



“十三五”国家重点图书出版规划项目



深远海工程装备与高技术丛书

BEIDOU WEIXING XITONG  
DE DINGWEI JISHU  
JI CHUANBO DAOHANG YINGYONG

# 北斗卫星系统 的定位技术及船舶导航应用

张云 等 · 著

上海科学技术出版社





上海市重点图书

BEIDOU WEIXING XITONG  
DE DINGWEI JISHU  
JI CHUANBO DAOHANG YINGYONG

# 北斗卫星系统 的定位技术及船舶导航应用

丛书策划 侯培东 楼玲玲 陈立 田立群  
责任编辑 陈立 杨燕  
美术编辑 赵军

上架建议：船舶与海洋工程

ISBN 978-7-5478-4249-2



9 787547 842492 >

定价：118.00元  
易文网 www.ewen.co



上海科学技术出版社  
www.sstp.cn

船舶工程

关注船舶工程编辑部  
微信公众号



深远海工程装备与高技术丛书

# 北斗卫星系统 的定位技术及船舶导航应用

张云 等 著

上海科学技术出版社

---

图书在版编目(CIP)数据

北斗卫星系统的定位技术及船舶导航应用 / 张云等著. —上海: 上海科学技术出版社, 2019. 1

(深远海工程装备与高技术丛书)

ISBN 978-7-5478-4249-2

I. ①北… II. ①张… III. ①卫星导航—全球定位系统—应用—航海导航 IV. ①P228.4 ②U675.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 257822 号

---

北斗卫星系统的定位技术及船舶导航应用

张云 等 著

技术编辑 张志建 陈美生

美术编辑 赵 军

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14.5 插页 4

字数 350 千字

2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-4249-2/TN·21

定价: 118.00 元

---

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

# 内 容 提 要

本书是技术应用型专著,首先系统阐述了全球卫星导航系统的概念及定位基本原理,主要介绍了北斗系统的单点定位技术、差分定位技术、廉价导航模块载波定位技术,以及北斗系统特有的短报文通信技术;在此基础上,介绍了北斗系统在船舶导航中的应用技术,包括电子海图、北斗卫星电子罗经、无人水面航行器的设计与开发;最后对北斗系统船舶定位与导航技术的未来发展趋势进行展望。

通过本书,读者可以全面了解北斗系统的定位原理和特性,掌握北斗系统的定位算法,拓宽北斗系统在船舶导航领域的应用范围。

本书的主要读者对象是船舶导航技术研发人员、船舶导航专业的高校学生,以及海洋测绘及陆地测绘领域的开发人员。

## 学术顾问

- 潘镜芙 中国工程院院士、中国船舶重工集团公司第七〇一研究所研究员
- 闻雪友 中国工程院院士、中国船舶重工集团公司第七〇三研究所研究员
- 顾心悱 中国工程院院士、胜利石油管理局资深首席高级专家
- 方书甲 中国造船工程学会原副理事长、研究员
- 童小川 中国船舶重工集团公司第七〇四研究所科技委主任、研究员
- 俞宝均 中国船舶设计大师、中国船舶工业集团公司第七〇八研究所研究员
- 杨葆和 中国船舶设计大师、中国船舶工业集团公司第七〇八研究所研究员
- 赵耕贤 中国船舶设计大师、中国船舶工业集团公司第七〇八研究所研究员
- 徐绍衡 中国船舶设计大师、江苏省舰船及海洋自动化工程研究中心首席科学家

## 丛书编委会

主 编 潘镜芙 童小川

常务副主编 闻雪友

副 主 编 方书甲 王自力 刘志刚 沈余生 桂文彬  
黄 震 王文涛

编 委 (按姓氏笔画排序)

尤 熙 冯志敏 刘建峰 李林焯 杨葆和

何可耕 张 云 张锦岚 陈福正 林宪东

周国平 赵耕贤 俞宝均 翁一武 崔维成

焦 依

编委办公室 刘 震 田立群 周海锋 施 璟 杨文英

方思敏 赵宝祥 李 慧 蒋明迪

主 编 单 位 中国造船工程学会《船舶工程》编辑部

# 前 言

全球卫星导航系统应用起源于船舶导航,普及于陆地应用。随着国家“海洋战略”的不断深化,尤其是我国自主研发的北斗全球卫星导航系统的全球化战略,使得北斗系统在船舶导航领域的应用范围不断扩展。

