



山区河流航标船系泊锚石系统 失稳机制试验研究*

刘俊¹, 胡江², 张文³, 黄纲³, 夏文颖³, 向维¹

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

3. 长江宜宾航道局, 四川 宜宾 644002)

摘要: 山区河流具有水流湍急、流量与水位变幅较大等特点, 常导致航标船失稳、移位以及漂移破坏等, 给船舶航行造成重大安全隐患。选取长江上游典型事故河段, 从锚石阻水面积、锚石质量、水深、流速以及缆绳角度等因素, 开展航标船系泊锚石系统失稳机制试验研究。研究结果表明: 从锚石形状角度, 扁平锚石具有重心低、底面积大和阻水面积小的优势, 相比于同质量的方形锚石具有更强的稳定性和极限拉力; 从水流和缆绳角度, 随着弗劳德数和缆绳角度的增加, 航标船系泊锚石系统稳定性越差, 其中缆绳角度越小其稳定性越好; 提出极限拉力与水深、流速及缆绳角度等因素的关系式。为山区河流航标船系泊锚石结构布置提供理论支撑。

关键词: 山区河流; 锚石结构; 失稳破坏; 原型试验; 极限拉力

中图分类号: U 644.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0147-06

Experimental study on instability mechanism of mooring anchor stone system of beacon vessel in mountainous rivers

LIU Jun¹, HU Jiang², ZHANG Wen³, HUANG Gang³, XIA Wen-ying³, XIANG Wei¹

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing

Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Changjiang Yibin Waterway Bureau, Yibin 644002, China)

Abstract: Mountainous rivers have the characteristics of rapid flow and large variation of flow & water level, which often lead to instability, displacement, and drift damage of the beacon vessel, becoming a threat to the beacon vessel. Selecting the typical accident section of the upper reaches of the Yangtze River, we carry out the experimental study on the instability mechanism of the beacon vessel and anchor stone system from the aspects of the water-resistance area of anchor stone, the weight of anchor stone, water depth, velocity, and cable angle. The results show that from the perspective of the anchor stone's shape, the flat anchor stone has the advantages of low gravity center, large bottom area, and small water-resistance area, and has better stability and ultimate tension than the square anchor stone of the same weight. From water flow and ropes, with the increase of Froude number and cable angle, the stability of the beacon vessel and anchor stone system is worse. The smaller cable angle will lead to better stability. The empirical formulae between the ultimate tension, water depth, velocity, and cable angle are presented, which provide theoretical support for the layout of the river beacon vessel and anchor stone system of mountainous rivers.

Keywords: mountainous river; anchor stone structure; destabilization damage; prototype test; ultimate tension

收稿日期: 2020-08-13

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600400); 重庆市社会民生科技创新专项(cstc2016shmszx30012)

作者简介: 刘俊(1994—), 男, 硕士研究生, 从事航道整治与河道治理研究。

我国山区河流滩险众多，坡陡流急，水流复杂，汛期洪水暴涨暴落，水位流量变幅大，船舶航行时多借助航标船导航，而在汛期航标船失稳情况频发。航标船失事统计数据显示^[1]，其失稳原因有水位陡涨、浮动和船舶碰撞等，每年航标船失事数量达十几艘，锚石损失严重。对于山区河流航标船系泊锚石系统失稳机制的认识尚不清晰，因此有待研究。

关于航标船系泊锚石系统稳定性的研究成果主要包括 2 个方面：针对海洋船舶，研究认为锚泊船走锚主要与大风、浪袭击及抛锚方法等因素有关^[2-3]，其中影响锚运动特性的因素包括锚的形状和缆绳的长度等^[4]，相关学者建立不同的走锚预警方法^[5-7]。针对山区河流，杨斌^[8-9]曾针对三峡库区 175 m 蓄水后水深增加等因素，通过三峡库区航标船展开受力分析，得出深水航道设标方法和航标船所需缆绳长度等；刘云飞等^[10]结合目前库区航标配置及系留设施等，通过航标受力分析及维护实践给出库区深水航标合理型号配置；冯飞^[11]基于航标船因外界因素的干扰发生异动导致其功能异常或偏离，建立一套适用于航标船的异动原因识别方法；朱滔^[12]因长江上漂浮物在航标船缆绳处造成堆积形成航标船失稳，提出相应的监测及报警方案。以上研究基本采用理论分析和数值模拟且侧重于分析航标船，对锚石研究相对较少。

