

蜗壳及尾水管复杂空间曲面三维布筋方法及应用

刘会波^{1,2}, 杨新军^{1,3}, 李 军^{1,2}, 吕昌伙^{1,3}

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

摘要:水电站蜗壳及尾水管由复杂空间曲面构成, 体型结构十分复杂, 二维配筋设计工作量大, 效率低。基于“三维配筋设计、二维出图”的设计思想, 根据蜗壳及尾水管空间曲面特征及配筋特点, 考虑到布筋形状与混凝土结构面具有相似性这一特点, 对曲面渐变段提出基于截面法的横向布筋方法及基于离散重构法的纵向布筋方法。工程实例表明, 该方法可实现蜗壳及尾水管复杂空间曲面三维配筋设计, 可有效提高设计效率和出图质量。可为复杂体型结构三维布筋设计提供参考。

关键词:三维布筋; 蜗壳; 尾水管; 空间曲面; 计算机辅助设计

中图法分类号: TV314

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.16.009

1 研究背景

蜗壳和尾水管是水电站厂房结构的重要组成部分, 由复杂的空间曲面构成。为尽量减小水力损失及厂房尺寸, 降低土建投资, 通常在设计时使沿管线方向各断面呈现不规则的流线型变化, 体型结构十分复杂。采用传统方式进行结构配筋设计制图时, 需要极强的空间想象能力, 钢筋变化多, 长度、间距、形状都不尽相同, 分组复杂, 控制位置关系表达困难, 甚至准确计算出某一根钢筋长度都极为不易, 导致绘图工作量大、工作效率低, 且图纸质量受影响, 给现场施工造成困难。

为更好地利用计算机辅助制图, 提高复杂水工结构配筋设计的质量及效率, 国内外科研设计机构研发了一些水工配筋 CAD 系统^[1-4], 起到了一定的改善作用, 但是仍存在问题: 比如不同结构适用面有限; 基于二维绘图环境, 不直观、不方便, 钢筋信息不够丰富, 可视化程度低; 钢筋类型具有限制, 且无法自定义; 无法对蜗壳、尾水管复杂曲面结构进行配筋设计。

鉴于此, 本文遵循“三维配筋设计、二维出图”的设计思想, 研究了蜗壳及尾水管结构特点及其配筋特性, 提出了曲面渐变段三维布筋方法, 并进行工程应

用, 以实现复杂空间曲面结构的高效配筋设计。

2 三维配筋设计

三维配筋设计即是在三维模型基础上进行配筋设计, 并按照设计要求实现三维设计结果向二维施工详图的自动转化, 同时完成材料表、钢筋表等的自动统计和绘制工作^[5]。

蜗壳及尾水管曲面渐变段三维配筋设计的流程见图 1。

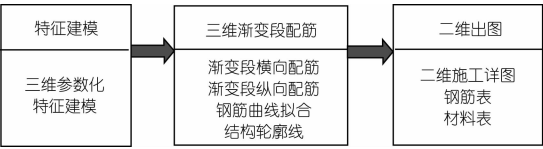


图 1 蜗壳及尾水管曲面渐变段三维配筋设计流程

(1) 特征建模。利用特征参数化造型技术建立蜗壳、尾水管的三维混凝土模型, 此为结构配筋设计的基础。

(2) 曲面渐变段结构配筋。依据三维模型曲面形状进行表面钢筋布设, 用曲线拟合钢筋位置离散点; 定义剖面位置, 为二维出图做准备。

(3) 二维出图。根据用户定义的剖面自动生成二

收稿日期: 2015-07-04

基金项目: 国家大坝安全工程技术研究中项目“蜗壳及尾水管三维布筋系统技术开发”(CX2013Z04)

