

基于参数化的弧齿锥齿轮建模仿真和加工

章 华, 杨文珍, 于世光, 付 园, 秦 聪, 陈广文

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 基于参数化设计思想, 以弧齿锥齿轮为研究对象, 建立了渐开线方程, 生成准确的齿形, 实现了不同模数、齿数齿轮的快速造型; 通过仿真和分析弧齿锥齿轮的运动和数控加工, 预先发现和改进实际加工出现的问题, 降低了生产成本, 提高了生产效率。

关键词: 弧齿锥齿轮; 参数化建模; 运动仿真; 数控加工

中图分类号: TH132 **文献标识码:** A

0 引 言

弧齿锥齿轮作为基础传动件, 主要用于传递两相交轴的运动和动力, 广泛应用于各类机械中。由于弧齿锥齿轮齿形结构的复杂性和独特性, 其设计、性能分析和加工方面还需要进一步完善。目前, 利用某些三维软件对弧齿锥齿轮进行简单的建模, 但是一旦齿数、模数等设计参数发生变化, 需要重新建模, 工作量很大且属于重复性劳动。因此, 快速且高效地实现弧齿锥齿轮的参数化设计就成为亟须解决的问题。

目前, 针对弧齿锥齿轮的参数化建模提出了不同方法: 在 Pro/E 的环境下, 实现标准渐开线弧齿锥齿轮的造型方法和步骤, 实现弧齿锥齿轮参数化设计^[1]; 综合应用 C 语言、AutoLISP 语言和 VC++ 语言编制了一个双圆弧弧齿锥齿轮交互式参数化设计软件来实现参数化设计^[2]。本文通过 Pro/E 软件完成了弧齿锥齿轮的参数化建模、运动仿真和数控加工模拟, 实现了弧齿锥齿轮设计、分析和加工的一体化。

1 弧齿锥齿轮参数化建模

1.1 设计参数

根据参数化设计思想, 用一组参数约束弧齿锥齿轮模型的一组尺寸, 运用参数驱动原有几何模型, 重新生成所需的模型。首先对弧齿锥齿轮进行特征分析, 得出其基本特征参数。弧齿的齿廓曲面与圆锥面的交线均是一条螺旋线, 因此弧齿轮的齿面实质上就是渐开螺旋面。分度圆锥面上的螺旋线切线与齿轮轴线之间的夹角即弧齿锥齿轮的螺旋角。弧齿锥齿轮的法面参数与刀具参数相同, 因此弧齿锥齿轮的法面参数是标准值。为了方便计算弧齿锥齿轮的几何参数, 需要按照其端面参数进行计算。

弧齿锥齿轮的设计参数如下: 分度圆直径 d ; 基圆直径 d_b ; 齿顶圆直径 d_a ; 齿根圆直径 d_f ; 齿宽 b ; 齿基高 h_b ; 锥距 R ; 齿顶高 h_a ; 齿根高 h_f ; 全齿高 h ; 分锥角 δ 等; 定义基本参数 m, z, b, c^* 等值, 通过关系式来计算其余各参数的数值。

将表 1 中各参数的计算公式输入到关系式关系窗口中, 建立各变量之间联动关系, 为参数化设计打下基础。

1.2 创建基本曲线

a) 首先沿顶平面的法向方向上平移一段距离 $d_0 = d/2 \times \tan(\delta)$ 建立基准面 1, 创建基准轴 A_1 和基准点 0; 在右平面内, 以基准点 0 为顶点绘制 4 条弧线, 分别为分锥、根锥、基锥和顶锥母线; 再分别定义出顶锥母线的终点尺寸为 $d_1 = d_a/2$, 分锥

母线的终点尺寸为 $d_2 = d/2$, 基锥母线的终点尺寸为 $d_3 = d_b/2$, 根锥母线的终点尺寸为 $d_4 = d_f/2$, 与大背锥母线的夹角 $\delta_5 = 90^\circ$; 绘制大背锥母线和小端背锥母线, 其间距为 $d_6 = b$, 且均垂直于分锥母线。再创建基准点 1 和基准点 2, 如图 1 所示。

