

段温度 -140°C 。温升提升 100°C ，液氮流量降低 94.4% 。

表 4 不同温升条件下液氮流量

T_a (K)	T_i (K)	T_o (K)	q_m (Ton/H)
298.00	133.00	143.00	24.26
298.00	133.00	153.00	11.74
298.00	133.00	163.00	7.56
298.00	133.00	173.00	5.46
298.00	133.00	183.00	4.20
298.00	133.00	193.00	3.36
298.00	133.00	203.00	2.75
298.00	133.00	213.00	2.29
298.00	133.00	223.00	1.92
298.00	133.00	233.00	1.63

通过计算我们可以看出，降低流体进口温度，提高流体温升可以显著降低液氮流量，节省液氮消耗量。试验过程中，我们也可以根据各阶段管子温度、气温及温升数据计算此时流体流量，以应对系统中无流量显示的问题。

3 冷却实验过程控制

流体流向。低温流体流向是冷却试验工艺准备阶段需优先考虑的问题，通常冷却试验大纲中会详细描述低温流体走向。由伯努利定律可知，流体流速大处压强低，流速小处压强高，气体从高压区流向低压强区域。对于 LNG 船舶，通常加注站位于船中位置，也就是说冷却试验时，低温氮气从主液货管路的中间注入，流向船头或者船尾。然而，通常仅船头透气桅会连接到液货管路。所以，低温氮气会直接流向船头，船尾至加注站段液货管并不会会有低温氮气流过，也就无法达到预定的冷却温度。因此，需要采取调整阀开度、增加临时透气桅或者从喷淋管路进入尾部液货管等方式。

流体耗量。冷却试验低温流体的耗液量可以通过上述公式计算。然而订购液氮选择最小耗液量还是最大耗液量亦或者中间某一个数值需考虑好以下几个方面因素：冷却试验管路重量，液氮供应便利程度，试验周期，阀件数量，管路绝缘厚度及导热率等。如重量较小时，需选择最大耗液量；重量较大时，可折中趋大；液氮供应便利，可折中趋小；液氮供应不方便，选择最大。考虑冷却试验的连续性要求，液氮配备需有足够余量。

试验前准备。冷却试验开始前，管路密性试验是

必要的。不仅仅试验管路的密性试验报验合格，临时的液氮管路也需要进行压力试验。管路吹扫也是必不可少的，因管路制作完成后，通常管内空气相对湿度在 $70\% \sim 80\%$ ，露点在 $15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ ，夏季甚至更高。当低温氮气流经管路时，水汽会凝结成冰，可能对系统的阀件、探头造成损伤。管路吹扫目标通常要求达到露点温度 -40°C 以下，氧含量小于 3% 。另外，试验前需根据应力计算报告选择并标记管路测量点初始位置。

试验过程中低温流体流量及温升选择。试验过程中流体流量、流体温度及温升速度对试验结果及经济效益影响较大。流量过大，流体温度过低，温升过大，管路急剧收缩，易产生香蕉效应，造成管子、附件或者支架的损坏。流量过小，流体温度过高，温升过小，造成冷却介质浪费，经济效益差。流量大小可通过码头阀件开度调节，流体温度可通过调整气液比例，流体温升可以通过调整管路系统阀门尤其是通透气桅的阀门开度调整。通常情况下，使用液氮及低温氮气进行冷却试验时，流体温度需高于 -170°C ，以避免管路中氧气冷凝。

试验结束后，需要测量报验管路系统位移、变形，检查系统法兰及阀件低温状态下表现，检查系统冷点及绝缘状态。报验结束后，管路升温可以通过常温氮气吹扫升温，也可自然升温，但需注意试验管路系统需敞开，不可封闭。

