

动力定位船舶 协调编队控制

Coordinated Formation Control
for Dynamic Positioning Ships

焦建芳 王光 顾禹 孙行衍◎著



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>

动力定位船舶协调编队控制

焦建芳 王光 顾禹 孙行衍 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是一部以动力定位船舶为研究对象,研究其相互之间存在通信约束以及受到海洋环境扰动的协调编队控制方法的著作,是作者近年来对动力定位船舶协调控制及其相关领域研究成果的积累和总结,同时吸收了国内外相关参考文献的精华部分。本书通过清晰的章节结构,由浅入深地介绍动力定位船舶的协调编队控制方法,并给出了相应编队控制方法的仿真验证结果,图文并茂地向读者展现了动力定位船舶的协调编队控制技术的精髓。

本书可作为协调编队控制领域和船舶控制工程领域的科学工作者和工程技术人员的参考书,也可供自动控制类及船舶工程类的高校师生选用,同时也适合对船舶协调编队控制技术感兴趣的其他专业人员阅读参考。

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

动力定位船舶协调编队控制/焦建芳等著. —北京:电子工业出版社,2017.8
ISBN 978-7-121-32436-9

I. ①动… II. ①焦… III. ①动力定位—船舶操纵—编队—控制系统 IV. ①U675.6②U664.82
中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第190436号

责任编辑:徐蔷薇 特约编辑:劳娟娟

印 刷:北京季峰印刷有限公司

装 订:北京季峰印刷有限公司

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:720×1000 1/16 印张:13.25 字数:211千字

版 次:2017年8月第1版

印 次:2017年8月第1次印刷

定 价:59.00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zits@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:xuqw@phei.com.cn。

前 言

随着对海洋资源的不断开发和利用，现已逐渐从浅海域向深海域跃进，伴随而来的是对海上作业的效率和对海洋资源开发的自动化程度提出了更高的要求。尽管船舶动力定位技术发展迅速，然而单艘船舶的作业能力毕竟有限，并且由于能源的限制，单艘船舶可作业的时间比较短。在实际应用中往往需要多艘船舶相互协调，共同完成复杂的海事任务。另外，相对于单艘船舶，多艘船舶相互协调作业有着许多潜在的优势：可以提高作业的效率，具有容错性强和适应性强等优点。因此，对多艘动力定位船舶的协调编队控制的研究具有重要的实际应用价值。

本书是一部以动力定位船舶为研究对象，研究其协调编队控制方法的著作，是作者近年来对动力定位船舶协调控制及其相关领域的研究成果的积累和总结，同时吸收了国内外相关参考文献的精华部分。本书通过清晰的章节结构，由浅入深地介绍动力定位船舶的协调编队控制方法，并给出了相应编队控制方法的仿真验证结果，图文并茂地向读者展现了动力定位船舶的协调编队控制技术的精髓。

本书共分 6 章。第 1 章为绪论，介绍了动力定位船舶的相关定义和原理，并介绍了船舶协调编队控制的背景意义及其研究现状；第 2 章介绍了动力定位船舶的数学模型、海洋环境模型以及常用的引理和数学基础知识；第 3 章介绍了基于虚拟领航者的动力定位船舶协调编队控制方法，该方法是基于无源性进行设计的；第 4 章介绍了以动力定位船舶相互之间的通信为有向拓扑图的协调编队控制方法，并在此基础上针对多种海上作业模式设计了混杂协调编队控制方法；第 5 章介绍了动力定位船舶受到未知定常海洋环境扰动下的鲁棒协调编队控制方法，该

方法是基于自适应反步法设计的；第6章介绍了动力定位船舶受到未知时变海洋环境扰动下的鲁棒协调编队控制方法，该方法是基于交叉耦合同步控制进行设计的。

本书的主要内容由渤海大学焦建芳完成，渤海大学王光、东北石油大学孙衍以及中船电子科技有限公司顾禹等作者参与了本书部分章节的编写。作者在研究过程中得到了哈尔滨工程大学付明玉教授的认真指导，并对本书提出了很多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

