




申 冲 著

惯性基导航 智能信息处理技术

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

内容简介

惯性基导航智能信息 处理技术

申 冲 著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

组合导航是近代导航理论和技术发展的结果。惯性导航系统具备自主性强、短时精度高、全天时、全天候等优点,因此在大部分组合导航系统中得到了应用。其中,惯性基组合导航系统的信息处理是关键核心技术。在使用过程中,由于受器件自身原理、工作环境等影响,惯性基组合导航系统的输出信息存在误差,包括陀螺仪噪声、温度漂移、非连续观测等,这会严重降低系统的精度和鲁棒性,因此对惯性基组合导航系统的信息处理技术进行研究是十分必要的。

本书系统地介绍了典型惯性器件与惯性基组合导航系统、陀螺噪声分析与处理技术、陀螺温度漂移建模补偿技术、非连续观测组合导航模型与算法、基于惯性视觉的类脑导航技术等内容,所涉及的智能信息处理技术均配有仿真验证,可供从事导航相关专业的科研和工程人员参考阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

惯性基导航智能信息处理技术 / 申冲著. —北京: 电子工业出版社, 2019.10

ISBN 978-7-121-37276-6

I. ①惯… II. ①申… III. ①组合导航—导航系统—人工智能—信息处理—研究 IV. ①TN967.2
②TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 175155 号

责任编辑: 刘志红 (lzhmails@phei.com.cn)

印 刷: 天津嘉恒印务有限公司

装 订: 天津嘉恒印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 10.5 字数: 268.8 千字

版 次: 2019 年 10 月第 1 版

印 次: 2019 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 98.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254479, lzhmails@phei.com.cn。

前 言

基于惯性导航的组合导航系统能够为载体提供姿态、速度、位置等导航信息，目前已在海、陆、空等领域得到了广泛应用。惯性基组合导航系统是通过选择适当的算法将各子系统的信息进行融合，克服单个系统的缺点，使组合后的系统在满足成本要求的前提下，提高导航信息的可靠性、精度和完整性。因此，信息处理技术对整个组合导航系统的性能至关重要。在组合导航系统工作过程中，由于器件自身原理、工作环境等影响，惯性基组合导航系统的输出信息存在误差，包括陀螺仪噪声、温度漂移、非连续观测等，这会严重降低系统的精度和鲁棒性，因此惯性基组合导航系统的信息处理技术研究是十分必要的。著书过程中，我们总结了多年来在惯性基组合导航系统信息处理方面的技术经验，并在书中进行详细阐述，主要包括：典型惯性器件及系统的介绍；惯性器件的信息处理方法，如陀螺仪噪声分析与处理、陀螺温度漂移建模补偿；惯性基组合导航系统，如非连续观测组合导航模型与算法；还详细介绍了前沿研究热点，如基于惯性视觉的类脑导航技术等相关内容。

在著书过程中参考了部分兄弟院校的相关资料，并得到了东南大学陈熙源教授及中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室多位教授的指导与帮助，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

申 冲

2019年9月

目 录

第 1 章	绪论	1
第 2 章	典型惯性器件及系统简介	7
2.1	光纤陀螺	7
2.2	MEMS 陀螺仪	12
2.3	惯性导航系统	22
2.3.1	捷联惯性导航系统	22
2.3.2	惯性导航系统基本原理概述	23
2.3.3	捷联惯性系统的基本算法	26
第 3 章	陀螺噪声分析与处理技术	34
3.1	陀螺噪声成分与 Allan 方差分析方法	34
3.1.1	陀螺噪声来源与特性分析	34
3.1.2	Allan 方差	40
3.2	光纤陀螺信号去噪算法	44
3.2.1	提升小波变换	44
3.2.2	前向线性预测算法	49
3.2.3	LWT-FLP 算法	51
3.2.4	光纤陀螺信号去噪结果分析	52
3.3	光纤陀螺角振动误差去除方法	54

