

嘉陵江草街航电工程通航船模试验

蔡汝哲 郑 涛 蔡 创 陈 里

(重庆交通大学海河学院 重庆 400074)

摘要 根据船模试验最高安全限值的要求,分析船队在各试验航段的航行要素和操纵要素过程,研究草街航电工程上下游引航道及连接段的通航条件,论证工程布置的合理性和可行性,给出最佳航线和驾驭方式,并指出航行难点。通过船模试验提出了将上下游引航道由对称布置调整为非对称布置、口门区岸线内扩以及通航船队由一字形顶推方式优化为梭形顶推方式等措施,大大改善了枢纽通航条件,保证了船舶航行安全。

关键词 船模试验 安全限值 最大舵角 最大漂角
中图分类号 :U661.74 文献标识码 :A 文章编号 :1006-764X(2008)S1-0067-03

草街航电工程位于嘉陵江干流合川市草街镇境内,是合川至重庆自下而上渠化梯级开发的第二级,该工程是一座具有航运、发电、旅游等综合效益的水利水电枢纽工程。为了配合该工程的初步设计,论证枢纽上下游引航道及连接段的通航条件,该研究对相应航段进行了船模通航试验。船模概况见表 1。

表 1 船模概况

参数	船队尺度	船队载重量	船队静水航速
实船	121.2 m×21.5 m×2.6 m	2×1 000 t	14.4~16.2 km/h
船模	121.2 cm×21.5 cm×2.6 cm	2×1 000 g	4.0~4.5 m/s

注:试验船队为 1+2×1 000 t 左梭顶推船队,舵角为左 35°~右 35°无级比例操舵。

1 船模试验方案、航段及流量级

1.1 试验方案

进行船模试验的枢纽布置方案为水工模型试验推荐方案。

1.2 船模试验航段

草街航电工程船模试验的航段为:①船闸上游引航道口门区及连接段,试验段长约 950 m;②船闸下游引航道口门区及连接段,试验段长约 1 000 m。

1.3 船模试验流量级及枢纽工况

a. 船闸上游航道。① $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$,库区水位 $H=203\text{ m}$ 电站发电;② $Q=12\,000\text{ m}^3/\text{s}$,库区水位 $H=200\text{ m}$ 电站发电;③ $Q=15\,000\text{ m}^3/\text{s}$,库区水位 $H=200\text{ m}$ 电站发电;④ $Q=15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 枢纽全闸敞泄。

b. 船闸下游航道。① $Q=3\,054\text{ m}^3/\text{s}$,库区水位 $H=203\text{ m}$ 电站发电;② $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$,库区水位 $H=203\text{ m}$ 电站发电;③ $Q=12\,000\text{ m}^3/\text{s}$,库区水位 $H=200\text{ m}$ 电站发电;④ $Q=15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 枢纽全闸敞泄。

2 船模试验成果与分析

在试验中船队车挡(静水航速)均按照上水航行 4.5 m/s 即 16.2 km/h(已换算为实船值,下同)下水航行 4.0 m/s 即 14.4 km/h 设置,结果见表 2 和表 3^[1]。

表 2 上游航道船模通航试验成果

航向	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	H/m	最大舵角/ $(^\circ)$	最大漂角/ $(^\circ)$	车挡/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	航速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		航程/ m	航行时间/ min	平均航速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
						最大	最小			
上行	6 000	203	12.53	5.57	4.50	4.17	3.39	980	4.08	4.00(5 次平均)
	12 000	200	15.97	6.72	4.50	3.84	2.44	976	5.06	3.30(7 次平均)
	15 000	200	17.15	8.24	4.50	3.92	2.35	958	5.13	3.13(6 次平均)
	15 000	敞泄	21.08	14.59	4.50	4.09	1.68	1 028	6.09	2.85(8 次平均)
下行	6 000	203	14.72	10.31	4.00	4.79	3.74	938	3.32	4.72(5 次平均)
	12 000	200	17.49	14.08	4.00	5.71	5.20	968	2.83	5.69(7 次平均)
	15 000	200	18.91	15.40	4.00	6.10	5.12	955	2.69	6.03(6 次平均)
	15 000	敞泄	24.78	16.05	4.00	6.69	4.71	979	2.64	6.20(8 次平均)

