

The Principle of Ship Dynamic Positioning System

船舶动力定位 系统原理

 徐海祥 冯辉等 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



本书获武汉理工大学研究生教材建设基金资助

船舶动力定位 系统原理

The Principle of Ship Dynamic
Positioning System

徐海祥 冯辉等 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统地论述了船舶动力定位系统的原理及其关键技术。全书一共分为6章,第1章概述了船舶动力定位系统的定义、发展历程及工作原理。第2章详细介绍了船舶动力定位系统的数学模型,包括船舶动力学和运动学模型,以及包括风、浪、流在内的环境力计算模型。第3章介绍了传感器系统,并侧重介绍了包括卡尔曼滤波、非线性无源滤波、 H_{∞} 滤波和渐消记忆滤波在内的状态估计方法,在此基础上对各种滤波算法的参数设置及性能进行了实验仿真研究。第4章介绍了船舶动力定位控制系统,包括传统PID控制、LQ控制、智能模糊控制等,并对其控制性能进行了实验仿真与结果分析。第5章从推进器模型出发,介绍了推力分配系统中的推力损失机理及计算方法、推力分配原理及方法,并对推力分配方法进行了实验仿真。第6章介绍了船舶动力定位能力分析相关的知识,并进行了具体的案例分析。

本书是在总结船舶动力定位领域国内外最新的著作和科研成果的基础上,结合作者及所在科研团队多年积累的丰富教学、科研及项目开发经验,倾心撰写的具有较高参考意义和价值的著作。本书可以作为船舶与海洋工程专业在校本科生或研究生的教学参考书,也可供从事船舶与海洋工程领域的科研人员、工程技术人员使用,同样适用于对船舶动力定位技术感兴趣的其他专业技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

船舶动力定位系统原理/徐海祥等著. —北京:
国防工业出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-118-11221-4

I. ①船… II. ①徐… III. ①船舶定位—动力
定位 IV. ①U675.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第326266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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 224 千字
2016年12月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 56.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

当今世界面临着严重的资源短缺问题,而海洋中蕴藏着丰富的自然资源,因此世界各大国都竞相将战略重心转移到海洋领域,投入了大量的人力和物力进行海洋工程领域的科学研究与技术开发。我国在党的十八大报告中明确提出“提高海洋资源开发能力,发展海洋经济,保护海洋生态环境,坚决维护国家海洋权益,建设海洋强国”的国家海洋发展战略。因此,大力发展先进的海洋工程装备技术,对提高我国海洋开发能力,维护国家海洋权益,保卫国家海洋安全都具有十分重要的战略意义。船舶动力定位系统是深海工程的关键支持系统,已广泛应用于钻井平台、供应船、铺管船、挖泥船、消防船、科研考察船、潜艇、布雷艇、扫雷艇等。

国外高校、研究所和企业从 20 世纪 60 年代开始进行船舶动力定位系统的研究与开发,目前欧美海洋强国引领着世界深海船舶动力定位系统核心技术的发展,垄断了国际动力定位产品市场。国内船舶动力定位系统的研究起步较晚,自主研发的动力定位系统在定位精度和可靠性等方面与国外相比还有很大差距。

目前国内外出版的有关船舶动力定位方面的书籍较少。最早由美国 M. J. Morgan 教授撰写,并被译成中文出版发行的《近海船舶的动力定位》(1984),为我国学者学习与研究动力定位提供了有益的入门参考,但是由于出版年代久远,书中涉及到的技术和方法现已存在一定的时滞性;随后,挪威科技大学的 Thor I. Fossen 教授分别出版了《Guidance and Control of Ocean Vehicles》(1994)、《Marine Control Systems》(2002)、《Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control》(2011),船舶动力定位被作为船舶控制的组成部分穿插其中,因此关于船舶动力定位的理论比较零散、不成系统,难以让读者对动力定位系统有全面的认识和理解。国内相关的著作仅有哈尔滨工程大学边信黔教授等人撰写的《船舶动力定位》(2011)一书。

本书系统全面地论述了船舶动力定位系统的原理及其关键技术,是作者及研究团队多年来在船舶动力定位系统方面的教学与科研工作的积累和总结,同时汲取了国内外相关领域的重要研究成果,并将该领域最新的理论、方法、技术

