

双向进水流道水力特性模型试验研究

傅宗甫¹, 严忠民¹, 叶舜涛², 王瑟澜²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 苏州河综合整治建设有限公司, 上海 200000)

摘要:分析模型的相似准则及其主要作用力, 考虑工况相似要求, 提出泵站进出水池和流道内分别按不同的相似准则进行设计的方法。结合彭越浦泵站水工模型试验, 对双向流道进口前漩涡及流道内的涡带、喇叭口附近流速分布、水泵起动及稳定运行过程中流道内的脉动压力和进出水流道的水头损失等水力特性进行全面的观测和分析, 提出在流道内设置垂直隔板及导流锥加隔板两种消涡的工程措施。

关键词:双向进水流道; 水力特性; 模型试验; 涡带; 淹没深度; 脉动压力; 水头损失

中图分类号:TV134

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2001)05-0028-03

双向进水流道泵站具有正反向抽水, 节省一系列水工建筑物, 实现闸站结合, 排灌结合, 且占地少, 投资省, 管理方便等优点, 因此在泵站工程中, 双向进水流道泵站具有重要的地位。

原形观测和模型试验表明, 双向进水流道泵站运行时, 一端进水, 另一端封闭, 封闭端形成一个死水区。死水区的水平和垂直方向都有回流产生, 有时在水泵喇叭口下诱发涡带, 涡带进入水泵叶轮后, 容易使机组产生振动, 严重时会对水泵造成破坏而不能运行。另外, 涡带的形成还会降低水泵的效率, 浪费能源。因此, 开展对双向进水流道水力特性的研究, 具有重要意义。

世界上一些发达国家都较早地开展了对进水流道水力特性的研究, 国内的众多学者对进水流道的水力特性也进行过不少研究, 他们大多试图采用数值方法对流动进行模拟。由于数值方法在理论上还有局限性, 目前仍然主要通过模型试验来进行研究。本文结合彭越浦泵站模型试验对相似准则及流道内的水力特性进行了全面的分析研究, 较好地解决了双向流道泵站模型试验的相似准则以及流道内的水力学问题。

1 模型相似理论分析

模型的几何比尺由原型与模型转轮直径的比值得 $\lambda_L = 4.25$ 。根据液体在叶轮中的非恒定运动方程式, 采用类比法可以得到四个相似准则, 即重力、惯性力、压力、及动态相似准则^[1]。水泵稳定工作工况,

动态相似准则不起作用。流道内主要是惯性力在起作用, 模型按惯性力相似准则并考虑到工况相似要求, 进行等扬程设计, 则

$$\begin{cases} (nD)^2/H = \text{idem} \\ \lambda_H = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 为水泵转速; D 为转轮直径; H 为扬程; λ_H 为扬程比尺。

由式(1)可推导出转速、流量和流速比尺分别为

$$\lambda_n = \lambda_H^2 / \lambda_D \quad (2)$$

$$\lambda_Q = \lambda_L^2 \lambda_H^{1/2} \quad (3)$$

$$\lambda_v = \lambda_Q / \lambda_L^2 = 1 \quad (4)$$

进出水池起主要作用的力是惯性力和重力。模型需同时满足惯性力相似和重力相似, 即

$$(nD_1)^2/H_1 = \text{idem} \quad (5)$$

$$v/\sqrt{gh_s} = \text{idem} \quad (6)$$

式中: H_1 为进出水池的水深; D_1 为流道高度; h_s 为流道进口上缘至自由水面的淹没深度; v 为进出水池的水流速度。

由式(5)和(6)得

$$\lambda_v = \lambda_{h_s}^{1/2} = \frac{\lambda_Q}{\lambda_B \lambda_{h_s}} = \lambda_L \lambda_{H_1}^{-1} \quad (7)$$

$$\lambda_{h_s} = \lambda_L^2 \lambda_{H_1}^{-2} = \left(\frac{h_{sm} + D_{1m}}{h_{sp} + D_{1p}} \right)^2 \quad (8)$$

式中带下标 m 的量为模型值, 带 p 的量为原型值。

进一步推导后得到淹没深度比尺 λ_{h_s} 的隐函数表达式:

作者简介: 傅宗甫(1966—), 男, 浙江青田人, 工程师, 从事水力学及河流动力学研究。

$$\lambda_{h_1} = \lambda_L^2 \left[\frac{1 + D_{1m}/h_{sm}}{\lambda_{h_1} + \lambda_L (D_{1m}/h_{sm})} \right]^2 \quad (9)$$

2 试验装置及量测仪器

2.1 试验装置

试验装置主要是由进水池、进水流道、立式模型轴流泵、出水池、回水槽等组成的循环系统,进水流道底板高程 -0.7m ,见图1.模型水泵通过变速设备与调节阀门调节以满足流量及转速相似要求.为了保证水泵转速与流量的调节精度,将模型的进水流道设计成分离式.在进水池闸墩上游布置椭圆曲线导流墙,以保证进水池的均匀进流.

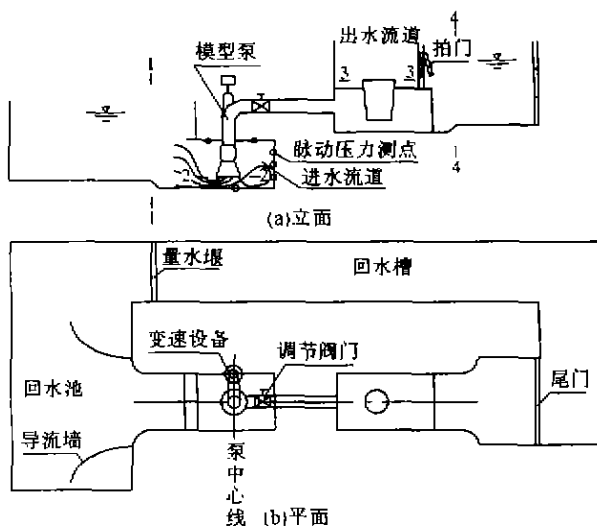


图1 试验装置示意图

2.2 量测仪器

流量由标准矩形薄壁堰量测,堰上水位测针位于堰上游8倍堰上水头处.进出水池及量水堰水位由测针量测,精度为 0.01cm .流速采用CSY-直读式多功能流速仪量测,传感器起动流速为 2.0cm/s .时均压力由测压管施测,测量精度为 0.1cm .水流脉动压力的测量采用标准的CYG1144型压力变送器,量程为 $0\sim 50\text{kPa}$,灵敏度及零位温度系数小于或等于 $1.5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C} \cdot \text{F.S.}$,准确度等级为3级,由CRAS V4.0X计算机数据采集及分析系统对脉动压力信号进行采集和分析处理.

3 试验成果及分析

3.1 漩涡特性

3.1.1 流道进口前漩涡发生规律

流道进口闸门底位于进水池最高水位 4.4m 以上,同时满足惯性力、重力相似和仅满足重力相似条件下,试验测得流道进口的临界淹没深度分别为 1.52m 和 2.08m ,当淹没深度小于临界淹没深度时,流道进口易产生吸气性漩涡.

流道进口闸门底与流道进口上缘齐平时,按上述两种相似条件下的各种工况流道进口均未发现有吸气漩涡产生.流道闸门底与流道进口上缘齐平,相当于流道进口上缘安置了一块垂直隔板,隔断了流道进口顶板上部的死水区与上游来流的联系,削弱了水流发生预漩的能力,使流道进口所需的淹没深度减少,这与试验结果是一致的.

3.1.2 流道内涡带产生情况

a. 不加整流设施方案.为了提高模型的试验精度及深入了解涡带的发生规律,分别进行了按等扬程($\lambda_Q = \lambda_L^2$)、日本机械工程学会进水池试验标准($\lambda_Q = \lambda_L^{2.2}$)和重力相似($\lambda_Q = \lambda_L^{2.5}$)准则下流道内水流流态的试验.观察表明,三种相似准则下,各种运行工况流道内水泵喇叭口下均有白色可见的涡带产生,涡带受水平方向的压力分布和沿流向压力不平衡的影响而摆动,同一运行工况,上述三种相似准则下涡带的强度依次减弱.由此可以推断,原型流道内各运行工况均会产生涡带,使水泵处于一种不稳定的运行状态.因此,研究采用有效的工程措施来消除涡带,得到优良的水流条件是非常必要的.

