



·总装部队军事训练“十二五”统编教材·



中远程导弹 组合导航技术

ZHONGYUANCHENG DAODAN
ZUHE DAOHANG JISHU

吕沧海 冯艳 师海涛 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

总装部队军事训练“十二五”统编教材

中远程导弹 组合导航技术

吕沧海 冯艳 师海涛 编著



国防工业出版社

·北京·

T761.2

13

图书在版编目 (CIP) 数据

中远程导弹组合导航技术 / 吕沧海, 冯艳, 师海涛
编著. —北京: 国防工业出版社, 2014. 3

总装部队军事训练“十二五”统编教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 09338 - 4

I. ①中... II. ①吕... ②冯... ③师... III. ①中程
导弹 - 远程导弹 - 组合导航 - 教材 IV. ①TJ765

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 040734 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 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 10½ 字数 299 千字

2014 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

总装备部军事训练统编教材 编审委员会

(2012)

主任委员 于建平

副主任委员 陈志敏 栗根文 蔡洙虎

委 员 王家伍 张海洋 李恒年

王泽民 姚志军 闫章更

白凤凯 康建勇 姜世忠

黄伟强

秘 书 石根柱 余敬春

前 言

组合导航技术是利用两个或两个以上导航系统所提供的导航信息,通过融合处理获取最佳导航信息的导航技术。微型计算机的发展与广泛应用,为组合导航奠定了物质基础,而新的数字滤波技术如卡尔曼滤波理论与技术,则提供了有力的处理工具。组合导航系统能有效地利用各子系统的信息,以取此长而补彼短。尤其是在一个大组合中,一般都有几种组合方式可供选择,其定位精度通常可比其中任何单一的导航系统的精度提高 30%。对于任何运动体的导航都必须考虑冗余度,以加强保障手段的可靠程度,乃至要绝对可靠。在组合导航系统中,通过自动故障检测,一旦发现某子系统失效,就自动转换工作模式,因此适应性强,可靠性高。对于给定的导航系统性能要求而言,采用组合导航与采用单一导航系统相比,其成本还会降低。

可见,由多个导航系统组成的组合导航已经成为当前重要的导航系统实现方案,而高精度和高可靠性是其基本的衡量指标。目前的导航系统是以惯导系统作为主导航系统,而将其他导航系统,如无线电导航、卫星导航、天文导航、地形及景象匹配导航等系统作为辅助导航系统,利用卡尔曼滤波器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。

21 世纪的战争是现代高技术的战争,一场战争的胜负往往取决于战争的双方谁拥有先进的、高精度的武器。20 世纪末,美国对伊拉克、南斯拉夫发动的两场战争就是对精确打击武器威力的最有力的证明。现代战争要求导弹打得远、精度高、机动能力强,这就对导弹的制导与控制系统提出了更高的要求,而导航系统作为制导与控制系统重要的一部分,起着极为关键的作用。可以说,导弹的精度是与导航系统紧密相关的。组合导航技术的采用,使整个导航系统的准确度、可靠性得到

极大提高。组合导航系统已成为当前导航技术重要的发展方向之一,是中远程导弹实现精确打击的重要手段。

本书适合在航天发射基地、武器试验靶场从事总体技术、导航与制导、导弹武器系统评估等专业的工程技术人员学习与参考,也可供高校、航天工业设计部门的广大学生及科技人员阅读、参考,希望能为他们提供有益的帮助。

本书参阅了国内外大量文献资料,研究了当前中远程精确打击导弹组合导航技术的发展趋势,融入了作者近年来科研成果,结合实际工程应用技术需求,对中远程导弹组合导航技术理论进行了系统整理,探讨了其工程应用。全书共分6章。第1章绪论,概述了导航系统的发展及各种导航系统的特点;第2章介绍了组合导航系统的信息处理技术;第3章~第6章分别依次接受了激光捷联惯性导航、惯性/星光组合导航、惯性/全球导航卫星组合导航、惯性/合成孔径雷达组合导航技术。内容丰富,语言通俗,图文并茂,系统性强,技术与应用并重。本书有吕沧海、冯艳、师海涛共同编著完成,由吕沧海统稿。