本书可作为协调编队控制领域和船舶控制工程领域的科学工作者和工程技术人员的参考书，也可供自动控制类及船舶工程类的高校师生选用，同时也适合对船舶协调编队控制技术感兴趣的其他专业人员阅读参考。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金（编号为61503040）的资助。

由于作者水平有限，书中难免存在一些不足和错误之处，真诚欢迎广大读者批评指正。

著者

2017年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 动力定位船舶简介	1
1.2 动力定位原理介绍	2
1.3 船舶协调编队的背景和意义	8
1.4 协调编队控制研究现状	10
1.4.1 协调控制概述	10
1.4.2 协调编队的国内外研究现状	11
1.4.3 多船协调编队的国内外研究现状	17
第 2 章 动力定位船舶数学建模与预备知识	21
2.1 引言	21
2.2 参考坐标系	22
2.3 船舶运动数学模型	26
2.3.1 船舶运动学模型	26
2.3.2 船舶动力学模型	37
2.3.3 仿真研究中的船舶模型	45
2.4 海洋环境模型	48
2.4.1 风要素与载荷模型	48
2.4.2 流要素与载荷模型	52
2.4.3 波浪要素与载荷模型	54
2.5 相关引理和数学基础知识	69
2.5.1 李雅普诺夫稳定性	69

方法	2.5.2 图论	71
第3章	基于虚拟领航者的多 DP 船无源协调编队控制	73
3.1	引言	73
3.2	基于无源性的协调控制	75
3.2.1	基本定义	75
3.2.2	无源协调控制算法	77
3.2.3	无源协调控制稳定性分析	81
3.3	基于虚拟领航者的多 DP 船无源协调编队算法	84
3.3.1	协调控制器设计的总体思路	84
3.3.2	导引系统的设计	87
3.3.3	多 DP 船的协调编队控制器设计	90
3.3.4	稳定性分析	93
3.4	仿真试验	97
第4章	有向通信拓扑下的多 DP 船无源协调编队控制	106
4.1	引言	106
4.2	有向通信拓扑下的多 DP 船无源协调编队算法	108
4.2.1	有向图的基本知识	108
4.2.2	欧拉-拉格朗日系统的无源性	110
4.2.3	有向通信下的多 DP 船无源协调编队控制	113
4.3	有向通信拓扑下的多 DP 船混杂协调编队算法	122
4.3.1	DP 船的多任务模式	122
4.3.2	混杂控制的基本概念	123
4.3.3	多任务模式的 DP 船混杂协调编队控制	124
4.4	仿真试验	128

第 5 章 基于虚拟领航者的多 DP 船鲁棒协调编队控制	135
5.1 引言	135
5.2 基于虚拟领航者的多 DP 船协调编队控制	136
5.2.1 虚拟领航者的协调策略	136
5.2.2 反步法	139
5.2.3 多 DP 船的协调编队控制算法	140
5.3 基于虚拟领航者的多 DP 船鲁棒协调编队算法	146
5.3.1 自适应控制	146
5.3.2 多 DP 船鲁棒协调编队控制算法	146
5.4 仿真试验	154
第 6 章 基于交叉耦合同步的多 DP 船鲁棒协调编队控制	160
6.1 引言	160
6.2 基于交叉耦合同步的多 DP 船协调编队控制	162
6.2.1 交叉耦合同步方法	162
6.2.2 多 DP 船的协调编队控制	163
6.2.3 稳定性分析	165
6.3 基于交叉耦合同步的多 DP 船鲁棒协调编队算法	168
6.3.1 反步滑模控制方法	168
6.3.2 多 DP 船的鲁棒协调编队控制	172
6.3.3 稳定性分析	178
6.4 仿真试验	184
参考文献	191

