息融合相对 C<sup>3</sup>I 来说尽管只是一个子集,但其工程应用和理论研究中仍有许多有待进一步深入研究的问题。美国在航天飞机的导航系统中采用了由五个机载计算机组成的冗余系统,处理由塔康(TACON)、微波着陆系统(MIS)、雷达高度表(RA)、惯性测量单元(IMU)、星体跟踪器(ST)等所获得的测量信息,经处理获得位置、速度、姿态等导航与制导信息。目前由于 GPS 已正式投入使用,因而也参与了为航天飞机提供全程导航服务。在这一先进的冗余导航制导系统中,当前的信息处理方式则仍大多采用组合或复合方式,多传感器系统的信息没有得到充分的利用。如何充分有效地进行导航与制导系统多传感器的信息融合是当今导航与制导技术研究的一个重点,许多国际知名学者致力于这一领域的研究,如 Willner D., Speyer, Kerr T. H., Carlson H. A., Bierman 等等,并且发表了大量的这一领域的研究文献。但导航与制导多传感器系统信息融合理论至今还很不完善,尤其结合工程研究。为此,本文在综述已有的导航与制导多传感器信息处理方法的基础上,将针对多传感器系统的信息融合理论在工程中的应用做进一步深入研究。

对于多传感器冗余导航系统,除了给自动控制系统提供可靠精确的导航与制导信息外,由于绝大多数航行是载人航行,面对如此众多的导航传感器所提供的信息,如不进行有效的人机系统设计,将很难使驾驶员充分有效地利用这一冗余多传感器导航系统,做出准确的判断,发出控制指令。为此本文基于信息融合的理论,

提出了‘可视化融合导航’的概念,即对于新一代的导航与制导系统,除可靠性与精确性之外,多信息源融合将成为其设计准则之一。

### 1.1.2 导航多传感器信息融合

在信息融合理论中,军事数据融合系统一般可分三个层次的处理,即:位置和属性的融合估计,敌我态势评估,敌军威胁度分析。而导航与制导多传感器的融合,是属于位置和属性的融合,它是信息融合系统的最底层,是根据系统的物理模型(由状态方程和观测方程描述)和系统模型及传感器的噪声的统计假设,将观测数据映射到状态矢量空间。状态矢量包括一组导航与制导系统的状态变量,如位置、速度、角速度、姿态和各种失调偏差量等等,它们可以用来描述系统的运行状态,精确测定载体的运动行为。多传感器数据融合根据观测数据给出一个关于状态的最优估计量。多个传感器可以具有不同的物理模型。融合的过程对于多传感器导航系统实际上是传感器测量数据的互联与状态矢量估计。来自多传感器的数据首先要进行数据对准,将各传感器的输入数据通过坐标变换和单位变换,转换到同一个公共坐标系中(导航坐标系),将属于同一状态的数据联系起来,根据建立的描述载体的运动规律,系统的状态方程及观测量的物理性质的数学模型,在一定的最优估计准则下,进行最优估计,即使状态矢量与观测达到最佳拟合,获得状态矢量的最佳估计值。

最佳准则有最小二乘、加权最小二乘、最小均方误差、最大似然、Bayesian 准则等,处理方式有最小二乘、加权最小二乘、Bayesian 加权最小二乘及最大似然估计等批处理方法,以及卡尔曼、Alpha-Beta 等序处理估计方法。由此可见,导航与制导多传感器信息融合的最终目的和结果,是以最优估计方法进行系统的状态矢量估计。有关系统状态的估计理论是现代控制理论的重要组成部分,它也是信息融合理论中的最底层位置融合的理论基础。