本书是总装部队军事训练“十二五”统编教材,在教材立项中得到了各级训练部门的领导、专家的推荐与帮助,特别是太原卫星发射中心陈志敏副总师、康健勇研究员两位专家亲自审查了本书的编著方案,对章节、内容的设置提出了具体指导意见。书中参考、引用了许多国内外相关领域研究人员的科研学术成果。在此,作者向他们一并表示衷心的感谢。

本书第一作者在西安交通大学攻读博士学位期间,得到了蔡远利教授的精心指导,第2章部分内容参考了蔡教授的教学成果,在此表示特别感谢。

在本书编著过程中,太原卫星发射中心高家智处长对本书内容进行了亲自审核,苗岩松、夏红根、肖松春、张正娟、孟冬波、张帆等同志帮助整理、录入了部分文字,作者在此向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,错误在所难免,请广大读者不吝指导。

作者

2013年10月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 导航系统基本概念	1
1.2 组合导航常用子系统技术特点	4
1.2.1 惯性导航系统	4
1.2.2 卫星导航系统	6
1.2.3 天文导航系统	9
1.2.4 地形匹配导航系统	11
1.3 组合导航系统理论基础	12
1.3.1 组合导航中的信息融合技术	13
1.3.2 组合导航中的滤波技术	14
1.3.3 组合导航技术展望	18
1.4 中远程导弹组合导航方案	19
1.4.1 主动段组合导航方案	19
1.4.2 自由段组合导航方案	20
1.4.3 再入段组合导航方案	20
第2章 组合导航中的信息处理技术	22
2.1 概述	22
2.2 基本定义	24
2.2.1 测量误差与测量精度	24
2.2.2 信息与信息量	25
2.2.3 信息空间	25
2.2.4 信息的相关性	26
2.3 基本定理与模型	27
2.3.1 引理	27

2.3.2	最小方差无偏估计	29
2.3.3	线性最小方差无偏估计	30
2.3.4	信息最优融合估计定理	32
2.3.5	信息正交化定理	34
2.3.6	信息共享原理与信息量分解定理	35
2.3.7	状态预测信息独立性原理	36
2.3.8	统一线性融合模型	37
2.4	组合导航卡尔曼滤波结构与算法	37
2.4.1	集中式卡尔曼滤波	38
2.4.2	分散化融合式卡尔曼滤波	41
2.5	次优滤波技术	48
2.5.1	衰减记忆滤波	49
2.5.2	限定记忆滤波	52
2.5.3	协方差平方根滤波	56
2.5.4	自适应滤波	59
2.5.5	常值增益次优滤波	62
2.6	智能化信息融合技术	63
第3章	激光捷联惯性导航技术	65
3.1	概述	65
3.2	激光捷联惯性测量系统	68
3.2.1	激光陀螺仪	68
3.2.2	位置捷联系统	84
3.2.3	速率捷联系统	88
3.3	捷联姿态解算	91
3.3.1	姿态表达方式	92
3.3.2	捷联解算中的坐标系	92
3.3.3	捷联姿态解算方法	95
3.4	捷联导航系统初始对准	112
3.4.1	初始对准的概念	112
3.4.2	初始对准基本算法	113
3.4.3	初始对准的工程实现	117