第 1 章

绪 论

1.1 动力定位船舶简介

海洋是潜力巨大的资源宝库，也是支撑未来发展的战略空间。我国海域辽阔，大陆海岸线长达 18000 多 km，管辖主权海域面积约 3000000km²，还拥有国际海底区域 75000km² 的专属勘探开发区。海洋资源丰富，海洋生物、石油天然气、固体矿产、可再生能源、滨海旅游等领域开发潜力巨大。国务院分别于 2003 年和 2012 年印发了《全国海洋经济发展规划纲要》和《全国海洋经济发展“十二五”规划》，对新世纪我国的海洋经济发展进行了科学的规划。地球表面约 71% 的面积被海洋所覆盖，从大陆海岸线到洋底最深的海沟，其水深范围跨度为 10m~11000m。世界范围内海洋的平均深度超过 3000m，其中我国领海所处的太平洋海域的平均深度为 4280m。由此可见，深水海区必将成为我国未来发展海洋经济的主战场。

为了利用浩瀚海洋中的丰富资源，人类利用自己的智慧不断创造出各种“工具”。船舶作为人类从事海洋活动的一种重要载体，随着人类活动范围的不断增大，其也从最初的木质帆船演变为百万吨的钢铁巨轮。为了使船舶在海洋中保持特定的位置，“锚”是广为采用的一种最为普遍的方法。

然而，随着探索海域水深的不断增加，当水深超过 600m 时这种锚泊方法的成本和可行性都面临着新的挑战。伴随着 20 世纪五六十年代近海石油工业的兴起和大洋科学钻探的进行，一种称为动力定位（Dynamic Positioning, DP）的特殊船舶控制技术在美 国率先诞生，随后法国、英国、德国、挪威、日本等国家也相继研制成功同类产品。国际海事组织（International Maritime Organization, IMO）给出的船舶动力定位相关概念定义如下。

（1）动力定位船舶：一种仅依靠推进器的推力调节，能够自动保持位置（固定位置或预设航迹）的船舶。

（2）动力定位系统：动力定位船舶所需配备的全部设备，包含三大子系统，分别为动力系统、推进系统和动力定位控制系统。

（3）动力定位控制系统：使船舶实现自动定位所需的全部控制元件和系统，包含软件和硬件两部分。动力定位系统的组成如下：①计算机系统/操纵杆系统；②传感器系统；③显示系统（操作面板）；④位置参考系统（Positioning Reference Systems, PRS）；⑤相应配套的电缆和敷设线路。

1.2 动力定位原理介绍

DP 控制是一种特殊的船舶运动控制问题，其他如船舶航向自动舵控制、船舶航迹控制、船舶减摇控制等也都属于船舶运动控制问题。从自动控制原理的角度来看，DP 控制系统方块图可以用图 1.1 加以表示。其中 DP 船舶作为特定的被控对象，其运动状态中的位置、航向和速度是需要加以控制的被控量，由制导、导航与控制系统（Guidance, Navigation and Control, GNC）组成的控制装置负责完成对被控对象施加控制作用。制导系统负责计算生成 DP 运动控制所需的参考指令信号（如位置、速度和加速度等），可利用最优化理论根据不同任务要求生成船舶运动最优路径或航迹，实现如最优能耗、最短航行时间、天气最优航线、避碰、编队航行等

功能。导航系统则通过确定船舶当前位置、姿态、速度、加速度、航向和航程等信息实现对船舶运动的指引，为控制和制导系统提供各种船舶运动和环境参数的实时信息。控制系统则根据 DP 任务设定确定完成任务所必需的控制力/力矩，期望控制目标的选择通常与制导系统中的最优轨迹的生成协调进行^[156]。

