

文章编号: 2095—0411 (2014) 01 - 0066 - 04

外波发生器谐波式齿轮泵齿轮的参数化设计^{*}

秦兴培¹, 祝海林², 黄 涛², 宁 鹏², 钱志达²

(1. 常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213016; 2. 常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213016)

摘要: 常规方法设计齿轮泵时, 齿轮计算工作量大、易出错, 建模步骤繁琐且精度差。本文基于 Visual Basic 和 SolidWorks 软件平台, 开发了一种外波发生器谐波式齿轮泵刚轮、柔轮的参数化设计软件, 利用该软件可以方便、高效地对这一新型泵进行交互式、系列化设计。

关键词: 谐波式齿轮泵; 渐开线; SolidWorks; Visual Basic; 参数化设计

中图分类号: TH 132

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095—0411.2014.01.015

Parametric Design of Gear in Harmonic Gear Pump with External Wave Generator

QIN Xing-pe¹, ZHU Hai-lin², HUANG Tao², NING Peng², QIAN Zhi-da²

(1. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: It is difficult to calculate gear parameters and build gear model in designing gear pumps by the traditional method, error - prone and bad precision. A parametric design software of circular spline and flexspline in harmonic gear pump with external wave generator based on Visual Basic and SolidWorks software platform is developed in this paper, which can be used to mutual and seriation design for the new gear pumps easily and efficiently.

Key words: harmonic gear pump; involute; SolidWorks; Visual Basic; parametric design

谐波式齿轮泵是将谐波齿轮传动技术和内啮合齿轮泵结合起来的一种新型齿轮泵。泵中轮齿啮合的对称性以及吸排油口分布的对称性, 使其承载的径向力近似平衡, 有效克服了普通齿轮泵径向液压力不平衡的缺点, 提高了泵的使用寿命。

外波发生器谐波式齿轮泵工作原理简图如图 1 所示。在刚轮和柔轮的轮齿脱开处用月牙型挡板隔开, 可形成 4 个密封的工作腔。波发生器固定, 刚轮带动柔轮按图示方向旋转时, 吸油口 1 处由于相

互啮合的轮齿逐渐脱开, 容积逐渐增大, 形成局部真空, 油液在外界大气压力的作用下进入; 排油口 4 处轮齿逐渐进入啮合, 密封空间体积减小迫使液体被挤出。这样, 谐波式齿轮泵在齿轮的连续转动中不断地进行吸油和排油。

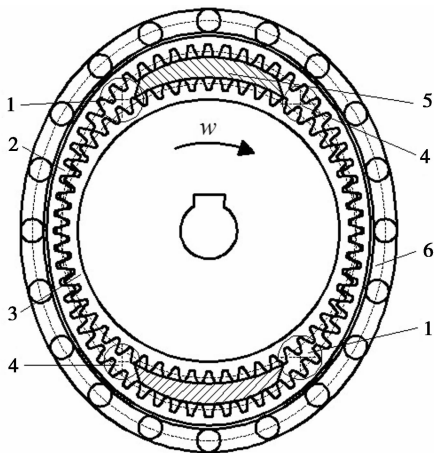
谐波式齿轮泵内的一对渐开线齿轮是决定该泵性能的核心部件, 对齿轮参数的设计不仅要参考齿轮泵设计的相关准则, 同时也要符合谐波齿轮传动的相关准则。为兼顾以上要求, 必须通过反复的计

^{*} 收稿日期: 2013 - 05 - 23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51075046)

作者简介: 秦兴培 (1989—), 女, 江苏南通人, 硕士生; 通讯联系人: 祝海林。

算来调整修改大量的参数并绘图, 任务繁重、效率较低。



说明: 1. 吸油口; 2. 柔轮; 3. 刚轮; 4. 排油口; 5. 月牙板; 6. 波发生器。

图 1 谐波式齿轮泵工作原理简图

Fig. 1 Working principle diagram of harmonic gear pump

基于 SolidWorks 的齿轮渐开线齿廓曲线的精确绘制, 一直是人们关注的计算机辅助三维设计的难点问题^[1]。目前应用较多的简化近似画法和描点法, 存在着绘图精度低和应用复杂的缺点^[1-2]。本文将 SolidWorks 的公式曲线功能应用到其二次开发中, 借助 Visual Basic (以下简称 VB) 实现了由公式驱动自动生成精确的渐开线齿廓曲线, 该方法不但保证了造型的精确性, 也是模型的建立和装配、有限元分析和运动学分析、加工仿真的基础; 同时将 SolidWorks 参数化建模和 VB 人机交互式编程的方法用于新型齿轮泵刚轮、柔轮的参数化设计中, 减少了设计人员的工作量, 提高了该新型泵的设计效率。