3.3.1	角振动实验与输出信号分析	54
3.3.2	灰色 FLP 算法	57
3.3.3	G-FLP 算法	58
3.4	本章小结	60
第 4 章	陀螺温度漂移建模补偿技术	62
4.1	光纤陀螺温度漂移与建模方法	62
4.2	基于外界温度变化率的光纤陀螺温度误差模型	66
4.3	基于遗传算法与 Elman 神经网络的温度漂移建模和补偿	72
4.3.1	神经网络	72
4.3.2	Elman 神经网络	74
4.3.3	遗传算法	75
4.3.4	基于 GA-Elman 的光纤陀螺温度漂移建模与补偿	77
4.4	本章小结	83
第 5 章	非连续观测组合导航模型与算法	84
5.1	非连续观测组合导航系统解决思路与典型模型	84
5.2	卡尔曼滤波与神经网络在非连续观测组合导航中的应用	89
5.2.1	强跟踪卡尔曼滤波	89
5.2.2	小波神经网络	91
5.2.3	实验结果与分析	95
5.3	自学习容积卡尔曼滤波在组合导航中的应用	100
5.3.1	平方根容积卡尔曼滤波	100
5.3.2	长短时记忆神经网络	103
5.3.3	自学习容积卡尔曼滤波	105
5.3.4	实验结果与分析	109

第 6 章 基于惯性视觉的类脑导航技术	116
6.1 仿生导航背景概述	116
6.2 仿生导航机理	118
6.2.1 位置细胞	118
6.2.2 头朝向细胞	119
6.2.3 网格细胞	122
6.2.4 速度细胞	123
6.2.5 类脑导航系统	124
6.3 高速有效的节点匹配算法	128
6.3.1 扫描线强度法	129
6.3.2 GMS (基于网格的运动统计)	131
6.3.3 扫描线强度/GMS	135
6.4 算法验证	136
第 7 章 总结与展望	141
7.1 惯性基导航智能信息处理技术总结	141
7.2 研究展望	144
参考文献	145

第1章

绪论

随着社会经济的发展和人们生活水平的提高，越来越多的人选择汽车作为代步工具，从而导致公路交通系统变得越来越复杂和拥挤。交通拥挤延误时间、交通事故数量逐年上升、车辆尾气排放和能源消耗过大等问题也随之出现，给国民经济造成了巨大的损失，日渐成为科学研究和社会关注的焦点。

面对当今世界全球化、信息化的发展趋势，传统的交通技术和手段显然已不能解决日益严峻的交通问题。因此，在交通事业发展的这场变革中，智能交通系统（Intelligent Transportation System, ITS）成为交通事业发展的必然选择。通过将先进的通信技术、信息技术、传感技术、控制技术、计算机技术及系统综合技术有效地集成和应用，以新的方式将人、车、路之间的相互作用呈现出来，从而实现准确、实时、高效、节能和安全的目标。

随着传感器技术、通信技术、3S技术（遥感技术、地理信息系统和全球定位系统）和计算机技术的不断发展，交通信息的采集经历了从人工采集到单一的磁性检测器交通信息采集，到多源交通信息采集的发展，同时，随着国内外对交通信息处理方法研究的深入，统计分析技术、人工智能技术、数据融合技术和并行

