



- 高等学校水利学科教学指导委员会
- 中国水利教育协会
- 中国水利水电出版社

共同组织编审

普通高等教育“十二五”规划教材配套辅导书
全国水利行业规划教材

沿海港口航道 仿真理论与实验指南

唐国磊 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



- 高等学校水利学科教学指导委员会
- 中国水利教育协会
- 中国水利水电出版社

共同组织编审

普通高等教育“十二五”规划教材配套辅导书
全国水利行业规划教材

沿海港口航道 仿真理论与实验指南

唐国磊 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是沿海港口航道数值仿真实验的配套实验指导教程，主要内容包括海港进港航道设计、船舶航行作业系统仿真、海港航道仿真实验教学系统以及海港进港航道仿真实验等内容。本书另附有实验报告供学生使用。

本书是港口航道与海岸工程专业本科生沿海港口航道数值仿真实验的指导教程，同时可以作为土木、水利、交通运输类专业为拓宽专业口径而设置的有关港口课程的实验教材，也可供从事港口规划、设计、航道工程等工程技术人员，以及院校相关专业的师生参考。

图书在版编目（C I P）数据

沿海港口航道仿真实理论与实验指南 / 唐国磊主编
— 北京：中国水利水电出版社，2012. 11
普通高等教育“十二五”规划教材配套辅导书. 全国水利行业规划教材
ISBN 978-7-5170-0229-1

I. ①沿… II. ①唐… III. ①海港—航道—仿真—高等学校—教材 IV. ①U612. 32

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第260566号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材配套辅导书 全 国 水 利 行 业 规 划 教 材 沿海港口航道仿真实理论与实验指南
作 者	唐国磊 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 5 印张 119 千字
版 次	2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	12. 00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

为改进与创新现有港口航道与海岸工程专业教学实验手段,大连理工大学港口航道与海岸工程实验室率先增设了沿海港口航道数值仿真实验,将计算机仿真技术引入到本专业综合实验课程。该实验是国家自然科学基金《复杂条件下沿海港口深水航道通过能力及航道线数的研究》科研成果的应用,反映了港口航道与海岸工程专业的新技术及发展前沿,有助于培养本科生的科研能力和创新思维。由于该实验在国内尚属首次开设,因此,为满足实验教学和理论教学的需求,亟需开发设计实验教学平台,并编制配套的实验指导教材。

为此,特编制本书,并以大连理工大学港口发展研究中心开发的具有自主知识产权的沿海港口航道设计仿真实验软件(教学版)作为该仿真实验的教学实验平台。读者可以从网站 port.dlut.edu.cn 中获取该实验的相关资料。

本书以沿海港口进港航道为对象,除第1章绪论外,主要包括四部分内容:第2章介绍了沿海港口进港航道设计的基本原则,以及航道设计方案的主要评价指标;第3章阐述了计算机仿真的基本理论、建模的基本方法,以及沿海港口船舶航行作业系统的逻辑模型和仿真模型,是该实验的理论基础;第4章详细介绍了沿海港口航道仿真实验教学系统的主要功能及使用说明;第5章,着重介绍了沿海港口航道数值仿真实验的实验内容、实验方法等,并给出了实验报告的内容与格式,方便实验者总结实验研究成果。

特别感谢大连理工大学宋向群教授、郭子坚教授对本书的补充修订,并提出宝贵的建议和修改意见。

感谢大连理工大学土木水利实验教学中心的大力支持与帮助。

感谢大连理工大学港口发展研究中心王文渊博士以及各位研究生的大力协助。

本书在编写过程中,参考并引用了大量国内外相关文献资料,吸收和借鉴了有关研究成果,在此一并表示感谢。

编者

2012年8月

前言

第 1 章 绪论	1
第 2 章 海港进港航道设计	3
2.1 航道及分类	3
2.2 进港航道设计内容	4
2.3 进港航道设计主要评价指标	13
2.4 工程实例	15
第 3 章 船舶航行作业系统仿真	17
3.1 系统仿真基本理论	17
3.2 单服务台排队系统仿真实例	22
3.3 船舶航行作业过程	29
3.4 系统组成	30
3.5 船舶到港规律及占用泊位时间分布	31
3.6 逻辑模型	33
3.7 仿真模型	35
第 4 章 海港航道仿真实验教学系统	37
4.1 系统主要功能	37
4.2 系统使用说明	37
第 5 章 海港进港航道仿真实验	45
5.1 实验目的	45
5.2 实验内容	45
5.3 实验条件	46
5.4 实验方法	46
5.5 实验案例	47
参考文献	57

沿海港口航道数值仿真实验实验报告

第 1 章 绪 论

随着我国逐渐进入工业化加快发展时期,对能源、原材料和工业品等的运输需求巨大,带动我国海港货物吞吐量迅速增长,运输船舶大型化的趋势也日益明显,这就要求沿海港口进一步加快规模化、集约化港区和大型专业化码头以及沿海港口深水航道的建设,以适应国际海上运输专业化、船舶大型化的发展要求,以及满足国民经济和对外贸易发展的需要。