1 谐波式齿轮泵齿轮参数的确定

齿轮泵中一对齿轮参数 (齿数、模数等) 是决定齿轮泵性能的关键, 谐波式齿轮泵设计过程中要进行配齿计算及验算, 步骤繁杂且易出错。利用 VB 编程, 让计算机自动对齿轮各参数进行计算, 求解快速、准确。

1.1 刚轮、柔轮齿数的确定

柔轮是谐波齿轮传动中承受载荷最大、且在复杂的交变应力状态下工作的构件^[3]。因此, 对谐波式齿轮泵进行设计时, 必须首先保证柔轮的疲劳强度, 据此计算柔轮的最少齿数, 再由齿数差确定刚轮齿数, 具体步骤如下: ①拟定齿轮副的理论传动

比 i_t (与何者主动有关), 设定柔轮的疲劳强度许用安全系数 $n_a^{[3-4]}$ (要求 $n_a = 1.3 \sim 1.5$); ②选择柔轮的材料及其热处理方式, 查得柔轮材料的弹性模量 E 、弯曲疲劳极限 σ_{-1} ; ③依据谐波传动齿轮副的齿数差等于波数的整数倍的原则, 选定刚轮与柔轮的齿数差为某个整数 K ; ④满足疲劳强度的柔轮最少齿数的计算。

柔轮在弯扭组合交变应力下的疲劳强度条件为:

$$n = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} \geq n_a \quad (1)$$

式中: n_σ 、 n_τ 分别是弯曲正应力 σ 、扭转切应力 τ 单独作用时柔轮的工作安全系数。

由于扭转切应力 τ 对柔轮疲劳强度的影响很小, 在近似计算中, 可以只考虑弯曲正应力 σ 的影响, 即柔轮的疲劳强度安全系数应该满足:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m} \geq n_a \quad (2)$$

式中: K_σ 、 ψ_σ 分别是齿根应力集中系数、平均应力的影响系数, 柔轮截面上的应力幅 $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = 6.7214 \frac{K_\delta W_o E \delta}{d_m^2}$ (d_m 为柔轮中性圆直径^[5], 柔轮径向最大变形量 $W_o = 0.5mK$, m 为齿轮模数)。

根据文献 [3], 一般取 $K_\delta = 1.05$, $K_\sigma = 1.8$, $\psi_\sigma = 0.15$, 柔轮圆环壁厚取 $\delta = 0.012d_R = 0.012mZ_R$, 得

$$n_\sigma = 12.2795 \frac{\sigma_{-1} (Z_R + 2.668)^2}{EZ_R (Z_R - Z_G)} \geq n_a \quad (3)$$

按公式 (4) 计算柔轮齿数的最小容许值 Z_{Rm} :

$$Z_{Rm} = 0.0081 \sqrt{25L^2 + 3276.17L} + 0.0407L + 2.668 \quad (4)$$

式中: $L = EK n_a / \sigma_{-1}$ 。

(5) 按公式 (5) 取 Z_{Ri} 、 Z_{Rm} 中的最大值

$$Z_{Ri} = \max \{Z_{Ri}, Z_{Rm}\} \quad (5)$$

式中: $Z_{Ri} = K i_t / (i_t - 1)$; 拟定柔轮的齿数 $Z_R = [Z_{Ri}] + 1$, 其中 $[Z_{Ri}]$ 表示不大于 Z_{Ri} 值的最大整数;

(6) 刚轮的齿数 $Z_G = Z_R - K$;

(7) 计算实际传动比 $i_p = Z_R / Z_G$, 验算传动比误差 $\Delta i = |1 - i_t / i_p|$, 要求满足 $\Delta i < 5\%$ 。

1.2 齿轮模数的确定

(以下公式中下标 1、2 分别表示刚性外齿轮、

柔性内齿轮)

根据文献 [6] 中的渐开线内啮合齿轮泵的排量公式, 推导得谐波式齿轮泵的排量 q (有 2 个排油口时):

$$q=2\pi Bm^2(1.65Z_1-0.3038Z_1/Z_2-0.2737) \quad (6)$$

式中: B 为齿轮宽度, $B=B^*d_1$, 建议取齿宽系数 $B^*=(0.6\sim 0.8)$, 其中 d_1 为刚性外齿轮的分度圆直径:

$$m\geq 10\times$$

$$\left[\frac{q_{sj}}{2\pi B^*Z_1\left[1.65Z_1+0.3038\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)+0.2737\right]}\right] \quad (7)$$

