

文章编号: 1005-0329(2009)12-0019-04

# 肘形进水流道优化设计与数值计算

施 伟<sup>1,2</sup>, 李彦军<sup>1</sup>, 邓东升<sup>2</sup>, 袁寿其<sup>1</sup>, 刘 军<sup>2</sup>

(1. 江苏大学, 江苏镇江 212013; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏南京 210029)

**摘要:** 为了提高泵站进水流道的设计水平, 对应用最为广泛的肘形进水流道的型线进行了数学建模, 并采用高级程序设计语言 Visual Basic 对工程图形处理软件 AutoCAD 进行二次开发, 形成基于流道设计参数的优化设计软件, 能够快速进行流道型线的绘制, 并能使流道的型线自动符合流速渐变的原则。同时结合三维紊流数值模拟技术和流道的模型试验对流道的水力性能进行检验。通过工程实例说明, 该流道设计方法快速、可靠, 所设计的肘形进水流道具有出口流态较好、水力损失较小的优点。

**关键词:** 泵站; 肘形进水流道; 优化设计; 程序开发; 流态分析; 试验研究

**中图分类号:** TV131

**文献标识码:** A

doi:10.3969/j.issn.1005-0329.2009.12.005

## Optimum Hydraulic Design and Model Test for Elbow Inlet Passage

SHI Wei<sup>1,2</sup>, LI Yan-jun<sup>1</sup>, DENG Dong-sheng<sup>2</sup>, YUAN Shou-qi<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>2</sup>

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Jiangsu Water Source Co., Ltd., the East Route of the South-to-North Water Transfer Project, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The elbow inlet passage is widely used in pumping stations. In order to raise the design level of the inlet passage, the mathematical model has been made for the geometric contours of elbow inlet passage accord with the principles of gradual rate. Based on second-development of AutoCAD, the general software for hydraulic optimum design has been developed based on the geometrical parameters of elbow inlet passage. The optimum geometric parameters of the elbow inlet passage are obtained quickly with the software. And the hydraulic performances are verified with CFD and model tests. The results of the examples illustrate that the method is quick and reliable, and the designed inlet passages have the advantages of small hydraulic loss and good flow pattern.

**Key words:** pumping station; elbow inlet passage; optimum design; program development; flow pattern analysis; experimental study

### 1 前言

肘形进水流道是国内外已建大型泵站最常用的,也是 GB/T50265—97 推荐采用的一种进水流道<sup>[1]</sup>。传统的肘形流道设计方法是以平均流速的渐变来确定流道的外形尺寸,但随着近年来计算流体动力学(CFD)的迅速发展和应用,逐渐抛弃了一维设计理论,运用三维紊流数值计算的方法来优化设计泵站肘形进水流道。通常采用四次曲线和各自的几何边界条件以及自由点的位置来确

定流道的初始型线,然后利用三维紊流数值仿真不断调整型线,以达到最优进水流场<sup>[2]</sup>。但这种设计方法在最初确定流道型线时具有一定的任意性,若连一维流速渐变的原则都不满足,则导致所谓的优化带有一定的盲目性,而且这种流道型线极不规则,不便于工程施工。本文根据肘形进水流道的型线特点,利用解析几何的方法对流道型线进行数学建模,采用参数化程序设计的方法来初步确定肘形进水流道的型线,使其符合流速渐变的原则。在此基础上再对流道进行三维紊流数

收稿日期: 2009-01-20 修稿日期: 2009-11-10

基金项目: 江苏省南水北调工程科技创新项目(KJXC-200804)和江苏大学高级人才启动基金资助项目(08JDC038)



值仿真,检验流道在三维空间的流态,从而通过改变流道的参数而使型线进行调整,使其达到流态最好,损失最小。

## 2 肘形进水流道型线数学模型

图1为常用肘形进水流道示意,建立 $XOY$ 坐标系,肘形进水流道各断面型线的数学关系可参考文献[1]的具体推导。其主要由三部分组成:直线渐缩段(流道进口至 $\alpha$ 断面)、弯渐缩段( $\alpha$ 断面至 $k$ 断面)、直锥段( $k$ 断面至流道出口)。直线渐缩段一般底部水平、顶部上翘,有时为了抬高进口底部高程,以减少土建工程量,利于站房稳定,也可做成顶部、底部同时上翘。弯曲渐缩段的近似椭圆断面,其焦距逐步减小,并逐步将水流从水平流向改变为垂直流向;直锥段为由下至上直径渐小的同心圆。流道的进口高度 $h_a$ 须结合流道的进口流速和淹没深度要求确定。而流道的出口收缩角 $\theta$ 应与泵体的进口收缩角相同,以使流道的出口与水泵的进口光滑过渡。

