

文章编号: 1000-8055(2023)12-2982-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210568

Ease-off 拓扑修形斜齿轮齿面黏着磨损计算方法

王永强, 魏冰阳, 谢学凯, 李家琦

(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 从 ease-off 差曲面拓扑修形出发, 对变位斜齿轮啮合参数进行了解析, 获得了齿面接触、运动与力学参数; 应用离散接触线有限元, 拟赫兹点接触仿真, 解决了齿面边缘接触应力集中的求解问题; 利用经典摩擦磨损计算模型, 快捷求解了齿面瞬时接触线上的动态磨损系数, 获得了两齿面磨损量三维分布云图。结果表明: 主动轮齿根处磨损量远超齿顶处, 从动轮齿顶处磨损略大于齿根处; 主动轮啮入区磨损变化剧烈, 啮出区磨损均匀, 从动轮啮入区与啮出区磨损量无明显差异; 抛物线修形, 使齿面的磨损向齿宽中部集中, 有利于改善齿面的磨损分布。选用合适的变位系数、修形量能够调整齿面的磨损分布, 延长齿面的精度寿命。为变位、修形多变量耦合斜齿轮磨损计算、减摩设计提供了理论方法。

关 键 词: 拓扑修形; 斜齿轮; 动态磨损系数; 磨损计算; 三维

中图分类号: V231; TH132

文献标志码: A

Ease-off surface topological modification of helical gear tooth surface calculation method of adhesive wear

WANG Yongqiang, WEI Bingyang, XIE Xuekai, LI Jiaqi

(School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: Based on ease-off surface topology, the meshing parameters of modified helical gear were analyzed, and the tooth contact, motion and mechanical parameters of gear surface were obtained. The discrete contact line finite element method simulating the point contact of Quasi Hertz was used, and the problem of stress concentration in instantaneous contact zone of tooth surface boundary was solved; using the classical friction and wear model, the dynamic wear coefficient on the instantaneous contact line of tooth surface was solved quickly. The 3D distribution nephogram wear of two tooth surfaces was obtained. The results showed that the wear at the root of the pinion gear was far greater than that at the tip, and the wear at the top of the gear was slightly greater than that at the root of the tooth. Engaging-in of the pinion wore a lot, while the engaging-out wore uniformly. The wear change of the gear in the meshing area was not obvious. Parabolic modification made the wear of tooth surface concentrated to the middle part of tooth width, helping to improve the wear distribution of tooth surface. The wear distribution of the tooth surface can be adjusted and the precision life of the tooth surface can be prolonged by selecting appropriate modification coefficient and modification quantity. It could provide a theoretical method for wear calculation and friction reduction design of modified and multivariable coupling helical gear conditions such as displacement modification.

收稿日期: 2021-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(51875174)

作者简介: 王永强(1987—), 男, 讲师, 博士生, 主要从事摆线针轮、谐波齿轮减速器摩擦学计算及仿真分析方面的研究。

引用格式: 王永强, 魏冰阳, 谢学凯, 等. Ease-off 拓扑修形斜齿轮齿面黏着磨损计算方法[J]. 航空动力学报, 2023, 38(12): 2982-2990. WANG Yongqiang, WEI Bingyang, XIE Xuekai, et al. Ease-off surface topological modification of helical gear tooth surface calculation method of adhesive wear[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(12): 2982-2990.

Keywords: topology modification; helical gear; dynamic wear coefficient; wear calculation; 3D

齿轮的摩擦磨损贯穿齿轮的全生命周期, 磨损不仅改变齿面形貌和载荷分布, 还会增大传动误差、降低传动精度, 引起振动与噪声, 更严重的将诱发或加速齿轮失效^[1-2]。

考虑两齿轮摩擦副的硬度近似相等, 所以在研究齿轮磨损时, 以黏着磨损为主。磨损计算公式以 Archard 模型使用最广^[3]。Flodin 等提出了单点观测法, 计算了渐开线直齿轮、斜齿轮的磨损^[4-5]。Flodin 等采用切片法, 计算了斜齿轮的磨损^[6]。文献 [7] 考虑油膜厚度对齿廓线上磨损的影响, 提出了磨损系数的近似解模型。文献 [8] 通过实验确定了不同条件下的磨损系数, 给出了估算 Archard 磨损系数的回归公式。文献 [9] 考虑了动态磨损系数, 计算了直齿轮的磨损分布。文献 [10] 提出了热-弹-流磨损分析模型, 预测并验证了其齿面磨损率。何荣国等分析了温度对磨损的影响^[11]。刘先增等综合运用 Hertz 接触理论和 Archard 磨损公式, 建立了渐开线斜齿轮齿面磨损模型, 并进行了数值仿真^[12]。周长江等采用反向圆锥滚子等效接触模型并结合 Archard 磨损计算式, 给出了标准斜齿轮齿面磨损的计算方法^[13]。

文献 [14] 基于 ease-off 拓扑, 采用二次修形解决了弧齿锥齿轮高阶传动误差拓扑分析的问题。文献 [15] 利用鼓形修形解决了直齿锥齿轮安装误差敏感性设计与预控的问题。文献 [16] 基于 ease-off 差曲面分析, 给出了曲面综合弧齿锥齿轮加工参数计算方法。文献 [17] 求解了齿面瞬时接触线上的油膜厚度、摩擦因数, 获得了齿面摩擦功耗分布规律与变化历程。文献 [18-19] 基于 ease-off 拓扑修形, 进行了准双曲面齿轮的减摩抗磨设计, 同时以磨损最小为优化目标, 进行了直齿锥齿轮的 ease-off 拓扑设计。上述研究针对标准直齿、斜齿轮磨损计算居多, 且在磨损计算时把磨损系数作为定值, 没有考虑变位与修形的影响, 与实际传动不符。

