

DOI: 10.3901/JME.2022.11.241

换向工况下非对称聚合物齿轮瞬态弹流润滑分析*

左名玉^{1,2} 王优强^{1,2} 菅光霄¹ 胡宇¹ 莫君¹ 房玉鑫¹

(1. 青岛理工大学机械与汽车工程学院 青岛 266520;

2. 青岛理工大学工业流体节能与污染控制教育部重点实验室 青岛 266520)

摘要: 齿轮的换向过程造成齿轮系统工作情况的恶化,不利于齿轮润滑的保持。为探究非对称齿轮在换向工况下的润滑性能,采用多重网格法对非对称聚合物齿轮进行了换向工况下的瞬态弹流润滑分析,比较了非对称齿轮和对称齿轮在换向工况下的弹流润滑特性以及非对称齿轮在正向运行与换向运行情况下的弹流润滑特性,分析了换向过程中不同形式的转速变化以及冲击对非对称聚合物齿轮在换向工况下的瞬态弹流润滑的影响。结果表明,齿轮在换向工况下换向点润滑油膜厚度大幅减小,是齿轮润滑失效的危险点。非对称齿轮能改善换向过程的润滑性能,换向过程中的正弦减速后正弦加速的变速形式对换向工况下的齿轮弹流润滑性能更为有利,冲击会对非对称齿轮换向时的润滑状态造成不利影响。

关键词: 非对称齿轮; 弹流润滑; 多重网格法; 聚合物齿轮; 齿轮换向

中图分类号: TH117

Analysis of Transient Elastohydrodynamic Lubrication of Asymmetric Polymer Gear Under Reversing Condition

ZUO Mingyu^{1,2} WANG Youqiang^{1,2} JIAN Guangxiao¹ HU Yu¹
MO Jun¹ FANG Yuxin¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520;

2. Key Lab of Industrial Fluid Energy Conservation and Pollution Control, Ministry of Education, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520)

Abstract: Reversing of the gear causes the deterioration of the working condition of the gear system and is unfavorable to the maintenance of gear lubrication. In order to explore lubrication performance of asymmetric gear under reversing working conditions, transient elastohydrodynamic lubrication performance of asymmetric polymer gear reversing conditions is analyzed with multiple grid method. The elastohydrodynamic lubrication properties of the asymmetric gear and symmetric gear under the reversing working condition are compared. The elastohydrodynamic lubrication properties of asymmetric gear under the condition of forward and the reversing operation is comparatively analyzed. The effects of different forms of rotational speed change and the impact on transient elastohydrodynamic lubrication performance of asymmetric polymer gear under the working condition of reversing is analyzed. The results show that under the reversing condition, the thickness of lubricating oil film decreases greatly at the reversing point, which is the dangerous point of gear lubrication failure. Asymmetric design of gears can improve the lubrication performance during reversing operation. The sinusoidal deceleration and sinusoidal acceleration in the reversing process is more favorable to the elastohydrodynamic lubrication performance of the gear than other forms of speed variation under the reversing condition. The impact is not conducive to the lubrication of asymmetric gear under reversing condition.

Key words: asymmetric gears; elastohydrodynamic lubrication; multi-grid method; polymer gears; gear reversal

* 山东省重点研发计划(2019GHY112068)和国家自然科学基金(51705270)资助项目。20210528 收到初稿, 20211117 收到修改稿

0 前言

在齿轮箱控制系统中,常通过控制电机反转控制齿轮换向以完成正车与倒车切换的命令。尤其是应急换向,换向过程中转速急剧减小至零并迅速反向增速,造成齿轮系统极大的不稳定。这类恶劣工况对于齿轮的润滑有着极大的考验,因而对齿轮换向工况下的弹流润滑机理进行研究非常必要。

聚合物齿轮由于其质轻节能等优点受到广泛关注,在轻量化设计的前提下逐渐取代金属齿轮应用于汽车、航空等领域,故而聚合物齿轮润滑吸引了大量研究者的注意。张建蓉等^[1]建立了有限元仿真模型,对塑料直齿圆柱齿轮的静态传递误差进行了分析计算。卢泽华等^[2]通过实验研究了塑料齿轮在润滑状态下运行过程中的温度、磨损量与齿面微观形貌。宋开利等^[3]研究了塑料-钢制齿轮啮合的弹流润滑机理,得出塑料作为齿轮材料较钢而言可以改善润滑性能。王发辉^[4]研究了油/水润滑下塑料/钢齿轮副的弹流润滑性能,得到了塑料齿轮由于弹性较大在润滑中不出现二次压力峰的结论。