然而,港口货物吞吐量的增加和船舶大型化趋势必然导致进港船舶数量不断增多,航道内船舶交通日趋繁忙,使需要进港的船舶在不同程度上出现等待航道的现象,造成航道使用的冲突,尤其单向航道的冲突更加明显。严重的等待往往会延长船舶在港的非作业停时,造成经济损失,产生所谓的“瓶颈现象”,给港口通过能力的发挥带来一定的影响,造成航道通过能力和港口通过能力不匹配,相配套的航道等级规模、通航条件逐渐成为港口发展的制约因素。因此,长江口、珠江口、营口、秦皇岛、天津、青岛、连云港、上海、厦门、广州、深圳、湛江、防城港等主要港口正积极地提高进港航道通航水深,以提高港口的通过能力;在通航水深提高的同时,航道的拓宽工程也在增多,个别港口已由原来的单向通航转变为双向通航,有效缓解了船舶通航压力,提高了港口生产效率。

鉴于开挖以及维护航道的巨大投资,各港口的行政管理部门、投资者、规划设计者等都迫切希望把握航道拓宽浚深的最佳时机,进而提高整个港口的经济效益。然而,航道内船舶交通量增大,新型船舶出现而引起船种和船型的构成更加复杂,航道建设规模扩大、航道长度越来越长等都会带来一些新问题,需在工程设计、建设、运营等方面加以考虑。为深化本科生对航道设计要素的理解,掌握港口航道设计的基本方法,切实了解设计水深以及乘潮水位对港口规划、设计和运营等方面的影响,开设沿海港口航道设计实验显得十分必要。

从目前教学实验手段和条件来看,物理模型试验花费的成本较大、时间相对较多,学生难以同时进行多个实验方案设计与验证,限制了学生自主学习和研究探索的积极性。为了全面实施精英教育、培养精英人才,结合国家自然科学基金《复杂条件下沿海港口深水航道通过能力及航道线数的研究》科研成果,在专业课教学改革中,大连理工大学港口航道与海岸工程实验室将“计算机仿真”引入到港口工程规划设计中,增设“港口水域布置专业实验项目”之沿海港口航道数值仿真实验,作为《港口规划与布置》专业课程有益的补充。

为此,结合港口规划与布置实践经验,大连理工大学开发设计了具有自主知识产权的沿海港口航道设计仿真实验软件(教学版)(以下简称海港航道仿真实验教学系统),作为本次数值仿真实验的实验平台。该系统集成了典型沿海专业化港区信息数据库、船舶航行

作业系统仿真、航道疏浚量及疏浚成本计算以及敏感性分析等功能。本科生可应用“沿海港口航道仿真实验教学系统”，依据选定的“典型沿海专业化港区”基础数据，如船舶到港规律、每潮次船舶乘潮进出港持续时间、航道通航水位、潮汐、气象等参数的不同组合，独自设计仿真试验方案，并验证各方案的港口服务水平（AWT/AST）、船舶等待时间、航道疏浚成本等评价指标值，挖掘航道主尺度与 AWT/AST、船舶等待时间、航道疏浚量之间关系，进而规划设计航道的主要要素，如航道线数、航道宽度、航道通航水位、通航水深等。同时，实验的结论因学生所选取参数的不同而不同，可改变专业课实验中验证性内容过多以及实验设备维护成本过高等弊病，对于培养港口航道与海岸工程专业学生的实验设计能力、创新思维能力、工程实用能力具有重要的作用，将极大发挥学生自主学习和研究探索的积极性。

与此同时，为更好地帮助学生熟悉航道设计的原则、仿真实验的基本原理以及仿真结果统计分析方法，掌握实验平台的操作技巧，编写出版配套实验教材《沿海港口航道仿真理论与实验指南》。本实验教材的主要内容包括以下几部分：

首先，介绍航道及其分类，详细阐述沿海港口进港航道的具体设计内容及主要影响因素，以及设计方案的主要评价指标，让学生掌握航道设计的具体内容，以及影响航道设计方案优化的影响因素及评价指标。

其次，讲述系统仿真的基本理论、建模的基本方法，以及仿真结果分析的基本方法，从逻辑、仿真模型两方面，阐述沿海港口船舶航行作业系统的具体流程及实现过程，为学生更好地认识系统仿真建模过程、仿真方案设计以及仿真结果统计分析提供理论基础。

最后，明确沿海港口航道仿真实验的实验目的、实验内容、实验条件、实验方案设计等内容，并详细介绍沿海港口航道仿真实验教学系统的主要功能、主要界面及系统使用说明，让学生了解仿真实验的目的及内容，熟悉实验环境等。本书以某港区进口散货作业区为例，给出实验案例，分析该实验操作及结果分析过程中的要点、难点，深化学生对航道设计要素的理解，并给出实验报告的内容要求。

第2章 海港进港航道设计

2.1 航道及分类

航道 (navigation channel; fairway) 是指在江河、湖泊、水库等内陆水域和沿海水域中能满足船舶和其他水上交通工具安全航行要求的通道, 由可通航水域、助航设施和水域条件组成。航道有多种分类方式。

按形成原因, 航道可分为天然航道和人工航道。天然航道在低潮时其水深已足够船舶航行需要, 即无需人工开挖航道; 多数情况下, 近海自然水深不能满足船舶航行所需的深度和宽度等要求, 需开挖人工航道。

按使用性质, 航道可分为专用航道和公用航道。专用航道是指由军事、水利电力、林业、水产等部门以及其他企业事业单位自行建设、使用的航道; 公用航道是指由国家各级政府部门建设和维护、供社会使用的航道。