为此, 本文从 ease-off 拓扑修形出发, 利用拟赫兹点接触求解, 解决了修形后点接触齿面载荷分布、动态磨损系数计算问题, 给出了从 ease-off 曲面修形分析到全齿面磨损分布的完整计算流程, 为点接触齿面的磨损计算提供了便

利的手段。

1 啮合曲面之间的映射

假设一平面齿条 Σ_0 与齿面相切, 则该齿条面可作为齿面映射平面(图 1), 构建坐标系为 $p-(u, v, w)$ 的 ease-off 曲面。直廓齿条产成标准渐开线齿面 Σ_s , 拓扑修形齿面 Σ_i 采用二阶抛物面产成实现。 Σ_s 、 Σ_i 两者之差 $\delta(u, v)$ 形成了 ease-off 曲面(图 2)。

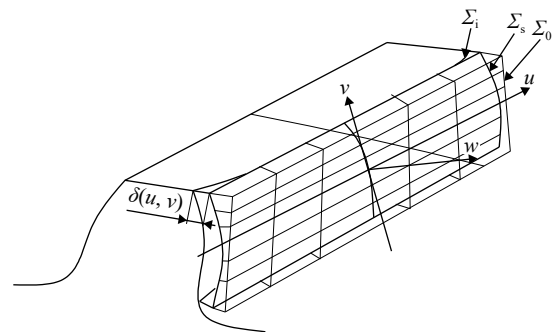


图 1 齿面坐标映射

Fig. 1 Coordinate mapping of tooth surface

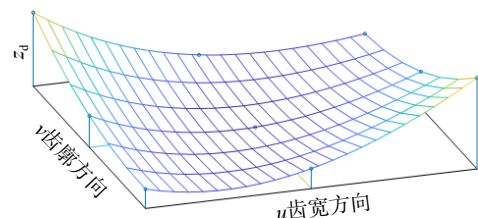


图 2 Ease-off 曲面

Fig. 2 Ease-off surface

现以 u 、 v 为参数构建齿条面方程:

$$w(u, v) = a_0 + a_1 u^2 + a_2 uv + a_3 v^2 \quad (1)$$

该式表示抛物面, 式中 a_1 控制齿廓修形; a_2 控制扭转修形; a_3 控制齿向修形。

以齿条平面 Σ_0 为公切平面做映射, 得到主动轮拓扑修形的差曲面 ease-off(1)、从动轮差曲面 ease-off(2), 两者差曲面的代数和, 为主动轮相对从动轮共轭啮合的差曲面 ease-off(图 3)。在图 3 中, u 代表齿宽方向, v 代表齿廓方向, z_d 为两轮 ease-off 曲面上的离差, 由 ease-off 曲面可得到齿面接触点的曲率参数^[13], 为赫兹接触、滑移比、摩擦磨损计算提供几何数据。

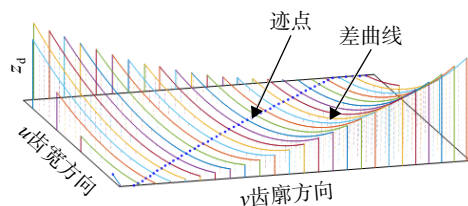


图 3 差曲面 ease-off

Fig. 3 Ease-off for gear surface

2 参数计算

2.1 曲率参数

齿面每一啮合位置都对应 ease-off 曲面上一条差曲线 $s_i(u_i, v_i, z_{di})$, 如图 2 所示。差曲线反映了两齿轮齿面经抛物线修形后由线接触转变为点接触的特征, 其曲率数值决定了齿面瞬时接触椭圆长轴的大小和方向。

与差曲线垂直方向为瞬时接触椭圆短轴方向, 其数值为啮合接触点的等效曲率半径, 由微分几何曲率计算公式得到:

$$\frac{1}{R_{bj}} = \sum_{i=p,g} \frac{LT_b^2 + 2MT_b + N}{ET_b^2 + 2FT_b + G} \quad (2)$$

式中 T_{bj} 为相应方向的 du/dv 比值, L 、 M 、 N 、 E 、 F 、 G 为微分几何第一、第二基本量, R_{bj} 为接触单元的法向差曲率半径。

2.2 滑移比计算

对于渐开线齿轮副, 其啮合点的滑动系数可直接用齿廓几何尺寸得到。如图 4 所示, 当齿轮 1 绕 O_1 转过角度 $d\varphi_1$ 时, 齿轮 2 绕 O_2 转过角度

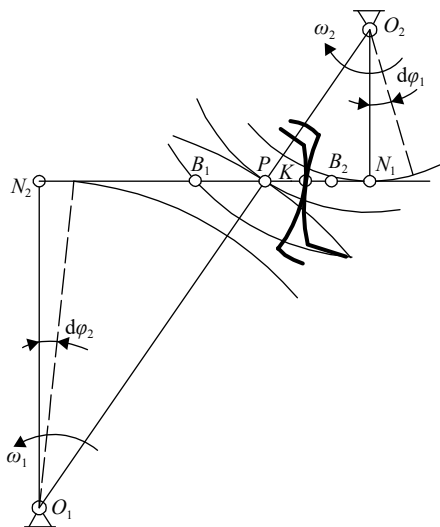


图 4 主动轮和从动轮滑移比计算

Fig. 4 Calculation of driving wheel and slave wheel slip ratio

$d\varphi_2 = d\varphi_1/i_{12}$, 其中 N_1 、 N_2 为两齿轮啮合时的理论啮合极限位置, B_1 、 B_2 为两齿轮实际啮合时的啮入与啮出点, K 为瞬时啮合点, 设 ρ_1 (即 N_1K) 和 ρ_2 (即 N_2K) 为两轮齿廓啮合点处的曲率半径, 则滑移比为

$$\mu_1 = \frac{ds_1 - ds_2}{ds_1} = 1 - \frac{\rho_2 d\varphi_2}{\rho_1 d\varphi_1} = 1 - i_{21} \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (3)$$