作者简介: 刘会波, 男, 工程师, 博士, 主要从事水电站建筑物及岩土工程设计研究方面的工作。E-mail: hbliuaaa@163.com

维施工详图,完成标注、钢筋及材料信息统计等,并能够进行交互式信息修改。

充分结合蜗壳及尾水管的体型特征和配筋要求,三维结构模型构建、三维布筋设计及二维出图均在三维平台上进行。限于篇幅,本文仅对三维布筋方法进行详述。

3 渐变段三维布筋方法

3.1 相似性原理

水工结构是大体积混凝土结构,钢筋与混凝土结构表面具有平行近似性特征。钢筋一般布置于结构表面下,钢筋布置走向和混凝土结构表面或横截面的形状轮廓近似,见图 2。根据此相似性,构造钢筋时,可根据钢筋分布排列方式,沿结构表面快速生成钢筋线。钢筋形状为带有一定粗度的钢筋实体扫掠路径的形状,即钢筋的中心轴线形状。为防止钢筋锈蚀,钢筋与结构表面之间一般设置一定厚度保护层。

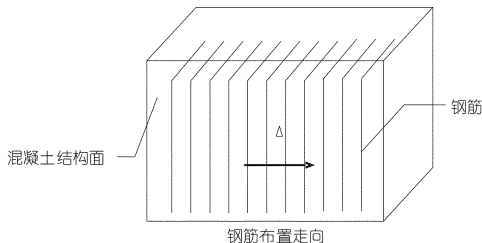


图 2 结构与钢筋的相似性特征

在蜗壳及尾水管结构设计中,需同时布置横向钢筋及纵向钢筋,以满足结构力学性能及构造要求。其中横向筋多为主受力筋,一般沿垂直于渐变段轴线方向布置;纵向钢筋多为架立筋,一般沿平行于空间曲导线的方向布置。

依据结构与钢筋的相似性特征,在三维模型中,横向钢筋布置可通过构造一系列垂直于管轴线方向与混凝土结构面相交的截切面,得到一系列的截交线,这些截交线的形状和所需钢筋的形状相似,对截交线进行一定的处理(如钢筋锚固等)即可得到相应的钢筋形状,此为截面法。纵向钢筋布置取决于渐变段模型的生成方式,本文中,渐变段模型的结构表面是通过点放样、插值得到的,因此,纵向配筋需在横向配筋后,先按照渐变段形状将横向配筋离散化,然后,通过曲线拟合离散点生成钢筋,再进一步对拟合曲线进行一定的处理,即可得到纵向钢筋形状,此为离散重构法。

3.2 横向布筋方法

基于截面法的钢筋构造方法是一种比较基本且通用的配筋方式^[6-7]。通过截面法构造钢筋,需将钢筋

放在相对混凝土结构表面偏移一个保护层厚度处,也就是将曲线作为相对于混凝土结构的等距曲线。等距曲线也称为平行或位差曲线,是基曲线沿法向距离为 d 的点的轨迹。等距曲线的代数次数相当高^[8-9],且一般不再具有原基曲线曲面的相同类型。除直线、圆弧以外,有理曲线的等距偏置一般无法表示为有理形式,从而无法被通用的 CAD 系统处理。蜗壳及尾水管渐变段钢筋一般要用样条曲线表示,其等距曲线很难通过曲线偏移的方式得到。因此,对于曲面和平面以及曲面和曲面相交的情况,提出“曲面偏移-平面切片-钢筋锚固”的钢筋生成方法,具体步骤如下。

(1) “曲面偏移-平面切片”。设曲面 S 上的一点 P ,沿着 S 在这点的法线的正(负)方向移动一段距离 λ ,则得到点 P^* 的轨迹 S_λ 称为 S 的等距曲面。如果已知曲面 S 的方程为