计算技术等逐步被应用于交通信息的处理中,使交通信息的处理得到不断发展和革新,更加满足了 ITS 各子系统管理者和用户的需求。当前 ITS 的主要组成系统包括先进的交通信息服务系统(ATIS)、先进的交通管理系统(ATMS)、先进的公共交通系统(APTS)、先进的车辆控制系统(AVCS)、货运管理系统、电子收费系统和紧急求援系统等。其中,先进的交通信息服务系统和先进的交通管理系统是现今城市交通两大重要管理手段。ATIS 是建立在完善的信息网络基础上的,交通参与者通过安装在道路上、车上、换乘站、停车场及气象中心的传感器和传输设备,向交通信息中心提供各地的实时交通信息。ATIS 接收到这些信息并进行处理后,实时向交通参与者提供道路交通信息、公共交通信息、换乘信息、交通气象信息、停车场信息及与出行相关的其他信息,根据这些信息,出行者即可确定自己的出行方式。同时,在车辆上安装自动导航和定位系统,便可以通过该系统自动地帮助驾驶员选择行驶路线。ATMS 主要是供交通管理者使用,用于检测、管理和控制公路交通,在道路、驾驶员和车辆之间提供通信,它可以对道路系统中的交通环境、交通事故和气象状况等进行实时监控,依靠先进的车辆检测技术和计算机信息处理技术,获得有关交通状况的具体信息,并以此对交通进行控制,如发布道路管制信息、交通诱导信息及进行事故救援等。尽管 ITS 的研究和表现形式繁多,但其基本上由道路模块、车辆模块、通信模块,以及管理和控制中心模块四部分组成,各组成部分间关系如图 1-1 所示。

(1) 管理和控制中心模块:依据采集到的车辆和道路信息对交通进行管理和规划,实现车辆跟踪、调度和管理,发布收费管理和服务信息,实现应急措施的安排和管理等工作。

(2) 车辆模块:依据各种传感器采集到的信号,车辆模块可以计算出车辆的导航定位信息,从而保障车辆按调度命令或路径规划命令行驶。

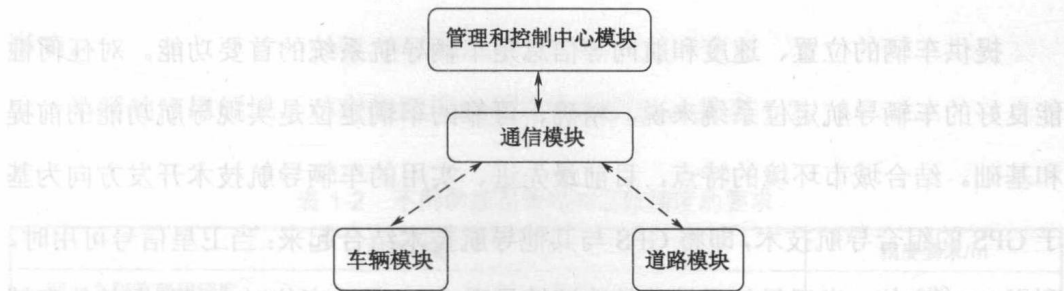


图 1-1 智能交通系统的组成部分

(3) 道路模块：道路模块可以提供实时道路交通信息，实时监测道路交通状况，完成电子收费、车辆检测和管理等功能。

(4) 通信模块：通信模块的作用是实现以上 3 个模块之间信息的传递和交互。

车辆模块作为智能交通系统的重要组成部分，其导航定位技术一直是许多科研工作者关注的重点。从上面的内容也可以看出，ITS 需要解决的一个首要问题就是定位，只有获得了精确的车辆位置信息才能进一步完成 ITS 的其他服务功能。因此，目前的智能交通系统以道路和车辆定位作为主要研究对象，以提高道路的通行能力。车辆导航定位系统的功能模块如图 1-2 所示。

