



安全通航视野下的 航道优化布置设计

ANQUAN TONGHANG SHIYE XIA DE
HANGDAO YOUHUA BUZHI SHEJI

艾万政◎著



海军出版社

安全通航视野下的 航道优化布置设计

艾万政 著

海洋出版社

2016年·北京

内 容 简 介

本书从安全通航视野出发,就目前航道建设中的一些热点问题,如航道富余水深、航道宽度、航道净空高度、桥区航道、弯曲航道等开展探索研究,希望本书的研究能够对我国的航道建设做出一点贡献。本书主要供港航管理、船舶运输等行业研究者参考。

图书在版编目(CIP)数据

安全通航视野下的航道优化布置设计/艾万政著. —北京:海洋出版社, 2016. 11

ISBN 978 - 7 - 5027 - 9609 - 9

I. ①安… II. ①艾… III. ①航道 - 设计 IV. ①U612.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 266319 号

责任编辑:郑跟娣

责任印制:赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

(100081 北京市海淀区大慧寺路8号)

北京朝阳印刷厂有限公司印刷

2016年11月第1版 2016年11月第1次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:7.75

字数:210千字 定价:32.00元

发行部:62132549 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前言

交通运输业是国民经济发展的重要支柱产业,尤其是水路运输具有清洁、运力大、节能等优点,在国内外贸易中占有重要地位。我国水路运输资源丰富,沿海各大航路可直达国外重要港口。国内主要运输水系有长江水系、珠江水系和黑龙江水系等,各水系还有很多分支水系,这些水系像血管一样遍布中华大地,构成了我国强大的航道运输网络,有力地支撑了我国水路运输事业的发展。但随着经济的发展,水上运输结构发生了深刻的变化,航道运量增多,运力增大,船舶运行强度和密度增大。搞好航道通航安全,对保障人民生命财产安全,维护航运经济持续发展,促进我国对内、对外贸易的繁荣,都具有十分重要的意义。

近几年,国家制定的水运发展战略及规划中,十分重视航道水运资源。发展航道运输,提出了强化运输生产安全管理要求和实施措施,使航道安全生产管理逐步走向科学化、规范化和制度化。尤其是在大力发展海洋经济的大背景下,航道建设和科学规划问题已经提上重要议事日程。虽然很多研究者针对航道问题开展了大量研究,且研究文献较多,也得出了一些重要的研究成果。但是已有的很多研究主要是针对航道的淤积和冲刷而展开,较少涉及船舶的操纵性,这不利于船舶在航道内的安全通航。由于航道是水路运输的载体,航道建设的终极目标是为通航服务,因此航道的建设与规划应紧密结合通航而展开。本书从安全通航视角出发,就目前航道建设中的一些热点问题开展探索研究,希望本书的研究能够对我国的航道建设做出一点贡献。具体来讲,本书针对以下问题开展了一些研究。

(1) 在航道建设中,与通航密切相关的因素包括:航道富余水深、航道宽度、航道净空高度等。本书以船舶的操纵性为基础,探讨了影响航道富余水深、航道宽度、航道净空高度的因素,并确立了航道富余水深、航道宽度、航道净空高度计算的数学模型。

(2) 针对一些事故易发的特殊航道,如桥区航道、弯曲航道开展讨论,结合船舶的操纵性,研究了船舶过弯所需要的附加宽度,并提出了弯曲航道附加宽度确定方法;通过数值模拟的手段,研究了桥墩紊流漩涡区最大范围的经验表达式,提出了桥浮和桥区航道优化布置设计方案。

(3) 以减少交通事故为目的,研究了交通事故与航道相关参数之间的关系,并基于大量统计数据,提出了航道优化布置设计方案。

(4) 以航道通航安全为目的,探讨了我国航道等级划分及航道建筑物评价问题,提出我国航道等级划分的建议和航道建筑物评价方法。

(5) 以舟山江海联运航道设计为例,提出了运用相关章节知识进行航道优化布置设计流程。

本书的顺利出版应感谢浙江海洋大学港航学院全体教师的大力支持,没有他们的支持,本书不会这么快出版发行。另外,浙江海洋大学张洪刚老师参与了本书富余水深这一章节部分内容的撰写工作,丁天明、刘虎、池弘福也参与了本书部分内容的撰写,对他们的辛勤劳动,表示衷心感谢!

