

文章编号: 1673-3851 (2012) 04-0560-05

ADAMS 二次开发技术在非圆斜齿轮齿廓面设计中的应用

姚佳明, 孙 良, 张留远, 郑 建

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 依据齿条刀具范成法加工非圆齿轮的原理, 建立了计算机仿真加工非圆斜齿轮的滚切数学模型, 提出了一种基于 ADAMS 二次开发技术生成非圆斜齿轮齿廓面的方法, 并开发了非圆斜齿轮仿真加工软件, 用该软件生成的椭圆斜齿轮, 已成功应用于椭圆斜齿轮行星系宽窄行分插机构中, 验证了该方法的正确性。

关键词: 非圆斜齿轮; 齿条插刀; ADAMS; 二次开发; 仿真加工

中图分类号: TH132.424; S223.91 **文献标识码:** A

0 引 言

非圆齿轮用于传递两轴间的非匀速运动, 齿轮副的结构紧凑、刚性好、传动平稳, 容易实现动平衡^[1], 广泛应用于水稻插秧机的分插机构、叶片差速泵、测量仪器等机械领域^[2-4]。

如何准确、快速地生成非圆齿轮的齿廓是非圆齿轮设计和制造中的难点, 许多学者对此做了深入研究。谭伟明等^[5]根据滚刀节曲线与非圆齿轮节曲线相互纯滚动原理, 建立了具有最少联运控制坐标轴数的滚切最简数学模型, 并进行了二维计算机图形仿真; 武传宇等^[6]提出了一种基于齿廓特征点的非圆齿轮齿廓描述方法, 阐述了齿廓特征点、齿根圆、齿根过渡曲线和齿顶圆等全部齿廓数据的计算方法; Litvin 等^[7]基于非圆齿轮基曲线, 采用展开渐开线的方法获得了椭圆齿轮的齿廓曲线; 谢征恒等^[8]实现了基于 SolidWorks API 的椭圆齿轮的参数化设计及加工仿真。本文提出一种基于 ADAMS 解释性语言的非圆斜齿轮齿廓设计方法。

根据本文提出的非圆斜齿轮滚切数学模型, 利用 ADAMS/View 解释性宏命令语言对 ADAMS 进行二次开发, 设计人机交互界面, 通过计算机图形

仿真, 将非圆斜齿轮的生成过程实时展现在操作者面前, 通过仿真加工软件可以快速得到设计者所要求的非圆斜齿轮三维模型。

1 齿条插刀加工非圆斜齿轮的原理

目前, 范成法是加工齿轮最常用的方法, 其利用齿廓啮合基本定律来切制齿廓。计算机仿真加工非圆斜齿轮时, 设定非圆斜齿轮齿坯固定不动, 齿条插刀的节曲线绕齿坯节曲线作纯滚动, 如图 1 所示。

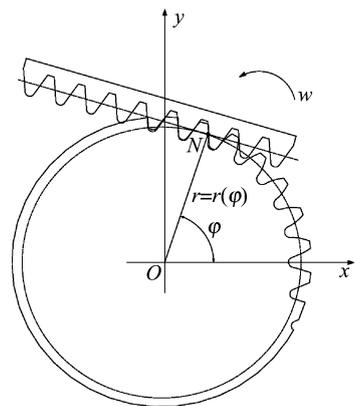


图 1 计算机模拟加工非圆斜齿轮

如图 1 所示, 以非圆斜齿轮旋转中心为坐标原点建立全局坐标系 oxy , 则非圆斜齿轮节曲线与齿

收稿日期: 2011-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(51175073); 浙江省现代农业装备与实施产业创新团队资金资助项目(2009R5001); “十二五”农村领域国家科技计划资助项目(2011BAD20B108)

作者简介: 姚佳明(1987-), 男, 浙江嘉兴人, 硕士研究生, 主要从事机构计算机辅助分析与设计等研究。

通讯作者: 孙 良, 电子邮箱: liangsun@zstu.edu.cn

条插刀相切点 N 的坐标方程如下:

$$\begin{cases} N_x = r(\varphi)\cos(\varphi) \\ N_y = r(\varphi)\sin(\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

式中, r 为节曲线的极半径, φ 为极角, 即非圆斜齿轮极半径与 x 轴正向之间的夹角。

齿条插刀二维截面几何形状局部示意如图 2 所示, 由 5 段直线段, 标记为 $l_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 和 4 段圆弧, 标记为 $R_i (i=1, 2, 3, 4)$ 组成。三维齿条插刀由二维截面按路径 $p_1 p_2$ 拉伸得到, 如图 3 所示。

