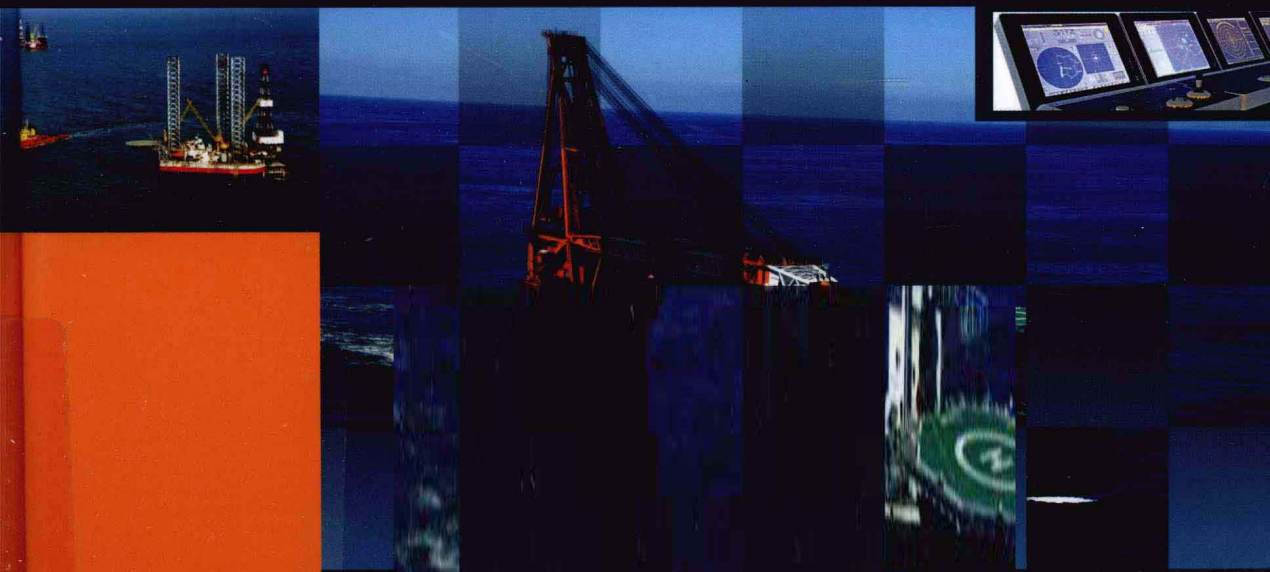


# 船舶动力定位

边信黔 付明玉 王元慧 著



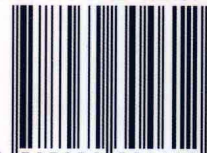
科学出版社

(TP-5193.0101)

科学出版社 工程技术分社  
电话: (010) 64019417  
Email: gcjs@mail.sciencep.com  
销售分类建议: 自动控制

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

ISBN 978-7-03-030461-2



9 787030 304612 >

定价: 100.00 元

# 船舶动力定位

边信黔 付明玉 王元慧 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书详尽地论述了动力定位技术及其应用,重点总结并深入研究了推动船舶动力定位技术进步的若干理论和关键技术,总结了作者多年来从事动力定位领域研究的成果。内容包括坐标系统及其变换、船舶运动数学模型、海洋环境模型、动力定位系统的数据处理和数据融合、动力定位系统的数据滤波与状态估计、船舶动力定位控制方法、测量系统、推进系统、动力系统、动力定位系统设计、船舶动力定位系统、动力定位船舶作业,以及有关动力定位的指南和规范等。

本书是国内第一部有关动力定位方面的专业著作,是作者近30年来有关船舶动力定位方面的教学和科学研究经验的积累和总结,同时吸收了国内外相关的重要参考文献的精华,力求反映当今该领域的新思想、新观点、新动态和新的技术及学术水平。

本书可作为船舶与海洋工程领域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海洋工程专业的高校师生选用,同时也适于对动力定位技术感兴趣的其他专业人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

船舶动力定位 / 边信黔,付明玉,王元慧著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-030461-2