表 1 设计参数表

名称	参数	计算公式	PRO/E 表达式
分度圆锥角	δ	$\delta = \arctan(z_2/z_1)$	$\delta = \text{atan}(z/z_asm)$
齿顶高	h_a	$h_a = (h_a^* + x)m$	$ha = (hax + x) \times m$
齿根高	h_f	$h_f = (h_a^* + c^* - x)m$	$hf = (hax + cx - x) \times m$
分度圆直径	d	$d = mz$	$d = m \times z$
基圆直径	d_b	$d_b = d \cos \alpha$	$db = d \times \cos(\alpha)$
齿顶圆直径	d_a	$d_a = d + 2h_a \cos \delta$	$da = d + 2 \times ha \times \cos(\delta)$
齿根圆直径	d_f	$d_f = d - 2h_f \cos \delta$	$df = d - 2 \times hf \times \cos(\delta)$
锥距	R	$R = m \sqrt{z_1^2 + z_2^2} / 2$	$rx = d / (2 \times \sin(\delta))$
齿顶角	θ_a	$\tan \theta_a = h_a / R$	$\theta_a = \text{atan}(ha/rx)$
齿根角	θ_f	$\tan \theta_f = h_f / R$	$\theta_f = \text{atan}(hf/rx)$
基圆角	θ_b	$\tan \theta_b = h_b / R$	$\theta_b = \text{atan}(hb/rx)$
顶锥角	δ_a	$\delta_a = \delta + \theta_a$	$\delta_a = \delta - \theta_a$
根锥角	δ_f	$\delta_f = \delta - \theta_f$	$\delta_f = \delta - \theta_f$
基圆齿高	h_b	$h_b = (d - d_b) / 2 \cos \delta$	$hb = (d - db) / (2 * \cos(\delta))$
基圆齿宽	b_b	$b_b = (d - d_b) / 2 \cos \delta$	$bb = b / \cos(\theta_b)$
基圆齿顶宽	b_a	$b_a = b / \cos \theta_a$	$ba = b / \cos(\theta_a)$
基圆齿根宽	b_f	$b_f = b / \cos \theta_f$	$bf = b / \cos(\theta_f)$
基圆齿角	θ_b	$\theta_b = \arctan(h_b / R)$	$\theta_b = \text{atan}(hb/rx)$

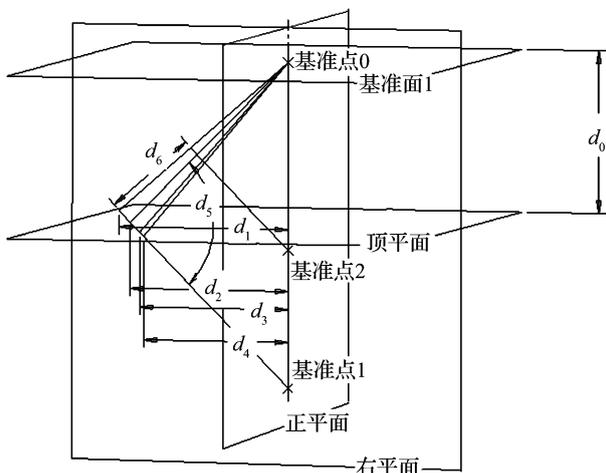


图 1 母线和基准点

b) 过背锥母线作两个分别垂直于右平面和分锥母线的基准平面 2 和基准平面 3。在这两个平面内分别绘制各基础圆曲线, 同时分别绘制 2 条过中心的竖直线, 为以后创建坐标系做好准备, 如图 2 所示。绘制大端基圆和小端基圆, 在关系窗口建立相应的关系式, 如表 2 所示。

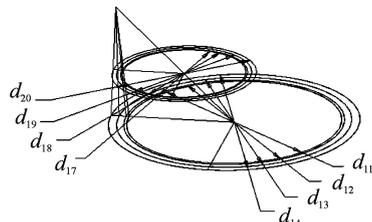


图 2 基圆曲线

表 2 大端基圆和小端基圆关系式

名称	大端基圆	小端基圆
齿顶圆直径	$d_{14} = d_a / \cos(\delta)$	$d_{20} = (d_a - 2 \times ba \times \sin(\delta_a)) / \cos(\delta)$
分度圆直径	$d_{13} = d / \cos(\delta)$	$d_{19} = (d - 2 \times b \times \sin(\delta)) / \cos(\delta)$
基圆直径	$d_{12} = d_b / \cos(\delta)$	$d_{18} = (d_b - 2 \times bb \times \sin(\delta_b)) / \cos(\delta)$
齿根圆直径	$d_{11} = d_f / \cos(\delta)$	$d_{17} = (d_f - 2 \times bf \times \sin(\delta_f)) / \cos(\delta)$

