

第一章 绪 论

第一节 水运在国民经济中的地位

交通运输业是国民经济中的一个重要组成部分，它在国民经济中的作用如同人体的血液循环一样，时刻影响着整个社会的经济活动。现代交通运输业是由铁路、公路、水运、航空和管道等运输方式所组成的。由于生产和消费的需要，各种运输方式都是根据其本身的特点和具体条件合理分工、相互配合、扬长避短、各尽其用，形成一个统一的运输体系。

水运（内河运输和海洋运输）是交通运输业中的一个重要组成部分。它对现代工农业的发展，改善人民生活 and 促进国际贸易与文化交流都起着重要的作用。

目前，世界上凡是工农业生产较为发达的国家，其水运也都是比较发达的。例如美国、德国、荷兰和俄罗斯等国，基本上都已建成一个四通八达的内河航道网，其货物周转量仅次于铁路运输。

水运之所以重要，是由于它与其他运输方式相比，具有如下的优越性：

1. 内河水道的建设可以密切结合水利资源的综合利用、综合开发

综合利用水利资源是我国水利建设的基本原则，许多水利工程的建设都为水运的发展创造了极其有利的条件。只要注重通航建筑物和航道的建设，兴建水利工程对内河航运事业能起着很好的促进作用。同时，内河航道的建设都是尽可能结合灌溉、防洪、供水、发电、渔业等方面综合进行的，因此，水运建设也可以取得多方面的综合效益。

2. 水运的运输能力（即航道的通过能力）比较高

通常一条单线铁路的年运量约为 3 000 万 t 左右，而一条通航河流的运输能力远远超过这个数量，可以说几乎是不受限制的，如德国莱茵河 1970 年年运量就相当于 20 条铁路。

3. 水运的运输成本低

据以往调查，我国铁路平均运输成本比内河航运高 5%。在国外，水运的运输成本一般仅为铁路的 1/3 ~ 1/2 为公路的 1/10 ~ 1/5。促成运输成本低的原因是：

(1) 船舶的航行阻力小，因此在一定的船速下，利用水运运输货物所消耗的动力和燃料比其他运输方式低；

(2) 航道建设投资和维持管理费用较铁路或公路小。建设年通过能力 100 万 t 的航道投资仅相当于铁路的 1/10 公路的 1/4 ~ 1/3。在运输工具制造方面，水运也比较经济，每一载重吨船的造价一般为铁路车辆的 1/6 ~ 1/5，而且每一载重吨铁路车辆所需的钢材超出船舶 1 倍以上；

(3) 船舶的载重量大，而且自重所占的比重较小。目前国外大型船舶的载重量一般为 4 ~ 5 万 t 最高可达 40 万 t。这相当于几列火车或数千辆汽车的载重量，在整个载重量中，船舶自重仅占 7.5% ~ 28%，而铁路车辆的自重却相当于它的载重量的 40% ~ 60%。

4. 由于河流的分布面广，使水运便于实行大、中、小结合及长短途运输的结合

船舶能装载各种类型的货物，特别是大宗散货、石油以及危险物资等。在同一条航道上，既可行驶大型船舶，为重要的工业建设生产服务，也可以行驶小型船舶，为短途运输，集散物资和农业生产服务。

此外，水运在现代化国防建设中也起重要作用，是打不烂、炸不垮的交通运输线。水运对环境的污染（噪声、振动、尘垢和散发有害物等）较公路和铁路运输为少。

但应指出，目前水运在技术上还存在一定的局限性。首先，由于航道地形、船舶技术和营运管理等方面的原因，水运的技术速度和商务速度都比较低。对于货物运输来说，商务速度比技术速度更重要，所谓商务速度是指货物由交运到交付的全部时间的平均速度。铁路的商务速度较技术速度低得多，而水运的商务速度仅略低于技术速度。因此，从商务速度来看，铁路运输的商务速度虽大于水运，但两者的差别不如技术速度那么大。因此，水运一般适用于运量大而对运期要求不高的货物运输。其次，水运受自然条件的影响较大，在有些地区不像汽车、火车那样，可以长年不分昼夜进行不间断地运输。此外，在建成四通八达的航道网以前，水系还自成体系，互不沟通，运输的连续性差，有时需转驳倒载，甚至造成货损货差等。不过随着科学技术的发展和现代化内河航道网的建设，在提高水运的连续性和加快运输速度的同时，不断提高营运管理水平，水运的缺点会逐渐被克服，其优越性就会更充分显示出来。

改革开放后，我国国民经济迅速发展，人民生活水平迅速提高，国内外经贸往来频繁，旅游业蓬勃发展，水上客流成倍增长，人们对交通运输提出了“安全、舒适、快速”的要求，低速水上客运已不能满足形势发展的需要，因此在我国港澳地区、珠江三角洲、长江水域、黄河水域、黑龙江水域等都先后发展了高速航运。据不完全统计，在全国各水域已开辟的高速船运输航线已有 79 条，从事高速客运的公司有 68 家。今后，随着我国国民经济的更大发展，人民生活水平的更大提高，旅游业的更加兴旺，我国高速水运事业必将有更大发展。

第二节 我国内河航道建设的成就

我国是世界上最早利用水运的国家。早在 4000 年前，我国人民就临河聚居，制造木舟，发展水上运输。大禹时代就已“导四渎而为贡道”，使当时中原地区的江、河、淮、济四条大河都能通航。

春秋时期（公元前 506 年），我国首开胥溪运河。它是世界上最早的运河，较欧洲最早的瑞典果达河早 2300 多年。继后吴王夫差又开凿了胥浦运河，这是我国的第二条运河。到公元前 84 年，开挖邗沟，沟通长江和淮河，是凿通南北大运河的先声。自隋朝起，经过漫长的年代，通过历代劳动人民的辛勤劳动，直到元朝工程浩大，贯通南北，联贯海河、黄河、淮河、长江和钱塘江五大水系的京杭大运河终于完全打通。大运河全长 794 km，是世界上最长的一条运河。

秦始皇时代（公元前 19 年至公元前 214 年），开凿了灵渠，沟通了湘江和漓江。为了克服两江水位落差，唐朝宝历年间，李渤监修灵渠，创设陡门（即闸门）18 座，船驶入一陡后把陡门关闭，等水积满后再前进一级，这是船闸的雏形，比欧洲公元 1375 年在荷兰出现的“半船闸”约早 400 年。到了宋朝，乔维岳在灵渠创二陡门（“二门相距五十步，复以夏屋，设悬门，积水俟平及泄之，而舟运往来无滞”），这是世界上最早的船闸。这些成就都是我们祖先勤劳智慧的结晶，也为现代内河航运建设积累了丰富的经验。

