

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2016.02.017

基于虚拟现实的范成法齿轮设计与精确建模

于盛睿¹, 韩文¹, 付俊发², 曾兰玉³

(1.景德镇陶瓷大学机械与电子工程学院, 江西 景德镇 333403; 2.东风汽车股份有限公司, 湖北 武汉 430074;

3.景德镇陶瓷大学教务处, 江西 景德镇 333403)

摘要:应用范成法提出一种基于虚拟现实的精确设计与建立齿轮模型的方法, 通过VS2005使用C#自动生成齿条刀具加工圆柱齿轮的仿真轨迹, 从而获得齿轮齿廓。根据齿廓平面图形, 对根切、齿顶变尖与齿顶修缘等齿轮设计的必要过程进行检查。将齿轮建模包络网格点坐标导出至UG后, 生成包络网格剪切体, 最终建立精确的真实三维齿轮模型, 为齿轮的设计、制造、动态分析及开发应用提供具有可操作性的高效方案。

关键词:范成法; 坐标变换; 网格包络; C#; UG grip

中图分类号: TQ174.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2278(2016)02-0200-05

The modeling of Involute Gear Based on Generating Method Using Virtual Machining Technology

YU Shengrui¹, HAN Wen¹, FU Junfa², ZENG Lanyu³

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, Jiangxi, China; 2. Dongfeng Automobile Co., Ltd, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Office of Academic Affairs, Jingdezhen Ceramic Institute,

Jingdezhen 333403, Jiangxi, China)

Abstract: An accurate design and modeling approach of gear is put forward using the generation method. The gear tooth profile is obtained by simulating rack cutter machining cylindrical gear tool path in VS2005 compiled using C#. The root cutting graphics, the addendum sharpening, the addendum edge fixing and other gear design processes can be checked with the gear profile. The gear modeling enveloping points on grid coordinates is exported to UG, the grid envelopes are generated, and a mathematical model for gear is establish.

Key words: generation method; coordinate transformation; grid envelope; C#; UG grip

0 引言

齿轮及其组成的齿轮产品是机械装备的重要基础件, 绝大部分机械成套设备的主要传动部件采用齿轮传动^[1]。齿轮传动具有传动平稳, 传动比精确, 工作可靠, 效率高, 寿命长, 使用功率、速度和尺寸范围广等优点^[2]。目前, 齿轮设计主要是利用计算渐开线的方法进行, 通过引导线进行拉伸^[3-5]。使用计算渐开线的方法生成的斜齿轮在弧形的齿面精度上稍有欠缺。范成法作为齿轮设计的常用方法, 通过范成法设计的齿轮在实际的生产和加工中更加贴近实际, 能够有效避免各种缺陷的发生^[6-8]。

本文将有限元网格技术提升分析精度引入齿轮齿面造型的过程中, 通过细密化网格划分, 提高齿

轮齿面造型的精度。使用C#编程模拟范成法齿条加工成形, 通过坐标变换, 得到齿轮轮廓, 通过轮廓大致形状, 可以更加直观的判定齿轮设计是否合理, 根切、齿顶变尖等常见问题是否存在, 以及进行齿顶修缘。获得平面的齿廓形状, 通过坐标变换, 得到空间上的包络网格点, 使用UG grip编程得到剪切体, 与目标圆柱进行布尔剪运算, 得到高可靠性的齿轮模型。通过UG运动仿真, 结果表明利用本文所采用方法生成的齿轮, 能够获得啮合区域, 建立精确的三维齿轮模型, 获得可信赖的结果。

1 齿轮平面轮廓的生成

1.1 单个齿廓形状点的获取

收稿日期: 2015-08-05。

修订日期: 2015-10-25。

通信联系人: 于盛睿(1976-), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2015-08-05.

Revised date: 2015-10-25.

Correspondent author: YU Shengrui (1965-), male, Doc., Associate Professor.