式(3)为标准渐开线直齿轮滑移比的计算公式, 需要计算瞬时接触位置两齿廓的接触曲率半径, 计算较麻烦, 且无法应用于修形斜齿轮。齿面修形后, N_1N_2 不再是直线, 两齿面的滑移比将发生变化, 为此采用一种更通用的方法, 通过空间啮合运动速度直接计算滑移比。

主动轮与从动轮旋转速度为

$$V_1 = \omega_1 \times r_1 \quad V_2 = \omega_2 \times r_2 \quad (4)$$

其中下标 1、2 分别表示主动轮和从动轮。在图 5 中, K 点为两齿轮的瞬时啮合点, V_1 、 V_2 为两齿轮在啮合点的速度, V_1 、 V_2 可以分别分解为法向速度 V_t 及切向速度 u_1 、 u_2 , V_s 为两轮在切向的相对速度, 在法平面内, 啮合点的运动速度矢量如图 5 所示。

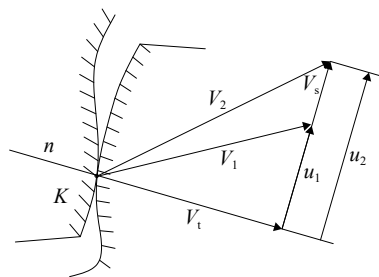


图 5 啮合点的运动矢量图

Fig. 5 Motion vector diagram of meshing point

接触点的滑动速度为

$$v_s = |u_1 - u_2| \quad (5)$$

其中 $V_t = n \cdot |V_1| = n \cdot |V_2|$, $u_1 = V_1 - V_t$, $u_2 = V_2 - V_t$ 。

滑移比

$$\mu_1 = \frac{u_1 - u_2}{u_1} \quad \mu'_2 = \frac{u_1 - u_2}{u_2} \quad (6)$$

因齿轮 1 与齿轮 2 的齿廓参与啮合的次数不同, 所以在连续运转过程中, 大齿轮齿廓的滑动系数应修正为

$$\mu_2 = i_{21} \mu'_2 = i_{21} \cdot \frac{u_1 - u_2}{u_2} \quad (7)$$

滑动系数的绝对值是表征相对磨损程度的指

标之一,其正负号表示滑动的方向。

2.3 点接触齿面的载荷应力计算

点接触齿面受载,瞬时接触区存在图 6 所示的 3 种情况,除了中间图 6(a)瞬时接触椭圆完整外,图 6(b)与图 6(c)瞬时接触椭圆会出现一端畸变或两端畸变,即在齿面边缘出现了应力集中。为解决上述问题,把接触区离散为有限个线接触单元^[20],用微小单元拟合逼近瞬时接触区,如图 7 所示。基于 ease-off 拓扑结构,任意接触区等效为圆柱体同平面的接触。假设每个离散单元的长度都为 Δl ,每一单元按均布载荷计算

$$q_j = f_j / \Delta l \quad (8)$$

赫兹接触半宽(单位: mm)

$$a_H = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{bj} \cdot R_{bj}}{\pi \cdot E_q}} \quad (9)$$

式中 F_{bj} 为啮合点正压力, E_q 为啮合点等效弹性模量。

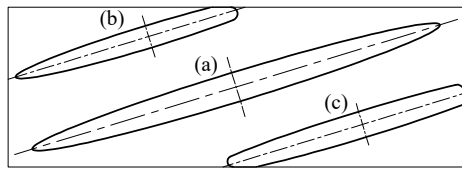


图 6 瞬时接触形变区假设

Fig. 6 Instantaneous contact deformation region hypothesis

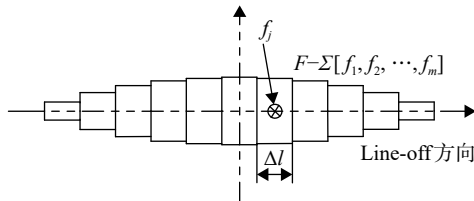


图 7 离散单元接触模型

Fig. 7 Discrete element contact model

应力沿接触区宽度 y 方向上的分布(单位: MPa)

$$p_y = 182.38 \sqrt{\frac{q_j}{R_{bj}}} \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{a_H^2}} \quad (10)$$

通过拟赫兹点接触分析能模拟齿面任意瞬时接触状况,解决啮合边界应力集中求解的难题。通过上述模型求解,可得到啮合齿面任意点的应力与赫兹接触半宽,为滑移距离与磨损计算提供力学参数。

3 黏着磨损计算模型

3.1 Archard 黏着计算模型

Archard 最早提出黏着磨损计算模型^[3],其计

算公式为

$$\frac{V}{s} = \frac{k}{3} \cdot \frac{W}{H} \quad (11)$$

式中 V 是磨损体积; s 为相对滑移距离; k 为量纲为一的磨损系数; H 为接触表面较软材料硬度,具体到齿轮传动,一般为大轮的齿面硬度; W 为接触表面法向载荷。