b. 消涡设施方案.双向进水流道中两侧水流流速不完全相同,水流转弯处过水断面的突变等都是造成边界层分离的因素.另外,流道一端死水区有足够的空间供带有环量的水流发展成漩涡,当漩涡强度足够大时,漩涡在主流的推动下被带向叶轮,沿漩涡的运动轨迹形成涡束,因涡束中心的压力大大低于外侧的压力,使水流中夹带的气体以及溶解于水中的气体析出而聚集到涡束中心,从而形成白色可见的涡带.因此,改善流态的基本途径是设法切断漩流或将流道分割成若干小的空间,抑制漩涡的进一步发展,从而达到消涡的目的.

通过多种方案的试验,得到两种有效的消涡设施方案.第一种是在流道中心线放置一块贯穿整个流道的垂直整流隔板,水泵喇叭口下为椭圆曲线(图2).第二种是在水泵喇叭口下设置导流锥,并沿流道中心线在导流锥两侧各放置一块隔板,导流锥锥面采用圆弧曲线,锥顶按无撞击进口设计^[2](图3).试验表明,上述两种调整流态的措施都收到了优良的效果,各种运行工况下流道内均未发现涡带.

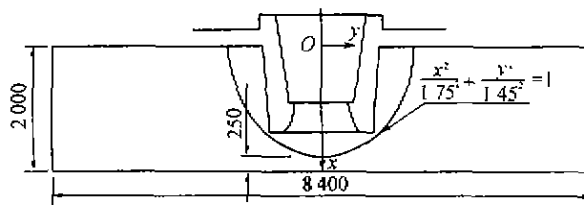


图2 消涡设施方案一

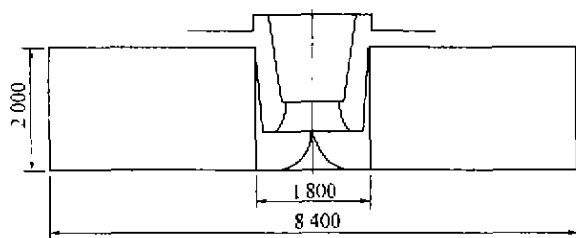


图3 消涡设施方案二

3.2 流速特性

沿流道长度方向布置了6个测速断面,每一测速断面布置6条测速垂线,量测了流道内4个水平层(近底层、1/3高度层、2/3高度层、近顶层)的平面时均流速。无消涡设施方案流道内流场具有强三维性,死水区一端空间点上流速方向及大小在随时间变化。消涡设施方案流道内死水区端空间点上流速方向及大小随时间变化不明显。水泵喇叭口理想的进流条件为等速度场和压力场分布均匀^[3],而双向流道总是一端进水,喇叭口附近不可能达到等流速进水,但消涡设施方案使喇叭口附近的流速梯度显著减少。图4为设计排涝工况(进水池水位3.5 m)无消涡设施方案及加隔板方案1/3高度层喇叭口附近平面流速等值线图。

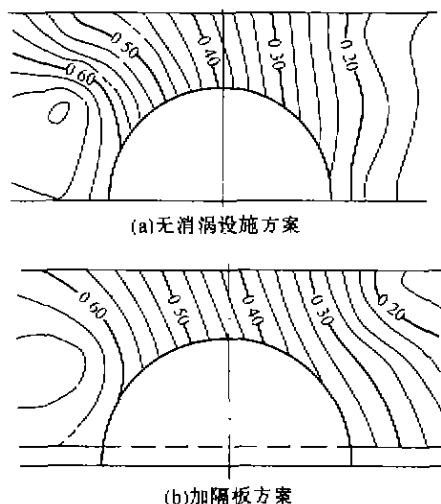


图4 设计排涝工况1/3高度层喇叭口附近平面流速等值线

3.3 脉动压力特性

模型中分别在流道底板、死水区端闸门及顶板布置了6个传感器(图1),对消涡设施方案水泵启动及稳定运行两种工况的脉动压力进行了测试。

3.3.1 水系启动

水泵启动过程是个暂态过程,短时间内流量从零增加到额定流量,有可能在流道内产生较大的脉动压力。因此,有必要对各工况的脉动压力进行全面的测试。试验表明,各种工况下,各测点都有6.2~13.0 kPa的负脉动值及4.0~9.4 kPa的正脉动值。尤其是引水