c) 创建辅助坐标系, 绘制大端齿廓渐开线和小端齿廓渐开线。首先要创建分别过大端和小端圆心且垂直于 A_2 和 A_3 的基准轴。要创建符合要求的标准渐开线, 一般需先建立定向好的基准坐标系。然后分别建立基准坐标系 CS0 与 CS1, 注意选对坐标系的方向, 再对这 2 个坐标系分别进行复制、移动旋转一定的角度为 $360 \times \cos(\delta)/(4 \times z) + 180 \times \tan(\alpha)/\pi - \alpha$ 。建立的新坐标系为 CS2 和 CS3。通过方程创建渐开线, 设参数 $t = 0 \sim 1$, 选择了“笛卡尔”坐标类型, 在弹出的记事本编辑器中, 输入下列函数方程:

$$\begin{aligned} r &= d_{11}/2 \text{ or } r = d_{17}/2 \\ \theta &= t \times 60 \\ x &= r \times \cos(\theta) + r \times \sin(\theta) \times \\ &\quad \theta \times \pi/180 \\ y &= r \times \sin(\theta) - r \times \cos(\theta) \times \\ &\quad \theta \times \pi/180 \\ z &= 0 \end{aligned}$$

最终生成的辅助坐标系和大端齿廓渐开线、小端齿廓渐开线如图 3 所示。

为了镜像大端渐开线和小端渐开线, 首先需要建立基准点 3, 其参照是大端渐开线和大端基圆的交点; 其次建立基准面 4, 是以穿过轴 A_2 和基准点 3 来确定的; 再次建立基准面 5, 其穿过轴 A_2 和通过基准面 4 旋转 $360 \times \cos(\delta)/(4 \times z)$ 角度创建的, 然后大端渐开线和小端渐开线选择基准平面 5 作为镜像平面。镜像的结果如图 4 所示。

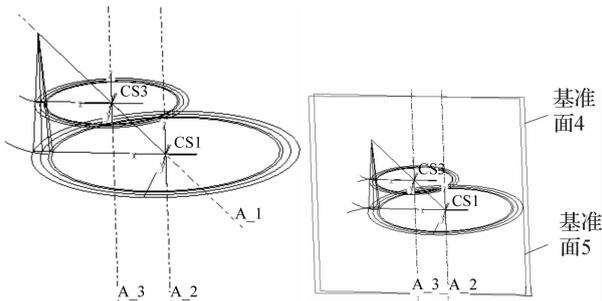


图 3 渐开线图

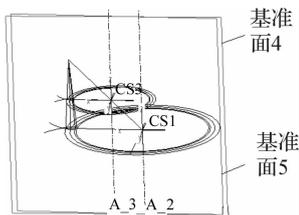


图 4 镜像后渐开线

1.3 创建齿坯实体、扫描轨迹和齿廓线

a) 首先以根锥母线为参考, 绘制齿坯曲线, 再旋转成齿坯实体; 然后绘制出大端背锥母线与小端背锥母线之间距离的直线, 旋转成投影面;

b) 以分锥母线为参考, 分别建立基准面 6 和旋转生成投影曲面。在基准面 6 中根据刀具半径、螺旋角和齿轮的旋转方向绘制刀盘圆线和夹角 35° 切线, 然后投影到曲面上就形成扫描轨迹;

c) 在草绘模式中根据大端和小端基圆渐开线绘制出 2 个剖面, 如图 5 所示。

1.4 生成完整模型

当模数 $m = 0.5$, 齿数 $z_1 = 20$, 配对齿数 $z_2 = 20$, 压力角 $\alpha = 20^\circ$, 齿轮宽度 $b = 3$, 齿顶高系数 $h_a^* = 1$, 齿隙系数 $c^* = 0.02$, 变位系数 $x = 0$, 螺旋角 $\beta = 35^\circ$ 时, 再通过扫描混合命令沿扫描轨迹生成第一个齿廓, 然后通过复制、阵列得到其他齿形。通过定义旋转角度 $360/z$, 阵列个数 $z-1$, 得到完整弧齿锥齿轮的模型, 如图 6 所示。显然, 通过齿轮的各个参数之间关系式, 只需按设计要求修改模数、齿数等参数, 就可得到弧齿锥齿轮三维实体模型。这种参数化设计方法可以减少弧齿锥齿轮三维造型时间, 提高产品设计效率。