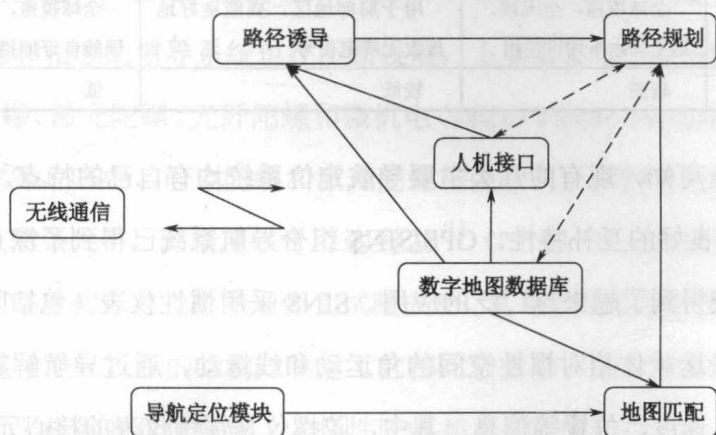


图 1-2 车辆导航定位系统的功能模块

提供车辆的位置、速度和航向等信息是车辆导航系统的首要功能。对任何性能良好的车辆导航定位系统来说，精确、可靠的车辆定位是实现导航功能的前提和基础。结合城市环境的特点，目前最先进、实用的车辆导航技术开发方向为基于 GPS 的组合导航技术，即将 GPS 与其他导航技术结合起来：当卫星信号可用时，利用 GPS 定位；当卫星信号被建筑物遮挡导致 GPS 无法定位时，可利用其他高精度定位技术进行定位。目前在各领域得到实际应用的几类主要导航系统的性能特点对比见表 1-1。

表 1-1 几类主要导航系统的性能特点对比

	惯性导航	无线电导航	GPS 等卫星导航
自主性	好（全自主）	差（依赖发射台）	差（依赖卫星）
精度水平	误差随时间积累	导航精度随距离增加而降低	精度高，不随时间、地点而改变
信息全面性	全面（可提供位置、速度、姿态信息）	不全面（一般只提供位置、速度信息）	
信息实时性与连续性	好	较差	
抗干扰能力	强	较弱	弱
使用特点	全球覆盖，全天候，地上、水下均可使用	用于局部地区，要能良好地接收无线电信号	全球覆盖，全天候，必须确保能良好地接收卫星信号
成本/价格	较高	较低	低

由表 1-1 可知，现有的几类主要导航定位系统均有自己的特点，而由于 GPS 与 SINS 具有良好的互补特性，GPS/SINS 组合导航系统已得到了深入研究，并在车辆导航领域得到了越来越广泛的应用。SINS 采用惯性仪表（包括陀螺仪和加速度计）来测量运载体相对惯性空间的角运动和线运动，通过导航解算可实时得到载体的姿态、速度、位置等信息。其中，陀螺仪是惯性仪表的核心元件，对 SINS 的性能有较大的影响，因此陀螺仪的选取对车辆导航定位精度有着至关重要的

影响。

不同的应用领域，对定位精度的要求是不同的，见表 1-2。

表 1-2 不同的应用领域对定位精度的要求

应用领域	精度要求/m
商业车辆管理和调度	100
自动车辆识别	30
自动语音报站	25~30
数据的采集	25
导航与路线引导	5~20
遗失车辆追踪	10
特殊车辆，如救护车、运钞车等管理和调度	10
公共安全	10
服务场所（如饭店、商场）的定位	10
防撞	1
交叉路口的检测	0.1

由表 1-2 可以看出，为了实现防撞和交叉路口检测等功能，高精度的车辆定位已经成为 ITS 技术发展的目标。为了实现高精度车辆定位，必须选取高精度陀螺仪作为惯性测量元件。自 20 世纪 60 年代以来，除了传统转子陀螺快速发展外，多类新型陀螺和相应的惯导系统也在不断发展，主要类型包括静电陀螺、挠性陀螺、谐振型陀螺、激光陀螺、光纤陀螺和微机电（Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS）陀螺等。其中，静电陀螺和激光陀螺精度较高，如静电陀螺在人造卫星的微重力与真空条件下，其精度水平可达到 10^{-11} ($^{\circ}$)/h；激光陀螺捷联惯导系统早在 20 世纪 70 年代便在飞机和导弹上试验成功，其导航精度能够达到 1 852m/h。但是静电陀螺与激光陀螺的结构与制造工艺都比较复杂、成本较高，因此多用在潜艇、导弹、飞机等高价值载体上。挠性陀螺和谐振陀螺结构简单、成本低，易批量生产，但是由于精度较低，只能应用于一般场合的车辆导航定位。相比静电

