

泵站进水流道设计理论的新进展

陆林广

(扬州大学水建学院水利系, 江苏 扬州 225009)

摘要 针对传统的进水流道设计理论建立在一维流动的基础上, 存在着难以自圆其说的矛盾的情况, 计算、分析了进水流道内的基本流态, 简要介绍了建立在三维流动理论基础上的进水流道优化水力设计的基本思路, 给出各种形式进水流道优化水力设计的主要结果及工程应用实例.

关键词 泵站 进水流道 设计理论 进展

中图分类号 S227

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2001)01-0040-06

1 问题的提出

进水流道是泵装置的一个重要组成部分. 各种不同的进水流道尽管形式不一, 但都是泵站前池与水泵叶轮室之间的过渡段, 其作用都是为了使水流在由前池进入水泵叶轮室的过程中更好地转向和加速, 以尽量满足水泵叶轮室进口所要求的水力设计条件.

水泵特性主要取决于水泵叶轮的几何参数, 表征这些特性的曲线都是在专用的水泵试验台上经过性能试验得到的. 根据有关的国家试验标准^[1], 在受试泵叶轮室之前必须配备不少于 15 倍管道直径的平直管段. 提出这样的要求主要是为了保证受试泵的进口流态最大限度地满足水泵叶片的水力设计条件. 由于泵站进水流道与实验室标准管道所提供的进水流场不可避免地存在差别, 在泵装置中, 水泵已不可能再得到标准进水管所能提供的那种理想的流态. 毫无疑问, 进水条件的变化必然引起泵装置中水泵工作状态的变化. 进水流态不良不仅会增加泵内水力损失, 降低水泵效率, 而且还会降低泵的空蚀性能. 因此, 进水流道的水力设计将直接影响到水泵和泵装置的工作性能. 进水流态发生改变以后, 泵装置中的水泵效率也就随之改变, 进水流态愈差, 对水泵工作状态的影响就愈大, 水泵效率的下降幅度就愈大^[2].

为了获得良好的进水流态, 大、中型泵站常采用专门设计的进水流道. 进水流道的型式包括斜式进水流道、肘形进水流道、钟形进水流道、簸箕形进水流道等单向进水流道和双向进水流道, 其中以肘形进水流道应用最多. 肘形进水流道的水力设计方法多采用一维流动理论的水力设计方法, 有关这一设计方法的具体内容详见文献^[3], 下面仅就其中存在的某种谬误作一简单的讨论.

肘形流道一维流动设计方法中以“断面平均流速”沿流道中心线的变化平顺均匀为依据调整流道型线, 而“断面平均流速”则是用设计流量除以所谓“过流断面”的面积得到的. 一个十分关键的问题是: 如何确定“过流断面”? 过流道中心线上的点作中心线的垂线, 得到的断面便认为是“过流断面”. 由图 1 可以看到, “过流断面”在流道弯道内侧发生了相交的现象, 这说明什么呢? 是流过去的水又流回来了还是这里发生了旋涡? 很明显, 这种设计理论本身存在着难以自圆其说的矛盾.

1997 年 9 月 1 日颁布实施的国家标准《泵站设计规范》(GB/T 50265—97) 已不再将进水流道的一维流动设计方法作为指导性方法列出^[4]. 事实上, 随着人们对泵站流道水力设计问题认识的不断深入, 随着计算机技术和计算流体动力学的迅速发展, 以三维流动理论为基础的进水流道优化水力设计方法近几年来已经被提出并得到了初步应用.

2 进水流道的水力设计优化问题及目标函数

2.1 水力设计优化问题

一般地讲,已知进水流道的边界,要求流道内的流场,为流体力学中的正命题.根据水泵叶轮室进口对流场的要求确定进水流道的边界形状,为反命题.在很多情况下(常常是受流道几何尺寸的限制),进水流道反命题的解往往并不存在.所幸的是世界上许许多多的事物都是连续变化的,如果我们认识到在进水流道的正命题解与反命题解之间还存在着各种优劣程度不等的近似解,就会导致一个新的命题——进水流道的水力设计优化问题,而这正是解决工程实际问题所需要的.