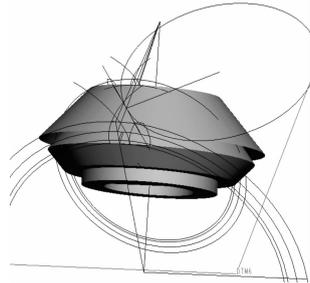


图 5 扫描轨迹和齿廓线

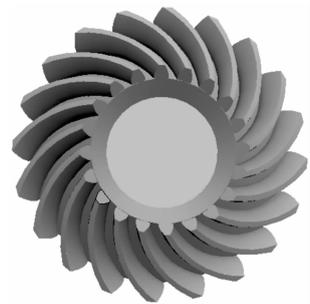


图 6 齿轮完整模型

2 弧齿锥齿轮运动仿真

在实际生产中, 需要装配一对齿轮进行运动分析和干涉检查。在 Pro/E 平台上, 对弧齿锥齿轮进行虚拟装配, 分析其速度和加速度, 可以预测齿轮在工作情况下存在的问题, 以改善不合理地方, 进行产品优化设计。

2.1 元件虚拟装配

在 Pro/E 组件环境下进行虚拟装配, 通过销钉连接形式的装配约束, 使得两个齿轮分别具有 1 个自由度, 即绕着齿轮中心轴转动。在运动仿真中, 需要固定齿轮的轴向, 由于没有创建齿轮的轴, 通过建

立骨架文件来对齿轮轴向进行定位。采用模数 0.5 mm, 齿数均为 20 的配对弧齿锥齿轮来简单介绍虚拟装配步骤:

a) 建立组件文件。在组件模式环境中, 单击创建元件按钮, 在“类型”选项中选择建立骨架模型。由于两个配对弧齿锥齿轮轴夹角是 90° , 因此可以在骨架模型中建立两个相互垂直的轴。

b) 添加元件和连接方式。点击“添加元件”按钮, 先把左旋的弧齿锥齿轮作为主动轮添加进来, 选择“销钉”连接方式, 建立轴对齐和面对齐两个定位条件, 即弧齿锥齿轮中心轴与骨架模型的一个轴对齐, 再选择两个相应平面进行适当距离定位。两个配对弧齿锥齿轮的装配图如图 7 所示。

2.2 运动分析和干涉检查

运动仿真在机构 (Mechanism) 模块下演示, 可以很直观地展示出一对齿轮的运动过程, 如图 8 所示。

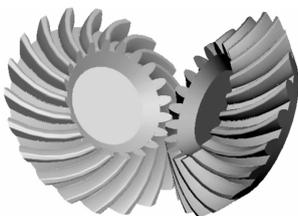


图 7 弧齿锥齿轮副装配图

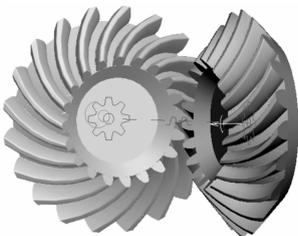


图 8 运动仿真图

a) 定义齿轮副连接, 首先选择一个弧齿锥齿轮作为 gear1 主动轮, 采取销钉连接方式, 同时输入分度圆的直径; 然后选择另一个弧齿锥齿轮作为 gear2 从动轮, 再输入分度圆的直径。

b) 确定齿轮轮齿的配对位置。确定配对位置的合理性主要通过检测两个齿轮轮齿之间是否会出现干涉现象来判断。首先定义伺服电动机, 给出需要的速度或者加速度运动方程; 然后建立运动分析, 即设定仿真时间、帧数、帧间隔、仿真的初始状态, 再点击运行按钮, 以查看运动状态。干涉检查通过回放检测来确定, 如果存在干涉现象, 干涉区域则显示红色, 可通过调整两个齿轮的配合距离以消除干涉。通过捕获按钮可录制 mpeg 格式动画的影像文件,

就可以看到整个运动过程。根据生成分析的测量结果可以得知两个齿轮的运动情况。

3 数控加工仿真

数控加工具有产品精度高、自动化程度高、生产效率以及生产成本低等优点, 特别是几何外形复杂且精度要求较高的零件, 更能突出 NC 加工制造技术的优点。本文利用 Pro/E 这个平台, 模拟出弧齿锥齿轮的数控加工过程, 从而可以获得数控加工程序。数控加工的主要特点是计算加工走刀过程的刀位点, 生成 CL 数据文件, 经过后置处理生成 G 代码, 即所需要的加工程序。采用这种技术可以解决复杂零件的数控加工编程问题, 其大部分工作由计算机来完成, 不但提高了编程效率, 而且解决了手工编程无法解决的许多复杂形状零件的加工编程问题。

