

文章编号:1000-8055(2019)04-0796-08

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2019.04.008

弧线齿面齿轮齿面几何设计及 径向齿宽特性

盛 伟, 王利霞, 冯占荣, 王文轩, 陈 勇, 赵玉龙
(南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063)

摘 要: 为适应航空领域对面齿轮传动的设计要求,综合弧线齿圆柱齿轮、面齿轮传动的各项优点,提出了弧线齿面齿轮齿面设计并研究了其径向齿宽特性。以端面渐开线齿廓弧线齿圆柱齿轮作为产形齿轮通过包络成形建立面齿轮齿面数学模型;结合齿面方程在 MATLAB 中进行齿面可视化分析,并通过 MATLAB 软件的数值计算和 CATIA 软件的复杂曲面造型实现面齿轮的参数化建模;确立内端根切、外端顶尖对径向有效齿宽的限制条件,计算面齿轮的径向有效齿宽,分析刀具齿轮的齿线圆弧半径和坐标系位置参数对径向有效齿宽的影响。研究表明:当增大齿线的圆弧半径,面齿轮的内径减小,外径、径向有效齿宽均增大;当增大坐标系位置参数,面齿轮的内径、外径均增大,径向有效齿宽减小。

关 键 词: 渐开线齿廓; 弧线齿面齿轮; 齿面可视化; 参数化建模; 径向有效齿宽

中图分类号: V232.8

文献标志码: A

Geometrical design of tooth surface and characteristics of radial tooth width for face gear with arc tooth

SHENG Wei, WANG Lixia, FENG Zhanrong, WANG Wenxuan,
CHEN Yong, ZHAO Yulong

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In order to meet the design requirements of face gear transmission in the field of aviation, a type of arc tooth face gear was proposed and its radial effective tooth width characteristics were studied. The involute tooth profile cylindrical gear with arc tooth was used as the generating gear, and the mathematical model of the gear surface was established by envelope forming. Combined with the equation of tooth surface, the tooth surface was visualized in MATLAB, and the parameterized modeling of the gear was realized through the numerical calculation function of the MATLAB software and the complex surface modeling function of the CATIA software. The restrictive conditions of the inner undercut and the outer tip to the radial effective tooth width were established, and the radial effective tooth width of the face gear was calculated. The influences of the arc radius of the tooth line and the position parameters of the coordinate system on the inner radius, the outer radius and the

收稿日期:2018-08-27

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ160701)

作者简介:盛伟(1993—),男,硕士生,主要从事面齿轮传动理论研究。

通讯作者:王利霞(1982—),女,讲师,博士,主要从事面齿轮设计及制造研究。E-mail:wanglixia@nchu.edu.cn

引用格式:盛伟,王利霞,冯占荣,等. 弧线齿面齿轮齿面几何设计及径向齿宽特性[J]. 航空动力学报, 2019, 34(4): 796-803.
SHENG Wei, WANG Lixia, FENG Zhanrong, et al. Geometrical design of tooth surface and characteristics of radial tooth width for face gear with arc tooth[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(4): 796-803.

radial effective tooth width were analyzed. Results showed that, when the arc radius of the tooth line was increased, then the inner diameter was decreased, the outer diameter and the radial effective tooth width were increased. When the position parameter of coordinate system was increased, the inner diameter and the outer diameter were increased and the radial effective tooth width was decreased.

Key words: involute tooth profile; face gear with arc tooth; visualization of tooth surface; parameterized modeling; radial effective tooth width

面齿轮传动装置具有体积小、重合度大、质量轻、振动噪声小等优点,因此在航空领域的应用显得尤为重要。面齿轮的研究起源于国外,其中, Litvin 等^[1-4]及其团队在面齿轮研究的早期阶段就取得了很多优秀的成果,推动了面齿轮研究的发展。他们对面齿轮传动的啮合原理进行了深入而全面的分析,依据齿轮啮合原理推导了面齿轮内端发生根切、外端发生齿顶变尖的界限条件,并且还提出了点接触形式的面齿轮传动设计,为面齿轮能够应用于一些高速重载的场合提供了重要理论支撑。而面齿轮在国内研究起步较晚,南京航空航天大学朱如鹏教授在其博士阶段就开始了面齿轮的研究,并一直致力于面齿轮的研究,其课题^[5-7]成功地研制出了我国第一台面齿轮插齿机床,为国内进一步开展面齿轮研究工作做出了巨大贡献。由于面齿轮在分流传动中所表现的巨大优势,使得其成为了航空动力传输领域的研究热点。近年来,许多科研院所正开展着新型面齿轮的创新研究,西北工业大学方宗德团队^[8-11]提出了一种弧线齿面齿轮传动,较渐开线面齿轮副传动性能更为优良,它是一种交错轴弧形齿圆柱齿轮与弧线齿面齿轮相啮合的传动。同时他们利用常规的格里森刀盘,在国内已有的数控加工中心或数控齿轮机床上实现了该种面齿轮的加工,并且制造工艺简单。彭先龙等^[12]结合人字齿轮传动的特点和面齿轮传动的原理,提出了面齿轮人字齿的构建方法,然后建立了齿面的数学模型以及齿面啮合性能仿真模型,并对齿面接触性能加以分析。研究表明:这种齿轮啮合性能优良,可以满足啮合传动的需要,且应用前景良好。苏进展等^[13]提出了一种齿线近似为斜线的面齿轮,齿线与半径方向呈一定的倾斜角,而且该齿轮只能与直齿圆柱齿轮相啮合,因此不会产生轴向力,具有简化支撑结构和易于实现浮动均载等特点。