Flodin 等^[4-6]通过计算接触齿面离散点的磨损深度来拟合逼近齿面的磨损分布,该方法假定离散点在一个啮合周期内接触压力与滑移距离保持不变,并给出磨损计算公式为

$$h_{p,n} = h_{p,n-1} + k_0 \cdot p_{p,n} \cdot s_p \quad (12)$$

式中 $h_{p,n}$ 为 p 点第 n 次的磨损量, $h_{p,n-1}$ 为 p 点第 $n-1$ 次的磨损量, k_0 为有量纲的磨损系数, $p_{p,n}$ 为 p 点的赫兹接触压力, s_p 为 p 点的滑移距离。

本文着重研究动态磨损系数、时变接触压力、瞬变滑移距离计算齿轮磨损深度,考虑了变位与修形条件下,齿轮接触表面磨损深度的分布,为斜齿轮的减摩抗磨设计提供理论依据。

3.2 动态磨损系数 k_0

动态磨损系数 k_0 受啮合副材料、接触面表面粗糙度、润滑条件和运行工况等因素影响。在计算磨损深度时,把 k_0 作为定值显然是不合适的,为此 Priest 和 Taylor^[7] 提出了一种磨损系数的近似解模型,但该模型在计算磨损系数时,需要给定初始值,这给磨损系数的求解带来了困难,而 Janakiraman 等^[8] 通过实验,对影响磨损系数的因素进行统计分析,得到了如下回归公式

$$k_0 = \frac{3.981 \times 10^{29}}{E_q} L_1^{1.219} G_1^{-7.377} S_1^{1.589} \quad (13)$$

式中 L_1 、 G_1 、 S_1 分别为量纲-载荷、量纲-润滑压力-黏度系数和等效复合表面粗糙度,其中

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{q_j}{E_q R_{bj}} & G_1 &= \alpha E_q & S_1 &= \frac{R_\alpha^c}{R_{bj}} \\ \frac{1}{E_q} &= \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} & R_\alpha^c &= \sqrt{R_{\alpha 1} + R_{\alpha 2}} \end{aligned} \quad (14)$$

据此,可计算出接触齿面上每一点的瞬时磨损系数。

3.3 滑移距离

主从动轮齿廓上点 K (图 5) 的滑移距离 s_1 和 s_2 由下式计算

$$\begin{cases} s_1 = 2a_H \cdot |\mu_1| \\ s_2 = 2a_H \cdot |\mu_2| \end{cases} \quad (15)$$

式中 s_1 为齿轮 1 的滑移距离, s_2 为齿轮 2 的滑移距离, μ_1 为齿轮 1 的滑移系数, μ_2 为齿轮 2 的滑移系数。

3.4 齿面磨损量计算

利用式(10)、式(13)、式(15), 可求得主、从动轮在一个啮合周期内任意啮合位置磨损量

$$\Delta h_{1,2} = k_0 \cdot p_y \cdot s_{1,2} \quad (16)$$

若齿面累积磨损量较小, 齿面形貌及载荷几乎保持不变。为此设置磨损阈值, 当齿面累积磨损超过该阈值时, 就重构齿廓, 获得磨损后的几何参数与压力分布, 重新计算有关参数, 进行下一次迭代求解。直到总的累积磨损量达到磨损失效值(单侧齿廓的磨损量不应超过齿厚的 5%^[21]), 迭代结束。

齿面磨损的计算过程如图 8 所示。

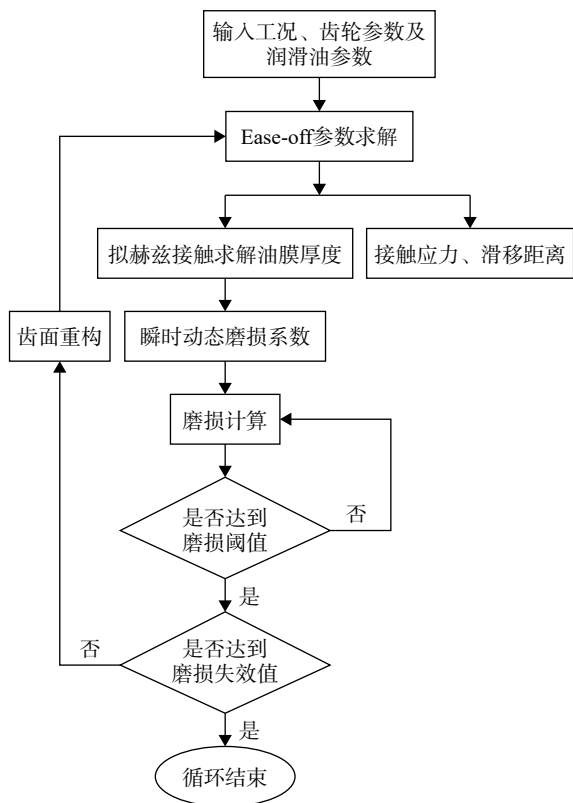


图 8 齿面累积磨损计算流程图

Fig. 8 Calculation flow chart of cumulative wear on tooth surface

4 仿真结果与分析

以表 1 中斜齿轮副的数据为准, 以上文推导的斜齿轮磨损计算模型为基础, 利用 MATLAB 软件进行数值仿真, 得到如下结果。

表 1 斜齿轮副基本参数

Table 1 Basic parameters of helical gear pair

基本参数	数值
传动比 i_{12}	29/21
齿宽 B/mm	80
模数 m_n/mm	5
泊松比 ν	0.3
压力角 $\alpha_n/^\circ$	20
表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	0.2
润滑油压黏系数 $\alpha_0/10^{-8} (\text{m}^2/\text{N})$	1.39
顶隙系数 c^*	0.25
齿顶高系数 h_a^*	1
螺旋角 $\beta/^\circ$	13
变位系数 x_1	0.1
变位系数 x_2	-0.098
转速 $n/(\text{r}/\text{min})$	3 000
弹性模量 E/GPa	209

