水泵进水设计模型试验方法

陆林广，奚　斌，左　滨
（扬州大学水利与建筑工程学院，江苏　扬州　225009）

摘　要：模型试验是国际上普遍采用的检验和改进泵站进水设计的主要方法，而试验标准则是水泵进水设计模型试验的重要依据；目前我国尚未有关于泵站进水设计模型试验的试验标准。本文简要讨论了水泵进水设计的整体概念，并根据美国国家标准《水泵进水设计》(ANSI/HI9.8-1998)，介绍了水泵进水设计模型试验的目的、主要内容、试验准则、测试方法、试验方案和试验结果评价等主要内容。

关键词：水泵；进水设计；模型试验；方法
中图分类号：TH3　**文献标识码**：A　**文章编号**：1005-6254(2003)05-0004-04

0　引言

泵站进水设计的内容包括从引渠、前池及进水池（进水流道）直至各台水泵叶轮室进口所有进水建筑物的水力设计，是一个整体概念。水泵进水设计的优劣直接关系到水泵进口的流态，从而影响到水泵的能量性能和空蚀性能。由于影响水泵进口流态的因素较多、相互之间的关系较为复杂，为获得理想的进水流态，国外较为重要的泵站常要求进行水泵进水设计模型试验研究。近十几年来，国内大型泵站均要求进行水泵装置模型试验，并作为对承包商验收的主要手段。

1　试验目的及内容

水泵装置一般由进水流道、水泵和出水流道组成。就进水条件而言，水泵装置试验台均能为进水流道进口提供比较均匀的速度分布，且无旋涡及横向流速等不良流态。因此，在试验台上所进行的水泵装置试验，是在理想进水流态条件下测得的装置性能。除了正向进水且只有一台机组的泵站外，一般泵站很难具备这样的进水条件。

典型的泵站进水设计模型试验的目的是确保最终的泵站进水设计在水泵叶轮室进口前产生良好的进水条件。合适的模型试验可以用来确定实际设计的效果，如果必要，可为改善进水流态提出补救措施。

如果水泵进水设计不当，可能使水流在进入水泵之前产生切向分速，从而导致水泵进口的预旋。预旋将改变叶片进口的速度向量，导致水泵能量性能和汽蚀性能变差，甚至可能引起水泵振动。此外，如果进水池内产生强度较大的水面涡或水下涡，就将产生有害影响。对此类问题需在泵站进水设计中予以充分重视。

以下情况均可能导致水泵进口的预旋或有害旋涡：

1）引渠偏短，形成侧向进水；

2）前池设计不合理；

3）进水池（进水流道）设计不合理；

4）进水池水位偏低；

5）水泵机组运行不对称。

水泵进水设计模型试验研究的目的是：在各种可能的流量、水位及水泵机组运行组合的情况下，考察进水池的流态、检验水泵进口的流态，若进水流态不符合要求，则采取必要的和有效的措施改善进水流态，以保证所有水泵在所有可能的工况下都获得良好的进水流态。

2　试验标准

1998年11月17日批准的美国国家标准《水泵进水设计》("American National Standard for Pump Intake Design"(ANSI/HI 9.8-1998))（以下简称《标准》）对水泵进水设计的模型试验提出了具体、明确的要求，包括相似准则、模型设计、试验方案、测试方法、试验结果，等等，其

作者简介：陆林广（1947－），男，江苏扬州人，教授，主要从事泵站工程方面的教学和科研。

万方数据

主要特点是：试验范围包括从引渠一直到水泵进口的整体；注重测试水泵进口的切向流速，并以此定量地评价泵站的进水设计。由此可见，试验标准是进行泵站进水设计的重要依据。目前，我国尚未制定泵站进水设计模型试验试验标准。

3 相似准则和比尺选择

3.1 相似准则

泵站整体模型试验中的进水流动是具有自由表面的、主要由重力支配的流动，因此应采用佛罗德数相似准则，原型和模型的佛罗德数必须相等，即：

$$F_r = F_m / F_p = 1$$

式中 m 、p 和 r 分别表示模型、原型和模型与原型参数间的比值。

佛罗德数表达为惯性力与重力的比值，对水泵进水口而言

$$F = u/(gL)^{0.5}$$

其中，u 为轴向平均流速（比如在水泵进口处）；g 为重力加速度；L 为水泵进水口特征长度（比如水泵进口直径）。

速度和特征长度参数的选择并非十分重要，但在确定佛罗德数时，在模型和原型中必须使用相同的参数。

为避免水面涡试验中任何可能的比尺效应，常采用偏于安全的做法，即保持1倍佛罗德数的淹没深度，进行1.5倍佛罗德数流量的模型试验。

与原型相同流速的试验准则不予推荐，因为这将使进水流态失真，过度地夸大了模型中水流（如旋涡）的扰动。

按佛汝德相似准则，设原、模型的几何比为 λ，则水深、流速和流量的比尺分别为

$$h_r = \frac{h_m}{h_p} = \lambda\ ;\ V_r = \frac{V_m}{V_p} = \lambda^{0.5}\ ;\ Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = \lambda^{2.5}$$