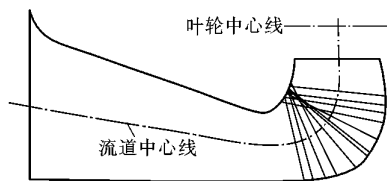


图 1 肘形进水流道‘过流断面’的相交现象

Fig.1 Intersection of“flow cross section”in elbow tube

2.2 优化问题的目标函数

在设计工况点,水泵叶片水力设计对叶轮室进口流场的要求可概括为:(a)流速分布均匀;(b)水流进泵角度 $\theta = 90^\circ$.根据这两个要求,可引入进水流道水力优化问题的两个目标函数^[5]:

(a)流速分布均匀度

$$V_u = \left[1 - \frac{1}{\bar{u}_a} \sqrt{\frac{\sum (u_{ai} - \bar{u}_a)^2}{m}} \right] \times 100\%$$

式中: $\bar{u}_a$ ——水泵进口断面的平均轴向速度; u_{ai} ——该断面各单元的轴向速度; m ——流场数值计算时该断面所划分的单元个数.

(b)速度加权平均角度

$$\bar{\theta} = \frac{\sum u_{ai} \left[90^\circ - \arctan \left(\frac{u_{ti}}{u_{ai}} \right) \right]}{\sum u_{ai}}$$

式中: u_{ti} ——水泵进口断面各单元的横向速度.

目标函数的引入,为泵站进水流道的水力优化计算提供了判别进水流场优劣的依据. $V_u = 100\%$ 和 $\bar{\theta} = 90^\circ$ 为理想值.在不可能达到理想值的情况下,优化计算的目标应是取得可满足工程实际需要的最优值.

根据水泵叶轮室进口对流场的要求建立目标函数,给定一系列不同的进水流道边界、完成一系列相应的正命题计算、用一系列正命题的解来尽可能地逼近最优解,就是本文试图解决泵站进水流道水力设计优化问题的基本思路.

本文引入目标函数,以流道进水口不发生吸气旋涡为前提.关于流道进口的最小淹没深度,文献[4]已有规定.

3 进水流道正命题解的数学模型

3.1 控制方程

泵站进水流道三维正命题的求解采用了雷诺平均 N-S 方程,并以标准 k- ϵ 紊流模型使方程组闭合.随着近十几年来计算流体力学方法(CFD)的迅速发展和应用,采用直接求解三维雷诺平均 N-S 方程和标准 k- ϵ 紊流模型方程组的方法模拟水轮机尾水管、蜗壳和叶轮内部的流动,进行水力机械的性能预测和优化设计,已被大量工程实践证明是有效的和可靠的,得到越来越多的应用,一些流动计算专用软件也应运而生.在这种背景下,泵站进水流道三维正命题的求解已不存在问题.

3.2 边界条件

泵站进水流道优化水力设计计算流场的进口设置在前池中距流道进口足够远处,在这里,可依据来流速度在垂直水流方向上均匀分布、在铅直方向为对数式分布确定.

计算流场的出口设置在水泵叶轮室进口断面,这里无疑是充分发展的流动.在紊流流动中,下游边界的流动状态可认为影响不到上游方向的流场.专门设计的试验表明,在额定工况下,水泵叶轮转动所引起的环

量对水泵叶轮室以前的流场没有可测出的影响^[6]. 因此, 流场出口的边界条件仅为沿垂直于该断面方向的压力梯度等于零.

进水流道边壁、前池底部及水泵喇叭管、导流帽等处均为固壁, 其边界条件按固壁定律处理^[7]. 固壁边界条件的处理中对所有固壁处的节点应用了无滑移条件, 而对紧靠固壁处节点的紊流特性, 则应用了所谓对数式固壁函数处理, 以减少近固壁区域的节点数.

前池的表面为自由水面, 若忽略水面风引起的切应力及与大气层的热交换, 则自由面可视为对称平面^[7].