为提高聚合物齿轮的传动性能与承载能力,采用工作侧压力角增大的非对称齿轮,已有专家学者进行了非对称齿轮的相关研究。PRABHU等^[5]从分担载荷、磨损性能等方面评价了对称与非对称直齿齿轮的性能,证明非对称齿轮可以提高齿轮的耐磨性和接触承载能力;PANDIAN等^[6]对比了对称齿轮与双压力角非对称齿轮的弯曲疲劳强度,得到工作侧采用大压力角能大幅提高齿轮弯曲疲劳寿命的结论。

齿轮故障发生的很大一部分原因是润滑失效,目前已有大量关于齿轮的弹流润滑研究^[7-9],也不乏与齿轮机构等换向往复相关的研究^[10]。王冰清^[11]对液压往复密封的软弹流润滑进行了研究,建立了其等温弹流混合润滑数值分析模型。袁玉鹏等^[12]对低速重载、频繁换向情况下的开式齿轮进行了研究,分析了齿轮齿条传动的润滑状态。徐彩红^[13]、王优强等^[14]对于往复运动的齿轮齿条机构的弹流润滑进行了分析,并对不同的换向工况进行了研究。谢奕浓等^[15]对于轴承不同形式加减速情况下的润滑情况进行了分析,非对称齿轮的换向也必然存在减速和加速过程,因此不同变速形式对润滑的影响还有待探究。

冲击载荷会对齿轮的润滑情况造成影响^[16-17],在换向工况下则应考虑啮入冲击与换向冲击对齿轮

弹流润滑的影响。目前对非对称齿轮在换向工况下的弹流润滑分析还少有研究,本文采用多重网格法对非对称聚合物齿轮进行弹流润滑分析,得到了不同换向工况下非对称聚合物齿轮的弹流润滑特性。

1 数学模型

将两非对称渐开线齿轮的啮合近似简化并建立模型,如图1所示,两齿轮的基圆半径分别为 R_{ba} 和 R_{bb} ,转动角速度分别为 ω_a 和 ω_b ,非对称齿轮的工作侧分度圆压力角 α_d 为 34° ,非工作齿侧的分度圆压力角 α_c 为 20° 。在任意时刻 t ,沿啮合线以速度 $\omega_a R_{ba}$ 做匀速运动得到的啮合点与节点的距离 $s = \omega_a R_{ba} t$ 。

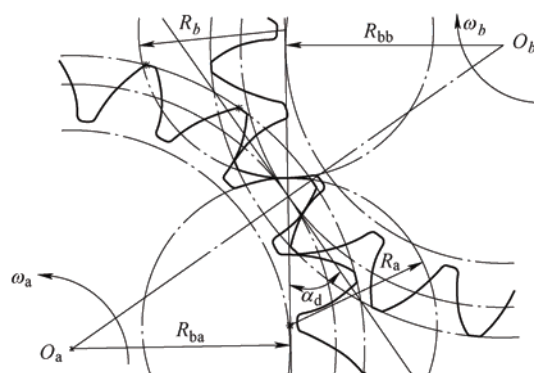


图1 非对称齿轮啮合示意图

两齿廓在任意接触点的曲率半径分别为

$$R_a = R_{ba} \tan \alpha_d + s, \quad R_b = R_{bb} \tan \alpha_d - s \quad (1)$$

啮合点的综合曲率半径为两啮合齿廓的当量曲率半径,表示为

$$R = R_a R_b / (R_a + R_b) \quad (2)$$

齿廓表面的卷吸速度 U 为

$$U = (U_a + U_b) / 2 \quad (3)$$

式中,两表面的线速度分别为 $U_a = \omega_a (R_{ba} \tan \alpha_d + s)$,
 $U_b = \omega_b (R_{bb} \tan \alpha_d - s)$ 。

2 基本方程

在牛顿流体的基础上考虑齿轮弹流润滑的时变效应,齿轮接触表面的弹性变形以及润滑剂黏度、密度随压力的变化。

2.1 考虑时变效应的 Reynolds 方程

考虑时变效应的 Reynolds 方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho h^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right] = 12 \frac{\partial}{\partial x} (\rho U h) + 12 \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) \quad (4)$$

