



组合导航

智能容错与故障检测方法

Intelligent Fault Tolerance
and Detection Method
for Integrated Navigation

高运广 李 锋 马长林 刘志国 著

组合导航智能容错与 故障检测方法

高运广 李 锋 著
马长林 刘志国

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍了组合导航原理、技术与实现方法,结合近些年来智能计算方法的发展,重点讨论了遗传算法、模糊理论、神经网络、支持向量机在组合导航智能容错与故障检测方面的应用问题,其中包含作者的部分研究成果。

全书共分为五章,第1章主要介绍了组合导航的发展、应用以及容错问题,第2章主要介绍了导航系统的常见类型,第3章主要介绍了组合导航系统信息融合及其典型设计,第4章主要介绍了组合导航智能容错滤波及其实现方法,第5章主要介绍了组合导航系统故障检测方法。

本书可作为高等院校导航、控制专业高年级本科生和研究生的参考书籍,也可供相关专业科研与工程技术人员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

组合导航智能容错与故障检测方法/高运广等著. —西安:西安电子科技大学出版社,2019.7

ISBN 978 - 7 - 5606 - 5302 - 0

I. ① 组… II. ① 高… III. ① 组合导航—容错技术 ② 组合导航—故障检测
IV. ① TN967.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 068678 号

策划编辑 刘小莉

责任编辑 张 玮

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西日报社

版 次 2019年7月第1版 2019年7月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 12.5

字 数 292千字

印 数 1~1000册

定 价 32.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 5302 - 0/TN

XDUP 5604001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前言

导航的作用是引导航行载体安全准确地沿着预定航线到达目的地。组合导航是使用两种或两种以上的不同导航系统(设备)对同一导航信息源进行测量,利用不同导航系统性能上的互补特性,从这些测量值的比较值中提取各系统的误差并校正,从而提高整个导航系统性能的技术。

随着科学技术的发展与时代进步,如今的导航对信息量的需求越来越多,对导航精度的要求也越来越高。单靠提高一种导航系统的精度,不仅技术实现难度大,而且在实际应用中效果并不显著,无法满足高精度的导航要求。组合导航技术的出现使得这一问题有了完美的解决方案,在其迅速发展的同时,也取得了令人瞩目的成就。组合导航克服了单个导航系统的不足,取长补短,使组合后的导航精度高于单个系统工作的精度。组合导航的基本原理是利用信息融合技术,通过最优估计、数字滤波等信号处理方法把各种导航系统结合起来,发挥各种系统的优势,达到比任何单一系统更高的导航精度。

在组合导航中,卡尔曼滤波是一种基本的信息融合方法。但是标准的卡尔曼滤波器的应用要求具有系统数学模型和噪声统计特性的先验知识。通常,我们可以得到组合导航的系统和观测模型,但由于系统本身元器件的不稳定性及外部应用环境不确定因素的影响,系统和观测噪声的统计特性难以准确描述,由此可能导致滤波器的发散。因此,常规的卡尔曼滤波器在实际应用中并不能保证其收敛性和稳定性,故障容错性能较差。

为了提高组合导航的容错性能和可靠性,可将智能理论与方法辅助于组合导航信息融合中的故障容错与检测。智能化的状态估计器能够很好地处理系统的不确定性问题。当前,遗传算法、模糊理论、神经网络和支持向量机是智能计算领域中重要的信息处理方法和计算工具,在处理自适应、非线性、故障容错与检测等诸多问题上已展现出特有的技术优势,尤其是在系统难以建模描述或先验知识不足的情况下,这种优势更为突出。如何结合各种智能方法的优点来构造新的混合算法,以应用于高精度、高可靠的组合导航系统中,是智能信息融合与容错方法设计的一种重要的指导思想,并且这种算法混合思想已成为当前算法性能优化的一种有效的途径。

本书在介绍了组合导航原理、技术与实现方法的基础上，结合近年来智能计算方法的研究与发展，重点讨论了遗传算法、模糊理论、神经网络、支持向量机在组合导航智能容错与故障检测方面的应用与设计实现问题，其中包含作者的部分研究成果。全书共分为五章，第1章主要介绍了组合导航的发展、应用以及容错问题；第2章主要介绍了导航系统的常见类型；第3章主要介绍了组合导航系统信息融合及其典型设计；第4章主要介绍了组合导航智能容错滤波及其实现方法，包括利用遗传算法优化模糊推理系统和神经网络及其两者在滤波容错中的具体应用问题；第5章主要介绍了组合导航系统故障检测方法，包括子系统和系统级故障检测问题。

由于组合导航涉及多门学科前沿，其理论、方法与技术仍在不断发展和更新中，加之作者研究水平、查阅资料范围和撰写功底有限，书中不足之处在所难免，敬请同行和读者不吝指正。