E-mail: yrsr.hotdog@163.com

齿轮范成法成形模型如图1所示，主要通过齿条刀具插齿加工齿轮齿坯，其加工原理为：根据齿条与齿轮啮合传动，两轮齿廓互为共轭曲线的原理来实现加工。其中齿条上下来回运动完成切削主运动，同时齿坯相应旋转，齿条刀具移动模拟齿轮与齿条的啮合运动，另外还需要刀具做必要的进给运动，齿坯做让刀运动^[9]。

齿廓的生成包括4个部分^[10]，如图2所示。第一部分是齿根平滑线部分，第二部分是齿根过渡圆弧部分，第三部分是刀具齿廓线部分，第四部分是齿顶部分。依据模数 m 、齿数 Z 、变位系数 x 、齿顶高系数 H_a 、压力角 α 、齿顶间隙系数 C 等参数确定4部分的坐标，另外一侧的点坐标合集即可依据 y 轴对称复制，通过C#画线函数，依次连接各点，得到刀具的齿廓线，如图2所示。接着，使用反转法进行坐标变换，得到一个齿廓形状，如图3所示。

1.2 坐标变换生成齿廓图形

在获得单个齿条刀具的图形及坐标点集 (x_i, y_i) 后(其中 $i=0, 1, 2, \dots$)，需要依据坐标变换来模

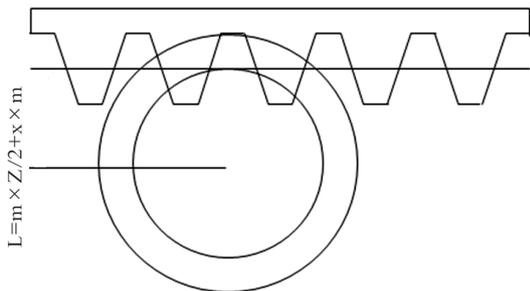


图1 范成法齿轮成形

Fig.1 Gear machining principle using the generating method

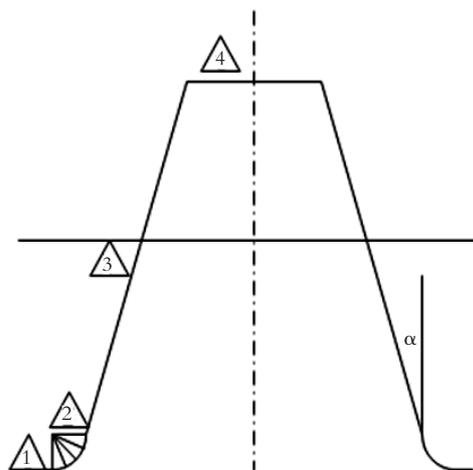


图2 刀具齿廓

Fig.2 Tooth profile of the cutter

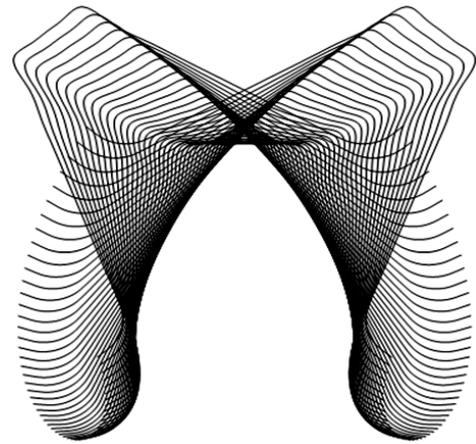


图3 刀具齿廓旋转变换生成单个齿形

Fig.3 Formation of a single tooth structure

拟齿条刀具的切割过程。如图4所示，在齿条刀具的切齿过程中，齿坯轴线到齿条刀具节线的距离 $L=m \times Z/2+x \times m$ ，齿轮运动过程中齿条刀具沿直线运动，运动速度为 v ，齿坯做旋转运动，运动的角速度为 w ，则有 $v=w \times L$ 。

对于给定的时间 Δt ，得到齿轮齿条的位移 $\Delta S=v \times \Delta t$ ，齿坯齿轮旋转的角度 $\Delta \alpha=w \times \Delta t/L$ ，求得 ΔS 和 $\Delta \alpha$ 后进行坐标变换，将 $X(2)OY(2)$ 坐标平移到 XOY 上面，可以通过式(1)进行，将 $X(1)OY(1)$ 旋转到 XOY 的坐标变换为式(2)，平面图形只使用 (x, y) 2个坐标。

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta S \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

