

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.02.001

基于刀具法向基准的奥利康准双曲面齿轮精确建模与验证

梁成成¹, 宋朝省¹, 朱才朝¹, 刘坤明², 檀杰²

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 桂林福达股份有限公司, 广西 桂林 541199)

摘要:基于奥利康制准双曲面齿轮切齿原理和加工方法, 分析了三面刀刀头的结构和安装位置, 提出了基于刀具 NS(neutral surface) 平面法向基准下刀盘数学模型的建立方法。在此基础上, 推导了奥利康制准双曲面齿轮的加工机床坐标系, 建立了成形法大轮和展成法小轮的齿面数学模型, 整理了一套基于三面刀盘奥利康制准双曲面齿轮精确化建模流程。通过齿面模型得到的数学齿面与通过 KIMOS 软件得到的 45 点齿面进行对比和实际接触印痕与理论接触印痕对比两种方法进行齿面验证。结果表明: 大小轮推导齿面与实际齿面齿线和几何形貌基本一致, 小大轮齿面基本重合; 小轮凹面最大误差位于小端偏齿顶处, 其值为 0.007 5 mm, 大轮凸面最大为 0.002 3 mm; KIMOS 计算的理论轮齿接触分析 (TCA)、轮齿承载接触分析 (LTCA) 印痕与有限元计算印痕的位置方向基本一致, 验证了齿面的正确性。

关键词:准双曲面齿轮; NS 法向基准; 齿面数学模型; 齿面 45 点; 接触印痕

中图分类号: TH132.413

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)02-001-11

Accurate modeling and verification of Oerlikon hypoid gears based on tool normal benchmark

LIANG Chengcheng¹, SONG Chaosheng¹, ZHU Caichao¹,
LIU Kunming², TAN Jie²

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University,
Chongqing 400044, P. R. China; 2. Guilin Fuda Co., Ltd., Guilin 541199, Guangxi, P. R. China)

Abstract: Based on the tooth cutting principle and manufacturing method of Oerlikon's hypoid gear, the structure and assembly location of three-faced blade is analyzed and the method to establish the mathematical model of three-face cutter head and plate (SPIRON) by the normal benchmark of the NS plane of tool is proposed. According to the manufacturing coordinate systems through HFT methods, the mathematical models of pinion with generating method and gear with shaping method is established on the basis of the NS benchmark. Furthermore, the technological process of Oerlikon's hypoid gear modeling

收稿日期: 2019-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775061); 广西科技重大专项资助项目(桂科 AA19182001); 重庆市科技重大主题专项重点研发项目(CSTC2018 JSZX-CYZTZXX0038)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51775061), Science and Technology Major Project of Guangxi (Guike AA19182001), and Key Research and Development Project of Chongqing Science and Technology Program (CSTC2018JSZX-CYZTZXX0038).

作者简介: 梁成成(1994—), 男, 重庆大学硕士研究生, 主要从事准双曲面齿轮啮合理论研究, (E-mail) 1294681903@qq.com。

通讯作者: 宋朝省, 男, 重庆大学副教授, 博士生导师, (E-mail) chaoshengsong@hotmail.com。

based on the three-face cutter is proposed. The two compare methods were made between the mathematical tooth flank by tooth surface mathematical model and 45 point tooth surface by the KIMOS of both pinion and gear and the contact pattern with actual and theory. Results reveal that the geometry and tooth line of theoretical tooth surface of gear and pinion corresponds well with the actual tooth surface, the maximum the concave error of pinion was 0.007 5 mm, the maximum convex error of gear about 0.002 3 mm. The contact pattern is consistent between the contact patterns of tooth contact analysis (TCA) and loaded tooth contact analysis (LTCA) by KIMOS and calculated by the initial element method, it verified the precision of the mathematical model.

Keywords: hypoid gear; the normal benchmark of the NS plane; mathematical models; contact pattern

准双曲面齿轮具有重合度大、容差能力强、啮合稳定性高,且适用于大交角、可偏置安装等优点,广泛运用于航空、汽车、船舶等传动系统之中。与格里森制齿轮相比,奥利康制齿轮具有加工效率高、承载能力强及噪声低等优点。由于奥利康制齿轮加工为连续分度切削的过程,刀头的结构、安装位置方向及刀盘-摇台-加工齿轮三者间的协调运动要求十分严格;同时,基于不同的参考基准,刀盘和切削参数是不相同的,造成奥利康制准双曲面齿轮齿面成形理论变得更加复杂。在现有研究中通常采用切屑方向基准进行齿面建模,而对于基于 NS(neutral surface)法向基准的齿面建模几乎没有,因此有必要研究此基准下齿面数学模型的推导。