4 总结

冷却试验计算是一个复杂的热力交换过程，通常无法面面俱到地考虑所有热交换点及流体流向。因此，在试验过程中需要根据现场管路及试验进展情况及时调整方案。生产准备期间需要预估液氮耗量时，我们可以通过理论计算出最大和最小比耗液系数。而在最大和最小耗液量之间选择时，需考虑冷却试验期间环境温度影响并在试验中调节进口流体温度及温升，从而顺利、高效益地完成试验过程。

参考文献：

- [1] 马国光, 吴晓南, 王元春. 液化天然气技术 [J]. 北京: 石油工业出版社, 2020.
- [2] 顾安忠. 液化天然气技术 [J]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [3] GB/T 14976-2012, 中华人民共和国国家标准 [S].
- [4] 符锡理. 低温系统的预冷过程和计算 [J]. 低温工程, 1998, (02): 3-8.

浅谈西江界首至肇庆段航道整治效果及思路变化

胡勇

(广东省交通运输规划研究中心, 广东 广州 510030)

摘要: 自上世纪五十年代以来, 为适应西江沿岸地市经济的发展, 西江界首至肇庆段实施了多次航道整治升级工程, 航道通航条件不断改善。为进一步分析该河段航道整治思路的发展, 立足新发展阶段, 结合该河段历次航道整治工程实际情况, 详细阐述了航道整治效果及思路变化情况, 为今后该河段进一步整治升级或类似航道项目整治提供参考。

关键词: 西江; 航道整治; 效果; 思路变化

中图分类号: U617 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2025) 21—0070—03

西江航运干线是广东省内河水运的重要组成部分, 是联接东、西部地区的“黄金水道”^[1]。根据《广东省航道发展规划(2020—2035年)》, 广东省航道总体布局为构建“八通、两横、一网、三连、四线”主骨架, 形成内外联通、干支衔接的全省航道“一张网”, 西江界首至肇庆段位于西江航运干线中游, 属于“两横”中的西江—东江线路范围, 自界首大源冲口起, 至肇庆大桥, 全长 171km, 分为界首至都城(37km)和都城至肇庆大桥(134km)两段。该河段一般河宽 800 ~ 1500m, 河床为沙质、局部石质, 平均坡降为 0.0128‰, 两岸为低山丘陵地区, 部分河段设有堤围。河段沿程沙洲、浅滩、礁石较多, 其中界首至都城河段的“四滩”(界首滩、蟠龙滩、新滩、都乐滩)是有名的浅滩, 素以“滩多、礁石多、水位落差大”著称, 通航条件较差^[2]; 都城至肇庆大桥 134km 河段水深条件优良, 航宽富足。自上世纪五十年代以来, 在经历数次航道改造升级后, 西江界首至肇庆段现为内河 I 级航道, 实现全线可通航内河 3000 吨级船舶。