本文通过分析两种形式的弧线齿圆柱齿轮几何特征和传动性能,确立与弧线齿面齿轮配对的弧线齿圆柱齿轮。根据包络成形理论推导面齿轮

齿面方程,实现面齿轮齿面可视化分析及参数化建模;根据内端根切、外端顶尖对径向齿宽的限制条件,分析圆柱齿轮齿线圆弧半径和坐标系位置参数对径向齿宽的影响。

1 弧线齿圆柱齿轮的几何特征

目前研究的弧线齿圆柱齿轮基本齿廓主要有两种,都是围绕弧线齿圆柱齿轮加工方法所提出:一种是以格里森刀盘铣削法(包括单面法和双面法)提出的基本齿条(下文简称“格里森制”),其对称中间平面所截齿廓为直线(基圆无穷大的标准渐开线)齿廓,而与中间平面平行的其他平面所截齿廓为双曲线齿廓(如图 1 所示格里森刀盘等价的齿条单齿,其中③所在平面为齿条中间平面,齿廓为直线,①、②、④、⑤所在平面是与③平行的平面,其齿廓为双曲线,西北工业大学方宗德教授团队所研究的与面齿轮配对的弧齿圆柱齿轮为这类形式);另一种是以平行连杆法^[14]提出的基本齿条,与中间平面平行的任意截面周向齿厚相等且周向槽宽相等,且截面齿廓均为直线(如图 2 所示平行连杆法刀具等价的齿条单齿,其中①~⑤平面所截齿廓均为直线,本文将该齿条产形的齿轮称作端面渐开线齿廓弧线齿圆柱齿轮)。

“格里森制”弧线齿圆柱齿轮的轴向槽宽不相等,那么轴向齿厚也必不相等,且中截面齿厚大于

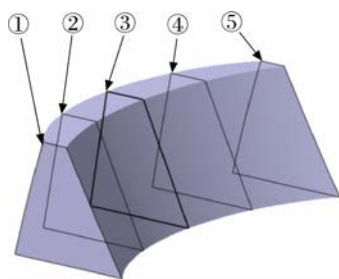


图1 格里森刀盘等价的齿条单齿
Fig. 1 Rack single tooth equivalent to the Gleason knife plate

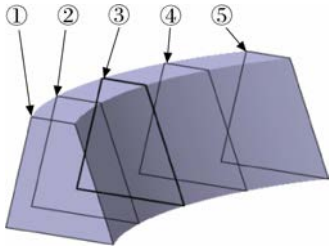


图 2 平行连杆法刀具等价的齿条单齿

Fig. 2 Rack single tooth equivalent to a parallel connecting rod tool

其他轴向截面齿厚,这种几何特征会导致齿轮在传动时易折断、啮合不平稳、承载能力差。而端面渐开线齿廓弧线齿圆柱齿轮轴向槽宽相等、轴向齿厚相等,且与端面平行的任意截面均为标准渐开线齿廓,这种几何特征使得其传动较平稳、噪声低、承载能力强^[15]。并且,端面渐开线齿廓弧线齿圆柱齿轮是在直齿、斜齿、人字齿圆柱齿轮的基础上提出的,既具有普通直齿圆柱齿轮的传动特点,又具有斜齿圆柱齿轮的特点,还可以克服人字齿轮的缺点^[16]。故本文选用端面渐开线齿廓弧线齿圆柱齿轮作为与面齿轮配对的小齿轮。

