

装备科技翻译图书基金资助专著

用于海上运动对象的 组合式定向与导航系统

[俄] O.H.阿努钦, Г.И.叶梅利扬采夫 著
杨亚非 吴磊 陶冶 译
张明华 高伟 审校



国防工业出版社

National Defense Industry Press

用于海上运动对象的 组合式定向与导航系统

國防工業出版社

• 北京 • 农业科学 (010) 68475941

著作权合同登记 图字:军—2010—062 号

图书在版编目(CIP)数据

用于海上运动对象的组合式定向与导航系统/(俄)
阿努钦,(俄)叶梅利扬采夫著;杨亚非,吴磊,陶冶译.

北京:国防工业出版社,2011.1

ISBN 978-7-118-07031-6

I. ①用… II. ①阿… ②叶… ③杨… ④吴…

⑤陶… III. ①航海导航 IV. ①U675.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 253789 号

本作品中文专有出版权由中华版权代理中心代理取得,由国防工业出版社独家出版。

※

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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 11¼ 字数 326 千字

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 64.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

译 序

海上运动对象要解决的主要问题是其导航、运动控制及各种机载设备的初始对准与稳定问题。要解决这些问题就要有能提供运动对象位置、速度和姿态等信息的设备,组合式定向与导航系统正是能满足这一需求的设备。组合式定向与导航系统通常包括无框架惯性测量模块、GPS/GLONASS 卫星导航系统接收机和电子海图导航信息系统等。

本书作者所在单位是俄罗斯“电气仪表”中央科学研究所,是俄罗斯在高精度导航、陀螺、重力测量和航海无线电通信领域的主力研究所。该研究所的主要研究工作达到世界领先水平。研究所每年举办圣彼得堡组合导航系统国际会议,国际会议在导航、陀螺仪和运动控制领域有着广泛的学术影响,每年都有来自世界近二十个国家的近二百位学者参加,会议出版论文集。每年还举办“导航与运动控制”青年学者会议。该研究所还出版《陀螺与导航》学术期刊,该期刊在国际上有一定的影响力。

本书从组合式定向与导航系统的用途和结构组成入手,研究了无框架惯性测量模块、卫星导航系统、相对计程仪的误差模型,进而研究了组合式定向与导航系统的误差模型、工作模式,叙述了俄罗斯在组合式定向与导航系统方面的研究现状和发展前景,对基于不同模块的组合式定向与导航系统在动态条件下的系统精度进行了分析,并进行了数字仿真,给出了仿真结果。本书的内容概括了该研究所多年来在组合式定向与导航系统方面的研究成果,这无疑会给我国从事此方面

研究的科研工作者以很好的启迪。

译者特别感谢哈尔滨工业大学王子才院士和北京航空航天大学房建成教授,是两位专家的大力推荐使译者得以申请到装备科技翻译图书基金。感谢国防工业出版社的支持,这将极大促进专业技术领域的国际学术交流,共同分享科学技术研究成果。

本书由杨亚非、吴磊、陶冶共同翻译,杨亚非统稿,张明华、高伟审校。

由于译者水平有限,如有不妥之处,敬请各位读者批评指正。

译者

2011年1月

目 录

绪论	1
第 1 章 舰船用组合式定向与导航系统的结构和算法	8
1.1 用途、所解决的问题与结构	8
1.2 接口和信息网	15
1.3 工作模式及其所使用的信息综合处理方法	22
1.4 捷联惯性测量模块的功能算法	31
1.4.1 基本情况	31
1.4.2 方位参数生成算法	41
1.4.3 表观加速度的转换算法和平移运动参数的 生成算法	55
1.4.4 捷联惯性测量模块算法在舰载计算机中 实现的特殊性	57
1.5 卫星导航系统中导航测定的方法和算法	71
1.6 电子海图导航信息系统及其用途和所解决的问题	90
第 2 章 组合式定向与导航系统误差模型	94
2.1 捷联惯性测量模块误差模型	94
2.1.1 基本概念	94
2.1.2 基于方位陀螺的捷联惯性测量模块	98
2.1.3 基于角速度传感器的捷联惯性测量模块	114
2.1.4 无陀螺的捷联惯性测量模块	120