I. ①船… II. ①边…②付…③王… III. ①船舶定位-动力系统  
IV. ①U675.6②U664.81

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第037151号

责任编辑:刘宝莉 张艳芬 / 责任校对:桂伟利

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011年5月第一版 开本:B5(720×1000)

2011年5月第一次印刷 印张:24

印数:1—2 000 字数:464 000

定价:100.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

随着人类对海洋石油资源的开发和利用,以及海上运输和海洋科学技术的不断发展,船舶与海洋工程技术迅速崛起。由于船舶、平台等海洋结构物经常需要定位于海洋中特定位置进行如海洋调查、油井钻探、打捞救助、海底电缆管线铺设、反水雷等各种作业,而传统的锚泊方式由于受作业水深、工作时间、精度要求等因素的限制而无法满足相关海上作业的要求。为解决船舶位置和航向保持这一问题,一种称为动力定位的船舶控制技术应运而生,并随着电子计算机、传感器和控制理论等相关技术的不断发展取得了长足的进步。所谓动力定位是指船舶不借助锚泊,而单独利用其自身安装的推进器实现其在海面上固定位置的保持。国际海事组织和各国船级社对动力定位系统给出的定义为:动力定位船舶需要装备的全部设备,包括动力系统、推进系统、动力定位控制系统。对动力定位船舶给出的定义为:通过推进器推力能够自动地保持位置(固定位置或预设航迹)的装置或船舶。时至今日,动力定位技术已经作为一种成熟的技术成功应用于海洋工程中的诸多领域。

1984年,摩根教授撰写的《近海船舶动力定位》被我国学者翻译成中文在国内出版发行,从此该书成为了我国研究动力定位的学者的入门必备参考书。随着人们对海洋无止境探索的日益加大,船舶动力定位已成为海洋工程的研究热点,其技术的发展也日新月异,20世纪80年代的动力定位技术和相关产品也已经逐步被新技术取代。遗憾的是,至今国内还没有动力定位技术的专著或新版的译著。

本书旨在从全新的角度论述船舶动力定位,重点探讨和研究推动动力定位进步和工程应用的理论和关键技术。本书在撰写过程中不仅吸收了国际船舶控制研究的前沿理论,还融入了我国科技人员的优秀研究成果,以期成为该领域科学工作者和工程技术人员的重要参考书籍,促进我国科学技术进步和国民经济发展,加速船舶自动化建设和满足海洋工程作业的需求。

全书除绪论外共分五部分。第一部分(第2~4章)为数学模型,包括坐标系统及其变换、船舶运动数学模型、海洋环境模型。第二部分(第5~7章)为控制理论在船舶动力定位中的应用,包括动力定位的数据处理和数据融合、动力定位的数据滤波与状态估计、船舶动力定位的控制方法。第三部分(第8~9章)为测量系统,包括位置参考系统、动力定位系统其他传感器。第四部分(第10~11章)为推进系统和动力系统。第五部分(第12~14章)为船舶动力定位系统,包括动力定位系统设计、动力定位系统功能和组成、动力定位船舶作业。

本书在撰写和出版过程中,得到了哈尔滨工程大学各级领导的支持和鼓励,特别对长期以来,共同从事船舶动力定位研究的教授、青年教师以及研究生给予作者的大量帮助,这里一并表示感谢。同时,对书中引用文献的作者深表敬意。

由于船舶动力定位技术涉及知识面既广又深,而作者水平有限,书中难免存在不妥之处,诚请广大读者批评指正。

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 船舶动力定位的定义 .....	1
1.2 船舶动力定位的发展史 .....	2
1.2.1 动力定位产生的背景 .....	2
1.2.2 动力定位系统的技术发展现状 .....	5
1.3 船舶动力定位简介 .....	8
1.3.1 动力定位系统工作原理 .....	8
1.3.2 船舶动力定位的基本功能 .....	9
1.3.3 动力定位的分级 .....	9
1.4 国际组织和船级社.....	11
1.4.1 国际组织.....	11
1.4.2 船级社 .....	12