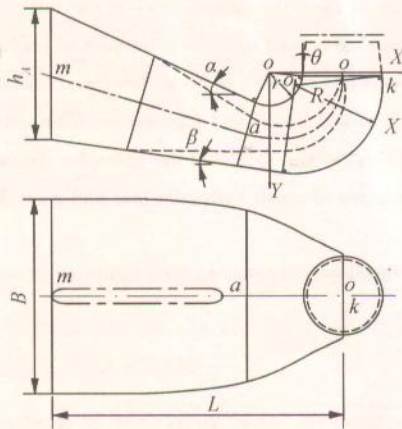


图1 肘形进水流道型线示意

从水力特性考虑,肘形进水流道设计最重要、最基本的要求即满足从进口至出口断面沿程渐缩。肘形进水流道的直线渐缩段与直锥段一般都能自然满足沿程渐缩的要求,设计的重点和难点在于弯曲渐缩段的优化设计。根据流体运动特性,过流断面渐缩,水体惯性力与管壁摩擦阻力同向,不产生旋涡,水力损失极小,并能改善水流均匀度。根据试验资料,断面渐缩的 $90^\circ$ 弯管局部水头损失系数仅为等径弯管水头损失系数的3%左右<sup>[3]</sup>。因此弯曲渐缩段设计的优劣直接影响到整个肘形进水流道的水力性能。

肘形进水流道设计给定参数为泵叶轮直径 $D$ ,锥形管进口直径 $D_0$ ,锥形管收缩角 $\theta$ ,弯曲渐缩段内外圆半径 $r, R$ ,直线渐缩段上翘角 $\alpha, \beta$ ,流道长度 $L$ ,流道宽度 $B$ 及设计流量 $Q$ 等。

### 2.1 流道过渡圆半径变化

取 $\alpha$ 断面过渡圆半径为 $r_a$ ,取直线渐缩段的任意断面为过渡圆的起点断面,与 $\alpha$ 断面之间的过渡圆半径呈直线变化。 $k$ 断面过渡圆半径 $r_k = D_1/2$ ( $D_1$ 为 $k$ 断面圆的直径), $\alpha$ 断面与 $k$ 断面间各断面过渡圆半径可取随断面中心线长度线性变化,即:

$$r_i = \frac{D_1}{2} - \left( \frac{D_1}{2} - r_a \right) \frac{L_{ik}}{L_{ak}} \quad (1)$$

式中  $L_{ik}$ ——断面 $i$ 至断面 $k$ 之间的流道中心线长度, m

$L_{ak}$ —— $\alpha$ 断面与 $k$ 断面之间的流道中心线长度, m

### 2.2 流道平面宽度变化

取弯曲渐缩段 $\alpha$ 断面的宽度为 $B_a$ ( $B_a \leq B$ ), $k$ 断面宽度与直径 $D_1$ 同( $B_k = D_1$ ),则 $\alpha$ 断面与 $k$ 断面的面积分别为:

$$S_a = B_a h_a - (4 - \pi) r_a^2 \quad (2)$$

$$S_k = \pi D_1^2 / 4 \quad (3)$$

设 $\alpha$ 断面与 $k$ 断面之间的断面面积 $S_i$ 随着流道中心线的长度 $L_{ik}$ 线性变化,则:

$$S_i = S_k + (S_a - S_k) L_{ik} / L_{ak} \quad (4)$$

则弯曲渐缩段的平面宽度 $B_i$ 为:

$$B_i = [S_i + (4 - \pi) r_i^2] / h_i \quad (5)$$

### 2.3 流道型线的变化调整

如流道的型线变化不圆滑过渡,可重新设定流道的基本参数,如 $\alpha$ 断面的过渡圆半径 $r_a$ 、平面宽度 $B_a$ 以及弯曲渐缩段的内外圆半径等。或根据流道的三维紊流数值模拟来调整流道的型线,使其在流动范围内无脱流现象,并控制流道的出口断面参数如流速分布均匀度和偏流角等,使其在理想范围之内。