本书共分为 10 个章节:第 1~6 章系统地阐述了北斗全球卫星导航系统的单点和差分定位技术,以及北斗系统特有的短报文通信技术;第 7~9 章介绍了若干个北斗系统的船舶导航领域的应用技术,重点阐述了北斗系统的定位的基本特性,以及北斗系统在船舶导航领域中的实际意义;第 10 章对北斗系统船舶定位技术的发展趋势进行了展望。

在“北斗系统定位技术”方面,重点阐述了基于北斗系统混合星座、三频率等特点的定位技术以及北斗特有的短报文通信技术。首先介绍了北斗系统单点定位原理,包括伪距单点定位原理、北斗系统信号多径误差模型,以及多系统组合单点定位技术;其次介绍了北斗系统载波差分定位技术,包括单差和双差伪距和载波相位模型、各类线性组合技术,以及北斗系统双频/三频载波差分定位技术;然后介绍了廉价导航模块载波定位技术,包括单频载波组合定位模型、零基线/静态/动态试验及结果分析;最后介绍北斗短报文通信技术,包括短报文通信流程、短报文的编码压缩技术,以及北斗短报文的系统开发和应用。

在“北斗系统船舶导航应用”方面,重点突出了北斗系统在船舶导航领域的应用。首先介绍了船舶导航与电子海图技术,包括电子海图和 YimaEnc SDK 的介绍,以及船舶监控系统模块设计;其次介绍了北斗卫星电子罗经的开发和设计,包括北斗卫星电子罗经仪技术、基于海洋渔业云平台架构技术;最后介绍了无人水质监测船的设计与开发,包括系统总体设计、移动端硬件设计和软件设计。

在“北斗系统船舶定位与导航技术展望”方面,重点阐述了北斗系统船舶定位技术的发展趋势,包括人工智能与定位导航技术、低轨卫星的导航定位增强技术、面向大众船舶自主式航行的位置修正信息服务,以及通导遥一体化服务。

本书主要由上海海洋大学信息学院通信导航实验室的人员编写,中海云重庆科技有限公司、上海海事大学信息工程学院的人员参与编写。本书的第 1~6 章由张云组织编写,第 7 章由洪中华和徐志京组织编写,第 8 章由蔡其和韩彦岭组织编写,第 9 章由韩彦岭组织编写,第 10 章由张云和韩彦岭组织编写,全书由张云、韩彦岭统稿。上海海洋大学的硕士研究生魏聪、于文浩、杭斯加、苏晓容、袁阳、张扬阳做了大量的论文内容收集和整理工作,在此一并致谢。

本书获得国家自然科学基金面上项目“基于全球导航卫星系统(GNSS)反射信号的海冰检测模型的研究”(编号: 41376178)和“基于激光测高和高分立体测绘卫星的大范围建(构)筑物灾害损失精细化评估方法研究”(编号: 41871325)的资助,在此表示感谢。