## 第一部分 数学模型

<b>第 2 章 坐标系统</b> .....	17
2.1 概述.....	17
2.2 地球中心惯性坐标系.....	18
2.3 地球中心固定坐标系.....	19
2.4 WGS-84 坐标系 .....	19
2.5 通用横向墨卡托投影坐标系统.....	20
2.6 北东坐标系.....	22
2.7 船体坐标系.....	23
2.8 船体平行坐标系.....	24
<b>第 3 章 船舶运动数学模型</b> .....	25
3.1 运动学.....	25
3.1.1 运动变量定义 .....	25
3.1.2 船体坐标系与北东坐标系之间的转换 .....	26
3.1.3 船舶运动学 .....	30

3.2	动力学	31
3.2.1	刚体动力学	31
3.2.2	船舶水动力和力矩	37
3.2.3	水动力的无因次体系	41
3.3	船舶运动数学模型	46
3.3.1	六自由度非线性运动方程	46
3.3.2	六自由度线性运动方程	48
3.3.3	单自由度直航模型	49
3.3.4	单自由度自动驾驶仪模型	50
3.3.5	二自由度线性操纵模型	50
3.3.6	三自由度水平面运动模型	51
3.3.7	纵荡-垂荡-纵摇三自由度运动模型	53
3.3.8	横荡-横摇-艏摇三自由度运动模型	55
<b>第4章</b>	<b>海洋环境模型</b>	<b>57</b>
4.1	风的模型	57
4.1.1	相对风速和相对风向	57
4.1.2	风力与风力矩系数	58
4.2	海浪的模型	61
4.2.1	风级、浪级和海况的定义	62
4.2.2	波能谱公式	63
4.2.3	海浪响应的线性模型	70
4.2.4	遭遇频率	72
4.2.5	海浪干扰力和干扰力矩	72
4.3	海流模型	73
4.3.1	海流对运动模型的影响	73
4.3.2	海流作用于船体的干扰力及力矩	74

## 第二部分 控制理论在船舶动力定位中的应用

<b>第5章</b>	<b>动力定位的数据处理和数据融合</b>	<b>79</b>
5.1	概述	79
5.1.1	多传感器数据融合的起源和发展	79
5.1.2	多传感器数据融合技术的分类	80
5.1.3	船舶动力定位数据处理和数据融合	82
5.2	位置参考系统数据处理	84



---

5.2.1 野值剔除	84
5.2.2 滤波	85
5.2.3 时间对准	87
5.2.4 空间对准	90
5.3 基于置信测度的融合算法	99
5.3.1 置信距离矩阵的计算	99
5.3.2 关系矩阵的确定	101
5.3.3 权值的计算	101
5.4 数据处理和融合算法仿真	103
5.4.1 计算机仿真	103
5.4.2 半实物仿真实验	112
<b>第6章 动力定位的数据滤波与状态估计</b>	<b>118</b>
6.1 卡尔曼滤波器的设计	118
6.1.1 卡尔曼滤波简介	118
6.1.2 数据滤波与状态估计中船舶运动数学模型	119
6.1.3 离散型卡尔曼估计滤波器的设计	121
6.1.4 扩展的离散时间卡尔曼估计滤波器设计	123
6.2 无源非线性估计滤波器设计	124
6.2.1 系统模型	124
6.2.2 估计滤波器方程	125
6.2.3 估计滤波器误差动态特性	125
6.2.4 稳定性分析	127
6.2.5 估计滤波器增益矩阵的确定	130
6.2.6 稳定性证明	131
6.3 非线性无源观测器的仿真案例	132
<b>第7章 动力定位的控制方法</b>	<b>148</b>
7.1 基于PID的动力定位船舶航迹保持控制	148
7.1.1 PID控制算法	148
7.1.2 PID控制算法的改进	151
7.1.3 动力定位船舶的低速航迹保持策略	154
7.1.4 动力定位船舶的高速航迹保持策略	156
7.1.5 低速航迹保持艏向控制器仿真	157
7.1.6 高速航迹保持艏向控制器设计与仿真	160
7.2 动力定位线性二次型(LQ)最优控制	164
7.2.1 LQ最优控制基本原理	164