按管理归属, 航道可分为国家航道和地方航道, 都属于公用航道。国家航道主要指: ①构成国家航道网、可以通航五百吨级以上船舶的内河干线航道; ②跨省、自治区、直辖市, 可以常年 (不包括封冻期) 通航三百吨级以上 (含三百吨) 船舶的内河干线航道; ③可通航三千吨级以上 (含三千吨级) 沿海的干线航道; ④对外开放的海港航道; ⑤国家指定的重要航道。地方航道是指: ①可以常年通航三百吨级以下 (含不跨省可通航三百吨级) 船舶的内河航道; ②可通航三千吨级以下的沿海航道及地方沿海中小港口间的短程航道; ③非对外开放的海港航道; ④其他属于地方航道主管部门管理的航道。

按航道所在地域, 航道可分为沿海航道和内河航道。沿海航道, 是指位于海岸线附近、具有一定边界、可供海船航行的航道; 内河航道, 是指河流、湖泊、水库内的航道, 以及运河和通航渠道的总称。

按通航时间长短, 航道可分为常年通航航道和季节通航航道。常年通航航道, 即可供船舶全年通航的航道, 又可称为常年航道; 季节通航航道, 即只能在一定季节 (如非封冻季节) 或水位期 (如中洪水期或中枯水期) 内通航的航道, 又可称为季节性航道。

按通航限制条件, 航道可分为单向航道、双向航道和限制性航道等。单向航道, 即在同一时间内, 只能供船舶沿一个方向行驶, 不得追越或在行进中会让的航道, 又可称为单线航道或单行航道; 双向航道, 即在同一时间内, 允许船舶对驶、并行或追越的航道, 又可称为双线航道或双行航道; 限制性航道, 即由于水面狭窄、断面系数^①小等原因, 对船舶航行有明显的限制作用的航道, 包括运河、通航渠道、狭窄的设闸航道、水网地区的狭

① 航道断面系数是指在设计最低通航水位时的过水断面面积与设计船舶船艏浸水面积的比值。

窄航道, 以及具有上述特征的滩险航道等。

按通航船舶类别, 内河航道可分为内河船航道、海船进江航道、内河航道主航道、副航道、缓流航道和短捷航道等。内河船航道, 是指只能供内河船舶或船队通航的内河航道; 海船进江航道, 是指内河航道中可供进江海船航行的航道, 其航线一般通过增设专门的标志辅以必要的“海船进江航行指南”之类的文件加以明确; 内河航道主航道, 是指供多数尺度较大的标准船舶或船队航行的航道; 副航道, 是指为分流部分尺度较小的船舶或船队而另行增辟的航道; 缓流航道, 是指为使上行船舶能利用缓流航行而开辟的航道, 这种航道一般都靠近凸岸边滩; 短捷航道, 是指分汊河道上开辟的较主航道航程短的航道, 这种航道一般都位于可在中洪水期通航的支汊内。

按航道所在特殊部位分为桥区航道、湖区航道、库区航道和进港航道等。桥区航道, 是指位于跨河桥梁及其上、下游一定范围内的航道; 湖区航道, 是湖泊航道、河湖两相航道和滨湖航道的总称; 库区航道, 是指位于水库库区内的航道; 进港航道, 是指与沿海航道或内河主航道连接的、供船舶进出港池使用的航道。

2.2 进港航道设计内容

航道设计与港口的位置有密切关系。布置在深水海岸的港口, 船舶进出港是利用天然水深, 无需人工开挖航道, 仅用浮标标示出通航线路; 布置在浅水海岸的港口, 必须开通航道、直达港口。海港进出港航道常常是港口规划、设计和维护的最重要的问题之一。

沿海进港航道设计包括航道选线与轴线布置, 航道设计基本尺度, 如航道有效宽度 W 、通航水深 D_0 、备淤深度 Z_4 、航道通航水位、航道边坡坡度 ($1:m$ 和 $1:n$) 等, 如图 2-1 所示。航道线数选择、转弯段设计也是航道规划的重要内容。航道设计过程中应考虑船舶的安全航行、船舶操作方便、地形、气象和海象条件以及与其他设施的协调配合等。

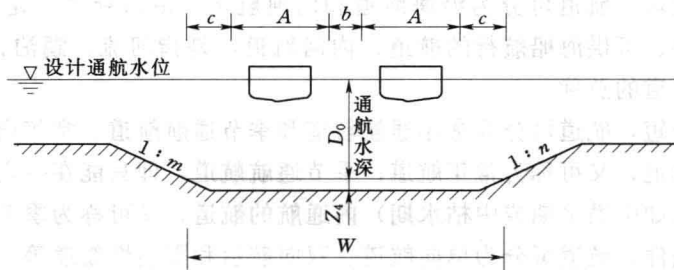


图 2-1 航道设计的基本尺度

2.2.1 航道选线与轴线布置

选择进港航道最佳方位是港口总体规划和设计的一项重要工作。航道选线应结合港口总体规划, 适当留有发展余地, 注意适应港口平面布置和远景发展对航道的要求。为保证船舶在航道中安全方便进出港口, 满足良好的操船作业条件, 提高航道通过能力, 航道轴

