



长江中游航道流速区划分及影响因素研究*

王先登

(长江武汉航道局, 湖北 武汉 430014)

摘要: 为满足长江电子航道图系统功能需要, 使长江电子航道图流速相关信息的显示更加符合实际航段的情况, 基于声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 的测流数据, 提出了基于船舶航行需求的主、缓流流速区划分方法。同时利用该方法, 研究影响流速区划分的因素, 对研究河段进行科学分段。

关键词: 主流; 缓流; 阈值; 分段

中图分类号: U 69

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0115-06

Division method and influential factors of waterway flow velocity area in the middle Yangtze River

WANG Xian-deng

(Changjiang Wuhan Waterway Bureau, Wuhan 430014, China)

Abstract: To meet the functional requirements of the Yangtze River electronic waterway chart and improve its display reality for relevant information about flow velocity, we propose a division method for the main and subcritical flow velocity area based on the requirement of ship navigation. The flow velocity is measured by the Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP). Moreover, the influential factors for dividing the velocity area are studied, and the segmenting of river is realized by the method proposed.

Keywords: mainstream; slow flow; threshold; segmentation

在电子航道图上进行主缓流划分, 对提高电子航道图船舶终端用户航运船舶的效率、降低船舶运输成本具有重要作用。长江航道局在 2013 年开发了长江电子航道图 3.0 版, 相比 2.0 版本增加了许多新的功能, 其中的功能之一就是流速相关信息的显示以及主、缓流流速区的划分。由于河段的流速信息受多种因素影响而常常发生变化, 导致 3.0 版本的长江电子航道图上的流速相关信息相对不够准确。尽管可作为内河船舶安全航行的参考, 但不能作为主要的参考信息, 具有较大的局限性。为此, 本文将对新采集的长江中游航

道断面流速数据进行分析, 确定主、缓流流速区最佳阈值。同时分析影响流速的因素, 对河段进行分段, 使得长江电子航道图 3.0 版流速相关信息显示功能更符合河段的特点^[1-3], 提升长江航道图 3.0 版的科技水平与应用效率。

1 河道概况

研究河段为长江宜昌—武汉段, 属长江中游, 长 626 km。宜昌—枝城 66 km, 是从峡谷过渡到冲积平原的山麓区河段, 为单一微弯河型, 两岸为低山丘陵, 床质为卵石夹砂, 处于宜昌单斜的

收稿日期: 2014-02-16

*基金项目: 交通运输部信息化技术研究项目 (201-364-548-200)

作者简介: 王先登 (1957—), 男, 高级工程师, 从事航道管理工作。

大地构造背景之上,新构造运动使大地大面积整体性缓慢上升,更新世晚期以来,已稳定成型,河床冲淤变化已基本平衡,河道较为稳定^[4]。枝城至藕池口为上荆江,以单一微弯河型为主,间有分汊。河岸地层上部为黏性土,较厚,底部为砂卵石层,顶板高程较高,抗冲稳定性较好,加上历年对崩岸段抛石固脚,总体河势基本稳定。藕池口至城陵矶 170 km,称为下荆江,为典型的蜿蜒型河段。城陵矶至汉江河口 230 km,属分汉河型^[4]。

2 流速区划分

2.1 主流概念与特性

水力学中,天然河流通常被认为是明渠非均匀流,其特点是明渠的底坡线、水面线、总水头线彼此不平行,水深沿程变化见图 1。因此,长江水流(研究河段)为明渠非均匀流。

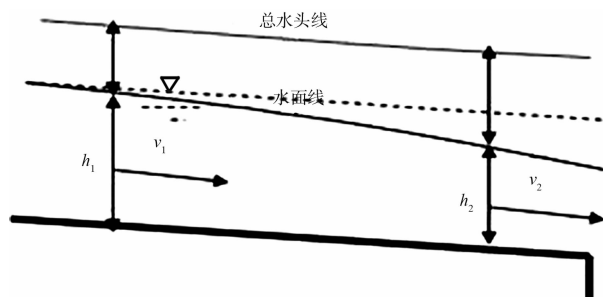


图 1 明渠非均匀流底坡线、水面线、总水头线示意图

明渠水流的流态分为缓流、临界流和急流^[5]。用 v 表示水流流速, c 表示干扰波在明渠静水中传播的相对波速。

如图 2 所示,当 $v < c$ 时,干扰波能分别向上游和下游传播,水流为缓流;当 $v = c$ 时,干扰波只能向下游传播,水流为临界流;当 $v > c$ 时,干扰波只能向下游传播,水流为急流。

