

大型船坞排水系统物理模型试验及分析

巩明鑫, 霍梦佳, 王国亮, 吴宏雷

(中国电建集团山东电力建设有限公司, 山东 济南 250001)

摘要: 根据相关理论分析成果, 借助于大学科研平台建立了船坞排水系统的物理模型, 针对不同工况进行了多种模型试验, 得到了船坞、泵房、流道及泵管中的流型分布, 分析了各工况下的排水系统水力性能, 结果表明防涡流装置可以有效避免涡流的产生, 干船坞泵房的设计满足相关水力要求。本文研究思路及试验方法对国内外的工程有一定的指导意义。

关键词: 物理模型试验; 泵房; 船坞; 涡流

中图分类号: TK71+2

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2021) 08—0111—03

沙特国王港项目是在建的世界上规模最大的“超级船厂”, 项目将新建三座大型船坞。其中 2 号干船坞基本尺寸为: 坞长 374m, 坞宽 90m, 坞底高程 -10.8m。该船坞的泵房由三个独立的泵舱组成, 容纳三台立式混流泵 (EBARA2000VZM), 单台额定容量达 37000m³/h。通常情况下, 三台泵的总额定排水量约为 111000 m³/h。

为了预测排水管路及泵入口处的流型, 本文建立了干船坞排水系统的物理模型 (本文仅研究 2 号船坞 DD2), 通过试验观察干船坞中的自由表面涡流以及泵进水口的流动状态, 检查泵运行时在流道入口处可观察到旋涡和气泡夹带的所有可能的工作水位, 研究模型在几种定义的工况下的水力性能, 试验将反映干船坞泵房的设计是否满足 ANSI/HI 9.8-2012 的水力要求。

1 模型设计

建立的模型包括船坞、船坞底部排水流道、泵房和泵管等, 通过水箱和循环泵实现水循环。模型中泵房的设计均为封闭式结构, 泵房内没有自由水表面。坞底流道入口横截面严格按照实际干船坞建模, 保持入口的形状和大小, 水位和测试流量, 在进入泵舱之前水流可以完成很好地发育。船坞及泵房模型实物图如图 1 所示。

船坞试验旨在检查干船坞模型在各种工作水位下的流量情况, 观察并记录船坞中的水位和水面波动, 并在水位较低时检查坞底流道入口处可能出现的旋涡和空气夹带^[1,2]。

泵房试验旨在评估泵喉处轴向速度分布的均匀性, 研究在试验过程中, 泵舱和泵管中是否产生旋涡, 并通过染料运动观察泵舱中水流稳定性^[3,4]。



图 1 物理模型总布置图

1.1 边界控制和流量控制

模型的流量通过循环泵控制, 并由校准的涡轮流量计测量。每个泵管中安装一个阀门以控制其开闭。干船坞模型通过缓冲壁分为两部分, 缓冲壁低于船坞侧壁, 但高于最大测试水位。水流首先进入缓冲部分, 然后经由缓冲壁流入船坞模型。根据经验, 进水不会在水面产生强烈的波动。

1.2 模型比例

物理模型比例设置为 1:16。所有试验都将在相应实际条件对应的 Froude 数下进行^[5,6]。

1.3 观察和测试方法

为便于观测, 从干船坞到泵房的流动采用染料进行可视化, 在泵喇叭口下方设置皮托管, 皮托管可以 45° 径向转动以测量多个点的速度分布。泵吸入管中设置旋度计, 以检测管路中水流所具有的旋转角速度。旋度计装有 4 片平直叶片组成的螺旋桨, 叶片末端到末端的直径为管道直径的 75%, 在流动方向上的长度为管道直径的 60%, 旋度计的螺旋桨在轴向速度的作用下不会转动, 但可在切向流速的作用下旋转。

雷诺数:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = 6 \times 10^4 (Q_p = 29100 \text{ m}^3/\text{h}) \sim 9.96 \times 10^4 (Q_p = 43250 \text{ m}^3/\text{h}) \quad (1)$$