2.1.5	地球重力场异常模型	122
2.2	卫星导航系统的误差模型	132
2.3	相对计程仪的误差模型	141
2.4	生成导航参数和动态参数时组合式定向与 导航系统的误差模型	142
2.4.1	初始对准和标定模式	143
2.4.2	自主工作模式	150
2.4.3	观测工作模式	154
2.4.4	与舰船用户信息相互作用模式	155
第3章	海上运动对象的组合式定向与导航系统基本模型的 研究现状及问题	157
3.1	捷联惯性测量模块及其敏感元件	157
3.1.1	静电陀螺	160
3.1.2	激光陀螺	173
3.1.3	动调陀螺与光纤陀螺	184
3.1.4	线性加速度计与角加速度计	195
3.2	卫星导航系统接收机	204
3.3	电子海图导航信息系统的发展现状与前景	214
3.4	组合式定向与导航系统的要求及其组成	218
第4章	组合式定向与导航系统精度分析	229
4.1	基本状况	229
4.2	基于静电陀螺捷联惯性测量模块的组合式定向与 导航系统	233
4.3	基于激光陀螺的捷联惯性测量模块的组合式定向 与导航系统	275
4.4	基于光纤陀螺捷联惯性测量模块的组合式定向 与导航系统	294
4.5	基于无陀螺捷联惯性测量模块的组合式定向 与导航系统	308

附录	313
Π.1 北约各国舰艇的捷联惯性导航系统	313
Π.2 用于海洋船舶的组合式定向与导航系统	329
Π.3 捷联惯性测量单元安装位置运动仿真算法	335
参考文献	344

绪 论

目前,海上运动对象上(即各种用途的海上舰船)所要解决的基本问题是导航、运动的自动控制及各种舰船用户舰载设备(即武器系统、舰载飞机等)的初始对准和稳定。为了解决这些问题需要有相应的信息保障。

近期,海上运动对象的现代导航设备的彻底完善出于以下原因。

- (1) 国际海事组织对航行的导航安全保障的要求更加严格。
- (2) 各种舰船用户在存在高量级的自然和人为无线电干扰条件下,要求有对象运动的参数信息。
- (3) 在特种海上运动对象(搜索用、地质勘察及其他船只,各种用途的海上运动平台)信息保障中必须有运动自动控制系统,用于解决按给定航迹的运动控制问题或在某一无水文气象条件实质性限制的点上的动态定位问题。

这时必须考虑降低其成本、能耗和重量轮廓尺寸参数。由于在沿岸水域、通过狭窄航道时舰船的通行密度增加及船员的缩减,因此还必须提高自动化水平和程度。

本书研究 21 世纪海上运动对象导航设备的未来发展方向——制造组合式定向与导航系统作为统一的全舰导航与稳定系统^[35,36,58]。组合式定向与导航系统可理解为用于解决导航运动控制、各种舰船用户的舰载设备的初始对准、标定和稳定等问题的信息保障综合系统,该系统包括捷联惯性测量模块、GPS/GLONASS 卫星导航系统接收机及电子海图导航信息系统信息组合装置。与海上对象标准导航设备的信息交换相比,组合式定向与导航系统的根本的特点是惯性模块、卫星导航系统的接收机及电子海图导航信息系统数据的集成程度较深。

由以下问题的研究现状论述得出研制舰船用组合式定向与导航

系统的必要性。

1. 导航问题

目前,在俄罗斯,海上舰船的导航参数的生成主要是基于按各种计程仪和陀螺航向指示器(即陀螺罗经和陀螺平台罗经)的数据来计算路径的方法。来自无线电设备(即陆基无线电导航系统、卫星导航系统、雷达导航系统)的信息用于所推导出的位置坐标的周期性或准连续校正。

但是,如上所述,由于导航信息用户对数据的精度和格式要求更加严格,且要求降低导航回路的重量轮廓尺寸参数、能耗和成本的同时,还必须显著提高舰船在自然和人为无线电干扰条件下导航回路的信息自主性,所以要寻求新的解决方法。各种不同的水上舰船的导航回路的结构在确保高的使用特性(可靠性、冷启动的准备时间、由船员维修和技术维护的可能性及重量轮廓尺寸参数的限制及成本)下,按满足精度和信息自主性要求程度进行比较、分析表明^[34,58],各种类型舰艇未来的导航设备的信息基础应该是与同样接收导航雷达系统数据的卫星导航系统接收机和电子海图导航信息系统进行信息集成的中等精度捷联惯性导航系统或捷联惯性测量模块。根据目前对舰船导航设备提出的要求和俄罗斯捷联惯性系统的元器件现状,属于未来舰船导航系统的首先应该是基于激光陀螺和光纤陀螺的惯性测量模块,也可能是基于静电陀螺的惯性测量模块^[35]。