2 产形齿轮方程

图 3 为端面渐开线齿廓弧线齿圆柱齿轮坐标系以及分度圆柱面展开图,建立坐标系 $O_h-x_h y_h z_h$ 和坐标系 $O_s-x_s y_s z_s, z_h$ 轴与 z_s 轴同向,平面 $x_h O_h y_h$ 和平面 $x_s O_s y_s$ 相距 h, x_h 轴和 x_s 轴相比,绕 z_h 轴或 z_s 轴转动了 β 角,其满足的关系式: $\beta = (R_1 - \sqrt{R_1^2 - h^2})/R$,其中 B 为齿宽,圆弧齿线 L 为齿槽中线且分布在分度圆柱面上,并且 x_h 轴和 x_s 轴均过齿线 L, R_1 为圆弧齿线的半径, R 为分度圆半径。

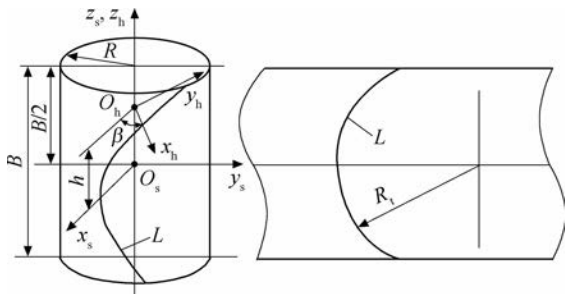


图 3 弧线齿齿轮坐标系的设定

Fig. 3 Setting of coordinate system of arc tooth gear

图 4 是图 3 中弧线齿圆柱齿轮的 $x_h O_h y_h$ 截面,则渐开线齿廓方程为

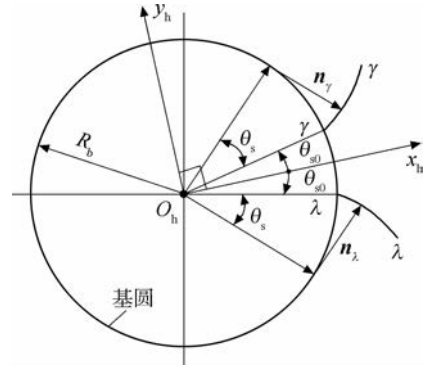


图 4 在截面 $x_h O_h y_h$ 上的渐开线齿廓

Fig. 4 Involute tooth profile on the cross section $x_h O_h y_h$

$$\mathbf{r}_h(\theta_s) = (x_h, y_h, z_h, t)^T = \begin{pmatrix} R_b [\cos(\theta_{s0} + \theta_s) + \theta_s \sin(\theta_{s0} + \theta_s)] \\ \pm R_b [\sin(\theta_{s0} + \theta_s) - \theta_s \cos(\theta_{s0} + \theta_s)] \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中“ \pm ”符号分别对应齿槽两侧渐开线 $\gamma-\gamma$ 和 $\lambda-\lambda$ 的方程, R_b 为弧线齿圆柱齿轮的基圆半径; θ_s 为渐开线上一点的角度参数,并且该点的法向量分别为 $\mathbf{n}_\gamma, \mathbf{n}_\lambda$; 齿槽对称轴线 $O_h x_h$ 到渐开线起始点的角度参数: $\theta_{s0} = 0, 5\pi/N_s - \text{inv}\alpha_s$, 渐开线函数 $\text{inv}\alpha_s = \tan\alpha_s - \alpha_s, N_s$ 为弧线齿圆柱齿轮的齿数, α_s 为齿轮的压力角。

根据坐标变换,得到端面渐开线齿廓弧线齿圆柱齿轮在坐标系 $O_s-x_s y_s z_s$ 中的齿面方程式

$$\mathbf{r}_s(x_s, y_s, z_s, t)^T = \mathbf{M}_{sh} \mathbf{r}_h = \begin{pmatrix} R_b (\cos \xi + \theta_s \sin \xi) \\ \pm R_b (\sin \xi - \theta_s \cos \xi) \\ h \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 $\xi = \theta_{s0} + \theta_s \pm \beta, \mathbf{M}_{sh}$ 为坐标系 $O_h-x_h y_h z_h$ 到坐标系 $O_s-x_s y_s z_s$ 的坐标变换矩阵。 h 满足关系式: $-B/2 \leq h \leq B/2$ 。

3 面齿轮齿面方程

3.1 齿面展成坐标系

采用产形齿轮(端面渐开线齿廓弧线齿圆柱齿轮)和弧线齿面齿轮共轲啮合的包络成形方法建立面齿轮齿面数学模型。建立如图 5 所示的坐标系,产形齿轮固连动坐标系和固定坐标系: $O_s-x_s y_s z_s, O_0-x_0 y_0 z_0$; 面齿轮固连动坐标系和固定坐标系: $O_2-x_2 y_2 z_2, O_1-x_1 y_1 z_1$ 。 ϕ_s 和 ϕ_2 分别表示产形齿轮和面齿轮共轲啮合时各自的转角。