陀螺和激光陀螺，光纤陀螺因轻小型、低功耗、长寿命、高可靠性和可批量化生产而具有自己的优势；相比挠性陀螺和谐振陀螺，光纤陀螺的精度较高，可应用于对导航定位精度要求较高的车辆导航中。因此，光纤陀螺在目前的大型无人车导航定位中扮演着极其重要的角色。此外，随着 MEMS 技术的发展，MEMS 陀螺的精度逐渐提高，如挪威 SENSOR 公司生产制造的 STIM210 系列 MEMS 陀螺其零偏稳定性高达 $0.5^{\circ}/h$ ，并且具备低成本、小体积、低功耗的特点，因此在某些应用场合完全可以替代光纤陀螺，具备广泛的应用前景，特别是在微小型无人平台领域，已经成为目前最主流的惯性导航定位手段。



第 2 章

典型惯性器件及系统简介

2.1 光纤陀螺

1976 年,美国 Utah 大学的 Vail 和 R. W. Shorthill 成功研制了第一个光纤陀螺,这标志着光纤陀螺(第二代光学陀螺)的诞生(第一代激光陀螺)。刚问世,光纤陀螺就因其灵活的结构和诱人的前景受到了世界范围内科研人员的重视,至今为止获得了很大进展。1990 年后,光纤陀螺惯导系统逐步投入使用,并可进行批量生产。通过科研工作者的不断努力,如今许多项关键技术问题已经得到完美解决,精度测量从以前的 $15^{\circ}/h$ 提高到了现在的 $0.001^{\circ}/h$ 的数量级。与其他陀螺比,FOG 具有以下显著特点。

(1) 结构简单,全固态结构,抗加速运动和耐冲击的能力较强。

(2) 光纤线圈的设计增长了激光束的检测光路,提高了检测分辨率和灵敏度,同时有效解决了激光陀螺中存在的闭锁问题。

(3) 不存在机械传动部件, 无磨损, 使用寿命长。

(4) 相干光束传播时间短, 可以瞬时启动。

(5) 方便采用集成光路技术, 信号稳定性较高, 可实现数字输出, 并且与计算机接口连接方便。

(6) 动态范围较宽。

(7) 可与激光陀螺共同使用, 构成各种惯性导航系统的传感器, 尤其是捷联式惯性导航系统的传感器。

从原理和结构的角度来看, 光纤陀螺的类型主要包括干涉型光纤陀螺仪、谐振腔光纤陀螺仪、布里渊光纤陀螺仪、锁模光纤陀螺仪和法布里·珀罗光纤陀螺仪五种。从结构角度, 可以分为开环光纤陀螺仪和闭环光纤陀螺仪两大类。从相位解调方式的角度, 还可分为光外差式光纤陀螺仪、相位差偏置式光纤陀螺仪及延时调制式光纤陀螺仪。

从 20 世纪 90 年代开始, 国外光纤陀螺逐步进入产业化发展阶段, 可以实现批量生产。具有一定规模生产能力的光纤陀螺制造商主要在美国, 其次为德国、法国等。美国诺斯罗普公司于 20 世纪 90 年代初建立了一条战术级组合惯导系统生产线, 向不同需求用户供应了数万套光纤陀螺惯性系统产品及近万只光纤速率陀螺; 美国霍尼韦尔公司最早将光纤陀螺用于商业航空领域, 并为美国海军开发了潜艇惯导用高精度光纤陀螺, 测试结果表明, 光纤陀螺的 14 小时长期零偏稳定性 (1σ) 为 $0.000\ 38^\circ/\text{h}$ 。美国 KVH 公司的开环光纤陀螺自 1987 年问世以来已大量用于车/船稳定系统、寻北仪等产品中, 2019 年, KVH 公司将光子芯片技术整合到光纤陀螺仪产品中, 其角度随机游走低于 $0.009\ 7^\circ/\text{h}$, 零偏稳定性为 $0.02^\circ/\text{h}$ 。德国利铁夫公司主要生产闭环光纤陀螺, 其单轴光纤陀螺在 2000 年前后就交付了数千只, 其三轴一体配置的光纤陀螺也得到了广泛应用; 法国光子 Ixsea 公司于 20