作者
2019.2

目录

MULU

第 1 章 绪论	1
1.1 导航概述	1
1.2 组合导航及其应用发展	3
1.2.1 组合导航与最优估计	3
1.2.2 组合导航的应用与发展	6
1.3 组合导航与故障容错	8
参考文献	10
第 2 章 导航系统	15
2.1 惯性导航系统	15
2.2 卫星导航系统	18
2.2.1 GPS 导航系统	19
2.2.2 GLONASS 导航系统	24
2.2.3 北斗导航系统	25
2.2.4 伽利略导航系统	26
2.3 陆基无线电导航系统	26
2.4 天文导航系统	29
2.5 其它导航系统	31
2.6 组合导航系统	34
参考文献	35
第 3 章 组合导航信息融合方法	37
3.1 滤波理论与方法	39
3.2 集中与分散卡尔曼滤波	45
3.3 联邦滤波	47
3.3.1 联邦滤波基本原理	47
3.3.2 联邦滤波常见结构	49
3.3.3 联邦滤波性能分析	53

3.4 典型组合系统与容错设计	54
3.4.1 卫星导航对惯导辅助	55
3.4.2 天文导航对惯导辅助	57
3.4.3 信息融合方案	58
3.4.4 系统容错设计	59
3.5 导航数据预处理	60
3.5.1 野值处理	61
3.5.2 组合导航信息同步	61
3.6 组合导航系统误差模型	65
3.6.1 SINS 基本工作原理	65
3.6.2 卫星定位基本原理	76
3.6.3 卫星导航误差模型	81
3.6.4 天文导航误差模型	82
参考文献	85
第4章 智能容错滤波算法与仿真	86
4.1 遗传算法	86
4.1.1 遗传算法概述	87
4.1.2 遗传算法基本理论	95
4.1.3 遗传算法收敛性分析	99
4.1.4 遗传算法性能分析及其改进	103
4.2 模糊理论	121
4.2.1 模糊理论基础	122
4.2.2 模糊推理规则	128
4.2.3 模糊推理系统的分类与组成	131
4.2.4 遗传模糊自适应滤波算法	135
4.3 神经网络	143
4.3.1 神经网络概述	143
4.3.2 前向型神经网络	144
4.3.3 RBF 神经网络	150
4.4 遗传 RBF 神经网络自适应滤波算法	153
4.4.1 遗传 RBF 神经网络自适应滤波设计	154
4.4.2 遗传 RBF 神经网络自适应滤波算法仿真	155
4.5 系统级智能联邦滤波容错算法	158
4.5.1 智能 SINS/GNSS/CNS 联合滤波设计	158
4.5.2 信息分配因子智能选择控制器	159
参考文献	161

第 5 章 组合导航故障检测方法 164

5.1 子系统故障检测 164

5.1.1 基于 KPCA 的 SINS 传感器故障诊断 164

5.1.2 基于 RAIM 的 GNSS 故障诊断 170

5.2 系统级故障检测 175

5.2.1 状态 χ^2 检验法 175

5.2.2 残差 χ^2 检验法 177

5.3 统计学习理论与支持向量机 178

5.3.1 统计学习理论 178

5.3.2 支持向量机原理 180

5.3.3 最小二乘支持向量机 183

5.4 基于 LS-SVM 的故障检测方法 185

5.4.1 LS-SVM 残差 χ^2 检验法 185

5.4.2 算法仿真 187

参考文献 189

第1章 绪 论

1.1 导航概述

导航的基本作用是引导航行载体安全准确地沿着预定航线到达目的地。从古代开始,人们就逐渐学会了利用天上的星座进行导航,特别是利用北极星来确定方向。考古发现,我们的祖先早在 17 000 年以前的旧石器时代就发明了导航方法,当时为了进行狩猎等活动,人们利用了简单的恒星导航方法,这就是早期的天文导航方法。北宋宣和元年(1119 年)朱彧所著的《萍洲可谈》一书中记载有“舟师识地理,夜则观星,昼则观日,阴晦则观指南针”,就是说当时的航海家用地文航海术、天文航海术(白天测太阳,夜晚测星体),在阴天见不到太阳时用磁罗经进行定向导航。从有文字记载的历史中可以看出,我国是最早综合应用各种航海术(天文、地文和仪表等导航术)的国度之一^[1]。

导航系统是能够向航行体的操纵者或控制系统提供航行体的位置、速度、航向等即时运动状态的装置或设备。其工作过程本身是从含有误差的测量数据中获取航行体有用运动信息的过程。20 世纪初,为了完成潜水艇北极航行计划(磁罗经在潜水艇内因地磁力线被潜水艇铁壳所屏蔽不能工作),德国人安休茨研制成功了世界上陀螺家族中的第一台精密(惯性级)陀螺仪器——航海陀螺罗经。之后,经过半个世纪的发展,陀螺仪表中的最高水平代表——航海惯性导航系统在美国麻省理工学院德雷珀实验室诞生。1958 年配备 N6A 型惯导的潜艇首次水(冰)下航行通过北极。无线电导航于 20 世纪 30 年代在第二次世界大战期间问世。最早的无线电导航设备是技术最简单的无线电测向仪,雷达则是第二次世界大战期间为了军用目的由英国发明的。半个多世纪以来无线电导航技术有着迅速的发展。低频中远程脉冲相位双曲线系统罗兰-C(LORAN-C)、甚低频超远程双曲线导航系统奥米伽(Omega)相继研制成功。卫星导航的第一代产品是 1965 年的子午仪(Transit),它使导航系统进入了宇宙空间。全球全天候自动精确三维定位导航的全球定位导航系统(GPS, Global Position System)的研制成功是导航技术上的一次革命。大到舰船、飞机,小到汽车甚至单兵作战也用上了全球定位系统。

