

# 凌津滩船闸输水廊道内动水压力及其脉动特性

冯伯林<sup>1</sup>, 孙小鹏<sup>2</sup>, 李桃凡<sup>3</sup>, 张泽润<sup>3</sup>, 易 伟<sup>3</sup>, 李泽源<sup>3</sup>

(1. 河海大学港口航道及海岸工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098;  
3. 中国水利水电第八工程局, 湖南 长沙 410000)

**摘要** 对中水头单级短廊道输水船闸——凌津滩船闸进行原型观测, 资料分析表明: 输水廊道工作阀门启门过程中, 阀门下游廊道内动水压力的脉动普遍较大, 阀门小开度时阀门门后及弯段内侧部位可出现瞬时负压, 并于阀门门后廊道的上部出现很大的负压脉冲, 负压脉冲持续时间不长, 频谱分析未发现水流空化的迹象, 动水压力的脉动属非空化流低频脉动性质。  
**关键词** 船闸; 短廊道输水; 动水压力; 脉动特性  
**中图分类号** :TU45      **文献标识码** :A      **文章编号** :1000-198X(2001)01-0111-04

凌津滩水电站位于湖南省桃源县境的沅水干流上, 船闸布置在枢纽右岸, 为单线单级船闸, 闸室有效尺寸: 120 m × 12 m × 2.5 m (长 × 宽 × 槛上水深), 设计水头 13.2 m。船闸输水系统为短廊道集中输水型式。在上闸首, 输水廊道左、右对称布置, 进水口及阀门段断面尺寸均为 2 m × 2 m (宽 × 高), 消能段位于上闸首工作闸门下游, 用全断面分支倒口出流方式消能, 消能后水体直接进入闸室停泊段, 未设集中输水型船闸常规必设的镇静段, 这是该船闸设计上的一个特点。上闸首工作门为下沉式平板钢闸门, 上闸首输水廊道工作阀门为上提式平板门, 下闸首设人字工作闸门, 下闸首左、右泄水廊道对称布置, 均设平板工作阀门。

凌津滩船闸于 1999 年元旦正式通航, 正式通航前夕, 即 1998 年 12 月底进行了船闸原型水力学观测, 以便为工程竣工验收和安全鉴定提供科学依据。观测取得的资料和成果有: 闸室充、泄水水力特性, 闸室船只停泊条件, 闸室充、泄水时输水廊道内的动水压力及其脉动特性, 闸室充、泄水时输水廊道内流动噪声特性等。

限于篇幅, 本文仅对闸室充水时输水廊道内的动水压力及其脉动特性进行分析和介绍, 有关输水廊道内流动噪声的分析将另文介绍。

## 1 观测方法及观测条件

输水廊道壁面上动水压力及其脉动的观测采用电测法, 数据采集分析系统的仪器配置如下: 动态压力传感器 FTSV 为电阻式、标准输出型, 共 18 只, 均埋设安装于上闸首右输水廊道内 (图 1), 这次观测取得了  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_5$ 、 $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 、 $P_{13}$ 、 $P_{15}$ 、 $P_{16}$ 、 $P_7$ 、 $P_8$  及  $P_9$  共计 11 个测点的资料。