最低水位(进水池水位1.5 m)、水泵启动过程中流道顶板将承受约8.5 kPa的负压。

3.3.2 水系稳定运行

为了保证测量精度,水泵稳定运行条件下的脉动压力分别用50 Hz、128 Hz和256 Hz三种采样频率进行采样,脉动压力样本经平稳性检验表明,信号具有较好的平稳性。数据处理时采用加Hanning窗、线性平均和平滑处理方法,以减小误差。

脉动压力样本的统计特征表明,各测点脉动压力的偏态系数较小,峰态系数在3.0左右,说明脉动压力的幅值分布接近正态分布。流道底板上的脉动压力最大标准差 $\sigma_{\max} = 1.77$ kPa,最大峰值 $A_{\max} = 10.96$ kPa;死水区侧闸门脉动压力最大标准差 $\sigma_{\max} = 1.07$ kPa,最大峰值 $A_{\max} = 9.60$ kPa。说明脉动压力的平均强度不大。

脉动压力信号经频谱分析后得到,各测点脉动压力的频率结构基本相似,属于低频脉动,优势频率范围为0~5.0 Hz。

3.4 阻力特性

进出水流道的水头损失主要取决于流道的边界形状及流速,当边界形状及过流断面一定时,只与流量有关。试验时通过阀门调节改变流量的方式量测了不同流量下进出水流道的水头损失。

进水流道的水头损失为图1中断面1和断面2之间的总水头差,包括进水流道的进口和沿程及局部损失。出水流道的水头损失指出水流道进口至出水池之间的水头损失,为图1中断面2与断面3之间的总水头差。进出水流道水头损失 h_w 与流量 Q 之间的关系曲线见图5。设计流量(2.5 m³/s)进出水流道的水头损失分别为0.131 m和0.330 m,即出水流道的水头损失远大于进水流道的水头损失,因此,出水流道对水泵效率的影响亦远大于进水流道。

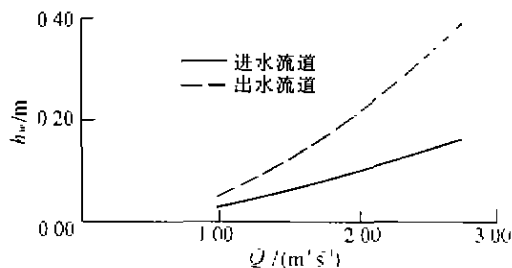


图5 进出水流道水头损失与流量关系曲线

4 结 语

a. 考虑工况相似要求,对双向进水流道泵站出水池和流道内采用两种不同的相似准则进行设计,较好地解决了泵站模型的相似律问题。

(下转第64页)

面摊铺 20 cm 左右嵌挤型二灰结石,再铺设 10 cm 左右 AC 结构类型的沥青混凝土面层;经过 2 年日交通量达 1.5 万~2 万辆的运营,目前使用状况良好,路面裂缝很少.应该说,处理方案是切实可行的.

苏州 324 省道昆太线段,老路原行车道水泥混凝土路面宽 9.0 m,两侧慢车道沥青路面各为 3.0 m.原有老路路面平整,全线 6.0 km 仅 7 块板出现单条裂缝,板块弯沉抽查值见表 3.

由表 1 及表 3 可知,昆太线段单点弯沉均小于 $40 \times 10^{-2} \text{ mm}$,其中 $l \leq 20 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 占 60%,且板块传力效果较好,这种路况采用直接加铺沥青面层是完全可以的.根据上海市政工程管理处、同济大学的实体试验经验,不加任何措施的纯沥青罩面层,接缝反射到罩面层的临界弯沉值为 $24 \times 10^{-2} \text{ mm}$,采用特种金属网有效地防止早期裂缝的临界弯沉为 $30 \times 10^{-2} \text{ mm}$.本工程控制板块单点弯沉值 $l \leq 25 \times 10^{-2} \text{ mm}$,弯沉差 $\Delta l \leq 10 \times 10^{-2} \text{ mm}$,不满足弯沉指标者,对板块进行注浆,注浆板块比例约为 20%~30%,折合为 90 元/ m^2 ,沥青面层最小厚度为 10 cm,面层下设玻纤格栅.