4.1 动态磨损系数

从图 9 磨损系数分布规律可知, 磨损系数在齿廓方向上呈增大趋势, 在齿宽方向上呈现先增大后减小趋势, 且在齿宽中部取得最大值。从式(13)可知, 磨损系数随着载荷及等效表面粗糙度的增大而增大, 参数 G_1 影响最大, 但在具体的齿轮传动中, 润滑油参数及材料选定后, 参数 G_1 为定值, 此时, 磨损系数主要取决于等效曲率半径, 由于主动轮齿根与从动轮齿顶处接触时等效曲率半径最小, 所以该处磨损系数最大。

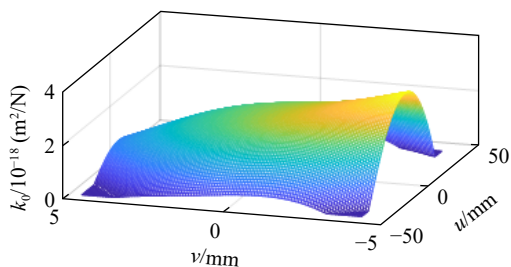


图 9 回归公式磨损系数分布

Fig. 9 Regression formula wear coefficient distribution

4.2 赫兹接触应力与接触半宽

从图 10 可知, 在整个啮合齿面上, 接触应力与接触半宽呈现相同规律。沿齿廓方向上先增大后减小, 沿齿宽方向上呈现同样规律。抛物线修形使得接触应力与接触半宽在齿宽中部附近取得最大值, 主动轮正变位, 使得接触应力与接触半宽在节圆靠近齿顶处取得最大值, 从动轮负变位

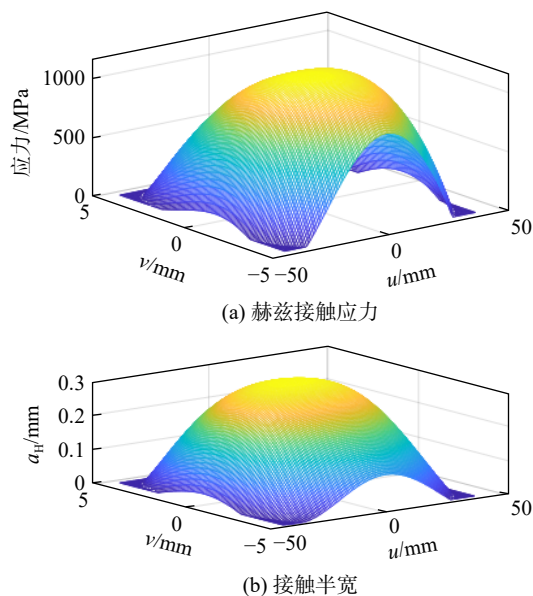


图 10 赫兹接触应力与接触半宽

Fig. 10 Hertz contact stress and contact half width

使得其在节圆靠近齿根处取得最大值。

4.3 滑移比与滑移距离

从图 11 可知,两齿轮滑移比从齿顶到齿根先减小后增大,且齿根处滑移比大于齿顶处滑移比,在节圆处最小,因为在节圆处为纯滚动,无相对滑移。两齿轮滑移比沿齿宽方向无明显变化。