按上述水力学定义,经初步验算研究河段水流绝大部分为缓流。因此,该定义不能较好地应用到研究河段的主、缓流流速区划分工作中。

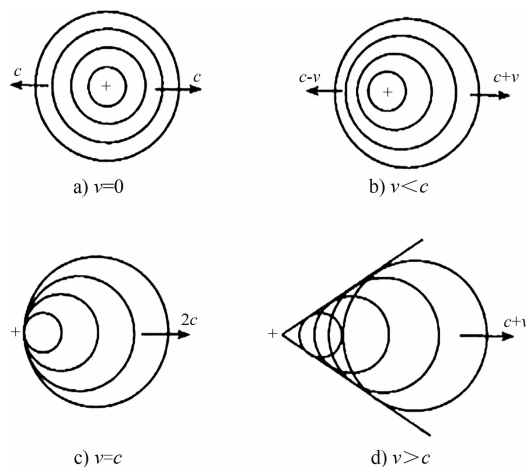


图 2 明渠的 3 种流态

河流动力学指出,天然河流中,主流指沿河流动力轴线走向的集中水流^[6]。航运部门则通常把河槽中表层流速较大并决定主要流向的一股水流称为主流,见图 3。

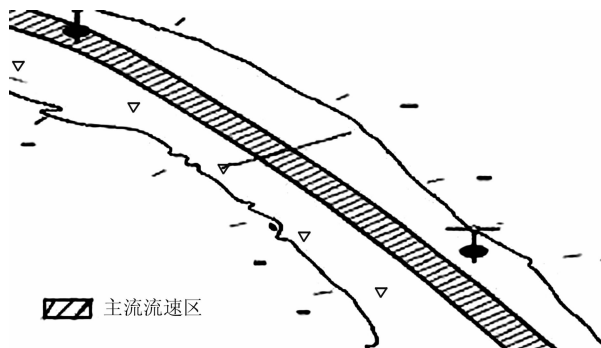


图 3 河段主流分布

本文对主、缓流的分区是为营运船舶航行服务的,所以在这里采用航运部门关于主流的概念。根据概念,可以得到主流的以下几个特性:1) 在一个断面中主流相对流速较大;2) 主流决定水流的主要流向;3) 河流表层流速的大小决定主流位置。

为了能够给航行船舶提供经济可靠的主、缓流流速区域,根据航运部门对主流的概念,本文给出了一个量化的河道主流概念:在一定流量下,一定河段中由占表层流速一定比例大值构成的连续的水流为主流。

2.2 基于航运需求的流速区划分方法

2.2.1 船舶经济航速法

据船舶单位反映,其代表船型在上行过程中,习惯是控制船舶以 700 r/min 的转速航行。当船舶的航行速度大于 4 km/h 时,则保持 700 r/min 转速航行;当船舶的航行速度小于 4 km/h 时,则提高船舶的航行转速,保证船舶能够以 4 km/h 的航速航行。因此,将船舶 700 r/min 转速下的静水航行速度减去 4 km/h,则可得到经济航速下最佳的主

缓流分界值,即划分主、缓流区的阈值。为此,本文对船舶单位提供的船舶及其代表船型进行了分析。根据长江船舶总公司提供的资料,目前长江上的船舶代表船型为新长江 25001 型,该船舶的车速和航速信息见表 1 和 2。由于船方未能提供该船型 700 r/min 转速下的上水、下水的航速,但提供了其他转速下的上水、下水航速,因此可分别拟合出船舶航行转速下与上水、下水航速的关系式。