针对准双曲面齿轮齿面成形理论,国内外相关学者进行了一定的研究。Litvin^[1]提出了局部综合法理论,为准双曲面齿轮相关研究奠定了基础。Fan^[2-4]基于传统摇台式机床对格里森 Spiroflex 面滚加工方法进行了系统的分解。Shih 等^[5-6]提出了一种通用型准双曲面齿轮端面铣齿和端面滚齿的通用建模方法。方宗德等^[7]利用常规格里森刀盘推到了弧齿齿面数学方程。郭晓东等^[8]通过齿面测量机得到齿面点集,建立了反调优化齿轮模型。林希^[9]通过 CATIA 进行切削仿真,建立了格里森制准双曲面齿轮副模型。王星星等^[10]基于 AutoCAD 二次开发构建轮坯与刀盘实体,通过模拟刀具加工系统进行摆线齿准双曲面齿轮建模。江玉刚^[11]、王星等^[12]以数学推导为基础,建立了格里森制准双曲面齿轮理论工作齿面和刀尖圆弧段曲面数学方程。张卫青^[13]、杜进辅^[14]基于切削方向基准对摆线准双曲面齿轮齿面的离散化建模进行了研究。这些研究中有关准双曲面齿轮建模主要是通过模拟仿真和数学推导两种方法。大部分研究针对格里森制准双曲面齿轮且采用简化刀具进行齿面建模,而针对奥利康制准双曲面齿轮精确化建模,均采用切屑方向基准,对刀具基准的定义几乎没有介绍。因此,笔者基于刀具 NS 法向基准,从加工刀具的几何截面、结构出发,分析了奥利康三面刀具结构和安装位置,建立了包含刀尖圆弧段的刀盘数学模型;通过刀倾半展成法建立了成形法大轮和展成法小轮的加工坐标系,得到了在毛坯坐标系下刀具切削刃的切削轨迹面;根据大轮小轮的加工方法,推导了大小轮的齿面数学模型。通过与理论 45 点齿面进行齿面误差对比和通过有限元方法计算的实际接触印痕与 KIMOS 理论轮齿接触分析 (TCA)、轮齿承载接触分析 (LTCA) 计算的接触印痕对比验证,验证了基于刀具 NS 法向基准的奥利康制准双曲面齿轮建模的正确性。

1 奥利康制准双曲面齿轮精确化建模

奥利康制准双曲面齿轮采用端面滚齿法加工。图 1 为奥利康制准双曲面齿轮端面滚齿的切齿原理,刀盘在自转的同时围绕基圆公转,形成延伸外摆线齿线。端面刀盘上有 z_0 组刀齿,每组刀齿至少有一个内刀和一个外刀,分别用于加工轮齿的凸面和凹面。 w_c, w_1 分别为产形轮和刀盘角速度,产形轮由刀具切削刃在机床坐标系下的切削回转面构成。

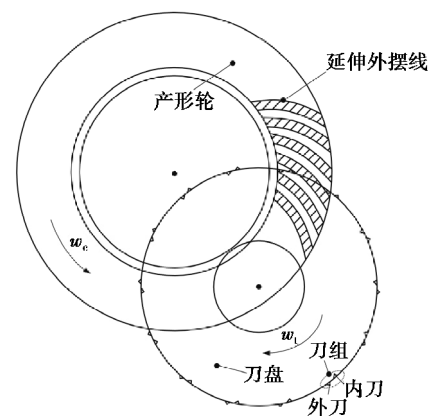


图 1 奥利康制准双曲面齿轮切齿原理
Fig. 1 Cutting principle of Oerlikon's hypoid gear

1.1 三面刀盘几何数学模型

准双曲面齿轮建模基准一般分为两种:切削方向基准和 NS 法向基准。NS 法向基准建立在 NS 平面的法向方向,切削方向基准建立在切削曲线的相切方向,如图 2 所示。图 3 为奥利康刀具切削刃截面图,切削刃由主切削刃和刀尖圆弧段构成。

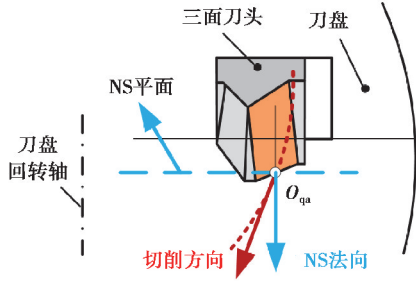


图 2 切削基准的定义

Fig. 2 Benchmark definition of cutting

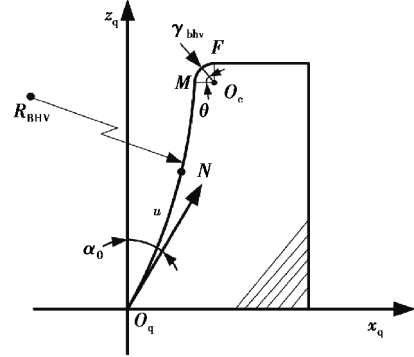


图 3 刀具切削刃截面

Fig. 3 Cutting edge section of cutting tool

以左弦内刀为例,在坐标系 $S_q(x_q, y_q, z_q)$ 下,建立主切削刃和刀尖圆弧段的数学模型,其表达式如下:
主切削刃(O_q-M 段)

$$\mathbf{r}_{q(u)} = \begin{bmatrix} 2 R_{\text{BHV}} \sin\left(\frac{u}{2 R_{\text{BHV}}}\right) \sin\left(\alpha_0 - \frac{u}{2 R_{\text{BHV}}}\right) \\ 0 \\ 2 R_{\text{BHV}} \sin\left(\frac{u}{2 R_{\text{BHV}}}\right) \cos\left(\alpha_0 - \frac{u}{2 R_{\text{BHV}}}\right) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

刀尖圆弧($M-F$ 段)

$$\mathbf{r}_{q(\theta)} = \mathbf{M}_D \mathbf{M}_R \begin{bmatrix} r_{\text{bhv}} \cos \theta \\ 0 \\ r_{\text{bhv}} \sin \theta \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{M}_D = \begin{bmatrix} \cos\left(\alpha_0 - \frac{u_{\text{max}}}{R_{\text{BHV}}}\right) & 0 & \sin\left(\alpha_0 - \frac{u_{\text{max}}}{R_{\text{BHV}}}\right) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\left(\alpha_0 - \frac{u_{\text{max}}}{R_{\text{BHV}}}\right) & 0 & \cos\left(\alpha_0 - \frac{u_{\text{max}}}{R_{\text{BHV}}}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -r_{\text{bhv}} - R_{\text{BHV}} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

