

# 蜗壳及尾水管周边混凝土轴向布筋拟合技术

杨新军<sup>1,3</sup>, 李 军<sup>1,2</sup>, 韩前龙<sup>1,2</sup>, 刘会波<sup>1,2</sup>, 吕昌伙<sup>1,2</sup>

(1. 国家大坝安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010 3. 长江信达软件技术(武汉)有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**针对水电站厂房中复杂结构的布筋难题,提出了蜗壳及尾水管渐变段曲面三维布筋的实现方法。对混凝土渐变段轴向钢筋采用基于放样的离散法来构造。根据环向钢筋离散点的曲率大小,分别选用直线、圆弧及样条曲线来拟合,其中重点介绍了曲率计算及不同线型的拟合方法。在此基础上开发了能用于蜗壳及尾水管布筋设计的三维 CAD 系统。该系统具有三维钢筋创建及二维施工图和信息表生成功能,显著提高了复杂结构的图纸质量和设计效率。

**关 键 词:**蜗壳; 尾水管; 轴向钢筋; 曲线拟合

**中图法分类号:** TV332

**文献标志码:** A

**DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.17.008

在水电站厂房施工图设计中,蜗壳及尾水管周边混凝土配筋设计十分复杂。钢筋变化多,长度、间距、形状都不尽相同,分组复杂,甚至准确统计出某一根轴向钢筋的长度都极为不易,只能大致估算。上述复杂结构特点降低了设计图纸质量,使现场施工难度加大。因此,专门研究适合于蜗壳及尾水管的布筋实现方法具有非常重要的现实意义。

## 1 曲面结构布筋原理

对于大体积混凝土结构,其钢筋与混凝土结构表面有一个显著的特点,就是平行近似性<sup>[1-2]</sup>。钢筋主要布置在结构表面,其走向和附近混凝土表面或截面的轮廓形状近似,它们之间相距一个保护层距离,这样既可满足结构的受力要求,又可以防止钢筋的锈蚀。蜗壳周边混凝土环向和轴向钢筋的三维配筋模型如图 1 所示。

根据钢筋和混凝土结构表面形状相似性这一特点,对于渐变段的环向受力钢筋采用截面法构造,结构面偏移一个保护层距离后,通过若干垂面截切偏移后的结构面,得到一系列的截交线,这些截交线就是环向的初始钢筋线。对于渐变段的轴向钢筋采用类似基于

放样建模的离散法构造,即先将环向钢筋离散,不同环向钢筋对应的离散点集可表示一根轴向钢筋,选择合适的曲线拟合这些表示轴向钢筋的离散点,就可以得到轴向钢筋(图 2)。本文重点介绍轴向钢筋的拟合生成方法。

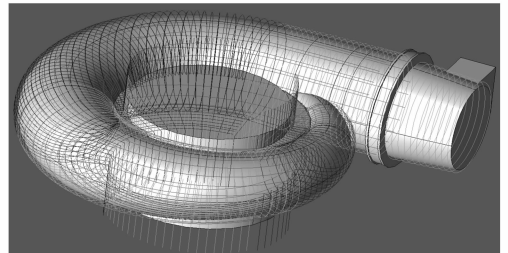


图 1 蜗壳模型及钢筋布置

## 2 轴向钢筋拟合技术

环向钢筋离散后,得到多组离散点,不同环向筋对应的离散点可以用来构造轴向钢筋。实际图纸中要求尽量用直线、圆弧或样条曲线描述钢筋形状。为此,根据环向筋离散点来拟合轴向钢筋线的步骤如下:① 离散环向钢筋线,并将离散点坐标的  $Z$  值变为相同;② 采用三次样条插值的计算方法算出离散点的曲率;③