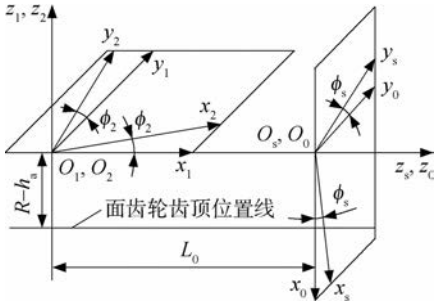


图 5 面齿轮展成坐标系

Fig. 5 Coordinate system of forming face gear

表 1 齿轮基本参数

Table 1 Basic parameters of the gear

参数	数值
模数 m/mm	4
产形齿轮齿数 N_s	30
面齿轮齿数 N_2	120
压力角 $\alpha_s/^\circ$	20
齿线圆弧半径 R_t/mm	500
齿顶高系数 h_a^*	1
齿根高系数 c^*	0.25
位置参数 L_0/mm	230

3.2 齿面方程

3.2.1 工作齿面

面齿轮的齿面是由产形齿轮的齿面包络而成,根据坐标变换和齿面啮合条件^[13],得到工作齿面方程为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_2(\theta_s, h, \phi_s) = \mathbf{M}_{2s} \mathbf{r}_s \\ f(\theta_s, h, \phi_s) = \left(\frac{\partial \mathbf{r}_2}{\partial \theta_s} \times \frac{\partial \mathbf{r}_2}{\partial h} \right) \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_2}{\partial \phi_s} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{M}_{2s} = \mathbf{M}_{21} \mathbf{M}_{10} \mathbf{M}_{0s}$ 为产形齿轮坐标系 $O_s - x_s y_s z_s$ 到面齿轮坐标系 $O_2 - x_2 y_2 z_2$ 的坐标变换矩阵; $f(\theta_s, h, \phi_s) = 0$ 为产形齿轮与面齿轮的啮合条件; $\partial \mathbf{r}_2 / \partial \theta_s$ 和 $\partial \mathbf{r}_2 / \partial h$ 分别表示工作曲面位矢对坐标参数 θ_s 和 h 的偏导数;矢量 $(\partial \mathbf{r}_2 / \partial \theta_s) \times (\partial \mathbf{r}_2 / \partial h)$ 表示工作齿面的法矢; $\partial \mathbf{r}_2 / \partial \phi_s$ 为工作曲面位矢对产形齿轮转角 ϕ_s 的偏导,表示在展成工作曲面时产形齿轮与面齿轮的相对速度。

3.2.2 过渡齿面

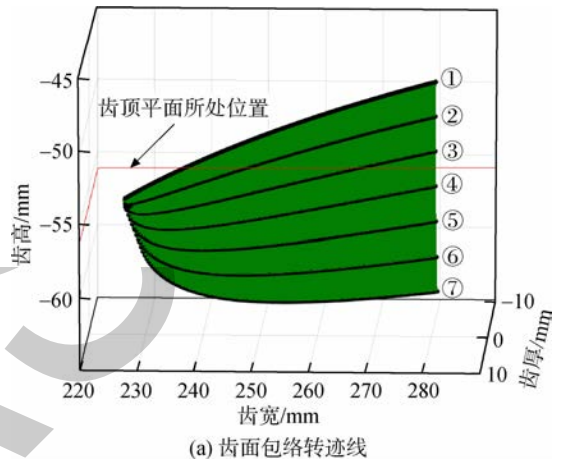
产形齿轮齿顶与面齿轮齿根处啮合形成的轨迹面为过渡曲面^[5]。可以使用一个常量 θ_s^* 代替产形齿轮齿面参数 θ_s , 并且 $\theta_s^* = \sqrt{R_a^2 - R_b^2} / R_b$, 其中 R_a 和 R_b 分别为产形齿轮的齿顶圆和基圆的半径。因此,过渡曲面的方程为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_2(\theta_s, h, \phi_s) = \mathbf{M}_{2s} \mathbf{r}_s \\ \theta_s = \theta_s^* = \sqrt{R_a^2 - R_b^2} / R_b \end{cases} \quad (4)$$

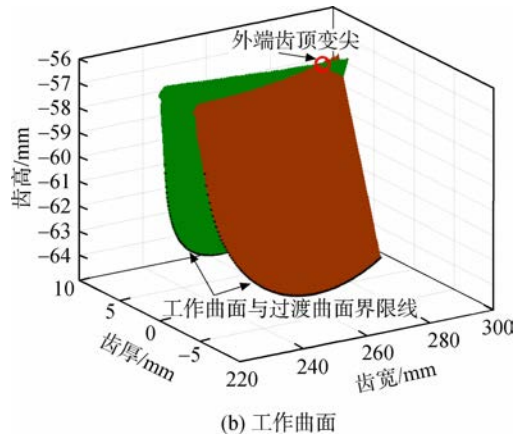
4 齿面分析

根据面齿轮工作齿面方程、过渡曲面方程、齿顶平面位置,结合齿轮基本参数(如表 1 所示),在 MATLAB 软件中进行面齿轮齿面可视化分析,如图 6 所示。

图 6(a)中线①是产形齿轮基圆处齿面(θ_s 为零)包络成形面齿轮齿面上的迹线;线②~⑥为产形齿轮齿面线 $\theta_s \in (0, \sqrt{R_a^2 - R_b^2} / R_b)$ 间隔取值包