线布置应符合以下要求：

(1) 航道轴线应尽量顺直，避免 S 形航路。航道需要转向时，转向角应尽量控制在 30° 以内。超过 30° 时，应适当加大转弯半径、加宽航道、减小航速或拖船助航。

(2) 应避免多次转向；必须多次转向时，宜采取减小转向角、加长两次转向间距、加大回旋半径或适当加宽航道等措施，使其达到设计要求。

(3) 临近防波堤口门外的航道应按直线布置。防波堤口门内航道与转头水域连接时最好按直线布置，并应满足制动距离要求。为了防止船舶进入防波堤口门前发生事故，防波堤口门外的航道直线段应不小于船舶制动距离。

(4) 应尽量减少航道轴线与强风、强浪和水流主流向间的夹角，避免船舶受常风、常浪和流的横向作用，通常要求夹角控制在 $\pm 20^\circ$ 范围内为最佳方向， $70^\circ \sim 110^\circ$ 范围内为恶劣方向。

(5) 航道轴线应尽量避免与大于 7 级风力、频率较高的风向正交，以减少船舶在强横风下航行的机遇。

(6) 航道轴线宜尽量避免与大于 1kn 横流正交。

(7) 一般而言，输沙以推移为主，航道轴线与主波向、主流向交角愈大，淤积率愈大。在泥沙活跃海岸，航道淤积应作为专门课题，结合模型试验研究合理的布置方案。

(8) 对有冰冻的港口，航道轴线应注意排冰条件和冰凌对船舶航行的影响，尽量避开冰凌及排冰通道。

2.2.2 航道有效宽度

1. 单向、双向航道及复式航道

根据航道线数，航道可分为单向航道、双向航道，如图 2-2 (a)、(b) 所示。单向航道，是指在同一时间内，只能供船舶沿一个方向行驶，不得追越或在行进中会让的航道；双向航道或双线航道，是指在同一时间内，允许船舶对驶、并行或追越的航道。在进出港船舶较少的情况下，一般可采用单向航道，以减少疏浚工程量和投资费用；当船舶进出港频繁时，则采用双向航道。