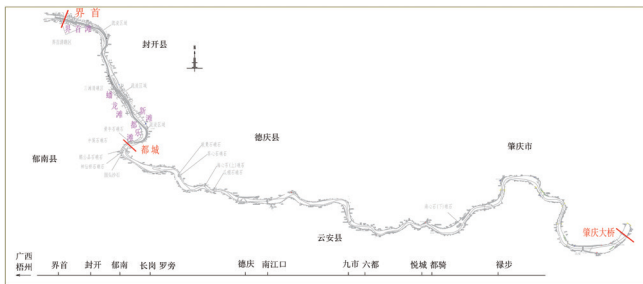


图 1 西江界首至肇庆段航道示意图

1 河床演变及碍航特性

1.1 河床演变

西江界首至肇庆河段以河形蜿蜒多变, 河床上砂、

石、礁共存为主要特征, 河段受潮动力作用较弱, 河流动力作用是塑造河床的主要动力^[3]。近年来, 西江上游来水量较大, 造床动力较强, 含沙量较少但输沙总量不小。其中界首至都城河段的河床变动主要集中在“四滩”河段, 在 2006 年之前, “四滩”中界首滩河床基本稳定, 蟠龙滩、都乐滩河床断面形态向宽浅方向发展, 而新滩河段航槽稳定, 河床演变以轻微冲刷为主; 2006—2013 年, 在对该河段实施了“以筑坝和炸礁为主, 辅以疏浚”的内河 2000 吨级航道整治工程, 以及受上游长洲枢纽建成后调峰调度的影响, “四滩”河段河床演变趋势发生明显变化, 河段主槽均发生明显的下切, 边滩则以淤积为主^[4]; 2013 年 6 月后, 水沙基本达到新的平衡, “四滩”河势稳定, 河床断面年际变化较小, 年内则呈现出“洪淤枯冲”季节性变化, 但冲淤强度不大, 总体呈轻微冲刷的态势。

都城至肇庆河段自 2003 年以来河床变动较小, 多年来河宽基本不变, 主要是该河段两岸均建有防洪大堤, 受到堤围保护控制, 该河段平面形态相对稳定。

1.2 碍航特性

根据对历次西江(界首至肇庆)航道整治工程情况分析, 研究河段碍航因素主要有界首至都城的“四滩”河段存在浅滩碍航、礁石碍航, 以及全河段沿线的桥梁碍航问题。

(1) 浅滩碍航。碍航浅滩主要集中在界首至都城河段的界首浅滩、蟠龙浅滩、新滩、都乐滩四个浅滩。其中, 界首浅滩碍航主要是因为界首河段上游白沙角微弯和江口下游江口大弯道的连接过渡段, 且过渡段长直宽阔, 原界首浅滩位于两弯交接位置, 水流及输沙散乱, 冲淤变化较大, 受江口弯道壅水及贺江中枯季发电

下泄水流顶托的一定影响,水动力较弱,上游来沙在河段落淤形成浅滩,造成水浅碍航;蟠龙浅滩、新滩和都乐滩碍航主要是因为三滩河段为江口反“S”型连续弯道与都乐弯道的连接段上游,入口处有印顶角山咀和渡头咀为控制,下游为马鬃角下游狭口段控制,由于中间连接段过于长直宽阔,洪水期上、下游控制断面水面宽度分别为600m、460m,三滩河段长直宽阔,水面宽度1000~1200m,上游来沙容易在河段落淤形成边滩、沙洲和浅滩,造成水浅碍航。

(2) 礁石碍航。西江河段礁石密布,主要碍航礁石有:界首浅滩自上而下沿程有黄安石、北赞石、沙头石、下典石、沉船区石、无名石、独獭石、双鱼石等碍航礁石;三滩的自上而下沿程有下苏文石、三兄弟石、下蟠龙石、旺村石、无名石(多处)、香炉石等碍航礁石;都城以下河段主要礁石有黄安石、牛屎石、鹅公品石、神仙桥石、罗旁石、三牛石、葵心石、海心石(上)、瓜棚石、海心石(下)等。这些礁石大部分位于航槽或在其周围,对船舶航行造成安全隐患。历次航道整治时为实现航道提级,提高航道通航水深,需将这些礁石进一步按新的标准清除,以确保船舶航行安全。

(3) 桥梁碍航。研究河段共有跨河桥梁7座,从上游至下游分别是封开西江大桥、德庆西江大桥、南广铁路西江特大桥、肇庆西江大桥(铁公桥)、肇庆西江大桥(公路)、阅江大桥、肇庆大桥^[5]。对照《内河通航标准》有关内河I级航道水上过河建筑物通航孔净空尺度要求,上述7座桥梁中有4座桥梁的通航净空尺度不满足规范要求。

2 历次整治及效果情况

2.1 局部整治(1950-1953年、1967-1971年)

1950年至1953年珠江水利工程总局首次对西江新滩进行整治,整治线宽度为800-850m,整治高度1.2m,于左岸修筑丁坝4条,自上游至下游为:1#坝长240m、2#坝长250m、3#坝长280m、4#坝长376m。