3.2 比尺选择

在研究水泵进口可能产生的旋涡时，应选择合理的模型比尺，较大尺寸的模型可减少粘滞力和表面张力的比尺效应，所得试验结果更精确、更可靠，但所需费用较高。所以在选择模型比尺时，要兼顾试验精度和试验费用两方面的要求。

量纲分析原理表明，如果雷诺数和韦伯数的数值分别大于 3×10^4 和120，粘滞力和表面张力对旋涡的影响就可忽略不计。为了保证比尺效应的影响最小，常采用2倍的安全系数，即按佛罗德数相似准则选择的模型比尺，应使进水流道出口处的雷诺数和韦伯数分别大于 6×10^4 和240。

4 试验方案

模型试验的方案应考虑水深、流量和水泵机组运行状况等三方面的因素：

1）进水池水深

①最小水深；②设计水深；③最大水深

2）流量

①佛汝德数的倍数 = 1.0

a. 水泵设计流量；b. 水泵最大流量

②佛汝德数的倍数 = 1.5

a. 水泵设计流量；b. 水泵最大流量

3）水泵运行状况

同一进水池的水泵所有可能的运行组合

以上三方面的因素将组成若干种不同的进水池水深、流量和水泵运行状况的组合，相应地构成若干个模型试验的方案，在所有的试验组合中都需要进行旋涡的观察和涡角的测量。尽管最严重的旋涡一般发生在最大流量和最小淹没深度的组合，但也有可能是由于较小水流扰动的原因，所以，不能排除更强烈的旋涡发生在较高水位和较小流量的组合。

5 测试方法及要求

5.1 流量

对所有受试模型泵均应能单独进行流量的调整和测试，建议采用电磁流量计，测试误差要求小于 ±2 %。

5.2 水位

采用测针测量进水池水位，测量精度控制在 ±3 mm 以内。

5.3 水面涡及水下涡

借助于比重与水相近的塑料粒子或其它示踪方法观察水面涡和水下涡，同时用拍照或录相的方法记录旋涡运动。由于旋涡的强度通常是不稳定的，其出现也是断续的，因此，在模型试验中对旋涡的连续观察时间不少于10 min。《标准》要求，不允许任何已形成连续涡核的水面涡或水下涡进入水泵。

5.4 预旋

用8根等间距布置的红色纱线固定在喇叭管进口，形成一个圆环，纱线的长度为为喇叭管悬空高的0.5倍，通过对纱线流向的观察，可定性

万方数据

地评价喇叭管进口的预旋。

5.5 水泵叶轮室进口的涡流

涡流用旋度计测量，典型的旋度计安装情况如图1所示。旋度计装有4片平直叶片，叶片直径为管道直径的75%，流动方向上的长度为管道直径的60%。涡角 θ 的意义见图2，其计算式如下：

$$\theta = \tan^{-1}\frac{v_t}{v_a}$$

这里，v_a 为水泵进水管的轴向平均流速，由下式计算：

$$v_a = \frac{Q}{\frac{1}{4}\pi d^2}$$

v_t 为根据旋度计螺旋桨的转速算得的切向流速，由下式计算：

$$v_t = \pi d_t n$$

以上两式中，Q 为流道内的流量；d_t 为安装旋度计处管道的直径；n 为旋度计叶片的转速。

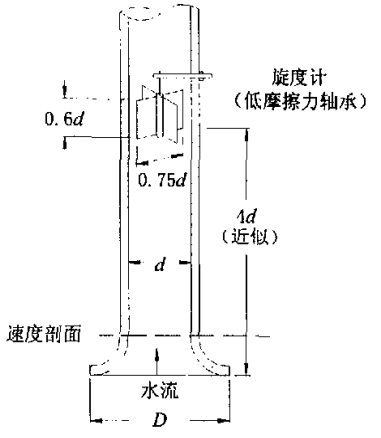


图1 旋度计示意图

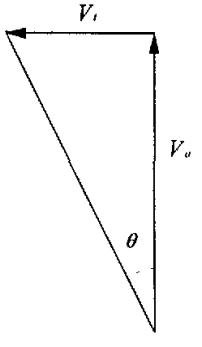


图2 涡角的意义

旋度计叶片每旋转1圈便通过光缆输出10个脉冲，计数器根据输出的脉冲数计算出叶片的转速。在通常情况下，涡流的旋转方向和旋转速度是不稳定的，因此，旋度计的读数将连续读取，每隔10~30 s读取一次，至少持续10 min。