随着科学技术的发展,导航逐渐发展成为一门专门研究导航原理方法和导航技术装置的学科。在舰船、飞机、导弹、宇宙飞行器、自动驾驶车辆等航行体上,导航系统是必不可少的重要设备。按照近代科技术语,导航的主要工作就是定位、定向、授时和测速。导航需要连续提供此类信息,运动越快,更新越快,但精度要求不高。相比而言,精密定位则是导航的一个极端情况:虽然也需要定位和定向,但并不要求实时性,而对精度要求很高。由于能够测得上述导航参数、完成导航任务的物理原理和技术方法很多,因此,随后便出现了各种类型的导航系统,如惯性导航系统(INS, Inertial Navigation System)、无线电导航系

统(Radio Navigation System)、卫星导航系统(Satellite Navigation System)、天文导航系统(CNS, Celestial Navigation System)等。这些导航系统都有各自的优点和特色,但也有其固有的不足之处。

惯性导航的优点是自主性和隐蔽性好,能够连续提供姿态、位置等多种导航信息,频带宽,抗干扰性好,但其误差随时间积累,必须不断加以校正,且系统造价较高。

无线电定位信息连续,长期稳定,精度高,但是受区域、时间和气候影响较大,其庞大的岸台也易被干扰和摧毁。

卫星导航定位和测速精度高,且基本不受地域、时间限制,但导航的精度和可靠性与载体的动力学和信号的通视性有关,且抗干扰能力差,信息的更新率低,难以满足高动态和某些场合实时控制的需要。

天文导航系统通过观测天体的位置和亮度来确定载体的导航参数,其优点是可以实现完全自主性,特别适合于高空远程飞行和星际航行,其导航精度不随时间而变化。但它受天气及载体姿态的影响较大,并且如果载体在大气层内飞行,则其昼夜导航能力差别很大。随着半导体微电子技术的发展,电荷耦合器件(CCD, Charge Coupled Device)和电荷注入器件(CID, Charge Injection Device)星体跟踪器使得天文星光导航与制导技术得到快速发展,并在远程武器系统中得到应用。

以数字地图为基础的地形或景象匹配辅助导航自主性强,精度高,成本低,不依赖于外部设备,且难以被发现和干扰。它虽然无法独立提供任何导航信息,但可以作为其它导航系统的辅助与补充。例如,在低高度、丘陵、山区等复杂地形条件下,卫星定位由于遮蔽而精度明显降低时,地形或景象参考导航系统正处于最佳状态,不足之处是需要有大容量的数字地图数据库,且景象匹配时昼夜导航能力差别较大。

鉴于每种导航系统的优势和不足,且随着科技的进步和导航要求的提高,单一的导航系统越来越难以满足现代化导航的需要,解决的有效途径之一就是将这些单一的导航设备组合起来,构成一个有机的整体,形成组合导航系统,以此实现高精度、高可靠性、全球、全天候和水上/水下连续定位的导航。

经过近百年来和技术发展,不仅惯性导航、无线电导航技术呈现出争奇斗艳的局面,其它导航技术及其设备也得到了深度发展和应用,比如水声导航、气象导航等。它们为组合导航提供了多信息源的基础。

随着电子计算机技术特别是微机技术的迅猛发展和现代控制系统理论的进步,从 20 世纪 70 年代开始组合导航技术得到了迅猛发展。过去单独使用的各种导航设备,通过微型电子计算机有机地组合到一起,发挥各自特点、扬长避短,加之使用卡尔曼滤波(KF, Kalman Filter)技术等数据处理方法,使系统导航能力、精度、可靠性和自动化程度大为提高,成为目前导航技术发展的重要方向之一。我国于 20 世纪 70 年代末、80 年代初开始研究组合导航技术,目前已有成熟可靠的技术应用于各种类型的军用与民用设备中。

总之,组合导航系统是组合不同特点的导航方法与导航设备,应用计算机技术对多种导航信息进行综合处理,以提高系统性能的导航系统。它是一种综合工程技术,涉及各导航信息源的多种设备的相关技术、计算机技术、显示技术以及控制系统、数据处理等理论,并将这些内容有机组织起来作为一门学科来加以研究。

1.2 组合导航及其应用发展

1.2.1 组合导航与最优估计

组合导航技术是指使用两种或两种以上的不同导航系统或设备对同一信息源进行测量,利用不同导航设备性能上的互补特性,从这些测量值的比较值中提取各系统的误差并校正之,以提高整个导航系统性能的方法和手段。采用组合导航的导航设备或系统称为组合导航系统。参与组合的各导航系统或装置称为组合导航的子系统。组合导航系统综合两个或两个以上不同类型的导航传感器信息,使它们优势互补,以获得比单独使用任一系统时更高的导航性能,由此满足各类用户的多种需要。

组合导航系统通常具有以下功能:

(1) 协同超越功能。组合导航系统能充分利用各子系统的导航信息,形成单个子系统不具备的功能和精度。

(2) 互补功能。组合导航系统综合利用了各子系统的信息和特点,各子系统能取长补短,扩大了使用范围,提高了精度。

(3) 余度功能。各子系统感测同一信息源,使测量值冗余,提高了整个系统的可靠性。

最早出现的组合导航系统是惯导系统与多普勒(Doppler)雷达的组合。它用惯导系统的高精度姿态信息稳定多普勒雷达的天线,以提高其测速精度,而用多普勒雷达长期精度较高的速度信息对惯导进行阻尼,以提高整个组合系统的导航精度;与此同时,利用多普勒雷达速度信息提供的初始条件,对惯导实施空中对准。多普勒导航雷达与GPS的组合系统在20世纪海湾战争中也受到实战的检验,证明了它是一种适应性强、造价低、精度高的自主式导航系统。20世纪70年代,出现了惯导与奥米伽的组合,它解决了潜艇的水下导航问题。随后出现了GPS与罗兰-C的组合,这种组合不仅提高了导航精度,而且大大提高了可用性。

组合导航系统从设备类型上可分为无线电导航系统间的组合(如罗兰-C/多普勒组合、罗兰-C/GPS组合、GPS/多普勒组合等)、惯性导航系统(INS)与无线电导航系统之间的组合(如INS/GPS组合、INS/多普勒组合、INS/罗兰-C组合、惯性/伏尔(VOR)/测距器(OME)组合等)、惯性导航与数据库参考导航系统之间的组合(如地形辅助导航、磁数据辅助导航、重力数据辅助导航)等。从参与组合的子系统数目来看,组合导航系统可分为两种导航设备构成的组合系统和两种以上导航设备构成的组合系统。通常,把多于两种导航设备构成的组合导航系统叫做多传感器组合导航系统。

以惯导为基础,将多种导航系统传感器综合起来,取长补短,可形成惯导/多传感器组合导航系统。这一系统将惯导的自主性好、抗干扰性强、可靠性高、可连续导航、固有的高带宽、低噪声和短时间高精度等优点,与卫星定位导航的误差与时间无关、长期的适中精度、全球或局部共享等优点,地形或景象匹配导航系统成本低和抗干扰性强等优良特性以及天文星光导航系统的自主性和全球性等优点结合了起来,克服了惯导误差随时间积累、需要外部初始化等缺点,弥补了卫星定位导航依赖外部信息、易受无线电干扰、定位精度与环境载体动力学有关、不能直接提供载体的加速度和姿态、数据输出率低等不足,以

及地形或景象匹配导航具有区域性和天文导航易受载体姿态、气候变化影响等不足。该组合系统可望构成具有高度自主能力、高精度、高可靠性、强容错的智能实时连续导航系统。

总的来看,基于惯导的组合系统的优点可归纳为以下几个方面:

(1) 能有效地利用各子系统的导航信息,互相补充,使系统定位精度大大提高,并且能够抑制惯导系统的误差振荡和误差增长的趋势。

(2) 可利用故障检测及识别技术,在一个子系统失效时,利用冗余导航信息使系统的工作模式进行自动切换,进一步提高系统的可靠性。

(3) 可实现对各子系统及其传感器的校准,从而放宽对子系统器件指标的要求,实现用低成本的子系统及器件构成高精度的组合导航系统。

(4) 允许惯性导航系统进行动态初始对准与调整,缩短地面准备时间,提高快速反应能力,减小惯导系统的累积误差。

目前,最受关注的是惯导与全球导航卫星系统的组合,因为两者不仅都是全球、全天候、全时间的导航设备,而且都能提供十分完善的导航数据,两者优势互补,使惯导/卫星组合导航的应用越来越广泛。

如果从物理组成来看,组合导航是一个典型的多传感器测量系统。在多传感器系统中直接采用外部测量值以确定方式修正导航变量,由于外部测量值本身包含严重的随机误差,导航系统误差主要由随机的、时变的导航传感器误差引起,存在诸多问题,甚至会引起严重的误差,因此,直接采用外部测量值以确定方式修正导航变量不能满足航行体的要求。而组合导航系统要在有限的动力学知识、初始条件存在不确定的情况下,从含有测量噪声和误差的多传感器测量数据中为航行体提供“最优”的位置、速度等运动状态估计。这也表明组合导航处理器必须采用合适的数据处理方法对含有误差的多导航子系统或传感器测量数据进行处理,在载体动力学行为和传感器测量信息之间进行合理的加权处理和折中,使估计状态和真实状态之间的误差最小。

从数据处理方式来看,滤波是从测量或接收到的各种带有干扰的信号中提取有用信号的方法和技术。估计是从带有随机误差的观测数据中较精确地确定系统的某些参数或某些状态变量的真实值及其变化过程的方法和技术。一个最优估计(滤波)算法,是利用关于系统和测量动力学的知识、假设的系统噪声和测量误差的统计特性以及初始条件信息,对被噪声污染的测量值进行数据处理(滤波),以得到实时的关于系统状态的最小误差估计,即获取对状态的无偏、误差方差最小的一致性估计。因此,组合导航是一个典型的最优估计或最优滤波问题。