尽管我国水运事业发展得很早，有过伟大的创造和光辉的成就，但由于长期遭受封建统治的束缚和帝国主义的侵略，水运事业的发展速度极其缓慢。解放前夕，全国仅有渠化河流两

条通航船闸约 30 座。内河航道大都处于天然状态，致使通航里程只有 73 000 km 其中能通轮船的仅仅 24 000 km。内河港口布局凌乱，多半为斜坡式码头，装卸都是肩挑人抬，效率很低。

解放初期，全国内河航道通航里程为 73 600 km 全国内河货运量为 2 500 万 t 货运周转量为 63.12 亿 t·km。至 1952 年，全国内河航道通航里程达到 95 000 km 净增大 21 400 km 货运量达 4 505 万 t 货运周转量为 75.9 亿 t·km，分别比解放初增长 80%和 20%。

第一个五年计划（1953 年～1957 年）期间，以川江航道整治为重点的航道建设，使川江航道初步实现了昼夜通航，1.0 m 以上水深的航道里程增加了 50 000 km，使全国内河航道通航里程达到 144 100 km，水运各项主要指标均超过历史的最好水平。

第二个五年计划（1958 年～1962 年）期间，全国内河航道普遍进行了不同程度的整治和渠化，结合河网化进行的航道建设均取得了较好的经济效益。全国内河航道通航里程继续增加，达 17.2 万 km 加快了货物周转 运量显著提高 货运量达 1.8 亿 t 货运周转量为 456 亿 t·km。

后经 3 年调整（1963 年～1965 年）时期和文化大革命 10 年（1966 年～1976 年）内河航运各方面都受到了严重影响，1979 年统计资料表明，全国内河航道通航里程缩短为 107 800 km。

1978 年党的十一届三中全会以后，由于国家的重视并采取了一系列措施，在内河航道建设方面又出现了可喜的发展局面。“六五”期间（1981 年～1985 年）国家将一批内河航道建设工程列为国家重点工程，各级地方政府也十分重视内河航道建设，并取得了可喜的成绩。1985 年，全国内河航道通航里程达 109 300 km；内河货运量达 303 830 万 t 货运周转量达 770.09 亿 t·km 分别比解放初期增长 12.1 倍和 11.2 倍。“七五”期间（1986 年～1990 年）全国以长江、西江、松花江、京杭运河、淮河这三江两河为重点，相应改善一部分支流的通航条件。如湘江、汉江、漓江、嘉陵江等，逐步建成一个四通八达、干支协调的内河航道体系。建成三级和三级以上航道 5 400 km 四级和五级航道 8 500 km 内河货运量达 5.6 亿 t 货运周转量达 1 100 亿 t·km。

总之，建国以来我国的内河航运得到了较大发展，取得了显著成绩。但与其他运输方式的发展速度相比则十分缓慢，与世界上内河航运发达国家相比尤为落后。我国虽有内河航道 10.9 万 km 但其中通航 1 000 吨级驳船的航道仅占总通航里程的 4%。近 50%的航道水深不足 1.0 m，80% 多的航道只能通航 100 吨级以下的船舶。这种不成网的低标准航道导致运距短、转运倒驳多，增加运输成本，限制了水运优越性的充分发挥。面对严重的形势，我国已明确提出“九五”内河航运建设规划完成“两纵三横”五条水运主要通道的格局 到 2000 年我国将拥有三级及三级以上航道 6 700 km 四级和五级航道 12 500 km 建成联通海河、黄河、淮河、长江和钱塘江流域，通航 300～500 吨级船舶标准的内河航道网。预计到 2020 年，我国航道建设可望有更大的发展，接近美国目前的水平。在今后一段时期内，我国内河航道建设的任务十分繁重。

第三节 现代化内河航道网的要求

治理天然河流，开挖人工运河，沟通各个水系，统一航道标准，形成一个四通八达的航道网，这是内河运输现代化的基础，也是发挥内河水运优越性的必要条件。

近几十年来，一些工业发达国家，都相当重视内河航道的规划和建设，他们投入巨款，经过几十年的持续努力，对河流进行综合治理和开发。

一个现代化的内河航道网主要应满足以下几方面的要求：

1. 航道成网、四通八达 凡具有一定自然地理条件的区域都应该重视航道的开发，尽可能做到各个水系相通，干支流相通，江河湖海相通，以形成一个四通八达的航道网。航道网的布局要与工农业建设的布局和国防建设相适应，做到与工业区和消费中心相联系，与主要城镇和铁路等交通枢纽相联系，充分发挥水运在统一的运输体系中的作用。

2. 全面规划、统一标准 所谓统一标准就是根据近期和远期船队船型、航行条件、运输状况及建设费用等因素，将航道划分成不同的等级，按照其级别规定相应的航道尺度和通航建筑物的尺度。统一内河航道标准犹如统一铁路轨距一样，对于建设现代化内河航道网有着十分重要的意义。只有统一了船舶和航道标准，才能做到江河湖海相通，船舶才能深入腹地，扩大直航范围，减少中转倒载，降低运价，使内河航运在国民经济中发挥更大的作用。

3. 统筹安排、综合利用 综合利用水利资源是建设现代化内河航道网的基本原则。在开发和建设航道时，要统筹全局、全面安排，不仅要考虑水运的要求，而且应尽可能满足发电、防洪、灌溉、工业及民用供水、渔业、木材浮运以及旅游等部门的需要，做到一水多用，以期获得最大的经济效益。

4. 更新设施、科学管理 航道及通航建筑物设施现代化，营运管理科学化是现代化内河航道网的一项重要要求。航道设施应不断更新完善，以便保证船舶安全顺利地航行；船舶过闸的操纵应自动化，以加速船舶过闸；管理机构要健全，营运要符合经济规律。

第二章 河流与航道

第一节 天然河流的主要特征

河流是陆域地表宣泄洪水的通道，是溪、川、江、河的总称。水流、泥沙与河床边界组成了河流。天然河流中的水量随季节降水而变化，同时，限制水流变化的周界及河床错综复杂，形态各异。

一、河流形态特征

河流形态特征主要指河流的横断面和纵剖面的几何特征（如横断面形状和纵剖面比降）以及河流发育过程中的地貌特征（如河流的蜿蜒形势和弯曲度、河漫滩、沙洲和三角洲的大小、形态和分布等）。

1. 河流横断面与纵剖面 垂直于水流动力轴线的河槽断面叫河流横断面。山区河流在水流侵蚀作用下常呈 V 形或 U 形断面。平原河流河谷开阔，地势平坦，有深厚冲积层，不同河段将形成不同的横断面形状，如图 2-1 所示。

顺直河段多为抛物线断面，弯曲河段多为不对称的三角形断面；分汊河段为马鞍形断面；游荡河段断面很不规则。在河口段，横断面更加宽阔，往往有很多股深槽。被水流充满的横断面，称为过水断面，它反映河流的过水能力，通过它推求平均水深和平均流速等，是研究河床演变，进行水力计算的基本参数。