本书是作者对航道建设方面的一些初浅认识,书中难免会有不足之处,希望广大同行和读者批评指正。

作者

2015年7月于浙江海洋大学

目 次

1 绪 论	(1)
1.1 研究的意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(6)
1.3 本书研究的主要内容	(8)
2 航道富余水深	(10)
2.1 浅水中船舶阻力变化	(10)
2.2 浅水对船舶操纵性能的影响	(11)
2.3 富余水深的含义	(12)
2.4 富余水深的确定方法	(13)
2.5 长江航道富余水深	(20)
2.6 本章小结	(22)
3 顺直航道优化设计	(23)
3.1 航道宽度对船舶安全的影响	(23)
3.2 交通事故与航道宽度之间的关系	(26)
3.3 顺直航道宽度设计	(27)
3.4 航道通过能力确定	(33)
3.5 本章小结	(33)
4 弯曲航道宽度设计	(35)
4.1 弯曲航道水流特性	(35)
4.2 航道弯曲对通航的影响	(36)

4.3	安全通航下的曲率半径	(38)
4.4	弯曲航道布置	(40)
4.5	本章小结	(44)
5	桥区航道布置	(45)
5.1	桥区航道布置概述	(45)
5.2	桥浮设置	(49)
5.3	桥区航道设计	(54)
5.4	桥梁防撞	(55)
5.5	本章小结	(59)
6	基于统计理论的航道设计	(60)
6.1	统计理论在航道设计中的应用	(60)
6.2	船间间距设计	(60)
6.3	船岸距离设计	(61)
6.4	基于灰色理论的航道优化	(62)
6.5	本章小结	(69)
7	航道等级划分	(70)
7.1	航道等级划分的意义	(70)
7.2	我国航道等级划分现状	(70)
7.3	航道等级划分探讨	(73)
7.4	本章小结	(79)
8	航道建筑物评价	(80)
8.1	航道建筑物对通航的影响	(80)
8.2	航道建筑物评价	(85)
8.3	本章小结	(87)
9	舟山江海联运航道通航论证实例	(88)
9.1	概述	(88)

目 次

9.2 舟山航道通航状况分析	(89)
9.3 长江航道通航状况分析	(95)
9.4 舟山江海联运规划	(107)
9.5 本章小结	(109)
10 结论与展望	(111)
10.1 重要结论	(111)
10.2 未来展望	(112)
参考文献	(113)

1 绪 论

本章介绍本书的选题背景及研究的意义,对航道优化布置设计研究现状进行回顾与评述,针对目前航道优化布置设计需要解决的问题,提出本书的研究内容及采取的技术路线。

1.1 研究的意义

水路运输具有运量大、成本低、能耗小以及占地少的优点,它是现代交通运输系统中的一个十分重要的运输方式,在国民经济和社会发展以及对外开放中占有重要地位。近年来,随着我国物流业和外贸业的进一步发展,水路运输在国民经济中的重要作用进一步凸显。水运主要是通过航道和船舶来实现,因为航道和船舶是水运的载体。目前我国沿海、内陆河流及湖泊航道众多,正是由于这些航道的存在,才保障了我国水运业的蓬勃发展。

我国的内陆水系包括珠江水系、长江水系、黑龙江水系、京杭运河水系、黄河水系等。沿海地区航道密布,和我国的内陆水系一起形成了发达的航道网络,使我国运输船舶能通江达海,有力地促进了我国对内、对外贸易的发展。除沿海航道以外,我国内陆航道网络的特点包括:①主要航道干线呈纬向分布。由于我国地形分布总趋势为西高东低,因此,除京杭人工运河外,长江、珠江、淮河和黑龙江等各主要内河航道干线均呈纬向分布。这一分布特点,与我国资源和经济的分布格局在空间上有较好的呼