世纪 80 年代开始研制光纤陀螺, 从 1986 年至 1999 年的十几年间, 该公司在船用和空间应用领域已有大量应用; 日本的日立电缆、三菱精密和日本航空电子工业公司是日本研制光纤陀螺的 3 家主要公司, 其中日立电缆公司已售出的汽车导航用光纤陀螺已数以万计。我国从 20 世纪 80 年代初开始进行光纤陀螺研制。目前, 国内 FOG 水平已经接近惯性导航系统的中精度要求。其中北京航空航天大学研制的中、低精度闭环光纤陀螺已经达到实用化阶段, 其研制的掺饵光纤陀螺在实验室环境下零偏稳定性达到 $0.01^\circ/\text{h}$ 。此外, 航天 33 所、航空时代电子 13 所、航空 618 所、中国船舶 707 所、浙江大学、北京理工大学等单位也在光纤陀螺的研制上有一定突破。航天 16 所的 GXT-4B 单轴光纤陀螺仪如图 2-1 所示。



图 2-1 航天 16 所的 GXT-4B 单轴光纤陀螺仪

光纤陀螺惯性系统是采用光纤陀螺仪作为角运动测量仪表的各类捷联式惯性系统的统称。由于不同领域、不同运载体对光纤陀螺惯性系统产品的要求各有不同, 因而存在多种不同类型的光纤陀螺惯性系统产品。根据所采用光纤陀螺与加速度计精度等级的不同, 可以分为以下几类。

- (1) 低精度或战术级产品: 一般陀螺精度为 $10\sim 0.1^\circ/\text{h}$ (1σ) 水平, 加速度计

精度为 $10\sim 3g$ (1σ) 水平。

(2) 中高精度或导航级产品：一般陀螺精度为 $0.01^\circ/h$ (1σ) 水平，加速度计精度优于 $10\sim 4g$ (1σ) 水平。

(3) 精密级产品：一般陀螺精度为 $0.003^\circ/h$ (1σ) 水平，加速度计精度优于 $10\sim 5g$ (1σ) 水平。

国外的各类光纤陀螺惯性系统在航天、航空、舰船、车辆等领域均得到了广泛应用，主要包括以下几类。

(1) 在导弹和火箭中的应用及典型产品。

美国诺斯罗普公司 LN-200 系列光纤陀螺惯性测量组合产品已成功应用于飞机、火箭、月球及火星探测器、无人机、潜艇等运载体，还广泛应用于导弹、坦克、姿态稳定系统等。LN-200 系列产品由 3 只光纤陀螺（精度约为 $1^\circ/h$ ）、3 只硅微加速度计（精度约为 g ）构成，可提供三维加速度与角速度信号。

(2) 在航天器中的应用及典型产品。

美国霍尼韦尔公司研制的飞船导航和哈勃望远镜姿态稳定用的光纤陀螺精度为 $0.00038^\circ/h$ (1σ)。利顿公司还研制了适合航天环境的漂移小于 $0.0005^\circ/h$ (1σ) 的 FOG2500 光纤陀螺，抗辐照为 100krad (Si)，可靠性为 0.998 (10 年寿命)。

(3) 在航空器中的应用及典型产品。

德国利铁夫公司已生产了万余套 LCR-9X 系列机载光纤陀螺航向姿态参考系统，在多种类型飞机上进行了应用。LCR-92/93 的性能指标为：航向精度 1.0° (95%)、姿态精度 0.5° (95%)、角速率量程 $^\circ/s$ 。

(4) 在舰船中的应用及典型产品。

法国 Ixsea 公司研制了船用惯导系统 PHINS，所用光纤陀螺精度为全温 ($-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$) 范围下 $0.01^\circ/h$ ，常温下精度为 $0.002^\circ/h$ ，纯惯性定位精度为 0.6 n mile/h 。