



# 基于 SolidWorks 的疏浚绞刀主体参数化设计

秦亮，邬德宇，李金峰，张德新

(中交天津航道局有限公司，天津 300461)

**摘要：**绞吸挖泥船作为疏浚行业的一种挖泥利器，其绞刀对挖泥船的挖泥能力影响巨大。目前设计绞刀时多以手动方式进行主体建模，其刀臂、大环和轮毂作为绞刀的主体结构，建模中存在参数较多、建模繁琐、精度不高的问题。为了缩短建模周期、提高建模精度，提出了一种参数化绞刀主体建模方法，并采用 C# 编程语言对 SolidWorks 进行二次开发，通过调用内置的 API 接口实现了绞刀主体三维模型的参数化、自动化生成。结合面向对象编程理念，开发了基于 SolidWorks 平台的绞刀主体建模软件，实现绞刀参数建模和绞刀性能计算的融合，提供了绞刀标准化、参数化创建方式。研究成果可为绞刀主体的性能优化提供参考方向。

**关键词：**绞刀；C#；SolidWorks；二次开发；API(应用程序编程接口)；3D 建模

中图分类号：U 616+.5

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)S2-0043-06

## Parametric design of dredging cutter body based on SolidWorks

QIN Liang, WU De-yu, LI Jin-feng, ZHANG De-xin

(CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

**Abstract:** Cutter suction dredger is considered to be an effective dredging tool in the dredging industry, and its cutter has a great influence on the dredging capacity. At present, the cutter body is mostly manually modeled during the design process. The cutter arm, big ring, and hub are the main structure of the cutter, and their modeling faces many problems, such as massive parameters, cumbersome modeling, and low precision. In order to shorten the modeling cycle and improve the modeling accuracy, this paper proposes a parametric cutter body modeling method, uses C# programming language to realize Solidworks's secondary development, and calls the built-in API interface to realize the parametric and automatic generation of the three-dimensional (3D) cutter body model. Based on the concept of object-oriented programming, the paper develops a modeling software for the cutter body based on the SolidWorks platform, which ensures that the cutter parameter modeling and cutter performance calculation are carried out in parallel, and it also puts forward a standardized and parametric creation of the cutter. The research results can provide a reference for the performance optimization of the cutter body.

**Keywords:** cutter; C #; SolidWorks; secondary development; API (application programming interface); 3D modeling

我国航道众多、航运业发达，需要高效率的疏浚船舶进行航道加深、拓宽、清淤等作业。绞刀的造型对于绞吸式挖泥船的疏浚效率影响巨大，研究绞刀三维建模有重要意义。目前，先进绞刀的研发技术基本被 IHC 等国外公司垄断，绞刀三

维模型大多手动绘制、速度较慢。为了实现先进绞刀设计的突破，张德新<sup>[1]</sup>使用 Pro/E 软件绘制出绞刀主体模型；朱文亮等<sup>[2]</sup>提出了一种绞刀参数化建模的方法，并给出了刀臂轮廓曲线在基准面上的投影方程；李洪彬等<sup>[3]</sup>、周栋彬<sup>[4]</sup>分别使

用 VBA 语言开发了绞刀建模系统，但是其软件架构缺少对刀臂截面的设计选项，有待改善。

在软件开发方面，LI 等<sup>[5]</sup>、赵满平等<sup>[6]</sup>、丁刚<sup>[7]</sup>在机械零件建模的实例基础上，阐述了 SolidWorks 二次开发所需的部分开发技术和方法；NING 等<sup>[8]</sup>、孙智慧等<sup>[9]</sup>对相关机械设备的建模进行了 SolidWorks 二次开发，对软件开发流程做了详细说明；陈永康<sup>[10]</sup>介绍了 C# 作为 SolidWorks 二次开发语言进行建模的优势，对相关的二次开发法做出说明；赵辉等<sup>[11]</sup>叙述了 C 语言面向对象编程的优势，并介绍了相关机制。

本文采用基于 SolidWorks 二次开发的绞刀主体建模软件，对目标架构进行升级，使用语法体系更为先进的 C# 语言用于编程，改善了系统稳定性和响应速度；同时对建模步骤进行优化，提供了两种刀臂截面选项，设计了性能预估模块，可为绞刀优化提供思路。