实现组合导航的基本方法有两种:回路反馈法(经典法)和最优估计法^[2]。回路反馈法采用经典的回路控制方法(利用自动调节原理的环节校正法),可以抑制系统误差,并使各子系统间实现性能互补。最优估计法是利用最优滤波和估计技术将两种不同传感器的测量信息或将两种不同导航系统的导航信息综合在一起,进行状态估计和校正的最优控制法。采用古典法设计的组合导航系统,由于通常未考虑导航信息传感器的随机误差,因而组合导航的性能并不理想。而采用最优滤波和估计技术设计的组合导航系统,能系统地使用外部测量值和导航系统所提供的结果,能实时反映和调整误差模型中的参数,使模型参数逐渐接近真实情况,并实时地求得导航系统误差状态的最优估计值,从而根据这些误差的最优估计值进行校正,使导航误差最小,能获得比直接采用外部测量值以确定方式修正导航

变量更好的性能。同时,使用滤波器可改善导航系统设计和工作的灵活性,导航系统结构的改变可通过程序的改变来实现。为了与古典法设计的组合导航相区别,通常称采用滤波和信息融合估计技术的组合导航系统为最优组合导航系统。在最优组合导航系统中,卡尔曼滤波技术是目前最为常用和成熟的信息融合技术。

图 1.1 所示是惯性组合导航系统的原理示意图。它利用惯导产生的导航输出与其它导航系统的输出相比较,得出差值。根据惯导的误差模型,卡尔曼滤波器可由这种差值估算出惯导的主要误差因素的大小,从而对惯导进行校正,提高惯导的输出精度。

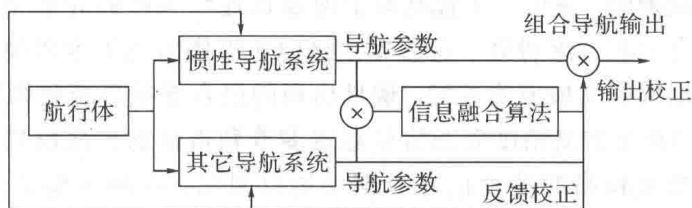


图 1.1 惯性组合导航系统原理示意图

卡尔曼滤波算法通常可分为两类。第一类是用一个集中的卡尔曼滤波器处理全部的测量信息,其优点是信息丢失量最少,缺点是滤波器的阶次较高,计算量大,容错性差。第二类方法是每两种导航系统先用一个子滤波器来处理各传感器的测量信息以产生局部的状态最优估计,然后各局部的状态信息传递给融合中心,以产生一个全局的状态估计。这种方法的融合中心的计算量相对减少,但是由于各局部的状态估计是局部最优解,因此在融合中心需考虑各局部状态估计解的相关性。若不知道局部状态量的协方差,则需根据历史数据进行精确估计。Carlson 等人对这种分散式的处理方法进行了重大改进,推出了联合卡尔曼滤波算法,并已被美国空军定为下一代标准的滤波器结构。

近年来,随着计算机技术、传感器技术和现代控制理论的发展,组合导航系统的信息融合技术在不断进步。目前已有不少研究工作将包括神经网络、模糊逻辑、专家系统、遗传算法在内的人工智能方法与卡尔曼滤波相结合作为最终的信息融合方式。文献[3]提出了一种用于多目标跟踪的神经网络自适应卡尔曼结构;文献[4]提出了一种用于 INS 和 GPS 数据融合的模糊自适应卡尔曼滤波方法;文献[5]提出了一种模糊逻辑与卡尔曼滤波的混合结构,并应用于多传感器数据融合;文献[6]利用专家系统根据机动情况对“贝尔-206”直升机组导航中的卡尔曼滤波器进行自动调节;文献[7]利用模糊逻辑来消除和抑制机器人导航中扩展卡尔曼滤波的噪声时变与干扰带来的问题;文献[8]将神经网络辅助于弹道导弹 SINS/CNS 组合导航的卡尔曼滤波器设计,以更好地补偿由初始姿态误差引起的速度、位置误差;文献[9]提出了一种基于模糊逻辑的卡尔曼滤波方法,以此实现机器视觉、激光雷达、惯性测量单元以及速度传感器多种数据源之间的信息融合;文献[10]对包括模糊、神经网络以及模糊神经自适应信息融合算法进行了分析研究;文献[11]提出了一种 BP 神经网络辅助的联邦滤波方案,实现了 SINS/GPS/TAN/SAR 组合导航系统的信息智能融合与容错;文献[12]提出了一种自适应线性神经网络与卡尔曼滤波组方法,并应用于 INS/GPS 组合导航系统;文献[13]将模糊逻辑应用于 NGIMU/GPS 系统组合导航中的信息融合;文献[14]提出了一种基于 RBF 神经网络预测的 GPS/SINS 组合导航系统算法,以用于 GPS 失锁时导航参数的预测;文献[15]将基于模糊神经网络的信息融合方法用于解决管道