本文从锚石形状和水力条件两方面，考虑锚石阻水面积、锚石质量、水深、流速以及缆绳角度 5 个因素，开展航标船系泊锚石系统失稳机制原型试验研究。

1 航标船系泊锚石系统受力分析

山区河流的卵石河床理想情况下较为平整。平衡状态时，航标船与锚石整体受力在水平方向上为标志船所受外力 R 、水流对锚石冲击力 F 和锚石与河床的摩擦力（即抓力） F_t ；竖直方向为总重力 $G_{总}$ 、二者的浮力 $F_{浮总}$ 和锚石的支持力 F_N ，见图 1a）。其中标志船所受外力 R 包括水流阻力

R_V 、波浪力 R_b 、风力 R_w 以及水面坡降力 R_J 。

对于锚石而言，其水平方向受力为水流对锚石冲击力 F 、缆绳拉力水平分量 $F_T \cos \theta$ 和锚石与河床的摩擦力 F_t ；竖直方向为锚石自重 G 、河底支持力 F_N 、浮力 $F_{浮}$ 及缆绳拉力竖直分量 $F_T \sin \theta$ ，见图 1b）。

航标船系泊锚石系统的稳定性主要依靠锚石与河床的抓力，即 $F_t = \mu N$ ，其中 N 为锚石所受浮重。其整体稳定性内因主要有锚石自重、锚石形状和与河床接触面大小等因素，外因包括缆绳角度和水力条件等。

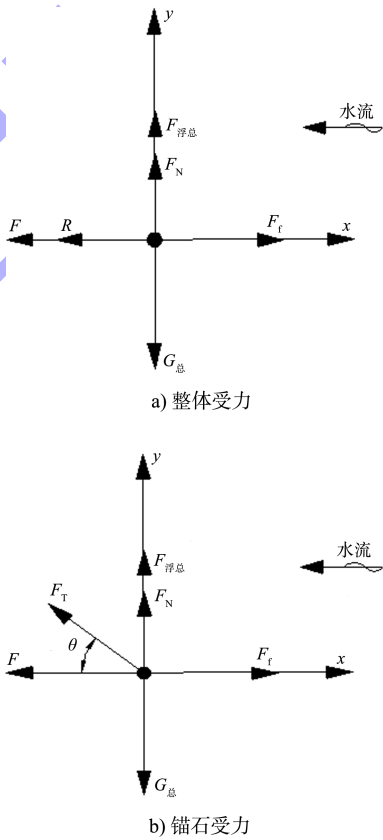


图 1 航标船系泊锚石系统受力分析

2 原型试验布置

2.1 河段概况

试验河段属长江上游叙泸段航道，该段航道上起宜宾合江门（航道里程 1 044 km）下至泸州纳溪（航道里程 944 km），为典型的山区河流航道，具有航道弯曲狭窄、滩多水浅、水位涨落频繁和变幅大等特征，河床组成主要为砂卵石，基本保持稳定。该河段水流流速在 2.0 m/s 以上，枯期滩

上流速大部分在 3.0 m/s 左右, 流态紊乱, 平均纵比降约 0.27‰。本次试验具体地点为叙泸段中筲箕背控制河南溪仙源大桥 3#红浮处, 距河右岸的距离约 176 m, 见图 2。



图 2 试验河段

2.2 试验方案布置

目前试验航道段航标船系锚锚石形状基本采用长条形结构, 标准质量约 1 t, 尺寸为 1.3 m×0.7 m×0.4 m(长×宽×高)。该航道段受上游日调节非恒定流作用, 枯水期航道水位日变幅可达 3 m 以上, 航标船随着水位变动改变缆绳角度, 从而