以及作者的实践经验融入到该书的每一个章节,力求为读者提供一本具有较高参考价值的书籍。

全书一共分为6章。第1章概述了船舶动力定位系统的定义、发展历程及工作原理。第2章介绍了船舶动力定位系统的数学模型,包括船舶动力学和运动学模型,以及风、浪、流等环境力计算模型。第3章介绍了传感器系统,并重点介绍了包括卡尔曼滤波、非线性无源滤波、 H_∞ 滤波和渐消记忆滤波在内的状态估计方法,在此基础上对各种滤波算法的参数设置及性能进行了实验仿真研究。第4章介绍了船舶动力定位控制系统,包括传统PID控制、LQ控制、智能模糊控制等,并对多种方法的控制性能进行了实验仿真研究。第5章从推进器模型出发,介绍了推力分配系统中的推力损失机理及计算方法、推力分配原理及方法,并对多种推力分配方法的性能进行了实验仿真研究。第6章介绍了船舶动力定位能力分析的原理,并对具体的案例进行了分析研究。

本书的撰写得到了研究团队成员的大力支持,冯辉博士参与了第3章和第5章的撰写,余文翌博士参与了第4章的撰写,赵小仁老师参与了第2章和第5章的撰写,李芬老师参与了第6章的撰写以及全书的审改,江苏科技大学李文娟博士参与了第3章的撰写。同时,本书的撰写也得到了卜德华、许林凯、柯泉冰、祝晨、梁梦瑶、周兴、瞿洋、文武等研究生的大力协助。本书的出版得到了武汉理工大学和国防工业出版社的大力支持。在此一并表示感谢!

本书撰写过程中参考了许多资料,作者已尽可能详细地在参考文献中列出,在此向这些专家学者们深表敬意。同时,若有本书中已引用但是由于疏忽而没有指出资料出处的情况,对此表示诚挚的歉意。

限于作者的经验和水平,书中难免出现不妥之处,诚请广大读者批评指正,及时提出修改意见和建议,以便修订再版,共同为提高本书的质量而努力,为此我们将不胜感激!

徐海祥

2016年10月于武汉理工大学

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 船舶动力定位系统的定义 | 1 |
| 1.2 船舶动力定位系统的发展历程 | 1 |
| 1.2.1 船舶动力定位系统的由来 | 1 |
| 1.2.2 船舶动力定位系统的发展 | 3 |
| 1.3 船舶动力定位系统的介绍 | 6 |
| 1.3.1 船舶动力定位系统的组成 | 6 |
| 1.3.2 船舶动力定位系统的功能 | 8 |
| 1.3.3 船舶动力定位系统的工作原理 | 8 |
| 1.4 船舶动力定位系统的分级 | 10 |
| 1.4.1 船级符号 | 10 |
| 1.4.2 设备的配置 | 12 |
| 参考文献 | 13 |
| 第 2 章 数学模型 | 15 |
| 2.1 船舶运动数学模型 | 15 |
| 2.1.1 坐标系及其转换关系 | 15 |
| 2.1.2 船舶六自由度数学模型 | 17 |
| 2.1.3 船舶平面运动线性数学模型 | 29 |
| 2.1.4 风浪中的船舶操纵运动数学模型 | 31 |
| 2.2 环境力模型 | 32 |
| 2.2.1 环境载荷方向角的定义 | 33 |
| 2.2.2 风载荷模型 | 33 |
| 2.2.3 流载荷模型 | 36 |
| 2.2.4 波浪载荷模型 | 38 |
| 参考文献 | 40 |

| | |
|-------------------------------|----|
| 第3章 传感器系统及状态估计 | 42 |
| 3.1 传感器系统 | 42 |
| 3.1.1 常用传感器介绍 | 42 |
| 3.1.2 传感器数据预处理与数据融合 | 50 |
| 3.2 状态估计原理 | 60 |
| 3.2.1 概述 | 60 |
| 3.2.2 状态估计的研究现状 | 61 |
| 3.3 状态估计中的船舶数学模型 | 63 |
| 3.3.1 环境力模型 | 63 |
| 3.3.2 低频运动数学模型 | 63 |
| 3.3.3 高频运动数学模型 | 63 |
| 3.3.4 测量模型 | 64 |
| 3.3.5 非线性运动数学模型 | 64 |
| 3.3.6 非线性运动模型状态空间形式 | 65 |
| 3.4 卡尔曼滤波 | 65 |
| 3.4.1 卡尔曼滤波原理 | 66 |
| 3.4.2 卡尔曼滤波器设计 | 68 |
| 3.5 自适应滤波 | 70 |
| 3.5.1 渐消记忆滤波 | 70 |
| 3.5.2 H_{∞} 鲁棒滤波 | 72 |
| 3.6 非线性无源滤波 | 74 |
| 3.6.1 数学模型 | 74 |
| 3.6.2 状态估计方程 | 75 |
| 3.6.3 误差动态特性方程 | 76 |
| 3.6.4 增益矩阵 | 77 |
| 3.7 仿真实例与结果分析 | 78 |
| 3.7.1 仿真实验方案 | 78 |
| 3.7.2 仿真结果与分析 | 79 |
| 参考文献 | 96 |
| 第4章 动力定位控制 | 99 |
| 4.1 PID 控制算法 | 99 |
| 4.1.1 PID 控制原理 | 99 |