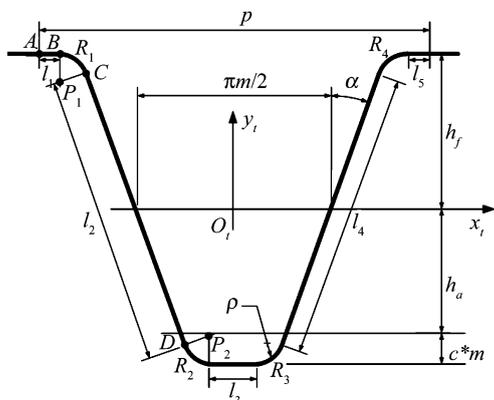
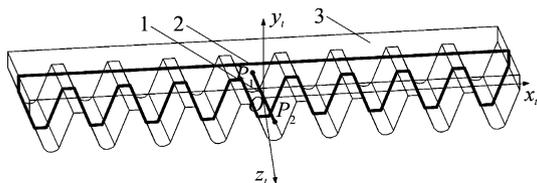


图 2 齿条插刀几何形状示意



1. 拉伸路径, 2. 拉伸截面, 3. 三维齿条插刀
图 3 三维齿条插刀示意

根据非圆斜齿轮的加工原理, 齿条插刀分度线与非圆斜齿轮节曲线相切并作纯滚动, 齿坯节曲线上滚过的弧长 l 应等于齿条插刀分度线上滚过的长度 s , 由关系式 $l = s$ 可以求得齿条插刀分度线上与齿坯节曲线上任意相切点对应的点, 如图 4 中的 N 点与 N_1 点。

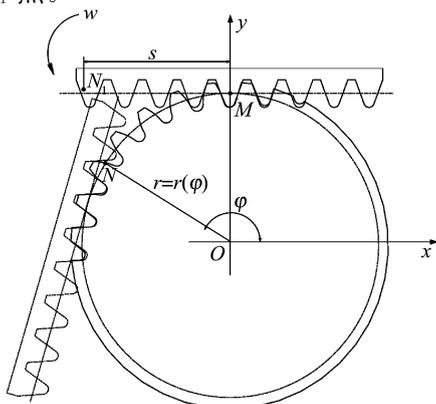


图 4 纯滚动示意

齿条插刀的转角等于经过齿条插刀分度线与齿坯节曲线的相切点 N_i 的切线与坐标系 oxy 的 x 轴正向之间的夹角, 如图 5 中所示的 θ 。图 5 中, $t-t$ 为 N_i 点处的切线; φ_i 表示相切点 N_i 处的极角, 即 N_i 与坐标系 oxy 原点连线与 x 轴正向之间的夹角; N_{i-1} 、 N_{i+1} 分别表示极角为 $\varphi_{i-1} = \varphi_i - \Delta\varphi$ 、 $\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta\varphi$ 的节曲线上的两点; $\Delta\varphi$ 表示角度的微小增量。

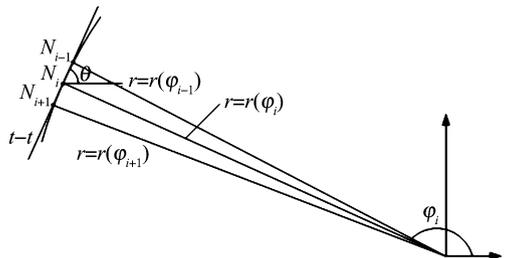


图 5 转角计算示意

本文中以 N_{i-1} 、 N_{i+1} 两点的连线来表示 N_i 相切点处的切线, 转角 θ 的数学表达式如下:

$$\theta = \arctan[(y_{N_{i-1}} - y_{N_{i+1}})/(x_{N_{i-1}} - x_{N_{i+1}})] \quad (2)$$

式中: $y_{N_{i-1}}$ 、 $y_{N_{i+1}}$ 分别表示 N_{i-1} 、 N_{i+1} 两点在全局坐标系 oxy 中的 y 坐标值;
 $x_{N_{i-1}}$ 、 $x_{N_{i+1}}$ 分别表示 N_{i-1} 、 N_{i+1} 两点在全局坐标系 oxy 中的 x 坐标值。