在 Pro/E 这个平台上模拟出弧齿锥齿轮数控加工的全过程如图 9 所示。

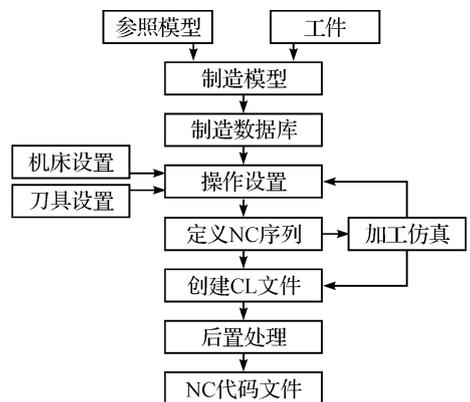


图 9 NC 加工流程

a) 创建制造模型。首先获取制造模型弧齿锥齿轮 (前面提到参数化设计的齿轮), 然后通过创建或者装配的方法来建立工件, 工件就是相当于实际生产中的毛坯。因此, 工件尺寸大小可以根据制造模型的尺寸大小进行适当选择。

b) 设置制造数据。主要选择加工机床、设置夹具和刀具。由于弧齿锥齿轮有曲面轮廓, 故选择了三轴铣床。设置夹具采用了默认设置。刀具根据具体加工工序选择刀具类型和材料。本例中选择了三轴铣床。

c) 操作设置。主要设置进给速度、进给量、机床主轴转速、退刀面等。这些设置可以根据实际生产的具体情况进行设置, 以达到较好的加工效果。

d) 设置 NC 序列, 进行加工仿真。在 Pro/NC 中, 不同的数控加工机床和加工方法所对应的 NC

序列设置项目有所不同,每种加工程序设置项目所产生的加工刀具路径参数形态及适用状态也有所不同。

在铣削加工中一般都首先进行体积块加工。这种加工形式主要用于去除大量的工件材料,进行粗加工,留少量余量给予精加工,可以提高加工效率、减少加工时间、降低成本以及提高经济效益。弧齿锥齿轮轮廓采用曲面铣削加工方法,再对另一边加工。体积块加工方法实现粗加工,再进行平面、曲面加工。操作步骤主要有序列设置、演示刀具轨迹、加工仿真、切减材料等等。

e)创建 CL 数据文件。主要把完成的 NC 序列中走刀过程的刀位点转换为加工的刀具运动轨迹文件。

f)利用后处理器生产 NC 代码。在实际生产过程中,数控机床控制器不能识别 CL 数据文件,必须把刀位文件转换为特定数控机床系统能识别的数控程序(MCD 文件)。后置处理器把加工指令解释为能够被加工机床识别的信息。由于不同数控机床的程序指令格式不同,因而需选择合理后置处理器。创建完 CL 数据文件后,将其发送给后处理程序,用来输出机床的 G 代码。一般在生成 CL 数据文件的同时生成 MCD 文件。前面保存的 seq001.tap 文件就是 MCD 文件。

在数控加工仿真过程中,可以看到工件被加工成齿轮的过程。如图 10 所示,经过体积块铣削、曲面铣削后,显示出弧齿锥齿轮的齿廓。弧齿锥齿轮上面竖直的杆状物是刀具,曲面上一道道圆圈代表了刀具走刀的痕迹。

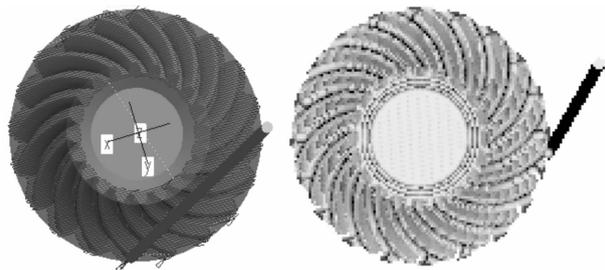


图 10 数控加工仿真

在 Pro/E 平台上,利用参数化思想建立弧齿锥齿轮三维实体模型,与传统的造型设计相比,可以通过改变齿轮的基本参数生成不同参数的三维模型,提高了弧齿锥齿轮的造型速度和效率。运用运动仿真,可以很直观地看到一对弧齿锥齿轮的啮合运动过程,便于发现齿轮模型一些不合理的地方,解决了在样品试制过程中出现的诸多问题。在数控加