## 1 软件开发框架

### 1.1 软件开发整体过程

为了达到用户通过在应用窗口中输入相应的参数，软件自动操控 SolidWorks 绘制出绞刀主体模型，并能够计算出对应绞刀的性能的目的，将软件开发的整体流程设计为：1) 分析绞刀主体尺寸和性能经验公式，根据参数化设计的原则提取绞刀的尺寸和性能参数，便于后期编程时设置变量。2) 规划建模步骤，确保没有冗余步骤，并可以在 SolidWorks 中手动操作。3) 搭建编程框架，布置编程环境，编写主程序、SolidWorks 运行优化程序、设计软件操作界面。4) 用宏录制建模的代码，将一些参数用变量进行表示，每个步骤封装成方法；编写性能计算程序方法，将这些方法整理到一个方法类当中。5) 在主程序中调用方法，将程序端与操作界面进行数据连接，不断对代码进行调试，最终完成软件的开发。

### 1.2 重要技术

#### 1) 微软 OLE ( Object Linking and Embedding)

技术。SolidWorks 软件内置了 API ( Application Programming Interface ) 应用程序接口对象可供使用，常用的有通用文档对象、草图相关对象和特征与配置相关对象等，这些对象是将 SolidWorks 软件的操作命令方法进行封装得到的。通过 OLE 技术，借助 C# 等编程语言使用这些接口对象，可以向建模软件传递操作指令，从而达到自动化运作，提高建模效率。

2) 微软的 Winform 类库。在开发和使用过程中，该技术将软件可视化界面和逻辑代码分离，实现人机互动，用户可以在窗体中输入参数等简单操作即可运行二次开发代码来操控 SolidWorks 软件，快捷生成绞刀主体。

3) xCAD 工具包。该工具包是一款适用于 SolidWorks 开发的框架，包含大量 SolidWorks API 接口对象，用户开发时可直接在开发环境中安装并引用，减小开发难度。

4) 微软 ActiveX 控件技术。可将整个开发项目打包成可独立运行的 \*.exe 软件，实现控制软件和建模软件之间的数据交互通信。

5). NET Framework 技术。该技术支持 Windows 应用，用于部署编程环境以及代码执行环境，并按照工业标准生成通信，是整个软件的底层目标框架。

### 1.3 程序编写方法

参数化建模分为尺寸驱动和编程两类技术路径。尺寸驱动相当于在完整的模型结构上进行尺寸更改，缺少灵活性；编程法则从零开始按照步骤将模型建成。由于绞刀的个性化程度高，更适合按照步骤建模，因此选择编程法作为技术路径。

1) 直接编程。参考 API 帮助手册，全手动编写 SolidWorks 进行建模的完整代码，灵活性高，但是效率低、出错率高，增加了二次开发难度。

2) 综合编程。通过手动编程和宏记录代码联合进行程序编写。SolidWorks 支持用宏来记录建模过程，并生成相应的代码，优点是程序自动生成、快速，缺点是代码冗杂且部分操作无法记录。因

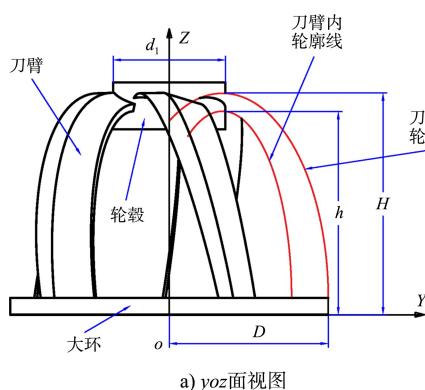
此需要手动来进行综合编程, 手动编程灵活性高, 可以弥补宏代码的缺陷。因此, 本文采用综合编程的方式对绞刀主体建模流程进行程序化处理。

## 2 绞刀参数化处理

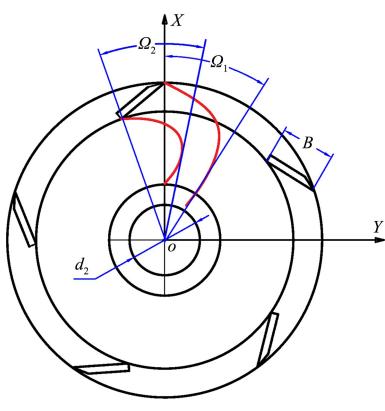
### 2.1 绞刀主体尺寸

根据参数化设计的要求, 首先需要分析绞刀的结构尺寸, 便于提取出与绞刀形状相关的参数以及约束参数。

轮毂、刀臂和大环是绞刀的主体部分, 见图 1。轮毂与传动轴直接相连接, 为绞刀的旋转提供动力; 刀臂是破碎土体的重要零部件之一, 打碎的土体进入绞刀的空腔内和水流混合, 从吸泥管排出; 大环则起到了链接固定刀臂的作用, 刀臂沿着大环圆周均匀分布。



a) yoz 面视图



b) xoy 面视图

图 1 绞刀主体

唐李白等<sup>[12]</sup>对刀臂内外轮廓线参数方程进一步简化, 得到了一组刀臂内外轮廓线关于  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的参数方程。