使得锚石受力状态不断地发生改变。因此, 考虑锚石形状及水力条件两方面参数影响, 将现场试验分为 2 类并测量锚石失稳时的极限拉力: 1) 当水力条件一定时, 研究锚石不同形状抵抗水流的极限拉力; 2) 锚石形状一定时, 探究水力条件改变对锚石极限拉力的影响。并进一步建立锚石极限拉力与水深、流速和缆绳角度等参数的关系。

2.2.1 锚石形状优化试验方案

试验 1 布置主要目的为探究锚石不同形状的稳定性。考虑锚石阻水面积及锚石质量影响, 共布置 5 种尺寸, 见表 1, 其中 2 号锚石形状为现阶段采用结构。1、2 和 3 号锚石质量基本相等, 通过改变其阻水面积大小, 考虑阻水面积影响; 而 2、4 和 5 号锚石宽度和高度一定, 通过改变长度进而分析锚石质量影响。试验时流速和水深在一定范围内基本稳定, 保持缆绳长度以及缆绳角度不变, 测量不同形状锚石的极限拉力数值, 分析比较得到推荐锚石形状。

表 1 试验 1 锚石参数

尺寸/ m			阻水面积(长×高)/m ²	底面积(长×宽)/m ²	理论参考参数	
长	宽	高			体积/ m ³	质量/kg
1.30	0.53	0.53	0.69	0.69	0.36	864
1.30	0.70	0.40	0.52	0.91	0.36	864
1.30	0.93	0.30	0.39	1.21	0.36	864
1.10	0.70	0.40	0.44	0.77	0.31	744
0.90	0.70	0.40	0.36	0.63	0.25	600

2.2.2 水力条件试验方案

试验 2 通过观测不同水力条件下锚石的极限拉力, 得到极限拉力与水深、流速及缆绳角度等因素的关系, 并给出航标船与最优锚石相关配置建议等。综合考虑长江上游河段典型水力条件并结合试验时间及缆绳消耗等因素, 试验选择 2 种水深、

2 种流速区间和 3 种缆绳小角度, 共 12 种工况, 见表 2。其中锚石形状根据试验 1 结果选择。这里 3 种缆绳角度的确定需依靠缆绳的理论长度来控制, 当锚石处于河底时, 理想状况下为底面平铺于河底, 此时锚石所处水深为实际水深与锚石高度差值, 试验测量时, 假定任意角度即可得到理论绳长数值。

表 2 试验 2 水力条件工况

工况	水深/ m	流速 v/(m·s ⁻¹)	缆绳角度/(°)	工况	水深/m	流速 v/(m·s ⁻¹)	缆绳角度/(°)
1	6	<2	10	7	8	<2	10
2			30	8			30
3			45	9			45
4		>2	10	10		>2	10
5			30	11			30
6			45	12			45

2.3 试验测量方法

试验方法如图 3 所示。测量过程中，将测力计两端固定于锚石与航标船之间，试验时航标船通过缆绳连接锚石并将船身挂靠在工作船舶上，顺水流方向开动船舶带动航标船至锚石松动即可（即无线手持仪显示器中拉力值出现突变），记录拉力值。采用 LS1206B 型便携式流速流量仪测取水流流速，水深则采用 HY1600 测深仪进行观测。