机器人的导航问题;等等。

由于智能方法通常在先验知识较少的情况下,能提供实时、自适应、收敛性及鲁棒性较好的决策估计,因此基于智能方法的信息融合技术在相关的应用中均取得了一些不错的效果。同其它应用领域一样,基于智能技术的融合方法必将成为组合导航信息融合研究领域的一个发展方向。

1.2.2 组合导航的应用与发展

第二次世界大战期间,英国为了提高海上巡逻机连续飞行的导航精度,率先进行了采用回路反馈法的组合导航系统研究。直至 20 世纪 60 年代出现了卡尔曼滤波技术,才使组合导航系统向更深层次的发展成为可能。最早出现的组合导航系统是惯导系统与多普勒雷达的组合。它用惯导系统的高精度姿态信息稳定多普勒雷达的天线以提高其测速精度,而用多普勒雷达长期精度较高的速度信息对惯导进行阻尼,以提高整个组合系统的导航精度;同时,利用多普勒雷达速度信息提供的初始条件,对惯导实施空中对准。多普勒导航雷达与 GPS 的组合系统在海湾战争中也得到了实战的检验,证明了它是一种适应性强、造价低、精度高的自主式导航系统。20 世纪 70 年代,出现了惯导与奥米伽的组合,它解决了潜艇的水下导航问题。随后出现了 GPS 与罗兰-C 的组合,这种组合不仅提高了导航精度,而且大大提高了可用性。目前,备受世界关注的是惯导与全球导航卫星系统(GNSS, Global Navigation Satellite System)的组合,这不仅是因为两者都是全球、全天候、全时间的导航设备,而且它们都能提供十分完善的导航数据。两者优势互补,使 INS/GNSS 组合导航的应用越来越广泛。

现代战争对制导系统的准确性和可靠性提出了越来越高的要求,促使导航与制导系统向高精度、综合化、容错化和智能化发展。随着科学技术的发展和飞行器对导航与制导系统要求的提高,飞行器将装备多种导航传感器和设备,使飞行器导航与制导体制从单一传感器类型发展到多传感器组合导航与制导。信息的处理方法也由围绕单个特定传感器所获得的数据集而进行的单一信息处理,向着多传感器多数据的信息融合方向发展。

目前和未来一段时间内,可供飞行器使用的导航系统有惯性导航系统(INS),特别是新型的捷联惯性导航系统(SINS, Strapdown Inertial Navigation System)、天文导航设备(CNS)、全球导航卫星系统(GNSS),包括美国的 GPS 系统、俄罗斯的 Glonass 系统(GLONASS, GLObal NAVigation Satellite System)、欧洲的 Galileo 系统和我国的北斗卫星导航系统(BDS, BeiDou navigation satellite System)、地形或景象匹配导航系统以及其它无线电导航系统等,这些导航系统都有各自的优点和特色,但也有其固有的不足之处。比如,INS 的优点是自主性和隐蔽性好,能连续提供多种较高精度的导航参数,频带宽,抗干扰性好,但其误差会随时间积累;GNSS 的定位和测速精度高,且基本不受地域、时间限制,但导航的精度和可靠性与载体的动力学和信号的通视性有关,且抗干扰能力差,信息的更新率低,难以满足高动态和某些场合的实时控制要求,目前 GNSS 还不能作为单独的导航设备使用,只能作为 INS 的有效补充的导航手段;以数字地图为基础的地形或景象匹配辅助导航是一种自主式、高精度的导航设备,它虽无法独立提供任何导航信息,但可以构成对 INS/卫星定位组合导航和制导的有效补充——在低高度、丘陵、山区等复杂地形条件下,卫星定位由于遮蔽其精度明显降低时,地形或景象参考导航系统正处于最佳状态,

而且地形或景象匹配导航系统成本低,不依赖任何外部设备,很难被发现和被干扰,但它必须有大容量的数字地图数据库,且景象匹配时昼夜导航能力差别很大;天文导航系统通过观测天体的位置和亮度来确定载体的导航参数,其优点是可以实现完全自主性,特别适合于高空远程飞行和星际航行,其导航精度不随时间而变化,但它受天气及载体姿态的影响较大。如果将这些传感器综合起来,取长补短,形成 INS/多传感器组合导航与制导系统,那么该系统能够融合 INS 的自主性好、抗干扰性强、可靠性高、可连续导航、卫星导航的误差与时间无关、长期高精度、全球或局部共享、地形或景象匹配导航的抗干扰性强、天文星光导航的自主性和全球性等优点,克服 INS 误差随时间积累、需要外部初始化、卫星导航易受无线电干扰、不能直接提供载体的加速度和姿态、数据输出率低、地形或景象匹配导航具有区域性限制以及天文导航易受载体姿态和气候变化影响等不足。

研究如何将这些导航技术和信息有机地综合起来,尽可能多地利用冗余测量信息,进行信息融合、互补、修正和动态补偿,从而获得一种高精度、同时可靠性和鲁棒性又好的组合制导系统,是 INS/多传感器组合导航和制导系统研究的重点和关键。