由于船闸闸室充、泄水属非恒定流动, 各测点动水压力数据为非平稳过程数据, 故采用分时段采集分析

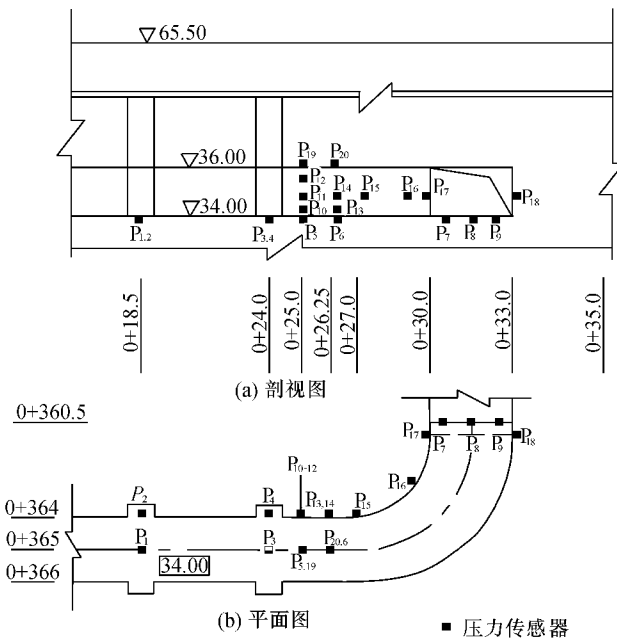


图 1 输水廊道内动水压力测点布置(1:100)  
Fig.1 Hydrodynamic pressure observation points

和大容量连续采集、分时段分析的方法.

船闸在无船只通行的情况下按正常运行速度共进行了四次充、泄水过程的运行试验. 试验观测时船闸最大工作水头 11.93 m(上游库水位 50.13 m,下游水位 38.20 m).

闸室充水时,上闸首两侧输水廊道内工作阀门按正常速度同步匀速开启(阀门在动水中开启,开门时间  $T_V$  约 2 min),至全开度后继续充水至闸室水位与上游库水位齐平,充水总历时  $T$  约 9 min.

闸室泄水时,下闸首两侧泄水廊道工作阀门按正常速度同步匀速开启,  $T_V$  约 5 min,阀门全开后继续泄水,直至闸室水位与下游水位齐平,泄水总历时  $T$  约 9 min.

## 2 动水压力及其脉动特性

表 1 为闸室充水各时段中输水廊道各部位部分测点的动水压力时均值和脉动特征值. 测点相应各时段脉动压力样本及其功率谱密度举例如图 2.

表 1 闸室充水过程各时段测点动水压力时均值及脉动强度

| Table 1 Time-averaged value and fluctuation value of some hydrodynamic pressure samples in lock filling process |     |           |       |       |           |       |       |           |       |       |           |       | kPa   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| 测次                                                                                                              | $n$ | $P_{12}$  |       |       | $P_2$     |       |       | $P_5$     |       |       | $P_{16}$  |       |       |
|                                                                                                                 |     | $\bar{p}$ | $p_r$ | $p_m$ | $\bar{p}$ | $p_r$ | $p_m$ | $\bar{p}$ | $p_r$ | $p_m$ | $\bar{p}$ | $p_r$ | $p_m$ |
| 0                                                                                                               | 0   | 32.34     | 0.62  | 2.13  | 158.10    | 0.63  | 3.67  | 47.04     | 0.64  | 2.76  | 37.24     | 0.60  | 1.57  |
| 1-1                                                                                                             | 0.1 | 29.89     | 3.25  | 12.18 | 152.90    | 1.19  | 2.81  | 39.98     | 1.97  | 5.53  | 31.16     | 3.05  | 10.71 |
| 1-2                                                                                                             | 0.2 | 27.83     | 15.25 | 负脉冲   | 145.10    | 1.45  | 4.68  | 31.26     | 7.81  | 23.88 | 13.23     | 4.42  | 15.59 |
| 1-3                                                                                                             | 0.3 | 43.02     | 4.99  | 17.39 | 137.40    | 1.41  | 4.68  | 35.08     | 4.93  | 23.88 | 23.62     | 4.48  | 18.30 |
| 1-4                                                                                                             | 0.4 | 46.06     | 5.70  | 18.27 | 127.10    | 2.06  | 7.48  | 29.01     | 6.96  | 14.59 | 21.95     | 14.16 | 47.76 |
| 1-5                                                                                                             | 0.5 | 61.94     | 3.04  | 10.96 | 117.20    | 1.47  | 5.61  | 52.23     | 5.09  | 25.60 | 45.37     | 11.65 | 39.04 |
| 1-6                                                                                                             | 0.6 | 73.01     | 3.74  | 11.88 | 103.40    | 2.24  | 7.79  | 63.31     | 4.26  | 20.45 | 66.54     | 4.85  | 21.45 |
| 1-7                                                                                                             | 0.7 | 100.25    | 2.33  | 7.31  | 91.80     | 2.27  | 18.71 | 102.31    | 6.25  | 19.31 | 102.12    | 3.46  | 11.07 |
| 1-8                                                                                                             | 0.8 | 113.68    | 1.68  | 5.18  | 93.50     | 2.63  | 10.29 | 129.26    | 1.99  | 7.61  | 120.34    | 1.90  | 7.26  |
| 1-9                                                                                                             | 0.9 | 115.93    | 1.51  | 5.48  | 97.20     | 2.46  | 9.04  | 131.03    | 1.92  | 6.22  | 122.50    | 1.70  | 5.19  |
| 1-10                                                                                                            | 1.0 | 120.34    | 1.39  | 4.26  | 100.50    | 2.00  | 8.10  | 135.73    | 1.69  | 6.91  | 126.71    | 1.57  | 5.19  |
| 1-11                                                                                                            | 1.0 | 140.83    | 0.98  | 3.35  | 120.10    | 1.44  | 5.92  | 156.11    | 1.37  | 4.49  | 147.00    | 1.17  | 4.83  |
| 1-13                                                                                                            | 1.0 | 143.28    | 0.66  | 2.13  | 156.80    | 0.59  | 1.87  | 158.17    | 0.83  | 2.76  | 148.37    | 0.70  | 2.41  |