4 进水流道的基本流态及分类

应用三维紊流数值计算方法, 求得了斜式、肘形、钟形、簸箕形和双向五种常用形式进水流道的正命题解, 所得结果与模型试验观察的结果一致. 以下将这几种形式进水流道内的基本流动形态作一简单介绍.

4.1 基本流态

斜式轴伸泵装置按水泵轴线与水平线的夹角一般分为 15° , 30° 和 45° 三种型式, 以适应不同的泵装置扬程. 图 2 给出了 30° 斜式进水流道主断面内的基本流态. 可以看出, 斜式进水流道由于转弯角度小、水流所受离心力小, 流态非常均匀平顺.

图 3 所示为肘形进水流道主断面内的基本流态. 在流道的直线段内, 流态平顺, 流速逐渐增大. 进入弯曲段后, 水流迅速改变方向并加速, 靠近内壁处的水流流向的改变尤其剧烈, 流速明显大于外壁处的流速. 在圆锥段内, 由于惯性力的强烈作用, 较大的水流速度开始出现在流道外侧壁附近, 经过圆锥段的短距离调整, 在接近流道出口处, 水流趋向于均匀分布和垂直于出口断面.

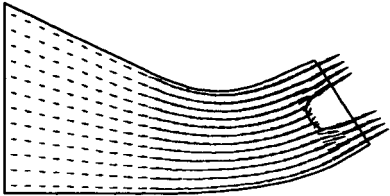


图 2 30° 斜式进水流道主断面内的流态

Fig.2 Basic flow pattern in 30° inclined inlet conduit

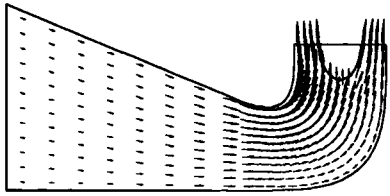


图 3 肘形进水流道主断面内的流态

Fig.3 Basic flow pattern in elbow tube

钟形进水流道的基本流态如图 4 所示. 由流场图可见, 由于钟形流道的高度压得很低, 同时有较大的宽度和后壁空间, 从而迫使水流从四周进入喇叭管, 这是钟形进水流道进水的主要特征.

簸箕形流道内的基本流态如图 5 所示. 由流场图可见, 尽管流道的底部向上翘起, 但由于悬空高度压得较低, 且有较大的宽度和后壁距, 水流从四周进入喇叭管.

方箱式双向进水流道内的流场如图 6 所示, 这种流道可视为后壁距很大的单向流道. 由流场图可见, 其流动的特点也是水流从四周进入喇叭口.