由图 12 可知,两齿轮的滑移距离从齿顶到齿

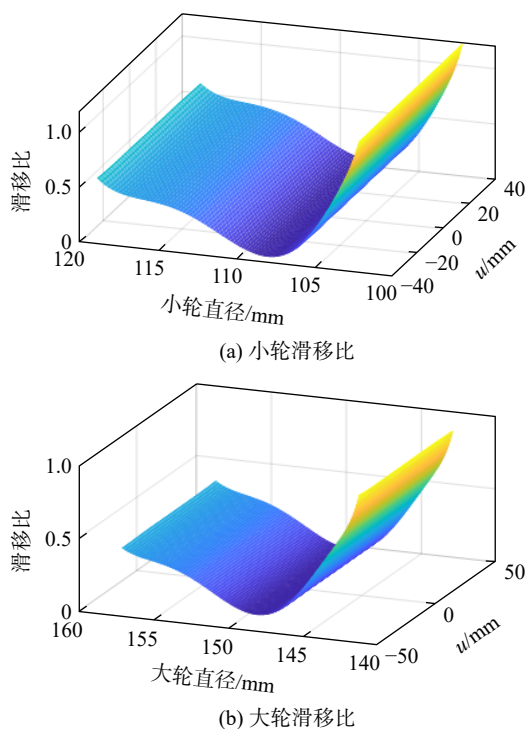


图 11 两齿轮滑移比

Fig. 11 Slip ratio of two gears

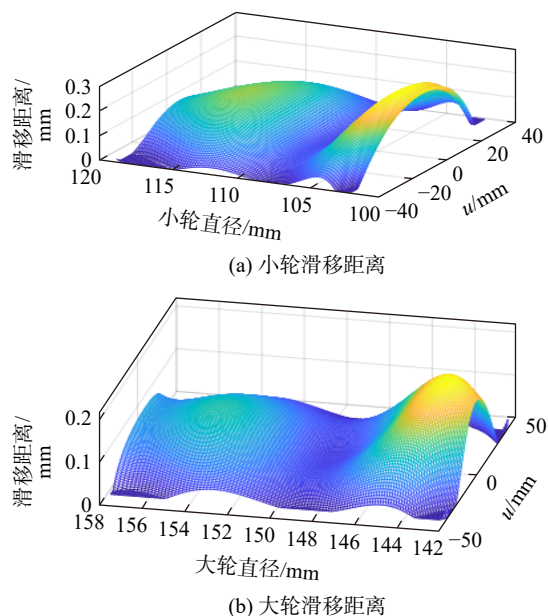


图 12 两齿轮滑移距离

Fig. 12 Slip distance of two gears

根,总体上呈现先减小后增大的趋势,在节圆处滑移距离最小,在齿根圆附近,滑移距离最大。由于接触半宽沿齿宽方向上呈现先增大后减小的趋势,两齿轮滑移距离沿齿宽方向呈现同样的规律。

4.4 磨损深度

本文计算了主动轮旋转 3.0×10^6 次,两齿轮磨损分布云图(见图 13)。由图 13(a)可知,主动轮磨损深度沿齿宽方向呈现先增大后减小趋势,且抛物线修形导致接触应力与磨损系数在齿宽中部

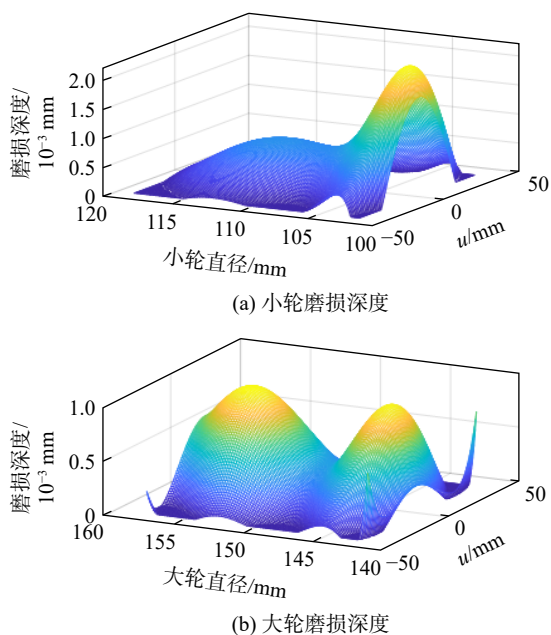


图 13 两齿轮磨损深度

Fig. 13 Wear depth of two gears

取得最大值,耦合作用使得齿宽中部,磨损量最大。沿齿廓方向磨损量先减小后增大,齿根处磨损量最大,齿顶次之,节圆处磨损最小,趋近于 $0\ \mu\text{m}$ 。主动轮啮入区磨损较大,磨损梯度大,啮出区磨损较均匀,使得啮合齿面靠近齿根处局部磨损剧烈,大大降低系统精度寿命。

由图 13(b)可知,从动轮磨损云图呈现马鞍形,啮入区与啮出区,磨损无明显变化;由于从动轮滑移距离在齿根处取得最大值,而磨损系数却在齿顶处取得最大值,综合影响使得齿顶处磨损略大于齿根处磨损,这与文献 [13] 结果不相符,究其原因在于其在计算磨损时,把磨损系数作为定值,显然本文更符合工程实际。从动轮在接触区边界出现了边缘接触,导致边缘翘曲,故其磨损也呈现同样的规律,导致接触区边界磨损迅速增大,严重影响啮合副精度寿命。

4.5 不同参数下的磨损

为了分析不同参数对啮合副磨损的影响,本文分别计算了不同变位系数、不同扭矩及不同传动比下两齿轮的磨损分布。

在图 14 中, x_1 、 x_2 分别代表齿轮 1 和齿轮 2 的变位系数,从图 14 可知,随着主动轮变位系数的增大,主动轮啮入区的磨损量呈下降趋势,啮出区的磨损量呈上升趋势,且啮合区向着齿顶方向偏移,使其磨损趋于均匀,有利于延长主动轮

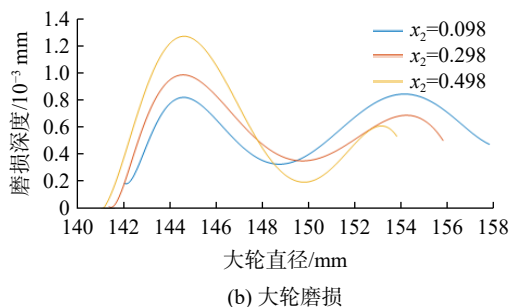
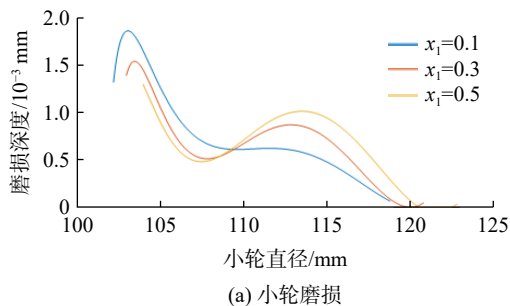


图 14 不同变位系数两齿轮磨损分布

Fig. 14 Wear distribution of two gears with different modification

的磨损寿命。而从动轮随着变位系数的减小同样使得其啮入区磨损下降,啮出区磨损增大,啮合区向齿根方向偏移。故选用合适的变位系数能降低局部磨损量,改善啮合齿面磨损梯度,使得两轮趋于均匀磨损,延长系统精度寿命。

