

文章编号：0258-0926(2021)03-0103-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.03.0103

# 三维可视化核电安全壳配筋系统研究与应用

张 洁, 周建秋, 许心炜, 刘全昌

中广核工程有限公司核电安全监控技术与装备国家重点实验室, 广东深圳, 518772

**摘要:** 依托在建核电项目, 在国际通用的工厂设计软件 PDMS 基础上, 设计和研发三维可视化核电安全壳配筋系统, 研究数字化智能配筋算法, 通过软件驱动配筋计算方程, 进行安全壳配筋可视化、数字化、自动化设计, 并以三维数据为基础实现高效的二维抽图等设计数据输出功能。研究成果在项目上的应用不仅提高了三维设计精度和效率, 同时极大提高了设计质量, 具有一定的推广应用意义。

**关键词:** 安全壳配筋; 可视化; 数字化; 自动化

**中图分类号:** TL48 **文献标志码:** A

## Research and Application of 3D Visual Reinforcement System for Nuclear Power Containment Shell

Zhang Jie, Zhou Jianqiu, Xu Xinwei, Liu Quanchang

State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, China Nuclear Power Engineering Company (CNPEC), Shenzhen, Guangdong, 518772, China

**Abstract:** Based on the nuclear power project under construction, a three-dimensional visualized reinforcement system for nuclear power containment is designed and developed on the basis of PDMS which is an international general plant design software, and a digitized reinforcement algorithm is studied. The visualization, digitalization and automation of reinforcement design of containment shell are carried out by program-driven reinforcement calculation equation and based on 3D data to realize the highly efficient output of engineering data such as two-dimensional drawing. The application of the research results in the project not only improves the accuracy and efficiency of the three-dimensional design, but also greatly improves the design quality, which has a certain significance of popularization for application.

**Key words:** Containment reinforcement, Visualization, Digital, Automation

### 0 引言

由于安全壳带有大型闸门及其他数以百计的贯穿件, 内壳还布置着横竖两层不规则形状的预应力钢筋, 其钢筋布置非常复杂, 特别是加厚区和补强区的配筋布置更复杂, 给安全壳筒体配筋设计带来很大的困难。

随着核电技术的发展, 对工程设计精度要求越来越高, 常规二维设计已难以满足实际核电站工程设计需要。关于核电配筋三维设计的研究,

国内外许多相关的单位公司已经开展了一系列工作, 取得了一些实际的应用。美国 Bentley<sup>[1]</sup>公司 MicroStation 系统的 Rebar、华东勘测设计院的 RESTATION<sup>[2]</sup>和中国建筑科学研究院的 PKPM 都是典型的三维设计和协同设计平台。

为满足核电多项目设计的要求, 建立三维设计和协同设计平台已经成为国内核电设计院的首要任务, 而建立三维设计和协同设计平台必须考虑的技术因素有: 三维设计软件与核电设计专

收稿日期: 2020-04-21; 修回日期: 2020-06-20

作者简介: 张 洁 (1972—), 男, 高级工程师, 现主要从事核电设计平台及工具建设方面的研究, E-mail: zhangjie@cgnpc.com.cn

业的相容性；新软件和工作的高效性；三维设计和协同平台应用过程中的质量保证要求<sup>[3]</sup>。通过多平台的分析比较，已有的工厂设计软件 PDMS 平台在数据协同、二次开发以及应用中的质量保证都较为适用。因此，本文提出基于 PDMS 平台研发三维可视化、数字化、自动化核电安全壳配筋系统。

## 1 安全壳配筋系统软件设计

### 1.1 系统架构设计

采用 PDMS 平台自身的 PML 和 .net 语言开发的三维可视化安全壳配筋系统结构见图 1，设计流程如下：

(1) 标准钢筋库：钢筋库创建的关键在于求解其几何参数关系式，从而获得钢筋的驱动方程。在 PDMS 平台中可以定义钢筋的等级，用于显示钢筋的形状，通过定义驱动方程的关键参数生成直线形、圆环形、弧形、L 形、U 形等各种样式的钢筋，实现数字化标准库设计。

(2) 三维可视化安全壳配筋系统：给设计人员提供一个友好界面，配置实际项目所需的配筋规则，包括定制配筋的起始角度、终止角度、布置半径、公称、布置样式等。

(3) 数据输入：采用在 PDMS 平台数据库中自动获取和 Excel 表导入相结合的便捷方式生成三维可视化配筋所需的所有输入数据。

(4) 配筋规则配置：采用可视化配筋方式实现普通直墙配筋、环墙配筋、预应力配筋、环梁配筋，牛腿锚筋设计，还能定制单孔加筋、联合孔洞加筋、闸门孔洞等复杂区域的自动化配筋。

