

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.06.001

欧姆形对称型双螺杆的参数化建模与数值模态分析

董娜^{1,2}, 倪益华^{1,2}, 刘达列^{1,2}, 许为群^{1,2}, 倪忠进^{1,2}

(1. 浙江农林大学 工程学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江省木材科学与技术重点实验室, 浙江 临安 311300)

摘要:针对已有螺杆型线方程参数化建模过程复杂、时间长的问题。根据型线的设计原则与要求,利用坐标系转换,构建了一种易于参数化建模且密封性、啮合性好的欧姆(Ω)形对称型端面型线方程,方程的滚圆相对于节圆的公转角 t ,根据螺杆传动几何关系推导并界定范围;以 Visual Basic 程序设计语言为开发工具,三维软件 SolidWorks 为二次开发平台,实现了螺旋套的参数化实体建模;建立了螺杆的固有特性分析模型,用 ANSYS 软件对螺杆的轴承处进行了刚性与弹性约束下的模态分析,并考虑了不同的弹性单元刚度对固有频率的影响。结果表明:弹性约束下螺杆的固有频率明显降低,2种约束下的振型一致,弹性单元的刚度对弹性约束下的固有频率没有影响。文中研究为双螺杆泵型线改进设计及螺杆模态分析提供理论依据,大大提高设计效率。

关键词:双螺杆泵;螺旋套;摆线;型线;参数化建模;模态

中图分类号:TH327

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)06-0001-06

Parametric Modeling and Numerical Modal Analysis of Omega Shaped Symmetrical Double Screw

DONG Na^{1,2}, NI Yihua^{1,2}, LIU Dalie^{1,2}, XU Weiqun^{1,2}, NI Zhongjin^{1,2}

(1. School of Engineering, Zhejiang A & F University, Linan, Zhejiang 311300, China;

2. Key Laboratory of Wood Science and Technology in Zhejiang Province, Linan, Zhejiang 311300, China)

Abstract: For the existing screw type line equation, parametric modeling complex, long-time problems, according to the design principles and requirements of profiles, by using of coordinate transformation, Ω -shaped symmetrical end face profile equations with easy-parametric modeling and good sealing, engagement properties were built. With respect to the pitch circle, rounded corners public t of the equations were deduced and defined ranges based on geometric relationships of screw driving; Visual Basic program language for the development tools, three-dimensional software SolidWorks for secondary development platform, achieved a parametric solid modeling of screw spiral sets; established the inherent characteristics of the screw analysis model, with ANSYS software did modal analysis of the bearing on screw under the constraints of rigidity and flexibility and considered the effects of different elastic stiffness of the natural frequency. The results show that: the natural frequency of the screw under elastic constraints is decreased obviously, the modes under two constraints are consistent, stiffness of the elastic element has no effect on the natural frequency of the elastic constraints. The research provided the theoretical basis for the improvement design of the double screw pump and the screw mode analysis, and greatly improved the design efficiency.

Key words: twin screw pump; helical units; cycloid; profile line; parametric modeling; modal

收稿日期:2015-03-19;修回日期:2015-05-29

基金项目:国家自然科学基金(61175125);浙江省自然科学基金(LZ15E050003);浙江省教育厅资助项目(Y201329351);浙江农林大学发展基金(2012FR027);浙江省高校发展基金(FX2013061)

作者简介:董娜(1989),女,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为数字化设计。通信作者:倪益华(1969),男,浙江嵊州人,教授,博士,主要从事制造业信息化研究。E-mail:nyh@zafu.edu.cn

双螺杆泵是一种容积式转子泵^[1],主要是由主杆、从杆、泵体、螺杆衬套、机械密封、密封座、轴承、同步齿轮等组成^[2],它依靠螺杆相互啮合时所引起的密封腔的容积变化来抽送液体^[3]。双螺杆泵在工作中具有其他多螺杆泵所不具有的优点,如具有很高的吸入能力,能无脉动地连续供液且无搅拌、乳化现象,采用独立润滑的外置轴承,可输送黏度范围宽广的各种介质,对输送介质不敏感等,其应用范围日益广泛^[4-6]。