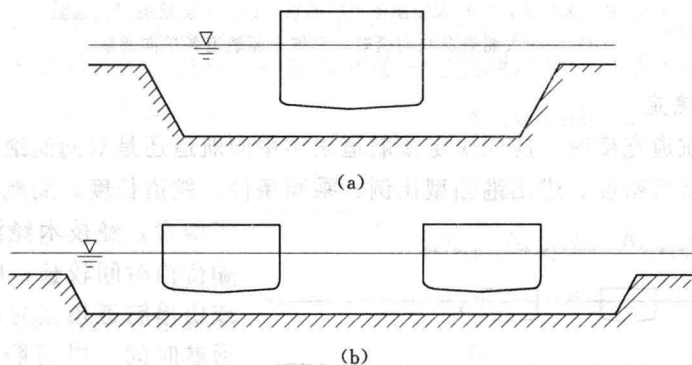


图 2-2 单向、双向航道断面示意图

(a) 单向航道；(b) 双向航道

复式航道，是指同一航道设计断面处有两个或两个以上不同航道通航深度的航道，一

般分为以下三种形式：

(1) 主航道（大船航道或重载航道）与次航道（小船航道或轻载航道）分开设置，见图 2-3 (a)。

(2) 大船航道单向通航，见图 2-3 (b)；或小船航道双向通航，见图 2-3 (c)。

(3) 中间大船航道双向通航，两侧小船航道各单向通航，见图 2-3 (d)。

复式航道中，大船航道、小船航道的布设应根据航行方式、疏浚工程量和港内泊位分布等因素确定。

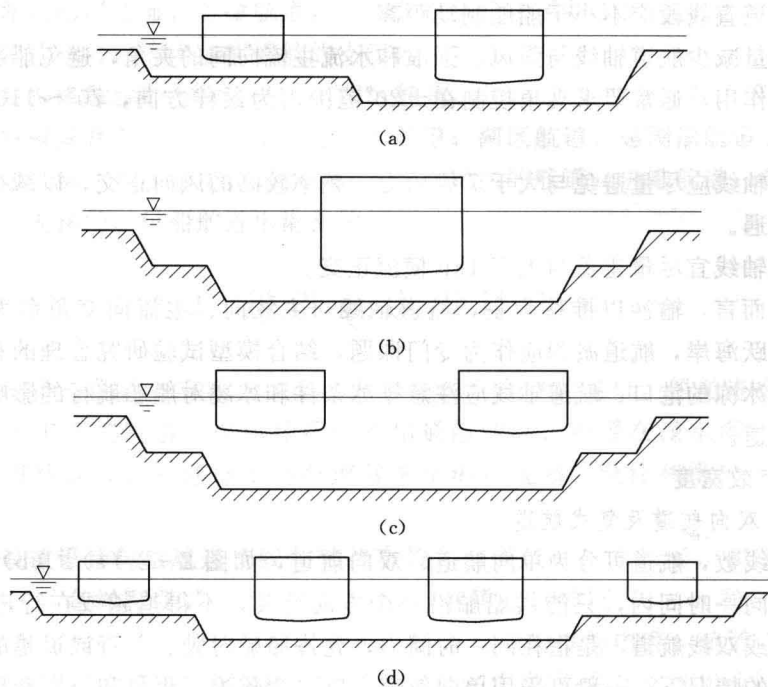


图 2-3 复式航道断面示意图

(a) 主、次航道；(b) 大船航道单向通航；(c) 小船航道双向通航；

(d) 中间大船航道双向通航，两侧小船航道各单向通航

2. 航道线数确定

在确定进港航道宽度时，应先决定该航道采用单向航道还是双向航道。航道线数的选择，应根据船舶航行密度、进出港船型比例、乘潮条件、航道长度、助航设施和交通管理

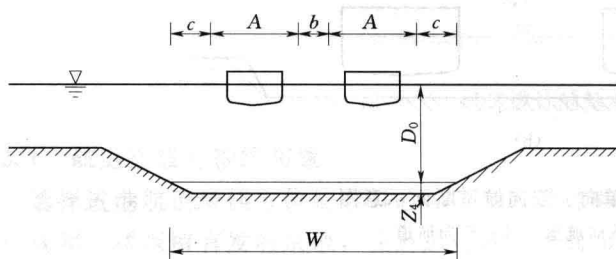


图 2-4 双向航道有效宽度

等因素，经技术经济论证确定。船舶待泊时间较长，应适当加深航道或由单航道拓宽为双向航道，延长通航时间，提高船舶进出港艘数。当航道内船流密度较大经论证有必要大、小船或重载、空载船多道航行时，可采用复式航道。但对于运输液化石油气 (Liquefied Petrole-

um Gas, LPG)、液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG) 及其他特殊危险品船要求必须按单向航道航行。

3. 航道有效宽度

航道有效宽度是指航槽断面通航水深处两底边线之间的宽度，通常用 W 表示，航迹带宽度 A 、船舶间错船富裕间距 b 和离岸距离 c 组成，如图 2-4 所示。

双向航道 $W=2A+b+2c$ (2-1)

单向航道 $W=A+2c$ (2-2)

其中 $A=n(L\sin\gamma+B)$ (2-3)

式中 n ——船舶漂移倍数，见表 2-1；

γ ——风、流压偏角，($^{\circ}$)，见表 2-1；

L 、 B ——设计船长和设计船宽，m；

b ——船舶错船富裕宽度，m，取设计船宽 B ，当船舶交汇密度较大时，可适当增加；

c ——船舶与航道底边间的富裕宽度，m，可按表 2-2 取值。

表 2-1 满载船舶漂移倍数 n 和风、流压偏角 γ 值

风 力	横风不大于 7 级			
横流 V (m/s)	$V\leq 0.25$	$0.25<V\leq 0.5$	$0.5<V\leq 0.75$	$0.75<V\leq 1.0$
n	1.81	1.69	1.59	1.45
γ ($^{\circ}$)	3	7	10	14

注 当斜向风、流作用时，可近似取其横向投影值查表。

表 2-2 船舶与航道底边间的富裕宽度 c

船 种	杂货船、集装箱船		散 货 船		油船或其他危险品船	
航速 (kn)	≤ 6	>6	≤ 6	>6	≤ 6	>6
c (m)	$0.5B$	$0.75B$	$0.75B$	B	B	$1.5B$

通常，典型的双向航道宽度约为 $8B$ ；单向航道宽度约为 $5B$ 。游艇港的航道宽度可按双向航道设计。当航道较长、自然条件较差和船舶定位困难时，可适当加宽；在自然条件有利的地点，经论证可适当缩窄。

2.2.3 海港航道水深

航道水深分航道通航水深和航道设计水深，如图 2-5 所示。值得指出，航道通航水深，又称航道的“有效”水深或公告水深不包含备淤深度 Z_4 。

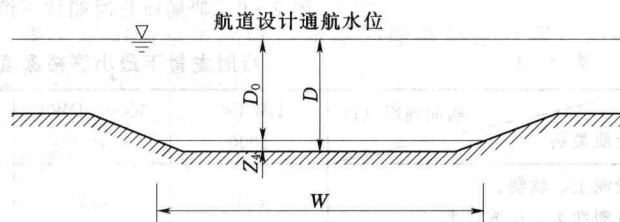


图 2-5 航道通航水深与设计水深

航道设计水深应按下列公式计算：

$$D=T+Z_0+Z_1+Z_2+Z_3+Z_4$$

(2-4)