| | | |
|------------|---------------------|------------|
| 4.1.2 | 数字PID控制算法 | 100 |
| 4.2 | 线性二次型(LQ)最优控制算法 | 102 |
| 4.2.1 | 最优控制原理 | 102 |
| 4.2.2 | LQ控制器设计 | 104 |
| 4.3 | 反步积分控制算法 | 105 |
| 4.3.1 | 反步积分理论基础 | 105 |
| 4.3.2 | 反步积分控制器设计 | 107 |
| 4.4 | 模糊控制算法 | 110 |
| 4.4.1 | 模糊控制系统的基本结构 | 110 |
| 4.4.2 | 模糊控制器设计 | 111 |
| 4.5 | 变海况下的混合切换控制器设计 | 114 |
| 4.5.1 | 海况等级划分 | 114 |
| 4.5.2 | 混合切换控制系统 | 115 |
| 4.6 | 仿真实例与结果分析 | 118 |
| 4.6.1 | PID控制器仿真与分析 | 118 |
| 4.6.2 | LQ控制器仿真与分析 | 120 |
| 4.6.3 | 反步积分控制器仿真与分析 | 123 |
| 4.6.4 | 模糊控制器仿真与分析 | 124 |
| 4.6.5 | 变海况下的混合切换控制器仿真与分析 | 125 |
| | 参考文献 | 134 |
| 第5章 | 推力优化分配 | 137 |
| 5.1 | 推进器模型 | 137 |
| 5.1.1 | 主推进器 | 138 |
| 5.1.2 | 槽道推进器 | 138 |
| 5.1.3 | 全回转推进器 | 139 |
| 5.1.4 | 吊舱推进器 | 139 |
| 5.2 | 推力损失 | 140 |
| 5.2.1 | 轴向流引起的推力损失 | 140 |
| 5.2.2 | 主推和全回转推进器横向流引起的推力损失 | 141 |
| 5.2.3 | 侧推横向流引起的推力损失 | 141 |
| 5.2.4 | 波浪引起的推力损失 | 142 |
| 5.2.5 | 推进器-船体干扰引起的推力损失 | 142 |
| 5.2.6 | 侧推进口形状、格栅及槽道引起的推力损失 | 143 |

| | | |
|------------|---------------------------|------------|
| 5.2.7 | 推进器-推进器之间的干扰引起的推力损失 | 144 |
| 5.2.8 | 降低推力损失的措施 | 145 |
| 5.3 | 推力优化分配模型 | 146 |
| 5.3.1 | 等式约束 | 146 |
| 5.3.2 | 不等式约束 | 148 |
| 5.3.3 | 目标函数 | 150 |
| 5.4 | 推力优化分配问题求解 | 152 |
| 5.4.1 | 广义逆法 | 152 |
| 5.4.2 | 增广拉格朗日乘子法 | 154 |
| 5.4.3 | 线性二次规划法 | 156 |
| 5.5 | 推力分配策略 | 158 |
| 5.5.1 | 快速转向推进器的应用 | 158 |
| 5.5.2 | 偏值 | 161 |
| 5.6 | 仿真实例与结果分析 | 164 |
| 5.6.1 | 常规推进器仿真与分析 | 164 |
| 5.6.2 | 快速转向推进器仿真与分析 | 171 |
| 5.6.3 | 基于二次推力分配的偏值方法仿真与分析 | 175 |
| | 参考文献 | 180 |
| 第6章 | 动力定位能力分析 | 183 |
| 6.1 | 动力定位能力曲线的描述 | 183 |
| 6.2 | 动力定位能力曲线的计算 | 184 |
| 6.2.1 | 环境载荷计算 | 184 |
| 6.2.2 | 推进器推力分配 | 187 |
| 6.2.3 | 动力定位能力曲线的计算与分析 | 188 |
| | 参考文献 | 194 |