河流的平面形状和它的水下地形是相适应的。河槽是由一系列的深槽与浅段所组成的，深槽位于河湾部分且接近凹岸，浅段则一般位于相邻两深槽之间的河段中，因此，河流纵剖面是深槽与浅段交替出现的波形线，见图 2-2。

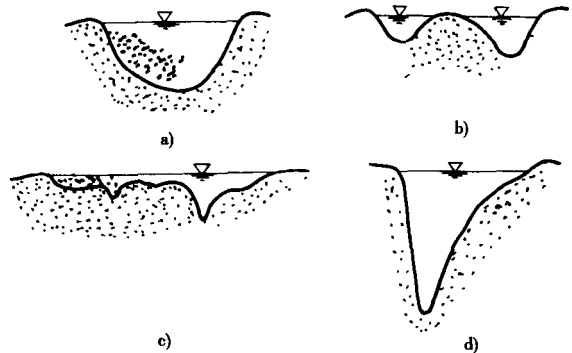


图 2-1 平原河流不同河段横断面

a)顺直过渡段 b)分汊段 c)游荡段 d)弯曲段

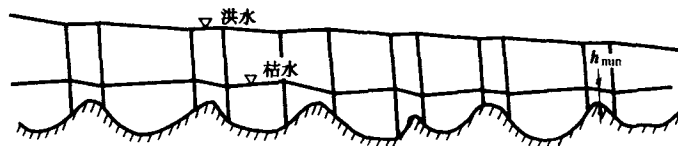


图 2-2 河流的纵剖面形状

2.河流阶地 河流阶地是由河流下切侵蚀和堆积作用交替进行,在河流两岸形成的台阶状地貌。如流域地区内发生过多次地壳升降,就会出现多级阶地。一般在间歇性上升地区,阶地位置越高,形成的时间越早。与河床相连的最低一级阶地算起,自下而上、由新到老,依次为一级、二级、三级阶地,逐次上推。

河流阶地按其结构可分为侵蚀阶地、堆积阶地、基座阶地和埋藏阶地等四类:

(1)侵蚀阶地,阶地面由基岩组成,阶面上没有或很少有冲积物,如图 2-3 中的 I 级阶地;

(2)堆积阶地,阶地全由冲积物组成,反映河流下切深度没超过老的冲积层,如图 2-3 中的 I、II 级阶地;

(3)基座阶地,阶地中的上部为冲积物,而阶地下部为基岩 如图 2-3 中 III 级阶地;

(4)埋藏阶地,地壳下降使前期的河床漫滩沉积层为后期河流堆积物所掩埋,如图 2-3 中 a 处。

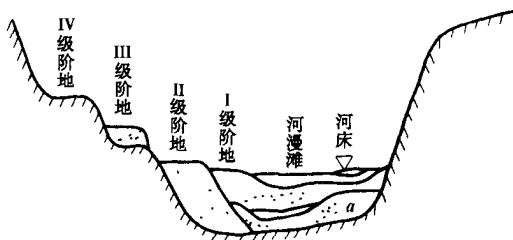


图 2-3 河流阶地结构类型示意图

3.河流节点 由抗冲性较强的突岸形成,并对河势变化起控制作用的河岸形态。河流两岸由于组成物质不均匀,抗冲性能差别很大。在山坝、硬土角或人工护岸处,抗冲性强,河流不能自由摆动,河槽宽浅,使得河流呈现宽窄相间的藕节状形态。由抗冲性强的物质形成的窄深河段对于河流的河势变化具有一定的控制作用,成为河流的节点。

河流节点有两种类型,一种是两岸皆有依托,位置固定,长年靠流。另一种是只有一岸依托,另一岸则是易于冲刷的滩地,当弯道凹岸与抗冲一岸重合时,可以起控制河势的作用,而且当上游流向发生变化、洲滩变动时,主流位置会上下变动,甚至会使节点脱溜,不起作用。河流节点不仅对其所在河段的主流摆动有控制作用,而且对节点上下游宽浅河段也有控制作用,其影响范围、程度与节点的长度、河宽等特征有密切关系。节点对上游河段有一定的壅水作用,从而会使泥沙落淤。节点下游水流扩散,泥沙也易堆积,因此,节点上下游宽浅河段内多有洲滩分布。

二、河流水力特征

河流水力特征是河流系统中最活跃、最关键性的因素,是开发河流水能资源的主要依据,也是影响河床变形的主导因素。主要包括 4 个方面 水位、流量特征 比降特征 流速特征 流态特征。其中流速经常是影响航行的一项重要因素。当流速过大时或具有与航道轴线斜交的显著的横向流速时,都将使船舶航行产生困难。横向流速一般产生于航道的转弯段、浅滩上的沙脊以上及支流汇入或侧向取水口所在的地方。

三、河流泥沙特征

河流泥沙主要来自于流域坡地及沟被侵蚀的岩土,以及河床包括河岸被冲刷的岩土。河流泥沙是河流重要水文现象之一,对河床演变起主要作用,对水情也有一定的影响。泥沙是河床冲淤变形的纽带,也是污染物的载体,对河流水质带来一定的影响。

河流泥沙特性主要有静态特性和动态特性,静态特性包括:几何特性,重力特性,级配特性;动态特性包括:沉降特性,运动特性和冲淤特性,在河流动力学中已有介绍。

天然河流总是处于不断变化之中。不仅是水深、流速等随着洪水、枯水季节而变化，而且由于水流与组成河床的泥沙之间的相互作用，河床经常是处于程度不同的冲、淤变化之中。例如在河湾的河床变形过程中一般有逐渐向下游移动的趋势，而深槽和浅滩的深度也随着高、低水位的变化而产生相应的冲淤变化。这将使航道轴线的位置和曲度、航道的宽度和深度等也随之改变，从而造成航道在使用上及管理上的困难。因此改善天然河流通航条件的重要原则之一就是要建立并维持稳定的，不冲不淤的航道。

第二节 航道条件

船舶在河流中行驶，要求有一条连续而通畅的航槽——航道。航道也是为了组织水上运输所规定或设置的船舶航行（包括船拖木排）的通道。

河流的航行条件首先是由其航道的基本尺度（包括航道的宽度、深度、净空及河弯半径）来表示的。深、宽而且曲线平缓的航道可以行驶吃水较深、航速较快的大型船队，其通过能力较高。相反浅、窄而且曲线急陡的航道则只能行驶吃水浅、航速慢的小船，因而限制了河流的通过能力。

一、通航保证率

通航保证率是指在规定的航道水深下，1年内能够通航的天数与全年天数之比，一般用百分率表示。通航保证率与河流的大小及其所承担的运输任务有关。大的河流，其运输任务一般都较繁重，故要求的保证率高些，使之达到要求的水深。如果保证率定得过高，航道工程的投资就较大。反之，过低时，则对河流利用率不高。故保证率须根据河流的特征、航运及战备的要求和技术经济的可能来决定，它是确定航道设计水位的依据。我国颁发的通航标准，对通航保证率规定见表 2-1。