研究表明,目前制造舰船导航系统时已经考虑到上面提到的要求。在 21 世纪初英国海军水上舰艇的导航设备组成中,计划特别关注自主式导航设备^[53]。美国海军同样也特别注重导航设备的信息自主性。导航设备的基础是根据舰艇类型不同,具有校正间隔从几小时到几天或更长时间的惯性系统。20 世纪 90 年代,北约各国的舰艇装备中作为标准的导航系统配备有 Sperry 和 Honeywell 公司(美国)研制的 Mk.49 型精密激光陀螺捷联惯性导航系统和 Litef 公司(德国)的 PL41 Mk.4 型精密激光陀螺捷联惯性导航系统(见附录 II.2),其价格约 30 万~40 万美元。20 世纪 80 年代研制出的 N2000 型舰载静电陀螺捷联惯导系统(美国 Autonetics 公司)目前还没有得到广泛的应用(见附录 II.1)。

随着较便宜的陀螺元器件:动调陀螺、光纤陀螺、固体波动陀螺、微机械陀螺和加速度计的出现,必然会在辅助舰艇和海上舰船上出现包含有低廉(2万~3万美元)的小型捷联惯性测量模块组成的高可靠性系统。例如,挪威 Seatex 公司研制的 SEAPATH 400 型系统(见附录 II2)。

包含有捷联惯性导航系统的导航回路的突出特点是回路中生成表征舰艇质心在频谱的低频区域平动的导航参数(航向、位置坐标、线速度矢量的分量)和表征捷联惯性导航系统在舰艇安装点的高频角运动和线运动的动态参数:摆动角、偏航角及其角速度、线速度或线位移矢量的动态分量。

2. 初始对准和稳定问题

众所周知^[45],舰艇用户的舰载系统,例如,舰载飞机的驾驶—导航综合设备惯性系统的粗初始对准模式是利用航向角 k 、纵摇角 ψ 和横摇角 θ 的基准数据。精初始对准模式是利用线速度或位移,也就是作用于对象上的加速度一次或二次积分的矢量匹配法。

该问题的正式提出归结为按照最小二乘法或卡尔曼滤波算法处理出的量测量在有限时间段上估计所研究的舰艇用户的舰载导航系统(即舰载飞机的驾驶—导航设备的惯性系统)的误差模型。这些量测量是驾驶—导航设备的舰载系统的线速度或线位移矢量在地理坐标轴上的分量分别与基准舰艇系统的差值。在使用最小二乘法时舰载系统的误差模型可以用舰载系统对准(标定)时间间隔的二次或三次多项式逼近。这种情况下,基于问题解算时间间隔的多项式系数主要由舰载系统的初始速度给定误差、调平误差和陀螺漂移量确定。

为了获得初始量测量,考虑到舰载系统与舰船系统相互距离和舰船相对水平坐标系的角速度(即摇摆和偏航角速度),来自舰艇系统的基准信息应该折算到舰载系统的安装位置,所以,为了解决所要研究的问题必须有对象的导航参数及对象运动的动态参数的信息。

目前,舰船上导航参数和运动参数的生成是由各种测量仪实现的。舰船质心的线速度数据主要来自计程仪,而对于摇摆角、偏航角及其角速度和线速度矢量的动态分量,则使用专门的陀螺平台罗经。当对舰载系统的初始对准精度的要求更加严格时,这一解决问题的途

径是行不通的。分析表明^[36],当舰船的导航设备组成中有捷联惯性导航系统才更有效解决该问题。在这种情况下,对象的线速度、线位移以及摇摆和偏航角速度在地理坐标轴中的分量在捷联惯性导航系统中生成。与其他导航测量仪不同,捷联惯性导航系统所要求的精度不仅在低频,而且能在高频生成舰船角运动和线运动参数变化矢量分量的信息。同时应该指出,在有效加速度的二次积分水平上,限制舰船系统与用户舰载系统的相互作用可降低扰动的影响,如振动、摇摆中舰体的变形、信息同步误差等。