第1章 绪 论

1.1 船舶动力定位系统的定义

海洋中蕴藏着丰富的人类赖以生存的宝贵资源。随着世界人口和经济的快速增长,人类对海洋资源的需求在不断加大,海洋开发也逐渐从沿岸、近海,扩展到了更深的远海。随着海洋资源开发的深入,传统的锚泊定位方式已经不能满足深远海域定位作业的要求,而动力定位系统(Dynamic Positioning System, DPS)能够很好地应对这一新的挑战。相比于传统的定位方式,动力定位方式具有定位准确、机动性高、不受水深限制等独特的优点。如今,船舶动力定位系统已广泛应用于钻井船、铺缆船、铺管船、供应船、科研考察船、挖泥船、消防船、海洋平台等定位作业中,已经成为深海资源开发不可或缺的关键支持系统。

国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)有关动力定位的定义^[1]:

(1) 动力定位船舶(Dynamic Positioning Vessel):指仅通过推进器的推力保持其固定的位置或沿着预先设定的轨迹移动的船舶或装置。

(2) 动力定位系统(Dynamic Positioning System):指使动力定位船舶实现动力定位所必需的一整套装置的总称,包括动力系统、推进器系统、控制系统和测量系统。

(3) 动力定位控制系统(Dynamic Positioning Control System):指船舶实现动力定位所必需的所有集中控制的硬件和软件。

1.2 船舶动力定位系统的发展历程

1.2.1 船舶动力定位系统的由来

随着能源问题变得越来越突出,人们把寻找能源的目光不约而同地转移到了蕴藏着丰富石油资源的海洋上。最初开采海洋石油的作业活动大多集中在水深小于20m的近岸海域,出现了桩腿穿过导管打入海底进行定位的固定式平台,如图1-1所示。随着开采活动越来越频繁,为了节约成本,人们希望平台能够重复使用,于是发展了锚泊定位方式,也即钻井船或钻井平台通过抛锚并

利用锚爪抓住海底,以此抵抗外界环境的作业干扰,如图 1-2 所示。相比于固定式桩腿定位,锚泊定位便于平台的移航。但是该定位方式也存在固有的缺点:首先,其定位精度受到水深和海床地质的限制,其有效定位水深一般小于 200m;其次,锚泊定位的机动性能较差,当作业地点更改时,必须重新进行收锚和抛锚,整个过程繁琐耗时,严重影响作业效率。

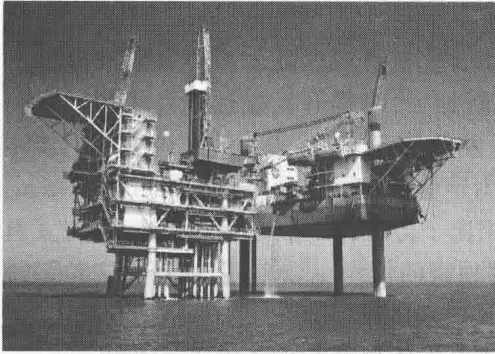


图 1-1 固定式定位平台

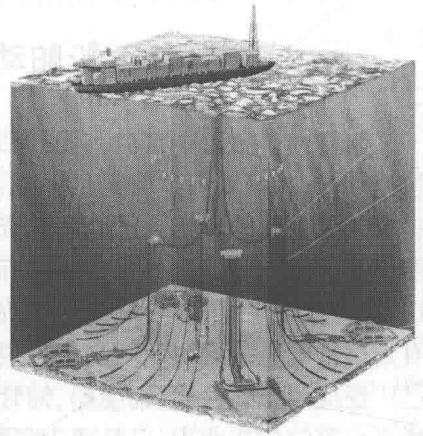


图 1-2 锚泊定位

随着海洋资源的开采由浅水海域向深水海域发展,传统锚泊定位技术已无法满足定位深度和精度的需求,于是动力定位技术应运而生。动力定位系统仅依靠自身装备的推进装置克服外界环境力的干扰以达到定位的目标,因此其机动性能好且不受水深的限制。与此同时,新的状态估计方法和控制技术的发展大幅度提高了动力定位系统的定位精度。随着动力定位系统的广泛应用,与之相关的诸如深海钻井、海底管线调查和检测、水下机器人作业、水下工程施工、油井增产措施和维修、平台供应、浮式采油等作业场合越来越离不开带有动力定位系统的海上钻井平台或船舶。另外,动力定位技术还被用于海上火箭发射平台的定位、军用船舶的维护与支持等。图 1-3 所示为一艘装备动力定位系统的半潜式钻井平台^[2]。