双螺杆泵的关键部件是一对相互啮合的螺杆,螺杆螺旋面和其轴线的垂直面之间的截交线形成了型线^[7],它的性能直接影响泵的效率、流量及使用寿命等^[8],因此对双螺杆泵的型线进行研究有着很重要的理论意义和应用价值。

国内现有对双螺杆的型线研究主要有:摆线对称型和渐开线对称型;非对称的有渐开线-渐开线、摆线-摆线和摆线-渐开线型。摆线形型线螺杆的啮合性好,方程简单,而渐开线可降低齿顶处工作运转时的冲击,又能保证型线与包络线的接触线的线啮合与连续性,泵的稳定性好,但方程复杂^[9-10]。

本文在以往型线研究的基础上设计出了一种 Ω 形对称型双螺杆泵的转子型线,并推导出其方程,在此基础上利用 VB 进行参数化建模,不同尺寸的零件图的绘制时间大为缩短,可有效地降低设计者的工作强度,提高效率。

1 螺杆螺旋套型线方程推导及建立

双螺杆螺旋套型线的设计是难点,本文采用如下参数化方程表示型线方程:

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \end{cases} \quad t_m \leq t \leq t_n$$

式中: t 表示滚圆相对于节圆的转角, t_m, t_n 为转角的起始和终止角度。滚圆上的所有坐标点 x, y 都可以用上式表示出来,要完整的推导出螺旋套型线,除了要推导出方程外,还要计算出参数 t 的变化范围。

本文设计的 Ω 形对称型双螺杆泵型线是由摆线组成的,并且设计的主、从杆头数均为单头。

1.1 Ω 形对称型型线形成过程

假设主从杆几何尺寸相等,旋转方向不同。节圆半径为 R_p ,齿顶圆半径为 R_a ,齿根圆半径为 R_f ,它们满足 $R_a + R_f = 2R_p$ 。滚圆半径为 r ,中心距为 a ,摆线初始角度为 β ,滚圆相对于节圆的公转角用 t 表示。

AB 段:以节圆为导圆,以半径为 $r = (R_a - R_f)/4$ 的圆为滚圆,中心距为 $a = R_p + r = R_a - r$,滚圆以 B 点为起点顺时针向 A 点开始滚动所形成的外摆线。

BC 段:以节圆为导圆,以半径为 $r = (R_a - R_f)/4$ 的圆为滚圆,中心距为 $a_1 = R_f + r$,滚圆以 B 点为起点逆时针向 C 点开始滚动所形成的内摆线。

CD 段:以齿根圆半径 R_f 为半径的一段圆弧。

DE 段:是关于 x 轴与 BC 段对称的一段曲线。

EF 段:是关于 x 轴与 AB 段对称的一段曲线。

FA 段:以齿顶圆半径 R_a 为半径的一段圆弧。

1.2 单头对称双螺杆螺旋套型线方程推导

以 AB 段曲线方程为例来推导 Ω 形对称型的参数方程。 AB 段型线推导过程如图 1 所示。

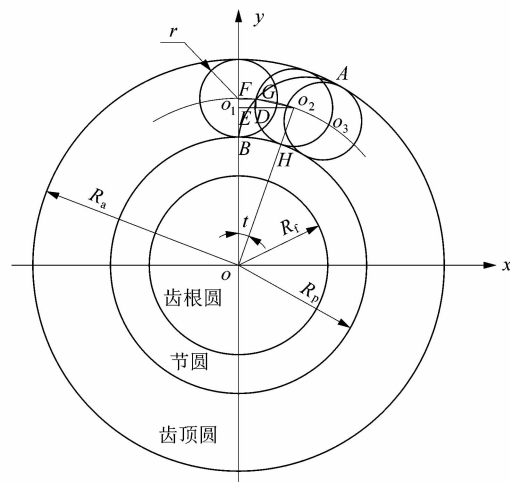


图 1 AB 段型线生成示意图

Figure 1 Forming sketch map of AB profile line

根据几何关系有

$$x = FG = (r + R_p) \sin t - r \sin (\beta + t) = a \sin t - r \sin (\beta + t),$$