注:所有数据均已换算为原型值,试验船队为 1+2×1 000 t。

表 3 下游航道船模通航试验成果

航向	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	H / m	最大舵角/ ($^\circ$)	最大漂角/ ($^\circ$)	车挡/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	航速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		航程/ m	航行时间/ min	平均航速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
						最大	最小			
上行	3 054	203	16.41	5.32	4.50	4.28	3.05	1078	4.67	3.86(5 次平均)
	6 000	203	14.82	4.97	4.50	4.30	3.31	1081	4.56	3.96(6 次平均)
	12 000	200	15.97	5.19	4.50	4.21	2.67	1079	5.03	3.58(5 次平均)
	15 000	敞泄	17.39	7.82	4.50	4.24	2.16	1089	5.67	3.23(5 次平均)
下行	3 054	203	14.89	8.76	4.00	3.68	2.15	1077	5.98	3.03(5 次平均)
	6 000	203	12.66	4.14	4.00	4.37	2.94	1086	4.74	3.82(6 次平均)
	12 000	200	13.30	4.54	4.00	4.89	2.91	1091	4.53	4.01(5 次平均)
	15 000	敞泄	14.54	5.92	4.00	6.05	2.96	1083	4.03	4.43(5 次平均)

注:所有数据均已换算为原型值,试验船队为 $1+2 \times 1\,000 \text{ t}$ 。

2.1 船闸上游引航道船模试验情况

2.1.1 船队出闸上行情况

试验结果表明,在草街航电工程船闸上游所进行的 4 种流量工况船模试验中,船队在 $Q=6\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H=203 \text{ m}$ 电站发电时舵角(12.53°)和漂角(5.57°)最小,最小对岸航速(3.39 m/s)和平均航速(4.00 m/s)最高,航行难度最小;从水流条件来看,此时流量小,且枢纽为蓄水发电状态,枢纽上游已成库区,流速小,通航条件较好。船队在 $Q=12\,000 \sim 15\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H=200 \text{ m}$ 时,虽然仍属于蓄水发电状态,但随流量加大,航道流速比降增加,船模试验的最大舵角、最大漂角均随之加大,最小航速和平均航速随之减小,说明航行难度随流量加大而增加。

在上游船模试验的 4 级流量工况中,船队在 $Q=15\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、枢纽敞泄时的舵角(21.08°)和漂角(14.59°)最大,最小对岸航速(1.68 m/s)和平均航速(2.85 m/s)都最低,航行难度最大;从水流条件来看,此时流量大,且枢纽敞泄,航道流速比降最大,通航条件最差。从表 2 中还可看到,在 $Q=6\,000 \sim 15\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H=200 \text{ m}$ 时^[2],船队出闸上行,最大舵角为 $12.53^\circ \sim 17.15^\circ$,明显小于船模试验舵角安全限值(25°),最小航速为 $2.35 \sim 3.39 \text{ m/s}$,明显优于船模试验最小航速安全限值(0.4 m/s)。只要操纵得当,船队可以较顺利地通过引航道和口门区驶向上游。试验的 4 级流量工况,船队通过上引航道上行时船队的航行要素与流量关系见图 1。