图中, O_q 为刀具参考点, O_c 为刀尖圆弧段圆心, M 为刀尖圆弧与主切削刃的公切点。 α_0 为参考点压力角, u 为切削刃参考点到主切削刃任意一点 N 的弧长, u_{max} 为 M 点到参考点之间的弧长, R_{BHV} 为主切削刃圆弧半径, r_{bhv} 为刀尖圆弧半径, θ 为刀尖圆弧段的角度。矩阵 \mathbf{M}_D , \mathbf{M}_R 为刀尖圆弧段转换至坐标系 $S_q(x_q, y_q, z_q)$ 的变换矩阵。

图 4 为加工奥利康制齿轮的三面刀具(a)和刀盘模型(b)。坐标系 $S_q(x_q, y_q, z_q)$ 建立在前刀面刀具参考点上, $S_t(x_t, y_t, z_t)$ 为刀盘回转坐标系, S_a, S_n, S_s 和 S_g 均为辅助坐标系。其中, $S_n(x_n, y_n, z_n)$, $S_s(x_s, y_s, z_s)$ 坐标系分别为刀盘切削方向基准和 NS 平面基准坐标系, NS 法向基准与切削方向基准的夹角为 γ_s 。

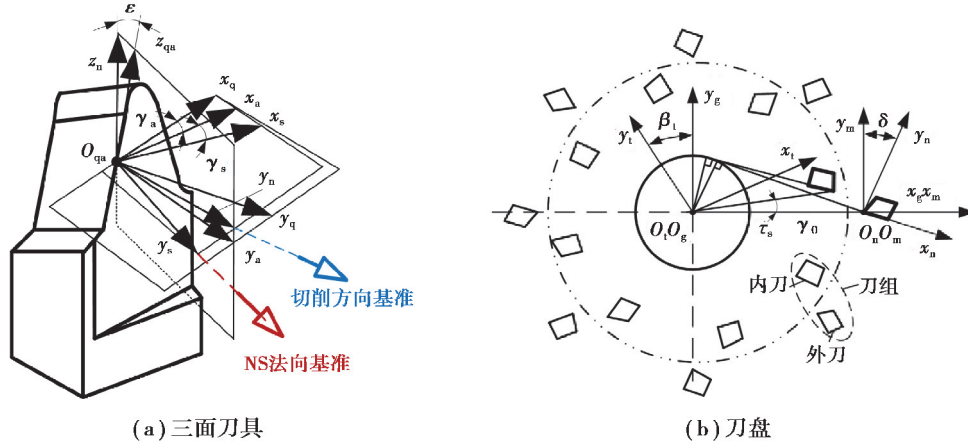


图 4 端面滚齿刀盘模型

Fig. 4 Knife plant model of face-hobbed

切削内刀与外刀切削刃参考点间的夹角为 τ_s 。切削刃通过刀具-刀盘坐标变换得到 $S_t(x_t, y_t, z_t)$ 坐标系下的切削轨迹面。 $r_t(u)$ 为主切削刃段, $r_t(\theta)$ 为刀尖圆弧段, 其表达式为

$$\begin{cases} r_s(u) = M_{sn}(\gamma_s) M_{na}(\epsilon) M_{aq}(\gamma_a) r_q(u), \\ r_s(\theta) = M_{sn}(\gamma_s) M_{na}(\epsilon) M_{aq}(\gamma_a) r_q(\theta). \end{cases} \quad (5)$$

$$M_{aq} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_a & \sin \gamma_a & 0 & 0 \\ \sin \gamma_a & \cos \gamma_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$$M_{na} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \epsilon & -\sin \epsilon & 0 \\ 0 & \sin \epsilon & \cos \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

$$M_{sn} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_s & \sin \gamma_s & 0 & 0 \\ \sin \gamma_s & \cos \gamma_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

$$\begin{cases} r_t(u) = M_{ts}(\delta, r_0, \beta_t, \beta) r_s(u), \\ r_t(\theta) = M_{ts}(\delta, r_0, \beta_t, \beta) r_s(\theta). \end{cases} \quad (9)$$

式中: γ_a 为刀具前角; ϵ 为刀具重磨角度; δ 为刀齿方向角; r_0 为刀具参考点的回转半径; β_t 为刀具起始安装角。 M_{aq}, M_{na}, M_{sn} 和 M_{ts} 分别为刀具前角、重磨角、主刃后角及刀盘坐标系的变换矩阵。 M_{sn} 为 NS 法向基准坐标变换矩阵, M_{na} 为切削方向基准坐标变换矩阵。

1.2 基于通用机床加工的准双曲面齿轮数学模型

奥利康制准双曲面齿轮加工机床(如图 5(a)所示)主要由切削刀盘、刀倾装置、刀转装置、摇台、床位装置、垂直轮位装置及水平轮位装置几大部件构成。机床坐标系的主要参数有刀倾角、刀转角、径向刀位、角向刀位、滚比、床位、垂直轮位和水平轮位。在机床坐标系中, 坐标系 $S_t(x_t, y_t, z_t)$ 、 $S_j(x_j, y_j, z_j)$ 和 S_p

(x_p, y_p, z_p) 分别固联在刀盘、机床和加工毛坯上。式(9)通过 $S_t(x_t, y_t, z_t)$ 到 $S_j(x_j, y_j, z_j)$ 的坐标变换(如图 5(b)所示),将刀具的回转切削面转换到机床坐标系下,得到虚拟产形轮的齿面方程;通过 $S_j(x_j, y_j, z_j)$ 到 $S_p(x_p, y_p, z_p)$ 的坐标变换(如图 5(c)所示),得到毛坯坐标系下刀具的切削轨迹面,表达式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_p(u, \beta, \phi_{c1}, \phi_{c2}, \varphi_1) = \mathbf{M}_{p1}(\varphi_1), \\ \mathbf{M}_{1t}(i, j, s_r, q, E, B, \gamma, A; \phi_{c1}, \phi_{c2}) \mathbf{M}_t(\beta) r_t(u), \\ \mathbf{r}_p(\theta, \beta, \phi_{c1}, \phi_{c2}, \varphi_1) = \mathbf{M}_{p1}(\varphi_1), \\ \mathbf{M}_{1t}(i, j, s_r, q, E, B, \gamma, A; \phi_{c1}, \phi_{c2}) \mathbf{M}_t(\beta) r_t(\theta). \end{cases} \quad (10)$$