由弧长相等原则有 $BH = HG$, 整理可得 $\beta = \frac{R_p t}{r}$, 令 $\frac{a}{r} =$

c , 可得 $x = a \sin t - r \sin (ct)$ 。

同理,

$$y = OF = a \cos t - r \cos (\beta + t) = a \cos t - r \cos (ct)。$$

综上, AB 段型线方程为

$$\begin{cases} x_1 = a \sin t - r \sin (ct) \\ y_1 = a \cos t - r \cos (ct) \end{cases} \quad 0 \leq t \leq \frac{r}{R_p} \pi。$$

同理, 可得 BC 段型线方程为

$$\begin{cases} x_2 = a_1 \sin t - r \sin (c_1 t) \\ y_2 = a_1 \cos t + r \cos (c_1 t) \end{cases} \quad -\frac{r}{R_p} \pi \leq t \leq 0。$$

CD 段,

$$\begin{cases} x_3 = R_f \cos t \\ y_3 = R_f \sin t \end{cases} \quad \left(\frac{1}{2} + \frac{r}{R_p}\right) \pi \leq t \leq \left(\frac{3}{2} - \frac{r}{R_p}\right) \pi。$$

DE 段,

$$\begin{cases} x_4 = x_2 \\ y_4 = -y_2 \end{cases} \quad -\frac{r}{R_p}\pi \leq t \leq 0。$$

EF段,

$$\begin{cases} x_5 = x_1 \\ y_5 = -y_1 \end{cases} \quad 0 \leq t \leq \frac{r}{R_p}\pi。$$

FA段,

$$\begin{cases} x_6 = R_a \cos t \\ y_6 = R_a \sin t \end{cases} \quad \left(\frac{3}{2} + \frac{r}{R_p}\right)\pi \leq t \leq \left(\frac{5}{2} - \frac{r}{R_p}\right)\pi。$$

本文建立的型线方程与已有型线方程的不同之处在于:方程的滚圆相对于基圆的公转角 t 是根据螺杆传动几何关系推导并界定范围的。

为了验证上述型线方程的准确性,给定每个结构参数一个具体数值,通过编写代码输入 MATLAB 画出的型线如图 2 所示,这为后续的螺旋套参数化建模提供了基础。

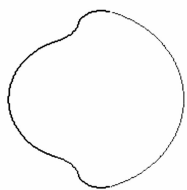


图2 MATLAB中型线方程仿真例图

Figure 2 Simulation case diagram of profile equation in MATLAB

2 螺旋套的参数化二次开发建模系统

本建模系统采用 ActiveX 技术,利用 VB 中的 DLL 工程文件加载 SolidWorks API 函数库,通过改变参数来控制螺旋套模型,以完成产品的参数化建模^[11]。在 VB 中引用 SolidWorks API 类型库,把 VB 程序与 SolidWorks 连接起来,从而在 SolidWorks 实现螺旋套设计和建模的一体化过程,二次开发的程序总体框架如图 3 所示。

2.1 创建 SolidWorks 建模插件

SolidWorks 插件实际是一个 DLL 文件,支持 Dynamic Link Library 技术,它建立的过程是:在支持 SolidWorks API 功能的编程语言 VB 中新建一个工程,工程中包含有实现功能的窗体与代码,编程好后另存为 dll 文件,在 SolidWorks 下以 Add—Ins(*.dll) 文件类型打开该 DLL 工程文件,则文件会作为 SolidWorks 插件出现在 SolidWorks【工具】-【插件】中,然后将此插件嵌入到 SolidWorks 程序中,由 SolidWorks 实施配置与管理,每次打开 SolidWorks 后新增的插件会自动加载进来^[12]。

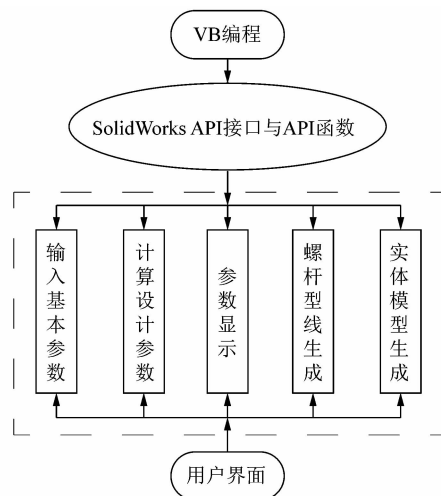


图3 二次开发总体框架图

Figure 3 Second development framework

在 SolidWorks 中加载编写的插件得到双螺杆螺旋套设计建模的菜单,该菜单下有 4 个子菜单,如图 4 所示。这 4 个子菜单就是 SolidWorks 自动画螺旋套的步骤。按顺序单击相应菜单即可执行相对应的二次开发的功能模块。