外轮廓曲线方程:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{2}d_1 \sin \Omega_1 \sin \theta \\ y = \frac{D}{2N}[(N-1) \cos \theta + 1] + kH \sin \theta \\ z = H \sin \theta + \frac{kD(N-1)}{2N}(1 - \cos \theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $d_1$  为轮毂外径 (m);  $\Omega_1$  为刀臂外轮廓线包角 ( $^\circ$ );  $D$  为大环外径或绞刀外径 (m);  $N$  为标准贯入击数;  $k$  为刀臂轮廓线外展系数;  $H$  为刀臂外轮廓线高度 (m);  $\theta$  为参变量 ( $^\circ$ )。

内轮廓曲线方程:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{2}d_2 \sin \Omega_2 \sin \theta - B \sin \varphi \\ y = \left[ \frac{D(N-1)}{2N} - B \cos \varphi \right] \cos \theta + \frac{D}{2N} + khs \in \theta \\ z = h \sin \theta + k \left[ \frac{D(N-1)}{2N} - B \cos \varphi \right] (1 + \cos \theta) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $d_2$  为轮毂内径 (m);  $\Omega_2$  为刀臂内轮廓线包角 ( $^\circ$ );  $\theta$  为参变量, 取  $0 \sim 150^\circ$ ;  $\varphi$  为刀臂安装角 ( $^\circ$ );  $B$  为刀臂宽度 (m);  $D$  为大环外径或绞刀外径 (m);  $N$  为标准贯入击数;  $k$  为刀臂轮廓线外展系数;  $h$  为刀臂内轮廓线高度 (m)。

得到绞刀的内外轮廓曲线之后, 还需要刀臂截面尺寸、大环和轮毂的内外径尺寸、厚度等参数以及约束参数, 运用这些参数便可以定义整个绞刀主体的形状。

### 2.2 绞刀性能指标

根据输入的一些绞刀参数, 通过经验公式<sup>[13]</sup>可以得到产量、绞刀功率和绞刀切削力等绞刀性能。

荷兰 IHC 吸管与绞刀直径关系公式:

$$D = 3.0d_s \quad (3)$$

式中:  $d_s$  为吸管直径 (m);  $D$  为绞刀直径 (m)。

荷兰 IHC 绞刀装机功率公式:

$$P = 0.736 \frac{d_s^2}{C} \quad (4)$$

式中:  $P$  为装机功率 (kW);  $d_s$  为吸管直径 (m);

$C$  为土质系数, 一般取 10, 黏土取 20。

根据功率计算切削力的公式:

$$F = \frac{973P}{nlR} \quad (5)$$

式中:  $F$  为单位刃长切削力 ( $\text{kg}/\text{m}$ );  $P$  为装机功率 ( $\text{kW}$ );  $n$  为绞刀转速 ( $\text{r}/\text{min}$ );  $l$  为刀片长度 ( $\text{m}$ );  $R$  为绞刀平均半径 ( $\text{m}$ )。

切削土体产量计算公式:

$$Q_s = \frac{60\alpha D^2 P_1 P_2 U_{sw}}{\eta \cos \varepsilon} \quad (6)$$

式中:  $Q_s$  为切削土体产量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ );  $P_1$  为前移距系数, 取  $0.3 \sim 0.8$ ;  $P_2$  为土质系数, 取  $0.4 \sim 1.0$ ;  $D$  为大环外径或绞刀外径 ( $\text{m}$ );  $U_{sw}$  为横移速度 ( $\text{m}/\text{min}$ );  $\alpha$  为绞刀长度/绞刀直径系数, 取  $0.7 \sim 0.9$ ;  $\eta$  为效率系数, 取  $0.8 \sim 1.0$ ;  $\varepsilon$  为绞刀摆动

轨迹与横移索夹角, 取  $30^\circ \sim 40^\circ$ 。

根据绞刀参数布置软件界面和编写程序, 公式中的参数将作为变量字段出现。按照软件需求把软件分为绞刀建模和计算模块, 选择公式(1)~(2)的参数用于绘制绞刀模型, 选择公式(3)~(6)中的参数作为性能计算用途。