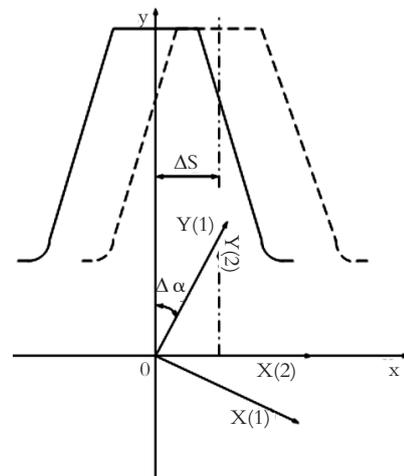


图4 相对运动坐标变换

Fig.4 Coordinate transformation based on the relative motion

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Delta\alpha) & -\sin(\Delta\alpha) & 0 \\ \sin(\Delta\alpha) & \cos(\Delta\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据运动的相对性原理,使用反旋转法,将齿坯齿轮固定不动,则沿直线运动的齿条刀具变为平移和旋转,其与固定的 (x_i, y_i) 的关系为式(3):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Delta\alpha) & -\sin(\Delta\alpha) & 0 \\ \sin(\Delta\alpha) & \cos(\Delta\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta S \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

将其展开,可得到齿条刀具旋转的点坐标 (x, y) 由式(4)表示:

$$\begin{cases} x = (x_i + \Delta S) \times \cos(\Delta\alpha) - y_i \times \sin(\Delta\alpha) \\ y = (x_i + \Delta S) \times \sin(\Delta\alpha) + y_i \times \cos(\Delta\alpha) \end{cases} \quad (4)$$

通过将上述变换的点连成曲线,得到展成单齿的齿廓形状,如图3所示。将展成齿形进行圆周旋转变换,变换次数为齿数 Z ,变换矩阵 M_i ,每次旋转的角度为 $360^\circ/Z$,变换矩阵 M_i 由式(5)表示:

$$M_i = \begin{vmatrix} i \times \cos(360/Z) & -i \times \sin(360/Z) & 0 \\ i \times \sin(360/Z) & i \times \cos(360/Z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} (i = 0, 1, \dots, Z) \quad (5)$$

通过软件模拟坐标变换的过程,得到完整的齿廓形状,如图5所示。

1.3 通过齿形轮廓判断是否存在根切和齿顶变尖

图6(a)、6(b)分别表示变位系数 x 为0.05与0.25两种情况下的齿轮轮廓。由图6(a)可知,当变位系数 $x=0.05$ 时,从分度圆往齿根圆方向的齿厚变薄了,产生根切。为此,修改变位系数 x 为0.25,得

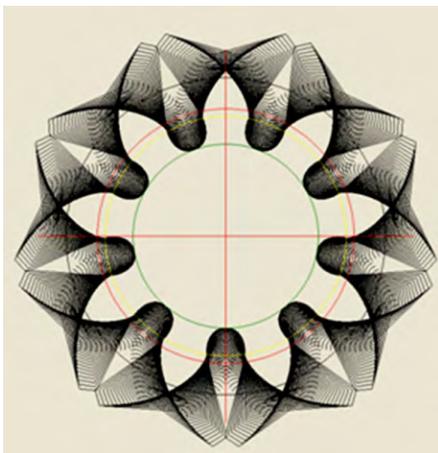
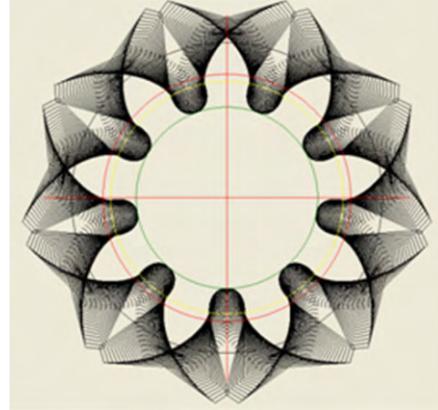
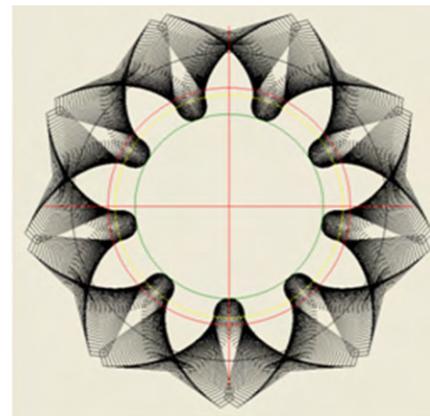