若不计 Z_4 ，即得到航道通航水深 D_0 ：

$$D_0 = T + Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 \tag{2-5}$$

式中 D ——航道设计水深，m；

D_0 ——航道通航水深，m；

T ——设计船型满载吃水，m；

Z_0 ——船舶航行下沉量，m，对于非限制性航道，按图 2-6 确定；

Z_1 ——龙骨下最小富裕深度，m，取决于底质条件和船舶吨位，采用表 2-3 中的数值；

Z_2 ——波浪富裕深度，m，按表 2-4 确定；

Z_3 ——船舶装载纵倾富裕深度，m，杂货船和集装箱船可不计，油船和散货船取 0.15m；

Z_4 ——备淤深度，m，应根据两次挖泥间隔期的淤积量计算确定，对于不淤港口，可不计备淤深度；有淤积的港口备淤深度不宜小于 0.4m。

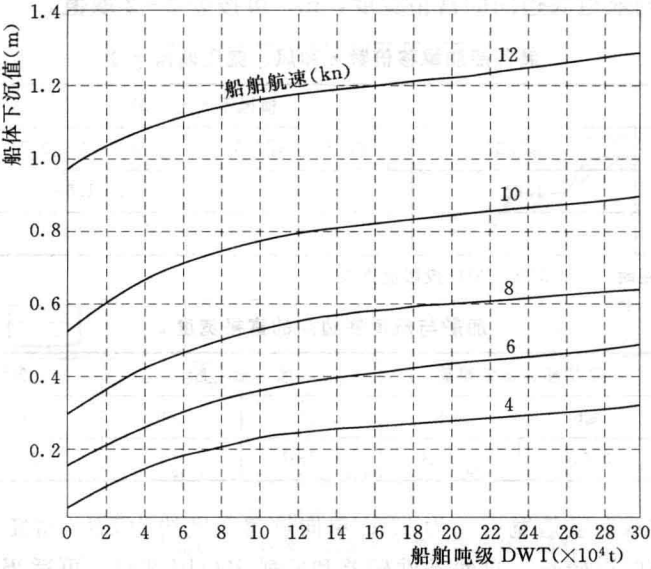


图 2-6 船舶航行时船体下沉值 Z_0 曲线

表 2-3 航行时龙骨下最小富裕深度 Z_1 (m)

船舶吨级 (t)	DWT<5000	5000≤DWT<10000	10000≤DWT<50000	50000≤DWT<100000	100000≤DWT<300000
土质类别					
淤泥土、软塑、可塑性土、松散沙土	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5
硬塑黏性土、中密砂土	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6
坚硬黏性土、密实砂土、强风化岩	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6
风化岩、岩石	0.5	0.6	0.6	0.8	0.8

对于有掩护的港口，航道设计波高，可根据我国南北方各港不同方向的波高累积频率及其港内泊稳情况确定，一般不超过 1.5m。

表 2-4 船、浪夹角 ϕ 与 $Z_2/H_{4\%}$ 的关系

ϕ (°)	0 (180)	10 (170)	20 (160)	30 (150)	40 (140)	50 (130)	60 (120)	70 (110)	80 (100)	90 (90)
$Z_2/H_{4\%}$	$\bar{T} \leq 8s$	0.24	0.32	0.38	0.42	0.44	0.46	0.48	0.49	0.50
	$\bar{T} = 10s$	0.55	0.65	0.75	0.83	0.90	0.97	1.02	1.08	1.15

- 注 1. 当 $DWT < 10000t$ 时，表中的数值应增加 25%。
 2. 当波浪平均周期 $8s \leq \bar{T} < 10s$ 时，可内插确定 $Z_2/H_{4\%}$ 的取值。
 3. 当波浪平均周期 $\bar{T} > 10s$ 时，应对 Z_2 进行专门论证。

对于开敞式码头，航道设计波高可采用码头泊稳标准中船舶作业所允许的最大波高值，但考虑到引水船靠近大船以及拖船拖带船舶进出港等作业要求，一般宜采用 2.0m。

2.2.4 航道通航水位

航道通航水位是指保持船舶在航道中正常航行时的最高或最低水位，它是确定进港航道水深的重要依据，也是充分利用潮位提高港口通过能力的重要措施之一。通常，航道设计水位可按船舶进出港航行密度、通航持续时间和设计乘潮水位确定，一般情况下，可取设计低水位或乘潮累积频率 20% 以上的乘潮水位；对于通航液化天然气船等的航道可取理论最低潮面。

(1) 通航密度。为满足港口输运能力要求，应合理确定航道设计通航密度，通常用以下两种方法：

方法一：统计历年来平均每年进出港口的船舶总数量、本次设计船舶数量、最大船型数量以及随着港口吞吐量的增加船舶数量递增的情况等，以此计算平均每天通过航道的船舶艘次数，并考虑不平衡系数 ($K=1.3$)，即作为该航道设计通航密度。

方法二：采用排队论方法。日到港船舶数符合泊松分布，依据排队论理论，当昼夜有 n 艘船通过航道时，通航保证率为 $Q_n = \sum_{i=0}^n \frac{\lambda^i}{i!} e^{-\lambda}$ (λ 为日到港船舶率，艘/日)。可见，只要给定 Q_n 即可确定 λ 值，则每天进出航道的船舶数量总和 2λ 即为该航道的设计通航密度。对于一般杂货船， $Q=80\%$ ；对于集装箱船、客航和定期班轮， $Q \geq 90\%$ 。