(a) 齿面包络迹线



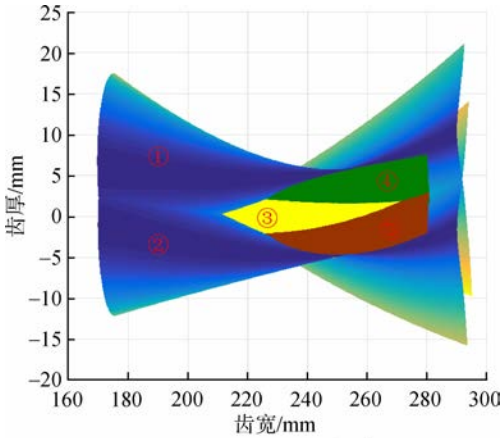
(b) 工作齿面

图 6 工作齿面可视化

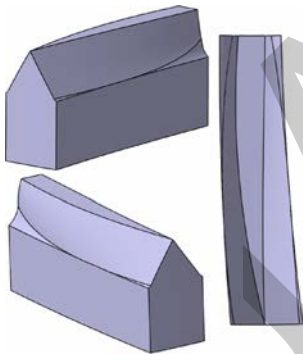
Fig. 6 Visualization of working tooth surface

络成形面齿轮齿面上的迹线;线⑦既是工作齿面与过渡曲面的公切线,又是产形齿轮齿顶线 $\theta_s = \sqrt{R_a^2 - R_b^2} / R_b$ 包络成形面齿轮齿面上的迹线。由图 6(a)中的迹线可知,由产形齿轮齿廓的基圆到齿顶逐渐包络成形了面齿轮工作齿面,由图 6(b)反映了单齿两侧工作齿面在外端齿顶变尖现象。

图 7(a)为基于包络成形理论的面齿轮可视化仿真图(其中①、②为过渡曲面,③为齿顶平面,④、⑤为工作齿面)。利用 MATLAB 软件计算齿面点坐标,将坐标点导入 CATIA 三维软件构建曲面,并以布尔运算切割毛坯实体得到面齿轮模型以实现面齿轮的参数化建模^[17],单齿三维模型如图 7(b)所示。



(a) MATLAB齿形仿真



(b) 单齿三维模型

图 7 面齿轮单齿三维模型

Fig. 7 Three dimensional model of single tooth

5 径向齿宽限制条件

5.1 齿根根切

齿根根切是一种加工缺陷,易造成应力集中,降低轮齿的弯曲强度,导致齿轮过早失效,须在齿轮几何设计阶段给予消除^[13]。由于弧线齿面齿轮的单齿两侧齿面的不对称性,那么需要对两侧不发生根切的内径分别计算,最后取最大计算结果作为面齿轮的内半径值。

一般情况下,可以通过限定产形齿轮齿面避免齿根根切。产形齿轮的齿面的界限线可由下列方程确定^[18]。

$$\begin{cases} \mathbf{r}_s(\theta_s, h, \phi_s) \\ f(\theta_s, h, \phi_s) = 0 \\ |\mathbf{G}| = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中

$$|\mathbf{G}| = \begin{vmatrix} \frac{\partial f}{\partial \theta_s} & \frac{\partial f}{\partial h} & -\frac{\partial f}{\partial \phi_s} \cdot \frac{d\phi_s}{dt} \\ \frac{\partial x_s}{\partial \theta_s} & \frac{\partial x_s}{\partial h} & -v_x^{(s,2)} \\ \frac{\partial z_s}{\partial \theta_s} & \frac{\partial z_s}{\partial h} & -v_z^{(s,2)} \end{vmatrix}$$