式中: \mathbf{M}_{1t} 为机床的坐标变换; \mathbf{M}_{p1} 为毛坯旋转坐标系; \mathbf{M}_t 为刀盘旋转坐标系。 β 为刀盘旋转角度, ϕ_{c1}, ϕ_{c2} 为摇台增量角。式(10)为超静定方程,需要根据其齿面成型方法减少求解量进行求解。

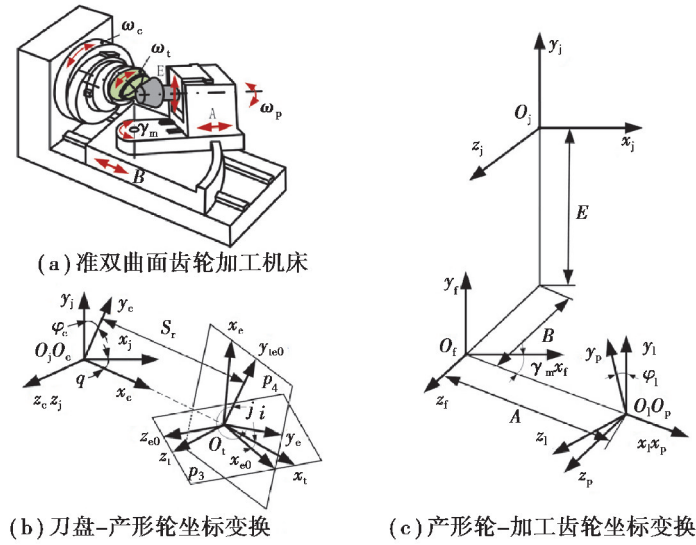


图 5 左旋准双曲面齿轮机床加工坐标系

Fig. 5 Machining coordinate system of left hypoid gear machine

成形法加工时,摇台固定不动,摇台增量角为零,即 $\phi_{c1} = 0$ 及 $\phi_{c2} = 0$;展成法加工时,摇台增量角是随时间变化的,其摇台增量角 ϕ_{c1}, ϕ_{c2} 的表达式为:

$$\begin{cases} \phi_{c1} = \beta \frac{z_0}{z_p}, \\ \phi_{c2} = \varphi_1 \frac{z_0}{z_p}. \end{cases} \quad (11)$$

式中: z, z_0, z_p 分别代表毛坯齿数、刀具头数和产形轮齿数; ϕ_{c1} 用于形成延伸外摆线, ϕ_{c2} 用于齿面展成。

1.3 齿面啮合方程

展成法加工时,齿面方程通过式(11)依旧超静定,需要经过啮合方程求解出各个刀盘旋转角下的摇台增量角或者毛坯旋转角进行求解。在毛坯坐标系 $S_p(x_p, y_p, z_p)$ 下,刀具的法向量和相对速度表达式为

$$\mathbf{n}_p(u, \beta, \varphi_1) = \frac{\frac{\partial \mathbf{r}(u, \beta, \varphi_1)}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{r}(u, \beta, \varphi_1)}{\partial \beta}}{\left| \frac{\partial \mathbf{r}(u, \beta, \varphi_1)}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{r}(u, \beta, \varphi_1)}{\partial \beta} \right|}, \quad (12)$$

$$\mathbf{v}_p = \frac{\partial \mathbf{r}_p}{\partial \varphi_1} \dot{\varphi}_1. \quad (13)$$

基于齿轮啮合理论,齿轮的啮合方程为

$$\mathbf{f}(u, \beta, \varphi_1) = \mathbf{n}_p \cdot \mathbf{v}_p = \mathbf{n}_p \left(\dot{\varphi}_1 \frac{\partial \mathbf{r}_p}{\partial \varphi_1} \right), \quad (14)$$

式中： v_p 为刀具切削刃在毛坯坐标系 $S_p(x_p, y_p, z_p)$ 的速度； r_p 为刀具在毛坯坐标系 $S_p(x_p, y_p, z_p)$ 下的矢径； φ_1 为毛坯的旋转角； $\dot{\varphi}_1$ 为单位毛坯角速度，一般取值为 1。将式(11)及(14)求解值代入式(10)，即可求得展成法在毛坯坐标系下的刀具切削轨迹面。

对于右旋准双曲面齿轮齿面，采用右旋刀盘，加工刀盘逆时针旋转，刀具安装方向沿着切削方向；在机床坐标系中，刀盘安装于第 1 象限，毛坯安装于第 4 象限，摇台初始安装角、垂直轮位与左旋齿轮相反；毛坯旋转方向与左旋齿轮相反为顺时针旋转，以相同的求解方式可得到右旋齿轮在毛坯坐标系下的切削轨迹面方程。

1.4 准双曲面齿轮三维实体模型

表 1 为齿轮的基本参数，表 2 为刀倾半展成法的大小轮机床基本参数。基于 NS 法向基准，通过刀倾半展成法加工，建立齿轮的实体模型。

表 1 齿轮基本参数

Table 1 Basic parameters of gear

参数	偏置距 E/mm	轴交角 $\Sigma/(\circ)$	头数 z_0	齿数 z	起始 安装角 $\beta_V/(\circ)$	切削刃 半径 R_1/mm	齿廓 压力角 $\alpha_0/(\circ)$	刀具 方向角 $\sigma_0/(\circ)$	重磨角 $\Psi/(\circ)$	主刃后角 $\gamma_a/(\circ)$	前角 $\gamma_s/(\circ)$
小 凹面	38.1	90	17	11	-21.176	1 324.49	19.445	22.93	4.705	12.673	9.642
轮 凸面					-10.588	1 305.95	20.554	22.93	4.935	13.389	10.320
大 凹面				10.588	1 030.74	17.485	22.93	4.304	12.678	10.290	
轮 凸面				21.176	1 276.45	22.515	22.93	5.319	13.382	9.601	