式中, ρ 为流体密度; η 为流体黏度; h 为油膜厚度; p 为压力; x 为坐标变量。

Reynolds 方程的边界条件为

$$\begin{cases} p(x_{\text{in}}, t) = 0 & p(x_{\text{out}}, t) = 0 \\ p(x, t) \geq 0 & x_{\text{in}} < x < x_{\text{out}} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 考虑时变效应的膜厚方程

考虑时变效应的膜厚方程

$$h(x, t) = h_0(t) + \frac{x^2}{2R(t)} - \frac{1}{\pi E'} \int_{x_{\text{in}}}^{x_{\text{out}}} p(x', t) \ln(x - x')^2 dx' \quad (6)$$

式中, $h_0(t)$ 为刚体中心膜厚; $R(t)$ 为综合曲率半径; E' 为两接触表面的综合弹性模量,

$$E' = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right).$$

2.3 载荷方程

在每一瞬时, 分配到轮齿上的瞬时载荷 $w(t)$ 与油膜压力 $p(x, t)$ 的合力相平衡, 载荷方程为

$$\int_{x_{\text{in}}}^{x_{\text{out}}} p(x, t) dx = w(t) \quad (7)$$

2.4 黏度方程

润滑剂的黏度与压力有关, 表示为

$$\eta = \eta_0 \exp\{(\ln \eta_0 + 9.67)[(1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^z - 1]\} \quad (8)$$

式中, η_0 为润滑剂的环境黏度; Z 为黏压系数, $Z = \alpha / [5.1 \times 10^{-9} (\ln \eta_0 + 9.67)]$; α 为黏压系数。

2.5 密度方程

密度方程为

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \frac{(0.6 \times 10^{-9} p)}{(1 + 1.7 \times 10^{-9} p)} \right] \quad (9)$$

式中, ρ_0 为润滑剂的环境密度。

3 数值方法

数值解采用多重网格法计算压力, 多重网格积分法计算膜厚, 网格共计 6 层, 其上节点数从底层网格逐层增加, 分别为 31、61、121、241、481、961 个均布节点。计算域取 $X_{\text{in}} = -4.6$, $X_{\text{out}} = 1.4$, 采用 W 循环, 将 1 个轮齿沿啮合线从啮入到啮出的全过程记为 1 个计算周期, 将 1 个完整的啮入啮出计算周期分为 180 个瞬时, 以啮入的前一瞬间的计算结果作为下一瞬时的计算初值求解, 收敛判据为瞬时压力的相对误差小于 10^{-4} 。

在齿轮机构换向的情况下, 由于齿轮反转, 齿

轮副的啮合方式由单齿啮合变为双齿啮合, 原非工作侧在换向后变为工作侧, 即由原工作侧承担载荷的单齿啮合变为由原非工作侧承担载荷的双齿啮合, 对于所研究的单一轮齿, 其所承担的载荷出现骤降。将所研究的轮齿承担的载荷简化为量纲一化的载荷谱图, 如图 2 所示, R^- 为换向前的瞬时点, R^+ 为换向后的瞬时点。

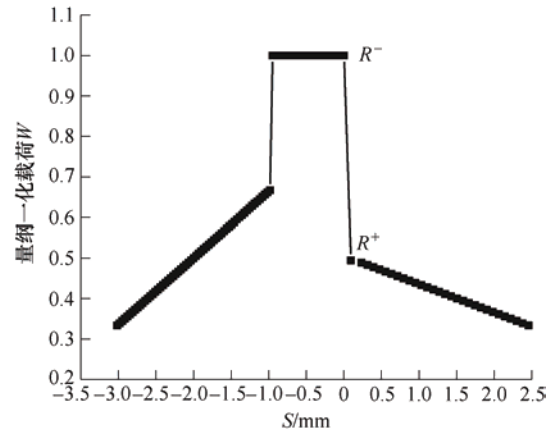


图2 简化载荷谱图

以文中正弦加减速的计算结果为例, 采用Dowson-Higginson 最小膜厚公式来验证结果的可靠性

$$h_{\text{min}} / R = 2.65 \bar{G}^{0.54} \bar{U}^{0.7} \bar{W}^{-0.13} \quad (10)$$