应关系,因而也具有很大的发展潜力。②绝大部分航道网都分布在南方各地。因受水系分布及其水文特征的影响,中国内河航道主要密布于南方各省区。其中航道里程在2 000 km以上的省区共有12个,除黑龙江外,均位于长江及其以南地区,南方11个省区的航道合计里程为 9.52×10^4 km,已占全国航道总里程的87.1%。其中,江苏省的航道里程最长,超过 2.4×10^4 km,占全国总里程的22%,其次为广东、浙江和湖南3省,其里程都在10 000 km以上。再从航道密度看,平均每千平方千米国土拥有10 km以上航道的省区共有15个,其中除山东和黑龙江两省外,也都分布在长江及其以南地区。它们又以上海的密度为最大(412 km/ $1\ 000$ km²),其次为江苏(240 km/ $1\ 000$ km²)和浙江(106 km/ $1\ 000$ km²)。③通航条件较好的航道集中于“三江两河”水系。若以可通航百吨以上船舶的航道为通航条件较好的内河航道,则这类航道绝大部分都集中分布在长江、珠江、黑龙江、淮河和京杭大运河五大水系(简称“三江两河”水系)之中,其合计里程近30 000 km,占全国该类航道总里程的80%以上,其中仅长江水系的这类航道里程长度,就已占到全国相应总里程数的42%。“三江两河”水系的货运量和货物周转量,也都分别占到了全国内河水运相应总量的80%以上。其中也以长江水系所占的比重为最大,其次为珠江水系和京杭运河。

长江(包括京杭运河和淮河)是世界上第二大河,也是内河航运最发达的河流,是我国第一大内河运输水系,被称为中国的黄金水道,共有通航支流3 600多条,其干支流合计通航里程为7万余千米(含京杭运河和淮河)。长江水系支流、湖泊众多,主干航道与支流航道、支流航道与支流航道之间的关系较为复杂。珠江是我国四大河流之一,由西江、北江、东江及珠江三角洲四大部分组成,流域涉及六省区和越南部分地区,其中与航运关系密切的是广东、广西两省区。珠江航运条件比较优越,其多年平均径流量为 3.38×10^8 m³,仅次于长江居全国第二位,珠江又属少沙性

河流,多年平均含沙量仅 0.27 kg/m^3 。全水系合计通航里程超过 $1.4 \times 10^4 \text{ km}$ 。西江横贯两广,是珠江水系的主要航道。西江航运干线自南宁经东平水道至广州 854 km ,其中南宁至贵县 279 km ,可通航 $80 \sim 120$ 吨级轮驳船队和 200 个客位的客轮;贵县至梧州 275 km ,通航 $120 \sim 250$ 吨级轮驳船队及 300 客位客轮;梧州至广州 300 km ,可通航 $1\,000$ 吨级轮驳船队和 $300 \sim 400$ 客位的客轮。西江上游右江百色至南宁 375 km ,可通航 120 吨级轮驳船队;支流柳江至桂平 268 km ,可通航 $120 \sim 250$ 吨级轮驳船队和 200 客位客轮;红水河可通航 120 吨级轮驳船。北江和东江通航条件相对较差,通航船舶一般为 50 吨级,最大不超过 100 吨级。珠江三角洲水网纵横交错,有通航水道 800 多条,通过 8 个口门河海相通,通航里程超过 $5\,300 \text{ km}$,其中前山水道通航 100 吨级船舶;陈村水道通航 300 吨级船舶;莲沙蓉水道通航 500 吨级船舶。珠江干流一般能通航 $1\,000 \sim 20\,000$ 吨级海轮。黑龙江系中苏界河,是我国第三大内河运输水系。黑龙江干流长 $2\,820 \text{ km}$,其中中苏界河自恩和哈达至伯力长 $1\,890 \text{ km}$,全部可以通航。黑龙江水深条件较好,可通航 $500 \sim 1\,000$ 吨级船舶;松花江是黑龙江的主要支流,也是黑龙江水系的水运干线,通航里程 864 km ,可通行 $500 \sim 1\,000$ 吨级船舶;中苏界河乌苏里江也有较好的水深条件,可通航 $500 \sim 1\,000$ 吨级船舶;此外,嫩江也是黑龙江水系的一条主要通航河流。黑龙江水系有较好的水深条件,其航运发展具有其有利的条件。