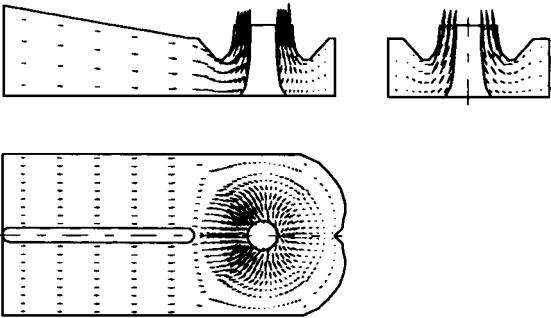


图 4 钟形进水流道内的基本流态

Fig.4 Basic flow pattern in suction bell

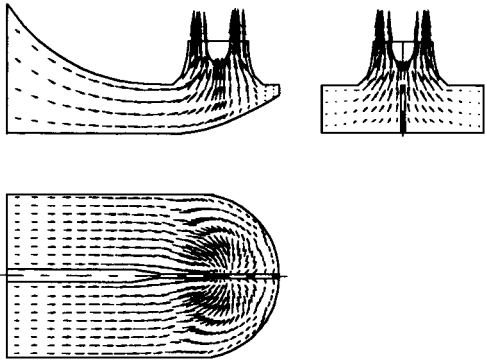


图 5 簸箕形进水流道内的基本流态

Fig.5 Basic flow pattern in suction box

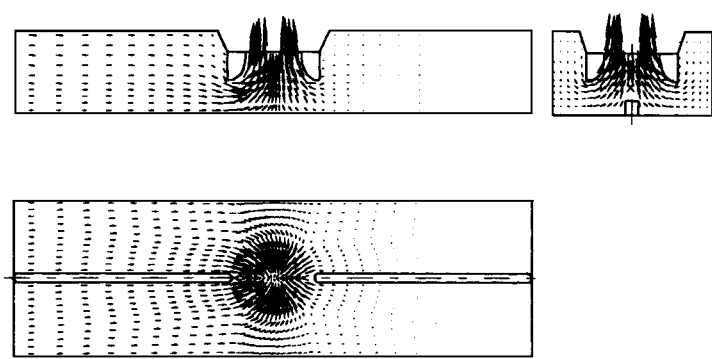


图 6 方箱式双向进水流道内的基本流态

Fig.6 Basic flow pattern in two-way suction box

4.2 基本流态分类

根据进水流道的基本水动力学特性,可将其分为单面进水和四面进水两大类型.

4.2.1 单面进水

水流从一个方向直接进入水泵叶轮室,称为单面进水.单面进水流动的主要特征在于水流只是简单地转向和加速,斜式流道和肘形流道都属于单面进水的流道.肘形流道水泵轴线与水平线的倾角为 90° ,斜式流道水泵轴线与水平线的倾角有 45° , 30° , 15° 三种情况.由于流道倾角不同,流道转弯的角度就不同,水流在流经弯道时所受离心力的影响也就不一样,倾角愈大所受影响愈大,水流转向及流场调整所需的空間高度也就愈大.

4.2.2 四面进水

四面进水的进水流道的主要结构特征是在流道出口(水泵叶轮室前)都有喇叭管.水流在进入叶轮室以前的流动分为两个阶段:(a)在流道内向喇叭管的汇集阶段;(b)在喇叭管内的流场调整阶段.所谓‘四面进水’即指在第一阶段水流从四面进入喇叭管.钟形进水流道、簸箕形进水流道及方箱式双向进水流道都具有这样的特征.

四面进水的进水流道要求流道有足够的宽度、一定的后壁空间和适宜的悬空高,以便水流尽可能均匀地通过喇叭管与流道底板之间的空间从四面进入喇叭管.水流在经过 90° 转向进入喇叭管以后,流场还非常紊乱,必须充分利用喇叭管进行流场调整,故而喇叭管的型线优化就显得十分重要.

5 推荐的进水流道水力设计准则

在进水流道正命题可解的条件下,以目标函数为判别标准,笔者曾对各种形式的进水流道逐一进行了优化水力设计^[5].大量的计算数据表明,进水流道的最优设计准则与流道内的基本流态密切相关.

5.1 单面进水的进水流道水力设计准则

单面进水流道内的基本流态相对比较简单,其水力设计准则也比较简单.根据优化水力计算的结果,推荐的单面进水流道水力设计准则列于表 1.

表 1 单面进水流道的水力设计准则推荐值

Table 1 The suggested criteria for boxes of unidirectional inflow pattern

流道	叶轮中心高度	流道宽度	流道长度	出口锥角/ $(^{\circ})$
15° 斜式流道	0.7 ~ 0.9	2.0 ~ 2.5	3.0 ~ 3.5	4.0
30° 斜式流道	0.8 ~ 1.0	2.0 ~ 2.5	3.0 ~ 3.5	3.3
45° 斜式流道	1.0 ~ 1.2	2.0 ~ 2.5	3.0 ~ 3.5	2.2
肘形流道	1.6 ~ 1.8	2.0 ~ 2.5	3.0 ~ 3.5	0.0

注:1)表中各参数除出口锥角外,均以水泵叶轮直径 D_0 为基本单位(下同);

2)叶轮中心高度指水泵叶轮中心至流道底板的距离(下同);

3)流道长度指流道进口至水泵叶轮中心的距离(下同).