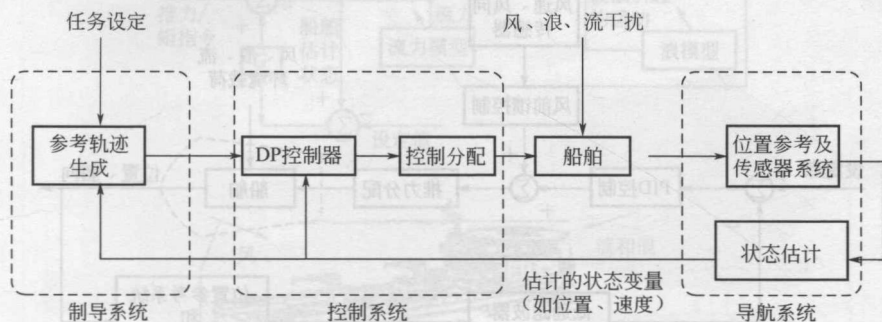


图 1.1 DP 控制系统方块图^[156]

20 世纪 60 年代，最初应用于深水钻井船的 DP 系统还较为简单，早期 Honeywell 的自动位置保持（Automatic Station Keeping, ASK）系统的原理框图如图 1.2 所示，这种基于解耦 PID 控制方法的系统占据了早期的 DP 市场，系统主要应用于小型科研调查用船舶。1975 年左右，Kongsberg Albatross 提出了采用卡尔曼滤波技术和现代控制理论的新一代 DP 系统^[1]，原理框图如图 1.3 所示，该方法很快也被 Honeywell^[2]和 GEC^[3]的 DP 产品所采用。20 世纪 70 年代末 80 年代初，研制适用于船型钻井船和半潜式钻井船的高可靠性 DP 系统成为业内的热点，由此 DP 系统开始成型并大量装备实船，应用实践中产生的具体问题促使人们进行更为深入的研究，从而不断提高 DP 系统的控制性能。随着非线性控制理论在船舶控制领域中的应用和发展，20 世纪 90 年代中后期 Fossen、Sørensen 等将诸如非线性 PID 控制、无源非线性观测器和反步法设计等方法应用于 DP 的控制技术研究中^[4-6]，这使得 DP 系统的控制性能产生了又一次飞越。1995 年全球卫星定位系统（Global Positioning System, GPS）正式投入运行，这种全球

位置参考系统同样也促进了 DP 系统的使用和发展。进入 21 世纪,科学技术的发展促使 DP 系统中相关技术进一步完善,目前主流的 Kongsberg Maritime DP 系统的原理框图如图 1.4 所示。