根据曲率的变化情况,选择合适的曲线去拟合这些离散点,如直线、圆弧或样条等;④ 将钢筋形状用上述直线、圆弧或样条表达。

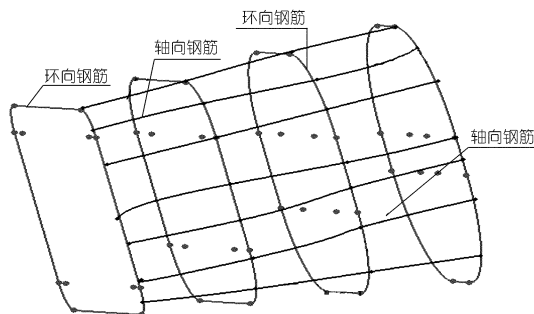


图2 轴向钢筋基于环向钢筋上的离散点拟合生成

## 2.1 离散点坐标值的Z轴变换

曲率是二维平面问题,而每组离散点坐标是空间的,为便于曲率计算和比较,需先对每一组离散点所在的平面进行坐标变换,使该平面与坐标系基准平面平行。本文中将该平面的z向坐标值都变换为相同,这样后面只需根据离散点坐标变换后新的x,y坐标值计算曲率。

如果该组离散点所在的平面与某坐标轴垂直,则可以简化计算,只用考虑与该平面平行的两个坐标方向的值。当该平面与任一坐标轴均不垂直时,通过坐标变换,将该平面的法矢变换为与某轴(如z轴)的正方向相同,则离散点经过同样的变换之后,可以保证得到变换离散点位于一张与上面坐标轴垂直的平面上<sup>[3]</sup>。对于任意一个平面法向量 $p(x, y, z)$ ,可以经过两次坐标变换,将 $p$ 的方向转化为与某个坐标轴方向平行。图3所示为坐标变换示意图,图3(a)为任意一个向量 $p$ ,为了将 $p$ 变换为与z轴正向一致,用了两次变换的方法。

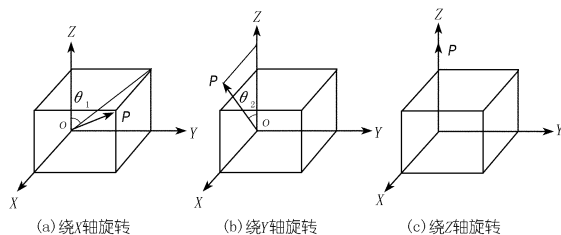


图3 离散点的坐标转换

## 2.2 离散点曲率的计算

根据离散点曲率的变化情况确定该组离散点选择哪种曲线来拟合,即选择合适类型的线来表示钢筋。在绝大多数实际情况下,直线或圆弧足以拟合各类钢筋;但在曲率变化不均匀时,需要用多个线段或者不同半径的圆弧来表示,为简化成一条线,这时用一段样条曲线表示,本文选用三次准均匀B样条曲线<sup>[4]</sup>。

本程序采用 Medioni 和 Yasumoto 的算法<sup>[5]</sup>。该算法采用三次B样条函数插值连续数据点,用三次样条插值函数来近似每个数据点处的曲线表示,然后计算数据点的曲率,进而根据曲率选择用合适的曲线去拟合这些离散点<sup>[6]</sup>。

考虑到点的局部性,为了减少偶然因素造成的误差,考虑间隔选择数据点来计算点的曲率<sup>[7]</sup>。应用实践表明,用这种方法计算出的曲率将减少由于局部离散点的数据误差带来的影响,比用连续的离散点来计算曲率方法的计算结果更可靠,精度也足以保证。

## 2.3 直线段钢筋的拟合

对离散点的曲率进行计算,得到多组离散点的曲率。设其中一组离散点的曲率为 $(c_{v,1}, c_{v,2}, \dots, c_{v,i}, \dots, c_{v,n})$ ,设 $\xi$ 表示一个极小值。如果 $(|c_{v,1}| + |c_{v,2}| + \dots + |c_{v,i}| + |c_{v,i+1}| + \dots + |c_{v,n-1}| + |c_{v,n}|) \leq \xi$ ,则认为该组离散点的曲率近似于等于零,通过该处的钢筋为直线钢筋,将该部分离散点用直线拟合。本程序采用最小二乘法进行直线拟合。