表 2 机床参数

Table 2 Machine parameters

参数	刀倾角 $i/(\circ)$	刀转角 $j/(\circ)$	径向刀位 S_R/mm	初始 摇台角 $q/(\circ)$	垂直 轮位 E_m/mm	床位 B/mm	水平 轮位 A/mm	机床根 锥角 $\gamma/(\circ)$	滚比 R_a
小轮	3.332 5	146.940 5	119.639 1	52.667 3	39.835 2	-12.248 6	3.115 6	23.445 3	4.722 168
大轮	0.000 0	0.000 0	122.009 0	-29.704 8	0.000 0	0.000 0	0.000 0	64.799 5	0.000 000

根据上文推导的齿面数学方程，依据表 1、表 2 参数，得到在毛坯坐标系下的刀具切削轨迹面；通过 CREO 建立大小轮毛坯，运用边界混合得到凹凸面的轨迹面，进行布尔求解去除齿槽材料，得到大小齿轮的实体模型；根据安装参数得到准双曲面齿轮啮合实体装配模型，如图 6 所示。

图 7 为奥利康准双曲面齿轮啮合实体模型的精确数学建模流程，主要分为奥利康制齿轮齿面数学模型的建立和准双曲面齿轮三维实体建模两个部分。第一部分主要是基于刀具参考基准，从齿轮的加工出发，建立刀头、刀盘、机床、毛坯加工坐标系，推导出大小轮的切齿齿面数学模型；通过 MATLAB 编程计算得到大小轮的切削齿面点集。第二部分将得到的齿面点集导入三维设计软件 CERO 中，通过边界混合得到刀具切削轨迹面、刀具切削齿槽以及通过图纸建立齿轮的加工毛坯；通过环形阵列得到全齿切削齿槽，通过布尔求

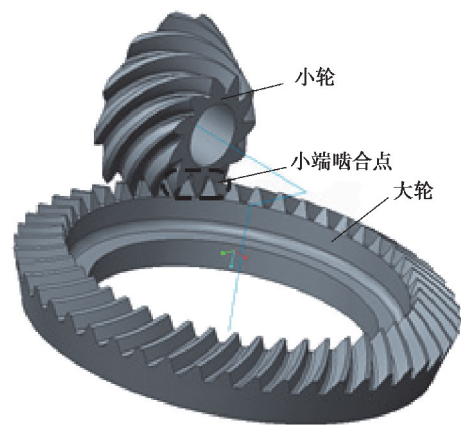


图 6 啮合实体装配模型

Fig. 6 The model of meshing solid assembly

差,得到大小轮的实体模型;根据齿轮装配参数,得到奥利康准双曲面齿轮的啮合实体模型。

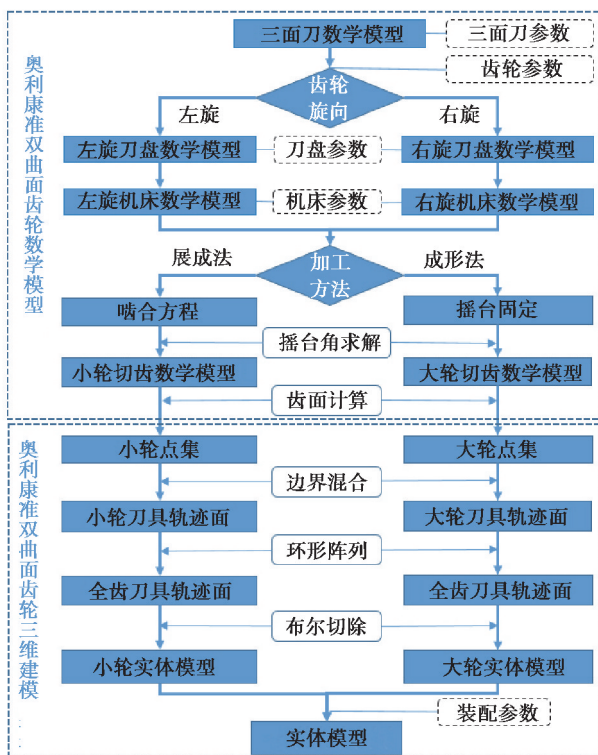


图 7 奥利康准双曲面齿轮建模流程

Fig. 7 Modeling process of Oerlikon's hypoid gear

2 模型验证

根据表 1,2 所示奥利康制准双曲面齿轮基本参数与机床加工参数,通过 KIMOS 软件导入 C27 机床,加工出实际齿轮,并与经过齿面方程推导得到的大小轮数学模型对比,如图 8 所示。

