

海洋石油工程固定式导管架平台T/K/Y节点 马鞍口建模

林永章, 柳冉, 翟志国, 王伟, 袁杰

海洋石油工程股份有限公司 天津 300450

摘要: 海洋石油工程固定式导管架是海上油气资源开采的重要设施, 是由钢管相贯焊接形成的空间桁架结构。导管架的主要焊接结构是T/K/Y节点, T/K/Y节点中存在大量的马鞍口结构。目前, 对马鞍口的加工及焊接主要以二维图样贴片为主, 尚无软件可实现管节点马鞍口的参数化三维建模。在分析马鞍口相贯线机理的基础上, 建立马鞍口相贯线的数学模型, 并基于此利用Unity3D编写了绘制马鞍口相贯线的通用软件, 实现了马鞍口的参数化三维建模, 有效解决了实际生产中T/K/Y节点马鞍口难以建模的问题, 为管节点马鞍口的加工及智能焊接提供精确的模型。

关键词: T/K/Y节点; 马鞍口; 参数化建模

Modeling of saddle shape for T/K/Y joint on offshore oil engineering fixed jacket platform

LIN Yongzhang, LIU Ran, ZHAI Zhiguo, WANG Wei, YUAN Jie

Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China

Abstract: The fixed jacket is an important facility for offshore oil and gas exploitation. It is welded by intersecting steel pipes and perform a space truss structure. The main component of the jacket is T/K/Y joint, which consists of a large number of saddle shape structures. The processing and welding of saddle shape are commonly executed by two-dimensional sticker method at present. Furthermore, there is no software to directly realize the parametric three-dimensional modeling of saddle shape. A mathematical model of saddle shape is established on the bases of analyzing the mechanism of saddle shape in this article. In addition, a general saddle shape modeling software is developed under Unity3D environment. The software realizes the parametric three-dimensional modeling of saddle shape and provides an accurate model for intelligent welding.

Keywords: T/K/Y joint; saddle shape; parametric modeling

1 序言

海洋石油工程固定式导管架是海上油气资源开采中应用最为普遍的一种结构形式, 由钢管相贯焊接形成的空间桁架结构, 最主要的焊接结构是大型管件的相交节点(T/K/Y节点)。由于节点数量多且管壁较厚, 为避免因应力集中而降低结构的使用

寿命, 因此对管节点的焊接质量提出了较高要求。但管节点在加工及焊接过程中存在以下问题: 一是管节点的相贯线是空间曲线, 传统二维建模方法难以精确绘制。二是在机器人智能化焊接过程中, 对坡口寻位需要精确的三维模型作为基础条件, 给出寻位轨迹。三是已存在的建模软件(如SolidWorks

等)，对相贯线如何建模描述不清晰。

刘德刚等^[1]提出了基于VTK平台提取相贯线并应用于管道切割，但VTK平台的相贯线模型建立方法并不明确。张翰阳等^[2]提出了一种可以精确模拟实际相贯线焊缝形式的有限元建模方法，通过建模软件Rhino、有限元前处理软件Hypermesh与有限元软件Abaqus的无缝对接，可以准确地模拟实际工程中节点处的全熔透对接焊缝构造。张宪明等^[3]提出了基于SolidWorks的等管径的正交圆管相贯线建模方法并取得了实际应用。但实际生产中更多的是不等管径的圆管相交工况。王吉岱等^[4]基于不等直径两圆柱形管件偏置斜交的插管方式形成的马鞍口相贯线，并推导构建数学模型，利用Matlab软件仿真获得马鞍形曲线的空间形式，为提高马鞍形相贯线的焊接效率提供理论研究基础。李静等^[5]采用测量工件上6个特征点的方法，建立了管道插接相贯线的数学模型，提出采用旋量理论的等分离散方法建模焊缝特征模型的方法。

以上应用研究中所采用的建模软件、仿真软件，如SolidWorks、Matlab等对相贯线如何建模描述不清晰，偏重于理论研究，无法应用于实际生产。针对以上问题，本文给出了管节点马鞍口相贯线的建模方法，并采用C#编程语言编写了坡口计算软件，实现了T/K/Y节点坡口点云的生成，并通过UNITY3D实现了参数化建模，可导出STL三维文件格式的节点模型，为机器人智能化焊接准确地规划模型。