韦伯数:

$$We = \frac{\rho v^2 d}{\sigma} = 300 (Q_p = 29100 \text{ m}^3/\text{h}) \sim 905 (Q_p = 43250 \text{ m}^3/\text{h}) \quad (2)$$

上式中, ρ 表示水密度; v 表示泵吸入口的水流速度; d 表示泵吸入口的直径; μ 表示水的粘度系数; σ 表示水的表面张力系数。

水利标准协会 (Hydraulic Institute Standards 2012, 简称为 HI) 规定的时间平均旋流角表示的预旋强度应小于 5 度, 旋流角定义如式 (3)。

$$\text{旋流角: } \theta = \tan^{-1}(\pi d n / u) \quad (3)$$

上式中, d 表示旋度计处的管径; μ 表示旋度计的平均轴向速度; n 表示旋度计的转速 / 秒。

2 设计方案

2.1 物理模型方案

针对 2 号船坞泵房物理模型, 编制了试验方案如下表 2 所示:

表 2 泵物理模型试验方案 (泵编号 A,B,C)

编号	方案	水面高度	A 泵流量 m ³ /hr	B 泵流量 m ³ /hr	C 泵流量 m ³ /hr
S1	最大水面高度 (泵 A,B,C 工作)	857	42.2	43.1	43.2
S2	中等水面高度 (泵 A,B,C 工作)	278	33.3	33	33.2
S3	较低水面高度 (泵 A,B,C 工作)	112.5	29.8	28.3	28.4
S4	低水面高度 (泵 A 工作)	62.5	28.42	0	0
S5	低水面高度 (泵 A,B,C 工作)	68.75	31.3	30.6	30.7
S6	低水面高度 (泵 A、C 工作)	43.75	30.8	0	29.9
S7	超低水面高度 (泵 A 工作)	18.75	30.3	0	0
S8	超低水面高度 (泵 B 工作)	18.75	0	29.5	0
S9	低水面高度 (泵 A 工作)	50	30.5	0	0
高 Froude 数试验					
S10	模型比例效应试验	857	63.3	0	0
S11	模型比例效应试验	857	0	64.7	0
S12	模型比例效应试验	857	0	0	64.8

2.2 验收标准

除了选择用于构建模型的合适比例之外, 还需要制定预设的验收标准以评估模型性能。验收标准采用 HI 制定的标准:

(1) HI 规定, 进入泵的任何旋涡强度都必须小于染料中心旋涡强度, 不能出现水下空气核心的旋涡, 水面染料核心的旋涡和水下染料核心的旋涡出现的时间不能超过试验总时间的 10%;

(2) 泵叶轮位置处的旋流角不得超过 5° ;

(3) 泵喉处的时间平均速度不应偏离横截面平均速度的 10% ;

(4) 根据涡流的严重程度将其分为 6 个等级, 其中 1 级最轻, 6 级最严重。前四级比较常见, 一般不会对泵产生影响; 5 级和 6 级强度的旋涡会将空气吸入泵中, 从而对泵体产生严重破坏。根据 HI 规定, 可接受的涡流等级不应大于 1 级。

3 结果分析

3.1 船坞中的流动状态

船坞试验旨在检查干船坞模型在各种工作水位下的流量条件。当水面处于低水位时, 记录下坞底排水流道入口处可能出现的旋涡和空气夹带。在试验过程中, 干船坞中的水位不断降低。

在每种水位条件下, 观察船坞和排水流道入口处的水流状态。下图 2~3 显示了几个重要的模型场景。



图 2 S2 工况下的船坞水面状态



图 3 S7 工况下的船坞水面状态

图 2~3 表明, 在所有试验水位下, 船坞内水面波动均很小, 最大波动幅度约为 5mm。当水面处于低水位时, 排水流道入口出现涡流但未发现空气夹带。当干船坞中水位极低时, 流道内无法完全充满水。

3.2 泵房中的流动状态

泵房试验旨在测量泵喉处的轴向速度分布, 并检查在所有试验过程中, 泵舱和泵管中是否发生涡流。在试验中, 使用染料观察从排水流道到泵舱, 直至泵管中的水流情况, 使用安装在泵管中的旋度计测量泵管中的旋流角。主要流动状态如图 4~5 所示。