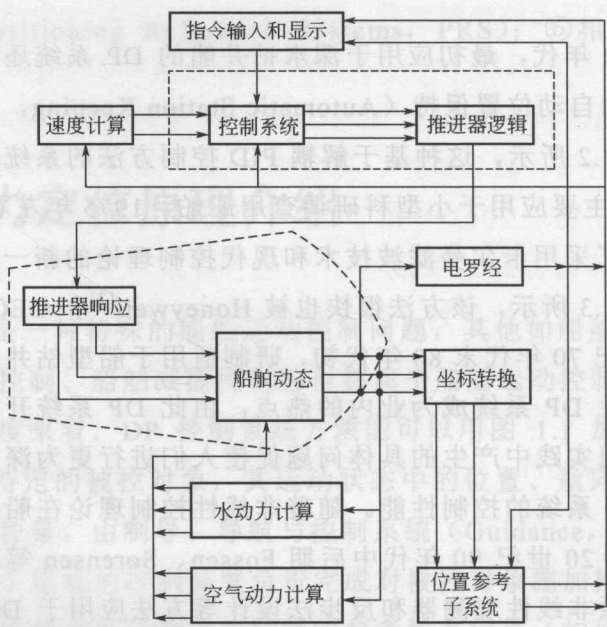
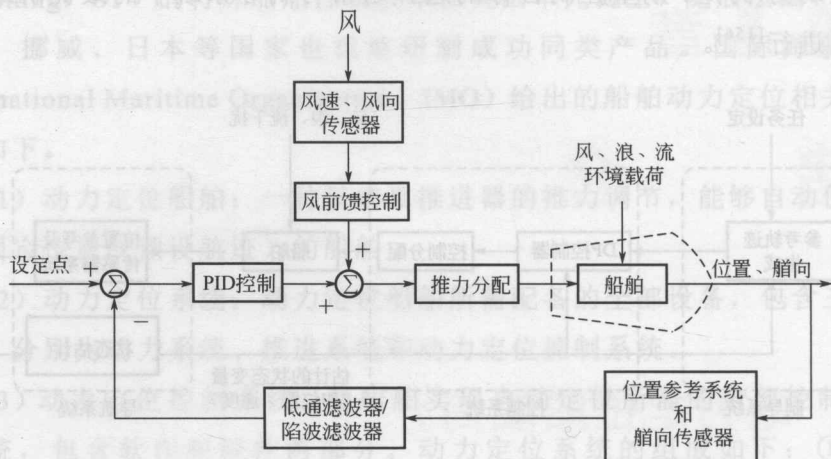
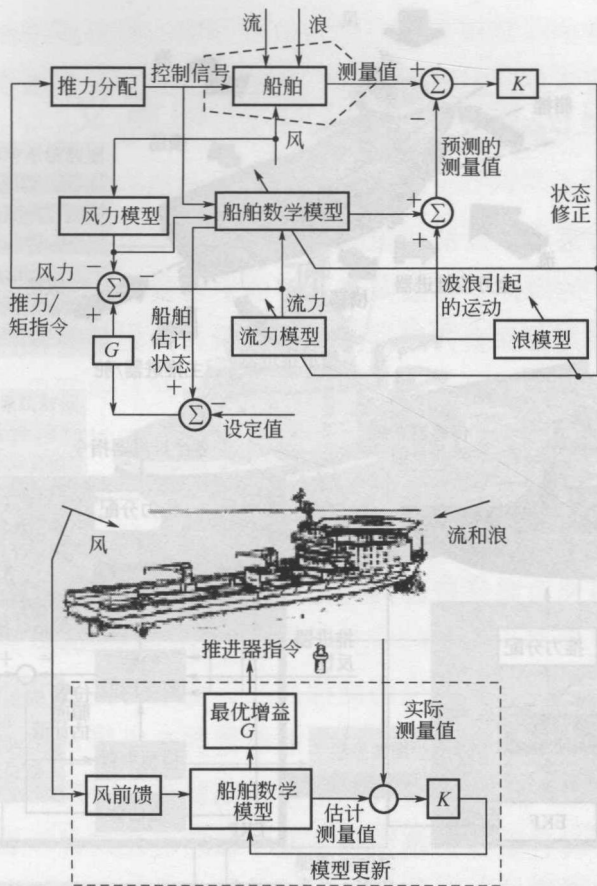


图 1.2 Honeywell ASK 系统的原理框图^[9]

图 1.3 Kongsberg Albatross DP 系统的原理框图^[1]

对比三者可见，虽然经过 50 余年的发展研究，DP 系统的基本原理并未发生重大的改变。但是随着计算机技术和相关学科理论的发展，目前的船舶 DP 技术中所涉及的信号处理、控制理论、软件开发和系统集成等关键技术的理论和方法更加全面和完善，DP 系统的功能更趋于多样化和智能化。DP 技术始终处于发展之中，船舶柴动力系统、推进器系统、控制系统、位置参考和传感器系统、人机交互等诸多方面的技术都在不断进步。海洋与极地工程国际会议（International Offshore and Polar Engineering Conference），海洋、离岸及极地工程国际会议（International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering），海洋技术学会动力定位会议（Marine Technology Society: Dynamic Positioning Conference, MTS: DP