(收稿日期:2001-04-04 编辑:马敏峰)

(上接第 13 页)

b. 工程布置.对双铰浮体卧倒门、浮箱门、浮动扇形门和有轨浮箱直升门 4 种门型方案做了工程布置,推荐有轨浮箱直升门方案.闸底板采用预制钢筋混凝土空箱浮运沉放结构,采用桩基协同抗滑;边墩和翼墙采用地下连续墙结构.施工期开挖临时航道,不断航施工.

c. 挡潮闸运行.就抗御台风高潮而言,预报吴淞站高潮位 5.50 m 情况下关闸挡潮,关闸频次 5~10 a 一次,每年至多关闸一次.

d. 工程投资匡算和施工工期.吴淞公园闸址方案投资匡算约为 39.78 亿元,水产码头闸址方案投资匡算约为 41.99 亿元,均低于再次加高加固防汛墙投资匡算.施工工期约 5 a,短于再次加高加固防汛墙施工工期.

(收稿日期:2001-04-29 编辑:熊水斌)

(上接第 30 页)

b. 流道进口上缘安置垂直隔板,可以有效消除流道进口前的漩涡.

c. 无整流设施方案流道内喇叭口下易产生涡带,经优化的消涡设施方案,可有效消除涡带,改善流道内的流态.

d. 引水最低水位水泵启动时,进水流道顶板将受约 8.5 kPa 的负压作用,结构设计时应充分考虑顶板负压的影响.水泵稳定运行工况,脉动压力的平均

324 省道绕城改线段西段,该段老路结构及弯沉指标见表 1 和表 3,从表面看,该路段弯沉指标良好,但根据苏州机场路等相似路面结构实例来看,一旦开放大交通,特别是重型交通,路面结构立刻会全面崩溃,因此,该种路面结构不能直接加铺沥青面层,需加设结构补强层.虽然板块脱空现象不明显,但基层空隙大,故仍需对路面基层进行注浆加固.

4 结 语

上述列举了路网改造的实例.同样的混凝土路面黑色化改造,3 个路段分别采取了 3 种不同处理方案.尽管处理效果有待进一步观察,但改造思路和方法是可行的.笔者的体会是:

a. 水泥混凝土路面黑色化改造,必须调查分析清楚老路路况,包括板块弯沉值、差异弯沉值、弯沉成因、老路路基和路面结构现状.

b. 防反射裂缝处置方法较多,应根据平、纵、横及老路交通量大小等灵活运用.

c. 本文所提板块弯沉临界指标、注浆弯沉控制值应注意有关试验路段的边界条件,不能生搬硬套.

(收稿日期:2001-04-04 编辑:马敏峰)

强度不大,且属低频脉动.

e. 设计流量下进出水流道的水头损失分别为 0.131 m 和 0.330 m,出水流道对效率的影响远大于进水流道的影响.

参考文献:

- [1] 田家山.水泵及水泵站[M].上海:上海交通大学出版社,1989:71~77.
- [2] 蔡坤、董瑾、曾正,等.导流锥节能原理及设计安装[J].排灌机械,1997(1):20~24.
- [3] 徐辉、王高鹏、张宜.轴流泵进口导流体的研制[J].排灌机械,1995(3):3~6.

(收稿日期:2000-04-06 编辑:张志琴)

(上接第 37 页)

4 结 语

双向轴流泵正向、反向运行效率较高,空蚀性能好;能根据不同的扬程要求,可选用任意轴流泵水力模型;泵体结构和安装形式多样,可为贯流式、立式、卧式等各种不同型式.通过在淮安市两座低扬程双向灌排结合轴流泵站建设中的应用研究可见,在有灌、排结合双向要求的低扬程泵站工程中,采用双向轴流泵及泵站方案与“一站四闸”枢纽方案、“闸站结合”双向流道方案、整体调头方案以及“S 型叶片”方案相比均有突出优点.因此,推广应用双向轴流泵及泵站技术有着巨大的社会、经济意义.

(收稿日期:2000-03-06 编辑:熊水斌)