$$r = r(u, v) \quad (1)$$

则等距曲面 S_λ 的方程为

$$r^* = r(u, v) + \omega \lambda n(u, v) \quad (2)$$

其中, n 是曲面 S 的单位法向量, λ 是一正的常数且 $\lambda \neq 0$, $\omega = \pm 1$ 。

当通过曲面相交得到样条曲线时,先对曲面按照式(2)进行等距偏移,得到偏移后的曲面。

根据用户交互输入的配筋方向和钢筋间距,构造切平面;然后对切平面和偏移得到的曲面求交集,该交线即为表示钢筋的曲线,即先曲面偏移后平面切片得到的交线,见图 3。

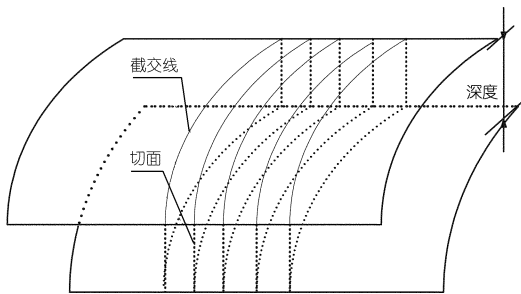


图 3 “曲面偏移-平面切片”的交线

(2) 钢筋锚固。钢筋混凝土结构内主受力钢筋主要承受拉力,混凝土承受压力。为改善钢筋受力条件,一般对钢筋作延伸处理,从而增加钢筋与混凝土之间的粘结面积,使钢筋较大限度地发挥抗拉作用。

结合钢筋在路径两端点处与混凝土结构面的关系,对上步中生成的非闭合钢筋路径链的起点和终点进行延伸或增加焊接段处理,即钢筋锚固处理;对于闭合钢筋路径链,则无需此步操作。不同混凝土结构面形状,钢筋锚固处理方式和结果不同,应根据混凝土结构面的几何拓扑条件,自动决定钢筋段的延伸或增加

钢筋段。如图 4 中,由于混凝土结构面的法矢方向相反,则其起始端和终止端的钢筋延伸和增加焊接或绑扎处理完全相反。

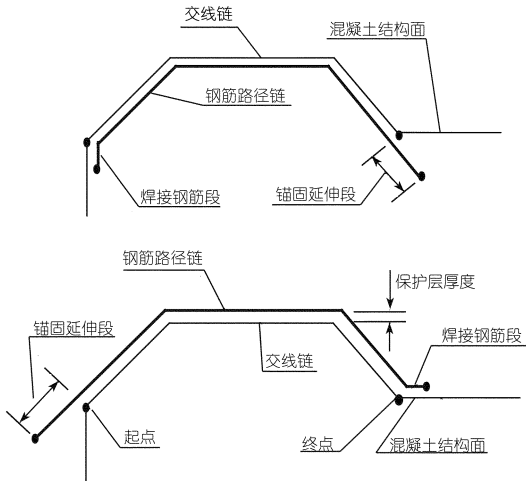


图 4 钢筋锚固处理

3.3 纵向布筋方法

纵向钢筋为分布筋,一般沿平行于空间曲导线的方向布置。蜗壳及尾水管均为流线型体型,因过水条件要求,沿管线方向实际的结构表面为渐变曲面,无法用特定的数学解析式表达,通常是通过保证一系列平面截面形状来确保整个空间曲面体型的正确。

其三维实体模型采用点面放样的方式构筑,即构造一系列截面的有序环 w_1, w_2, \dots, w_n , 其集合表示为 W_{set} , 称为环集; 每个环由一系列顺序排列的边组成, 即 $w_i = \{E_{i,j}\}$, 一个环就是一个闭链; 则放样的实体环集为 $W_{set} = \{\{E_{i,j}\}\}$, 见图 5。