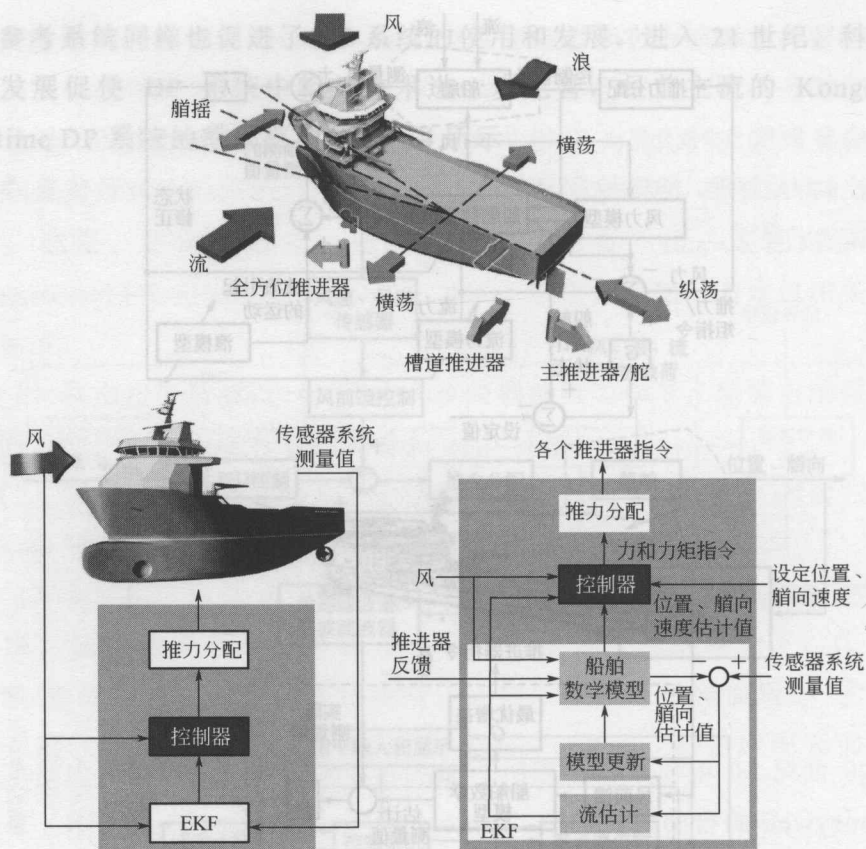


图 1.4 Kongsberg Maritime DP 系统的原理框图^[10]

Conference) 和近海技术会议 (Offshore Technology Conference, OTC) 等国际学术交流会议为 DP 相关技术的新发展提供了有效的交流平台。图 1.5 所示为一种较为详细的典型 DP 系统的原理框图。全船控制的集成化使得 DP 成为综合船舶控制系统中的重要功能之一，各种作业环境的新需求和技术的不断创新为 DP 相关研究带来新的活力。北极蕴藏着地球上近 20% 的剩余石油和天然气能源，冰区海洋油气开发的需求前景使得海冰条件下船舶 DP 相关技术的研究正在成为该领域新的研究热点^[7]。2011 年 OTC 成立了专门针对北极地区能源开发技术的北极技术会议 (Arctic Technology Conference, ATC)。随着无线网络技术和智能移动终端设备的发展和普及，传统 DP 系统的构成模式已发生了新的变革，演变出移动式 DP 系统^[8]等新