2 基于 ADAMS 的非圆斜齿轮仿真加工软件的开发

ADAMS 具有强大的二次开发功能, 包括 ADAMS/View 界面的用户化设计, 利用命令语言实现自动建模、仿真控制, 通过编制用户子程序实现复杂的特定功能等。

基于 ADAMS 开发的非圆斜齿轮仿真加工软件由用户界面模块、齿条型刀具和齿坯参数化建模模块、非圆斜齿轮仿真加工模块三部分组成。

系统的用户界面模块的主要功能是通过人机交互界面实现人机对话, 包括设计参数与计算参数显示、齿轮根切提示等功能。

齿条型刀具和齿坯参数化建模模块根据设计者通过用户界面输入的齿轮设计参数计算齿轮的其它基本参数、进行根切较验、生成刀具、齿坯参数化模型等, 编制程序的流程如图 6 所示。

非圆斜齿轮仿真加工模块是本系统的核心模块。此模块根据第 1 节所述的非圆斜齿轮纯滚动数学模型编制仿真切割程序, 将非圆斜齿轮的生成过程实时展现在设计者面前, 实现非圆斜齿轮的虚拟

仿真加工。

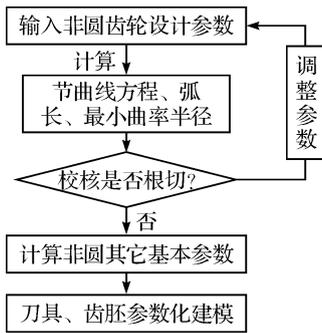


图6 参数化建模模块流程

3 椭圆斜齿轮仿真加工实例分析

椭圆齿轮是最常见的一种非圆齿轮,在纺织机械、造纸机械、卷烟机和往复式输送机等机器中都有广泛应用^[1]。

3.1 齿条型刀具与齿坯的参数化建模

椭圆斜齿轮仿真加工软件的主界面如图7所示,包括设计参数、参数计算、计算结果、刀具齿坯生成、(斜齿)椭圆齿轮生成五部分。

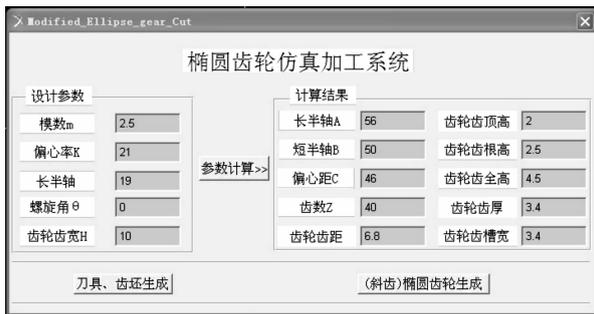


图7 椭圆斜齿轮仿真加工软件主界面

软件将根据设计者输入的椭圆斜齿轮设计参数按照工程上常用的以椭圆几何中心为坐标原点的公式计算椭圆节曲线的总弧长^[1]。

$$l = 4 \int_0^{\pi/2} A \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi \quad (3)$$

式中: A 为椭圆斜齿轮的长半轴; k 为椭圆斜齿轮的偏心率。

上述积分可以通过数值积分方法求解,也可以查阅椭圆积分表求解,文献^[1]也提供了一个近似计算公式。本文采用微分累积的方法进行求解,具体思路是将椭圆节曲线平均等分为360份,每 1° 又平均分成1000份,在每 0.001° 中,微小椭圆弧长可以近似看作圆弧长,采用计算圆弧长的公式来计算椭圆弧长,再将每 0.001° 的弧长累加求和求得总弧长。每 0.001° 圆弧长的半径为该 0.001° 的起始半径和终止半径的一半,即

$$R_i =$$

$$A(\sqrt{1 - k^2 \sin^2(\varphi_i + 0.001)} + \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi_i})/2 \quad (4)$$

式中: R_i 表示第 i 份 0.001° 上的半径, φ_i 表示第 i 份 0.001° 上的起始角度。

微小弧长累加求和在ADAMS/View中采用如下程序实现:

```

var modify var=xmatrixarc
real=(eval(append(xmatrixarc,x_arclength)))

```

```
var set var=xsumarc
```

```
real=(eval(sum(xmatrixarc)))
```

其中: $x_arclength$ 表示每 0.001° 对应圆弧的弧长;