## 3 肘形进水流道优化设计程序开发

在肘形进水流道的优化设计过程中,为了得到良好的进泵流态,需要不断调整流道的基本参数来优化流道的型线。而每调整一次参数,流道的数学模型就需要重新进行求解,流道的型线就需要重新进行绘制,使得流道的优化设计工作成



为一项十分繁杂的工作,在一定程度上严重影响了流道的优化设计水平。

为了减轻流道优化设计的负担,提升设计的水平,本文针对所建立的肘形进水流道型线的数学模型,开发了基于参数化的肘形进水流道优化设计的应用程序。采用了高级程序设计语言 Visual Basic 开发应用程序,并对工程图形处理软件 AutoCAD 进行二次开发,将 AutoCAD 当成 Visual Basic 程序中的一个图形窗口,可以对其进行打开、绘图、编辑等操作,使得流道型线的计算求解与型线的绘制可以在瞬间完成,降低了流道设计强度。

软件主要分为设计参数输入和读取、设计参数的文件保存、设计结果检查、设计成果的数据输出以及流道型线 CAD 图的绘制几个部分。其中在设计结果检查模块中,主要计算并显示流道进口流速、流道高度和喉部高度的大小以及断面流速变化曲线等,以此初步检验流道型线设计的合理性。在软件的主界面中,所需输入的设计参数为流道的初步设计过程中必须的基本参数,在流道的基本型线确定以后,可以在“高级设置”界面中进行流道的各细部尺寸(例如中隔墩等)的详细设置。

#### 4 肘形进水流道三维紊流数值计算

##### 4.1 数学模型及边界条件

肘形进水流道内部三维紊流采用连续性方程和雷诺平均 N-S 方程描述,并利用标准 k-ε 紊流模型使动量方程闭合<sup>[4-6]</sup>。采用有限体积法,分离式求解各变量离散后的代数方程组;利用 SIMPLEC 算法,解决速度和压力耦合问题,提高迭代计算收敛速度。

计算流场的进口设置在远离流道进口的进水池中,按速度进口条件给定;计算流场的出口设置在离流道出口有相当距离的等径圆管上,出口流动符合充分发展条件,按出流条件给定。流道边壁按标准固壁定律处理。壁面速度满足无滑移条件,粘性底层以外的区域,无量纲速度服从对数分布律<sup>[7]</sup>。忽略进水池自由水面因风引起的切应力及与大气的热交换,其速度和紊动能均按对称边界条件处理。

采用四节点四面体单元非结构化网格,以增强对肘形进水流道弯曲段复杂边界的适应性,如

图 2 所示。



图 2 肘形进水流道网格剖分

##### 4.2 进水流道水力特性评价指标体系

进水流道水力特性包括水泵进水条件和流道水力损失两部分。进水流道的出口即为水泵的进口,为水泵提供良好的进水条件,是进水流道设计的主要目标,同时力求减少流道的水力损失。

(1)水泵的进水条件。水泵的进水条件主要是考查流道出口的轴向流速分布均匀度  $\eta$  和出口水流平均偏流角  $\bar{\theta}$  两个技术指标。 $\eta$  值越大, $\bar{\theta}$  值越小,越符合水泵的设计进水条件, $\eta$  和  $\bar{\theta}$  的计算式为:

$$\eta = \left\{ 1 - \frac{1}{\bar{V}_a} \left[ \sum_{i=1}^n (V_{ai} - \bar{V}_a)^2 / n \right]^{1/2} \right\} \times 100\% \quad (6)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{ai} \operatorname{tg}^{-1} \frac{V_{ti}}{V_{ai}})}{\sum_{i=1}^n V_{ai}} \quad (7)$$