天然河流试行通航标准表 2-1

航道等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	VI 级	VII 级
浅滩最小水深(m)	> 3.2	2.5 ~ 3.0	1.8 ~ 2.3	1.5 ~ 1.8	1.2 ~ 1.5	1.0 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0
通航保证率(%)	98 ~ 99	93 ~ 97	90 ~ 95	85 ~ 95	80 ~ 93	80 ~ 90	75 ~ 90

二、航道尺度

根据航道内通过设计船型载重吨位的大小，航道分为七级，见表 2-2。

为了保证设计船型（船队）在通航期内能安全、方便地航行，航道必须具备必要的通航条件，它们包括：

1. 足够的水深、宽度和弯曲半径；
2. 合适的水流条件，包括流速、比降和流态；
3. 足够的水上净空，包括净空高度和宽度。

把在设计通航期内，航道能保证设计船型（船队）安全航行的最小尺度称为航道标准尺度。它包括：在设计最低通航水位下的航道标准水深、航道标准宽度、航道最小弯曲半径，在设计最高通航水位时跨河建筑物的净空高度和净空宽度（又简称为通航净空）。

全国内河航道分级与航道尺度

表 2-2

航道等级	驳船吨级(t)	船型尺度(m×m×m) (总长×型宽×吃水)	船队尺度(m×m×m) (长×宽×吃水)	航道尺度(m)					
				天然及渠化河流			限制性航道		弯曲半径
				水深	单线宽度	双线宽度	水深	宽度	
I	3 000	75×16.2×3.5	(1)350×64.8×3.5	3.5~4.0	120	245			1 050
			(2)271×48.6×3.5		100	190			810
			(3)267×32.4×3.5		75	145			800
			(4)192×32.4×3.5		70	130	5.5	130	580
II	2 000	67.5×10.8×3.4	(1)316×32.4×3.4	3.4~3.8	80	150			950
			(2)245×32.4×3.4		75	145			740
		75×14×2.6	(3)180×14×2.6	2.6~3.0	35	70	4.0	65	540
III	1 000	67.5×10.8×2.0	(1)243×32.4×2.0	2.0~2.4	80	150			730
			(2)238×21.6×2.0		55	110			720
			(3)167×21.6×2.0		45	90	3.2	85	500
			(4)160×10.8×2.0		30	60	3.2	50	480
IV	500	45×10.8×1.6	(1)160×21.6×1.6	1.6~1.9	45	90			480
			(2)112×21.6×1.6		40	80	2.5	80	340
			(3)109×10.8×1.6		30	50	2.5	45	330
V	300	35×9.2×1.3	(1)125×18.4×1.3	1.3~1.6	40	75			380
			(2)89×18.4×1.3		35	70	2.0	75	270
			(3)87×9.2×1.3		22	40	2.5	40	260
VI	100	26×5.2×1.8	(1)361×5.5×2.0	1.0~1.2			2.5	18~22	105
		32×7×1.0	(2)154×14.6×1.0		25	45			130
		32×6.2×1.0	(3)65×6.5×1.0		200	15	30	1.5	25
		30×6.4(7.5)×1.0	(4)74×6.4(7.5)×1.0		220	15	30	1.5	28
VII	50	21×5.4×1.75	(1)273×4.8×1.75	0.7~1.0			2.2	18	85
		23×5.4×0.8	(2)200×5.4×0.8		10	20	1.2	20	90
		30×6.2×0.7	(3)60×6.5×0.7		13	25	1.2	26	180

(一) 航道尺度与水运经济效益

航道尺度的选择应综合考虑其必要性、可能性和经济合理性。较大的航道尺度，能通航较大的船舶，完成较大的运量，可以降低运输成本，提高水运经济效益。但航道尺度的提高并不是无止境的，它受到河流自然条件的制约。大江大川经适当的工程措施能得到较大的航道尺度，而对较小的河流要得到较大的航道尺度就比较困难。排除投入大量的工程投资，一般来说，对具体的某河流，在技术可行的前提下，要求的航道尺度越大，需要投入的工程成本（包括基建性的工程投资和航道的维护费用）越大。

如果需要完成的货运量是一定的，工程成本随航道尺度的加大而增加，而运输成本随航道尺度的加大而降低，如图 2-4 所示。工程成本与运输成本之和为完成一定运量的总成本。理论上总可以找到一个总成本最小时对应的航道尺度，这就是所谓的最佳航道尺度。这里需要指出的是，影响工程成本和运输成本的因素较多，需做大量的调查研究，充分掌握第一手资料，

并认真仔细地分析计算，才能找到合理的航道尺度。

(二) 航道标准尺度的计算

1 航道标准水深

航道水深是航道尺度中非常重要的指标，决定着船舶的航行速度和载重量，若水深不足，船舶只能减载航行。一般在平原河流和河口，海港航道，航道水深不足是碍航的关键因素，在这些地区采取工程措施的主要目的是解决航道水深问题。

航道标准水深是指在设计最低通航水位下航道范围内保证的最小水深，如图 2-5 所示，是航道工程设计的主要依据之一，也称为航道设计水深。

航道标准水深由设计船型的标准吃水和富裕水深两部分组成，可用下式表示：

$$H = t + \Delta H \quad (2-1)$$

式中： H ——航道标准水深(m)；

t ——设计船型标准吃水(m)；

ΔH ——富裕水深(m)。

设计船型标准吃水 t 是指设计船型在标准载重量时的吃水。船体结构所能承载的吃水称最大吃水（亦称结构吃水），最大吃水大于标准载重时的标准吃水。例如目前长江中游的油驳标准载重量为 3 000 t，标准吃水为 3.3m，而其最大载重量约为 3 300 t，相应的最大吃水为 3.6m。