图5 C#窗体函数生成齿轮齿廓形状

Fig.5 Generating of gear profile using C# window function



(a) Modification coefficient $x=0.05$



(b) Modification coefficient $x=0.25$

图6 不同变位系数下的齿轮齿廓

Fig.6 Different gear profiles at variable modification coefficient

到图6(b)图案,此时根切消除,但是同时产生齿顶变尖,需进一步修改齿形参数。

2 导入UG生成模型点数据

通过上述过程,即可生成设计合理的平面齿形点数据集,平面的齿形点数据集无法导入UG生成空间模型,需要采集空间数据集。对于直齿轮可以直接增加 z 坐标,其 (x, y) 坐标都不用改变,生成层叠的数据点集。对于斜齿轮来说,生成空间点集 (x, y, z) 需要通过坐标变换来实现。假设斜齿轮的螺旋角为 β ,对于不同的导程点平面处所产生的坐标变换角度 θ 不同。对于该变化,使用轴线方向上的位移 L 来度量,如图7所示。

此时可得式(6)-式(8):

$$D = m_n \times Z / \cos(\beta) \quad (6)$$

$$\theta = 2|AB|/D \quad (7)$$

$$\tan(\beta) = \pi D / H = |AB|/L \quad (8)$$

计算可得式(9):

$$\theta = L \tan \beta \times 2 \cos \beta / m_n \times Z = 2L \sin \beta / m_n \times Z \quad (9)$$

式中， m_n 表示法向模数， Z 表示齿数， β 为斜齿轮螺旋角，由表达式(9)可知 θ 是与轴向位移 L 有关系的函数式。由1.2节可知，平面上的坐标点集 $(x_i, y_i, 0)$ 已经获得(其中 $i=0, 1, 2, \dots$)，即可通过坐标变换获得空间包络点坐标集 (x, y, z) ，变换方程如式(10)所示，同时导出空间点集grs文件用于UG grip处理。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(2L\sin(\beta)/m_n \times Z) & -\sin(2L\sin(\beta)/m_n \times Z) & 0 & 0 \\ \sin(2L\sin(\beta)/m_n \times Z) & \cos(2L\sin(\beta)/m_n \times Z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

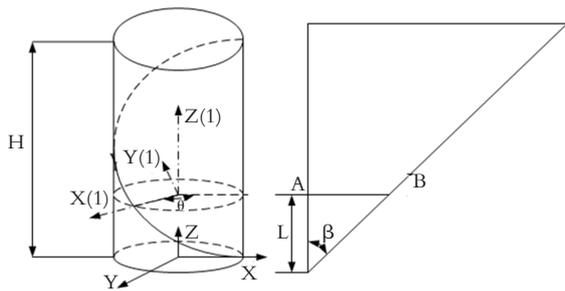


图7 空间点集的坐标变换

Fig. 7 Coordinate transformation for set of points in 3D space

3 生成齿轮模板

利用UG grip编写程序，通过画点，生成网格曲线，接着生成包络面，生成剪切体等函数将第3节生成的grs文件转换为UG可识别的grx文件，生成齿轮的过程大致分为5个步骤：(1)导入点集数据，生成空间数据点；(2)将空间点集连成相互交错的网格包络曲线；(3)利用网格包络曲线生成外轮廓片体；(4)通过片体扫掠生成剪切实体；(5)使用剪切实体与圆柱进行旋转剪切得到精确的齿轮模板。下面以法向模数 $m=0.5$ ，齿数 $Z=10$ ，法向压力角 $\alpha=20^\circ$ ，变位系数 $x=0.25$ ，齿顶高系数 $H_a=1$ ，齿顶间隙系数 $C=0.25$ ，齿条齿宽 $b=6$ ，螺旋角 $\beta=15^\circ$ 为例进行建模过程模拟，如图8所示。由整个过程可以看出，以范成法原理为基础的渐开线齿廓虚拟切削加工，可在UG环境下准确、快速的实现，并以此构建出具有真实完整的三维齿轮模型。在保证齿轮精度的前提下，提高了设计效率，为齿轮参数化设计、分析与应用提供设计与建模方法。