其功能包括:选择螺杆套类型,参数计算,角度范围的定义,双螺杆螺旋套模型生成等。

建立双螺杆螺旋套的三维模型时,首先在参数化建模界面输入螺旋套的参数;运行程序,按照程序中预先输入的型线方程画出型线,通过沿螺旋线扫描得到空间实体模型。



图4 双螺杆螺旋套三维建模主菜单

Figure 4 Double screw set of 3D modeling of main menu

2.2 螺旋套参数化建模应用实例

本文编写了若干种螺旋套型线的程序代码,子菜单的不同之处主要在于型线方程不一样,其实现过程基本一致。现以 Ω 形对称型螺旋套为例,参数化建模过程如图 5 所示。

首先是选择螺旋套类型,加载出来的界面如图 5(a)所示,本次实例选择的是 Ω 形对称型螺旋套。



(a) 选择螺旋套类型界面



(b) 参数计算界面



(c) 计算角度范围界面



(d) 模型生成界面

图5 参数化建模流程图

Figure 5 Parametric modeling flow chart

选择完螺旋套类型后,按下一步即会显示参数计算界面,界面如图5(b)所示。输进外径、内径、节圆半径的数值则会自动计算出其它几个参数的数值。

由图2可知,设计出的型线由6段组成,并且每段参数 t 不是具体数值,这样VB在内部应用程序运行时会变慢甚至出错,因此设计出计算角度范围的界面如

图5(c)所示。

角度范围计算完之后,按确定按钮就加载出双螺杆螺旋套模型生成界面,如图5(d)所示,输进螺旋套长度、螺距、偏心距、等距半径后自动生成螺旋套的三维模型。

2.3 双螺杆的装配仿真

完成螺旋套的参数化建模后,在SolidWorks中对各个零件进行基本配合,2个齿轮之间进行机械配合,通过干涉检查确保无干涉。新建运动算例,根据实际工作情况,设置较长的一根轴为主动轴,在该轴上定义马达,马达带动主动轴旋转,通过同步齿轮传递扭矩给从动轴使之旋转,从而使2个螺旋套之间啮合形成密封腔输送液体,经过运动模拟得出双螺杆的装配仿真模型如图6所示。

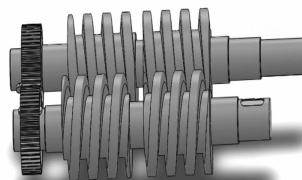


图6 双螺杆的装配仿真模型

Figure 6 Double screw assembly simulation model

通过该模型可验证双螺杆的运动,仿真显示型线不会发生任何干涉,说明了上述型线构建算法是有效的。

3 螺杆的有限元数值模态分析

3.1 有限元模态分析

模态分析是借助振动系统的模态参数对其动态性能进行分析的方法,也是确定复杂结构振动形态和薄弱环节的有效方法,螺杆泵在工作过程中会产生振动,故有必要对其进行模态分析。

模型的导入:将建立的螺旋套与轴装配的三维实体模型以*.x*_t文件形式导入有限元分析软件ANSYS,划分网格后如图7所示。采用的单元类型为Brick 20node 95,单元总数为124 007,点数总为189 221。

螺旋套材料参数:材料为12CrNi3;密度 $\rho = 7\ 840\text{ kg/m}^3$;弹性模量 $E = 212\text{ GPa}$;泊松比 $\mu = 0.31$ 。