### 3 软件程序和界面设计

确定绞刀参数后, 开启绞刀具体建模过程的设计, 即规划建模流程、优化建模步骤; 性能计算则是将相应的经验公式编译成程序可以运行的代码, 并且在程序运行上与建模模块相互独立。设计软件运行流程见图 2, 在此基础上设计程序的界面以及结构。

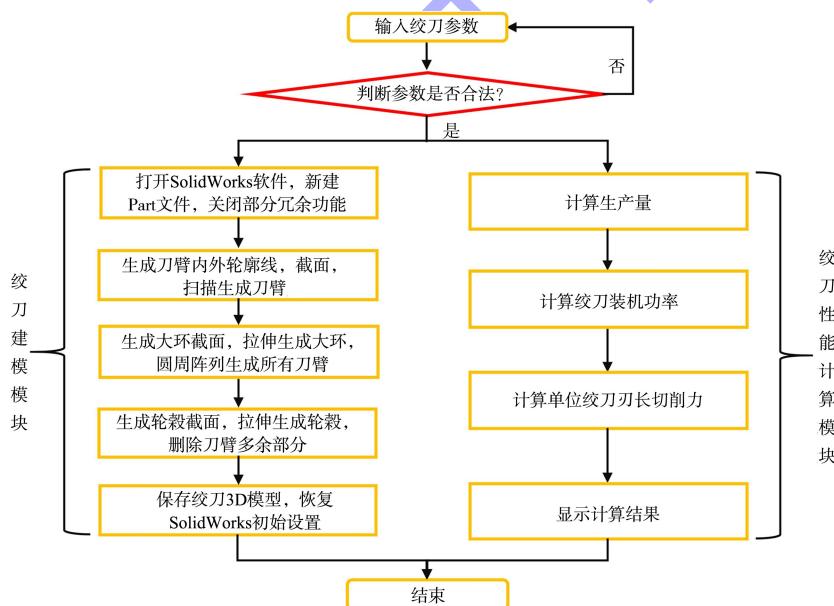


图 2 绞刀主体建模软件运行流程

#### 3.1 软件主体框架

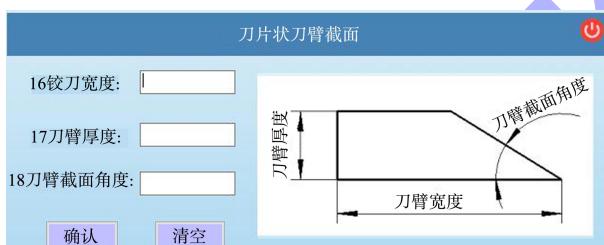
在 Visual Studio 软件中新建一个 Winform 项目, 选择 .NET Framework 或者 .NET 作为目标框架, 添加 xCAD 工具包; 新建窗体类, 在类中调用工具包中的 sldworks、swconst 等引用, 这些引用中就包含了 API 相关的接口对象。

然后结合建模步骤和功能要求, 布置操作窗口, 将软件主页面左右两侧分为 2 个模块; 布置文本控件、标签控件、按钮控件、菜单栏和工具栏。完成上述准备后, 初步编写主程序和建模方法框架。主窗体见图 3。

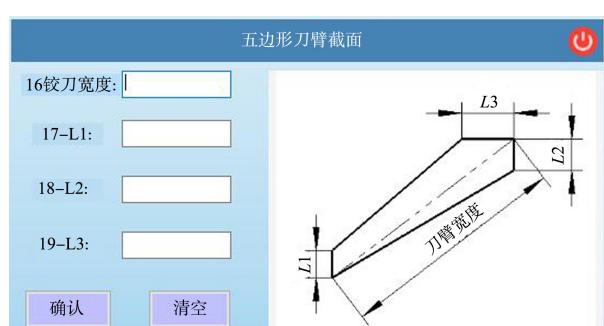


图 3 绞刀主体建模软件界面

刀臂是绞刀主要的切土构件, 其形状对绞刀的性能影响很大, 根据现有的绞刀产品, 本软件提供两种截面选项以备使用, 封装成一个选择方法和两个窗体类, 并将数据链接到“刀臂截面选择” combobox 控件, 使用 switch 判断语句进行选择。两种刀臂参数化交互界面, 见图 4。



a) 刀片状



b) 五边形

图 4 刀臂截面

### 3.2 程序编写

根据先前规划建模步骤, 手动操作建模, 使

用宏功能记录建模代码, 将代码移植到主程序类中, 并使用变量字段代替建模参数; 每个建模步骤相当于一个对象方法, 互相独立, 在主程序类中依次运行这些方法, 就可以生成所设计的绞刀主体; 找出与建模相关的变量, 并与窗体对应的文本框进行数据链接; 手动编写宏录制无法记录的内容, 如打开 SolidWorks 软件、公式计算、判断数据合法性等。在此过程中反复优化代码, 使之能够稳定运行。