表 1 轮总的船型信息

船名	船长/m	型深/m	型宽/m	吃水/m	主机功率/kW	额定主机转速/ (r·min ⁻¹)	设计静水	
							航速/(km·h ⁻¹)	吃水/m
新长江 25001 型	92.00	5.80	14.80	5.200	600	1 500	18	4.00
新长江 06001 型	110.00	5.60	19.20	4.650	735	830	18	4.65
荣江 14021 型	110.00	5.10	17.20	4.350	540	750	18	4.20
荣江 15003 型	100.08	6.40	17.00	5.588	662	750	18	5.00

表 2 新长江 25001 型轮总的代表船型及转速、航速信息

转速/(r·min ⁻¹)	航速/(km·h ⁻¹)	
	上水	下水
800	4.57	14.91
900	5.74	16.09
945	6.56	16.11
1 191	10.59	19.02

注:载质量 4 932 t,吃水 5.185 m。

经过拟合计算,得到转速与航速的关系,见图 4,可求出船舶航行 700 r/min 转速对应的上水和下水航速分别为 3.47 km/h 和 14.51 km/h,由此可得其静水航速约为 8.99 km/h,进而求得主缓流阈值为 4.99 km/h,换算成 1.39 m/s。用该方法获得的划分主、缓流区阈值为定值。由于不同流量下,流速存在变化,如果采用该定值作为划分主、缓流区的阈值,高流量下,部分河段几乎都为主流覆盖;在较低流量下,大部分河段存在没有主流的情况,因此有必要采用其他方法确定主缓流区。

2.2.2 *p*-分位数阈值法

1) *p*-分位数阈值法原理。

ADCP 测流是近年兴起的一种基于新型测流设

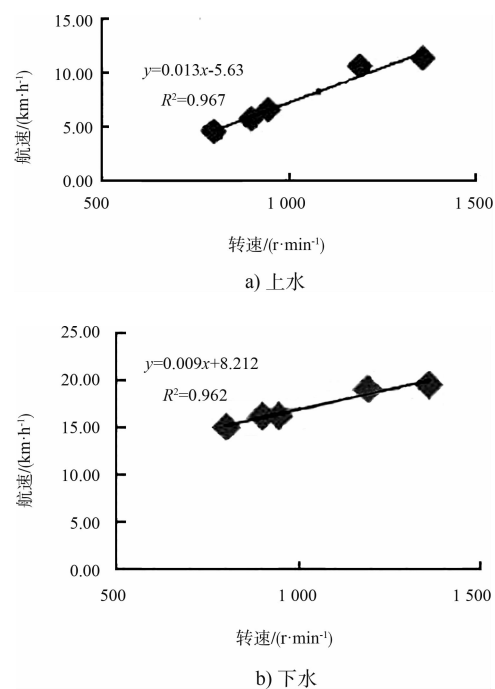


图 4 长江代表船型转速与航速关系

备的流速测量技术,是目前长江航道用于电子航道图流速区划分的主要测流手段。ADCP 测流能获得较为详实密集的数据,能够为研究流速区的划分提供基础数据^[7]。流速区的划分是个典型的模式二值化问题,合理选取阈值非常关键。

1962 年 Doyle 提出的 p -分位数法（也称 p -tile 法）是最古老的一种阈值选取方法。该方法使目标模式或背景模式的数量比例等于其先验概率来设定阈值，简单高效。其原理是根据先验知识，设定目标模式与背景模式的比例为 P_o/P_B ，则可根据此条件直接在模式直方图上找到合适的阈值 T ，使得 $f(x, y) \geq T$ 的模式为目标模式， $f(x, y) \leq T$ 的模式为背景模式。

2) p -分位数阈值确定。

根据表 3 中长江中游航道荆州处某年 8 月 10 日陈家湾至玉和坪河段的流速测量数据可得，该河段测时流量为 23 500 m^3/s ，从表 3 可见，比

例占 20% 时其主缓流阈值为 1.64 m/s ；比例 25% 时其阈值为 1.53 m/s ；比例 30% 时其阈值为 1.48 m/s 。比例 25% 与 30% 来区分主缓流流速区差别不大，其阈值在 1.50 m/s 左右，但如用 20% 作为 p -分位数则主流宽度偏小，该段可认为 25% ~ 30% 作为 p -分位数较为适当。