7.2.2	动力定位控制系统的最优 LQ 设计 .....	166
7.2.3	风前馈控制器的设计 .....	167
7.2.4	动力定位 LQ 控制的仿真实验 .....	168
7.3	基于 MPC 的动力定位控制器的设计 .....	174
7.3.1	选用 MPC 用于动力定位系统的几点考虑 .....	175
7.3.2	动力定位系统中的约束 .....	175
7.3.3	基于 MPC 方法实现动力定位系统约束处理的原理 .....	176
7.3.4	动态矩阵控制算法 .....	177
7.3.5	动力定位 MPC 控制器的仿真实验 .....	179
7.4	环境最优艏向控制 .....	189
7.4.1	最优艏向的获得方法 .....	190
7.4.2	李雅普诺夫稳定性定理 .....	194
7.4.3	基于非线性反步设计法的环境最优艏向控制器 .....	197
7.4.4	环境最优艏向控制器仿真实验及分析 .....	201

### 第三部分 测量系统

<b>第 8 章</b>	<b>位置参考系统</b> .....	209
8.1	卫星定位系统 .....	209
8.1.1	全球定位系统 .....	209
8.1.2	差分全球定位系统 .....	214
8.1.3	全球导航卫星系统 .....	222
8.1.4	北斗 .....	223
8.2	水声位置参考系统 .....	227
8.2.1	概述 .....	227
8.2.2	长基线系统 .....	228
8.2.3	短基线系统 .....	229
8.2.4	超短基线系统 .....	232
8.3	Artemis 微波位置参考系统 .....	236
8.3.1	Artemis 工作原理 .....	236
8.3.2	Artemis 系统功能特点 .....	237
8.3.3	Artemis Mk IV 系统 .....	242
8.4	张紧索系统 .....	244
8.4.1	概述 .....	244
8.4.2	张紧索的几何推算 .....	244

8.4.3 三种张紧索系统 .....	251
8.5 激光位置参考系统 .....	253
8.5.1 Fanbeam .....	253
8.5.2 CyScan .....	256
<b>第9章 动力定位系统其他传感器</b> .....	<b>259</b>
9.1 艏向传感器 .....	259
9.1.1 电罗经简介 .....	259
9.1.2 NAVIGAT X MK 1 型数字电罗经 .....	260
9.2 风传感器 .....	262
9.2.1 皮托管式风传感器 .....	262
9.2.2 螺旋桨风传感器 .....	263
9.2.3 超声波风传感器 .....	265
9.2.4 霍尔效应电磁风传感器 .....	266
9.2.5 热线、热膜式风传感器 .....	268
9.3 垂直运动传感器 .....	270
9.3.1 MRU 简介 .....	270
9.3.2 Kongsberg Seatex MRU 5 .....	271

## 第四部分 推进系统和动力系统

<b>第10章 推进系统</b> .....	<b>277</b>
10.1 概述 .....	277
10.2 推进器的形式和原理 .....	279
10.2.1 主推进器 .....	279
10.2.2 槽道推进器 .....	279
10.2.3 全回转推进器 .....	280
10.2.4 吊舱推进器 .....	282
10.2.5 喷水推进器 .....	283
10.3 推进系统的数学模型 .....	284
10.3.1 敞水螺旋桨的推力和转矩 .....	284
10.3.2 船体与螺旋桨的相互作用 .....	286
10.3.3 推进器效率 .....	287
10.3.4 螺旋桨流体动力的计算模型 .....	288
10.4 喷水推进器的一般特性 .....	289
10.4.1 船舶航行推力与阻力平衡方程 .....	289

10.4.2	喷水推进器能头平衡方程	290
<b>第 11 章</b>	<b>动力系统</b>	<b>293</b>
11.1	概述	293
11.2	动力系统组成	294
11.3	电力系统	295
11.3.1	概述	295
11.3.2	动力定位船舶的发电系统	297
11.3.3	动力定位船舶的供配电系统	297
11.3.4	动力定位船舶的负载系统	300
11.3.5	动力定位船舶的输电系统	300
11.4	动力系统可靠性的保障	301
11.4.1	冗余电路	301
11.4.2	电力系统保护	302
11.4.3	应急电力系统	302
11.5	电站监控和运行管理系统	305
11.5.1	电力参数监测显示及报警	306
11.5.2	发电机的启动和停车控制	307
11.5.3	分级卸载功能	309
11.5.4	重载的启动询问	310
11.5.5	停电恢复功能	310
11.5.6	电站运行情况记录	310