根切界限线上的根切极限点就是齿轮最早发生根切的位置。则 $\theta_s = \sqrt{R_a^2 - R_b^2}/R_b$, 将 θ_s 代入式(5)中,求解出参数 h 和 ϕ_s ;再将 (θ_s, h, ϕ_s) 代入到式(3)中求出面齿轮发生根切起始点的坐标 (x_2, y_2, z_2) 。则内端齿根不发生根切的最小内径为

$$R_1 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \quad (6)$$

5.2 齿顶变尖

当轮齿的两侧齿面与齿顶圆锥面相交时,导致齿顶的厚度等于 0 mm,即齿顶变尖现象。顶尖的出现会导致该区域轮齿的接触强度的降低,一般可在齿轮几何设计阶段予以避免。

弧线齿面齿轮齿顶变尖位置即两侧工作齿面在齿顶处的交点,根据图 5 和式(3),尖点位置可通过式(7)求得。

$$\begin{cases} x_{21}(\theta_{s1}, h_1, \phi_{s1}) = x_{22}(\theta_{s2}, h_{12}, \phi_{s2}) \\ y_{21}(\theta_{s1}, h_1, \phi_{s1}) = y_{22}(\theta_{s2}, h_{12}, \phi_{s2}) \\ z_{21}(\theta_{s1}, h_1, \phi_{s1}) = z_{22}(\theta_{s2}, h_{12}, \phi_{s2}) = h_a - R \\ f_1(\theta_{s1}, h_1, \phi_{s1}) = f_2(\theta_{s2}, h_{12}, \phi_{s2}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 h_a 为圆柱齿轮齿顶高,则面齿轮不发生齿顶变尖的外半径为

$$R_2 = \sqrt{x_{21}^2 + y_{21}^2} \quad (8)$$

根据面齿轮内端不发生根切的条件和外端不发生顶尖的条件,确定径向有效齿宽 $W = R_2 - R_1$ 。

5.3 影响径向齿宽的因素

5.3.1 齿线圆弧半径的影响

结合弧线齿面齿轮齿面方程和面齿轮齿面方程,可知齿线圆弧半径影响面齿轮的径向有效齿宽。以表 1 中的刀具齿轮基本参数为基础,分析不同圆弧半径对径向齿宽的影响(数值计算设定的求解精度为 1×10^{-10} mm),如图 8 所示(图中虚线表示相同基本参数的直齿面齿轮径向齿宽的相关数值)。

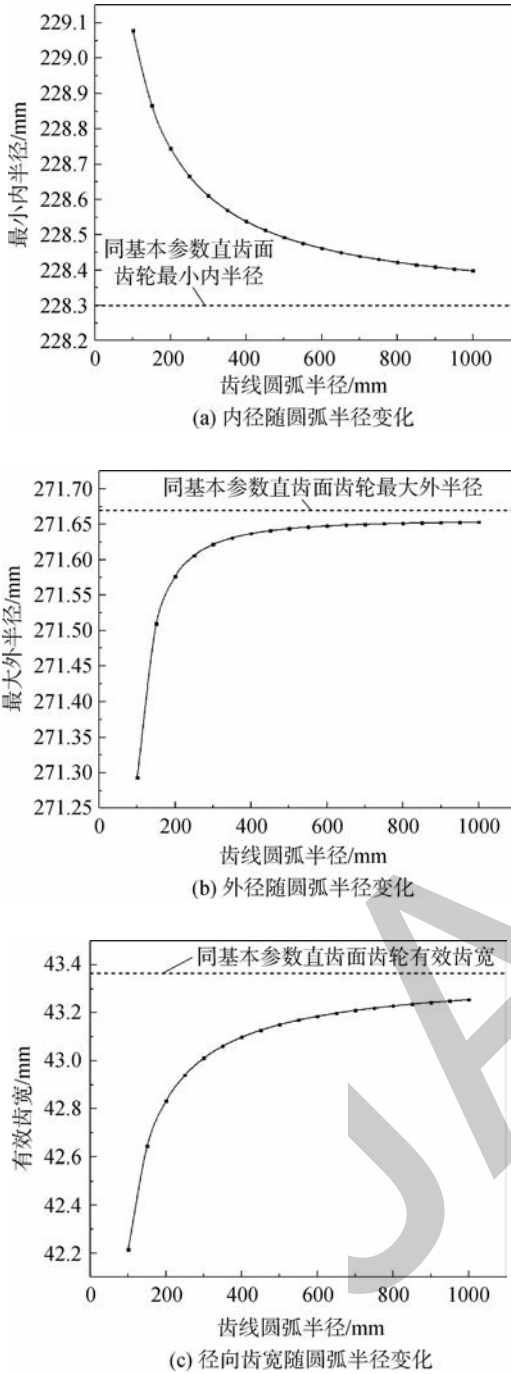


图 8 圆弧半径对内径、外径和径向齿宽的影响
 Fig. 8 Influence of arc radius on the inner radius, the outer radius and the radial tooth width