形式。

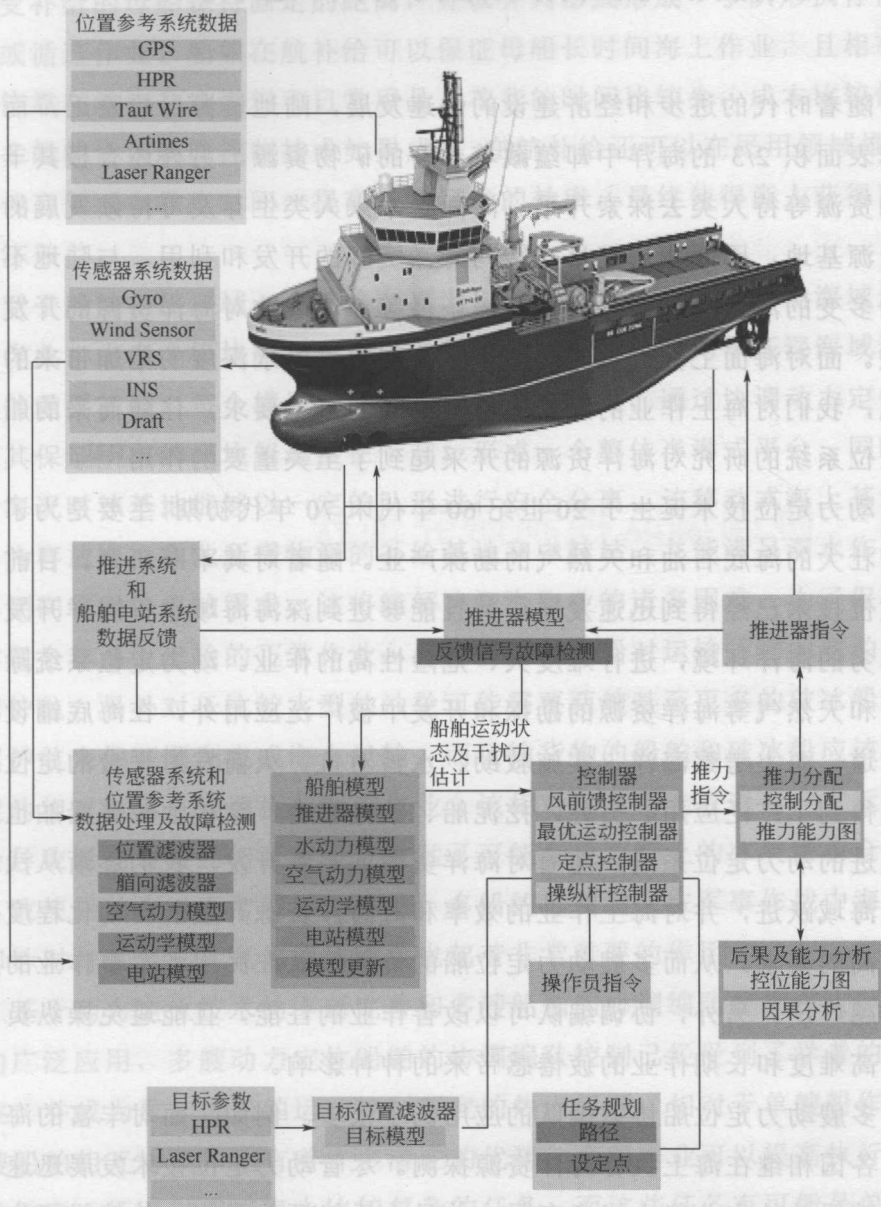


图 1.5 典型 DP 系统的原理框图^[11]

1.3 船舶协调编队的背景和意义

随着时代的进步和经济建设的快速发展，陆地资源日趋匮乏，而占到地球表面积 2/3 的海洋中却蕴藏着丰富的矿物资源，另外还有极其丰富的生物资源等待人类去探索开采。海洋是未来人类生存及可持续发展的战略性资源基地，因此我们把目光转向海洋资源的开发和利用。与陆地不同，复杂多变的海洋环境、恶劣的气候条件等都将导致对海洋资源的开发困难重重。面对海面上变幻莫测的惊涛骇浪和随着海水深度的增加带来的气候变化，我们对海上作业的船舶提出了更高的技术要求，伴随而来的船舶动力定位系统的研究对海洋资源的开采起到了至关重要的作用^[12]。