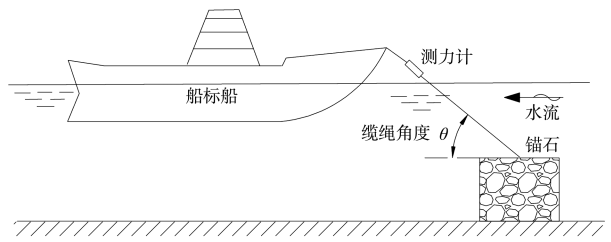


图 3 航标船系泊锚石系统水下受力试验示意

3 结果与讨论

3.1 锚石形状优化比选

试验 1 控制缆绳角度为 23°，缆绳长度 30 m，水深控制在 12 m 左右。记录不同锚石形状实测极

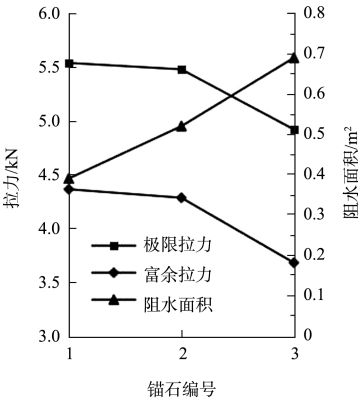
限拉力数值，见表 3。表 3 中，根据设标处的水深、流速、风速和波高等自然条件估算得出航标船所受水流阻力、波浪力、风荷载及水面坡降力，即 $R_b=652\text{ N}$ 、 $R_w=282\text{ N}$ 、 $R_j=12\text{ N}$ 。通过锚石实测极限拉力和航标船所受外力关系以及缆绳夹角，得到缆绳理论拉力，此时富余拉力为极限拉力与缆绳理论拉力水平分量和锚石水流冲击力之差。

图 4a) 为 1、2 和 3 号锚石的极限拉力和富余拉力数值大小。综合分析，1、2 号锚石稳定性基本相同，同时优于 3 号锚石。验证了在锚石质量一定的情况下，重心越低、底面积越大和阻水面积越小，稳定性越强。而图 4b) 为 2、4 和 5 号锚石的极限拉力和富余拉力数值大小，2 号锚石稳定性优于 4、5 号锚石，验证了锚石质量的影响，质量越大锚石稳定性越强。

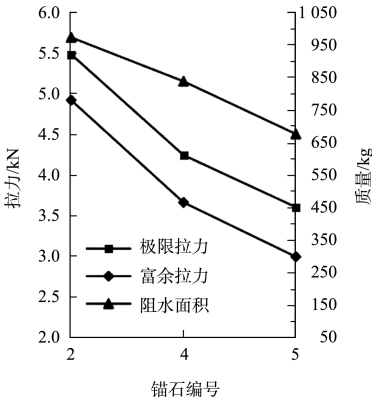
综合整体分析，考虑锚石质量、重心、阻水面积和底面积的影响，推荐的锚石最优形状主要有 1.3 m×0.7 m×0.4 m 和 1.3 m×0.93 m×0.3 m 两种。

表 3 不同锚石形状拉力计算

锚石尺寸/(m×m×m)	流速/(m·s ⁻¹)	极限拉力/N	航标船水流阻力/N	缆绳理论拉力/N	锚石水流冲击力/N	富余拉力/N
1.30×0.93×0.30	1.71	5 540	115	1 123	144	4 362
1.30×0.70×0.40	1.62	5 480	104	1 111	174	4 283
1.30×0.53×0.53	1.59	4 920	101	1 108	223	3 677
1.10×0.70×0.40	1.62	4 240	104	1 111	174	3 043
0.90×0.70×0.40	1.70	3 600	114	1 122	192	2 375



a) 1、2和3号锚石



b) 2、4和5号锚石

图 4 锚石拉力对比

3.2 水力条件对航标船系泊锚石系统的影响

根据试验 1 结果，试验 2 采用的锚石形状为 1.3 m×0.7 m×0.4 m。表 4 为不同水力条件下记录

的锚石极限拉力值，水面比降为 0.188‰。考虑水深和流速参数得到弗劳德数 Fr ，见图 5。图 5 中，从 3 条不同缆绳角度对应下锚石的极限拉力趋势

线分析可知,随着弗劳德数的增加,3 种缆绳角度对应下的锚石极限拉力值都相应减小,除去个别点存在误差,总体变化趋势一致。其中,缆绳角度越小,锚石极限拉力值越大,航标船系泊锚石系统就越稳定,但是缆绳角度太小导致缆绳过长,不仅造成绳索浪费还会增加航标船的回旋半径。在实际情况中,缆绳角度会随水位升降而变化,因此设标时推荐的缆绳角度参考值为 10°,设标缆绳为水深的 3~5 倍,可根据航道实际情况适当改变。