本书虽数易其稿,几经增删,但由于编者水平有限,错误和不当之处在所难免,恳请广大读者朋友批评指正。

作者

2018年10月

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 引言 .....	3
1.1.1 船舶导航的历史 .....	3
1.1.2 海图的简介及发展状况 .....	5
1.1.3 全球卫星导航系统 .....	7
1.1.4 天空海一体化导航系统 .....	9
1.2 全球卫星导航系统的定义和系统组成 .....	10
1.2.1 全球卫星导航系统的定义 .....	10
1.2.2 全球卫星导航系统组成 .....	11
1.3 现有的全球卫星导航系统 .....	12
1.3.1 美国 GPS 系统 .....	12
1.3.2 俄罗斯 GLONASS 系统 .....	15
1.3.3 欧洲 GALILEO .....	17
1.3.4 中国北斗系统 .....	18
1.3.5 其他区域性卫星导航系统 .....	21
1.4 北斗系统的船舶导航应用现状 .....	24
<b>第 2 章 北斗系统简介</b> .....	29
2.1 北斗系统的建设现状 .....	31
2.2 北斗系统的特点 .....	33
2.2.1 北斗系统混合星座 .....	33
2.2.2 北斗系统三频信号 .....	33
2.2.3 北斗系统短报文功能 .....	34
2.3 北斗反射信号软件接收机的设计与实现 .....	35
2.3.1 通用 GNSS 软件接收机中信号捕获处理相关算法 .....	36
2.3.2 北斗反射信号软件接收原理 .....	38
2.3.3 北斗软件接收机的实现 .....	41
2.4 北斗定位技术研究现状 .....	47

<b>第 3 章 北斗系统单点定位技术</b>	49
3.1 北斗系统测量质量分析	51
3.1.1 可视卫星数	51
3.1.2 载噪比	51
3.2 伪距单点定位	54
3.2.1 伪距观测模型	54
3.2.2 单点定位原理	55
3.2.3 观测误差分析	61
3.2.4 北斗系统单点定位结果	64
3.3 北斗系统信号多径误差模型	73
3.3.1 数学模型	73
3.3.2 定位精度	78
3.4 组合单点定位技术	80
3.4.1 组合定位必要性	80
3.4.2 组合定位算法	81
3.4.3 组合单点定位性能分析	82
3.4.4 混合星座的选星技术	86
3.4.5 开放环境实验	86
3.4.6 障碍物环境实验	91
<b>第 4 章 北斗系统载波差分定位技术</b>	95
4.1 差分技术简介	97
4.2 单差与双差伪距和载波相位	99
4.2.1 单差伪距和载波相位	99
4.2.2 双差伪距和载波相位	100
4.3 各类线性组合技术	101
4.3.1 线性组合模型	101
4.3.2 宽巷、超宽巷组合模型	104
4.3.3 LAMBDA 模型	105
4.4 北斗系统载波差分定位技术	107
4.4.1 双频短基线载波差分定位	107
4.4.2 双频中长基线载波差分定位	111
4.4.3 三频中长基线载波差分定位	114
<b>第 5 章 廉价导航模块载波定位技术</b>	127
5.1 单频载波组合定位模型	129
5.1.1 原始观测方程差分	129

5.1.2	卡尔曼滤波求解 .....	130
5.1.3	LAMBDA 算法模糊度求解 .....	130
5.2	廉价导航模块简介 .....	132
5.2.1	U-blox 系列模块 .....	132
5.2.2	ST 系列模块 .....	132
5.3	零基线实验 .....	133
5.3.1	零基线实验环境 .....	133
5.3.2	双差伪距和相位残差值 .....	133
5.3.3	双差伪距中提取多径误差及观测噪声 .....	134
5.3.4	零基线实验定位结果 .....	135
5.4	静态对比实验 .....	137
5.4.1	静态实验环境 .....	137
5.4.2	静态对比实验结果 .....	137
5.5	动态试验 .....	140
5.5.1	操场试验 .....	141
5.5.2	树木遮挡实验 .....	143
5.5.3	建筑物严重遮挡试验 .....	147
<b>第 6 章</b>	<b>北斗短报文通信 .....</b>	<b>151</b>
6.1	短报文通信简介 .....	153
6.1.1	短报文通信流程 .....	153
6.1.2	北斗报文通信服务类别 .....	154
6.2	短报文编码压缩技术 .....	155
6.2.1	短消息的概念 .....	155
6.2.2	短消息的组成要素 .....	155
6.2.3	短消息编码 .....	156
6.2.4	常见短消息结构 .....	156
6.2.5	ZLib 压缩技术 .....	157
6.3	短报文系统开发和应用 .....	158
6.3.1	北斗用户终端功能 .....	158
6.3.2	北斗用户机软件设计 .....	159
6.3.3	基于北斗短报文的水质监测系统结构 .....	162
6.3.4	短报文系统应用实验结果 .....	163
<b>第 7 章</b>	<b>船舶导航与电子海图 .....</b>	<b>167</b>
7.1	电子海图 .....	169
7.1.1	电子海图的相关介绍 .....	169