1967年至1971年进行第二次整治。原广东省航道局在新滩原有整治工程基础上,将整治线宽度缩窄为700-800m,将2#坝加长到450m,3#坝加长至430m,同时在都乐滩右岸修筑了3座丁坝加固稳定白木沙。1971年进一步将整治线宽度缩窄为590-800m,整治高度1.7m。

2.2 西江航运建设一期工程广东段航道整治工程(1986-1991年)

1986至1991年开展的西江航运建设广东段航道整治工程,着手全面系统解决西江航运干线广东段制约航道发展瓶颈的“四滩”问题,当时拟按照国家Ⅲ级航道进行建设,通航1000吨级内河船舶。三滩整治线宽度650m,整治高度2.0m,界首滩整治线宽度600m,整治高度1.5m。经过五年十个月的航道整治,原国家计委委托交通部于1991年对整个工程进行竣工验收,并通过了国家验收,被评为优良工程。整治后的西江航道广东段全线达Ⅲ级航道标准,大大改善了通航条件,实现了内河千吨轮船可由广州直达广西梧州,且相较原航道缩短了航程一百一十公里,对西江沿线地市经济带动效果显著。

2.3 西江“四滩”完善性整治工程(1996-2001年)

经西江航运建设广东段航道整治一期工程建设后,该河段通航条件得到改善,但界首、都乐河段经常出浅,航槽易位。为此,航道部门于1996-2001年开展了“四滩”完善性整治工程。完善性整治工程界首滩整治线宽度600m、整治高度1.5m;三滩整治线宽度650m,整治高度2.0m。整治后“四滩”河段航槽保持相对稳定,未出现出浅、航槽易位等情况,航道通航顺畅。

2.4 西江(界首至肇庆)航道整治工程(2007-2011年)

2007年,航道部门启动了对该段航道2000吨级整治工程,按内河Ⅱ级航道标准、都城以下同时满足Ⅲ级港澳线标准建设,其中界首至都城段37km航道尺度为3.5m×80m×550m(航道水深×航道宽度×最小弯曲半径,下同)、都城至肇庆134km为4.0×80×550m。工程分筑坝和护岸、清礁、疏浚等主体工程和整治河段的支持保障系统建设等配套工程,工程实施后,该段航道通航条件大为改善,全线满足2000吨级航道尺度要求,西江航运干线广东段水运量也由整治工程实施前(2003年)的2988万吨增长至工程实施后(2013年)的1.39亿吨,增长了近5倍^[6],为贵广铁路货运量的4倍,已经超过西江内河Ⅱ级航道设计通过能力1.3亿吨。

2.5 西江(界首至肇庆)航道扩能升级工程(2016-2024年)

2016年,西江(界首至肇庆)航道扩能升级工程开工建设,按内河I级航道,通航3000吨级内河船舶标准进行,通航保证率98%,其中界首至封开江口段12km航道的设计通航尺度为4.1m×90m×670m;

封开江口至肇庆大桥段 159km 航道的设计通航尺度为 4.5m×135m×670m。主要工程措施为筑坝、清礁、疏浚、护岸、桥梁防撞、航标以及配套工程等, 工程实施后, 实际航道航槽水深全线达到 3000 吨级航道扩能所要求的 4.5m 水深, 全面实现 3000 吨级航道整治目的。西江航运干线货运量连续 8 年创历史新高, 2024 年货运量为 2.24 亿吨, 同比上涨 22.06%, 航道整治作用效果明显。

3 整治思路变化分析

上世纪 90 年代之前, 在西江干流航道整治工程中, 采用以筑坝为主、疏浚为辅的方法, 以丁坝群为主对浅滩进行整治, 取得一定效果后, 再对局部浅滩进行疏浚, 整治工程取得较好效果, 航道达到设计要求的尺度, 航槽稳定。因此, 以“筑坝为主”的整治思路成为上世纪 90 年代之前对西江“四滩”浅滩进行整治的主导思路和整治方法。