从表 3 中长江中游航道监利河段章华港——夏家台河段测流数据可得，比例 20% 流速大值的主流在弯道和分汊段较窄，比例 25% 相对适中，且两者相差不大，而 30% 相对较宽。因此比例 20% ~ 25% 的 p -分位数在该段确定主流较为合适。

表 3 河段流速信息统计

范围	日期	平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	点数	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	站点	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)				
						15% / 流量	20% / 流量	25% / 流量	30% / 流量	35% / 流量
陈家河—玉和坪	08-10	1.27	399	23 500	沙市	≥ 1.72	≥ 1.64	≥ 1.53	≥ 1.48	≥ 1.43
章华港—夏家台	07-09	1.21	677	24 900	沙市	≥ 1.65	≥ 1.56	≥ 1.48	≥ 1.41	≥ 1.35

注：表中 15%、20% 等列的单位 m/s 。

综合考虑各方面因素，为了获得统一的主缓流阈值界定方法，本文取流速大值 25% 为划分主、缓流流速区的阈值的 p -分位数。因此，可将主流的定义完善为：主流是在一定流量下一定河段内流速值中 25% 的流速大值构成的水流。

长江中游龙口水道是比较典型的缓流航道，通过绘制的流速区分区与实际缓流航道设置比较来验证 p -分位数阈值法的正确性。由图 6 可见，绘制缓流的范围与缓流航道的设置一致。图 7 为长江中游杨林岩水道主缓流情况，水道在南阳洲分汊，主流位于右汊，与 p -分位数阈值法绘制的主流一致。

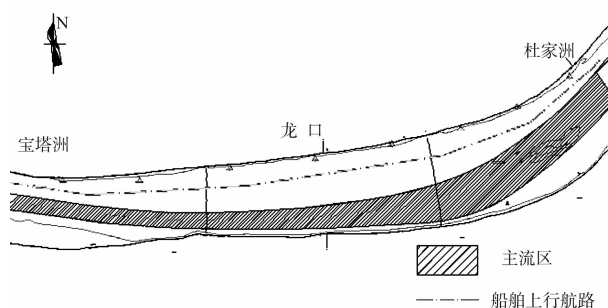


图 6 汛期龙口水道主缓流分布

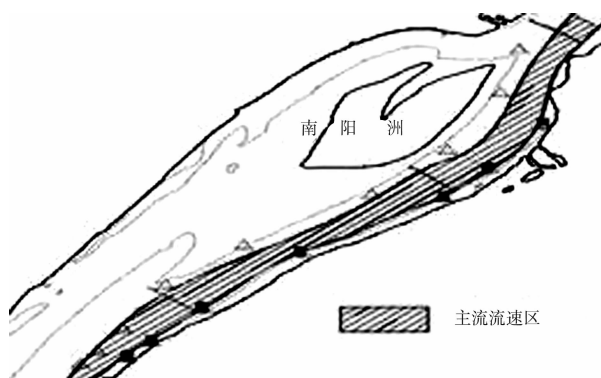


图 7 枯水期杨林岩水道主流流速区分布

3 流速区划分影响因素分析

对河流主、缓流区划分的影响因素主要有以下几种：比降、河宽、支流和河流平面形式。由于特定的河段中流速区划分影响因素具有耦合作用，影响主缓流划分的阈值，受研究条件限制，本文只针对影响相对较大的因素进行单独分析。

3.1 水面纵比降和河宽

河段水面沿河流方向的高程差与相应的河流长度相比，称之为水面的纵比降。河床的比降较难确定，因此通过水面比降来进行分析。如表 4 和图 8

所示，长江中游公安—郝穴—新厂—石首段有较明显的比降变化，特别是以郝穴、新厂为界，新厂—

郝穴的比降较上下游两段的大。为此，本文选择该段来研究比降对流速区划分的影响。

表4 公安—郝穴—新厂—石首比降、河宽及流速信息

断面里程/km	日期	平均流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	点数	流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	站点	阈值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	比降	河宽	所属范围
432~444	08-13	1.28	178	20 900	沙市	1.53	0.041	窄	公安—郝穴
416~428	08-13	1.24	214	20 900	沙市	1.44	0.054	较宽	郝穴—新厂
400~412	08-13	1.18	214	20 900	沙市	1.38	0.035	较宽	新厂—石首