(5) 数据输出：可以生成各类文件清单、配筋图、钢筋表以及用于计算输入的文件。

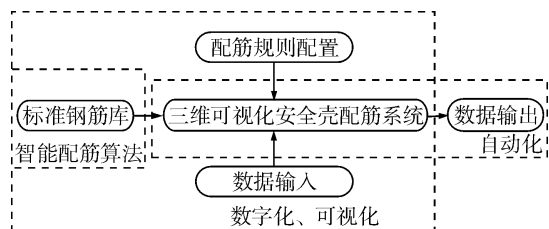


图 1 三维可视化安全壳配筋系统结构

Fig. 1 Reinforcement Structure System of Containment Shell in 3D Visual Design

在三维可视化配筋过程中，三维可视化显示方法、钢筋几何参数关系求解、数字化方法是系统研究的难点，也是提高设计效率和质量的关键要素，下面进行详细介绍。

### 1.2 三维可视化显示方法

三维可视化设计可以直观地进行设计及展示、方便地生成各种剖切、投影视图；具备纠错功能，提高准确率；成品可作为计算输入，减少重复建模时间。

(1) 安全壳模型显示：基于安全壳三维布置设计环境，利用 PDMS 已有的、先进的三维图形引擎显示真实、精确的安全壳三维设计模型。

(2) 配筋显示方式：结构配筋依赖于结构实体本身，钢筋的形状、走向、布置范围等大多依赖于结构实体的形状和尺寸。因此，采用三维可视化安全壳配筋系统进行三维配筋设计，首先要通过软件程序定制好钢筋结构构件的类型，再使用设计模块调用这些构件类型，在 PDMS 平台中获取安全壳半径、孔洞、贯穿件的位置及半径等信息，通过输入配筋所需的起始/终止等参数，才能高效地对指定范围内的安全壳进行三维可视化配筋，并生成钢筋的三维实体模型。安全壳配筋三维可视化显示效果如图 2 所示。

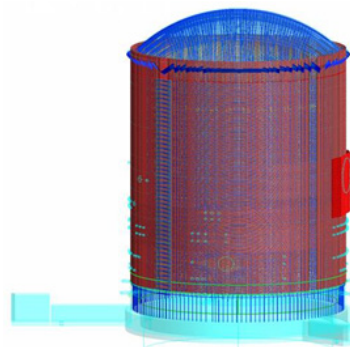


图 2 安全壳配筋三维可视化显示效果

Fig. 2 Renderings of Reinforcement of Containment in 3D Visualization Design

### 1.3 钢筋几何参数关系求解

1.3.1 标准钢筋样式求解 此方法主要结合实际情况，确定需要的关键参数，通过关键参数可获得关键点的位置，通过关键点的位置驱动钢筋的形状，得到所需不同的钢筋样式，标准配筋样式轨迹如图 3 所示。

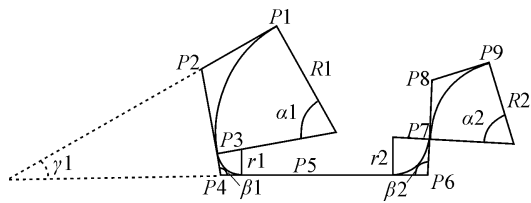


图 3 标准配筋样式轨迹图

Fig. 3 Trajectory Diagram of Standard Pattern for Reinforcement

图 3 中的关键参数为：4 个折弯角度  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ；4 个折弯半径  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ ；底边长度  $P_4P_6$  ( $P_4$  点至  $P_6$  点距离)。

依据几何关系，求解方法如下： $P_3$  点至  $P_4$  点的长度为： $P_3P_4 = r_1 [1 / \tan(\beta_1 / 2)]$ ； $P_2$  点至  $P_3$  点的长度为： $P_2P_3 = R_1 [\tan(\alpha_1 / 2)]$ ；其中， $P_2$  点为其角平分线上的点， $P_2$  至  $P_1$  点的长度与  $P_2$  点至  $P_3$  点的长度相等： $P_1P_2 = P_2P_3$ 。 $P_1P_2$  与  $P_4P_5$  之间的夹角为  $\gamma_1$ ， $\gamma_1 = \beta_1 - \alpha_1$ 。