3.5 捷联惯性系统导航误差分析及补偿技术	123
3.5.1 捷联惯性系统仪表的安装误差和标度误差	123
3.5.2 捷联惯性系统导航误差辨识	132
3.5.3 捷联惯性系统导航误差补偿	134
第4章 惯性/星光组合导航技术	139
4.1 概述	139
4.2 星敏感器基本原理	141
4.2.1 星敏感器工作原理	141
4.2.2 星图图像预处理技术	150
4.2.3 弹载星敏感器系统设计	155
4.3 惯性/星光组合导航系统	160
4.3.1 惯性/星光组合导航基本原理	160
4.3.2 惯性/星光组合导航基本算法	166
4.3.3 捷联惯导姿态的直接修正算法	167
4.3.4 惯性/星光组合导航仿真	168
4.4 惯性/星光组合导航系统应用技术	173
4.4.1 系统方案及组成	173
4.4.2 星敏感器测量模型	177
4.4.3 系统时间同步	181
4.4.4 导航星的选取与星光诸元的生成	182
4.5 导航误差修正及补偿	193
4.5.1 基于星光观测与弹体旋转的误差分离与估计	193
4.5.2 不可观测状态的可观测化激励方法	195
4.5.3 导航参数的一次补偿算法	196
4.5.4 数学仿真	203
第5章 惯性/全球导航卫星组合导航技术	208
5.1 概述	208
5.2 卫星导航基本原理	209
5.2.1 卫星导航系统的发展与特点	209
5.2.2 卫星导航的应用	211

5.2.3	卫星定位原理	212
5.3	惯性/全球导航卫星组合导航系统	223
5.3.1	惯性/全球导航卫星组合导航基本原理	223
5.3.2	惯性/全球导航卫星组合导航系统数学模型	227
5.3.3	惯性/全球导航卫星组合导航系统的发展方向	231
5.4	载波相位时间差分在卫星导航中的应用	232
5.4.1	载波相位时间差分的概念与分析	232
5.4.2	载波相位时间差分 and 捷联惯导的紧组合导航系统	237
5.5	导航误差修正及补偿	238
5.5.1	惯性导航参数校正	238
5.5.2	惯性/全球导航卫星组合导航的系统模型和测量模型	241
第6章	惯性/合成孔径雷达组合导航技术	261
6.1	概述	261
6.2	合成孔径雷达基本原理	262
6.2.1	合成孔径雷达的发展与特点	262
6.2.2	合成孔径雷达的应用	264
6.2.3	合成孔径雷达原理	266
6.3	惯性/合成孔径雷达组合导航系统	280
6.3.1	惯性/合成孔径雷达组合导航基本原理	281
6.3.2	惯性/合成孔径雷达景象匹配组合导航系统的数学模型	287
6.3.3	惯性/合成孔径雷达景象匹配组合导航系统的发展方向	289
6.4	惯性/合成孔径雷达组合导航应用技术	291
6.4.1	惯性/合成孔径雷达组合导航系统的图像匹配技术	291
6.4.2	合成孔径雷达的运动补偿	296

6.4.3 弹体定位技术	301
6.5 导航误差修正及补偿	307
6.5.1 组合导航系统观测量的获得	307
6.5.2 惯性/合成孔径雷达景象匹配组合导航系统中 的滤波器	313
6.5.3 误差校正与故障检测	314
6.5.4 惯性系统误差对合成孔径雷达图像质量参数 的影响	316
参考文献	318

第1章 绪 论

1.1 导航系统基本概念

导航是一门古老而又年轻的学科。从古至今,人们利用电学、磁学、声学、光学、力学等方法,通过测量与运动体位置有关的参数来实现对运动体的定位,并从出发点沿预定的路线,安全、准确、经济地引导到目的地。导航技术综合性很强。任何导航系统都涉及不断更新的导航信息的获取、传输、处理、控制与显示等。例如,信息发射已采用了当代最先进的固态大功率合成技术,传输则应用了伪随机编码与扩频技术,信息处理普遍采用了微机与先进的卡尔曼滤波技术,而控制与显示几乎更是所有这方面的先进技术都在导航领域中获得了应用。所以说现代导航的的确确是一门高新科学技术学科。根据导航信息获取原理的不同,如惯性原理、无线电传播特性、天体运动规律、人造地球卫星技术、地球表面地形、地貌特征等,便可分为惯性导航、无线电导航、天文导航、卫星导航、地形辅助导航等。如果导航定位的数据完全只依靠装在运动体上的导航设备来获取,采用航位推算原理工作,称为自备式导航。如果靠接收地面或空中导航台发播的导航信息,才能定出运动体位置者称为他备式导航。对于完成一定导航任务的设备组合,人们就称为导航系统,如无线电导航系统、惯性导航系统、天文导航系统、卫星导航系统、组合导航系统、综合导航系统、地形辅助导航系统等。