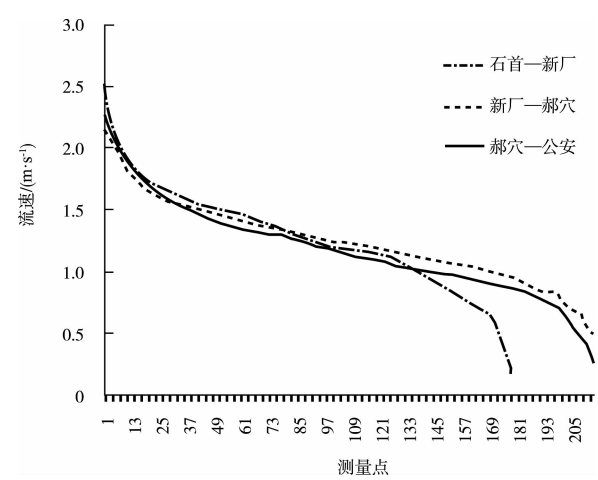


图8 公安—郝穴—新厂—石首3段的流速分布

由表5和图8可见：公安—郝穴的主缓流阈值最大，该段的比降小于郝穴—新厂。

由于河床的其他条件相差不大，可以得到这种

差别是由河宽造成的，且河宽在该段的影响相对较大。

在河宽相当的情况下，比降大的其阈值也相对较大，如郝穴—新厂段的比降较新厂—石首段的大，其阈值也相对较大。

3.2 支流作用

在不考虑其他因素的情况下，支流起汇流作用时，会使支流下游的平均流速和阈值增大；支流起分流作用时，会使支流下游的平均流速和阈值减小。如表5和图9，松滋河位于长江干线宜昌段，该支流起分流作用，可明显看出下游断面主缓流阈值比上游明显变小。而汉江河口位于长江干线武汉段，该支流起汇流作用，见表6，下游断面主缓流阈值比上游有较大增大。

表5 松滋河河口上下游断面流速信息

断面航道里程/km	日期	平均流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	站点	阈值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	范围
中游554	07-22	1.69	34 100	宜昌	1.99	松滋河口上游
中游551		1.24		宜昌	1.47	松滋河口下游

表6 汉江河口上下游断面流速信息

断面航道里程/km	日期	平均流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	站点	阈值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	范围
中游2~9	08-07	1.17	33 000	汉口	1.32	汉江河口上游
下游1 037~中游0		1.31		汉口	1.46	汉江河口下游

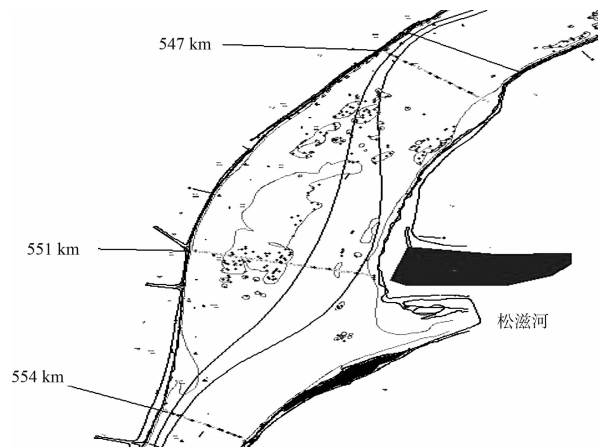


图9 松滋河断面

3.3 河流平面形式（不考虑河宽因素）

河床平面形式主要可分为3种：弯曲型、微弯顺直型和分汉型。长江干线水道的形态多样复杂，但基本上都能简化成弯曲、微弯顺直和分汉3种形态。

以嘉鱼—龙口—燕窝—王家渡段为例分析，该段分汉河段较多，但分汉段与其他河段的河宽相差不大，对于研究平面形式对主缓流分界的影响有典型作用。由表7试验获得的数据可以认为在相对接近的时间段内，分汉河段与顺