式中: q_{sj} 为泵的设计排量, mL/r (按 GB2347-80 选取); m 为齿轮模数, mm。

1.3 计算刚轮、柔轮的几何尺寸

根据通用谐波齿轮渐开线齿廓常用标准, 对于分度圆压力角 $\alpha=20^\circ$, 柔性内齿轮、刚性外齿轮都是正常齿时, 按文献 [5], 刚性外齿轮的齿顶高系数 $h_{a1}^*=1$, 齿根高系数 $h_{f1}^*=1.2$; 柔性内齿轮的齿顶高系数 $h_{a2}^*=0.65$, 齿根高系数 $h_{f2}^*=1.35$ 。根据谐波齿轮传动的有关公式^[3,5], 即可分别计算出内、外齿轮的几何尺寸。

1.4 谐波式齿轮泵齿轮参数的可视化计算

根据节 2.1~2.3 的设计思路, 应用 VB 软件编程, 建立交互式对话框, 输入或选取齿数差、设计排量等原始数据, 依次点击图 2 界面 1、2、3、4 中 [参数计算] 按钮, 即可自动计算谐波式齿轮泵刚轮、柔轮的齿数、模数及几何尺寸, 为参数化绘制齿轮提供尺寸数据。软件可对传动比误差及齿顶不变尖条件进行校验, 若不满足条件, 会有信息提示。如: 若选择的原始数据使得传动比误差大于或等于 5%, 会提示“传动比误差过大, 请重新输入原始数据!”。

2 谐波式齿轮泵齿轮的参数化设计

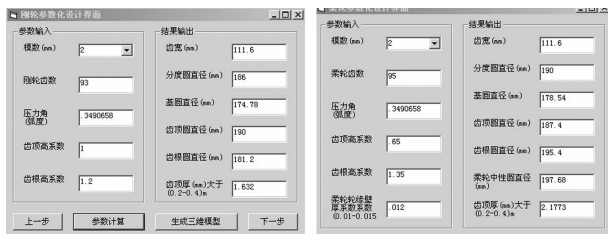
SolidWorks 软件强大的 API 接口, 实现了 VB 与 SolidWorks 的通讯, 可通过 VB 编程对 SolidWorks 进行操纵; 而 SolidWorks 自带的宏录制功能, 可以将产品设计过程以宏操作代码形式记录下来, 进行合理编辑修改, 即可提供 VB 所需的程

序。宏功能极大地简化了 SolidWorks 的二次开发过程, 对于实现参数化产品设计具有重要意义。



界面 1: 齿数的确定

界面 2: 齿轮模数的确定



界面 3: 刚轮参数化设计

界面 4: 柔轮参数化设计

图 2 刚轮、柔轮的参数化设计软件

Fig. 2 Parametric design software of circular spline and flexspline

2.1 谐波式齿轮泵齿轮的参数化设计过程

运用 SolidWorks 中宏录制命令录制齿轮的三维建模过程, 通过编辑修改所录制的宏, 用变量代替代码中的关键数据, 以便将上节得出的尺寸数据赋值给这些变量, 完成刚轮与柔轮的参数化设计。在此重点阐述渐开线齿廓线的绘制方法:

在录制宏之前, 需要对 SolidWorks 环境中生成的齿轮用多种方法进行比较, 最终确定适于二次开发生成齿轮的步骤来录制宏^[7]。

渐开线齿廓曲线比较复杂, SolidWorks 的公式曲线功能, 可以在草图中用公式方便、快捷的建立精确渐开线。此方法关键是建立渐开线直角坐标方程。根据文献 [8] 推导出渐开线直角坐标方程:

$$\begin{cases} X_t=r_b(t\sin t+\cos t) \\ Y_t=r_b(\sin t-t\cos t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: t 为渐开线发生线在基圆上的滚动角, 由于本文所涉及的谐波式齿轮泵齿轮齿数较多, 齿轮的齿根圆直径总是大于基圆直径, 所以,

$$\sqrt{r_f^2-r_b^2}/r_b\leq t\leq\sqrt{r_a^2-r_b^2}/r_b。$$

然而, SolidWorks 的公式曲线功能暂不支持对变量 (如 r_b 、 r_f 及 r_a) 的定义, 只能以 t 作为变量。若直接在 SolidWorks 中输入公式 (8), 再在程序中对 r_b 、 r_f 及 r_a 分别赋值, 并不能生成目标曲线。这也是公式曲线功能一直以来未被应用到二次开发绘制各类曲线的主要原因。但是, 在公式