## 2.4 圆弧段钢筋的拟合

对离散点的曲率进行计算,得到多组离散点的曲率。设其中一组离散点的曲率为 $(c_{v,1}, c_{v,2}, \dots, c_{v,i}, \dots, c_{v,n})$ ,设 $\xi$ 表示一个极小值。如果 $(|c_{v,1} - c_{v,3}| + |c_{v,2} - c_{v,3}| + \dots + |c_{v,i} - c_{v,3}| + |c_{v,i+1} - c_{v,3}| + \dots + |c_{v,n-1} - c_{v,3}| + |c_{v,n} - c_{v,3}|) \leq \xi$ ,则认为 $(c_{v,1}, c_{v,2}, \dots, c_{v,i}, \dots, c_{v,n})$ 都近似于相等且不为零,即该组离散点的曲率认为都近似于相等且不为零,这时通过该处的钢筋为圆弧,将该部分离散点用圆弧拟合。

## 2.5 三次准均匀B样条曲线拟合

对于曲率变化不均匀或没有规律、很难用一根直线或圆弧去拟合的离散点,采用三次准均匀B样条曲线去拟合该组离散点,可避免出现太多段直线或圆弧表示的钢筋。

NURBS是目前流行的自由曲线与自由曲面的表达方式,但是其生成原理和表达式相对较为复杂。三次均匀B样条曲线由于能够满足一般工程问题的需要且计算简便,成为工程上广泛采用的曲线构造方法。三次均匀B样条曲线的端点不通过特征多边形首、末顶点,也不直接与特征多边形的首边和末尾边发生关联,但是在拟合离散点的过程中,需要将离散点的首、末两点作为B样条曲线的首、末两点。为了达到此要求,采用工程上通用的三次准均匀B样条曲线去拟合曲率变化没有规律的多组离散点。

对离散点进行B样条曲线拟合的过程,是由控制点产生B样条曲线的反过程。B样条曲线的拟合过程

定义如下。

对一组  $m + 1$  个数据点  $p_i = [x_i, y_i, z_i] (i = 0, 1, \cdots, m)$ , 用  $n$  个控制顶点  $d_i = [d_{x,i}, d_{y,i}, d_{z,i}] (i = 1, 2, \cdots, n)$  构成的三次准均匀 B 样条曲线去插值它们, 取节点矢量为  $U = [u_0, u_1, u_2, \cdots, u_{n+k+1}]$ , 这样可以得到如下方程组

$$U = [u_0, u_1, u_2, \cdots, u_{n+k+1}] \tag{1}$$

其中  $u_j$  为数据点  $p$  在参数域上的参数,  $k = 3$  首末节点取重复, 即  $u_0 = u_1 = u_2 = u_3 = 0, u_{n+1} = u_{n+2} = u_{n+3} = u_{n+4} = 0$ , 这样可以保证曲线插值于首末端点。对于水工进出口渐变段的轴向钢筋, 都是开曲线, 因此可以增加两个边界条件

$$\begin{cases} \vec{p}_0 = \frac{3}{\Delta_3}(\vec{D}_1 - \vec{D}_0) \\ \vec{p}_m = \frac{3}{\Delta_n}(\vec{D}_n - \vec{D}_{n-1}) \end{cases} \tag{2}$$