叶轮中心高度是流道设计中最重要参数,此高度愈大,水泵进口的流态愈好,但所需的泵站土建投资也愈大.这一矛盾对肘形进水流道尤为突出.表 1 中的推荐值兼顾了进水流态和土建投资两方面的要求.

弯曲段是位于进口直线段与出口锥段之间的过渡段,要实现两段之间良好的几何过渡并便于优化过程中的线型调整,使水流的转向与加速达到最佳状态,该段的线型宜采用四次曲线.

单面进水流道的出口锥段紧接水泵叶轮室进口,该段的锥角直接影响到进泵水流相对于水泵叶片的冲角.由表 1 可以看到,水泵轴线的倾角愈大,相应的最佳锥角愈小.

流道直线段的长度和宽度对水泵叶轮室进口的流场影响较小,长度一般可视泵房上部顺水流方向结构布置的要求确定.流道宽度则可根据机组中心距等布置方面的要求确定.

5.2 四面进水的进水流道的水力设计准则

四面进水流道内的流态比较复杂,根据优化计算的结果,几种不同形式四面进水流道的水力设计准则推荐值列于表 2.

表 2 四面进水流道的水力设计准则推荐值
Table 2 The suggested criteria for boxes of four-side directional inflow pattern

流 道	叶轮中心高度	流道宽度	流道长度	后壁距	喇叭管直径	喇叭管高度
簸箕形流道	1.5 ~ 1.6	2.5	3.5	1.0	1.47	0.6 ~ 0.7
钟形流道	1.3 ~ 1.4	2.74	3.5	1.3	1.4	0.5 ~ 0.6
方箱式双向流道	1.3 ~ 1.4	2.8	4.5(单侧)	4.5	1.4 ~ 1.5	0.5 ~ 0.6

注:后壁距指水泵叶轮中心至流道后壁的距离.

叶轮中心高度对四面进水流道内流态的影响也很大,进水流场的要求与土建投资的矛盾在这里同样表现得十分突出.与肘形流道相比,钟形流道的叶轮中心高度下降了许多,但同时宽度也增加得较多.簸箕形流道的叶轮中心高度与宽度均居于钟形流道和肘形流道之间.

悬空高指喇叭管至流道底板之间的距离,其值等于叶轮中心高度减去水泵叶轮中心至叶轮室进口的距离(约 $0.2D_0$ 左右)和喇叭管高度.确定最佳悬空高十分重要,过大的悬空高不仅不利于水流均匀地从四面进入喇叭管,而且还会增加流道高度.过小的悬空高将使喇叭管下方水流的速度加大以及速度方向的变化曲率加大,不仅造成水流紊乱,增加水力损失,而且直接影响到进泵水流的均匀性.

流道后壁空间的作用是为了便于一部分水流从流道后部进入喇叭管.后壁距太小,会影响从后部进泵水流的流动;后壁距太大,对于从后部进泵水流的流动不仅是不必要的,而且可能使水流在后壁空间具有较大的自由度而导致不良流态.

喇叭管与水泵叶轮室进口相接,是水流进入叶轮室的最后通道,对入泵水流的流速分布起着举足轻重的调整作用.

模型试验结果表明,在钟形流道、方箱式双向流道等形式的四面进水的流道内,若宽度较小,就有可能产生附壁涡带.为避免附壁涡带的产生,流道的宽度须大于 $2.74D_0^{[8]}$.四面进水的流道对宽度的要求,并不是从便于部分水流绕至喇叭管后部进泵提出来的,而是为了防止产生侧壁涡带,防止产生侧壁涡带所要求的宽度大于前者.此外,钟形流道一般需设置导流锥,簸箕形流道一般需设置中隔板,以防止附底涡的产生.