注:  $n$  为阀门相对开度,测次 0 为充水启门前,测次 1-1 在充水启门开始时,测次 1-9 于充水启门完毕时,  $t_v = 2\text{ min}$ ;测次 1-13 为闸室充水完毕之时,  $T = 9\text{ min}$ ;  $\bar{p}$ ,  $p_r$  和  $p_m$  分别为动水压力的每测次时均值、均方根值和最大值,每测次历时 2 s.

### 2.1 动水压力的时均特性

由表 1 可见,闸室充水过程中输水廊道内各测点动水压力时均值随充水进程而变化,在整个充水过程中各测点各测次动水压力的时均值均为正值. 位于输水阀门下游各测点的时均动水压力一般于充水之初时段有下降,此后则随闸室水位的升高而提高.

在紧靠输水廊道工作阀门下游的廊道上部、底部及廊道弯段内侧部位(如测点  $P_{12}$ ,  $P_5$ ,  $P_{16}$  等),其时均动水压力于阀门小开度时段( $n$  为 0.1~0.2 时)较启门前有明显减小,由于这时动水压力的脉动也大,故这些部位的某些测点(如  $P_9$ ,  $P_{12}$ )此时易出现瞬时负压.

在输水廊道工作阀门的上游段内(如  $P_1$ ,  $P_2$ )时均动水压力于廊道内流量最大的时段出现最小值.

### 2.2 动水压力的脉动强度及其分布特征

阀门开启过程中输水廊道内的流态比较复杂,除阀门上游段廊道及廊道弯段出口处测点(如  $P_1$ ,  $P_2$  及  $P_7$ ,  $P_8$ )外的大多数测点,尤其是紧靠阀门下游及弯段内侧流动复杂处的测点(如  $P_{12}$ ,  $P_{11}$ ,  $P_{15}$ ,  $P_{16}$  等),其动水压力的脉动强度均较大,脉动的平均强度(即脉动均方根值)约达测点( $P_{12}$ ,  $P_{15}$ )处静水头的 10.8%,脉动的最大值可达测点( $P_{15}$ ,  $P_{13}$ ,  $P_{12}$ )处静水头的 40%左右.

输水廊道内动水压力脉动强度的空间分布特征是:紧靠阀门下游的廊道上部及廊道弯段内侧紊动大流态复杂的部位(如  $P_{12}$  和  $P_{15}$ ,  $P_{16}$ )动水压力脉动强度最大,阀门下射流区及弯段出口部位(如  $P_5$ ,  $P_{11}$  及  $P_9$ ,  $P_7$  等)脉动强度次之,阀门上游段( $P_1$ ,  $P_2$ )的脉动强度最小,  $P_2$  处因受检修门槽影响,故该处的脉动强度略大于  $P_1$  处.