式中,  $\Delta_i = u_{i+1} - u_i$ 。将方程组(1)和(2)组成一个方程组, 写成矩阵形式

$$P = N \cdot D \tag{3}$$

式中

$$N = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ N_{1,3}(u_0) & N_{2,3}(u_0) & \cdots & \cdots & N_{0,3}(u_0) \\ N_{1,3}(u_1) & N_{2,3}(u_1) & N_{3,3}(u_1) & \cdots & N_{0,3}(u_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{1,3}(u_{m-2}) & \cdots & \cdots & N_{n-3,3}(u_{m-2}) & N_{n-2,3}(u_{m-2}) \\ N_{1,3}(u_{m-1}) & \cdots & \cdots & N_{n-3,3}(u_{m-1}) & N_{n-2,3}(u_{m-1}) \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$P = \begin{bmatrix} \frac{\Delta_3}{3}x_0 & \frac{\Delta_3}{3}y_0 & \frac{\Delta_3}{3}z_0 \\ x_0 & y_0 & z_0 \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m-1} & y_{m-1} & z_{m-1} \\ \frac{\Delta_n}{3}x_m & \frac{\Delta_n}{3}y_m & \frac{\Delta_n}{3}z_m \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} d_{x,0} & d_{y,0} & d_{z,0} \\ d_{x,1} & d_{y,1} & d_{z,1} \\ d_{x,2} & d_{y,2} & d_{z,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{x,n-1} & d_{y,n-1} & d_{z,n-1} \\ d_{x,n} & d_{y,n} & d_{z,n} \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中,  $P$  为  $(m + 3) \times 3$  阶矩阵,  $D$  为  $(n + 1) \times 3$  阶矩阵,  $N$  为  $(m + 3) \times (n + 1)$  阶矩阵。在解上述方程组的时候, 如果蜗壳环向筋离散数据点比较少的时候, 取  $n = m + 2$ , 这样就可插值一条 B 样条曲线。当数据点比较多时, 通常  $n < m + 2$ , 因此方程组(5)为超定方程组, 没有精确解。本文采用最小二乘法去拟合它的解, 也就是使准三次均匀 B 样条曲线  $P(u)$  上具有参数值  $u_k$  的点  $P(u_k)$  与对应数据点  $p_k$  间的距离平

方和  $D_{dis}$  达到最小。

$$D_{dis} = \sum_{k=0}^m |p(u_k) - p_k|^2 = D_{dis,x} + D_{dis,y} \tag{6}$$

其中,  $D_{dis,x} = \sum_{k=0}^{m-1} (\sum_{i=0}^{n-1} x_i n_{i,k} - \overline{x_k})^2, D_{dis,y} = \sum_{k=0}^{m-1} (\sum_{i=0}^{n-1} y_i n_{i,k} - \overline{y_k})^2$ , 要使  $D_{dis}$  的值最小, 也就是使  $D_{dis,x}$  和  $D_{dis,y}$  的值最小, 则下列偏导数的值为零

$$\begin{cases} \frac{\partial D_{dis,x}}{\partial x_j} = 0 \\ \frac{\partial D_{dis,y}}{\partial y_j} = 0 \end{cases} \quad j = 0, 1, 2, \cdots, m - 1 \tag{7}$$

从上式可推出高斯正交方程组  $N^T N D = N^T P$ , 其中矩阵  $N^T$  是  $N$  的转置矩阵。由于  $N$  是满秩的, 方程存在唯一解。所以得到最小二乘法拟合的准均匀三阶 B 样条曲线控制点的求解方程为  $D = (N^T N)^{-1} N^T P$ , 其中  $(N^T N)^{-1}$  是矩阵  $N^T N$  的逆矩阵。

利用上述条件就可以拟合出一条最小二乘的准均匀三次 B 样条曲线。通过拟合的准均匀三次 B 样条曲线可以将曲率变化不规律的离散点用一条曲线在三维布筋 CAD 系统中创建钢筋, 并方便工程人员查看配筋效果, 对钢筋进行可视化管理和交互操作。

3 结 语

针对传统水工配筋设计存在的不足, 考虑到蜗壳、尾水管中曲面钢筋的特点, 提出曲面渐变段三维布筋的解决方案, 并重点介绍了蜗壳尾水管周边混凝土中轴向钢筋线拟合生成的方法。运用本方法开发的布筋 CAD 系统可成功实现蜗壳和尾水管周边混凝土结构的环向和轴向钢筋的三维创建、二维施工图和信息表自动生成, 提高了水工结构图纸质量和设计效率。

参考文献:

[1] 刘会波, 杨新军, 李军, 等. 蜗壳及尾水管复杂空间曲面三维布筋方法及应用[J]. 人民长江, 2015, 46(16): 34-37.  
[2] 许百立. 水利水电勘测设计计算机应用的回顾与展望[J]. 水力发电, 1995, (2): 4-7.  
[3] 汪树玉, 刘国华, 陈福林, 等. 计算机辅助设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.  
[4] 童秉枢. 现代 CAD 技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.  
[5] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
[6] Cox M G. The numerical evaluation of B-Splines[J]. J. inst. Maths. Applications, 1972, 10: 134-149.  
[7] Farouki R T, Neff C A. Analytic properties of plane offset curves[J]. Computer Aided Geometric Design, 1990, 7(1-4): 83-99.