2 T/K/Y节点结构形式

海洋石油工程中的T/K/Y节点主要由支管与主管相交而成。其中主管的直径比支管的直径略大或相等。当支管与主管相交时，支管被主管截断，截断的断面形状形似马鞍状，因此称为马鞍口，如图1所示。

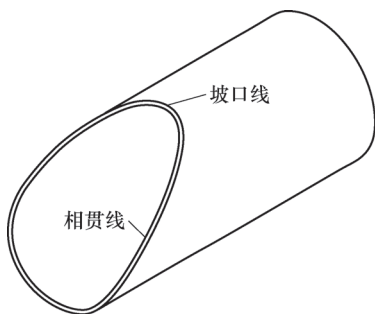


图1 马鞍口示意

在导管架T/K/Y节点相贯位置焊接时，由于支管的壁厚较厚，为保证节点焊接时能做到全熔透，所以需要在支管厚度方向上开出坡口。在管节点中，支管的内壁和主管相交即为相贯线，由于开坡口的原因，支管外壁不会与主管相交，所以在外壁上形成一个三维曲线，也叫坡口线，如图2所示。

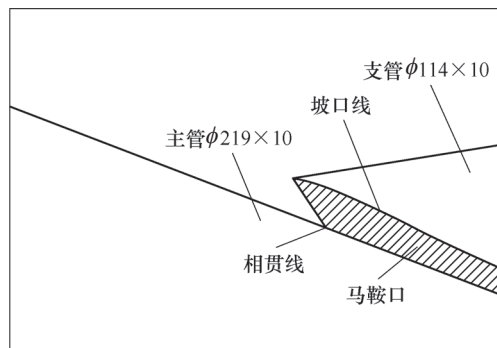


图2 坡口线和相贯线

马鞍口的相贯线和坡口线的形状与两个管的二面角大小有关。海洋工程中的T/K/Y节点马鞍口所开的焊接坡口形式、钝边厚度及根部间隙大多遵循美国焊接学会钢结构焊接标准AWS D1.1: 2015《钢结构焊接规范》^[6]的规定。AWS D1.1: 2015关于管节点坡口角、二面角规定如图3所示。

根据美国焊接学会AWS D1.1: 2015标准规定，当二面角 $\psi \geq 90^\circ$ 时，坡口角 $\phi = 45^\circ$ ；当二面角 $\psi < 90^\circ$ 时，坡口角 $\phi = \psi/2$ ，即

$$\phi = \begin{cases} \frac{\psi}{2} & \psi \leq 90^\circ \\ 45^\circ & \psi > 90^\circ \end{cases} \quad (1)$$

3 建模方法

将支管轴线与主管轴线的交点确定为坐标系原点O，根据T/K/Y节点的三维模型建立相贯结构的坐标系，由于T形和K形可根据Y形节点旋转变换得到，因此本文以Y形节点为例，建立主管和支管数学模型，分别为

$$\begin{cases} X_1^2 + Y_1^2 = R^2 \\ Z_1 = Z_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} X^2 + Y^2 = r^2 \\ Z = Z \end{cases} \quad (3)$$