直河段相间的河段，其主缓流阈值差异并不明显。

同样，以调关段为例分析，该段位于上荆江，河段蜿蜒，但河宽总体变化不大。将弯道与顺直微弯分开进行统计分析（表 8），该段弯道阈值相较顺直微弯段变化较小。

表 7 嘉鱼—龙口—燕窝—王家渡段流速信息

分类	平均流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	点数	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	站 点	阈值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	范围
总体	1.09	892	25 600	螺山	1.28	
分汊段	1.06	417	25 600	螺山	1.26	嘉鱼—王家渡
其他段	1.12	475	25 600	螺山	1.30	

表 8 调关段流速信息

分类	平均流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	点数	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	站 点	阈值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	中游里程/km
总体	1.17	391	20 900	沙市	1.48	344.6 ~ 372.1
顺直微弯段	1.19	142	20 900	沙市	1.52	364.3 ~ 372.1
弯道段	1.16	249	20 900	沙市	1.47	344.6 ~ 359.2

3.4 流速区划分河段分段综合分析

由以上几个因素可见：流速区阈值和支流、河流平面形式有一定关系，但相邻一段河段中阈值受河宽、支流影响相对较大，受平面形式影响较小。考虑上述因素及各航道管理处管理范围，分段情况见表 9。

表 9 宜昌—武汉河段流速区分段

河段	航道里程/km	分段理由
宜昌—云池	中游 626 ~ 602	该河段顺直且河宽较窄，流速较大
云池—枝城	中游 602 ~ 572	该河段弯曲，且受清江、河宽作用，流速相对上游相邻河段较小
枝城—大埠街	中游 594 ~ 516	该河段有关洲、水陆洲、柳条洲分汊，松滋河分流，与上游相邻河段流速差异较大
大埠街—虎渡河	中游 516 ~ 492	虎渡河对水流起分流作用，且过了虎渡河后，河道有所展宽，虎渡河上下游的流速有明显变化
虎渡河—南星洲尾	中游 492 ~ 450	该段分汊、束窄和展宽河段相间作用，总体分汊和展宽占主流
南星洲尾—戚家台	中游 450 ~ 424	该段河道较窄，流速相对较大
戚家台—石首	中游 424 ~ 389	在藕池口（分流较小）、石首弯道后，河道明显缩窄，该处流速较大，后经碾子湾，多浅滩，流速有所放缓
石首—鹅公凸	中游 389 ~ 334	该段弯道较多
鹅公凸—42-1 岸标	中游 334 ~ 293.5	该段河道较窄
42-1 岸标—城陵矶	中游 293.5 ~ 231	该段弯道多，河道较窄
城陵矶—邓家口	中游 230 ~ 61	该段河宽较宽，分汊、弯道较多
邓家口—汉江河口	中游 61 ~ 下游 1043	该段河宽变化相对较小

4 结语

1) 根据长江典型船舶经济航速法获得的流速区划分阈值为 1.39 m/s 。由于不同流量下，流速存在变化，如果采用该定值作为划分主、缓流区的阈值，高流量下，部分河段几乎都为主流覆盖；在较低流量下，大部分河段存在没有主流的情况，因此该方法没有实用性。

2) 综合考虑航道流速的经验知识，采用 p -分位数阈值法作为主缓流阈值界定方法。并通过对长江中游航道 ADCP 测流数据统计分析，取流速

大值 25% 为划分主、缓流流速区阈值的 p -分位数。同时提出主流的定义，即在一定流量下一定河段内流速值中 25% 的流速大值构成的水流。

3) 比降、河宽、支流和河流平面形式对主缓流划分河段的分段具有影响，并以此为依据确定了长江中游航道流速区分段的分段。

由于目前测流数据资料有限，流速区的划分和对研究河段的分段还需在后续测量及运用中加以验证和优化。

（下转第 125 页）