(编辑: 郑毅)

2010 年汛后加固防护的部位未出现险情,但上游围堰堰前出现了横向回流,上游围堰左侧局部坍塌。主要是因为上游横向围堰左端堰脚前 200 ~ 300 m 宽的滩地(原滩地顶高程 35.5 m 左右)经 2010 年洪水冲刷后河床最低高程达到 22 m 左右,冲刷严重所致。险情发生后,采用大块石进行抛填加固,险情得到有效控制。

4 结 语

(1) 兴隆水利枢纽坝址河段粉细沙覆盖层深厚,抗冲能力弱、透水性强。实践表明,导流明渠采用“守点护线”的防护原则,并结合运行过程中明渠的冲淤变化,及时对防护措施进行补充,解决了导流明渠的防

冲保护问题,也减小了因冲淤变化带来的风险。

(2) 在深厚粉细砂层上修建围堰,采用全截渗防渗墙是必要的。该工程围堰采用圈式布置全截断的防渗方案,避免了渗透稳定破坏,减小了基坑抽水量,有效保障了主体工程的顺利实施。

参考文献:

[1] 王智娟. 南水北调中线工程汉江兴隆水利枢纽水工整体模型试验研究报告[R]. 武汉:长江科学院,2005.  
[2] 黄建成. 汉江兴隆水利枢纽工程河工模型试验报告[R]. 武汉:长江科学院,2005.  
[3] 刘志雄. 汉江兴隆水利枢纽导流建筑物补充水力学模型(1:100)试验成果报告[R]. 武汉:长江科学院,2008.

(编辑:徐诗银)

Design and practice of construction diversion of Xinglong Hydro – junction on Hanjiang River

ZHAN Jinhuan, LI Heng, ZHANG Qian

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The river channel of Hanjiang River at Xinglong Hydro – junction site is wide. The main channel is on the middle – right part with low or high beach at both banks. 2 – staged diversion was adopted in the construction of the project. Due to thicker overburden layer composed of fine sand with sandy loam, thick fine sand etc. , the foundation has low anti – scouring and strong permeability, so the anti – scouring and cofferdam seepage prevention are 2 key technical issues in diversion construction. Through the hydraulic and sediment tests as well as 2D seepage calculation, the principle of "preventing the point from souring and protecting the line" was adopted, so the anti – scouring problem was solved. The full cut plastic concrete cutoff wall was applied for the transversal cofferdam and 2 longitudinal cofferdams with the layout form of full closed circular, which avoided the seepage stability failure. The problems occurred in the design and operation of the project and treatment measures are briefed to provide reference for other similar projects.

**Key words:** construction diversion scheme; diversion open channel; cofferdam; operation and practice; Xinglong Hydro – junction

(上接第 35 页)

Fitting technology of axial reinforcing bars in concrete of spiral case and tailrace conduit of hydropower stations

YANG Xinjun<sup>1,3</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>, HAN Qianlong<sup>1,2</sup>, LIU Huibo<sup>1,2</sup>, LU Changhuo<sup>1,2</sup>

(1. National Dam Safety Research Center, Wuhan 430010, China; 2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co. , Ltd. ,Wuhan 430010, China; 3. Changjiang Schinta Software Technology Co. , Ltd. , Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulties in the layout of reinforcing bars of complicated structures of hydropower stations, a realization methodology for three – dimensional layout of reinforcing bars in transition section of spiral case and tailrace conduit of hydropower station is proposed. The discrete method on the basis of lofting is used to generate the layout form of axial reinforcing bars in the concrete, and then the straight line, arc and spline curves are adopted to fit the bars according to the curvature of discrete points of circular bars. The fitting methods of various curve types as well as curvature calculation are mainly introduced. Based on the results, a three – dimensional reinforcing bars design CAD system for spiral case and tailrace conduit is developed, which improves the quality and design efficiency of the complex structure.

**Key words:** spiral case; tailrace conduit; axial reinforcing bars; curve fitting