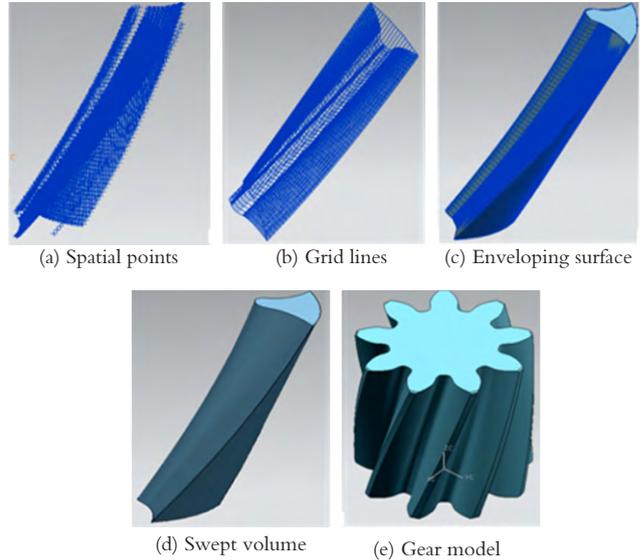


图8 生成齿轮模板的动态过程演示

Fig.8 Dynamic display of gear generating

4 结论

本文对设计与建立齿轮模型的方法进行了研究。根据渐开线圆柱齿轮的结构特征，通过VS2005使用C#自动生成齿条刀具加工圆柱齿轮的仿真轨迹，快速、精确的获得齿轮齿廓模型。通过坐标变换，生成空间数据点集，使用点集做出光滑的曲面可以获得精确的结果，同时对于各种复杂曲面的造型也提供了一种新的解决方案，在空间曲面造型领域的应用前景十分广阔。

参考文献:

[1]莫江涛, 王耀祖. 基于AutoCAD实现齿轮范成法加工仿真[J]. 现代机械, 2007, (05): 38-39.
 MO Jiangtao, et al. Modern Machinery, 2007 (05): 38-39.
 [2]马元节, 周金宇, 丁前进, 等. 基于幂函数的修形齿轮建模与仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015, (08): 63-65.
 MA Yuanjie, et al. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015 (08): 63-65.
 [3]张学刚, 谢永春. 渐开线圆柱齿轮全参数化精确建模研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013, (07): 46-48.
 ZHANG Xuegang, et al. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013 (07): 46-48.
 [4]赵慧勇. 渐开线圆柱齿轮参数化建模思路研究[J]. 机械设计与制造, 2012, (03): 87-89.
 ZHAO Huiyong. Machinery Design & Manufacture, 2012 (03): 87-89.
 [5]廖希亮, 汪宗兵, 张树生. 渐开线圆柱齿轮的参数化建模研究[J]. 机械传动, 2003, (06): 33-34.

- LIAO Xiliao, et al. Journal of Mechanical Transmission, 2003 (06): 33-34.
- [6]蔡小华, 薛小雯. 在CAD环境下利用VB实现范成法加工齿轮的仿真[J]. 无锡职业技术学院学报, 2008, (03): 29-31.
- CAI Xiaohua, et al. Journal of Wuxi Institute of Technology, 2008 (03): 29-31.
- [7]陈华, 孙书民. 基于范成法虚拟加工技术的渐开线齿轮建模研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2010, (05): 7-9.
- CHEN Hua, et al. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2010 (05): 7-9.
- [8]方淑媛. 基于AutoLisp的范成法加工齿轮的实现方法[J]. 通用机械, 2006, (04): 91-93.
- FANG Shuyuan. General Machinery, 2006 (04): 91-93.
- [9]张晋西. 编程实现齿轮范成法加工动态模拟[J]. 机械科学与技术, 2002, (S1): 89-90.
- ZHANG Jinxi. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2002, (S1): 89-90.
- [10]张训福, 黄康, 陈奇. 渐开线齿轮齿根过渡曲线方程的建立及三维精确建模[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2008, (02): 1-3.
- ZHANG Xunfu, et al. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2008 (02): 1-3.