7.1.2	YimaEnc SDK .....	169
7.2	船舶监控系统模块设计 .....	174
7.2.1	海图管理设计 .....	175
7.2.2	船舶动态显示设计 .....	175
7.2.3	船舶实时监控设计 .....	177
<b>第 8 章</b>	<b>电子罗经的设计与开发 .....</b>	<b>179</b>
8.1	引言 .....	181
8.2	系统特点 .....	182
8.3	关键技术 .....	183
8.3.1	北斗卫星电子罗经仪技术 .....	183
8.3.2	基于海洋渔业云平台架构技术 .....	184
<b>第 9 章</b>	<b>无人水质监测船的设计与开发 .....</b>	<b>187</b>
9.1	引言 .....	189
9.2	系统总体设计 .....	190
9.2.1	设计思路 .....	190
9.2.2	设备组成 .....	190
9.3	无人船移动端硬件设计 .....	191
9.3.1	船体平台设计 .....	191
9.3.2	远程控制系统设计 .....	193
9.3.3	自主式系统设计 .....	195
9.3.4	数据采集传输系统设计 .....	197
9.4	无人船移动端软件设计 .....	200
9.4.1	总体架构 .....	200
9.4.2	433 MHz 无线遥控软件设计 .....	200
9.4.3	抗干扰程序架构 .....	201
9.5	系统测试和实验 .....	203
<b>第 10 章</b>	<b>北斗系统船舶定位与导航产业现状与前景展望 .....</b>	<b>207</b>
10.1	北斗系统的行业应用现状 .....	209
10.2	北斗系统定位导航技术展望 .....	209
10.2.1	人工智能与定位导航技术 .....	210
10.2.2	低轨卫星的导航定位增强技术 .....	210
10.2.3	面向大众船舶自助式航行的位置修正信息服务 .....	211
10.2.4	通导遥一体化服务 .....	211
<b>缩略语表</b>	.....	<b>213</b>

北斗卫星系统的定位技术及船舶导航应用

## 第1章 概 述

---



本章首先介绍了船舶导航的历史、电子海图的发展状况和现有的船舶导航技术,并介绍了卫星导航系统,对四大卫星导航系统的特点进行了对比。然后介绍了全球卫星导航系统(GNSS)的定义和组成,包括 GNSS 的全球设施、区域设施、用户部分以及外部设备。接着详细介绍了一些全球和区域的导航卫星系统,包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 GALILEO、中国自主研发的北斗系统、日本的 QZSS 和印度的 IRNSS,给出各个卫星导航系统的星座组成、轨道参数、卫星运转周期和建设情况等,并介绍了各个卫星导航系统的特点和相关应用技术。最后简要介绍了北斗系统的船舶导航应用现状。

## 1.1 引言

### 1.1.1 船舶导航的历史

船舶的历史几乎和人类文明史一样久远。船舶导航的发展大致分为三个阶段:远古时代至 19 世纪、20 世纪初至 20 世纪中叶和 20 世纪 60 年代至 21 世纪。

船舶导航第一个阶段主要以灯塔作为航行指向,建立的是点对点的近距离导航(一般适合于 60 km 之内),该方法受气候影响较大。世界上第一座灯塔为建立于公元前约 270 年的埃及法罗斯灯塔(见图 1.1a),它是古代的七大奇观之一,为进出亚历山大港的船只指引方向。其他著名的灯塔还有号称远东第一灯塔的中国浙江舟山嵊泗县花鸟灯塔(见图 1.1b)、澳大利亚奥特维角灯塔(见图 1.1c)和美国最上镜灯塔波特兰灯塔(见图 1.1d)等。

船舶导航第二个阶段主要以雷达为主,可以全天候实时导航,同时还可以测量船舶之间距离以避免相撞,在第二次世界大战中德军和英美盟军的军舰均广泛使用船用导航雷



(a)