导航系统的基本定位原理,归纳起来有三种。一是航位推算法,也称推测航位法,它是最基本的导航定位方法,即从一个已知的位置开始,根据运动体在该点的航向、航速和时间推算出下一点的位置。自备式导航系统多数采用此法进行导航定位。二是无线电定位法,即在地

球表面或外层空间的人造地球卫星上建立若干个基准导航台,利用无线电波传播特性,在测出其电气参数如传播时间、相位、频率、幅度后,即可测出运动体相对于导航台的几何参数,如角度、距离、距离差等,从而建立运动目标与导航台的相对位置关系。某种几何参数相等的点的轨迹,就叫几何位置线(常见的有直线、圆、双曲线等),根据两条位置线的交点来确定运动体位置的方法,称为平面定位法,他备式导航系统大多采用无线电定位法。三是地形辅助导航定位法,也就是在航行过程中,地形辅助导航系统预先存储有运动体所要飞越地区的三维数字地形模型。在航行中将运动体的气压高度(海拔高度)和由雷达高度表测出的运动体正下方地表的相对高度相减,得出地面上的地形剖面图,再将存储的地形模型与测得的地形剖面相比较,当达到匹配时便定出了运动体所在点的位置。

国际权威人士一致认为,理想的导航系统应满足如下要求:全球覆盖;高的相对精度和绝对精度;对高动态载体具有良好的实时响应;能够提供三维位置、三维速度和航向姿态数据;工作不受外界环境的影响;具有抗人为及非人为干扰的能力;能随时、自主地进行故障检测和故障排除;高的可靠性;成本低,为广大用户所接受。显而易见,任何单一的导航系统是无法满足上述要求的。于是组合导航技术便逐渐成为导航领域的主要研究和发展对象。

组合导航技术是利用两个或两个以上导航系统所提供的导航信息,通过融合处理获取最佳导航信息的导航技术。微型计算机的发展与广泛应用,为组合导航奠定了物质基础,而新的数字滤波技术如卡尔曼滤波理论与技术,则提供了有力的处理工具。组合导航系统能有效地利用各子系统的信息,以取此长而补彼短。尤其是在一个大组合中,一般都有几种组合方式可供选择,其定位精度通常可比其中任何单一的导航系统的精度提高 30%。对于任何运动体的导航都必须考虑冗余度,以加强保障手段的可靠程度,乃至要绝对可靠。在组合导航系统中,通过自动故障检测,一旦发现某子系统失效,就自动转换工作模式,因此适应性强,可靠性高。对于给定的导航系统性能要求而言,采用组合导航与采用单一导航系统相比,其成本还会降低。例如,采用 GPS 与 INS 的组合就比单独采用 INS 的成本要低。高精度 INS,一台十几

万至几十万美元,中等精度的价格就低得多,而一台 GPS 用户设备仅几千美元,乃至更低。可见,由多个导航系统组成的组合导航已经成为当前重要的导航系统实现方案,而高精度和高可靠性是其基本的衡量指标。

组合导航系统的发展方向是容错组合导航系统和导航专家系统,这些系统具有故障检测、诊断、隔离和系统重构的功能。目前的导航系统是以惯导系统作为主导航系统,而将其他导航系统,如无线电导航系统、卫星导航系统、天文导航系统、地形及景象匹配导航系统等作为辅助导航系统,利用卡尔曼滤波器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。

实现组合导航有两种基本方法。

(1) 回路反馈法,即采用经典的回路控制方法,抑制系统误差,并使各子系统间实现性能互补。第二次世界大战期间,英国为解决海上巡逻机长时间连续飞行的导航精度问题,率先研究了该型系统。