6 应用实例

6.1 双向进水流道

治理太湖重点工程望虞河泵站水泵叶轮直径 2.5 m,单机设计流量 $20\text{ m}^3/\text{s}$,在悬空高度 H_B 分别为 $0.68D_0$ 和 $0.48D_0$ 而其它条件相同的情况下,对该泵站进水流道内的流场分别进行了数值计算,悬空高度从 $0.68D_0$ 减至 $0.48D_0$ 后,水泵进口的流场均匀度下降了 3.92%,水流平均角度减少了 0.6° .在同样情况下进行了该站泵装置模型能量性能对比试验,悬空高度从 $0.68D_0$ 减至 $0.48D_0$ 后,泵装置效率平均下降了 2%;在最高效率点的左侧(小流量区),效率下降小于 2%;在最高效率点的右侧(大流量区),效率下降幅度大于 2%.

经过优化的双向进水流道在河北大浪淀水库叶三拨泵站也得到了成功的应用.

6.2 簸箕形进水流道

世行贷款加强农业灌溉项目中的江苏刘老涧泵站设计流量为 $150\text{ m}^3/\text{s}$,安装 3100ZLQ38—4.2 立式轴流泵 4 台套,水泵叶轮直径 3 m,采用了簸箕形进水流道.在给定流道高度、宽度和长度的条件下,对原设计流道

进行了优化、改进.经水泵装置模型试验验证,在最优工况点,进水流道优化前,泵装置模型的扬程 $H = 5.1$ m,流量 $Q = 0.257\text{ m}^3/\text{s}$,效率 $\eta = 69.2\%$ 进水流道优化后,其最优工况点的扬程 $H = 4.85$ m,流量 $Q = 0.302\text{ m}^3/\text{s}$,效率 $\eta = 74.2\%$.

7 结 束 语

泵站进水流道的作用是为了给水泵叶轮室提供符合水泵叶片进口设计条件的流态,进水流态对泵装置中水泵的工作状态影响很大.研究和把握进水流道内的流动形态是研究泵站进水流道水力设计理论和设计方法的基点.

根据进水流道内基本流态的主要特征,可将它们分成两种类型.单面进水的进水流道和四面进水的进水流道.进水流道的水力设计准则决定于流道内的基本流态.

泵站进水流道优化水力设计的研究结果为编制流道设计专用软件创造了必要的条件.有理由相信,随着这一类软件的开发和推广应用,过去被认为较复杂的进水流道水力设计必将十分方便地为各级工程技术人员所掌握.

参考文献：

[1] 中华人民共和国国家标准局. GB3216—87 离心泵、混流泵、轴流泵和旋涡泵试验方法[S]. 北京 中国标准出版社,1983. 10.

[2] 陆林广,刘成云,陈玉明. 进水流道对水泵装置性能的影响[J]. 水泵技术,1997(3) :25 ~ 26.

[3] 中华人民共和国水利电力部. SD204—86 泵站设计规范设计分册[S]. 北京 水利电力出版社,1987. 122 ~ 125.

[4] 中华人民共和国国家标准. GB/T 50265—97 泵站设计规范[S]. 北京 中国计划出版社,1997. 1 ~ 245.

[5] 陆林广,张仁田. 泵站进水流道优化水力设计[M]. 北京 中国水利水电出版社, 1997. 18 ~ 19,44 ~ 102.

[6] 汤方平,周济人,袁家博. 轴流泵站进出水流道水力损失的试验研究[J]. 排灌机械, 1995(3) :13 ~ 14.

[7] Rodi W. Turbulence models and their application in hydraulics experimental and mathematical fluid dynamics[M]. Delft : IAHR Section on Fundamentals of Division II , 1980. 44 ~ 46.

[8] 曹志高,钱义达. 泵站钟形进水流道试验研究[J]. 水泵技术,1989(3) :26 ~ 31.

Progress in Design Theory for Suction Boxes of Pumping Stations

LU Lin-guang

(College of Water Conservancy, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract The traditional design theory of suction box is based on 1D flow theory, in which there is a self-contradictory problem. The basic pattern in a suction box is computed and analyzed, and the train of thought to establish a 3D theory of optimal hydraulic design for suction box is briefly illustrated. The main results of optimal hydraulic design and some of their applications in engineering practice are also given in this paper.

Key words pumping station ; suction box ; design theory ; progress