假定  $P_5$  点为钢筋原点，可求得：

$$P_5 = (-P_46 / 2, 0) \quad (1)$$

$$P_4 = [P_34 \cos(\beta_1), P_34 \sin(\beta_1)] \quad (2)$$

$$P_3 = [P_23 \cos(\beta_1), P_23 \sin(\beta_1)] \quad (3)$$

$$P_2 = [P_12 \cos(\gamma_1), P_12 \sin(\gamma_1)] \quad (4)$$

由此可得，各点的坐标如下：

$$P_4 = P_5 + P_54 \quad (5)$$

$$P_3 = P_4 + P_43 \quad (6)$$

同理，可分别求出  $P_6$ 、 $P_7$ 、 $P_8$ 、 $P_9$  坐标。最终，求得 9 个关键点后，可通过关键点驱动钢筋轨迹，生成三维钢筋模型。

1.3.2 预应力钢筋样式求解 预应力钢筋采用 3 段式曲线方程求解<sup>[4]</sup>，3 段式曲线由 2 段弧线和中间一段直线组成，是钢筋平滑绕过障碍物的一种基本形式。2 段圆弧一般为半径 8.0 m 的圆弧，中间直线段为两圆弧的公共切线。

钢筋布置在一个圆柱面上，圆柱的  $Z$  轴向上，需利用钢筋的平面轨迹方程  $F(x,y)=0$  成形（成形为展开的逆过程）为三维空间钢束，圆柱面上的曲线方程  $P(x,y,z)=0$ 。

由  $F(x,y)=0$  确定  $P(x,y,z)=0$  的过程称为成形过程。具体方法为将方程  $F(x,y)=0$  中的  $y$  值转化为极坐标中的值，其关系如图 4a 所示，其中  $dy$

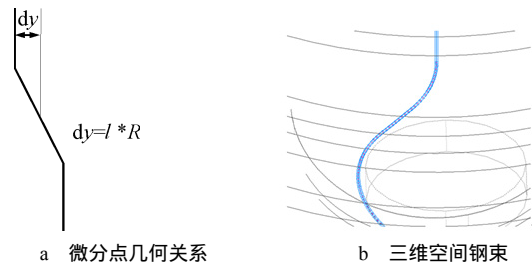


图 4 三维空间钢筋示意图

Fig.4 Schematic Diagram of Reinforcement in 3D Space

为  $y$  的增量（增量弧长）， $l$  为增量弧度， $R$  为成形圆柱的半径。通过微分处理，形成一系列三维坐标点，以此点集创建三维空间钢筋（图 4b）。

### 1.4 配筋数字化

安全壳配筋设计的数字化<sup>[5]</sup>是设计信息化水平的关键一环，是实现整个数据协同及三维可视化的基础。通过研究安全壳配筋的规则，将安全壳复杂多变的配筋关系转化为可以度量的配筋参数，再以这些参数建立起配筋的标准样式和节点样式，配筋数字化方式如图 5 所示，通过程序驱动实现数字化配筋。下面对配筋的标准样式和节点样式进行详细介绍。

配筋的标准样式一般应用于安全壳筒体配筋，通过 PDMS 平台获取配筋定位参数，赋值到标准钢筋库中的圆弧式和直线式进行标准样式配筋；配筋的节点样式一般用在复杂区域的配筋，如孔洞节点和闸门节点，即将孔洞或闸门周边复杂的配筋按节点的方式集成，通过程序进行统一处理。

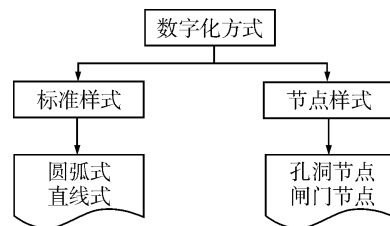


图 5 配筋数字化方式

Fig. 5 Digitization Method For Reinforcement

壳体结构配筋，70%以上的区域为标准样式配筋，在安全壳内侧、中间、外侧均匀地分布着横竖 2 层钢筋，其配置规则为横向的圆弧式钢筋以一定水平间距均匀分布，竖向的直线式钢筋以一定的竖向间距均匀分布，可以通过角度、标

高、间距、布置样式等参数，实现批量数字化自动排布，效果如图 6 所示。

将复杂区域的配筋定义为节点配筋<sup>[6]</sup>，安全壳配筋中较为典型的是孔洞节点和闸门节点配筋，即将孔洞周边的加筋通过程序定义为一个块，再根据不同大小的孔洞，自动匹配规格。闸门节点配筋则是将闸门口周边不规则的配筋定义成不同的块，再通过程序驱动统一处理。孔洞节点和闸门节点配筋效果见图 7。