在图 15 中, T 代表齿轮 1 和齿轮 2 啮合传动时受到的扭矩,从图 15 可知,随着扭矩的增大,两齿轮的磨损量均增大,且在啮合区两端磨损梯度大。

在图 16、图 17 中, i_{12} 为齿轮 1 和齿轮 2 啮合传动时的传动比,从图 16、图 17 可知,随着传动比的增大,两齿轮磨损深度均减小;主动轮磨损量减少,是由等效曲率半径增大,磨损系数减小造成的,而从动轮磨损量较少,主要是滑移距离减少造成的。

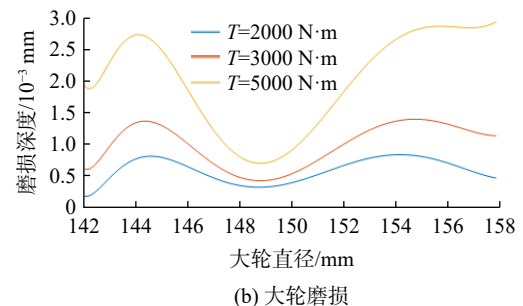
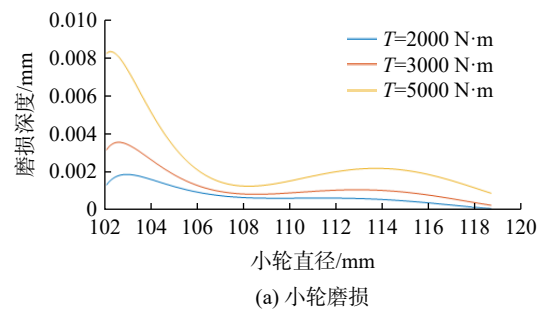


图 15 不同扭矩两齿轮磨损分布

Fig. 15 Wear distribution of two gears with different torques

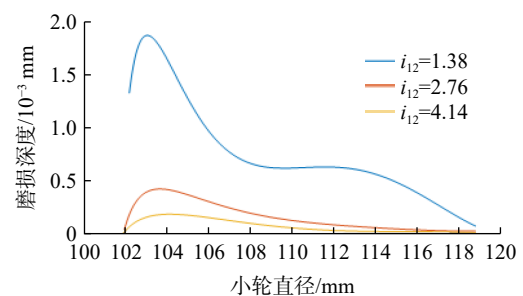


图 16 不同传动比小齿轮磨损分布

Fig. 16 Wear distribution of pinion with different transmission ratio

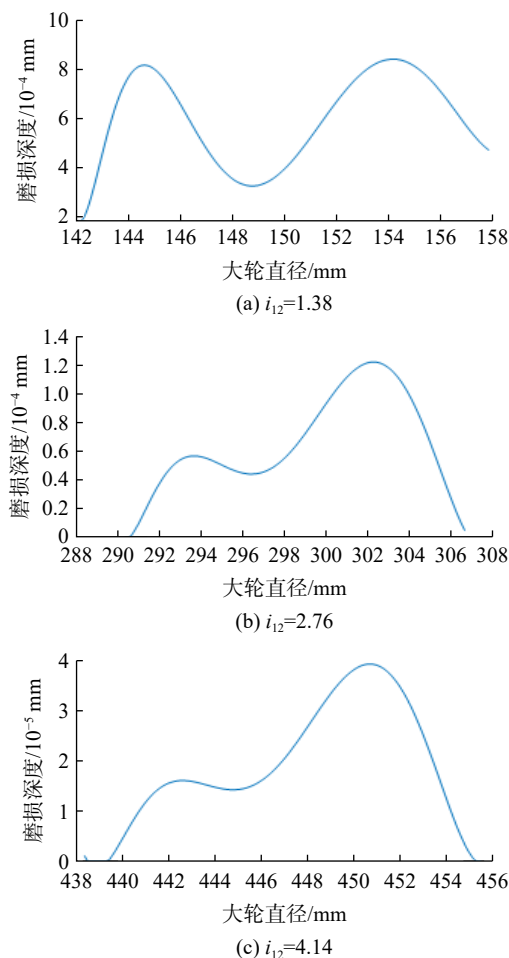


图 17 不同传动比大齿轮磨损分布

Fig. 17 Wear distribution of gear with different transmission ratio

5 结 论

本文建立了点接触齿面磨损计算模型,给出了 ease-off 曲面修形分析到全齿面磨损分布的完整计算流程,主要结论如下:

1) 通过离散接触线单元,给出了拟赫兹点接触应力求解方法,解决了齿面边界瞬时接触区求解问题,基于回归公式瞬时解,给出了啮合齿面动态磨损系数的分布规律。

2) 齿面黏着磨损计算结果表明,两齿轮齿根与齿顶处磨损较大,主动轮齿根处磨损大于齿顶处磨损,而从动轮恰好相反,节圆处磨损趋近于 0;主动轮啮入区磨损变化剧烈,啮出区磨损均匀,从动轮啮入区与啮出区无明显变化。