(8) 中将 r_b 、 r_f 及 r_a 直接用标注尺寸后的名称代替则能避免上述情况的发生。此段程序代码如下:

```
.....  
Dim equationDriveCurve As Object  
Set equationDriveCurve =  
Part.SketchManager. _ CreateEquationSpline2  
(""" D2@草图 2"" /2 * (t * sin (t) _ + cos  
(t))", """" D2@草图 2"" /2 * (sin (t) - t * cos  
(t))", "", " sqr ( "" D1@草图 1"" ^2 - "" D2@  
草图 2"" ^2 ) / "" D2@草图 2""", " sqr ( "" D3  
@草图 2"" ^2 - "" D2@草图 2"" ^2 ) / "" D2@  
草图 2""", False, 0, 0, 0, True, True)
```

Part.ViewZoomtofit2
.....
此段程序运行后所得的图形如图 3 所示。

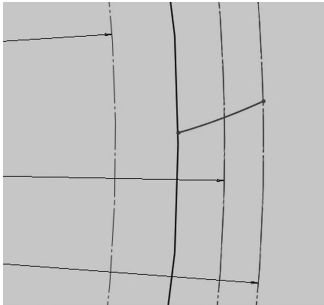


图 3 渐开线齿廓曲线
Fig. 3 The involute tooth profile curve

2.2 应用实例

现设计一外波发生器谐波式齿轮泵, 拟定齿轮副的理论传动比 $i_t=1.05$, 柔轮的疲劳强度许用安全系数 $n_a=1.4$, 柔轮的材料选用 30CrMnSiA, 热处理工艺采用调质+喷丸, 其弹性模量 $E=2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ 、弯曲疲劳极限 $\sigma_{-1}=480 \text{MPa}$, 齿数差取 2, 设计排量 $q_{sj}=400 \text{ml/r}$, 齿宽系数 $B^*=0.6$, 柔轮轮缘壁厚系数 $\delta^*=0.012$, 运行外波发生器谐波式齿轮泵齿轮参数化设计软件, 如图 2 所示, 点击界面 3、4 中的 [生成三维模型] 按钮, 程序将自动驱动打开 SolidWorks 软件并生成如图 4 所示的刚轮、柔轮三维模型。

通过改变齿数差, 可以驱动软件生成相应的刚轮、柔轮三维模型。将不同齿数差下的刚轮、柔轮进行装配形成齿轮副, 可以很直观地观察不同齿数差下月牙板的安装空间; 反过来, 也可以通过此方

法选择合适的齿数差。

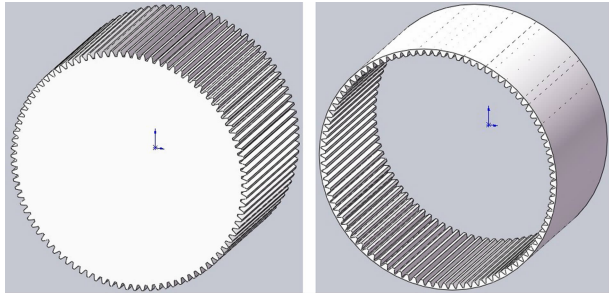


图 4 刚轮、柔轮三维模型
Fig. 4 3D model of circular spline and flexspline

3 结 语

针对谐波式齿轮泵齿轮设计过程计算量大、建模效率低、精度差的缺点, 本文开发一种参数化设计软件, 计算机自动完成繁琐的计算和三维建模过程、出图快速且不易出错, 具有友好的人机界面、交互操作简便, 只需输入原始设计数据, 即可自动计算并驱动 SolidWorks 直接生成两齿轮的三维模型; 此外, 在参数化生成齿轮的过程中, 基于 VB 和 SolidWorks 实现了由公式驱动自动生成精确的渐开线齿廓曲线, 保证了齿轮造型的精确性。该软件的使用, 可缩短谐波式齿轮泵的设计周期、提高其设计质量, 有助于这一新型齿轮泵的系列化开发与推广。

参考文献:

[1] 孙付春, 李玉龙. 基于 SolidWorks 渐开线斜齿轮建模方法的研究 [J]. 煤炭技术, 2012, 31 (12): 20-21.
[2] 罗通, 陈敏. 基于 SolidWorks 的齿轮参数化设计方法 [J]. 现代机械, 2011 (4): 17-19.
[3] 饶振纲. 行星传动机构设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
[4] [苏] 伊万诺夫. 谐波齿轮传动 [M]. 沈允文, 李克美, 译. 北京: 国防工业出版社, 1987.
[5] 范又功, 曹炳和. 谐波齿轮传动技术手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
[6] 何存兴. 液压元件 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
[7] 索超, 李玉翔, 林树忠. 基于 VB 语言对 SolidWorks 参数化设计的二次开发 [J]. 制造业自动化, 2013, 35 (8): 137-139.
[8] 郑文纬, 吴克坚. 机械原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.