验证结果如图 3 所示。由图 3 可知, 最小膜厚公式计算所得的代表点与本文计算结果对应点的相对误差较小, 验证了本文的计算结果。

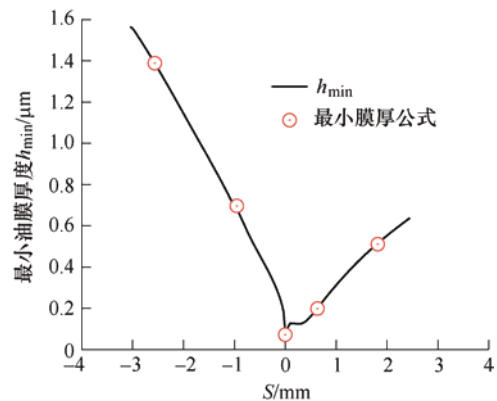


图3 最小油膜厚度验证

4 结果与讨论

以钢-聚醚醚酮齿轮副为例, 探究非对称齿廓的聚合物-金属齿轮副的弹流润滑性能, 非对称齿轮与润滑油的相关参数见表 1。

表 1 润滑剂与齿轮的相关参数

参数	数值
齿轮分度圆压力角 $\alpha_d, \alpha_c / (^\circ)$	34, 20
模数 m / mm	3
齿数 z_1, z_2	25, 25
齿宽 B / mm	20
齿顶高系数 h_a^*	1
顶隙系数 c^*	0.25
弹性模量 $E_1, E_2 / \text{GPa}$	206, 3.66
泊松比 μ_1, μ_2	0.3, 0.33
润滑油的环境黏度 $\eta_0 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.075
润滑油的环境密度 $\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	870
润滑油的黏压系数 $\alpha / (\text{Pa}^{-1})$	2.19×10^{-8}

4.1 非对称齿轮在换向工况下的润滑性能

非对称齿轮工作侧压力角为 34° ，非工作侧压力角为 20° ，如图 4 所示，而对称齿轮的两侧压力角都为 20° 。

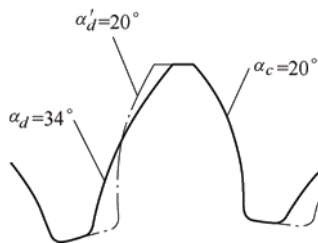


图 4 非对称齿轮与对称齿轮的轮齿齿廓对比

当齿轮换向时，非对称齿轮的工作齿侧由压力角为 34° 的原工作侧变为压力角为 20° 的原非工作侧。换向工况存在先减速后反向加速的过程，这种转速变化的具体形式如图 5 所示。

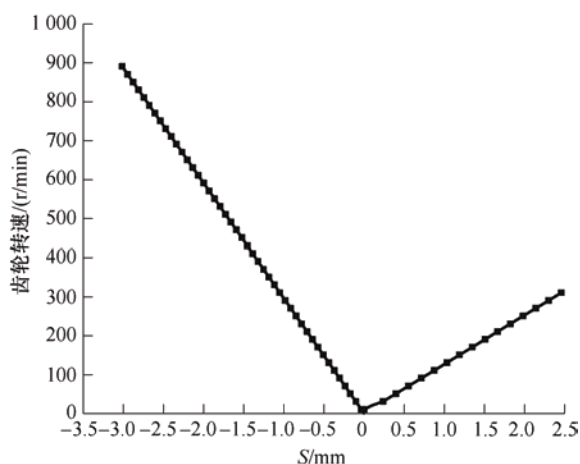
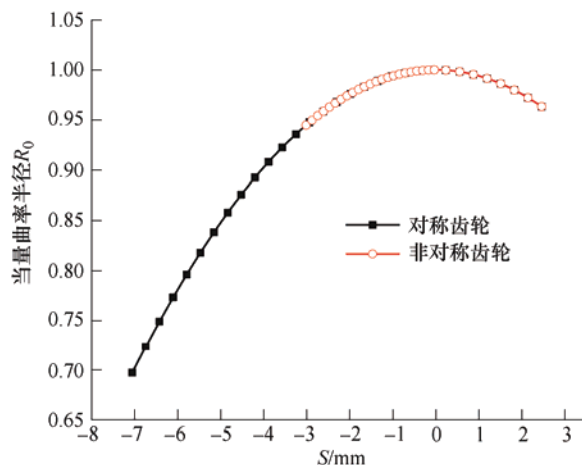