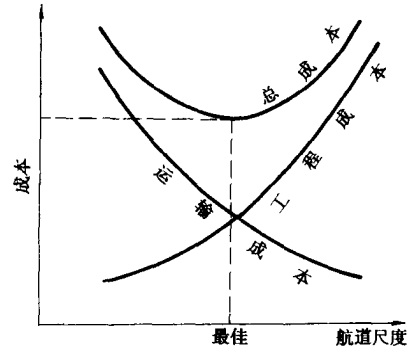


图 2-4 航道尺度与成本关系图

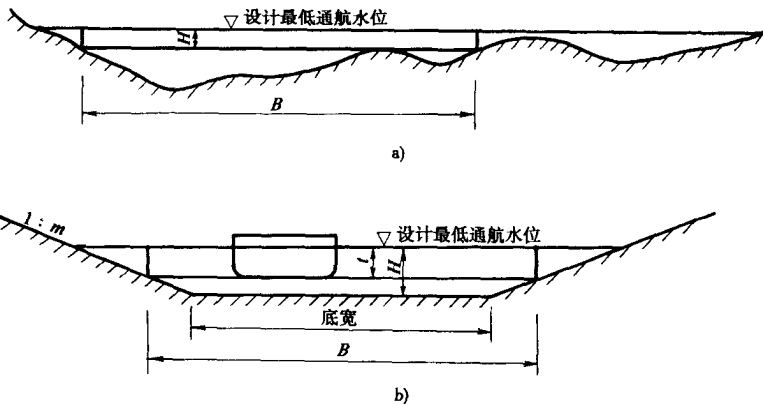


图 2-5 航道标准水深定义图

a) 天然、渠化河流航道断面 b) 限制性航道断面；

H —航道标准水深； B —航道标准宽度； t —船舶标准吃水

富裕水深是指船舶在标准载重时，船底龙骨下至河底的最小安全距离。富裕水深应考虑以下因素：

(1) 触底安全富裕量 ΔH_1

为了保证航道航行安全，船底龙骨下应有最小富裕量 ΔH_1 。 ΔH_1 包括船舶装载不均匀，水深测量误差的影响。采取表 2-3 中数值时，设计底面以下的土层厚度不应小于 0.5 m。如果小于 0.5 m，而下层土质又比上层土质坚硬，则应选择较坚硬的下层土质要求的 ΔH_1 。如码头的

抛石基床伸入港池内宽度超过 2 m 时, 则应按岩石土质选取表 2-3 中的数值。

触底安全富裕量(m)

表 2-3

土 质	船 舶 吨 位 (t)			
	> 8 000	8 000 ~ 3 000	3 000 ~ 500	< 500
淤泥、松沙、沙质粘土	0.20 ~ 0.30	0.20 ~ 0.30	0.20 ~ 0.30	0.20
粘土、沙	0.45	0.35	0.30	0.30
岩石、块石、砾石	0.60	0.50	0.40	0.30

(2)考虑波浪影响的富裕量 ΔH_2

波浪对船体的作用使船舶产生复杂的运动, 在纵横方向俯仰、摇摆等, 使船舶吃水有所增加。其影响主要和波浪要素有关, 一般可用下列经验公式估算 ΔH_2 :

$$\Delta H_2 = 0.3H' - \Delta H_1 \quad (2-2)$$

式中: H' ——最大设计波高 (m)。

当按公式 (2-2) 得出的 ΔH_2 为负值时 则取 ΔH_2 为零。

(3)船舶航行下沉量 ΔH_3

船舶航行时, 因回流作用, 其四周流速增大, 水位下降, 使船体下沉。其下沉量和航道水深、船舶的航行速度、航道断面系数及船型有关: 随航道水深的减小而增大; 随航行速度的增加而增加 船舶的方形系数 船长 / 船宽 越小, 下沉量越大 航道的断面系数较大时 产生的下沉量较小。一般可采用经验公式:

$$\Delta H_3 = m \sqrt{\frac{t}{H} v^2} \quad (2-3)$$

式中: ΔH_3 ——船舶航行下沉量 (m);

H ——航道标准水深 (m);

t ——船舶标准吃水 (m);

v ——船舶相对于水的速度 (m/s);

m ——系数 见表 2-4。

船舶航行下沉量系数

表 2-4

船长(L) 船宽(b)	3.5	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
m	0.0038	0.0029	0.0023	0.0020	0.0016	0.00145

(4)考虑水体密度影响的富裕水深 ΔH_4

由于水体含盐量的不同, 水的密度会发生变化, 影响船舶吃水。因为海船的标准吃水是指在夏季海水中标准载重量时的吃水, 因此当海船进入河口或内河时吃水将会有所增加, 吃水增加的百分比 p 见表 2-5 则 $\Delta H_4 = t \cdot p / 100$ 。

水的密度对吃水的影响

表 2-5

含盐量(‰)	密度(ν/m^3)	增加吃水 p (%)	含盐量(‰)	密度(ν/m^3)	增加吃水 p (%)
35	1.025	0.0	15	1.010	1.5
30	1.021	0.5	10	1.005	2.0
25	1.017	1.1	0	1.000	2.5
20	1.013	1.2			

(5)考虑挖槽回淤影响的富裕量 ΔH_5

根据港口回淤的情况, 浚深航道港池时, 应适当考虑备淤深度, 即适当增加一定的富裕量, 一般为 $0.3 \sim 0.5 \text{ m}$, 因此, 对海港航道的富裕水深 ΔH 可按下式计算:

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 + \Delta H_5 \quad (2-4)$$

内河航道富裕水深主要考虑触底安全富裕量 ΔH_1 和船舶航行下沉量 ΔH_3 即可采用下式计算:

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_3 \quad (2-5)$$

式中符号意义同前文, 也可直接根据航道等级, 按《航道整治工程技术规范》的规定选取, 见表 2-6。

沙、泥质河床航道富裕水深

表 2-6

航道标准水深 $H(\text{m})$	< 1.5	1.5 ~ 3.0	> 3.0
富裕水深 $\Delta H(\text{m})$	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.4	0.4 ~ 0.5

注: 石、卵石质河床航道富裕水深另增加 $0.1 \sim 0.2 \text{ m}$ 。

2. 航道标准宽度

航道标准宽度是指在设计最低通航水位下具有航道标准水深的宽度, 如图 2-6 所示, 根据船舶航行密度和航道条件, 可设计成双线航道和单线航道。一般情况, 均以保证两个对开船队安全错船为原则, 设计成双线航道。当船舶(队)航行密度较小, 航道狭窄段不长, 且拓宽工程量较大时, 可设计成单线航道。单线航道的标准宽度只要能保证单向航行船舶(队)安全通过。如图 2-6所示, 直线段航道的宽度可用下式计算:

$$B = 2(b \cos \alpha + L \sin \alpha) + \Delta b + 2D \quad (2-6)$$

式中: B ——航道标准宽度 (m);

b ——设计船队(或单船)宽度 (m);

L ——设计船队长度, 拖带船队为最大单船长度 (m);

α ——航行漂角;

Δb ——上、下行船队间的横向舷距 (m);

D ——船舷上航槽边线的距离 (m)。

式(2-6)中 $2(b \cos \alpha + L \sin \alpha)$ 为船舶航行时占用的水域宽度, 也称航迹线宽度; $(\Delta b + 2D)$ 为航道富裕宽度。对单线航道航迹带宽度为 $(b \cos \alpha + L \sin \alpha)$ 航道富裕宽度为 $2D$ 。由于航道漂角 α 较小, 在计算时可取 $\cos \alpha = 1$ 。

航迹带宽度不仅取决于船队宽度, 还与船队长度、船队操纵性能及航行条件等因素有关, 船队的操纵性能和航行条件等因素对航迹宽度的影响, 集中反映在式(2-6)中的航行漂角 α 上。航行漂角的定义如图 2-7 所示。