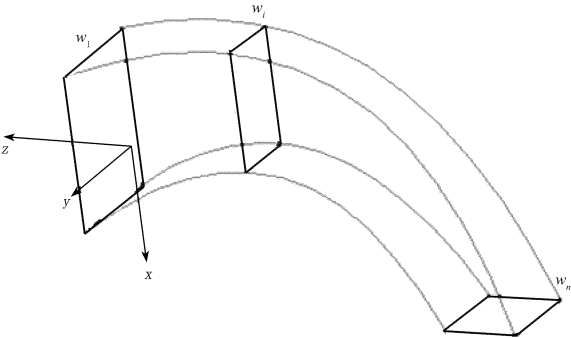


图 5 放样方法构造的实体示意

因无规律可循,考虑渐变段纵向布筋采用与结构放样建模相似的方法,即离散重构法。其核心思想为横向钢筋离散化,以离散点作为纵向钢筋的放样点,通过点重组、曲线拟合及插补生成钢筋线。具体步骤为:“横向钢筋分块→横向钢筋离散化→离散点重组→曲线拟合离散点→插补钢筋→钢筋锚固”。以常见的圆

变方渐变段布筋为例,纵向布筋算法如下:已知一个由环集 $W_{set} = \{w_i | 1 \leq i \leq n\} = \{\{E_{i,j}\}\}$ 表示渐变段横向配筋集合,见图 6。

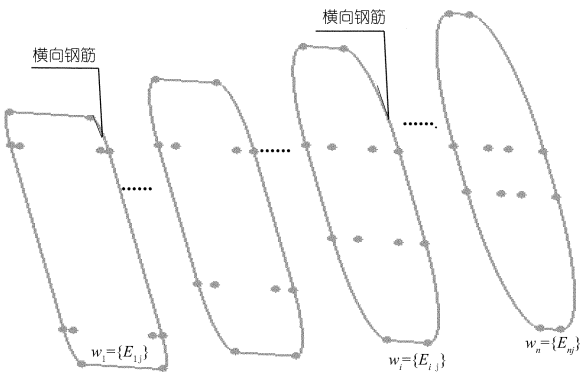


图 6 渐变段横向钢筋

(1) 横向钢筋分块。根据渐变段形状和实际受力要求,将渐变段分成对称的等分块。如本文示例分为 8 块,构造 4 个参考平面,将渐变段横向钢筋 W_{set} 分成 8 个部分 $W_{1set}, W_{2set}, \dots, W_{8set}$ 。

(2) 横向钢筋离散。根据轴向钢筋的间距 $Dist_{Min-Bar}$, 对横向钢筋的每个部分 W_{iset} 进行等距离散化,得到离散点集。

(3) 离散点重组。根据钢筋段数将离散点分组,即将段数相同的离散点分为一组。

(4) 离散点拟合。根据离散点曲率不同,分别采用直线、圆弧或者样条曲线拟合离散点,生成钢筋线。曲率均为 0 时,拟合曲线采用直线;曲率相等且不等于 0 时,拟合曲线采用圆弧;曲率不等时,拟合曲线采用三次准均匀 B 样条曲线。

(5) 插补钢筋。由于横向钢筋离散化时,分段是按最短钢筋长度进行划分的,对于截面面积较大的洞段,可能会造成纵向钢筋间距较大,因此,需要根据离散点间距大小进行钢筋插补。当相邻离散点间距大于最大设计间距时,即 $Dist_{dis} \geq Dist_{MaxBar}$, 两点之间插补 1 根钢筋,直至所有相邻离散点间距均满足设计间距为止。

(6) 钢筋锚固处理。采用离散重构法实现纵向钢筋分布,如图 7 所示。

4 工程实例

采用本文提出的三维布筋方法,开发了基于面向对象的三维布筋 CAD 系统,并在马来西亚沫若水电站蜗壳及尾水管钢筋图设计过程中进行了应用。上述方法能很好地实现蜗壳及尾水管的环向钢筋与架立钢筋的布设功能,满足环向钢筋和水流向钢筋的曲线、弯