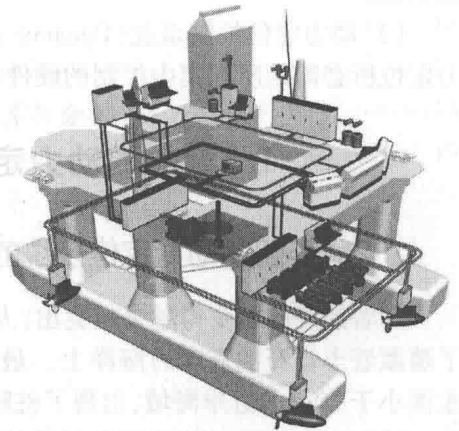


图 1-3 装备动力定位系统的半潜式钻井平台

1.2.2 船舶动力定位系统的发展

船舶动力定位系统是涉及导航技术、自动控制技术、船舶水动力学、计算机技术、通信技术等多学科交叉的复杂系统。由于其应用范围广、经济效益高,世界多家高科技公司和船舶科研单位对其开展了深入的研究,并取得了大量研究和应用成果。据不完全统计,20世纪70年代全球仅有30余艘装有DPS的工程船舶,2000年底突破了1000艘,2012年全球动力定位船舶和海洋平台总数已超过了2000艘。2010年以来,仅挪威的Kongsberg公司每年就向全球交付了150~200套DP系统。

动力定位技术发源于美国,其最早的应用是手动操作,操作人员通过目测或根据位置传感器提供的相对位置信息操纵船舶保持其期望的作业位置。1961年3月,装配有4个147kW全回转推进器的“CUSS1”号钻井船在美国的加利福尼亚海岸进行钻探作业,如图1-4所示。为了确定船的相对位置,在船周围半径180m的水面上布置了4个浮标作为参照物,水下布置了一套水声定位器。它由两名操作人员根据目测水面浮标的相对位置和水声显示器提供的位置信息对动力定位系统进行手动操作,从而保持船舶的位置。同年,美国壳牌公司一艘钻井船“Eureka”号下水,它的设计总吨位比“CUSS1”号小,但工作水深要求比“CUSS1”号深,计划采用与“CUSS1”号相同的定位方式,如图1-5所示。负责配备该船设备的工程师是Howard Shatto,他出生于美国明尼苏达州,1946年毕业于耶鲁大学的电子工程专业。为了降低工作人员的操作难度和劳动强度,提高船舶的定位精度,发展一套自动控制单元以实现船舶的自主动力定位的想法逐渐在Howard Shatto脑海中产生,并在“Eureka”号进行了成功应用。“Eureka”号成为了世界上第一艘具有全自动动力定位能力的船舶,Howard Shatto也被尊称为“动力定位之父”^[3]。