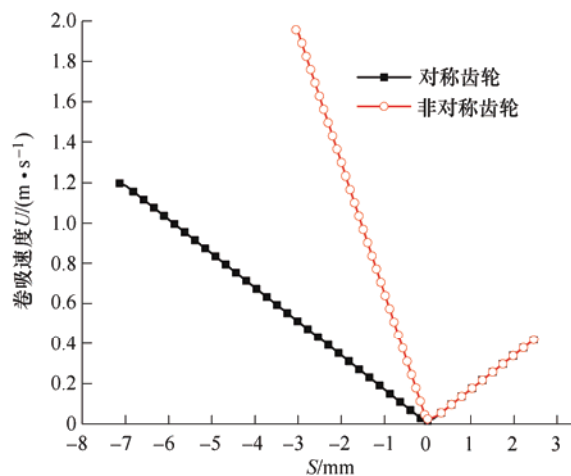
图 5 换向工况的转速变化

在相同的载荷工况及其余齿轮参数相同的情况下，非对称齿轮在齿轮换向转动时的相关润滑参数与对称齿轮的差异如图 6 所示。可以看出，在非对称齿轮换向前工作侧承担载荷的情况下，其油膜压

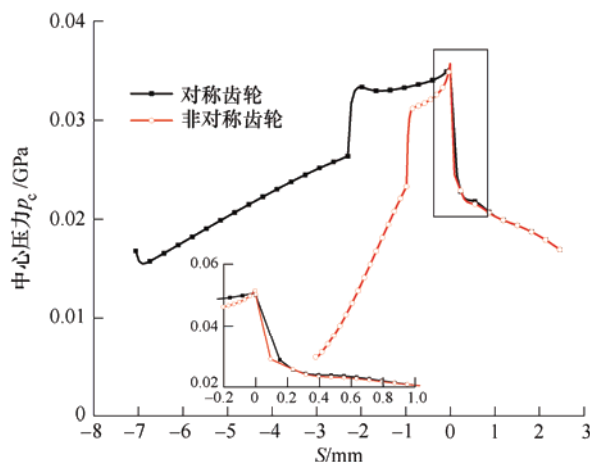
力远小于对称齿轮相同情况下的压力，相应地，非对称齿轮润滑油膜的中心膜厚和最小膜厚也显著大于对称齿轮相同情况下的对应膜厚；而在换向后，用于对比的两齿轮都用原运行情况下的非工作侧承担负载，压力角也同为 20° ，对比两种齿轮的润滑特性可知，非对称齿轮润滑油膜的中心压力小于对称齿轮的，相应地，两种齿轮中心膜厚与最小膜厚的对比也可以看出在换向点附近非对称齿轮的膜厚大于对称齿轮的对应膜厚。