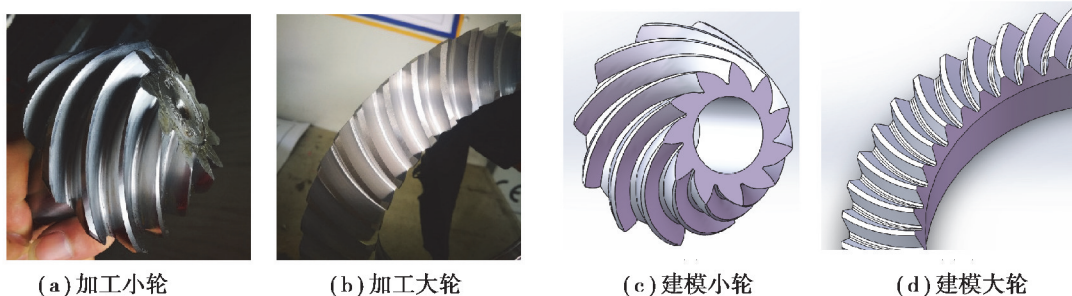


图 8 加工与数学齿轮模型

Fig. 8 Machine and mathematics model of pinion and gear

2.1 几何形貌验证

通过 KIMOS 设计模块得到 45 点齿面点集,部分数据如表 3 所示;通过齿面数学模型计算,求解齿轮点集,部分数据如表 4 所示。在 CREO 软件中建立大小轮数学齿面实体模型,并导入 45 点数据,建立对比齿面,如图 9 所示。图 9 中蓝色齿面为小轮凹面理论 45 点构成的齿面,橙色为大轮凸面理论 45 点构成的齿面,灰色模型是通过齿面方程推导建立的大小轮实体模型。对比分析得出大小轮齿面基本重合,其中,小轮凹面最大误差位于小端偏齿顶处,其值为 0.007 5 mm,最小误差点在大端齿根处,其值为 -0.001 5 mm;大轮

凸面最大误差为 0.002 3 mm,位于小端偏齿顶,最小误差为-0.000 5 mm,位于大端偏齿根。

表 3 Kimos 理论齿面 45 点齿面坐标点集(部分)

Table 3 Theory tooth surface 45 points set of Kimos (Portion)

mm

点集 编号	小轮凹面 x_i, y_i, z_i	小轮凸面 x_i, y_i, z_i	大轮凹面 x_i, y_i, z_i	大轮凸面 x_i, y_i, z_i
1	27.137, 27.489, 106.206	30.170, 24.121, 106.206	3.338, 95.311, 36.380	-1.157, 95.364, 36.679
2	28.876, 27.103, 106.206	31.015, 24.625, 106.206	4.120, 95.882, 35.413	-1.729, 95.956, 35.413
3	30.650, 26.593, 106.206	31.840, 25.155, 106.206	4.862, 96.449, 34.147	-2.304, 96.956, 34.147
4	32.454, 25.952, 106.206	32.648, 25.707, 106.206	5.608, 97.009, 32.881	-2.883, 97.129, 32.881
5	34.278, 25.176, 106.206	33.441, 26.276, 106.206	6.358, 97.565, 31.615	-3.465, 97.710, 31.615
6	19.051, 31.198, 101.472	22.614, 28.720, 101.472	5.459, 91.735, 35.034	1.094, 91.891, 35.033
7	21.551, 31.347, 101.472	23.491, 29.920, 101.472	6.186, 92.291, 33.767	0.548, 92.496, 33.767
8	24.205, 31.247, 101.472	24.292, 31.180, 101.472	6.917, 92.841, 32.501	0.000, 93.098, 32.501
9	26.992, 30.877, 101.472	25.028, 32.489, 101.472	7.651, 93.385, 31.235	-0.552, 93.696, 31.235
10	29.888, 30.211, 101.472	25.706, 33.956, 101.472	8.390, 93.924, 29.969	-1.107, 94.292, 29.969

表 4 数学齿面坐标点集(部分)

Table 4 Mathematical tooth surface points set (Portion)

mm

点集 编号	小轮凹面 x_i, y_i, z_i	小轮凸面 x_i, y_i, z_i	大轮凹面 x_i, y_i, z_i	大轮凸面 x_i, y_i, z_i
1	138.050, 46.199, -55.395	137.517, 44.124, -26.463	107.746, 41.534, 28.305	106.350, 12.844, 44.532
2	138.131, 45.291, -54.983	137.610, 44.062, -26.388	108.122, 38.497, 29.754	107.210, 14.158, 42.135
3	138.255, 43.930, -54.365	137.713, 44.018, -26.312	108.823, 32.807, 31.656	108.119, 15.316, 39.813
4	138.381, 42.569, -53.747	137.782, 43.993, -26.236	109.791, 25.589, 32.548	109.078, 16.348, 37.635
5	138.509, 41.208, -53.130	137.934, 43.987, -26.162	110.209, 22.954, 32.405	110.343, 17.551, 35.236
6	137.310, 50.835, -47.901	134.770, 46.831, -18.258	101.755, 31.179, 36.677	102.619, 4.170, 4.460
7	137.424, 49.420, -47.415	134.862, 46.757, -18.193	102.283, 23.681, 37.736	103.777, 6.463, 4.192
8	137.541, 48.006, -46.929	134.962, 46.701, -18.123	102.642, 185.518, 37.556	104.762, 8.075, 3.984
9	137.660, 46.591, -46.443	135.070, 46.663, -18.050	103.009, 13.352, 36.498	105.796, 9.509, 3.789
10	137.822, 44.707, -45.795	135.180, 46.646, -17.975	103.340, 93.920, 34.930	106.876, 10.820, 3.620