在软件涉及的程序方法中, 调用 C#自带的 Math 类, 可以计算刀臂曲线方程和绞刀的受力、功率、产量; 采用多线程模式, 建模模块和计算模块能够并行运算; 关闭绘图软件实时显示和设计树, 开启后台模式等用以加快软件运行速度; 草图绘制时关闭对象捕捉以提高精度。

### 4 实例

绞刀主体建模过程复杂, 若采用非面向对象的编程方法会使得程序冗杂, bug 过多且难以修复, 导致开发进程缓慢。本文通过面向对象的编程方法, 将绞刀绘制步骤编写成数个可以运行的对象方法, 代码结构清晰, 便于除错, 减小开发难度。

刀臂作为空间扭曲构件, 绘制过程繁琐, 截取刀臂建模代码说明建模大体思路。

1)新建零件。

```
var doc2 = _swApp.Sw.INewDocument2(templatePart, 0, swSheetWidth, swSheetHeight);
```

2)绘制刀臂轮廓 3D 草图。

```
var skMgr = doc2.SketchManager;
```

```
SketchSpline equationDriveCurve = null;
```

```
equationDriveCurve = ((SketchSpline)(skMgr.CreateEquationSpline2(x, y, z, "0", du1, false, 0, 0, 0, true, true)));
```

3)绘制刀臂截面 2D 草图。

```
skMgr.CreateLine(s1, s2, s3, e1, e2, e3);
```

4)扫描特征生成刀臂。

```
Feature1 = ((Feature)(doc2.FeatureManager.InsertProtrusionSwept4(false, false, 0, false, false, 1, 1, false, 0, 0, 10, true, true, true, 0, false, 0.01, 1)));
```

5)阵列生成全部刀臂。

```
Feature2 = ((Feature)(doc2.FeatureManager.FeatureCircularPattern5(z, 2 * Math.PI, false, "NULL", true, true, false, false, 1, 0.26179938779915, "NULL", false)));
```

以上的步骤可以封装成 5 个方法，在主程序中按照顺序调用便可以得到所有的刀臂。同理，可将大环、轮毂的建模过程细化为多个编程步骤，通过 C# 语言将这些步骤生成相对应的程序方法，整个软件底层便由这些程序方法以及辅助程序组成，主程序从上往下依次调用这些方法就可以生成绞刀主体。本软件的所生成的绞刀主体见图 5。

对比发现，手工计算、建模时间约 30 min，软件约 15 s 便可以得到绞刀主体的模型，速度提升明显。



图 5 绞刀主体模型

2)提出了一种参数化绞刀主体建模方法，将复杂的绞刀建模过程精简，优化成多个便于程序运行的步骤，为后续建模软件开发提供便利。

3)提出了一种绞刀主体 3D 建模系统的开发方法，通过该方法设计的绞刀主体建模软件，既能快速绘制绞刀主体，又能够预估绞刀性能参数，易于加快绞刀设计研发，为后续绞刀力学仿真打下基础、为绞刀后期的标准化创造条件。

#### 参考文献：

- [1] 张德新, 倪福生, 朱文亮. 基于 Pro/E 的绞刀三维造型[J]. 中国水运: 学术版, 2006(6): 88-89.
- [2] 朱文亮, 倪福生, 张德新. 挖泥船绞刀的三维建模方法[J]. 船海工程, 2007(1): 45-48.
- [3] 李洪彬, 徐立群, 倪福生. 挖泥船绞刀参数化三维建模[J]. 水运工程, 2010(12): 47-49+55.
- [4] 周栋彬. 绞吸式挖泥船绞刀的参数化建模及流场分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [5] LI J, HUA S G. Modification to 3D model from exchange format file using visual basic in SolidWorks [J]. International journal of science and research, 2015, 4(2): 893-897.
- [6] 赵满平, 张庆民. 滚子链轮的三维参数化设计研究[J]. 煤矿机械, 2018, 39(7): 1-2.

(下转第 68 页)

## 5 结论

1)采用 C# 编程语言进行 SolidWorks 二次开发，并结合面向对象的编程方法，可以优化软件结构、提高系统稳定性、降低开发难度。