(a) 等效曲率半径沿啮合线的变化



(b) 卷吸速度沿啮合线的变化



(c) 中心压力沿啮合线的变化

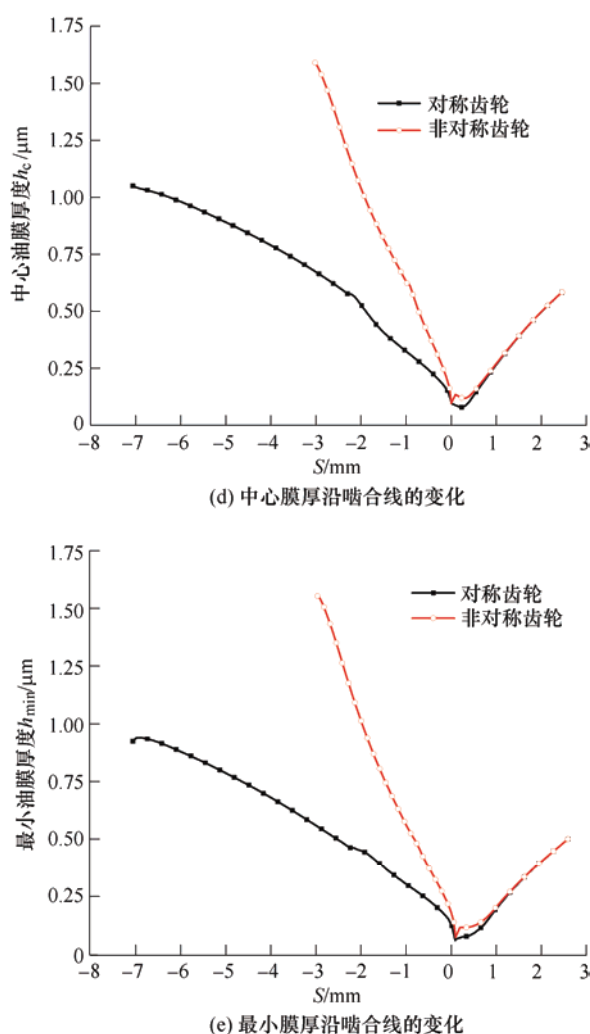


图 6 非对称与对称齿轮相关参数比较

由于换向工况的特点, 齿轮运行至换向点时速度骤减至零, 这对于齿轮的弹流润滑是极为不利的, 加之通过对整个啮合周期的观察, 非对称齿轮在换向点附近的弹流润滑特性优于对称齿轮, 因而对换向点处非对称齿轮与对称齿轮的油膜压力与膜厚在载荷 6000 N/m 的工况下进行单独的对比分析, 结果如图 7 所示。由图 7 中结果可知, 非对称齿轮在换向点处的油膜压力较对称齿轮的低约 $1/4$, 膜厚也显著大于对

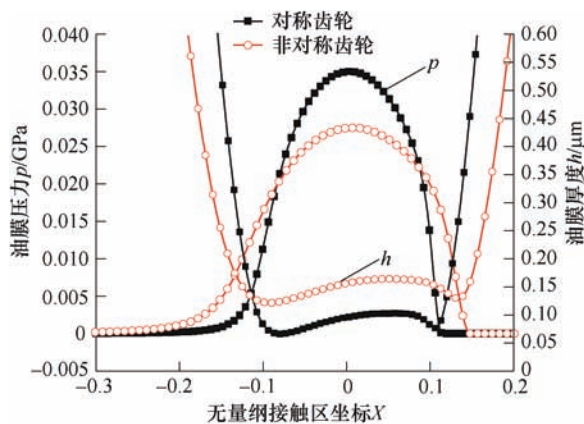


图 7 非对称齿轮换向点的油膜压力与膜厚比较

称齿轮的膜厚, 因而非对称齿轮对于齿轮换向工况下的润滑特性较对称齿轮有明显的改善。

4.2 换向工况对于非对称齿轮润滑的影响

由整个啮合过程的油膜压力及膜厚的变化曲线可知, 换向点附近是齿轮润滑状况最为恶劣的位置, 因而探究换向对于换向点附近的润滑带来的影响是必要的。在各齿轮参数与齿轮负载的载荷相同的情况下, 比较非对称齿轮单向运行与换向工况下换向点的润滑油膜压力与膜厚, 如图 8 所示。

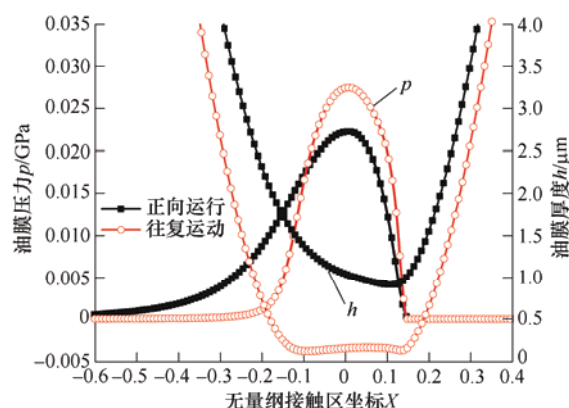


图 8 不同情况下换向点的油膜压力与膜厚比较

可以看出, 相比往复运动的换向点处, 正向运行的齿轮在相同位置的油膜压力较小, 油膜厚度相对较大, 这说明齿轮的换向对于非对称齿轮的弹流润滑是一种考验, 应探究一种合适的换向方式以尽力改善换向过程中的弹流润滑性能。