从图 8 中可以看出:当刀具齿轮和面齿轮之间的位置参数 L_0 一定时,面齿轮的最小内半径随着圆弧半径的增大而减小,最大外半径则呈现出与最小内半径相反的趋势;当圆弧半径趋近于无穷大时,弧线齿面齿轮最小内半径和最大外半径分别接近与直齿渐开线面齿轮的最小内半径和最大外半径;当增大圆弧半径时,面齿轮的径向齿宽随之增大,且逐渐接近直齿渐开线面齿轮的径向齿宽。

5.3.2 位置参数 L_0 的影响

位置参数 L_0 影响面齿轮的径向齿宽以及齿形的设计。取圆弧半径为 500 mm,分析 L_0 对径向齿宽限制条件的影响(数值计算设定的求解精度为 10^{-10} mm),如图 9 所示。

从图 9 中可以看出:当刀具齿轮圆弧半径一定时,位置参数 L_0 的增大会导致面齿轮的最小内

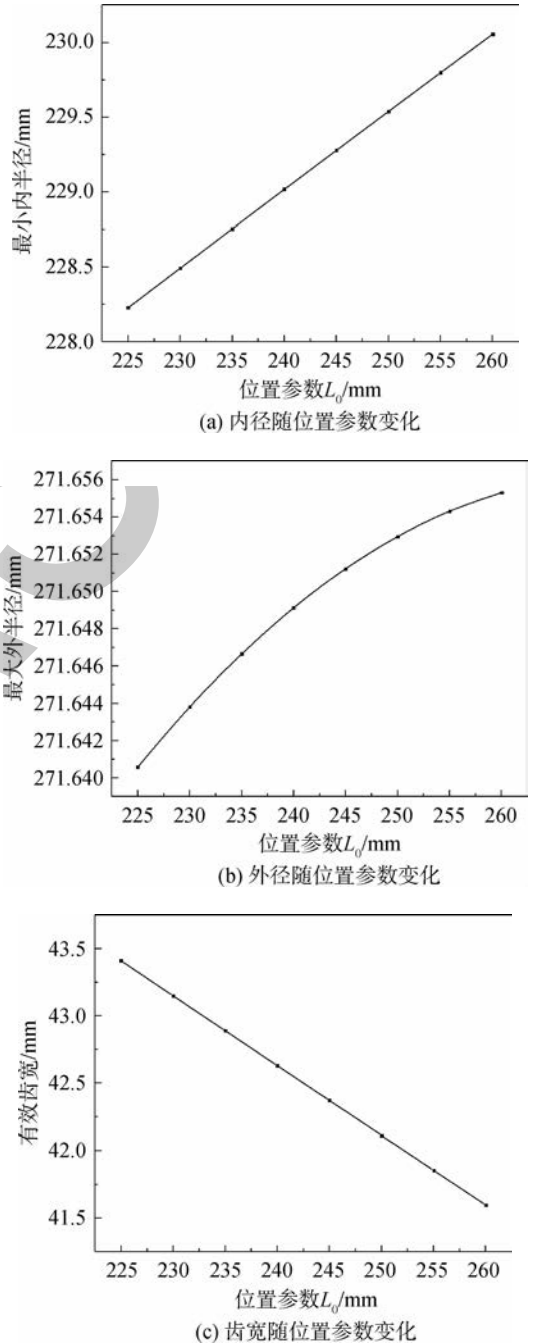


图 9 位置参数对内半径、外半径和齿宽的影响
 Fig. 9 Influence of position parameters on the inner radius, the outer radius and the radial tooth width

半径和最大外半径随之增大,而径向齿宽值随之减小。

6 结 论

1) 通过比较两种主要形式的弧线齿圆柱齿轮,确立以端面渐开线齿廓弧线齿圆柱齿轮为刀具齿轮,提出弧线齿面齿轮齿面设计,并构建面齿轮齿面数学模型。结合 MATLAB 进行齿面可视化分析,利用 CATIA 软件确立了面齿轮的参数化模型,为今后的有限元分析提供模型参照。

2) 根据齿宽限制条件,确立弧线齿面齿轮径向齿宽计算公式,分析齿线圆弧半径和坐标系位置参数对径向齿宽的影响:增大刀具齿轮的齿线圆弧半径或减小位置参数 L_0 时,弧线齿面齿轮的最小内半径减小;增大刀具齿轮的齿线圆弧半径或增大位置参数 L_0 时,弧线齿面齿轮的最大外半径增大;面齿轮的径向齿宽特性:增大刀具齿轮的齿线圆弧半径或减小位置参数 L_0 时,弧线齿面齿轮的径向有效齿宽增大。

参考文献:

- [1] LITVIN F L, ZHANG Y, WANG J C. Design and geometry of face-gear drives[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1992, 114(4): 642-647.
- [2] LITVIN F L, FUENTES A. Gear geometry and applied theory[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 15-50.
- [3] LITVIN F L, FUENTES A, HOWKINS M. Design, generation and TCA of new type of asymmetric face-gear drive with modified geometry[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001, 190(43): 5837-5865.
- [4] LITVIN F L, GONZALEZ-PEREZ J, FUENTES A, et al. Design, generation and stress analysis of face-gear drive with helical pinion[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2005, 194(36): 3870-3901.
- [5] 朱如鹏,潘升材,高德平. 正交面齿轮传动中齿宽设计的研究[J]. *机械科学与技术*, 1999, 18(4): 54-55, 57. ZHU Rupeng, PAN Shengcai, GAO Deping. Study of the design of tooth width of rigaht shaft-angle face-gear drive [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 1999, 18(4): 54-55, 57. (in Chinese)
- [6] 李政民卿,朱如鹏. 面齿轮传动的承载接触分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 2010, 42(2): 219-223. LI Zhengminqing, ZHU Rupeng. Load tooth contact analysis on face gear driver[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 42(2): 219-223. (in Chinese)
- [7] LI Zhengminqing, WANG Jing, ZHU Rupeng. Influence predictions of contact effects on mesh stiffness of face gear drives with spur gear[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 32(5): 566-570.
- [8] 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(1): 224-227. (in Chinese)
- [9] 方宗德,李建华,彭先龙,等. 弧线齿面齿轮应力过程分析[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(12): 2814-2820. FANG Zongde, LI Jianhua, PENG Xianlong, et al. Analysis of stress process for face gear with arcuate tooth pinion [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(12): 2814-2820. (in Chinese)
- [10] 蔡香伟,方宗德,苏进展. 弧线齿面齿轮的几何设计和数控加工[J]. *机械科学与技术*, 2012, 31(11): 1781-1785. CAI Xiangwei, FANG Zongde, SU Jinzhan. Geometrical design and manufacture on NC machine for face gear with arcuate tooth[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(11): 1781-1785. (in Chinese)
- [11] CUI Yanmei, FANG Zongde, SU Jinzhan, et al. Precise modeling of arc tooth face-gear with transition curve[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(5): 1346-1351.
- [12] 彭先龙,李爱民,郭卫. 人字齿面齿轮传动及其几何啮合特性[J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(7): 1131-1135. PENG Xianlong, LI Aimin, GUO Wei. Face gear driver with double helical pinion and its meshing performance [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2017, 36(7): 1131-1135. (in Chinese)
- [13] 苏进展,张昆仑,方宗德. 新型斜线齿面齿轮齿宽的几何设计[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(9): 2363-2369. SU Jinzhan, ZHANG Kunlun, FANG Zongde. Geometrical design and tooth width for a new-type face gear with tilted tooth trace[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(9): 2363-2369. (in Chinese)
- [14] 宋爱平,吴伟伟,高尚,等. 弧齿圆柱齿轮理想几何参数及其加工方法[J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44(12): 1735-1740. SONG Aiping, WU Weiwei, GAO Shang, et al. The ideal geometry parameters of arch cylindrical gear and its process method[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2010, 44(12): 1735-1740. (in Chinese)
- [15] 宋爱平,易红,汤文成,等. 渐开线弧齿圆柱齿轮及其啮合特性[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(18): 1888-1892. SONG Aiping, YI Hong, TANG Wencheng, et al. Involute arc cylindrical gear and its mesh characteristics[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(18): 1888-1892. (in Chinese)
- [16] 吴伟伟,宋爱平,王召垒,等. 渐开线弧齿圆柱齿轮的应力

- 分析[J]. 机械传动, 2010, 34(11): 38-44.
- WU Weiwei, SONG Aiping, WANG Zhaolei, et al. Stress analysis of the involute arc cylindrical gear[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(11): 38-44. (in Chinese)
- [17] 冯占荣, 盛伟, 王利霞. 圆弧齿廓面齿轮齿面设计[J]. 机械传动, 2018, 42(4): 76-79.
- FENG Zhanrong, SHENG Wei, WANG Lixia. Design of face gear tooth surface of circular arc profile[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(4): 76-79. (in Chinese)
- [18] 沈云波, 方宗德, 赵宁, 等. 斜齿面齿轮齿宽的设计[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 754-748.
- SHEN Yunbo, FANG Zongde, ZHAO Ning, et al. The design of tooth face width of the face-gear drives with helical pinion[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 754-748. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)

更 正

由于作者疏忽, 发表在本刊第34卷第2期(2019年2月)的文章《不同形状砂尘高速冲蚀 TC4 平板的数值仿真》(文章编号: 1000-8055(2019)02-0321-10), 将通讯作者赵振华的职称误写为副教授, 赵振华的职称应为讲师, 特此更正。

作者: 马松林
2019年3月29日