3. 运动控制问题

目前,许多类型舰船的自动控制系统都包含自动驾驶仪或运动自动控制装置和动态定位装置,从而能确保解决如保持舰船在给定的航迹上、在给定点的动态定位等问题。

在各种不受水文气象实质性限制的使用条件下,为了使舰船与给定的运动航迹偏离最小,在现代的自动驾驶仪和动态定位装置的控制律中不但引入了标准的航向与位置坐标数据,而且还引入了其导数及干扰力和力矩估计的信息^[27,28,47]。

在文献[28,37]中,根据用于使舰船分别与给定运动航迹^[28]和动态定位点^[37]的线(横向)偏差和角(航向)偏差极小化的质量均方根准则来研究运动自动控制装置的优化问题。以下是研究导航设备的不同组成方案。

(1) 标准导航设备(陀螺罗经、计程仪、GLONASS 卫星导航系统差分模式的接收机及风参数测量仪)。

(2) 同样是标准导航设备,不过由陀螺平台罗经替代陀螺罗经,它可以额外生成航向角速度、摇摆角角速度与卫星导航系统数据,并一同生成舰艇质心线速度矢量的分量及线加速度。

(3) 同样是标准导航设备,不过由中等精度水平的捷联惯性导航系统替代陀螺平台罗经。

通过分析这些问题的数值仿真结果表明,在不受水文气象实质性限制的条件下使用捷联惯性导航系统是最有效的。这时,最优控制律的形成不但是基于惯性参数量测量,而且基于舰艇运动的动态参数量测量。

尽管制造具有最优控制律的自适应自动驾驶仪和动态定位装置非常迫切,特别是对于高机动性舰船,但是它们暂时在舰船上没有得到应用。在许多国家的专用船舶(水文地理的、搜索用的等)上已经使用自适应自动驾驶仪和动态定位装置,但是由于目前没有低成本的捷联惯性导航系统,它们的信息保障是由标准导航设备辅以水声计程仪、垂直陀螺仪、偏航角角速度传感器及其他一些测量仪来完成的。这无疑增大了重量轮廓尺寸参数、成本,降低了信息的可靠性。

由分析得出,导航与运动控制问题以及各种舰船用户舰载仪器的初始对准、标定和稳定问题的信息保障要求连续生成导航参数和动态参数。对导航参数的生成精度的最严格要求源于保障海上运动对象航行导航安全问题;而对动态参数生成精度的要求源于舰船用户舰载仪器的初始对准和标定问题。

目前,在舰船上已使用各种陀螺仪表装置及其他解决个别问题的运动参数测量仪。但是舰船运动参数在其线位移和角位移的低频区域及高频区域时,有利于所有舰船用户的最有效和通用的测量仪是基于捷联惯性测量模块和卫星导航系统接收机的组合式定向与导航系统。为了保证组合式定向与导航系统的使用特性,特别是为了有效解决海上运动对象在通过狭窄航道时的运动自动控制问题、缩减重量轮廓尺寸参数、降低其成本,在其组成中必须包含作为操作图形与雷达信息源的电子海图导航信息系统。这时适宜在基于电子海图导航信息系统的小型船舶的组合式定向与导航系统中实现所有导航量测量的集成。

不同集成水平的组合式系统已经在世界的航空、导弹技术中得到实际应用。例如,近些年制造的 LN-100G 型(美国 Litton 公司)和 H-764G 型(美国 Honeywell 公司)组合式定向与导航系统,其组成中均使用激光陀螺捷联惯性导航模块。对于海上对象来说,组合式定向与导航系统是未来导航设备发展方向。设想在 21 世纪的舰船上,它们将是未来组合式导航与控制系统,也就是作为世界知名“组合式舰桥”型系统的更高集成度舰船系统(德国 Anschutz 公司的 NAUTO CONTROL 型)的信息基础。

第 1 章研究组合式定向与导航系统的用途、所能解决的问题和构

建原理,并且引入了捷联惯性测量模块、卫星导航系统接收机的功能算法,确定了电子海图导航信息系统的用途和所能解决的问题。

第2章推导不同类型陀螺的捷联惯性测量模块的误差数学模型,组合式定向与导航系统在对准模式、标定模式以及自主工作模式和监测模式的误差模型。

第3章研究组合式定向与导航系统基本模块,包括捷联惯性测量模块的敏感元件、卫星导航系统接收机和电子海图导航信息系统的研制现状及问题。列出对不同类型舰船的现有要求和组合式定向与导航系统的组成。