经典的系统状态估计方法可以分为两大类:一类是针对确定

性系统设计一个观测器来估计系统的状态；另一类则是针对随机系统使用卡尔曼滤波器来获得系统状态的最小方差估计。但是对于阶次较高的系统，特别是多重冗余的多传感器系统等大系统，用经典的估计方法来估计其状态将会遇到计算及数据通信方面的问题，并且有可能出现数值发散。为此，早期进行融合估计系统的设计时，人们曾采用了模型简化、降阶等手段来解决这个问题，但在一定条件下对系统模型简化后得到的状态估计往往是不可靠的，特别是简化系统将使得状态估计精度降低、滤波不稳定甚至发散。因此自 70 年代初以来，分散估计问题越来越为人们所重视。

下面有两点需要说明：

(1) 所谓分散估计就是将一个高阶系统的状态估计问题，分解成若干个子系统的局部状态估计问题，通过设计一组子观测器或局部滤波器以获得各子系统的局部状态估计，并依据一定的准则获得系统的整体状态估计。

(2) 导航与制导多传感器信息融合，就是将各传感器的测量空间所组成的测量子空间，按照其测量数据间的关系进行互联，向局部测量空间投影，形成局部测量空间（最优，次优……），局部测量空间按照一定的准则向导航与制导系统空间投影，形成系统状态的最优估计。

分散估计问题主要有两类：一类是基于 Luenberger 观测器理论的分散化观测问题；另一类是基于卡尔曼滤波理论的分散滤波问题，前者已经研究了多年，这里主要考虑第二类问题。

### 1.1.3 分散化滤波

分散化滤波方法是一类解决分散估计问题的重要算法。到目前为止，分散化滤波应用最多的是导航多传感器信息融合领域。由于分散估计方法的算法结构十分适合于并行运算，因而可以减少单个 CPU 的计算量和计算时间。随着计算机并行处理技术的发展，分散估计方法将使得多传感器信息融合估计理论走向实际工程应用，并有着广泛的应用前景，本节下面的部分着重介绍几种分

散化滤波方法及其应用问题。

这里考虑如下动态系统：

$$x(k+1) = \Phi(k+1, k)x(k) + B(k)u(k) + w(k) \quad (1-1)$$

$$y(k) = H(k)x(k) + v(k) \quad (1-2)$$

式中  $x(k) \in R^n$  —— 系统状态；

$u(k) \in R^r$  —— 输入；

$y(k) \in R^m$  —— 输出；

$\Phi(k+1, k)B(k)$  和  $H(k)$  —— 适当维数的已知矩阵；

$w(k), v(k)$  —— 相互独立的零均值高斯白噪声，方差分别为  $Q(k), R(k)$ 。

为了对系统式(1-1)、式(1-2)进行分散估计，可将其写成如下  $N$  个子系统的形式（不失一般性可先不考虑输入向量）：

$$x_i(k+1) = \Phi_{ii}(k+1, k)x_i(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \Phi_{ij}(k+1, k)x_j(k) + w_i(k) \quad (1-3)$$

$$y_i(k) = H_{ii}(k)x_i(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^N H_{ij}(k)x_j(k) + v_i(k) \quad (1-4)$$

式中  $x_i(k) \in R^{n_i}, y_i(k) \in R^{m_i}$ ；噪声  $w_i(k), v_i(k)$  的方差分别为  $Q_i(k), R_i(k)$ ，在此假设  $Q(k) = \text{diag}\{Q_1(k), Q_2(k), \dots, Q_N(k)\}, R(k) = \text{diag}\{R_1(k), R_2(k), \dots, R_N(k)\}$ 。

对于系统式(1-1)、式(1-2)一般可用卡尔曼滤波器估计其状态，但由于系统式(1-3)、式(1-4)中，对于第  $i$  个子系统来说，由两个和式表示的交联作用包含其它子系统的待估状态，因而不能直接应用卡尔曼滤波器估计其状态。如何处理这些交联的未知作用是获得系统状态估计的关键。下面根据不同情况介绍几种基本的处理方法。

### 一、Surely Locally Unbiased(SLU)的方法

该方法是 Sanders 等人为了估计系统式(1-3)、式(1-4)的状态而提出的一种分散化滤波方法。Sanders 等人讨论了连续系统的状