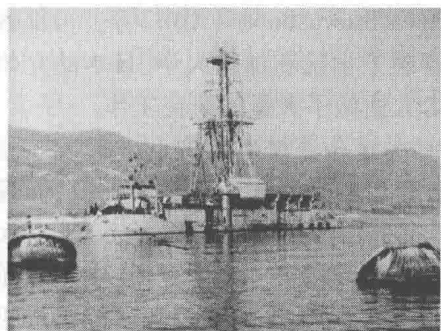


图1-4 美国的“CUSS1”号钻井船

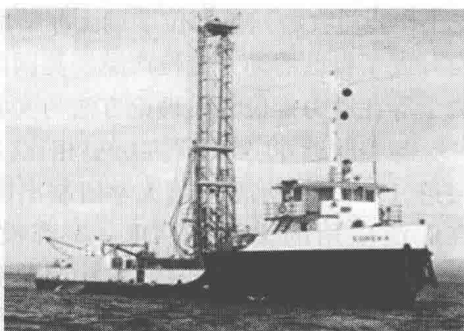


图1-5 美国的“Eureka”号钻井船

其后,动力定位技术逐步转移到挪威,在此过程中起关键作用的人是 Jens Glad Balchen 教授。他 1949 年毕业于挪威理工学院(Norwegian Institute of Technology, NTH),1951 年获得耶鲁大学工程科学专业的硕士学位,1959 年在美国参与船舶自动控制技术研究,对“CUSS1”号钻井船和“Eureka”号钻井船的定位技术产生了浓厚的兴趣,1971 年回到挪威理工学院从事动力定位技术与开发工作,并与 Steinar Sælid、Nils Albert Jenssen 等人提出了一种以现代控制理论和卡尔曼(Kalman)滤波理论相结合的动力定位控制方法,直接推动了第二代动力定位产品的出现,成为了当时挪威控制理论研究领域无可争辩的领导者。动力定位技术在挪威发展的初期,NTH、The Foundation for Scientific and Industrial Research(SINTEF)、Kongsberg Våpenfabrikk(KV)、Christian Michelsen's Institute(CMI)以及 Simrad 发挥了重要作用,其中 NTH 和 SINTEF 主要在自动控制方面具有优势,KV 主要负责计算机和控制技术的研究与开发,CMI 主要在船舶模型实验、海洋环境影响以及推进器设计等方面积累了丰富的经验,Simrad 主要在位置参考系统和传感器技术方面实力雄厚,他们之间的通力合作为挪威动力定位系统的发展奠定了基础^[3]。1996 年由挪威理工学院与挪威特隆赫姆大学合并成立的挪威科技大学(Norwegian University of Science and Technology, NTNU)与 Kongsberg 公司在动力定位技术开发与应用方面开展了紧密合作,为挪威在动力定位技术领域处于世界领先水平作出了重要贡献^[4-6]。

荷兰的 Marin 公司在 20 世纪 80 年代初期制定了推进器和动力定位技术的研究计划,并开展了动力定位模型试验,内容包括推进器和推进器之间的相互干扰、推进器和船体之间的相互干扰以及环境力对船舶运动的影响,研究了风力、流力、二阶波浪漂移力以及推进器推力的计算方法。另外,Marin 公司还开展了动力定位系统和锚泊系统的联合使用以及动力定位性能评估、功率估算等方面的研究。一般认为,Marin 公司在动力定位系统实验研究方面走在了世界前列^[7]。几乎同一时期,美国的 L-3 Communications、法国的 Alstom(后来被美国 GE 公司收购)、总部位于瑞士苏黎世的 Asea Brown Boveri(ABB)等公司都各自开发了自己的动力定位产品。美国的麻省理工学院和加州大学、日本的九州大学等在动力定位相关理论方法与实验技术方面做了大量的研究工作。

与美欧近 60 年的研究历史相比,国内动力定位系统的研究起步较晚。据报道,1998 年哈尔滨工程大学研制出国内首套船舶动力定位系统 DP-1,而现在广泛应用的 DP-2、DP-3 都没有产品推出^[7-11]。另外,武汉理工大学^[12-28]、上海交通大学^[29-32]、中国船舶重工集团公司第 712 研究所、中国船舶工业集团公司第 708 研究所、武汉船用机械有限公司等高等院校和研究机构相继开展了动力定位系统相关理论研究与技术开发工作,并取得了可喜的进展,

但与国外先进水平相比还有较大差距,还缺乏工程应用经验。2009年,随着我国成为世界第一造船大国,国内船舶与海洋工程产业对动力定位系统的需求量呈高速增长态势。2011年,我国首座第六代深水半潜式钻井平台“海洋石油 981”顺利完成了试航和故障模式与影响分析(FMEA)试验,其配备了 Kongsberg DP-3 动力定位系统,如图 1-6 所示。



图 1-6 中国“海洋石油 981”深水半潜式钻井平台

随着传感器技术、自适应滤波方法、控制理论、优化算法和计算机技术的飞速发展,动力定位系统也

由早期的独立系统发展为更为复杂的集成系统,其定位精度、可靠性、灵活性和可扩展性得到了大幅度提高,极大地满足了工业界的需求。为了适应业界对环境保护的高度关注,2001年挪威 Kongsberg Simrad 公司发布了一款绿色动力定位(Green DP)系统。该系统采用非线性模型预测控制替代了对船舶运动的实时测量,可以忽略小的和短时的环境干扰,使推进器维持在平均转速,从而避免了主机功率大幅度波动。这意味着与常规动力定位系统相比,Green DP 可以大大降低峰值负载,从而节约能源(仿真表明可降低能量消耗达 20%),降低主机和推进器的磨损,减少 CO_2 的排放^[3]。2006年,挪威 Kongsberg Maritime 公司又发布了其第六代动力定位系统 K-Pos。