《标准》要求，短时间（10～30 s）涡角或长时间（10 min）平均涡角均应小于5°。

5.6 水泵进口前的流速分布

采用流速仪在距水泵进水管前2倍于喇叭管进口直径处测量断面流速，以查明行近水流的偏流程度，有助于分析不正常的进水流态。

6 试验阶段及试验结果

6.1 试验阶段

6.1.1 基本试验

按原设计方案进行试验，对进水流态作出评价，并决定是否需修改原设计。

6.1.2 修正改试验

对原设计方案进行修改，以满足《标准》提出的各项要求。

6.1.3 验收试验

由业主、承包商、设计方和试验方的代表共同参加，重复主要的基本试验和修正试验，验证试验结果，并对有关试验内容及程序、模型装置及测试仪器、试验方法和试验结果等作出评价。

6.2 试验结果

在模型试验的三个阶段，均需提供以下三方面的结果：

1）在1.5倍佛汝德数的条件下，在不同水位、流量和水泵运行状况的所有组合中，进水池内水面自由涡的发生情况；

2）在1倍佛汝德数的条件下，在不同水位、流量和水泵运行状况的所有组合中，进水池内水下涡的发生情况；

3）在不同水位、流量和水泵运行状况的所有组合中，各台受试模型水泵进口的涡角（观测时间不少于10 min）。

7 结论

1）本文所述的水泵进水设计模型试验是指包括引渠、前池、进水池（进水流道）和水泵进口在内的完整意义上的进水设计，其模型试验结果符合泵站的实际进水条件和水泵的运行状况；

2）在国内尚未制定水泵进水设计模型试验

万方数据

标准的情况下，可参照有关的美国国家标准《水泵进水设计》（ANSI/HI 9.8-1998）。

参考文献：

[1] American National Standard for Pump Intake Design. ANSI/HI 9.8.1998：22～28.

[2] 左东启. 模型试验的理论和方法[M]. 北京：水利电力出版社，1984：53～55.

[3] 徐 辉，段志强，于永海.泵站有压前池流态改善措施的研究[J]. 排灌机械，2003，21(4)：13～16.

Research Method of Intake Hydraulic Design Model Test

LU Lin-guang, XI Bing, ZUO Bin

(College of Hydraulic & Architectural Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Model test is a main method to verify and modify the intake design of a pumping station, which is popularly used in the word. Up to now, there is no test standard for model test of intake design in our country. Integrative concept of pump intake design is briefly discussed, and based on"American National Standard for Pump Intake Design"(ANSI/HI 9.8-1998), the test purpose, main concept, test principle, measurement method, test scheme and evaluation of test results are illustrated.

Key words: Pump sump; Hydraulic design; Model test; Method

《中国农村水利水电》征订启事

《中国农村水利水电》是由中国灌溉排水发展中心、水利部农村水电及电气化发展局、武汉大学、中国国家灌溉排水委员会主办的水利电力专业性期刊，内容包括水利水电研究、设计、建设和管理的各个方面，信息量大，读者面广，且注意应用技术的研究和推广。是全国(省、部)优秀科技期刊，并荣获"首届国家期刊奖"，是"中国期刊方阵"的双高期刊。是全国中文核心期刊、中国科学引文数据库来源期刊、中国科技论文统计源期刊、中国学术期刊综合评价数据库来源期刊。

月刊，大16开，64页，每月10日出版，定价8.00元，全年96元。**国内订阅**：全国各地邮局，邮发代号38-49；**国外订阅**：中国国际图书贸易总公司(北京399信箱)，国外代号：M4211。

地址：武汉大学内　邮编：430072　电话：(027)87643133　传真：(027)87652781

2004年《节水灌溉》征订启事

《节水灌溉》是由中国国家灌溉排水委员会、中国灌溉排水发展中心、武汉大学、国家节水灌溉北京工程技术研究中心共同主办的技术性期刊，是全国中文核心期刊，中国科技论文统计源期刊。

栏目设置：水资源利用，灌溉技术，输水技术，量水技术，农艺节水，灌溉制度，技术经济，灌溉设备，灌溉自动化，节水与生态，工作经验，工程管理等。

读者对象：从事节水灌溉行业的水利、农业、林业、机械及相关领域的技术人员、管理人员。

《节水灌溉》邮发代号：38-17，双月刊，6元/期，全年定价36元。每逢双月5号出版，全国各地邮局征订，国内外公开发行。

地址：武汉市珞珈山　武汉大学二区　邮编：430072

电话：(027)67802201　传真：(027)87652781　电子信箱：jieshui@163.net

万方数据