近几年,随着国民经济的发展,航道运输结构发生了深刻的变化,航道运量增多,运力增大,船舶运行强度和密度增大。根据 2008 年 4 月 30 日至 2010 年 7 月 26 日武汉长江大桥断面日均船舶流量观测结果, 2008 年 4 月 30 日以来,通过武汉长江大桥断面的船舶日平均流量约为 403 艘。其中绝大多数船舶为普通货船,约为 265 艘,占日平均流量的 65.82% ,另有少量客船、集装箱船、船队,分别占日均流量的 17.30% 、 6.90% 、 5.37% 。并有少量危险品船、公务船、渔船、工程船等船舶在航段内航

行，约占船舶日平均流量的 4.61%。在该航段内航行的船舶主要是船长为 50~90 m 的中型船舶，约占船舶日平均流量的 60.69%；其次为船长在 30~50 m 的小型船舶，约占船舶日平均流量的 22.05%；30 m 以下的小型船舶约占 5.87%；船长在 90 m 及 90 m 以上的大型船舶，约占 11.39%。2008 年 4 月 30 日至 2010 年 7 月 26 日武汉长江大桥断面日均船舶流量观测结果分别如图 1.1 和图 1.2 所示。

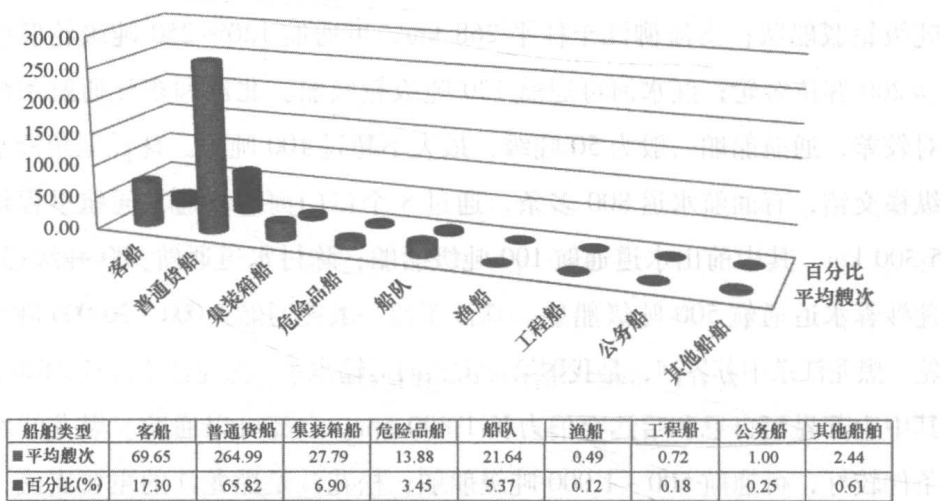


图 1.1 武汉长江大桥断面日均船舶流量（按船舶种类分）

据相关统计资料显示，30% 的水运交通事故是由航道缺陷引起的。航道是为通航服务的，因此航道布置应充分考虑船舶的操纵特性。近几年，由于航道缺陷引起的交通事故时有发生，这对发展我国水路运输经济极为不利。据舟山海事局统计，舟山海域 2005—2012 年船舶交通事故 339 起（表 1.1），40% 左右的事发生在弯曲航道和交叉航道等复杂航道。由此看来，紧密结合船舶的操纵性，科学研究航道的优化布置，对维护航运安全有着十分重要的现实意义。