输水廊道内动水压力脉动强度的时间分布特征是:在充水的头 2 min 即阀门开启过程中脉动强度大,阀门全开以后继续充水时脉动迅速减小,直至充水结束,脉动基本消失,动水压力脉动强度的最大值一般出现于阀门小开度(相对开度 0.1~0.2)或中等开度(相对开度 0.4~0.5)时(表 1).

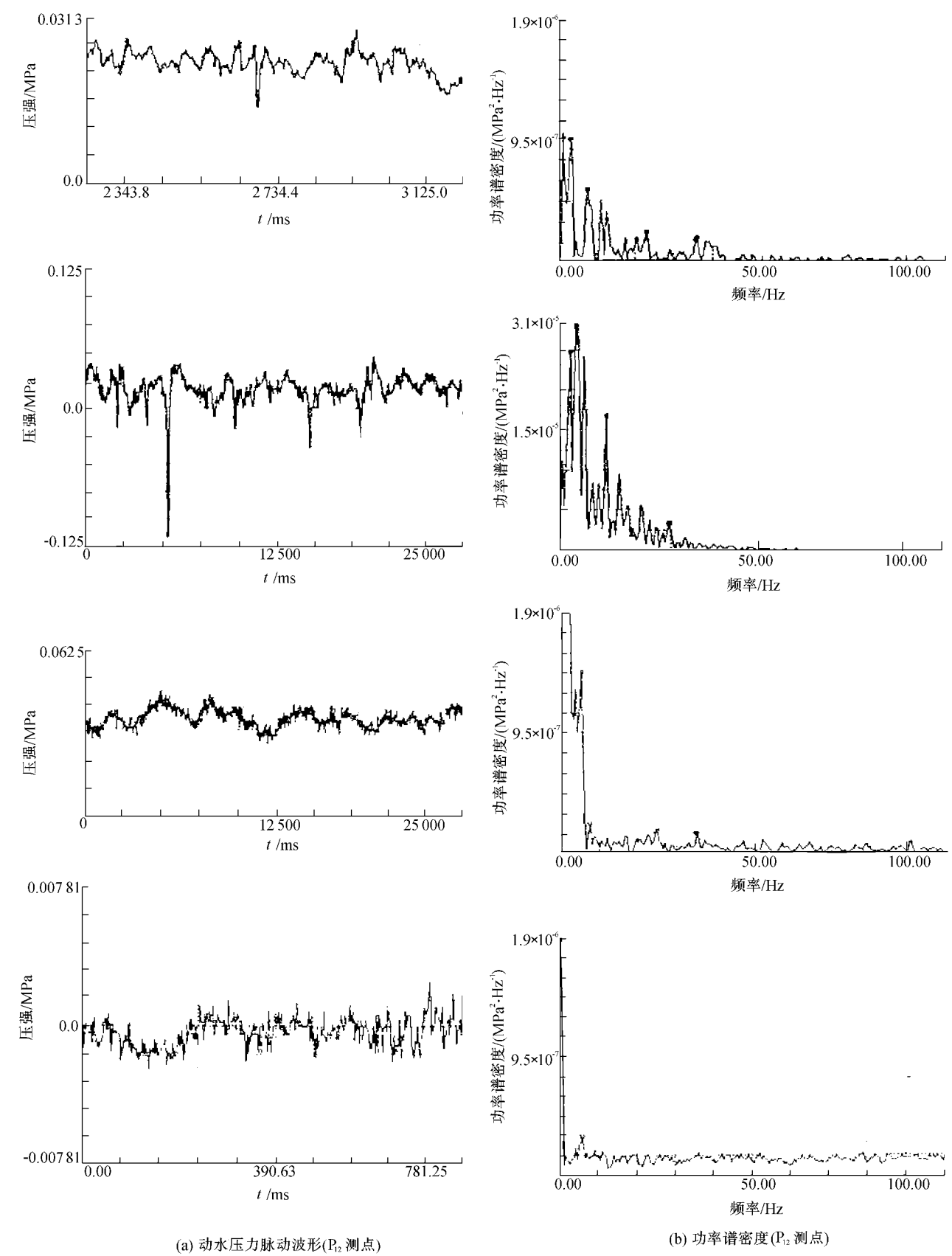


图 2 测点动水压力脉动波形和功率谱密度

Fig.2 Oscillogram and power spectral density of a hydrodynamic pressure sample

阀门小开度时(相对开度约 0.15),测点  $P_{12}$  处出现大的瞬时压力负脉冲(图 2),这可能与输水廊道工作阀门的启门速度较快,并与测点  $P_{12}$  所处的位置正好在门下射流区的上部有关。当阀门迅速开启、门下水流突然加速时,门下射流上部的水体受到突然拉动,邻近水体受惯性影响不能立即补充,迫使  $P_{12}$  处水体受拉出现大的压力负脉冲。负压脉冲持续时间约 40 ms,该负压脉冲低于  $-3\text{ m}$  水柱部分持续时间约 24 ms。若适当放慢启门速度或采取适当的变速启门方式,可能有助于减小瞬时压力负脉冲的幅值,但也有可能延长负压脉冲的持续时间,从而造成不利影响,故宜谨慎处理。

### 2.3 动水压力脉动的频率特性

闸室充水过程中由于水头、流量、阀门开度的变化和流态不同,不同测点同一时段或同一测点不同时段内动水压力脉动的频率结构(如功率谱密度)是不同的(图 2)。功率谱密度分析表明,各测点动水压力脉动的频率范围大多在 50 Hz 以下,脉动的能量主要分布在 0~30 Hz 的低频区域,输水廊道内动水压力的脉动主要由 30 Hz 以下低频分量构成,无能量大、频带宽的高频成分。

测点  $P_{12}$  处于阀门小开度时虽出现大的负压脉冲,但持续时间不长,其压力脉动的频率特性在该时段并未发现异常(图 2),与其它测点一样也为低频脉动性质,未见明显空化迹象。

## 3 结 语

凌津滩船闸是中水头单级短廊道输水船闸,输水廊道工作阀门为平板提升门,实际运行时启门速度较快。本文根据原型观测资料分析所得输水廊道内的动水压力及其脉动规律,在水力设计较好的同类船闸中具有代表性,可供进一步研究、设计同类船闸和船闸的运行操作借鉴或参考。

凌津滩船闸在闸室充水输水廊道工作阀门启门过程中,阀门下游廊道内动水压力的脉动普遍较大,某些部位位于阀门小开度时出现时均压力下降和大的负压脉冲,但频谱分析表明并未出现水流空化的明显迹象,输水廊道内各测点的动水压力脉动均为非空化流低频脉动性质。

### 参考文献:

- [1] 蔡志长.渠化工程学[M].北京:人民交通出版社,1988.84~89.
- [2] 中华人民共和国交通部.JTJ261—266 船闸设计规范[S].北京:人民交通出版社,1987.71~75.
- [3] 贝达特 J S,皮尔索 A G 著.随机数据分析方法[M].凌福根译.北京:国防工业出版社,1976.372~399.