4.3 换向前后不同形式加减速的润滑情况

由于齿轮运转方向变化, 正向转速逐渐减小至零, 随即转动方向改变, 齿轮反向转速开始逐渐增大, 齿轮换向前后有着不同的加减速形式, 比较不同形式加减速工况对应的齿轮弹流润滑情况。在齿轮副材料等参数不变的情况下, 选取 5 种不同的加减速形式, 分别为线性加减速, 余弦加减速、余弦减速正弦加速、正弦减速余弦加速与正弦加减速, 在一个轮齿啮合周期内提供的转速变化如图 9 所示。转速从 900 r/min 逐

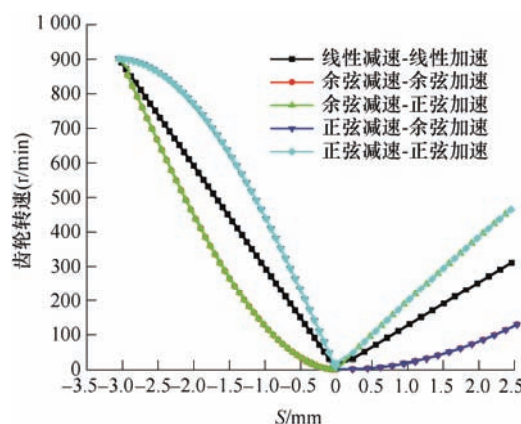
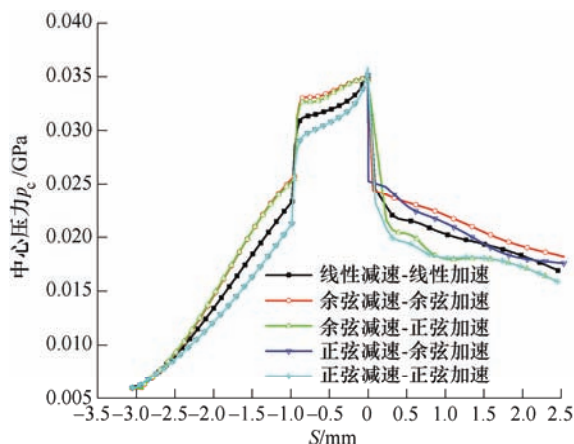


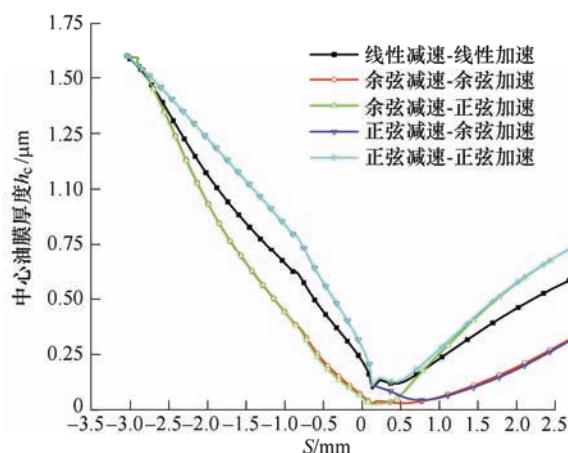
图 9 换向前后的不同加减速形式

渐以线性、余弦或是正弦形式减少至 0，随即以线性、余弦或是正弦形式反向增加。速度变化的形式不同，对于齿轮弹流润滑特性的影响也不同。

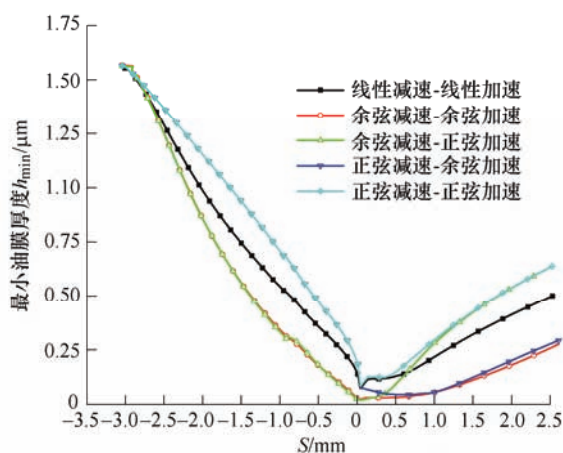
可以看出除线性加减速外，还设有正弦加减速等 4 种速度变化形式，不同的速度设定形式对于非对称齿轮的弹流润滑特性的影响如图 10 所示。换向工况对齿轮的润滑特性有显著影响。比较几种不同的换向工况，换向前以余弦形式减速并于换向后以余弦形式加速时，中心油膜压力最高且中心油膜厚度和最小油膜厚度最小，换向点油膜厚度很小，