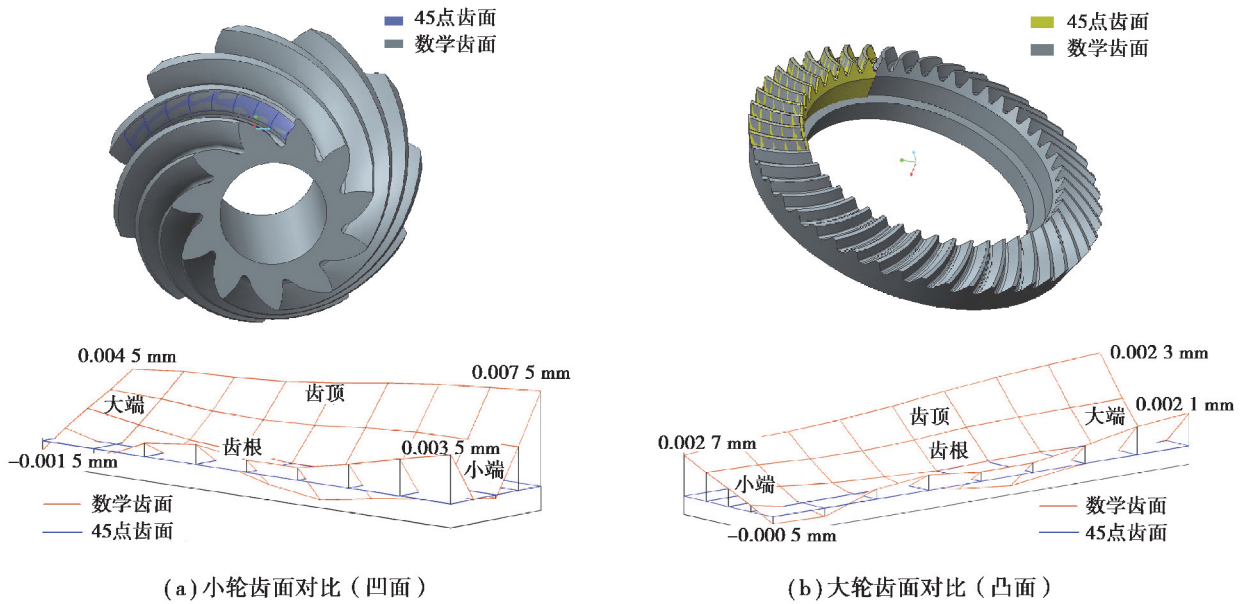


图 9 数学齿面与 45 点齿面对比
 Fig. 9 Comparison of 45 points tooth surface

2.2 啮合印痕验证

通过 ABAQUS 加载特性分析得到大轮凸面的接触斑点与 KIMOS 轮齿接触分析(TCA)及承载接触分析(LTCA)在 450 NM 时计算的大轮凸面接触印痕进行对比,进一步验证齿面模型推导的准确性。KIMOS 计算结果如图 10 所示。

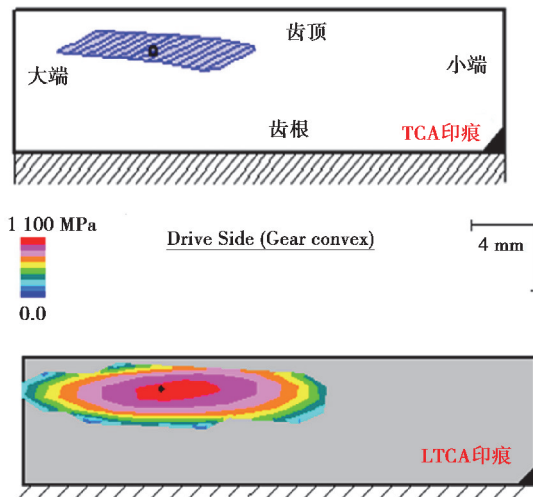


图 10 KIMOS 理论 TCA 与 LTCA 印痕(大轮凸面)
 Fig. 10 Contact patterns (KIMOS)

根据上文建立的齿轮实体模型,通过 ABAQUS 建立有限元啮合模型,如图 11 所示,为节省计算时间,大轮选择 11 齿,小轮为全齿。 R_{P1} , R_{P2} 分别为小轮、大轮的参考耦合点;小轮凹面为主动接触面,大轮凸面为从动接触面,相互啮合齿面分别建立接触对,接触特性设置无摩擦、硬接触;采用预加载和正常啮合分析步来模拟齿轮的正常啮合过程。大轮扭矩 450 NM,杨氏模量为 210 GPa,泊松比为 0.3。

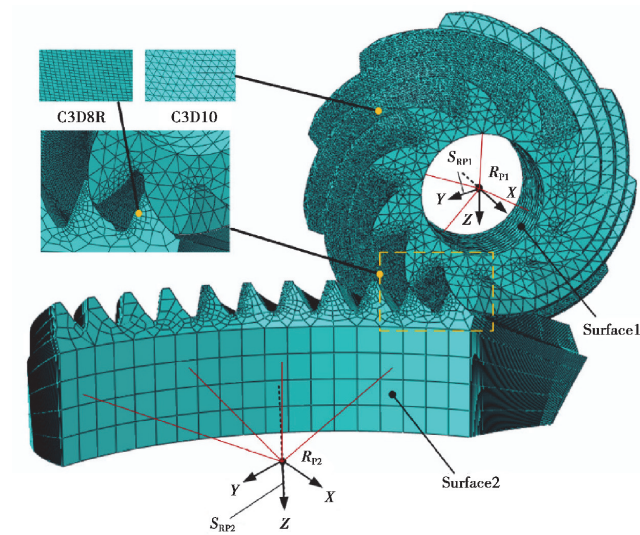


图 11 有限元啮合模型

Fig. 11 Finite element meshing model

图 12 为大轮凸面从啮入到啮出的 3 个时刻的瞬时接触线。图 13 为大轮凸面的接触印痕。由图可知, KIMOS 计算的理论 TCA 印痕与有限元计算印痕的位置基本一致;有限元计算的接触印痕与 KIMOS 通过 LTCA 计算的位置、大小基本一致,进一步验证了齿面的正确性。