从技术的角度,一般将动力定位系统近 60 年的发展历程概括为以下三个主要阶段:

第一代动力定位产品出现于 20 世纪 60 年代,其技术特点主要是采用经典的控制理论设计控制器,通常采用常规的比例积分微分(Proportional - Integral - Derivative, PID)控制方法,同时为了避免一阶波浪力及高频噪声对定位精度的影响,采用低通滤波器滤除测量信号中的高频分量和环境噪声。第一代动力定位系统存在一些固有的技术缺陷:①PID 控制方法是基于偏差的控制,属于事后控制,控制精度和响应速度存在一定的局限性;②PID 参数整定困难且适应性较差;③采用低通滤波技术,使得定位误差信号产生了相位滞后^[33]。

第二代动力定位产品出现于 20 世纪 70 年代,其技术特点主要是通过卡尔曼滤波理论和现代控制理论相结合以提高其定位性能,位置传感器则由单一型发展为综合型,提出了风前馈控制(wind - feed forward control)策略,控制系

统、测量系统、推进系统均采用了冗余设计,显著提高了系统的定位精度和可靠性。1971年,壳牌公司下水的“SEDCO445”号钻井船是第二阶段动力定位技术发展的第一个受益者,该船长145m,最大排水量17500t,装配有2个主推和11个侧推,如图1-7所示。1973年进行的海试报告显示,该船在49kn风、3kn流、4m波高、300m水深的海洋环境中作业时能保持15m以内的定位精度。

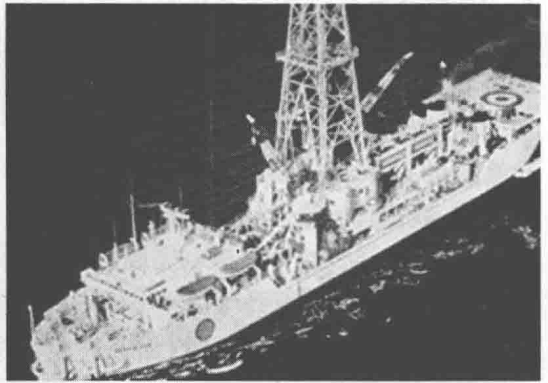


图1-7 美国的“SEDCO445”号钻井船

第三代动力定位系统的技术特点主要是使用非线性模型预测控制、自适应模糊控制、鲁棒控制等智能控制方法来提高对船舶在运动非线性、传感器误差、海况多变等条件下定位控制的精度,但依赖于更精确的船舶数学模型。尽管近年来智能控制技术在船舶动力定位领域的仿真研究工作取得了很大的进展,但大多数系统离工程应用还有一定距离。

目前,国际上动力定位系统制造商主要有挪威的 Kongsberg,美国的 L-3 Communications、General Electric 和 Marine Technologies,英国的 Rolls-Royce 以及俄罗斯的 Navis Engineering 等^[3]。2005年,Kongsberg 收购了 ABB 的动力定位业务,Kongsberg 的动力定位市场占有率达80%以上,成为了 DP 解决方案全球供应商中名副其实的领导者,目前它能提供从 DP-1 到 DP-3 所有动力定位产品。2014年,Rolls-Royce 签订了两套 DP-3 的供货合同。

1.3 船舶动力定位系统的介绍

1.3.1 船舶动力定位系统的组成

船舶动力定位系统主要由测量系统、控制系统、推进系统和动力系统四个部分组成。

1. 测量系统

测量系统可以比喻成动力定位系统的五官,它用于感知船舶相对于某参考点的位置、姿态和海洋环境状态信息,并实时将数据传输给控制系统。船舶动力定位中的测量系统主要包括:

(1) 位置参考系统:主要采用全球卫星定位系统、水声位置参考系统、张紧索系统、微波定位系统、激光定位系统等。通常动力定位系统无需对船舶的横摇、纵摇和垂荡三个自由度的运动加以补偿,但需要利用包括垂直参考系统和运动参考单元(MRU)测量得到的船舶运动状态参数对船舶的位置信息进行修正。