(2) 通航持续时间。一般地，每潮次船舶乘潮进出港口所需的通航持续时间，包括航道航行时间、回转水域调头时间、靠离码头和解系缆时间等，可按式确定：

$$t_s = K_s(t_1 + t_2 + t_3) \quad (2-6)$$

式中 t_s ——每潮次船舶乘潮进出港所需的持续时间，h；

K_s ——时间富裕系数，取 1.1~1.3；

t_1 ——每潮次船舶通过航道的持续时间，h，其中包括船舶间追踪航行的间隔时间；

t_2 ——一艘船舶在港内转头的的时间，h；

t_3 ——一艘船舶靠离码头的的时间，h。

1) 航道航行时间 t_1 。根据航道通航密度，所有船舶依次通过航道的全部时间，按模拟图 2-7，公式如下：

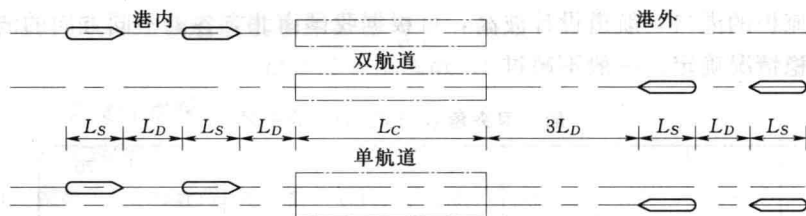


图 2-7 船舶乘潮进出港模拟图

(a) 单航道航行时间:

$$\text{出港} \quad t_{\text{出}} = \frac{S_1 L_S + (S_1 + 2) L_D + L_C}{v_1} \quad (2-7)$$

$$\text{进港} \quad t_{\text{进}} = \frac{S_2 L_S + (S_2 + 2) L_D + L_C}{v_2} \quad (2-8)$$

$$t_1 = t_{\text{出}} + t_{\text{进}} \quad (2-9)$$

(b) 双向航道航行时间:

$$t_1 = \frac{S_0 L_S + (S_0 + 2) L_D + L_C}{v_0} \quad (2-10)$$

式中 L_C ——航道全长, m; L_S ——设计船长, m, 当一次进出港船型不同时, 可分别计算; L_D ——船舶航行间距, m, 按前后最大船长或有危险品要求的船长计算; v_1 、 v_2 ——单航道船舶出港、进港航速, m/s; v_0 ——双向航道船舶出港、进港航速, m/s; S_1 、 S_2 ——出港、进港船舶数量; S_0 ——双向航道出港和进港最多的一队船舶数量。2) 回转水域调头时间 t_2 。 $t_2 = 0.5 \sim 0.75\text{h}$ 时, 船舶载重吨 ≤ 5 万吨级; $t_2 = 0.75 \sim 1.0\text{h}$ 时, 船舶载重吨 > 5 万吨级。3) 靠离码头和解系缆时间 t_3 。 $t_3 = 0.5 \sim 0.75\text{h}$ 时, 船舶载重吨 ≤ 5 万吨级; $t_3 = 0.75 \sim 1.0\text{h}$ 时, 船舶载重吨 > 5 万吨级。

对于港内连接水域和从锚地到航道口门的航行时间, 可根据具体情况分别进行计算。

4) 限制速度及安全航速。各港根据实际情况, 为确保船舶在航道内航行的畅通和安全, 对航道内船舶速度做出具体规定, 称为限制速度。我国上海港港内航道限速 $6 \sim 8\text{kn}$, 港外航道不限速。欧洲引航协会推荐: 港内航道航速 6kn , 港外航道航速 8kn , 外海航道航速 12kn 。安全航速随船舶吨级的增加而减小, 万吨级以下小船航速 $8 \sim 10\text{kn}$, 万吨级以上大船航速 $6 \sim 8\text{kn}$, 10 万吨级以上大型船舶航速为 $4 \sim 6\text{kn}$ 。

5) 进出港船舶间距。船舶航行时, 为防止相互碰撞事故而规定相隔一定距离, 这是由船舶本身的冲程 (或称惯性) 和撞船事故造成的影响程度决定的。

6) 时间富裕系数 K_s 。由于进出港船舶的乘潮持续时间通常并不是严格地按照上述要求进行的。实际航行时, 往往有时因船舶航行间距拉大, 航速较预计低, 进出船舶衔接不

好,乘潮时间有误差,以及不可预见的时间等,使通航时间增加。根据各港的经验,建议时间富裕系数 $K_t=1.1\sim 1.3$ 。

(3) 设计乘潮水位。设计乘潮水位应根据需要乘潮的船舶航行密度、航行持续时间港口所在地区的潮汐特征和疏浚工程量等因素确定,不仅应从航道拓宽浚深的技术可能性进行比较,还要从由于航道水深不足,使船舶待泊和码头空闲所造成的经济损失与疏浚建设费和维护投资方面进行比较。

客运船舶、集装箱班轮、LNG 船舶和各类工作船,一般不乘潮进出港口。

2.2.5 航道转弯段

航道转弯段应以航道中心线为准,用一定半径的圆弧连接过渡。船舶在航道转弯段航行,航线、导助航设施的有效性及其适用范围、风浪流的影响以及航道断面等不断变化,引起水流强度的改变,为满足船舶在航道中有良好的操船作业条件,保证其安全方便转向,提高航道通过能力,要求在布置转弯段航道时,必须增加宽度并确定航道转弯半径。航道转弯半径 R 和加宽方式应根据转向角 φ 和设计船长确定,如图 2-8 所示。