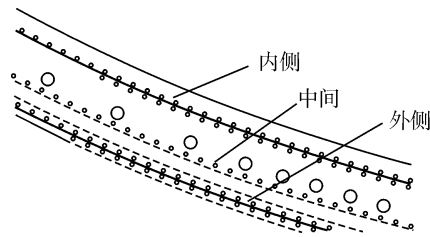
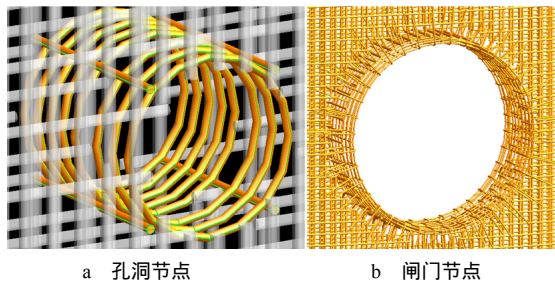


图 6 安全壳筒体截面俯视图

Fig. 6 Top View of Cross Section of Containment Cylinder



a 孔洞节点 b 闸门节点

图 7 孔洞节点和闸门节点配筋效果

Fig. 7 Renderings of Reinforcement For Hole-Node and Gate-Node

### 1.5 配筋自动化

传统的二维放样设计基本靠手绘处理，遇到孔洞绕行是以圆弧+直线相切的形式实现，效率非常低，且随着孔洞的调整修改需要反复地调整验证。二维放样设计无法进行钢筋的碰撞检查，而三维可视化配筋系统自动化功能如图 8 所示，可以很好地解决二维放样设计无法实现的功能，通过自动化的三维设计功能和文件输出功能，极大地提高了设计质量和设计效率。

(1) 三维可视化安全壳配筋系统通过在 PDMS 中配置钢筋等级属性，可以生成并显示钢筋形状。

(2) 通过孔洞控制曲线来实现孔洞避让。钢筋拐弯时，需先加入孔洞，然后再加入相关曲线，且加入的曲线的数量有效值为 1 或 2，超过

数量的曲线无效（但不影响前 2 个曲线对钢筋的作用），图 9 为孔洞避让示意图。

(3) 钢筋切断是通过计算钢筋与切断面的交点对钢筋进行重构，首先在需要切断处构造一个面，通过钢筋上的点虚构一个多边形封闭面，求得交点，将切断面内重构的钢筋删除，将两端钢筋重构出所需的钢筋，钢筋切断效果见图 10。

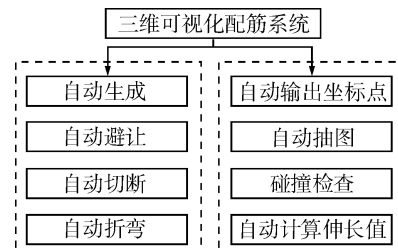


图 8 三维可视化配筋系统自动化功能

Fig. 8 Automation Module of Reinforcement in 3D Visualized Reinforcement System

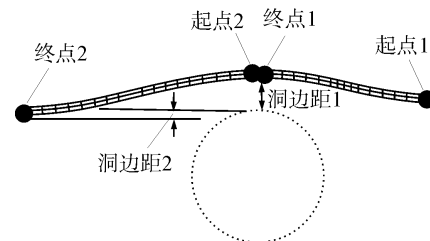


图 9 孔洞避让示意图

Fig. 9 Schematic Diagram of Hole-Avoidance

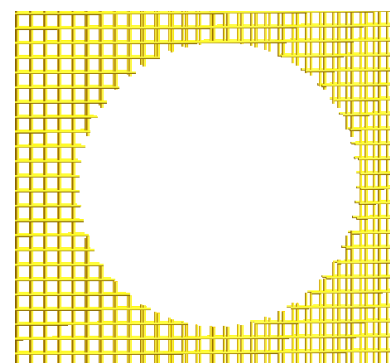


图 10 钢筋切断效果

Fig. 10 Renderings of Reinforcement-Cutting

(4) 先通过获取孔洞的半径定义一个投影面，再获取孔洞的方向，通过程序分别计算出钢筋是头折弯或尾折弯，定义钢筋的折弯方向。依据钢筋的用途、类型、名义直径来确定钢筋的弯曲半径，应用循环的方法实现钢筋批量折弯。钢筋折弯效果见图 11。