式中  $\eta$ ——出口断面轴向流速分布均匀度

$\bar{\theta}$ ——出口水流速度加权平均偏流角,°

$\bar{V}_a$ ——出口断面上平均轴向流速,m/s

$V_{ti}$ ——出口断面计算单元的切向速度,m/s

$V_{ai}$ ——出口断面计算单元轴向速度,m/s

$n$ ——出口断面上计算单元数

(2)流道的水力损失。流道的水力损失直接影响到水泵装置效率,是评价进水流道的一个重要的经济指标,以流道阻力系数  $S$  作为比较的依据,计算式为:

$$S = \Delta h / Q^2 \quad (8)$$

式中  $S$ ——流道阻力系数, $s^2/m^5$

$\Delta h$ ——进水流道的水头损失,mH<sub>2</sub>O

$Q$ ——流道的过流流量, $m^3/s$

##### 4.3 数值模拟结果分析

国内已建成的某大型泵站,其进水流道为肘形进水,流道的型线采用了四次曲线的形式,并采用 CFD 技术优化后确定了流道的原型线方案。本文针对该大型泵站的控制性尺寸,利用开发出



的肘形进水流道优化设计软件,通过对流道参数进行不断的调整,重新确定了流道新的最佳型线方案,对新方案进行了三维流场的数值模拟,并同时也对原方案进行了数值仿真计算,以比较本文新的型线方案的效果。因两种设计方案的流道控制性尺寸相同,数值计算的网格划分以及边界条件等的划分均相同,因此具有较强的可比性和说服力。

采用 CFD 计算软件 Fluent 对两种方案分别进行了三维流场的数值模拟。图 3 为肘形进水流道原方案及新方案在同一位置的纵剖面等流速分布图的对比;图 4 为两种方案流道出口断面等流速分布图的对比。



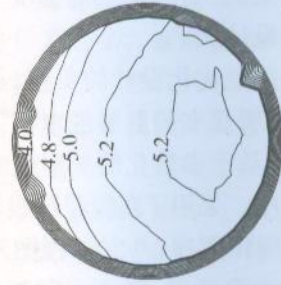
(a) 原优化方案



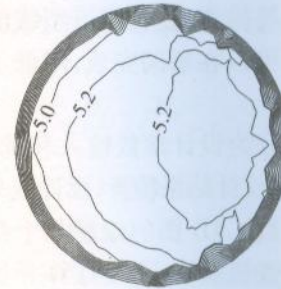
(b) 新优化方案

图 3 流道纵剖面等流速分布图的对比

由图 3 可以看出,原方案为了充分利用流道的高度,使水流有充分的空间在竖直方向上进行调整,故将流道的内外弯曲半径设置得较小。但这违背了水流流动的规律,使得在流道弯曲段外圆弧处以及内圆弧上部都出现了不同程度的脱流。而本文新优化设计方案的型线则过渡较平顺,几乎无脱流现象发生。这种效果同样体现在流道的出口断面流速分布上,由图 4 可以看出,新优化方案的流道出口流速分布明显要好于原优化方案。为了定量分析两种优化方案的肘形进水流道的水力性能,分别对原方案及本文新优化方案的出口轴向流速分布均匀度、出口水流偏流角和水头损失进行了计算,见表 1 所示。



(a) 原优化方案



(b) 新优化方案

图 4 两种方案流道出口断面等流速分布的对比

表 1 肘形进水流道水力性能计算结果

项目	水泵进水条件		流道水头损失 $S$
	$\eta$	$\theta$	
原优化方案	95.21	4.86	$1.165 \times 10^{-4}$
新优化方案	97.89	3.12	$1.013 \times 10^{-4}$

由表 1 可以看出,新优化方案的肘形进水流道的各项水力性能指标均明显好于原方案,说明本文对肘形进水流道的优化设计方法具有明显的优势。

## 5 结语

在流道型线几何建模的基础上,进行了肘形进水流道优化设计软件的开发,同时结合三维紊流数值仿真技术对流道内流场进行了模拟。通过线性渐变的原则确定各断面的过流面积、过渡圆半径和高度,然后计算各断面的宽度,以此确定流道的型线,并可使其遵循流速渐变的原则。通过数值模拟技术对流道的内流场进行仿真计算,可从三维空间对流道的型线进行调整。通过对实际工程的应用实例说明该方法具有一定的优越性。

## 参考文献

- [1] 严登丰. 泵站过流设施与截流闭锁装置[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.