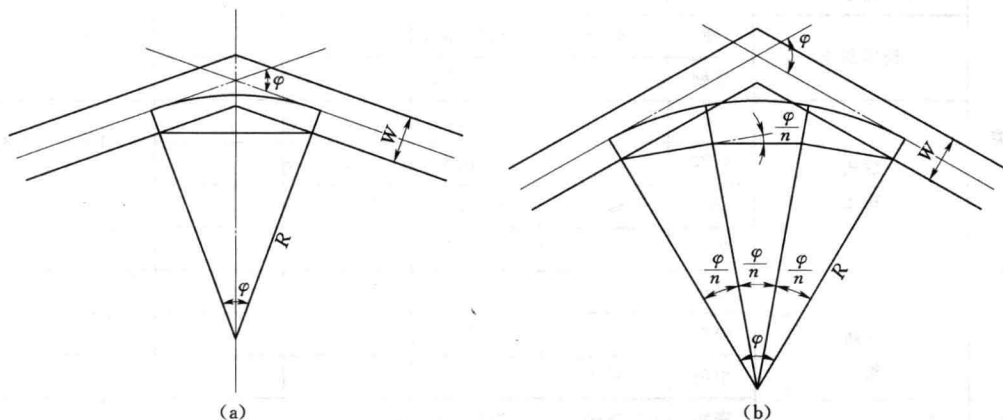


图 2-8 航道转弯段加宽图解法图

(a) 切角法; (b) 折线切割法

n —航道转弯处采用折线切割法加宽的等分折线段数

(1) 当 $10^\circ < \varphi \leq 30^\circ$, $R=(3\sim 5)L$ 时,宜采用切角法加宽,当水域狭窄,切角困难时,经论证可采用折线切割法加宽。

(2) 当 $30^\circ < \varphi \leq 60^\circ$, $R=(5\sim 10)L$ 时,通常采用折线切割法加宽。

(3) 当 $\varphi > 60^\circ$, $R > 10L$ 时,航道转弯半径和转弯段加宽方案可采用船舶操作模拟实验验证。

2.2.6 航道边坡设计

不同岩石类别航道边坡坡度可参考表 2-5 中的数值确定。对情况复杂的航道边坡应通过试验或按类似岩土特性和水文条件的现有航道确定。当航道开挖较长且岩土特性有明显区别时,可根据实际情况分段采用不同边坡坡度。但航道开挖较深且岩土特性明显区别时,可采用变坡度设计。

2.2.7 航道疏浚的超宽与超深计算

航道疏浚是开发航道、增加和维护航道尺度的主要手段之一。在疏浚工程竣工验收时

在施工区域内是不允许出现浅点的，为使航道疏浚满足设计尺度，避免施工误差，在设计中应考虑疏浚作业时的水平和垂直的正负偏差，即计算港航道工程量时应考虑各类挖泥船疏浚作业时的计算超宽值和计算超深值，如图 2-9~图 2-11 所示，并依此安排进度和投资。工程的最大超宽、最大超深不应超过计算超宽、计算超深的 2 倍，计算超宽值和计算超深值与挖泥船的分类及其机械性能有关。

表 2-5 各类土质设计的水下边坡

岩土类别	岩土名	状态	岩土有关指数				边坡坡度
			标准贯击数 N	天然重度 (kN/m ³)	天然含水率 $\omega(\%)$	空隙比 e	
淤泥土类	流泥	流态		<14.9	$85<\omega\leq150$	$e>2.4$	1:25~1:50
	淤泥	很软	<2	<16.9	$55<\omega\leq85$	$1.5<e\leq2.4$	1:8~1:25
	淤泥质土	软	≤4	≤17.6	$36<\omega\leq55$	$1.0<e\leq1.5$	1:3~1:8
黏性土类	黏土	中等	≤8	≤18.7			1:2~1:3
	粉质黏土	硬	≤15	≤19.5			
		坚硬	>15	>19.5			
	黏质粉土	软	≤4	≤17.6			1:3~1:8
		中等	≤8	≤18.7			
		硬	≤15	≤19.5			1:1.5~1:3
		坚硬	>15	>19.5			
砂土类	砂质粉土	极松	≤4	≤18.3			1:5~1:10
		松散	≥10	≤18.6			
		中密	≤30	≤19.6			1:2~1:5
		密实	>30	>19.6			
	粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾砂	极松	≤4	≤18.3			1:5~1:10
		松散	≥10	≤18.6			
		中密	≤30	≤19.6			1:2~1:5
		密实	>30	>19.6			
岩石类	软质岩石	$R_c<30\text{MPa}$					1:1.5~1:2.5
	硬质岩石	$R_c\geq30\text{MPa}$					1:0.75~1:1.0

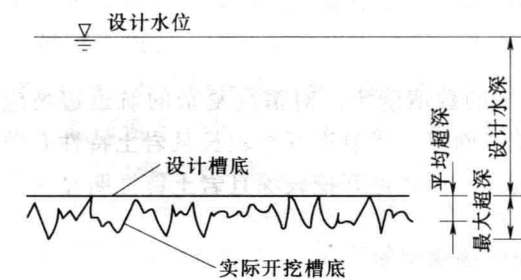


图 2-9 挖槽实际开挖槽底示意图

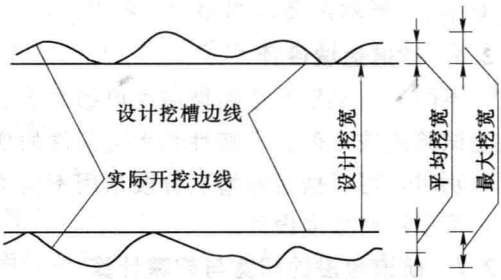


图 2-10 挖槽实际开挖边线示意图