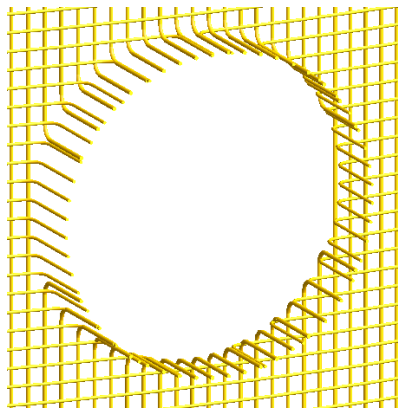


图 11 钢筋折弯效果

Fig. 11 Renderings of Reinforcement-Bending

(5) 在安全壳配筋三维设计过程中所有的数据都保存在 PDMS 数据库中，不仅能和其他专业进行协同设计，参与碰撞检查，而且可以根据需要输出设计文件，尤其是自动化抽图功能，极大地提高了设计质量和设计效率。预应力钢筋展开如图 12 所示。

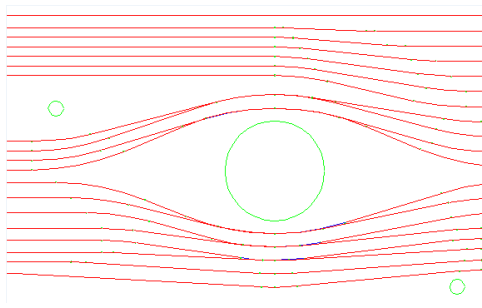


图 12 预应力钢筋展开图

Fig. 12 Cross-Sectional View of Prestressed Reinforcement

## 2 应用效果

本文的研究成果已应用于某三代核电项目设计中，起到了如下作用：

(1) 解决了复杂区域配筋难的问题，仅需简单的操作即可完成安全壳钢筋的放样布置；辅助设计人员快速找到最优配筋方案；在图纸中准确表达，避免现场二次放样，缩短工期。

(2) 通过已经完成的安全壳三维模型与预应力钢筋模型进行碰撞检查，检查出安全壳配筋设计图纸与安全壳设计的冲突，为工程修改提供依据。

(3) 用于施工参照。一方面，通过三维放样，可预先发现现场钢筋安装困难处，做施工进度计划时，提前把该因素考虑在内；另一方面，通过参考三维模型，施工人员可大大减少解读配筋图纸的时间，提高了现场安装效率。

(4) 建立 PDMS 与 ANSYS 有限元分析软件接口，将 PDMS 输出钢束模型作为 ANSYS 计算输入，对三维模型进行力学分析，得到钢束各部分的应力分布，以实现安全壳完整性所必须达到的功能<sup>[7]</sup>。

(5) 通过自动化抽图，节省展开图绘制时间的 70% 以上。

通过开发三维可视化安全壳配筋系统生成的配筋模型，填补了 PDMS 安全壳配筋三维模型的空白，为三维虚拟仿真、现场施工、设计数据输出提供了模型数据。

## 3 结束语

通过研究与实际项目应用，本文基于 PDMS 平台研发的三维可视化、数字化、自动化核电安全壳配筋系统仅需提供少许人力即可完成复杂的核电安全壳配筋过程，且能对布置合理性进行校验，有效地规避潜在的设计问题，提高了设计质量和效率，具有一定的应用推广价值。

### 参考文献：

- [1] 李政鹏, 曲晓宁. 基于 Bentley 的三维建模及配筋技术研究与应用[J]. 河南水利与南水北调, 2015(5): 32-33.
- [2] 郑建华, 陈健, 陈佑, 等. Restation 混凝土三维配筋设计系统研究与应用[J]. 水力发电, 2014(8): 5-9.
- [3] 王勇. 三维设计和协同设计平台在核电设计院的应用[J]. 核动力工程, 2010, 31(3): 96-101.
- [4] 蓝天云, 董占发, 李忠诚, 等. 压水堆核电站预应力安全壳三维仿真设计与应用[J]. 建筑结构, 2018, 48(16): 102-106.
- [5] 陈建林, 陈佑, 杨建城, 等. 设计规范的数字化研究及在三维配筋系统中的应用[J]. 水力发电, 2014(8): 33-41.
- [6] 李忠诚. 钢筋混凝土框架结构弹塑性动力响应分析[J]. 核动力工程, 2009, 30(2): 41-45.
- [7] 施勳, 徐小刚, 杨林民. 双层安全壳人员闸门力学分析[J]. 核动力工程, 2015, 36(5): 144-147.

(责任编辑：孙 凯)