船舶在航行过程中, 由于受外界因素影响, 船舶会偏离航向。为保持航行的正确方向, 往往使船舶(队)纵轴线与航向保持一定的夹角, 即通常所说的航行漂角。影响漂角的因素有:

(1)漂角 α 的大小和船舶吃水与航道水深的比值 t/H 成正比 比值越大则漂角越大。

(2)水流流态的好坏直接影响航行漂角, 流态越坏漂角越大, 流速越大漂角也越大, 且下水船舶的漂角比上水船舶大。

(3)船舶(队)长度与航道弯曲半径的比值 L/R 增加, 漂角亦随之增加。反之, 则减小。

(4)顶推船队的方形系数 (L/b) 较小时, 产生的漂角较大。

在设计计算时, 漂角的大小可通过设计船型的实船试验确定, 或按《航道工程技术规范》规

定的范围在 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 内选取 在一般情况下 航道标准高 取值较大 航道标准低 取值较小。

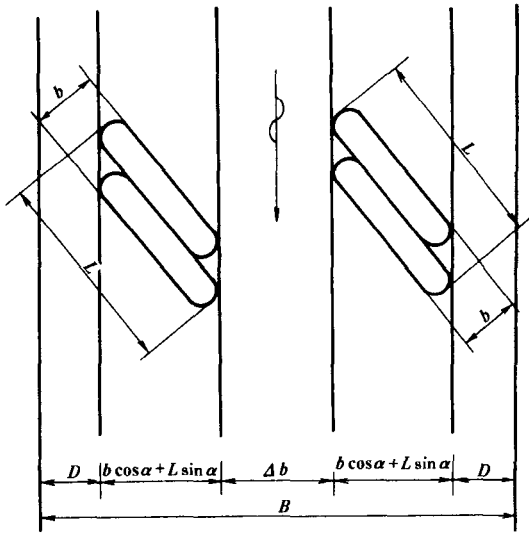


图 2-6 航道宽度示意图

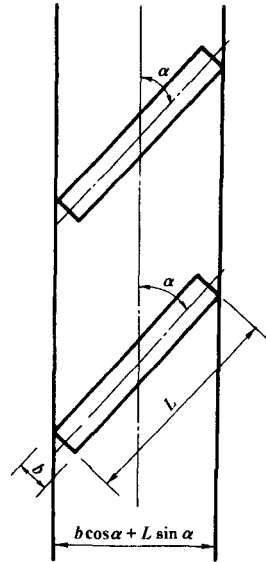


图 2-7 航行漂角示意图

航道富裕宽度是保证船舶安全航行，不产生船吸和岸吸现象的最小宽裕尺度。两船队交会时，船队两侧存在着流速差和水位差，从而形成压力差而产生互吸；船舶与河岸之间的水流有推动船首离岸和吸引船尾靠岸的倾向。影响航道富裕宽度的因素有船型、队型、系结方式；船队的航速及推轮的舵效；水流流速、流态；河岸的土质及坡度等。航道富裕宽度可由实船试验确定，也可参照下式估算。

对平原、丘陵地区航道：

$$\Delta b = 0.7b + 4$$

$$D = 0.2b + 1.2$$

对山区航道：

$$\Delta b = 0.8b$$

$$D = (0.24 \sim 0.33)b \text{ (适用于 1 级到 4 级航道)}$$

$$D = (0.32 \sim 0.60)b \text{ (适用于 5 级到 7 级航道)}$$

我国目前的直线段航道标准宽度大致是设计船队宽度的 4 倍。随着航运事业的发展，船舶趋向大型化、高速化，这一比值将会增加。根据资料，美国一般为 5.0~6.0，西欧一般不小于 4.4 国际航运会议推荐的比值达 6.0~7.0。

船舶在弯曲航道上航行时，其航迹带宽度要比在直线段宽得多。

船舶在经过弯道时，不仅要承受本身的转向力矩、离心力，还要随受动水压力和扫弯水的作用，则船舶必须用较大的漂角来克服这些用力。然而，在航道弯曲段应适当加宽，其加宽值应根据弯曲半径、流速、流向、流态、船队长度及其操作性能等因素来确定。根据《航道整治工程技术规范》的规定当 $R > 6L$ 时，可不考虑弯曲加宽； $R < 3L$ 时，需要适当加宽，加宽值宜通过实船试验确定，或参照下式计算，酌情选取。

$$\Delta B = \frac{L^2}{2R + B} \quad (2-7)$$

式中： ΔB ——弯道加宽值 (m)；

R —— 航道弯曲半径 (m);

B —— 直线段航道标宽度 (m);

L —— 顶推船队长度或拖带船队的最大船长 (m)。

当 $3L < R < 6L$ 时, 可根据水流条件等具体情况确定是否需要加宽。

同时也可以用品 2-7 汇总的船舶(队)在弯道上的航行漂角, 按公式(2-6)计算 即在弯曲段上航道的标准宽度。

弯曲段的船舶(队)航行漂角

表 2-7

R/L	α (下水)	α (上水)	R/L	α (下水)	α (上水)
2.0	28° ~ 35°	9°	5.0	13° ~ 17°	3°
3.0	21° ~ 25°	5°	6.0	11° ~ 15°	3°
4.0	16° ~ 20°	4°			

3. 航道最小弯曲半径

航道弯曲半径是指弯曲航道中心线的曲率半径。航道最小弯曲半径 R 是指保证标准船队安全通过弯道的最小弯曲半径。从便利航行考虑, 航道弯曲半径越大越好, 但因受自然河流地形条件的限制, 往往要求船舶在弯曲半径较小的弯道中航行。为保证航行的安全, 因而规定了一个最小限值, 作为保障航行的一个条件, 它主要与船舶队长度及操纵性能有关。一般情况下, 取顶推船队长度的 3 倍, 或拖带船队中最大单船长度的 4 倍作为航道最小弯曲半径。在弯道采取了加宽措施, 或流态较好, 驾驶能通视的情况下, 弯曲半径也可适当减小, 但不得小于顶推船队长度的 2 倍, 拖带船队最大单船长度的 3 倍。

4. 通航净空

通航净空主要包括净空高度 H_m 、净空宽度 B_m 、上底宽 b 和侧高 h , 见图 2-8。跨河的桥梁、渡槽、管道、电缆线等应有足够的水上净空 以便船舶安全顺利地通过。净空高度是指设计最高通航水位往上至跨河建筑物底部的垂直距离, 其数值应满足标准船舶(队)空载的水上高度加富裕值; 净空宽度是指航道底标高以上桥墩(桥柱)间的最小净空, 包括标准船舶(队)的航迹带宽度和富裕宽度两部分。为了使桥梁通航孔的净宽尺度尽量小些, 在桥孔内不得会船, 上下行船舶应在不同的通航孔内通过。因此, 天然、渠化河流的水上跨河建筑物一般不应小于两个通航孔。在水运繁忙的较宽河流上, 应设多孔通航。河宽不足两个通航孔的, 应一孔跨过, 且桥墩的顺水面应尽可能与水流流向一致, 其偏角不得超过 5° , 否则净空必须相应加大。根据《内河通航标准》的规定, 各航道等级的水上净空尺度可按表 2-8 中的要求选定。