## Fluctuation Characteristics of Flow Pressure in Culvert Filling at Lingjintan Ship Lock

FENG Bo-ling<sup>1</sup>, SUN Xiao-peng<sup>2</sup>, LI Tao-fan<sup>3</sup>, ZHANG Ze-run<sup>3</sup>, YI Wei<sup>3</sup>, LI Ze-yuan<sup>3</sup>

(1. College of Harbor, Waterway and Coastal Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

3. Eighth Construction Bureau of China Water Conservancy & Hydropower, Changsha 410000, China)

**Abstract** The Lingjintan ship lock is a single-lift and moderate head ship lock with a short culvert conveyance system. The analysis of the observational data in the prototype shows the fluctuation of flow pressure in the downstream culvert of the lock paddle in the process of lock paddle opening for lock filling is generally large than that in the upstream culvert; at small opening there may be not only negative instantaneous pressure near the downstream side of the paddle and inside the curved section but also large negative pressure pulse in the upper part of the culvert near the downstream side of the paddle, but the duration of negative pressure pulse is not long. No signs of cavitation in the flow are found from the analysis of power spectral density. In lock filling the fluctuation of flow pressure is regarded as low frequency fluctuation of non-cavitation flow.

**Key words** ship lock; short culvert conveyance system; flow pressure; fluctuation characteristics