表 4 不同水力条件下试验记录

水深/m	流速/ (m·s ⁻¹)	弗劳 德数 <i>Fr</i>	缆绳 角度/(°)	理论 绳长/m	极限 拉力/kN
6	1.27	0.166	10	32	4.30
	1.80	0.235	30	11	3.86
	1.80	0.235	45	8	4.18
	2.83	0.369	10	32	3.78
	2.91	0.379	30	11	3.58
	2.97	0.387	45	8	3.40
8	1.50	0.169	10	44	4.42
	1.61	0.182	30	15	4.26
	1.52	0.172	45	11	4.14
	2.17	0.245	10	44	4.28
	2.20	0.248	30	15	4.02
	2.12	0.239	45	11	3.88

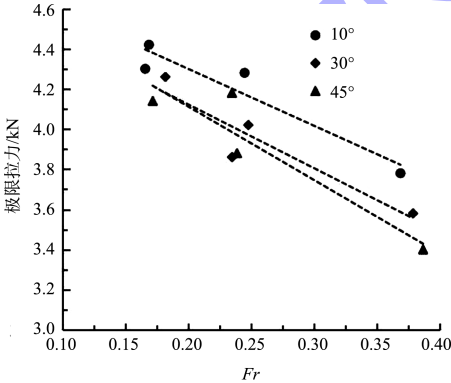


图 5 3 种缆绳角度下锚石拉力对比

3.3 锚石极限拉力经验公式

综合分析可知,对于山区河流的卵石河床,

考虑小范围的河床仍然较为平整,在简化其床面形态后,某一形状确定的锚石结构(本文仍取现有代表锚石形状),其自身能承受的极限拉力决定于水深、流速和缆绳角度,如式(1)所示。

$$F_{lim}=f(v,h,\theta)$$

考虑参数的相关性与无量纲化,则可以化简为:

$$F_{lim}=f(Fr,\sin\theta)$$

根据实测的不同水深下不同流速、角度时的极限拉力分析见图 6。根据拟合后相关系数比较,发现指数形式拟合程度高,因此极限拉力可以用如下经验公式简化计算:

$$F_{lim}=G_1e^{-0.91(Fr^{0.54}\sin^{0.12}\theta)}$$

式中: F_{lim} 为锚石极限拉力; G_1 为锚石结构的水下质量; v 为标志船处流速; h 为锚石处水深; Fr 为水流弗劳德数; θ 为锚石与航标船的系泊角度。

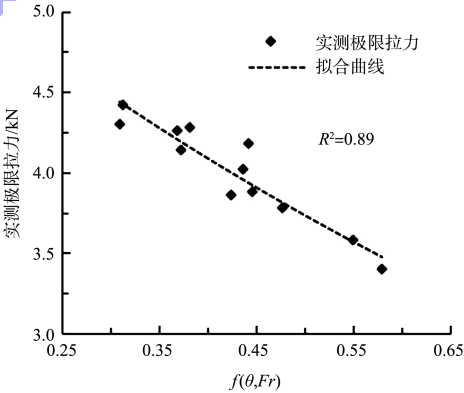


图 6 不同水力条件临界拉力曲线

表 5 分析不同水力条件下锚石极限拉力实测值和计算值。从表 5 可知,误差不大,基本能控制在 5% 以内,整体效果较好。由图 7 可知,公式(3)能够很好地反映锚石结构在上述条件下极限受拉力的变化规律,其计算值与实测值符合较好,相关系数 $R^2=0.89$ 。

表 5 不同水力条件下锚石拉力理论、实测值

水深/ m	锚石尺寸/m			缆绳角度/ (°)	流速/ (m·s ⁻¹)	Fr	极限拉力/N		误差/%
	长	宽	高				实测	计算	
6	1.3	0.7	0.4	10	1.27	0.166	4 300	4 294	-0.1
				30	1.80	0.235	3 860	3 984	3.2
				45	1.80	0.235	4 180	3 915	-6.3
				10	2.83	0.369	3 780	3 825	1.2
				30	2.91	0.379	3 580	3 576	-0.1
				45	2.97	0.387	3 400	3 481	2.4
8	1.3	0.7	0.4	10	1.50	0.169	4 420	4 421	0.0
				30	1.61	0.182	4 260	4 185	-1.8
				45	1.52	0.172	4 140	4 165	0.6
				10	2.17	0.245	4 280	4 155	-2.9
				30	2.20	0.248	4 020	3 942	-2.0
				45	2.12	0.239	3 880	3 903	0.6