第4章介绍基于静电陀螺、激光陀螺和光纤陀螺、捷联惯性测量模块以及基于角加速度测量仪的无陀螺惯性测量模块的组合式定向与导航系统在生成海上运动对象导航参数和动态运动参数时的精度分析结果。对于所研究的每一个组合式定向与导航系统都推导了数学模型、误差的解析表达式,给出了误差在计算机上的数值仿真结果。

在此作者要感谢俄罗斯科学院院士、导航与运动控制科学院主席 V. G. 别什霍诺夫,由其主编本书才得以出版;还感谢 V. Z. 古希斯基, S. P. 德米特里耶夫和 L. P. 涅谢纽科教授,以及现代捷联惯性测量模块研制领域的顶尖专家 L. P. 斯达拉谢里采夫和 S. G. 罗曼年科,与他们就本书中所研究问题的多次交谈和讨论对本书的内容以及表述形式产生了实质性的影响,并且他们在阅读手稿的过程中提出了许多意见和建议,无疑促进了本书的完善。

本书的此次再版,修正了发现的错误,明确了算法,引入了基于静电陀螺、激光陀螺和光纤陀螺捷联测量模块的组合式定向与导航系统的新的精度分析结果,并且列出了地球重力场异常的数学模型。

主要符号的意义如下。

$O_e i_1 i_2 i_3 (O_e \xi_* \eta_* \zeta_*)$ ——计算用惯性坐标系;
 $O_e e_1 e_2 e_3 (O_e \xi_e \eta_e \zeta_e)$ ——地面导航坐标系;
 $O_e m_1 m_2 m_3 (O_e \xi_m \eta_m \zeta_m)$ ——与位置点子午线固连的赤道坐标系;
 $O_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3} (OENh)$ ——轴的地理方位水平坐标系(地理跟踪坐标系);

$x_b y_b z_b$ ——与测量单元固连的右手正交坐标系;

q_1, q_2, q_3 ——与陀螺动量矩矢量固连的右手正交坐标系；

x_0, y_0, z_0 ——与对象壳体固连的右手正交坐标系；

C_j^i ——确定右手正交坐标系相互方位的方向余弦矩阵；

φ, λ, h ——对象所在位置的地理(大地测量)纬度、经度和高度；

V_E, V_N, V_h ——对象相对地球的线速度的东向、北向、天向分量；

K, ψ, θ ——对象的航向角、纵倾(纵摇)角、侧倾(横摇)角；

ξ_g, η_g, ζ_g ——垂线的倾斜分量及大地水准面的起伏；

δ_g ——重力异常；

$\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h$ ——对象所在位置纬度、经度和高度的生成误差；

$\Delta V_E, \Delta V_N, \Delta V_h$ ——对象相对地球的线速度的东向、北向、天向分量的生成误差；

$\Delta K, \Delta\psi, \Delta\theta$ ——对象的航向角、纵倾(纵摇)角、侧倾(横摇)角的生成误差；

β, γ ——垂线的模拟误差；

$A_{\gamma b} = [\beta_s \quad \gamma_s \quad \alpha_s]^T$ ——表征各轴地理方位 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ (ENh) 水平坐标系模拟(构建)的总误差的矢量；

$A_{iq} = [\beta^* \quad \gamma^* \quad \alpha^*]^T$ ——表征惯性坐标系模拟误差的矢量；

$\delta\omega_{qE}, \delta\omega_{qN}, \delta\omega_{qh}$ ——与陀螺敏感轴固连的坐标系 q_1, q_2, q_3 的漂移在水平坐标系各轴上的投影；

$\delta a_E, \delta a_N, \delta a_h$ ——加速度计表误差在水平坐标系 ENh 各轴上的投影；

$\omega_E, \omega_N, \omega_h$ ——水平坐标系 ENh 旋转角速度各分量；

n_E, n_N, n_h ——表观加速度矢量 n 在水平坐标系 ENh 各轴上的投影。

第1章 舰船用组合式定向与导航系统的结构和算法

1.1 用途、所解决的问题与结构

近年来的研究表明,21 世纪舰船导航设备的基础应该是组合式定向与导航系统。用于海上运动对象的包含有捷联惯性测量模块、GPS/GLONASS 卫星导航系统接收机和电子海图导航信息系统的组合式定向与导航系统,其结构原理图如图 1.1 所示。