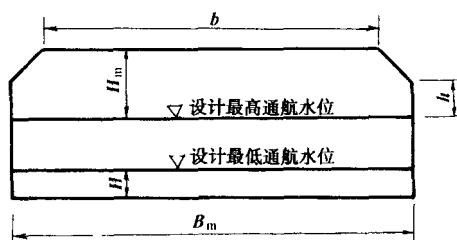


图 2-8 通航净空示意图

三、航道断面系数

航道断面系数是指最低通航水位时的航道过水断面与标准船舶(队)标准吃水时的船中浸水横断面的面积之比, 即:

$$\eta_{\varphi} = \frac{A}{A_{\varphi}} \quad (2-8)$$

式中: η_{φ} —— 航道断面系数;

A ——设计最低通航水位时，航道过水断面面积；

A_{φ} ——标准吃水时，船中浸水横断面面积。

航道断面系数的大小，直接影响航行阻力的大小， η_{φ} 值越小，船舶航行阻力越大。为了减小航行阻力，就必须扩大航道过水断面面积，尤其在人工运河和裁弯取直的引河中，必须考虑 η_{φ} 值。

根据国内外的研究成果，认为 $\eta_{\varphi} = 7$ 是最经济合理的。当 $\eta_{\varphi} > 10$ 时，断面形状对航道阻力的影响可以忽略不计。结合我国实际情况，《航道整治工程技术规范》规定：一般情况， $\eta_{\varphi} \geq 6$ 对流速较大的河流， $\eta_{\varphi} \geq 7$ 。

水上过河建筑物通航净空尺度

表 2-8

航道等级	天然及渠化河流(m)				限制性航道(m)			
	净高 H_m	净宽 B_m	上底宽 b	侧高 h	净高 H_m	净宽 B_m	上底宽 b	侧高 h
I-(1)	24	160	120	7.0				
I-(2)	18	125	95	7.0				
I-(3)		95	70	7.0				
I-(4)		85	65	8.0	18	130	100	7.0
II-(1)	18	105	80	6.0				
II-(2)		90	70	8.0				
II-(3)	10	50	40	6.0	10	65	50	6.0
III-(1)								
III-(2)		70	55	6.0	10			
III-(3)	10	60	45	6.0		85	65	6.0
III-(4)		40	30	6.0		50	40	6.0
IV-(1)	8	60	50	4.0	8			
IV-(2)		50	41	4.0		80	66	3.5
IV-(3)		35	29	5.0		45	37	4.0
V-(1)	8	46	38	4.0				
V-(2)	8	38	31	4.5	8	75~77	62	3.5
V-(3)	8.5	28~30	25	5.5、3.5	8.5	38	32	5.0、3.5
VI-(1)					4.5	18~22	14~17	3.4
VI-(2)	4.5	22	17	3.4				
VI-(3)	6				6	25~30	19	3.6
VI-(4)		18	14	4.0		28~30	21	3.4
VII-(1)					3.5	18	14	2.8
VII-(2)	3.5	14	11	2.8		18	14	2.8
VII-(3)	4.5	18	14	2.8	4.5	25~30	19	2.8

注：在平原河网地区建桥遇特殊困难时，可按具体条件研究确定。

桥墩（或墩柱）侧如有显著的紊流，则通航孔桥墩（或墩柱）间的净宽值应为本表的通航净宽加两侧紊流区的宽度。

当不得已将水上过河建筑物建在航行条件较差或弯曲的河段上时，其净宽应在表列数值基础上根据船舶航行的需要适当放宽。

四、航道水流条件

为保证船舶（队）的安全航行，航道内的表面流速和局部比降不能过大，否则上行船舶（队）的推力不能克服逆流阻力而前进，下行船舶队的舵效难以发挥，使船舶队操纵困难。垂直航道轴线的横向流速亦不应过大，否则会将船舶推离航道，发生海事。航道内的允许流速和允许比降均与船型、功率、载重量、操纵性能等有关，通常应通过实船试验，综合比较后确定。一般情况应符合下列要求：

(1) 平原河流航道内的最大纵向表面流速的整治水位及其以下时不大于 2.0 m/s ；

(2) 山区性河流航道内的最大纵向表面流速和局部比降，应能满足标准船舶（队）自航上滩的要求。

(3) 船闸上下引航道进水工程的进口及排水工程出口处，航道横向流速不宜超过 0.3 m/s ，回流流速不宜超过 0.4 m/s 。

第三节 航道规划及航道工程措施

一、航道规划

航道工程规划是航运规划的一个重要组成部分，它的主要任务是研究航道开发的经济意义、社会价值及技术上的可能性，制定近期与远景航道开发方案，并根据远景货流及运输组织提出适应远景发展的航道措施方案，拟定第一期航道工程的项目。航道工程项目的完成一般要经过下述 6 个阶段：

1. 预可行性研究阶段；
2. 工程可行性研究阶段；
3. 初步设计阶段；
4. 科学试验研究阶段；
5. 施工图设计阶段；
6. 工程实施阶段。

航道工程措施方案应包括：根据综合利用的要求及河流的自然特点，拟定航道的治理或开发方式；拟定航道路线；拟定航道及其建筑物的通航标准尺度，即航道的航深、航宽、弯曲半径、船闸尺度及跨河建筑物的净空等，同时还应拟定改善通航条件的工程措施，即提出航道的疏浚整治爆破等方案，配布航行标志，计算航道工程量、投资及年维修费用。此外应重点结合水利枢纽的规划，分析水工建筑物建成后对通航条件所产生的影响，提出航运流量及航运保证率的要求，提出对水库电站操作的要求。最后，航道规划还应根据流域间远景货运的发展，提出运河开发方案。

航道规划的第一步必须收集整理资料，提供规划设计的依据，这些资料包括河流的自然地理情况、水文地质特点、河床演变的规律、现有航行的状况、已有的航道工程措施及各部门对开发河流的规划意见等，特别是对于航道规划中所需要的基本资料，如浅滩水位流量关系曲线、水深水位关系曲线、水深和流量的保证工作，确定各种资料的正确程度及参考价值。在资料的整理分析后，即可拟定航道工程措施的初步方案和航道实地查勘计划，并进行查勘的准备与组织工作。

航道查勘的主要目的，在于通过实地查勘增强规划人员的感性知识，查清和对证有关资料的正确性，并对资料进行修正与补充，征求地方和群众对规划的要求。此外，还对初步拟定的航道措施方案、梯级布置进行直接的观察，为下一步的规划工作提供切实可靠的依据。