## 第五部分 船舶动力定位系统

<b>第 12 章</b>	<b>动力定位系统设计</b>	<b>313</b>
12.1	概述	313
12.2	推进器布置	313
12.2.1	简单的推进器布置	313
12.2.2	推进器布置规则	314
12.3	动力定位系统的组成与配置	316
12.3.1	动力定位系统的组成	316
12.3.2	动力定位系统的配置和分级	316
12.4	动力定位能力计算	323
12.4.1	概述	323
12.4.2	有关动力定位能力计算的说明	324

---

12.5	中国船级社有关动力定位系统的相关说明	327
12.5.1	附加标志	328
12.5.2	定义	328
12.5.3	故障模式与影响分析	330
<b>第13章</b>	<b>动力定位系统功能和组成</b>	<b>331</b>
13.1	概述	331
13.2	动力定位的模式与功能	331
13.2.1	动力定位的模式	331
13.2.2	动力定位的特种功能	339
13.3	动力定位系统的基本组成	343
13.4	动力定位产品介绍	347
<b>第14章</b>	<b>动力定位船舶作业</b>	<b>353</b>
14.1	概述	353
14.2	潜水支持作业	353
14.3	勘察和 ROV 支持作业	355
14.4	海床开沟机作业	356
14.5	铺管作业	357
14.6	倾倒岩石作业	358
14.7	采砂挖泥作业	359
14.8	铺缆与维修作业	359
14.9	起重船作业	360
14.10	移动式海底钻井平台作业	360
14.11	油轮作业	361
14.12	浮式生产储存装载单元作业	362
14.13	其他功能和作业	363
<b>参考文献</b>		<b>364</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 船舶动力定位的定义

随着世界经济的发展,能源和资源问题日趋尖锐,过去不为人们重视的海洋,现在已成为国际间激烈争夺的领域。由于海洋环境复杂多变,如果没有先进的技术和设备来装备船舶,即使面对丰富的海洋资源,人们也只能望洋兴叹。因而对于许多海上作业船来说,动力定位系统(dynamic positioning system,DPS)已成为必不可少的支持系统。

下面给出国际上有关动力定位的定义。

### 1. 国际海事组织(IMO)的相关定义<sup>[1]</sup>

(1) 动力定位船舶(dynamic positioning vessel): 表示通过推进器推力能够自动地保持位置(固定位置或预设航迹)的装备或船舶。

(2) 动力定位系统: 表示动力定位船舶需要装备的全部设备,包括动力系统、推进系统、动力定位控制系统。

(3) 动力定位控制系统(dynamic positioning control system): 表示船舶动力定位需要的所有控制系统和部件,硬件和软件。动力定位控制系统包括计算机系统/操纵杆系统、传感器系统、显示系统(操作面板)、位置参考系统以及相关的电缆铺设和线路选择。

### 2. 挪威船级社(DNV)中船级规范的相关定义<sup>[2]</sup>

(1) 动力定位船舶: 通过推进器推力,能够自动保持位置和航向(固定位置或者预定航迹)的装置和船舶。

(2) 动力定位系统: 表示动力定位船舶需要装备的全部设备,必须包括动力系统、推进系统、动力定位控制系统、独立操纵杆系统(适用时)。

(3) 动力定位控制系统: 表示船舶动力定位所需的所有控制系统和部件、硬件和软件。动力定位控制系统包括计算机系统、传感器系统、显示系统(操作面板)、位置参考系统以及相关的电缆铺设和线路选择。

## 1.2 船舶动力定位的发展史

### 1.2.1 动力定位产生的背景

石油产品在人类的现代文明中扮演着非常重要的角色,甚至在诺亚时期,沥青就被用于防止船舶的渗漏。后来,人类发明了越来越多利用石油产品的方法<sup>[1]</sup>。