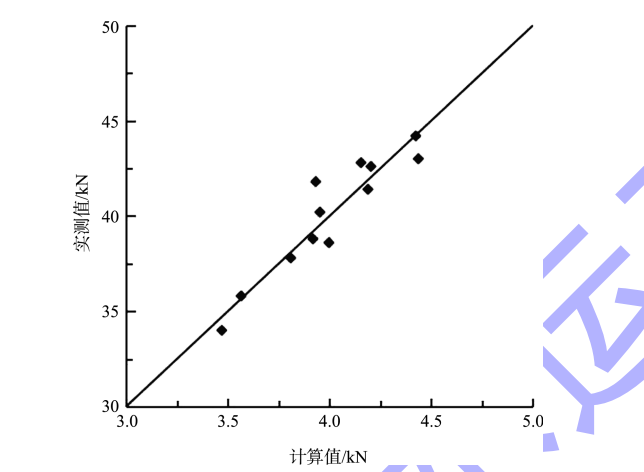


图 7 简化计算公式与实测极限拉力对比

4 结语

1)当锚石质量一定时，重心越低、底面积越大，航标船与锚石系统稳定性越强，承受的极限拉力越大。综合整体分析，扁平锚石比同质量的方形锚石稳定性更好。

2)缆绳角度越小航标船系泊锚石系统越稳定；缆绳角度会随水位变动而改变。因此，设标时宜选用小角度，推荐的缆绳角度参考值为 10°。

3)对不同水力条件下实测极限拉力进行分析，提出极限拉力与水深、流速及缆绳角度等因素的关系式，该公式能较好地反映锚石结构极限拉力的变化规律。

参考文献：

[1] 黄红渡, 陈文雄.关于航标失常的原因分析与控制分

析[J]. 珠江水运, 2019(5): 28-29.

[2] 刘芳贵, 洪刚.船舶走锚原因分析及探测方法研究[J]. 大连海运学院学报, 1993(2): 159-164.

[3] 隋万胜.析走锚的原因和应对措施[J]. 航海技术, 2010(6): 26-27.

[4] DOU Y Z, YU L. Numerical investigations of the effects of different design angles on the motion behaviour of drag anchors[J]. Applied Ocean Research, 2018, 76: 199-210.

[5] 肖进丽, 付耀方, 程涛.基于 AIS 信息的单锚泊船舶走锚监测报警方法[J]. 大连海事大学学报, 2018, 44(4): 8-14.

[6] 杨林家, 杨佐昌, 于洋.船舶走锚预警系统[J]. 大连海事大学学报(自然学科版), 2005, 31(1): 29-32.

[7] BAI C, LI Y, SUN G. Study on the safety chain scope of LNG carriers anchoring in designated anchorage [C]// ICCSS. 2017 4th International Conference on Information, Cybernetics and Computational Social Systems (ICCSS). Dalian: [s.n.], 2017.

[8] 杨斌.三峡库区航道深水浮标受力及缆索长度计算探讨[J]. 水运工程, 2004(9): 39-43.

[9] 杨斌, 张学忠, 杨必荣.三峡水库 135 m 蓄水库区深水航标设置技术研究[J]. 水运工程, 2004(7): 63-66.

[10] 刘作飞, 蒋明贵, 闻光华.三峡库区深水航道航标配置分析[J]. 水道港口, 2016, 37(1): 67-70.

[11] 冯飞.基于 BP 神经网络的船型式浮标异动原因识别研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

[12] 朱滔.内河航标钢缆堆积物监测及报警的设计与实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.