(2) 最优估计法,即采用卡尔曼滤波或维纳滤波,从概率统计最优的角度估计出系统误差并消除。

两种方法都使各子系统内的信息互相渗透,有机结合,起到性能互补的功效。但由于各子系统的误差源和量测误差都是随机的,所以第二种方法远优于第一种方法。设计组合导航系统时一般都采用卡尔曼滤波。

21 世纪的战争是现代高技术的战争,一场战争的胜负往往取决于战争的双方谁拥有先进的、高精度的武器。20 世纪末,美国对伊拉克、南斯拉夫发动的两场战争就是对精确打击武器威力的最有力的证明。现代战争要求导弹打得远、精度高、机动能力强,这就对导弹的制导与控制系统提出了更高的要求,而导航系统作为制导与控制系统重要的一部分,起着极为关键的作用,可以说,导弹的精度是与导航系统紧密相关的。组合导航技术的采用,使整个导航系统的准确度、可靠性得到极大提高。组合导航系统已成为当前导航技术重要的发展方向之一,是中远程导弹实现精确打击的重要手段。

1.2 组合导航常用子系统技术特点

随着多传感器融合理论的发展,组合导航系统,从先前的比较简单的惯性/多普勒、惯性/大气数据、惯性/天文、惯性/伏尔/测距仪等,发展到了惯性/地形匹配、惯性/GPS 和惯性/图像匹配,以及多种系统和传感器组合的惯性/GPS/地形轮廓和景象匹配,甚至有什么信息源就利用什么信息源的多传感器组合系统。在这些组合系统中,有的精度较低,有的易受干扰,组合后的效果并不很理想。如前所述,目前的组合导航系统是以惯导系统作为主导航系统,其他导航系统作为辅助导航系统。当前,人们最关心并且实际应用比较成功的,主要是惯导/卫星导航、惯导/天文导航、惯导/地形匹配导航等。这些组合导航系统有其不同的技术特点,根据使用条件的不同,导航性能各有优劣。不同组合导航系统的技术特点,主要取决于各子导航系统的导航特性。本节对常用组合导航系统各子导航系统的技术特点进行详细阐述。

1.2.1 惯性导航系统

惯性导航系统(INS,简称惯导)的原理是依据牛顿惯性定理,利用陀螺、加速度计等惯性敏感元件及初始位置来确定载体的位置、姿态和速度。工作时通过精确量测载体的旋转运动角速度和直线运动加速度信息,然后送至数字计算机中通过数学积分技术进行计算,得出导航数据。它完全是依靠载体自身设备独立自主地进行导航,不依赖外界任何信息,不受外界干扰,能够独立完成导航任务。它已经被广泛应用于航天、航空、航海和许多民用领域,成为目前各种载体上的一种主要导航设备。

按惯性量测装置在载体上的安装方式,惯性导航系统可分为平台式惯性导航系统与捷联式惯性导航系统。平台式惯性导航系统是将惯性量测装置安装在惯性平台的台体上,根据建立坐标系的不同,又分为空间稳定和当地水平惯性导航系统两种。空间稳定平台惯性导航系统的惯性平台相对惯性空间稳定,用以建立惯性坐标系。地球自转、重力

加速度等影响由计算机加以补偿。这种系统多用于运载火箭的主动段和一些航天器上,当地水平平台式惯性导航系统的特点是台体上的两个加速度计输入轴所构成的基准平面能够始终跟踪载体所在点的水平面(利用加速度计和陀螺仪组成的舒拉回路保证),因此加速度计不受重力加速度的影响。这种系统多用于沿地球表面运动的飞行器,如飞机、巡航导弹等。在平台式惯性导航系统中,惯性平台能隔离载体的角振动。惯性测量仪表工作条件较好。平台能直接建立导航坐标系,计算量小,容易补偿和修正测量仪表的输出,但是结构复杂,尺寸大。随着计算机的迅猛发展,出现了捷联式惯性导航系统。陀螺仪和加速度计直接安装在载体上,省掉了机电式的稳定平台;但平台的概念仍然存在,它仅仅用计算机软件建立了一个“数学平台”来代替机电平台实体。其工作原理是:将陀螺敏感的载体运动角速度,送给导航计算机,通过积分得到载体坐标系到导航坐标系的坐标转换矩阵,而后通过转换矩阵将加速度计测量所得的比力进行变换,即把沿载体坐标系各轴上测得的加速度分量转换到导航坐标系中,从而在导航坐标系内可进行位置与速度的计算;根据转换矩阵和姿态方位的唯一关系,可计算出载体的姿态和方位角。