石油首先是在里海(Caspian Sea)附近的陆地上被发现的,但随着时间的推移,人们发现油田延伸到了海中。早在18世纪初期,巴库(阿塞拜疆共和国首都)附近海岸线就曾经钻过一口30m深的油井。虽然这不是一个成功的例子,但它标志了一个时代的开始。1925年,第一口油井在里海投产。

以下的历史事件说明了钻井平台的发展过程<sup>[3]</sup>:

1869年,美国人 Thomas 发明了自升式平台, Samuel 开发了自升式船舶的项目。

1897年,在加利福尼亚的萨姆兰德,产生了从码头连接到海岸的木制石油钻探设备。

1906年,200个海上生产用井在萨姆兰德海岸建成,如图1.1所示。路易斯安那州、得克萨斯州等地出现了11口天然气井。

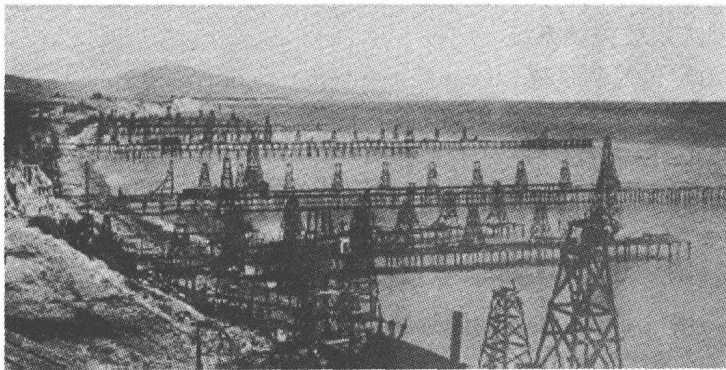


图 1.1 萨姆兰德<sup>[3]</sup>

1924年,在委内瑞拉西北部马拉开波湾湖,出现了第一口油井。

1934年,在阿泰母岛附近的里海,出现了第一口钢结构的石油钻井平台。

1947年,在水深达6m的墨西哥湾建成了石油钻井平台,该平台与路易斯安那海岸距离已超出了人在岸上的视距。

1963年,出现了钻探深度达75m的自升式平台。

1976年,在南加利福尼亚海,出现了安装深度达260m的钻探平台。

1978年,在南密西西比海岸,出现了安装深度达312m的钻井平台,所用钢铁重量达59000t。在北海的尼尼安油田,水深为138m处安装了由混凝土浇筑建造的钻探平台。

1988年,在墨西哥湾出现了安装深度为411m的自升式平台,平台重达77000t左右。

钻井平台的造价非常高,而且将其从一处迁移到另一处所用的费用将更加昂贵,因此短期试探性钻井是没有意义的。平台自身对水深(通常300m左右)的限制使得有必要寻找其他海中采油的方法。工业上迫切需要深海开采石油和更加简单低廉的移动式钻井作业方法,这导致了锚泊钻井船和可移动钻井平台的出现。一些锚泊系统或重物用来固定船或钻塔,同时使其海上移动幅度最小,如图1.2所示。