主管坐标系 O_1 、 X_1 、 Y_1 、 Z_1 和支管坐标系 O 、 X 、 Y 、 Z 之间的转换关系为

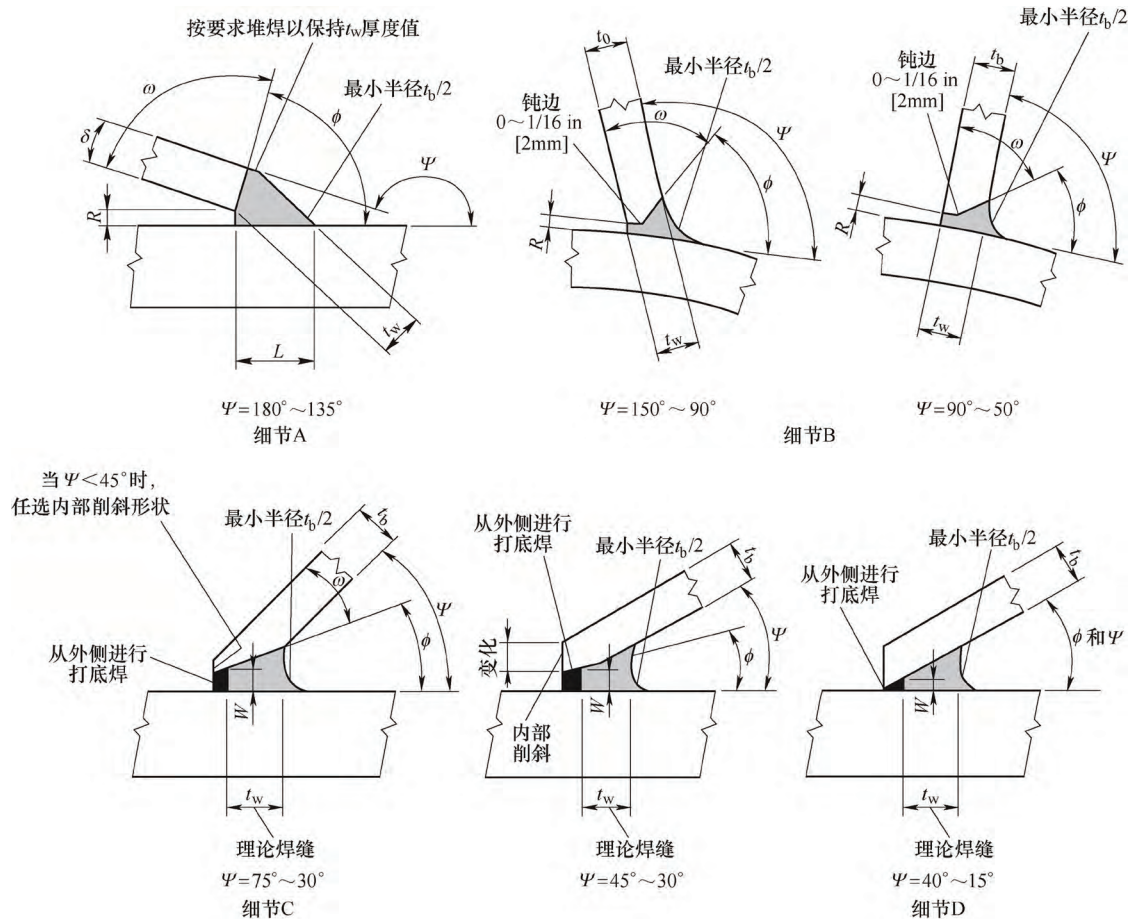


图3 管节点坡口角、二面角示意^[6]

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ 0 & \sin \phi & -\cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

可得

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \bar{M} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ -Y_1 \cos \phi - Z_1 \sin \phi \\ Y_1 \sin \phi - Z_1 \cos \phi \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

即

$$\begin{cases} X_1 = X \\ Y_1 = -Y \cos \phi + Z \sin \phi \\ Z_1 = -Y \sin \phi - Z \cos \phi \end{cases} \quad (6)$$

则相贯线方程为

$$\begin{cases} Y = \pm \sqrt{r^2 - X^2} \\ Z = \frac{\pm \sqrt{R^2 - X^2} + Y \cos \phi}{\sin \phi} \end{cases} \quad (7)$$

4 软件实现

基于以上理论分析,以Unity3D为基础编写了绘制马鞍口相贯线的通用软件,建立了专门的T/K/Y节点参数化模型。

4.1 软件操作流程

本软件针对T/K/Y节点参数化建模,首先选取T/K/Y的节点类型,并输入支管的各项参数。然后通过上一节中的理论得到支管坡口信息。通过输入主管与支管参数,获得主管坡口信息,最后生成3D模型,同时可以导出3D点云数据(STL格式)供后期机器人焊接多层多道规划和路径规划提供模型基础。生成坡口模型的流程如图4所示。