21 世纪初, 西江(界首至肇庆)航道整治工程(2000 吨级)开始实施, 结合河段特性, 工程确定“四滩”的整治原则为以筑坝和炸礁为主, 与疏浚相结合的方式, 以调整枯水期河床, 尽可能减小洪中枯水流动力轴线的差异。自 2007 年底整治工程实施以来, 筑坝工程调整了水流流态, 并稳定边滩, 保护了岸坡; 疏浚及清礁工程调整了水流流态, 畅通主槽, 提高了河流的泄洪能力, 基本达到了整治效果。

近十几年来, 西江航道的水沙条件及河流特性发生了重要改变, 航道整治的目标要求也发生较大变化。航道建设中水力、泥沙因子的变化, 都会导致河床作出整体性反应, 航道整治思路应系统考虑浅滩及其上下河段, 防止出现新的浅滩, 达到标本兼治。因此, 西江(界首至肇庆)航道扩能升级工程(3000 吨级)整治思路为: 通过疏浚及清礁等整治措施提高航槽水深, 使河段全线达到设计航道尺度; 以加密布置丁坝等方式进一步调整洪、枯季水流动力轴线, 必要时辅以规整边滩、保护洲滩和岸坡节点等工程措施, 全面实现 3000 吨级航道通航要求。

4 总结

(1) 整治思路转变影响整治措施。西江中游作为长河段、浅滩众多的典型, 在经历多次扩能升级大幅度提高航道水深, 水力和泥沙因子发生深刻变化的条件下,

仅靠传统束水攻沙理念, 即通过布置大规模丁坝群调整断面形态和水流分布的方式将难以达到预期整治效果, 还可能对河道带来严重的不良影响。新形势下西江“四滩”的整治应从浅滩本身及上下游进行系统分析研究, 进一步通过数学模型、物理模型进行模拟研究, 适当确定炸礁范围及疏浚规模, 再通过少量筑坝, 调顺水流, 以增加中枯水航槽流速、保持航槽稳定, 最终实现满足通航的航道尺度和维持航道稳定的双重目的。

(2) 碍航礁石为西江中游航道整治的关键。随着西江上游长洲枢纽运行, 水库拦截了进入河道的泥沙, 淤粗排细, 下泄水流含沙量较天然条件下减小, 一般下泄含沙量减小往往伴随着悬移质级配的变细^[7]。水流具有的能量大于携带沙量所要求的能量, 水流开始从河床上卷起新的物质来补偿含沙量的不足, 造成坝下的河床开始逐渐下降, 且向下游逐渐推进。这种有选择的侵蚀过程一般会导致河床顶层逐渐粗化, 最终形成抗冲保护层。抗冲保护层形成后, 将使河床下切受到抑制, 卵石、礁石暴露而成为碍航的主因, 故西江中游段今后航道整治的关键在于碍航礁石的处理。

参考文献:

- [1] 杜小燕. 西江航运干线整治工程通航安全影响与对策研究 [J]. 珠江水运, 2024, (10): 28-30.
- [2] 张建林, 桂姗子, 朱俊杰, 等. 西江“四滩”高等级航道攻坚战 [J]. 珠江水运, 2017, (02): 24-27.
- [3] 王勇. 潮汐影响下西江“三滩”的航道整治工程研究 [D]. 重庆交通大学, 2008.
- [4] 童朝锋, 卢行长, 孟艳秋. 西江四滩河段近 10 年河床变形与成因分析 [J]. 水运工程, 2016, (02): 114-120+126.
- [5] 马劲. 西江(界首至肇庆)航道扩能升级工程对桥梁防船舶碰撞问题的研究 [J]. 珠江水运, 2020, (10): 70-71.
- [6] 李露露, 姚海元, 武哲宇, 等. 西江航运堵点分析及对策 [J]. 水运工程, 2024, (07): 18-23+41.
- [7] 刘临雄, 李俊娜, 黄文辉. 西江长洲水利枢纽至界首河段航道碍航分析及整治措施 [J]. 水运工程, 2020, (07): 158-163+174.