$xmatrixarc$ 为软件创建的用于存储各段圆弧长的矩阵;

$append(M_1, M_2)$ 表示将矩阵 M_2 中的行添加到矩阵 M_1 ;

$sum(M)$ 表示对矩阵 M 的所有元素求和^[9]。

若椭圆斜齿轮的齿数为 z ,模数为 m ,则封闭椭圆节曲线在 2π 角度内的总周长 L 应恰好是 z 个齿距,即应该满足表达式^[1]:

$$L = pz = \pi mz \quad (5)$$

一般来说,设计者随意输入的椭圆斜齿轮设计参数很少能恰好满足以上表达式,本文开发的椭圆斜齿轮仿真加工软件通过以下程序实现圆整。

```
var set var=num_z
```

```
real=(eval(rtoi(4sumarc/(m*pi))))
```

```
var set var=num_z0
```

```
real=(eval(rtoi(1+4sumarc/(m*pi))))
```

```
var set var=tmp_num_z
```

```
real=(eval(2rtoi(num_z0/2)))
```

```
if condition=((num_z0 - tmp_num_z) == 0)
```

```
var modify var=num_z0
```

```
real=(eval(num_z0 - 1))
```

```
end
```

其中: $rtoi(x)$ 是ADAMS内置的函数,表示返回数字表达式 x 的整数部分;

$sumarc$ 是根据设计者给定的设计参数计算得到的 $1/4$ 椭圆弧长;

m 表示椭圆斜齿轮的模数;

if 是ADAMS内置的判断函数。

3.2 仿真加工程序的设计

仿真加工程序的核心是如何模拟实现齿条插刀分度线与椭圆斜齿轮节曲线的纯滚动。本文开发的仿真加工软件通过以下四步来实现: 将齿条插刀平移到椭圆斜齿轮节曲线相切点位置; 将齿条插刀分度线绕着相切点旋转到此点的切线位置; 对椭圆斜齿坯和齿条插刀作布尔差运算; 按以上三步循环一周, 实现整个椭圆斜齿轮的计算机模拟加工。

关键一步是求出相切点至初始点的椭圆弧长, 采用上文提出的微分累加的方法求得。

根据极坐标原点取在椭圆下焦点的弧长计算公式^[1]:

$$\begin{cases} l = p \int_0^\varphi \sqrt{\frac{1-2k\cos\varphi+k^2}{(1-k\cos\varphi)^4}} d\varphi \\ p = A(1-k^2) \end{cases} \quad (6)$$

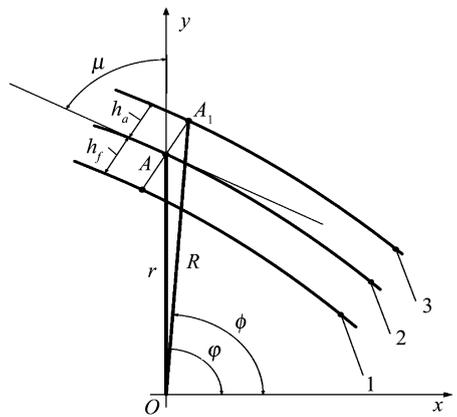
采用以下公式近似计算微小椭圆弧段的弧长:

$$l = p \int_0^\varphi r d\varphi = pr\varphi = p\left(\frac{r_0+r_\varphi}{2}\right)\varphi \quad (7)$$

其中: r_0 表示微小弧段初始点到椭圆下焦点之间的极半径; r_φ 表示微小弧段终止点到椭圆下焦点之间的极半径。

3.3 交错布置椭圆斜齿轮干涉分析及解决

采用上述椭圆斜齿轮仿真加工软件生成的椭圆斜齿轮交错布置如图 8(a) 所示, 从中可以观察到两个齿轮有微量干涉。笔者经过分析, 其产生干涉的原因是: 椭圆齿轮的齿顶曲线理论上是节曲线的法向等距线, 如图 9 所示, 为了简化计算, 一般把齿顶线近似为椭圆节曲线的偏距线, 偏距齿顶高并不在节曲线的法向计量, 齿顶线的长、短半轴, 分别等于椭圆节曲线的长短半轴加上一个齿顶高 h_a ^[1]。实际的齿顶曲线极坐标方程如下:



1. 齿根曲线, 2. 节曲线, 3. 齿顶曲线

图 9 椭圆齿轮齿顶线

$$\begin{cases} R = \sqrt{r^2 + h_a^2 + 2rh_a \sin\mu} \\ \phi = \varphi - \arcsin \frac{h_a \cos\mu}{R} \\ \mu = \arctan \frac{r}{dr/d\varphi} \end{cases} \quad (8)$$

式中: R 为实际齿顶曲线的极半径; ϕ 为近似齿顶曲线的极半径; ϕ 为实际极半径对应的极角; φ 为近似极半径对应的极角; μ 为节曲线在 A 点的切线正方向(转角 φ 加大的方向)与极半径 r 的正向的夹角。

由极坐标方程可知, 齿顶线的极半径为:

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{r^2 + h_a^2 + 2rh_a \sin\mu} \\ &\leq \sqrt{r^2 + h_a^2 + 2rh_a} = r + h_a \end{aligned} \quad (9)$$

即实际的椭圆斜齿轮齿顶半径比近似的半径要小, 采用上述调整后的齿轮齿顶半径建模切割得到的椭圆斜齿轮交错布置如图 8(b) 所示, 正常啮合, 运动仿真后也不发生两齿轮轮齿干涉。

4 结 论

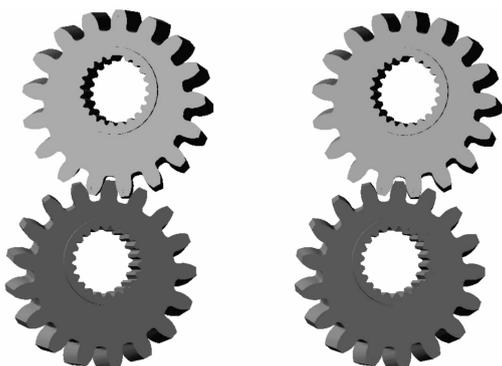
a) 依据齿条刀具范成法加工非圆斜齿轮的原理, 建立了非圆斜齿轮、齿条插刀及纯滚动数学模型;

b) 基于提出的数学模型, 对 ADAMS 软件进行二次开发, 设计了非圆斜齿轮仿真加工软件;

c) 以椭圆斜齿轮为实例, 开发了仿真加工软件, 论述了实现椭圆斜齿轮仿真加工的过程, 分析椭圆斜齿轮副产生干涉的原因, 并通过调整齿顶曲线方程解决了这一问题。

参考文献:

[1] 吴序堂, 王贵海. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 1-44.



(a) 干涉

(b) 不干涉

图 8 椭圆斜齿轮交错布置

- [2] 陈建能. 椭圆齿轮行星系分插机构的动力性能分析、参数优化及实验验证[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [3] 陈明, 王广林, 刘福利, 等. 叶片差速泵偏心圆-非圆齿轮驱动系统的研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 98-101.
- [4] 熊镇芹, 高本河, 吴序堂. 非圆行星齿轮液压马达的配流设计研究[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(5): 509-511.
- [5] 谭伟明, 胡赤兵, 沈伟杰, 等. 非圆齿轮滚切最简数学模型及其图形仿真[J]. 机械工程学报, 2001, 37(5): 26-29.
- [6] 武传宇, 金玉珍, 贺磊盈. 基于包络特征的非圆齿轮齿廓计算方法研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(15): 1796-1799.
- [7] Litvin F L. Gear Geometry and Applied Theory[M]. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1994: 346-381.
- [8] 谢征恒, 王生泽. 基于 SolidWorks API 的椭圆齿轮参数化设计及加工仿真[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2009, 35(4): 467-471.
- [9] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 257-275.

Application of Secondary Development of ADAMS in Design of Profile of Non-Circular Gears

YAO Jia-ming, SUN Liang, ZHANG Liu-yuan, ZHENG Jian

(School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Based on the principle of employing rack cutter to machine non-circular gears, a mathematical model stimulating non-circular gear machining by computer has been built up; A method to generate profile of helical non-circular gear by the secondary development technique of ADAMS has been proposed; Based on this method, machining simulation software of non-circular gears has been developed, providing technical support for design and manufacture of non-circular gears. For example, helical ellipse gear generated by the software has been successfully applied to wide-narrow line transplanting mechanism composed by epicyclic train of helical elliptic gears, which verifies the correctness of the method.

Key words: non-circular gear; rack cutter; ADAMS; the secondary development; machining simulation

(责任编辑: 张祖尧)