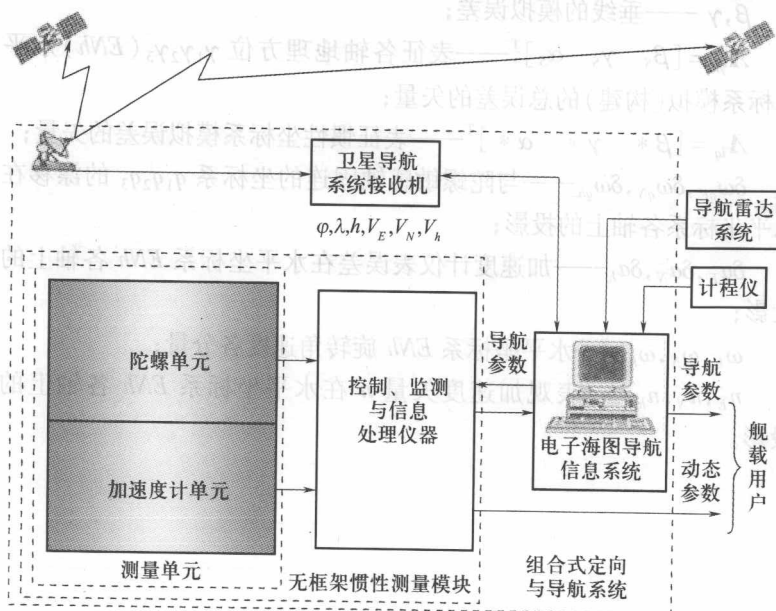


图 1.1 舰船用多通道定向与导航系统结构原理图

组合式系统的必要组成是由以下总体构想决定的。众所周知,捷

联惯性测量模块是具有高使用特性的针对海上运动对象的运动参数的有效通用测量仪。它的基础是直接安装于对象壳体上的测量单元,通过惯性敏感元件生成关于测量单元安装位置处的表观加速度矢量的分量(加速度计单元)和旋转运动参数的连续信息。在使用不受控三阶陀螺(方位陀螺)情况下,这些信息就是其动量矩矢量的方位参数;在使用角速度传感器的情况下,这些信息就是角速度矢量的各分量;而在使用角加速度计或分布式线加速度计(角加速度测量仪)代替陀螺的情况下,这些信息就是角加速度矢量的各分量。这些初始信息可以在捷联惯性测量模块的控制、检测与信息处理的仪器中,按捷联惯导系统算法生成测量单元安装位置处导航参数和动态参数的连续值,由于敏感元件有不可避免的仪表误差,这些测量值的误差会随时间而积累,这就是要在组合式定向与导航系统中引入卫星导航系统接收机的原因。为了提高舰船用组合式定向与导航系统的可靠性,减小其重量轮廓尺寸参数,降低其成本,同样可以使用无外壳的、嵌入到捷联惯性测量模块的电子海图导航信息系统或卫星导航系统接收机,这些也已经出现在现代的航空组合系统中。

为了在固定的时间间隔内保障信息的自主性,在战舰的组合式定向与导航系统中使用相对计程仪的数据来衰减捷联惯性测量模块误差的固有振荡是适宜的,这就必须将它们列入未来舰艇的导航设备组成中。但是对于不久的将来海上船舶来说,没有必要构建基于组合式定向与导航系统的导航设备。

设想,对于未来航海用组合式定向与导航系统来说,在其组成中引入能够保证有效提高航行安全的电子海图导航信息系统用作操作地图和雷达信息源是具有代表性的。对于小型船舶来说,适宜用基于电子海图导航信息系统的计算装置集成组合式定向与导航系统中的所有导航量测量。

与标准的舰船用导航设备相比,组合式定向导航系统的特别之处是惯性模块、卫星导航系统接收机和电子海图导航信息系统的数据的集成程度较深。至今,在组合式定向与导航系统得到实际应用的航空与导弹技术中,其定义已经复杂化^[72]。在航空组合式定向与导航系统中分松组合系统和紧组合系统(对应为卫星导航系统接收机与捷联惯性测量单元的弱相互联系和强相互联系)。第一种情况中(图 1.2,