折、锚固、间距等细节要求,相比传统二维钢筋图设计,设计效率有很大提高。

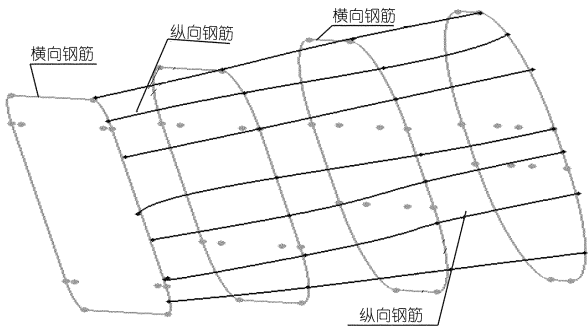


图 7 横向钢筋的离散与纵向布筋

5 结语

水电站蜗壳及尾水管由复杂空间曲面构成,体型结构十分复杂,传统二维配筋设计方法效率低、工作量大。本文基于“三维配筋设计、二维出图”的设计新思想,根据蜗壳及尾水管结构混凝土结构面与钢筋形状相似的原理,提出了曲面渐变段三维布筋的解决方法,并通过面向对象程序得以实现。对于渐变段横向配筋,提出以“曲面偏移→平面切片→钢筋锚固”为思路的钢筋生成方法,即截面法。对于渐变段纵向配筋,提出以“横向钢筋分块→横向钢筋离散化→离散点重组→曲线拟合离散点→插补钢筋→钢筋锚固”为思路的钢筋生成方法,即离散重构法。

在马来西亚沫若水电站蜗壳及尾水管结构中钢筋布设的应用实例表明,本文所提方法能够快速、高效实现环向钢筋和水流向钢筋的曲线、弯折、锚固、间距等细节要求,满足环向钢筋与架立钢筋的功能,较大提高了设计效率。

参考文献:

- [1] 张玉峰,丁宇明.大体积水工结构配筋 CAD 研究[J].计算机辅助设计与图形学学报,2002,14(4):375-379.
- [2] 刘农,张振鑫,黄俊发,等.多孔水闸 CAD 系统[J].河海大学学报,1998,26(6):21-25.
- [3] 王启富,张红,陈刚.面向配筋 CAD 的水工结构分析可视化系统研究[J].小型微型计算机系统,2006,27(4):727-731.
- [4] Raghavan K. 3D Modeling for Computer - Integrated Construction of RC Structures[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1997, 11(2): 92-101.
- [5] 杨新军,朱文婷.水工结构全自动布筋设计方法[J].水利水电科技进展,2012,32(2):70-72.
- [6] 左丽.水工建筑物进出口渐变段直线扭曲面展开技巧[J].水利水电技术,2005,36(5):46-47.
- [7] 新萍,欧阳建国.水工渐变段设计与计算机图形处理[J].武汉大学学报:工学版,2007,40(5):95-102.
- [8] Farouki R T, Neff C A. Analytic properties of plane offset curves[J]. Computer Aided Geometric Design,1990,7(1-4):83-99.
- [9] 方忆湘,刘文学.基于几何特性的三次均 B 样条曲线构造描述[J].工程图学报,2006,(2):96-102.

(编辑:郑毅)

Application of three - dimensional reinforced bar arrangement method for complex space surface of spiral case and tailrace conduit

LIU Huibo^{1,2}, YANG Xinjun^{1,3}, LI Jun^{1,2}, LU Changhuo^{1,3}

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

Abstract: The spiral case and tailrace conduit in hydropower stations are constituted of complex space surfaces and the structure is extremely complicated. Thus the reinforced bar design under two - dimensional environment is labor and time consuming. According to the above problems, considering the shape of reinforced bar and the concrete surface is similar, the lateral reinforcement design based on sectional method and axial reinforcement design based on discrete reconstruction method are presented respectively aiming at the curved transition section, based on the thought of "three - dimensional reinforcement design, two - dimensional drawing". The engineering practices show that the presented methods could realize three - dimensional reinforcement design of spiral case and tailrace conduit with high efficiency and good drawing quality and it has reference for other reinforcement design of structures with complex shape.

Key words: three - dimensional reinforcement design; spiral case; tailrace conduit; space surface; computer aided design