工仿真方面,将生成的 G 代码可以输入到数控机床中,减少了人工编程中的失误且提高了编程效率。在实际加工中,首先通过适当地修改 NC 代码程序并输入数控机床,然后适当地调整加工工艺,可实现弧齿锥齿轮的加工,如图 11 所示。



图 11 弧齿锥齿轮

4 结论

实现了弧齿锥齿轮的参数化设计、运动仿真和数控加工仿真。通过改变齿轮的基本参数,可快速造型出所需要的弧齿锥齿轮;在运动仿真中,对齿轮进行虚拟装配,运动分析得到齿轮的速度、加速度分析结果;数控加工仿真可以得到所需要的加工 G 代码。本文提出的方法完成了弧齿锥齿轮的参数化建模、运动仿真及数控加工模拟,实现了弧齿锥齿轮设计、分析和加工的一体化,从而减少了从产品设计到实际加工的周期,可降低生产成本,提高生产效率,具有较大的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 冉兆波. 基于 Pro/E 的渐开线弧齿锥齿轮的三维建模[J]. 计算机应用技术, 2007, 34(1): 35-37.
- [2] 姚俊红. 双圆弧齿锥齿轮三维参数化设计的实现[J]. 德州学院学报, 2007, 23(2): 82-85.
- [3] 陈立新. 基于 Pro/E 二次开发技术的斜锥齿轮参数化设计及仿真[J]. 起重运输机械, 2007(7): 27-29.
- [4] 张刚. 基于设计知识的齿轮参数化模型[J]. 机械设计, 2004, 21(12): 4-5.
- [5] 博创设计坊. Pro/ENGINEER Wildfire 4.0 机械设计实例教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [6] 詹友刚. Pro/ENGINEER 中文野火版 4.0 数控加工教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [7] 郭庆. 基于 Pro/E 的渐开线斜齿轮三维参数化设计[J]. 机械研究与应用, 2004, 17(6): 95-96.

Preparation of Nano-TiO₂ via Sol-Gel Method and Its Characterization

SHENG Xing-cong, XU Jie, ZHANG Rui, CHEN Zhi-jie, QI Dong-ming

(Engineering Research Center of Eco-Dyeing & Finishing of Textiles(Zhejiang Sci-Tech University),
Ministry of Education, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Nano-TiO₂ sol particle is prepared by sol-gel method using the designed ethanol solution of butyl titanate (TNB), deionized water, hydrochloric acid and acetylacetone (Acac). The generation process of TiO₂ and its particle size and crystal are characterized by dynamic light scattering (DLS), X-ray diffraction (XRD) and high resolution transmission electron microscope (HRTEM). It is found that TiO₂ generation process consists of three stages: hydrolysis reaction, condensation reaction, and sol-particle combination. The particle size and crystal can be controlled by reaction temperature and catalyst concentration. Especially when the reaction temperature is 70°C, the amount of hydrochloric acid catalyst 0.5 mol/L, the molar ratio of deionized water to TNB 4, a kind of nano-TiO₂ sol particle with high dispersion and typical anatase crystal can be obtained just via a low-temperature sol-gel process.

Key words: nano-TiO₂; sol-gel; particle size; crystal

(责任编辑: 张祖尧)

(上接第 224 页)

Modeling Simulation and Processing of Skew Bevel Gear Based on Parametric Design

ZHANG Hua, YANG Wen-zhen, YU Shi-guang, FU Yuan, QIN Cong, CHEN Guang-wen

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

Abstract: Spiral bevel gears have more stable transmission, less vibration and noise, high load bearing capacity, high speed and many other advantages. Based on parametric design thinking, the authors use spiral bevel gears as the study object; firstly, established the involute equation to generate an accurate tooth shape, and then set up relations between variable and basic parameters to carry out quick modeling of various modulus and teeth number. We can pre-discover and improve the actual processing problems, reduce production costs and enhance productivity by simulation and analysis of spiral bevel gear and sports and NC processing.

Key words: spiral bevel gear; parametric modeling; motion simulation

(责任编辑: 杨元兆)