1 绪 论

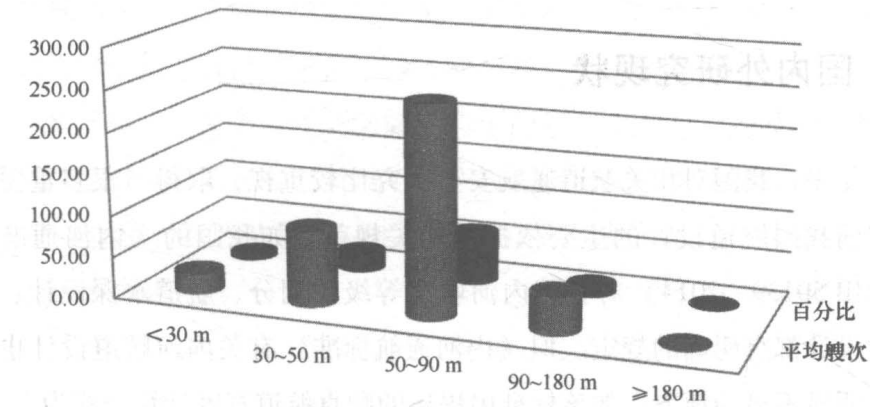


图 1.2 武汉长江大桥断面日均船舶流量（按尺度分）

表 1.1 2005—2012 年舟山海域航道交通事故统计

年份	碰撞	触损	自沉	触礁	搁浅	火灾	其他	合计
2005	10	11	10	5	2	0	4	42
2006	36	12	7	4	2	0	2	63
2007	22	6	7	8	0	0	0	43
2008	25	13	3	8	0	2	1	52
2009	16	9	7	14	0	2	2	50
2010	25	5	5	4	1	2	0	42
2011	27	5	1	2	0	1	0	36
2012	5	1	2	2	0	1	0	11
合计	166	62	42	47	5	8	9	339

1.2 国内外研究现状

近年来,我国对相关航道通航安全研究比较重视,取得了很多重要成果。目前我国航道设计的主要依据是相关规范。如我国的《内河通航标准》(GB 50139—2014)对我国内河航道等级的划分、航道水深设计、航道宽度设计都有明确的规定。但《内河通航标准》有关内河航道设计也存在一些明显不足的地方。如该标准中提出的顺直航道宽度计算公式为

$$B = |B_1| + |B_2| + C + 2d \quad (1.1)$$

式中, B_1 为上水船所占航宽, $B_1 = |L_1 \sin a| + |b_1 \cos a|$, L_1 为上水船船长, b_1 为上水船船宽, a 为漂角; B_2 为下水船所占航宽, $B_2 = |L_2 \sin a| + |b_2 \cos a|$, L_2 为下水船船长, b_2 为下水船船宽; C 为船与船之间的间距 ($C = 0.25 |L \sin a + b|$), L 取 L_1 和 L_2 之中的较大者, b 取 b_1 和 b_2 之中的较大者; d 为船与岸之间的间距, $d = 2C$ 。

《内河通航标准》所提出的内河顺直航道宽度计算公式是在充分论证的基础上提出的,具有一定的科学性。但是,如果将《内河通航标准》中的航宽公式应用到航道设计,有3个地方有待完善:①该公式没有较好地考虑风和流对航道宽度的影响。事实上,船舶在风和流的作用下,不但会产生偏转,同时也会产生漂移;②标准中将 a 定义为漂角有失偏颇,作者通过阅读大量文献,认为将 a 改为偏航角比较恰当;③公式(1.1)只是从船型角度和宏观上考虑航道尺度,对于特定水域(如桥区、弯曲航道等),套用本公式来设计航道尺度有失偏颇。这主要是因为特定的水域,存在特殊的水流条件,应将这些影响船舶操纵的特殊条件考虑到航道设计中去。又如《内河通航标准》在界定弯曲航道宽度时指出“弯曲航道宽度应在顺直航道宽度的基础上适当加宽”,但究竟加宽多少,该标准并没有明确指出,这对于我国内河航道建设极为不利。