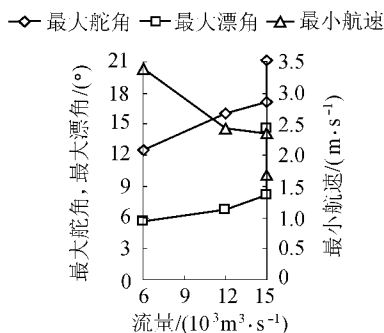


图 1 船队上行引航道时最大舵角、漂角、最小航速与流量的关系

在 $Q=15\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、枢纽敞泄时,最大舵角为 21.08° ,小于船模试验舵角安全限值(25°),最小航速为 1.68 m/s ,优于船模试验最低航速安全限值(0.4 m/s)。在谨慎驾驶的情况下,船队可以自航通过引航道和口门区驶向上游。

2.1.2 船队下行进闸情况

从图 2 中可以看出,船队下行进闸最大舵角为 $14.72^\circ \sim 24.78^\circ$,未超过船模试验舵角安全限值(25°)。但当 $Q=15\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、枢纽敞泄时,最大舵角已接近 25° ,操纵需谨慎。

船模试验成果表明,在草街枢纽船闸上游引航道,船队下行进闸,当 $Q \leq 15\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,在谨慎驾驶的情况下,进闸船队均可较顺利地下行通过连接段和口门区驶入引航道。

2.1.3 上游航道最佳航线、驾驭方式和航行难点

a. 船队出闸上行。在 $Q=6\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H=203 \text{ m}$ 、 $Q=12\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H=200 \text{ m}$ 和 $Q=15\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H=200 \text{ m}$ 时船队出闸,先沿引航道中部上行,在船队驶出堤头时要注意避免被堤头横流推向江心。船队驶出引航道后,调顺航向和船位,保持距左岸 $100 \sim 150 \text{ m}$ 上行。但在 $Q=15\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、枢纽敞泄时,船队驶出引航道后,应逐步过江到右岸上行,以避开口门连接段上游的高流速比降区。船队出闸上行的难点,一是船队驶出引航道时要注意用舵克服堤头附近的横流,二是大流量时口门上游 600 m 附近的高流速比降会使船队上行困难。

b. 船队下行进闸。下行进闸的船队,在船闸引航道上游与右岸保持 $80 \sim 120 \text{ m}$ 下行,在口门区上游适时操抱左边凸岸,逐渐向口门靠拢,船队驶入口门区后要及时操左舵克服横流压尾,船队才能顺利驶入引航道^[2]。

2.2 船闸下游引航道船模试验情况

2.2.1 船队上行进闸情况

从表 3 可以看到,草街航电工程船闸下游航道船队上行进闸,除 $Q=3\,054 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H=203 \text{ m}$ 、电站发电时由于浅底效应使舵角、漂角偏大,航速降低外,其余流量均是最大舵角、最大漂角随流量的加大而加

大,最小航速和平均航速随流量的加大而减小,航行时间则随流量的加大而变长。最大舵角和最大漂角加大是因为大流量时航道流速加大使船队操纵困难所致,航速降低,航行时间变长则是大流量时航线上纵向流速加大使船队向上航行变得更困难造成的。

试验结果还表明,在草街航电工程船闸下游航道,当 $Q = 3\,054\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H = 203\text{ m}$ 、 $Q = 6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H = 203\text{ m}$ 、 $Q = 12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H = 200\text{ m}$ 和 $Q = 15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、枢纽敞泄时,船队上行进闸,最大舵角为 $16.41^\circ \sim 17.39^\circ$,均未超过船模试验舵角安全限值(25°);最小航速为 $2.16 \sim 3.31\text{ m/s}$,优于船模试验最低航速安全限值(0.4 m/s)。只要操纵得当,船队可以较顺利地通过连接段和口门区上行驶入引航道。