4.2 程序功能

软件提供了参数输入界面,用户可以按照实际节点形式输入主管直径、支管直径、壁厚、支管与主管的夹角、坡口组对间隙等主要参数。如果参数输入有误,则会提示输入错误,计算结果显示在屏

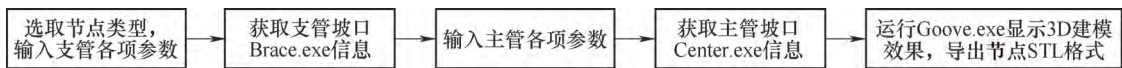


图4 T/K/Y节点参数化建模软件流程

幕上。另外,软件提供了导出功能,可以导出3D点云数据(STL格式),供后期机器人焊接多层多道规划和路径规划提供模型基础。软件输入界面和数据显示界面如图5所示。



图5 软件输入界面和数据显示界面

4.3 典型节点

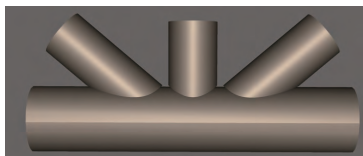
海洋石油工程中涉及的固定式导管架平台的典型T/K/Y节点的主要形式和参数,见表1。不同的形式和组合会产生不同形式的相贯线。本软件都可以通过参数设置实现准确绘制,仅需几秒便可完成马鞍口相贯线建模并导出坡口数据。

4.4 软件应用

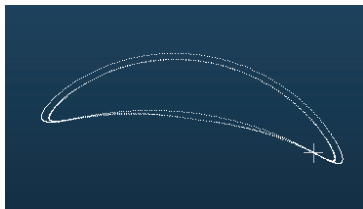
本软件针对典型节点3进行参数化建模,所生成的T/K/Y节点模型如图6a所示,导出相贯线数据并在CloudCompare软件中显示,如图6b所示。试验结果表明,本软件能便捷、快速、准确地针对任意节点类型的T/K/Y节点进行参数化建模,并且建模描述清晰,不依赖任何建模软件、有限元软件。

表1 典型T/K/Y节点参数

节点类型	主管尺寸（直径×壁厚） /mm	主管长度 /mm	支管尺寸（直径×壁厚） /mm	支管长度 /mm	支管与主管的夹角 /（°）	组对间隙 /mm
典型节点1	2025×60	700～5000	762×25/32	700～2000	90	2～6
	2654×70				40～90	
典型节点2	2025×60		762×25/32			
	2654×70				40～90	
典型节点3	2025×60		762×25		40～90	
	2654×70				40～90	
典型节点4	762×38		762×19/25	60～90		



a) 3D建模效果



b) 马鞍口相贯线

图6 典型节点3

5 结束语

针对海洋石油工程中的T/K/Y节点马鞍口难以准确描述的问题,通过分析马鞍口相贯线机理,建立了相贯线的数学模型。通过Unity3D参数化建模马鞍口相贯线,获得了马鞍口坡口的点云数据。该软件使用省时便捷,可有效提高生产效率。

参考文献:

- [1] 刘德刚, 吴兴群, 李佳星. 基于VTK的相贯线坐标计算方法研究[J]. 现代制造工程, 2016 (3): 59-63.
- [2] 张翰阳, 高小婷. T型相贯节点相贯线实体焊缝模型建立方法[J]. 砖瓦, 2020 (6): 111.
- [3] 张宪明, 周知进. 等径正交圆柱管道相贯线展开曲线的建模及应用[J]. 河南科技, 2015 (6): 85-87.
- [4] 王吉岱, 王海洋, 雷琳琳. 基于MATLAB的马鞍形相贯线的仿真研究[J]. 制造业自动化, 2014, 36 (7): 46-48.
- [5] 李静, 李君, 郝卫东. 基于逆向建模的复杂焊缝数学模型的建立方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016 (6): 43-46.
- [6] AWS. Structural Welding Code-Steel: AWS D1.1/D1.1M: 2015[S]. Miami: AWS, 2015.

MW 20240309