目前国内外关于航道的研究很多,但大部分研究主要是针对航道的冲刷和淤积而展开,具体来讲,这些研究主要是针对航道悬移质和推移质运动规律来开展的。航道的主要功能是用于通航,因此,说到底航道的优化布置设计应充分考虑船舶的操纵性。关于船舶操纵性对航道布置的影响,国内外专家比较关注的问题是船舶航行时的偏航距,认为偏航距是关系到航道布置的关键问题之一。张仲南(1982)和李一兵等(1990)通过大量试验,得出了船舶过闸横向偏航速度与横向流速之间的经验关系,这种经验关系对于航道布置具有借鉴意义。但是,该经验关系也仅仅适用于船闸,对于其他航道,由于船舶受到特殊水流作用不同,他们提出的横向偏航速度经验公式不一定实用。陈永奎(1996,1999)针对船舶在均匀斜流场偏航漂移的计算公式进行了系统的研究,从动量定理出发,推导出了船舶横漂速度的理论计算公式。但是该公式不但没考虑风动力矩的作用,而且公式的应用还要考虑船体附加质量,而附加质量很难准确计算,因此陈永奎所提出的偏航漂移计算公式还不能完全应用于实际。苏联沙拉辽夫(1983)应用数理统计理论对航道通航环境进行过研究,建立了航道尺度与交通事故数据之间的定量关系,这种定量关系综合考虑了航道尺度的所有因素,具有很好的借鉴意义。但是,沙拉辽夫成果的应用要依赖于统计数据,推广应用多有不便。近几年,不少专家在通航评估中,认为船舶在航道的偏航距应该是风致漂移量和流致漂移量的叠加,这种处理偏航距的方法虽然充分考虑了风对船舶操纵的影响,但是考虑问题过于宏观,并没有仔细考虑特殊航道的特殊水流对航道布置的影响,尤其是在弯曲、桥区航道,弯道环流变化较大,这种方法的可靠性更受到质疑。随着航道建设事业的发展,实船试验方法被应用到桥区航道布置的研究中,而且该方法也被认为是一种解决航道布置问题最为可靠的方法。但由于该方法耗费巨大,且实施困难,包括易于受到环境的影响,有发生碰撞等事故的风险。同时实船试验方法往往仅能开展特定工况下的研究,由于耗费巨大,不可

能对各种工况进行系列试验,从一定层面上讲,实船试验数据具有不可复制性。总之,关于船舶操纵性对航道布置的影响,国内外的相关研究还存在一定的缺陷,因此对这一问题的研究也有待于进一步深入。

弯曲航道和桥区航道属于特殊航道,这些航道水流流态复杂,不利的水流条件易于诱发交通事故。弯曲航道不但存在纵向流速,而且还存在弯道环流,弯道环流是诱发船舶触岸的重要因素;桥区航道由于桥墩的存在,水流结构发生改变,桥墩附近存在“墩吸流”,也易于诱发船舶撞桥。因此,在考虑桥区航道和弯曲航道等特殊航道的优化布置设计时,不但要考虑船舶的操纵性,而且还应充分考虑它们的特殊水流条件。然而,关于这些特殊的水流条件在航道布置时并没有得到足够的重视,相关的研究文献也很少见。因此,有关特殊航道的优化布置设计问题有待进一步加强研究。

综上所述,从通航安全视野出发,前人对航道优化布置设计研究还有很多不充分的地方,还有很多热点问题亟待解决。本书主要针对以往研究的不足之处,从通航安全角度出发,研究航道优化布置设计问题,以促进我国水路运输事业的持续发展。

1.3 本书研究的主要内容

以船舶安全航行为目的,紧密结合船舶的操纵性能以及航道的水流条件,针对航道优化布置设计方面,进行了以下几方面的研究。

- (1) 在回顾和总结前人研究成果的基础上,确定本文的主要研究内容。
- (2) 从船舶通航安全角度出发,探讨航道富余水深的确定方法。
- (3) 研究顺直航道的优化布置设计方案,包括航道的宽度设计、航道的通过能力设计。

(4) 研究船舶过弯操纵性, 探讨弯曲航道宽度加宽值的确定方法。

(5) 通过数值模拟, 研究桥墩紊流漩涡区范围, 提出桥区航道优化布置设计方案。

(6) 研究基于统计理论的航道优化布置、航道评价方法。

(7) 研究航道等级划分, 提出航道等级划分的建议 and 对策。

(8) 研究航道建筑物评价方法、评价体系。

(9) 应用以上各章节的理论, 以舟山江海联运航道优化布置设计为实例, 探索航道优化布置设计流程。