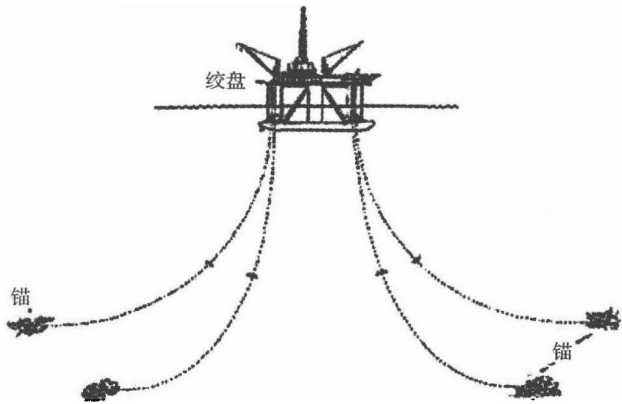


图 1.2 四点锚泊系统示意图<sup>[3]</sup>

1953年,出现了第一艘采用锚泊系统的钻井船——Submarex号,可在远离加利福尼亚海岸,水深为120m的海上作业。

1954年,在墨西哥湾出现了第一艘钻井船。

1962年,第一个半潜式钻井平台在美国建成。

1970年,Wodeco 4号钻井船可以在水深达456m的海上进行石油钻探。

1976年,泰国建造出了Discoverer 534号锚泊船,可在1055m处完成深水钻探作业,打破了世界纪录。

1984年,在锚泊系统的辅助下,西方国家在300m作业水深处建成了大约30口油井。

1987年,Discoverer 534号锚泊船的钻探深度达到1085m,刷新了深水钻探世界纪录。

抛锚泊位是将锚抛出去,沉于海底,利用锚爪抓住海底,来抵抗外界对船舶的干扰。它的优点是:锚是任何船舶都有的定位设备。不需要另外加装定位设备。



它的缺点是：定位不准；抛锚和起锚费时费力；机动性能差，最重要的是它还受到水深的限制。

因此，作为 1957 年美国“莫霍深钻计划”的一部分，人们开始研制一种能够满足深水作业需求的位置保持系统来取代锚泊系统。这项工程的目的是钻到地壳与地幔间的界限层，就是打穿地球的外壳。为了成功完成这项工程，人们选择了最薄的区域进行钻探，即大洋的最深处。深度大概是 4500m，这对于一般的锚泊系统来说太深了。CUSS 1 号船通过在驳船上携带 4 个可操纵的推进器解决了这个问题。在海床放下一个传送器用来确定驳船与海床的相对位置，传送器将信号传回驳船，传送器给出的位置信息能够在随船的一个显示系统上读到。另外，试用了 4 个围绕在船周围的锚泊浮标，它们用于向随船雷达发送无线电信号。通过使用 4 个不同的推进器及其不同方向的组合，使驳船保持在钻井位置的正上方不动。1961 年 3 月 9 日，在加利福尼亚的 La Jolla，CUSS 1 号船在动力定位的辅助下能在钻探深度为 948m 处保持位置（见图 1.3），一段时间后其在 3560m 钻探深度同时打了 5 口钻井，CUSS 1 号船的位置可以保持在半径为 180m 的圆周范围内。

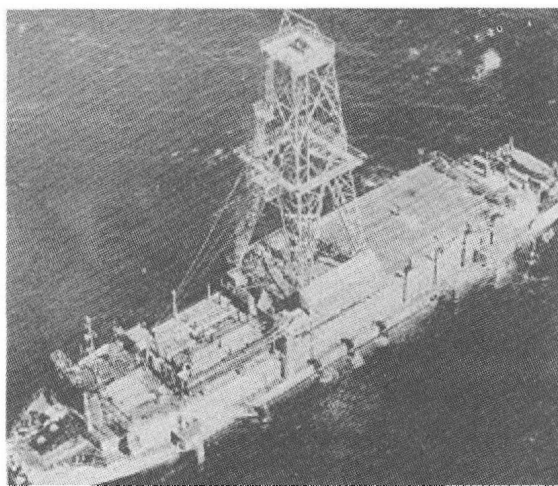


图 1.3 1961 年，首次出现可进行动力定位的船舶——CUSS 1 号<sup>[3]</sup>

发展一个自动控制单元来完成动力定位功能的想法逐渐产生了。1961 年，美国壳牌石油公司的钻井船 Eureka 号完成下水，很快自动控制推进器的设备就进行了装船。1964 年，另一艘有相似设备的 Caldrill 1 号船交付给了美国的 Caldrill Offshore 公司，Eureka 号船和 Caldrill 1 号船的钻探工程都很成功。Eureka 号船在 6m 高浪和 21m/s 风速下可达到 1300m 钻探深度。Caldrill 1 号船可以达到最大钻探深度 2000m，并装备 4 个可操纵推进器，每个推进器的功率为 221kW。船的位置由两个张紧索参考系统确定。