惯性导航系统是一种不依赖于任何外部信息,也不向外部辐射能量的自主式导航系统,它不仅具有良好的隐蔽性,而且其工作环境不仅包括空中、地球表面,还可以在水下,这对军事应用来说有重要的意义。另外,惯导所提供的导航数据十分完全,它除能提供运载体的位置和速度外,还能给出航向和姿态角等信息;而且具有数据更新率高、短期精度和稳定性好的优点。所有这些,使惯性导航系统在军事导航及民用导航领域中起着越来越大的作用。尤其在军事领域,在未来战争中,为破坏敌方的精确打击力量,往往采用强大的电子干扰手段。在这种复杂的干扰环境中,如果过多的依赖外界信息,势必对武器平台的生存带来致命的威胁。

目前,精确制导武器的重大发展方向就是向自主式制导武器发展。因而惯性导航、惯性制导以及以惯性为主的组合导航与制导是重要的研究方向。例如在海湾战争中,无论是装在F-117隐身对敌攻击机和B-52战略轰炸机的静电陀螺惯性导航系统、装在F-15E战斗机上的

激光陀螺惯导系统、装在 E-3A 指挥预警机上的惯性/奥米伽/多普勒组合导航系统,还是装在 SLAM 和“战斧”巡航导弹中的挠性陀螺惯性制导/地形匹配组合等,均发挥了强大的摧毁性的精确打击作用。战争检验了惯性系统的能力,同时又为其发展和改进提出了更高的要求。惯性技术作为综合作战能力的重要支撑技术,将在未来战争中发挥越来越突出的作用。但是,惯性导航也并非十全十美。当其单独使用时,导航精度随时间而发散,即长期稳定性差。正是由于这一缺点,并且随着控制理论、微电子技术、计算机技术和智能化信息技术的发展,在导航领域开展了以惯性导航系统为主的多导航系统组合研究。

1.2.2 卫星导航系统

卫星导航系统具有范围广、全天候、连续、实时的精确导航与定位能力,可为战机、舰船、战车等作战平台与武器系统和指挥员提供精确的位置、速度和时间信息。世界上现有卫星导航系统有美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 以及我国的“北斗”导航定位系统,欧洲的 GALILEO 卫星系统也将在近几年内建立。

1.2.2.1 全球定位系统

GPS 导航系统是以全球 24 颗定位人造卫星为基础,向全球各地全天候地提供三维位置、三维速度等信息的一种卫星导航定位系统。

1957 年 10 月 4 日,苏联发射了人类历史上第一颗人造地球卫星“Sputnik”号。美国霍普金斯大学应用物理实验室的科学家们通过对这颗卫星用无线电方法跟踪观察、发现了所测得的多普勒频移与卫星运动之间的关系。进一步研究认为,在对地球重力场充分了解的基础上,通过对已知轨道卫星的观测,可以确定观测者自己的位置,这就是卫星导航的思想。这一设想正好是美国“北极星”潜艇导航所需要的,为此该实验室得到了第一笔经费,揭开了第一代卫星导航系统研究的序幕。该系统的第一颗卫星在 1959 年 9 月发射升空,1964 年开始交付海军使用,1967 年正式组网并允许民用。

GPS 由三部分构成:一是监控部分,由主控站、地面天线、监测站及通信辅助系统组成;二是空间部分,由 24 颗卫星组成;分布在 6 个轨道平面;三是用户装置部分,由 GPS 接收机和卫星天线组成。