3) 抛物线修形使得两齿轮齿面磨损向齿宽中部集中,主动轮最大磨损量集中在齿根中部附近,从动轮最大磨损量集中在齿顶中部附近。

4) 采用合适的变位系数有利于改善齿面的

磨损性能,使啮合副面磨损趋于均匀,延长齿面的精度寿命。

本文基于 ease-off 拓扑修形方法,计算了变位、修形状态下斜齿轮啮合齿面上的磨损分布,为后续高性能齿面拓扑设计奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] DING H. Dynamic wear models for gear systems [D]. Columbus, US: The Ohio State University, 2007.
- [2] BRANDÃO J A, MARTINS R, SEABRA J H O, et al. An approach to the simulation of concurrent gear micropitting and mild wear[J]. *Wear*, 2015, 324/325: 64-73.
- [3] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24(8): 981-988.
- [4] FLODIN A, ANDERSSON S. Simulation of mild wear in spur gears [J]. *Wear*, 1997, 207(1/2): 16-23.
- [5] FLODIN A, ANDERSSON S. Simulation of mild wear in helical gears[J]. *Wear*, 2000, 241(2): 123-128.
- [6] FLODIN A, ANDERSSON S. A simplified model for wear prediction in helical gears[J]. *Wear*, 2001, 249(3/4): 285-292.
- [7] PRIEST M, TAYLOR C M. Automobile engine tribology—approaching the surface[J]. *Wear*, 2000, 241(2): 193-203.
- [8] JANAKIRAMAN V, LI S, KAHRAMAN A. An investigation of the impacts of contact parameters on wear coefficient[J]. *Journal of Tribology*, 2014, 136(3): 031602.
- [9] 王晓笋, 巫世晶, 陈杰, 等. 考虑动载荷与动态磨损系数的直齿轮传动系统动态磨损特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(2): 408-413.
WANG Xiaosun, WU Shijing, CHEN Jie, et al. Dynamic surface wear characteristics in spur gear transmission system with dynamic loads and wear coefficients[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(2): 408-413. (in Chinese)
- [10] 张建阁, 刘少军, 方特. 混合润滑下齿面磨损预测研究及试验验证[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(2): 22-30.
ZHANG Jiange, LIU Shaojun, FANG Te. Prediction of gear wear rate in mixed lubrication and experimental verification[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(2): 22-30. (in Chinese)
- [11] 何荣国, 江亲瑜, 姚一富. 渐开线斜齿圆柱齿轮磨损的数值仿真[J]. *润滑与密封*, 2007, 32(3): 88-91, 130.
HE Rongguo, JIANG Qinyu, YAO Yifu. Numerical simulation of tooth wearing for involute helical cylindrical gears[J]. *Lubrication Engineering*, 2007, 32(3): 88-91, 130. (in Chinese)
- [12] 刘先增, 鲁庆, 张鹏, 等. 斜齿圆柱齿轮齿面磨损建模与数值分析[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2015, 32(2): 147-151.
LIU Xianzeng, LU Qing, ZHANG Peng, et al. Modeling and numerical simulation of surface wear for helical gears[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2015, 32(2): 147-151. (in Chinese)
- [13] 周长江, 雷玉英, 汪红兵, 等. 准静态与动态载荷下斜齿轮齿面粘着磨损计算[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(23): 10-22.
ZHOU Changjiang, LEI Yuying, WANG Hongbing, et al. Adhesive wear models for helical gears under quasi-static and dynamic loads[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(23): 10-22. (in Chinese)

- [14] 曹雪梅, 邓效忠, 聂少武. 基于共轭齿面修正的航空弧齿锥齿轮高阶传动误差齿面拓扑结构设计[J]. 航空动力学报, 2015, 30(1): 195-200.
CAO Xuemei, DENG Xiaozhong, NIE Shaowu. Ease-off flank topography design for aviation spiral bevel gears with higher-order transmission errors by modification of conjugate flank[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(1): 195-200. (in Chinese)
- [15] 曹雪梅, 孙宁, 邓效忠. 直齿锥齿轮低安装误差敏感性设计与实验验证[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 227-232.
CAO Xuemei, SUN Ning, DENG Xiaozhong. Design for straight bevel gear based on low installation error sensitivity and experiment tests[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 227-232. (in Chinese)
- [16] 魏冰阳, 杨建军, 仝昂鑫, 等. 基于等距Ease-off曲面的轮齿啮合仿真分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5): 1259-1265.
WEI Bingyang, YANG Jianjun, TONG Angxin, et al. Tooth meshing simulation and analysis based on isometric mapping Ease-off surface[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1259-1265. (in Chinese)
- [17] 魏冰阳, 王振, 杨建军, 等. Ease-off拓扑修形齿面拟赫兹接触与摩擦特性分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(1): 61-67.
WEI Bingyang, WANG Zhen, YANG Jianjun, et al. Analysis on quasi hertzian contact and friction characteristics of tooth surface modified by ease-off topology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 61-67. (in Chinese)
- [18] 蒋进科, 刘钊, 刘红梅. Ease-off修形准双曲面齿轮齿面动态抗磨设计与分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(19): 155-164.
JIANG Jinke, LIU Zhao, LIU Hongmei. Dynamic anti-wear design and analysis for hypoid gears with ease-off flank modification[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(19): 155-164. (in Chinese)
- [19] 蒋进科, 刘钊, 刘红梅. 齿面磨损最小直齿锥齿轮Ease-off修形设计与分析[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 99-106.
JIANG Jinke, LIU Zhao, LIU Hongmei. Design and analysis for straight bevel gears with ease-off flank modification based on minimal wear[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(6): 99-106. (in Chinese)
- [20] 魏冰阳, 李家琦, 王文胜. 基于差齿面拓扑的轮齿承载拟赫兹接触分析[J]. 中国机械工程, 2021, 32(18): 2174-2180.
WEI Bingyang, LI Jiaqi, WANG Wensheng. Quasi-hertz loaded tooth contact analysis of gears based on ease-off surface topology[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(18): 2174-2180. (in Chinese)
- [21] 徐大伟, 奔霖, 沈伟. 直齿齿轮机构齿面磨损估算[J]. 航天工艺, 2001(6): 4-8.
XU Dawei, BEN Lin, SHEN Wei. Estimation of tooth surface wear of spur gear mechanism[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2001(6): 4-8. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)