航道的查勘一般在枯水季节进行，对于浅滩较多、条件较复杂的航道，可考虑组织不同水期的多次查勘。查勘时一般可与港埠营运查勘结合进行，经济调查由于腹地较大、牵涉面较广，其查勘多另行组织。

查勘的方法一般是沿着大致的航线方向结合拟定的查勘重点进行调查访问，开群众座谈会，查出当地机关实地观测资料，并进行野外视察证实、编制草图，有时也进行一些简单的测量、掘出工作和取样分析工作。

查勘的内容视河道的特性和规划工作的深度而异，一般应包括洪水枯水的调查，浅滩险滩的勘测，枢纽位置，地形地质的考证，航道障碍的记载，河床泥沙及河床演变规律的探索，以及沿岸状况调查等。

二、治理航道的主要工程措施

航道工程指以延长通航里程，提高航道标准，改善通航条件和保障航道畅通为目的的疏浚、整治、渠化、运河、航标、清障等工程措施的总称。

航道疏浚工程是采用人力或机械施工方法，为拓宽、加深水域而进行的水下土石方开挖工程。在内河碍航河段经常利用挖泥船浚深或拓宽航道中最浅或狭窄的部分，以建立并维持枯水期航道所必需的深度和宽度。一些航道的浅滩经疏浚以后，其挖槽往往不能保持稳定，而遭回淤，这样每年便必须进行大量重复的维修性的疏浚工程。因此疏浚工程设计的重要任务之一就在于根据水流及泥沙运动的规律选择合理的挖槽布置，以保持挖槽的稳定和维持疏浚工程的效果，使每年需要的维修性的疏浚工作量减至最小。

航道整治工程是借助于在河床中建筑专门的整治建筑物或其他工程措施，调整河床形态和水沙流路以影响河中水流，并造成有利的水流结构，利用水流本身的内部力量刷深航道并维持航道的稳定，保证枯水期航道必需的尺度。根据治理航道的不同要求，可将整治建筑物布置在一岸、两岸、河底和水面起到束窄河道、护岸、改善流态、固滩等作用，也可采取裁弯取直方法对岸过分弯曲的河段，从河湾窄颈处开挖新槽，并促其发展，以取代原河道，缩短航道里程；也可采取切嘴工程措施，削去突入河道中挑阻水流的突嘴，或在弯道上切去凸岸突嘴，改善弯道航行条件。

疏浚工程与整治工程并不能从根本上改变河流的水文情况，即并不改变天然河流的洪水、枯水的变化情况，基本上不改变河流水位—流量的对应关系，而只是局部性地改变河床的形状及河中的水流状态。利用疏浚与整治维持航道时，河流基本上处于自由状态，此时的航道常称为天然水道。一般的河流特别是中、下游河段大都自然地具备着一定的通航条件，而在不过大地改变河流水文情况的基础上进行合理的疏浚和整治常可以获得经济而且有效的结果。在我国目前的内河航道里程中，天然水道占 90% 以上，而且今后天然水道的建设将仍是我国内河航道建设中的一个重要方面，因此疏浚工程与整治工程在内河航道开发的总体工程中具有重要的意义。另一方面，由于航道的疏浚与整治都是在基本上不改变河流水文情况的条件下进行的，因此，必须充分地掌握河流的水文情况变化的规律及水流与泥沙运动的规律，在这一基础上进行疏浚工程和整治工程的设计才能保证收到显著而且稳定的效果。此外，限于疏浚工程与整治工程对河流天然情况改变的程度，在某些情况下它们改善航行条件的效果常受到一

定的限制，例如对于流量小、坡度陡的山区河流，仅仅借助于疏浚及整治的方法以彻底改善其通航条件往往是有困难的。

渠化工程是指在天然河流上，以航运开发为主要目的，修建拦河闸坝和通航建筑物以壅高上游水位，从而改善航行条件。渠化工程从根本上改变了天然河流的水文情况：此时枯水期河中水位不再取决于河流的流量大小而是直接决定于闸、坝等建筑物的布置和它们的高度，流速较天然河流显著降低了；同时，视闸、坝上游容蓄能力的大小可以对天然河流洪、枯流量的分配进行不同程度的调节。因此渠化后的航道、人工运河都被称为人工水道。渠化工程直接地影响着河流的整体开发计划，同时一条河流的全面渠化常常需要进行规模巨大的工程。因此，河流渠化工程必须紧密结合河流综合利用和综合开发的计划进行。对于某些采用疏浚、整治不能满足要求的山区河流，渠化往往是改善河流航行条件的主要方法。

在同一条河流上的不同河段、不同时期，上述各种改善航行条件的工程措施必须互相配合、综合使用，才能取得显著而且合理的工程效果。

第四节 船舶及其特征

一、船舶与船队

（一）船舶

指能航行或漂浮于河流、湖泊和海洋等水域内的一种运输承载工具。

在内河上航行的船舶按有无动力装置可分为机动船和非机动船两大类。机动船是指自身装有推进动力装置的船，如客船、货船和用来拖带没有自行能力的驳船和船队的拖船，以及船首装有顶推设备用来顶推驳船和船队的推轮等。非机动船是指没有推进动力装置需要由机动船（拖船、推船）来拖带或顶推的船舶，如驳船和停泊在港区水域内用来系靠船舶的趸船等。有些工程船也属非机动船。

运输船舶的发展大致经历了舟筏、木帆船和蒸汽机船 3 个阶段。现在处于以柴油机为基本动力的钢船时代。20 世纪以来，为提高船的经济效益，船舶出现了专业化、大型化、高速化、自动化和内燃机化等多种趋势。从 60 年代起，运输船舶进一步专业化，出现了一系列新型船舶，如专门运载集装箱的集装箱船；船上设有活动跳板，载货托车可直接开上开下的滚装船；专门载运油料的油船；可以运载货驳的载驳船等。同时运输船舶的载重量也日益增大。从 70 年代出现 30 万 t 以上的大油船，装运散货的货船的载重量也超过 10 万 t 最大的已达 17 万 t。在旅客运输上出现了非排水型的高速客船，如装有水翼，航行时船体被托出水面的水翼船和气垫船等。这些新型船舶对港口及航道的规划提出了新的要求。

（二）船队

船队是指将若干艘驳船按一定的方式编结在一起，由拖船拖带或推船顶推航行的运输组合体。船队的动力由拖船或推船提供，驳船则用以装载货物，这两部分可以灵活结解。当船队到达目的港或装卸货物时，拖船或推船可用以拖带或顶推别的驳船。船队运输的优点是能充分发挥动力的效率，运输成本低；既适宜运输大宗货物，也适宜运输批量大、货种多的货物；同时驳船又可分散到各港口分散装卸，减少货物的中转和倒载。

按编队方式不同，船队可分为拖带船队和顶推船队。

1. 拖带船队 拖带船队是拖船在前，用缆绳拖带后面的若干艘编结在一起的驳船航行的