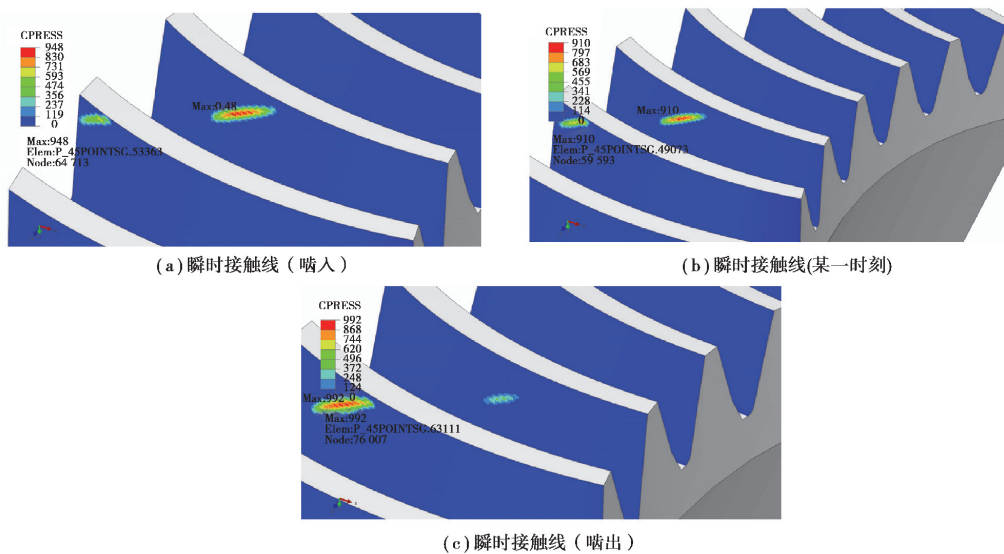


图 12 瞬时接触线

Fig. 12 Instantaneous contact line

在实际接触印痕的位置、大小设计过程中,热处理工艺以及轴系支撑变形等因素应当被考虑。通过调整刀具及机床参数,可以调整设计印痕的位置,确保在热处理变形及支撑变形之后,啮合印痕的区域位于齿中,提高齿轮的接触状态。

通过齿面对比和接触印痕的验证,基于刀具 NS 法向基准的准双曲面齿轮建模方法是准确可行的。

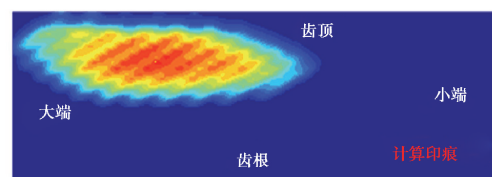


图 13 有限元计算印痕

Fig. 13 Contact patterns (ABAQUS)

3 结 论

笔者从奥利康准双曲面齿轮的实际加工出发,研究了加工刀盘的结构和位置,建立了基于刀具 NS 法向基准的刀盘数学模型和奥利康制准双曲面齿轮实体模型,并进行了相关验证,提出了一套基于 NS 基准的建模流程。该方法对准双曲面齿轮的精确化建模提供了新的思路,为后续相关齿轮齿面的设计优化提供了基础,具有较强的实用价值。

参考文献:

- [1] Litvin F L. Michalec. Theory of gearing [M]. Washington, D. C.: NASA Reference Publication, 1989.
- [2] Fan Q. Computerized modeling and simulation of spiral bevel and hypoid gears manufactured by gleason face hobbing process[J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128(6): 1315-1327.
- [3] Fan Q. Advanced developments in computerized design and manufacturing of spiral bevel and hypoid gear drives[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 86: 439-442.
- [4] Fan Q. Tooth surface error correction for face-hobbed hypoid gears[J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(1): 61-69.
- [5] Shih Y P, Fong Z H. Flank correction for spiral bevel and hypoid gears on a six-axis CNC hypoid generator[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(6): 876-877.
- [6] Shih Y P. A novel ease-off flank modification methodology for spiral bevel and hypoid gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(8): 1108-1124.
- [7] 方宗德, 曹雪梅, 沈云波. 弧线齿面齿轮的齿面设计与加工[J]. 航空动力学报, 2010, 25(1): 224-227.
FANG Zongde, CAO Xuemei, SHEN Yunbo. Tooth surface design and manufacture for arcuate tooth trace face-gear[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(01): 224-227. (in Chinese)
- [8] 郭晓东, 张卫青, 张明德, 等. 螺旋锥齿轮切齿调整参数的精确反调[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(3): 32-37.
GUO Xiaodong, ZHANG Weiqing, ZHANG Mingde, et al. The machine setting reverse method of spiral bevel gear[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(3): 32-37. (in Chinese)
- [9] 林希. 全工序法准双曲面齿轮建模与有限元分析[J]. 机械传动, 2017, 41(6): 159-163.
LIN Xi. Modeling and finite element analysis of hypoid gear cutting by completed method[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41(6): 159-163. (in Chinese)
- [10] 王星星, 李权才, 付丽, 等. 摆线齿准双曲面齿轮模拟加工系统建模[J]. 现代制造工程, 2013(07): 86-89.
WANG Xingxing, LI Quancai, FU Li, et al. Modeling on simulation machining system of epicycloidal hypoid gears[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2013(7): 86-89. (in Chinese)
- [11] 江玉刚. 基于精确齿面建模的弧齿锥齿轮有限元分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
JIANG Yugang. Finite element analysis of spiral bevel gear based on precise tooth surface model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- [12] 王星, 方宗德, 李声晋, 等. HGT 准双曲面齿轮精确建模和加载接触分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(4): 181-185.
WANG Xing, FANG Zongde, LI Shengjin, et al. Precise modeling of HGT hypoid gear and loaded tooth contact analysis[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2015, 47(4): 181-185. (in Chinese)
- [13] 张卫青. 螺旋锥齿轮端面滚齿加工的理论及实验[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
ZHANG Weiqing. The face hobbing theory and experiments of hypoid gear[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [14] 杜进辅. 摆线齿准双曲面齿轮齿面啮合性能分析及设计技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
DU Jinfu. Tooth contact pattern analysis and design technology research of cycloid hypoid gears[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015. (in Chinese)