以目前发展和应用情况来看,组合导航系统的发展方向是多传感器智能化容错组合导航系统和导航专家系统。这些系统具有多传感器协调管理、信息共享和综合利用,故障检测、诊断、隔离和重构(FDIR, Fault Detection, Isolation and Recovery)的功能。基于 INS 基准系统的多传感器组合精确制导技术,是美国正在发展的第四代中/远距精确制导武器,尤其是第四代精确制导炸弹和巡航导弹普遍采用的一项关键技术。在最近几场局部战争中,美国把 SINS/GPS/TAN 组合制导系统应用于导弹武器系统,使其联合直接攻击弹药(JDAM)、联合防区外武器(JSOW)、防区外对地攻击武器(SLAM)、常规巡航导弹(CALCM)、高速反辐射导弹(HARM)等具有很高的命中精度和良好的性能,取得了引人注目的战绩。基于信息融合技术的 INS/多传感器组合导航与制导系统也逐步被应用在飞机、航天器、深空探测器等多种应用场合。

近年来,为了进一步降低 INS 的成本,减小其体积,微机电系统(MEMS)惯性器件迅速发展起来。利用由微型固体惯性器件制作的多个陀螺和加速度计可构成微型惯性测量单元(MIMU)或 MEMS INS。新型的 MEMS INS 具有成本低、体积小、质量轻、功耗小、寿命长、可靠性高和环境适应能力强等优点,是惯性导航技术今后的主要发展方向。但目前 MIMU 和 MEMS INS 的精度还不能满足长航时高精度导航系统的指标要求,而且由于 INS 在本质上是利用航位推算原理,积分运算的累积误差是不可避免的,因此,在不断追求高精度和高性能导航定位的应用领域,其应用仍需要采用与其它系统进行组合的导航方式。利用 MIMU 与 GNSS 接收机进行组合,是目前 MIMU 的主要应用方式。两者组合可以提供灵巧、廉价、精确的导航、定位服务,是目前最先进的全天候、自主式组合导航技术,有着广泛的应用前景。因此,低成本的 MIMU/GNSS 组合系统已成为国内外导航界研究的热点之一。美国、以色列、日本等国对基于 MEMS 的低成本惯性组合导航系统进行了大量研究,目前已经处于实用阶段。

综上所述,随着科学技术的不断进步以及军事战略和战术的变化,导航系统及其相关技术也在发生着日新月异的变化。以惯性导航、卫星导航、组合导航、地形辅助导航及各种定位报告和通信系统(如联合战术信息分布系统 JTIDS、定位报告系统 PLRS)等为代表的新型系统把导航定位技术推到了一个新的水平,它不仅能改善航行保障功能,而且在适应

新的战争环境条件下还支持各种战术操作的要求。卫星导航覆盖全球,精度高,但抗干扰能力不强。惯性导航不受干扰,还能用于水下,但误差随时间而积累。把两者组合起来,一方面具有较高的导航精度,另一方面又明显地提高了抗干扰能力。地形信息与惯导相组合,能形成一种自主式的精度较高与抗干扰能力很强的系统。如果进一步将地形辅助、惯性导航、卫星定位和其它定位通信系统组合起来,整个系统功能还会更强。2006年公布的美国《发展中的科学技术清单》和《军事关键技术清单》强调指出,具有下述特征的集成惯性导航系统将在未来几年内显著增强军事能力:

(1) 集成或嵌入了任何一种或多种导航/通信/光学信源(多普勒(声呐、激光或雷达)、罗兰、大气数据(Air Data)、GNSS或DBRN(声学、恒星、重力和磁场数据库或二维数字地形地图和其它地质填图数据)、JTIDS、增强型PLRS及光电成像),定位精度优于1 m(CEP)。

(2) GNSS丢失后,在长达4 min内具有优于10 m(CEP)的定位精度,或优于0.1 n mile/h的导航漂移率,或优于0.1 m/s的速度精度,或优于 $0.5' \times \tan L$ 的方位精度。

(3) 能以60 000 ft(1 ft=0.3048 m)以上高度和1000 kn(1 kn=1 n mile/h=0.514 444 m/s)以上速度进行导航。

(4) 拥有持续1 ms~1 s的100g或更大的非运转冲击水平。

1.3 组合导航与故障容错

组合导航技术的发展使导航系统日益复杂,同时也对组合导航系统的可靠性提出了更高要求。由于组合导航系统引入了多种导航设备,因而加大了系统出现故障的概率。导航系统一旦出现一些突发故障,很可能导致载体出现毁灭性的事故。因此,一个有效的组合导航系统,除了能提供高精度的导航信息以外,当某个或某些导航设备发生故障时,也必须能快速、准确地定位故障发生所在的子系统或部位,同时进行必要的隔离以及系统重构。这就是组合导航中的故障检测和容错所要研究的问题。

从20世纪起,发生在航空、航天界的一些重大飞行事故给了我们重要警示,如美国“挑战者”航天飞机失事、“德尔塔”火箭坠毁、“诺阿-13”气象卫星与地面失去联系、欧洲“阿丽亚娜”火箭飞行失败以及我国发射卫星的失利等。这些都说明在大型复杂系统中引入故障检测与容错技术是十分必要的^[16]。