(下转第 26 页)



图9给出了喷嘴在小流量,设计流量及大流量下50%叶高时速度等值线图。可以看出,3种流量下气流在叶片前部流动情况均较为合理,这也表明在该膨胀机内气流对头部形状不敏感,气流在通过喉部后继续加速而后由于相邻尾迹的影响,速度又有所降低,但随着斜切口内气流膨胀后

速度再次增大。对比3种流量下的速度图可以看出:可调叶片喷嘴在大部分流量工况下可以保持较高的流动效率,但在流量较小时体现出来了它变工况性能的劣势,这说明在结构形式和叶片等零部件强度允许的情况下,可以对该叶型进行优化设计,进一步提高其在小流量工况下的性能。

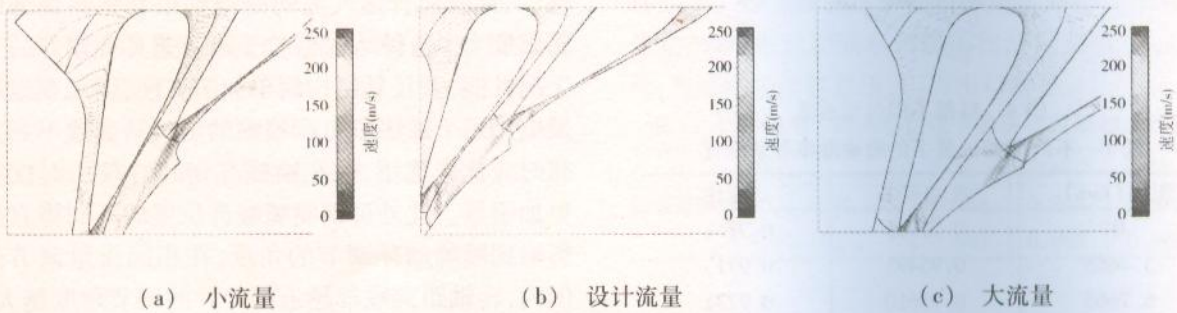


图9 不同流量下叶片喷嘴50%叶高处速度等值线

## 5 结论

(1)研究了可调喷嘴不同头部型线及不同喷嘴喉部位置对气动性能的影响。结果表明:进口速度较低喷嘴的头部型线对其气动性能影响较小,在可调喷嘴设计时应重点考虑结构可行性。跨音速喷嘴的喉部位置对气动性能影响也较小,因此在出口马赫数不是太高时,建议采用喉部位置在相邻出口处的结构形式,在变工况调节时容易保证变工况性能;

(2)所设计的可调喷嘴在60%~110%设计流量调节范围内均具有较高的气动性能。在小流量下,喷嘴出口段的分离损失有所增大,斜切口段的流场更加不均匀,导致了喷嘴性能下降,流动效率低于90%;在大流量下喷嘴出口段的分离损失也有所增大,但增大并不明显,因此流动效率并未明

显下降;

(3)直线圆弧型喷嘴叶片在斜切口处型线简单,加工制造方便,但流动损失较大,可以考虑先进翼型的采用和优化,提高喷嘴性能。

## 参考文献

- [1] 熊联友,候予,王瑾,等.小型低温透平膨胀机直线圆弧喷嘴的设计[J].低温工程,2000,01:32-35.
- [2] Zhang Jizhong, Hu Lifeng. Structural design and flow field analysis of the variable nozzle of turbocharger [A]. BIT-TU Berlin Symposium on Turbocharging Technology [C]. 2006.

作者简介:梁凤(1983-),女,研究生,主要从事能量回收用离心透平膨胀机设计及数值计算的研究,通讯地址:710049 陕西省西安市西安交通大学东区1620信箱。

(上接第22页)

- [2] 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.
- [3] 仇宝云.南水北调工程泵装置理论与关键技术研究[D].江苏大学,2004.
- [4] Constantinescu G S, Patel V C. A numerical model for simulation of pump-intake flow and vortices[J]. Hydr Engng, ASCE, 1998, 124(2): 123-134.
- [5] Constantinescu G S, Patel V C. Role of turbulence model in prediction of pump-bay vortices[J]. Hydr engng, ASCE, 2000, 126(5): 387-391.
- [6] Guo Jia-Hong, Chen Hong-Xun, Lu Jia-Rong. Numerical method for simulation of three-dimensional flow in outlet passage of pump station. Key Engineering Materials, 2003, 243(244): 237-242.
- [7] 陶文铨.数值传热学第2版[M].陕西:西安交通大学出版社,2001.

作者简介:施伟(1980-),男,博士研究生,主要从事泵及泵站工程方面的研究,通讯地址:210029 江苏南京市上海路5号南水北调东线江苏水源有限责任公司。