动力定位技术诞生于 20 世纪 60 年代末 70 年代初期，主要是为了满足不断壮大的海底石油和天然气的勘探产业。随着对其不断研究，目前的动力定位技术已经得到迅速发展，并且能够进到深海海域进行海洋开发，抵抗恶劣的海洋环境，进行难度大、危险性高的作业。动力定位系统除了在石油和天然气等海洋资源的勘探和开发中被广泛应用外，在海底铺设电缆和管道、海上考察海洋、实施救助、水雷对抗、火箭发射平台的定位等领域也得到了广泛应用。另外，挖泥船、钻井平台、穿梭油轮等船舶也采用了先进的动力定位系统。随着对海洋资源的不断开发，我们逐渐从浅海域向深海域跃进，并对海上作业的效率和对海洋资源开发的自动化程度提出了更高的要求。从而多艘动力定位船的协调编队在民用和军事作业的应用越来越广泛。另外，协调编队可以改善作业的性能，且能避免操纵员因作业的高难度和长期作业的疲倦感带来的种种影响。

多艘动力定位船协调编队的应用例子很多。例如，面对丰富的海洋资源，各国相继在海上执行海洋资源探测。尽管动力定位技术发展迅速，然而单艘船舶的作业能力毕竟有限，并且由于能源的限制，单艘船可作业的时间比较短，而多艘船舶如果以一定的队形共同执行资源探测任务，这样勘探的范围相对于单艘船舶作业就会成倍增加，从而可以提高勘探的效率，

保证高质高效地完成任任务。船舶执行在航补给任任务时，即将燃料、物资等货物由补给船传送给受补给船，需要一艘或多艘装有动力定位系统的补给船和受补给的母船保持固定的距离，并以并列形式形成一字队形执行协调定位或循迹作业。船舶在航补给可以保证母船长时间海上作业，且相对于船舶停靠在港口补给燃料和日常用品，花费的时间比较少，成本比较低。未来多船的协调编队控制技术如果成熟，在航补给还可以在民用领域推广，从而使商船减少靠岸时间，提高货物运输的效率，最终使得商人获得可观的经济效益。

对于船舶在深海域，尤其是在离港口较远且环境相对恶劣的海域进行长期作业，由多个模块船相连形成的移动式海上基地成为保证深海域海上作业的重要基地。每个模块船都装有动力定位系统，通过协调动力定位技术使其保证所有的模块船连接在一起，形成一个整体半潜式平台。同时在恶劣海况时该基地能够以一定的队形进行安全分离。该移动式海上基地可以作为存放海上作业所需物资的补给基地和中转站，并能满足深水作业船风暴期间临时停靠的需求，这将能解决深海作业的诸多困难。为了保证船舶实现全年海上运输的正常作业，冬季需要破冰船对运输货物的船舶进行保驾护航，另外对于比较大型的油轮可能需要两艘甚至更多的破冰船进行保驾护航来保证顺利完成海上运输。而运输货物的船舶和破冰船应该保持固定的相对距离，协调执行循迹作业。该相对距离要选取适当，太近了可能会导致船舶之间的相互碰撞，太远了可能会导致海上的冰块重新合在一起，致使船舶不能正常航行。另外，多船的协调编队在军事作战中海上巡逻和针对海上突发状况的搜捕营救也起着非常重要的作用。

基于动力定位技术的不断完善和多艘船舶的协调编队控制在实际作业中的广泛应用，多艘动力定位船舶的协调编队控制已经受到了学者的广泛关注，并成为数年内船舶运动控制研究的热点问题。相对于单艘船作业，多艘船舶相互协调作业有着许多潜在的优势：多船作业可以提高执行某作业的效率，还可以完成海上比较复杂的任务，而这些任务有可能是单艘船根本无法完成的。另外，多船协同作业还具有容错性和适应性强等优点。所以研究多艘动力定位船舶的协调编队控制具有很大的实际应用价值。