基于解析冗余的故障检测技术始于美国,1971年美国麻省理工学院的Beard首先提出了用解析冗余代替硬件冗余,通过系统的自组织使系统闭环稳定,通过比较观测器的输出得到系统故障信息的新思想,标志着这门技术的诞生。故障检测技术是一门综合性技术,伴随着各学科的蓬勃发展,它的理论基础涉及多门学科,如现代控制理论、可靠性理论、数理统计、模糊集理论、信号处理、模式识别以及人工智能等^[17]。故障检测技术是由建立“监控系统”的需要而发展起来的。随着自动化系统规模的不断扩大,复杂性的日益提高,以及系统投资的不断加大,人们迫切需要提高自动化系统的可靠性、可维修性和安全性。因而有必要建立一个监控系统来监视整个控制系统的运行状态,不断检测系统的变化和故障信息,及时发现系统中的故障并加以定位,进而采取必要的措施,防止系统灾难性事故的发生。国内外相关资料表明,开展故障检测的经济效益是明显的。据日本统计,在采用故障检测技术后,事故率减少75%,维修费降低25%~35%;英国对2000个国营工厂的调查表

明,采用故障检测技术后每年节省维修费用近3亿英镑,用于故障检测的费用仅为0.5亿英镑;据有关部门统计,我国每年用于设备维修的费用仅冶金部门就达250亿元,如果将故障检测这项技术推广,每年可减少事故50%~70%,节约维修费用10%~30%,效益相当可观^[18]。因此,系统故障检测技术的应用研究已成为控制领域的研究热点之一。

容错控制的概念是1986年9月由美国国家科学基金会和美国电气和电子工程师学会(IEEE)控制系统学会共同在美国举行的一个控制领域专题讨论会的报告中正式提出的。所谓容错控制系统,就是具有冗余能力的控制系统,即在某些部件发生故障的情况下,系统仍能按原定性能指标或可以接受的略为降低的性能指标,安全地完成控制任务^[19-20]。从目前发展来看,故障检测和容错控制有着密切的联系,故障检测是容错控制的基础,容错控制的发展为故障检测带来新的活力。

在组合导航中,卡尔曼滤波是一种基本的信息融合方式。但是标准的卡尔曼滤波器的应用要求具有系统的数学模型和噪声统计特性的先验知识。通常,我们可以得到组合导航的系统和观测模型,而由于系统本身元器件的不稳定性及外部应用环境不确定因素的影响,系统和观测噪声的统计特性难以准确描述,由此可能导致滤波器的发散。所以常规的卡尔曼滤波器在实际应用中并不能保证其收敛性和稳定性,故障容错性能较差。为了抑制卡尔曼滤波发散问题和提高其容错性能,国内外不少学者进行了广泛研究,如鲁棒滤波^[21, 22]、自适应滤波^[23-26]、扩展卡尔曼滤波(EKF, Extended Kalman Filter)^[27, 28]、Sigma点滤波(SPKF, Sigma Point Kalman Filter)^[29]等。这些方法虽然在一定程度上减少了外界干扰等因素对卡尔曼滤波的影响,却是以牺牲某一方面的最优指标为代价的^[30]。例如, H_∞ 鲁棒滤波可提高滤波鲁棒性和适用范围,但是滤波器的平均估计精度会下降;Sage-Husa自适应滤波只能比较准确地估计系统噪声或量测噪声中的一个,而且当系统模型阶数较高时容易出现发散;强跟踪自适应滤波(STF, Strong Tracking Filter)中衰减因子估计为次优,且推导繁琐,计算量较大;EKF对卡尔曼滤波做了一定的非线性化处理,但非线性化处理仍存在一定缺陷,泰勒展开线性化时存在较大误差,对模型也有一定的约束;相比EKF,SPKF在非线性化处理技术上有了一定进步,但是当系统噪声和量测噪声的统计特性不准确时,SPKF也存在估计误差,会使估计精度降低甚至发散。

近年来,基于解析余度的故障检测和诊断(FDD, Fault Detection and Diagnosis)方法及其在导航系统的应用得到了高度的重视。随着惯性技术的高速发展,SINS日益成熟,并获得了广泛应用。为了提高SINS的可靠性,在其应用中广泛采用了余度结构和余度管理技术,由此推动了基于奇偶向量的导航系统传感器故障检测技术的发展。例如,Daly提出了广义似然比检验方法(GLT, Generalized Likelihood Test)^[31],它适用于没有传感器误差的情况;在此基础上,Hall等人提出了用卡尔曼滤波对奇偶向量进行补偿的方法,Motyka提出了方差补偿的GLT法,这些改进的方法从一定程度上降低了故障的误检和漏检率,提高了GLT法的检验性能。

由于奇偶方程法依赖于同类型传感器的余度配置,因而在实际应用中受到了一定的限制。而基于各种残差的 χ^2 检验法具有简单实用、不依赖于传感器余度配置等特点,被广泛应用于组合导航系统故障检测领域,目前状态 χ^2 检验法和残差 χ^2 检验法是最常用的两种基本方法^[32, 33]。状态 χ^2 检验法要求比较准确地了解系统状态的先验统计知识,否则会因初值