2.2.2 船队下行出闸情况

从试验结果可看到,在草街航电工程船闸下游航道,船队下行出闸,除 $Q = 3\,054\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H = 203\text{ m}$ 时舵角、漂角偏大外(这是由于小流量时航槽较浅,浅底效应所致),其余均是最大舵角、最大漂角、最大航速和平均航速随流量的加大而加大。这是因为流量越大,航道的纵横向流速也就越大,船队下行的对岸航速也越大,使操纵变得困难。在草街航电工程船闸下游航道,船队下行出闸难度也是随流量的加大而加大。在 $Q = 3\,054\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H = 203\text{ m}$ 、 $Q = 6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H = 203\text{ m}$ 、 $Q = 12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H = 200\text{ m}$ 和 $Q = 15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、枢纽敞泄时,船队下行出闸最大舵角为 $12.66^\circ \sim 14.89^\circ$,远未超过船模试验舵角安全限值(25°)。只要操纵得当,船队可以由引航道通过口门区和连接段顺利下行。

2.2.3 下游航道最佳航线和驾驭方式

a. 船队上行进闸。上行进闸船队应沿左岸保持

(上接第 47 页)

差在一天洪峰流量中体现,由于是山区性河流,洪水暴涨暴落,高、中水推求流量时间很短。各时段洪峰流量随时段的增长相对误差逐渐减小,月、年径流相对误差均小于 3%。由此可见,用综合线推算的流量资料成果能充分满足水利工程建设和国民经济发展的需要。

表 4 为 2005 年、2006 年和 2007 年所测中水水位级流量资料与综合线推算流量的比较情况,相对误差符合《水文巡测规范》要求。

表 4 2005~2007 年实测流量与综合线推算流量误差统计

年份	水位/m	水位级	$Q_{\text{实}}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_{\text{推}}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	误差/%
2005	3.50	中水	270	260	3.7
2006	3.92	中水	367	371	1.1
2007	4.14	中水	405	404	0.2

80~100 m 岸距上行,在下引航道下游 100~200 m 附近逐渐向引航道靠拢,在口门附近要注意用舵克服此处回流对航线的影响,调顺航向和船位,驶入引航道。

b. 船队出闸下行。下行出闸船队应首先沿引航道中部下行,在接近口门时适当操右舵,船队驶出引航道时要向右扬头,以克服江心水流压船队右舷,保持船队沿左岸 100~150 m 下行。

3 结 语

a. 上引航道堤头外的导航墩减小了船队进出闸的回旋余地,对进出闸航行船队的安全均有不利影响,建议取消。船队的航线和驾驶方式以及枢纽的运行方式对航行安全都有很大影响,建议枢纽建成后,结合船模试验结果和实船试航的情况设置航标,制订安全运行方式,确保过往船只的安全^[4]。

b. 通过船模试验提出的将上下游引航道由对称布置调整为非对称布置、口门区岸线内扩以及通航船队由一字形顶推方式优化为梭形顶推方式等措施,大大改善了枢纽通航条件,保证了船舶航行安全。

参考文献:

[1] 蔡汝哲.三峡工程船闸和升船机上游航道船模试验研究.三峡水利枢纽工程应用基础研究.第二卷[M].北京:地质出版社,1996.
[2] 蔡创.长江渝沪段滩险整治小尺度船模通航试验研究[J].中国港湾建设,2005(4):29-32.
[3] 蔡汝哲.嘉陵江草街航电枢纽船模通航试验研究报告[R].重庆:西南水运工程科学研究所,2004.
[4] 苏兴翹.船舶操纵性[M].北京:国防工业出版社,1985.
(收稿日期 2008-05-16 编辑:方宇彤)

3 结 语

通过以上分析验证,月潭水文站水位在 3.0~9.40 m 时可试行停 5 年测 1 年的间测方案。停测期间,用综合水位流量关系线推算流量,并每年用高精度方案检测流量 3 次以上,检测点均匀分布在高、中、低水位。恢复测流年份,需进行 15 次以上的测流。低水(3.08 m 以下)因水草影响及控制变化,每年应正常测流,9.40 m 以上水位需进行正常测流。

参考文献:

[1] SL195—97 水文巡测规范[S].
[2] SL247—1999 水文资料整编规范[S].
(收稿日期 2007-09-07 编辑:方宇彤)