由图 4、图 5 可以看出, 从排水流道到泵舱, 再到泵管的流动是均匀、稳定的, 未观察到强烈的回流和旋涡; 在防涡流装置的作用下, 在泵喇叭口下方未观察到大于 ANSI / HI 9.8-2012 标准中定义的类型 2 的内部涡流。



图4 S1工况下泵舱C后壁的流动状态



图5 S11工况下泵舱B右侧侧壁的流动状态

泵房试验结果如下表3所示:

表3 泵房试验结果汇总

编号	泵	底部涡流	侧壁涡流	旋流角	泵喉处速度分布	流型
1	A	0-1	0	0.31°	2.1	稳定
	B	0	0	0.4°	3.3	稳定
	C	0	0	0.9°	2.1	稳定
2	A	0-1	0	0.78°	1.8	稳定
	B	0	0	1.84°	4.4	稳定
	C	0-1	0	1.04°	5	稳定
3	A	0	0	0.73°	4.7	稳定
	B	0-1	0	2.15°	3.4	稳定
	C	0-1	0	3.06°	2.8	稳定
4	A	0	0	1.22°	3	稳定
5	A	0-1	0	1.67°	2.3	稳定
	B	0-1	0	1.99°	2.5	稳定
	C	0	0	2.83°	4.8	稳定
6	A	0-1	0	0.56°	3.3	稳定
	C	0-1	0	2.03°	2.5	稳定
7	A	0	0	0.86°	2.3	稳定
8	B	0	0	1.18°	1.9	稳定
9	A	9	0	0.85°	2.4	稳定
10	A	0-1	0	0.48°	1.4	稳定
11	B	0-1	0	0.34°	1.4	稳定
12	C	0-1	0	0.6°	1.3	稳定

由上表可以看出:泵管中的预旋流很小,在所有试验结果中,计算的旋流角均未超过ANSI/HI9.8-2012标准中定义的阈值(5°)。泵喉部的轴向流速分布均匀,

最大偏差不大于5%,完全符合标准的要求。

4 结论

本文建立了船坞排水系统物理模型,根据试验方案研究了多种工况下船坞及泵房中的流型及水面稳定性,得到了以下结论:

(1)在船坞试验中,对于所有试验水位,干船坞模型中水面均保持稳定,未出现较明显的水流波动;在坞底排水流道入口附近产生的轻微涡流中,未发现空气卷入流道中,即涡流等级小于1;

(2)在泵房试验中,从排水流道到泵管的流量分布是均匀、稳定的;在防涡流装置的作用下,对于大多数试验工况,泵喇叭口下方未观察到内部涡流;泵管内的流型通常是均匀稳定的,未观察到明显的涡流。

干船坞排水系统物理模型试验是检验和优化泵装置、排水流道等水力性能的重要手段。本文通过对沙特国王港项目的干船坞及泵房物理模型试验分析,得到了各操作工况下排水系统的流型及速度分布等,验证了防涡流装置的有效性及其必要性。本文采用的模型设置、研究方法思路将对国内外的工程有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 陈方旻,沈颖,白玉川.水泵站进水池物理模型试验研究[J].水资源与水工程学报,2013(02):155-159.
- [2] 王晏,张硕,王如华.数值模拟和物理模型试验交互优化节地型输水泵站[J].中国给水排水,2014,030(013):54-57.
- [3] 葛强,陈松山,施伟,等.船坞泵站泵装置模型优化试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(003):327-330.
- [4] 李礼.火电厂循环水泵站进水流道模型试验与三维数值模拟[D].西北农林科技大学,2011.
- [5] 彭大田.船坞排水泵站进水系统水力特性研究[D].扬州大学,2007.
- [6] 吉红香,邱静,林美兰,等.某核电厂一期工程循环水泵房进水流道物理模型试验研究[J].广东水利水电,2010(10):20-23.