(b)

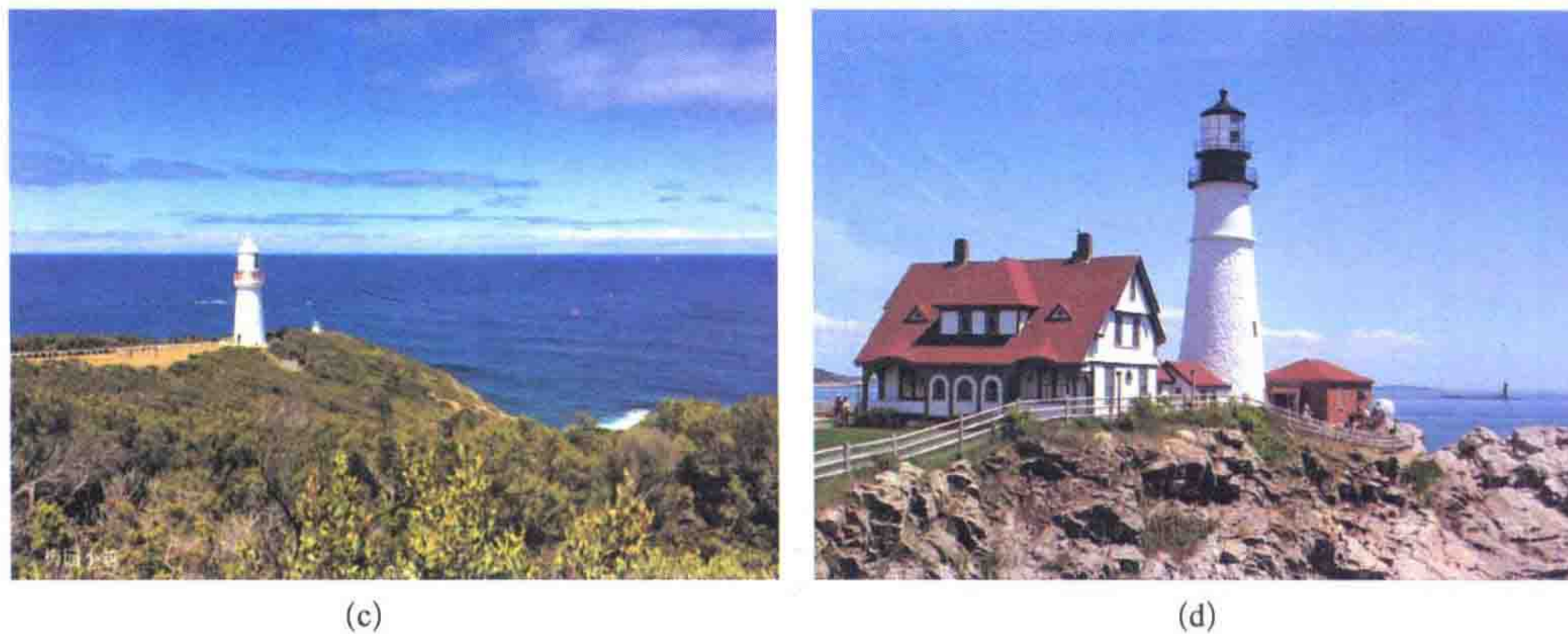


图 1.1 世界著名灯塔

(a) 埃及法罗斯灯塔;(b) 中国浙江舟山嵊泗县花鸟灯塔;(c) 澳大利亚奥特维角灯塔;(d) 美国波特兰灯塔

达(Brown 1999),战后逐步扩大到民用船舶,国际海事组织(IMO)规定,1 600 吨位以上的船舶需要装备导航雷达(见图 1.2)。



图 1.2 船用导航雷达

船舶导航第三个阶段为卫星导航,卫星导航可以实现全天候、全球性实时导航,目前全球四大卫星导航系统(美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 GALILEO 和中国的北斗系统)在船舶导航中得到广泛使用,具有划时代的意义。

近代船舶的发展,除了在船舶吨位和航速方面不断有所改进外,主要是在船上应用了