(2) 艏向参考系统:主要采用电罗经、陀螺罗经等。

(3) 环境测量系统:主要有风速风向仪、海流计、浪高仪等。

2. 控制系统

控制系统可以比喻成动力定位系统的大脑,它通过接收测量系统发送的位置、艏向和环境参数,利用状态估计滤波器滤除测量信号中的高频运动分量与噪声,计算出船舶在纵荡、横荡和艏向三个方向的控制力,由推力分配模块计算推进系统各执行机构所需要产生的推力和力矩,并转化为转速、螺距、转向角等控制指令下发给推进系统。控制系统的发展代表着整个动力定位系统的发展水平,其核心是寻找高效实用的控制策略,以保证船舶在本身动态性能改变和外界环境干扰条件下仍能满足船舶与海洋工程领域中不断提高的定位性能要求。

3. 推进系统

推进系统可以比喻成动力定位系统的四肢,它根据控制系统发送的指令产生使船舶保持其固定的位置或沿着预先设定的轨迹移动所需要的推力和力矩。动力定位船舶常用的推进器类型包括主推进器(带舵)、全回转推进器、槽道推进器等。推进系统是能量消耗的主体,为降低推进系统的能量消耗,需要在推力分配算法中考虑相关因素,力求不影响船舶正常作业的情况下减少不必要的能量消耗和机械磨损。

4. 动力系统

动力系统可以比喻成动力定位系统的核心,它主要给推进器和其他辅助系统分配功率,实现船舶根据周围环境条件的变化对电站功率的综合优化管理。动力定位船舶在进行定位工作时,其推进系统消耗功率较大,但在未进行定位时,只需提供功率消耗较少的生活用电。为了满足船舶在各种海况与工况下的综合供电要求,动力定位船舶需要配备独立的电力监控系统,并与船舶自身的电站管理系统协同工作,保证电站运行的经济性与安全性。动力定位船舶通常采用柴油—电力推进相结合的方式,相比传统的推进方式,其配置更灵活,推进性能更好。典型的动力定位船舶操作要求有大的功率变化,在级别为 DP-2 和 DP-3 的动力定位船舶中,计算机、控制台、显示器、警报器和测量系统要求由不间断电源(UPS)供电。当船舶的主交流电供应发生中断时,不间断电源应能

为用电系统提供不少于 30min 的电力。

1.3.2 船舶动力定位系统的功能

(1) 艏向控制: 艏向的当前值和设定值存在偏差时, 动力定位系统自动改变船舶的当前艏向, 将船舶的艏向调整到设定值。

(2) 定点控制: 船舶的期望位置为固定坐标系上的某一点。当船舶偏离设定位置时, 动力定位系统能自动移动船舶到其设定位置附近并保持位置。

(3) 航迹控制: 船舶在作业或航行过程中, 根据操作员或控制器给定的轨迹指令和速度指令, 由动力定位系统控制船舶以一定的航速沿预定的轨迹移动, 直至终点。在此过程中, 船舶的艏向允许控制系统根据航行过程中海洋环境的变化自行调整。

(4) 循线控制: 功能与航迹控制相似, 其主要差别在于当动力定位系统控制船舶沿预定的轨迹移动时, 必须保持船舶的艏向沿着预定轨迹, 不允许自行调整船舶的艏向。此项功能主要应用于石油管线的铺设与检修。

(5) 跟踪控制: 主要用于机动目标的跟踪, 始终让动力定位船舶与目标保持固定的空间位置关系。

1.3.3 船舶动力定位系统的工作原理

船舶动力定位系统是一个复杂的闭环控制系统。为了便于理解动力定位系统的工作原理, 本节将根据其各模块之间的数据流对动力定位系统的工作原理进行介绍。船舶动力定位系统的工作原理如图 1-8 所示。

动力定位系统首先利用测量系统感知船舶相对于某参考点的位置、艏向和海洋环境信息。由于动力定位船舶一般配备有多种类型的位置参考系统和传感器, 且测量值包含因测量噪声和船舶运动所引入的干扰信号, 因此测量值需经野值剔除、滤波、数据融合、时间空间对准等预处理后发送给状态估计模块处理。相关内容详见本书第三章。

船舶数学模型和状态估计模块在定位过程中紧密联系在一起。状态估计模块以经过预处理后的传感器数据作为输入, 通过建立的船舶数学模型, 估计因风、二阶波浪力、流、推进器推力对船舶的作用而产生的低频运动信息, 包括船舶的位置、艏向、速度、未建模环境力等, 滤除因一阶波浪力干扰产生的高频运动分量。船舶数学模型相关内容详见本书第二章, 状态估计原理详见本书第三章。

控制算法是动力定位系统的核心, 它以状态估计模块得到的船舶当前位置、艏向和速度等估计值作为输入, 根据位置估计值与位置设定值之间的偏差