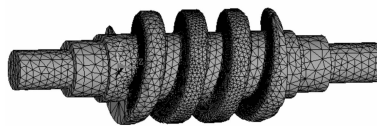


图7 网格划分图

Figure 7 Mesning map

在轴端、轴承安装处、花键处施加刚性约束后,加载完成后的约束如图8所示,利用ANSYS求解处理器的MODAL模块进行螺杆转子的模态分析,计算结果如表1所示。

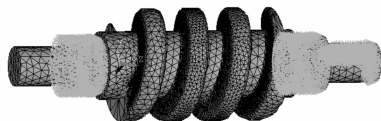


图8 刚性约束时加载约束图

Figure 8 Loading constraint graph

表1 刚性约束下螺杆的固有特性分析

Table 1 Analysis of inherent characteristics of screw in rigid constraint

阶数	固有频率/Hz	总位移最大变形量/mm
1	876.58	0.759 129
2	1 122.10	0.538 716
3	1 148.30	0.733 909
4	3 733.80	0.602 382
5	3 973.90	0.665 702
6	6 228.80	1.133 000

有限元模态分析过程中固有频率与螺杆轴承处的约束类型有关,当轴承处为弹性约束时,可看作径向的压缩弹簧,螺杆受弹性约束模型图见图9。当刚度系数为 $4.7 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时固有特性分析结果如表2所示。

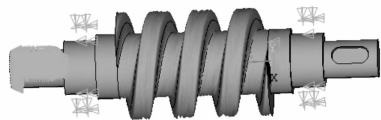


图9 螺杆受弹性约束模型图

Figure 9 Screw model diagram in elastic constraints

表2 弹性约束下螺杆的固有特性分析

Table 2 Analysis of inherent characteristics of screw in elastic constraints

阶数	固有频率/Hz	总位移最大变形量/mm
1	232.17	0.728 025
2	235.78	0.728 431
3	918.71	0.667 205
4	2 142.00	1.167 000
5	2 169.90	1.201 000
6	3 089.90	0.481 560

根据表1和表2的总位移最大变形量数据,综合分析后最大位移变形量为1.201 000 mm,故设计泵体时应使它与螺杆的安装间隙大于1.201 000 mm,以免发生干涉碰撞。

综上,通过对比轴承在2种约束情况下的固有频

率,知最小频率为232.17 Hz。弹性约束时,各阶固有频率的数值比刚性约束时明显降低,但2种约束下的振型除第一阶不同之外,其它阶几乎没有差别。可知约束类型只能改变固有频率的大小而对振型几乎没有影响。

本次研究螺杆泵工作转速 n 为3 250 r/min,对应的激振频率为

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{n}{60} = \frac{3\ 250}{60} = 54.17 \text{ Hz}。$$

式中, ω_n 为螺杆角速度/($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)。

激振频率远小于最小固有频率232.17 Hz,因此在正常工作时螺杆泵不会发生共振。

3.2 弹性单元的刚度对模态分析的影响

考虑弹性支撑时,固有振动特性研究的关键是:确定单元Combin14的刚度 K ,将弹簧单元的 K 依次取为 4.7×10^4 , 4.7×10^5 , 4.7×10^6 和 $4.7 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,分析结果如表3所示。

表3 弹性单元的刚度取不同值时螺杆的基本固有振动频率

Table 3 Fundamental natural frequency when the stiffness of the spring element for different values of screw

刚度 $K/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	基本阶固有频率/Hz
4.7×10^4	230.14
4.7×10^5	230.59
4.7×10^6	230.59
4.7×10^7	232.17
∞	876.58

由表3知,考虑弹性支撑时螺杆的基本阶固有频率明显降低,当 K 的取值以10倍递增时,相应的固有频率变化不明显。当刚度值 K 增加到 $4.7 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,第1阶固有频率为232.17 Hz,当 K 再增加时,固有振动频率增加将不明显。弹性单元刚度 K 对螺杆轴承处弹性约束下的基本阶固有频率几乎没有影响。

4 结语

1) 本文分析了双螺杆螺旋套端面型线的形成过程,运用坐标转换的方法,以 Ω 形单头对称型型线为例推导出了它的型线方程,并对其进行了参数化建模。为其他类型的螺旋套参数化建模提供了良好的基础。

2) 研究了基于SolidWorks二次开发的双螺杆螺旋套参数化建模所涉及的关键技术,完成了螺旋套型线设计平台,实现了螺旋套型线的参数化设计,提高了设计效率,并对主从杆进行了装配及干涉检查。

(下转第13页)