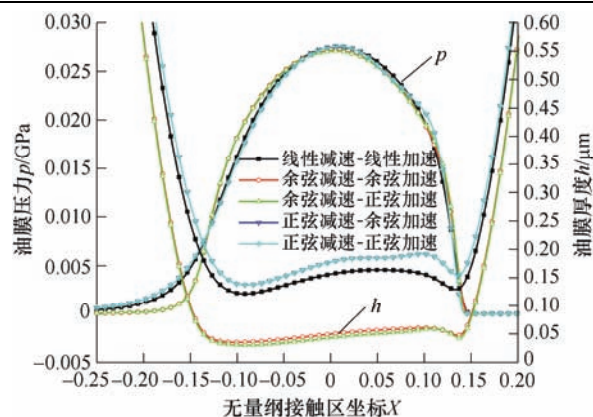
(a) 中心压力沿啮合线的变化



(b) 中心膜厚沿啮合线的变化



(c) 最小膜厚沿啮合线的变化



(d) 换向点的油膜压力与膜厚比较

图 10 不同形式加减速的油膜压力与膜厚比较

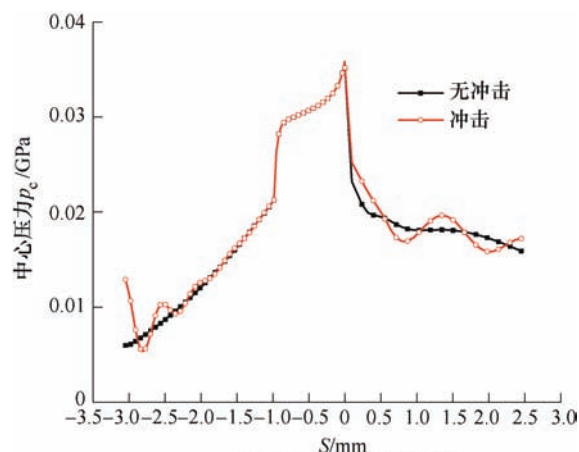
相互啮合的两齿间处于边界润滑状态；换向前以正弦形式减速并于换向后以正弦形式加速时，中心油膜压力最低且最小油膜厚度和中心油膜厚度最大，换向点可以实现较为良好的油膜润滑。因此不同形式的加减速工况下，正弦变速的润滑性能优于余弦变速，综合比较 5 种形式的换向工况，在正弦减速并且换向后以正弦形式加速的工况下非对称齿轮的弹流润滑性能最优。

4.4 换向过程中冲击的影响

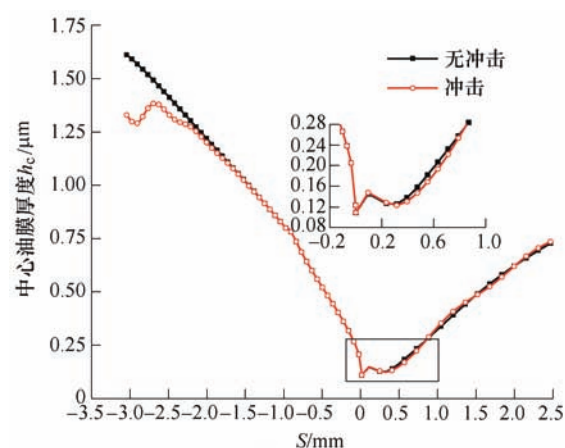
考虑齿轮的制造误差等因素，齿轮在啮入与换向时会产生啮入冲击与换向冲击，因此本部分探究冲击载荷对非对称聚合物齿轮润滑特性的影响。用指数余弦函数模拟非对称齿轮在换向工况下受到的啮入冲击与换齿冲击载荷^[16, 18]

$$\begin{cases} w_1(t) = -0.18e^{-0.08t} \sin(5.84t - 1.6) \\ w_2(t) = 0.3e^{-0.015t} \sin(5.84t - 1.6) \end{cases} \quad (11)$$

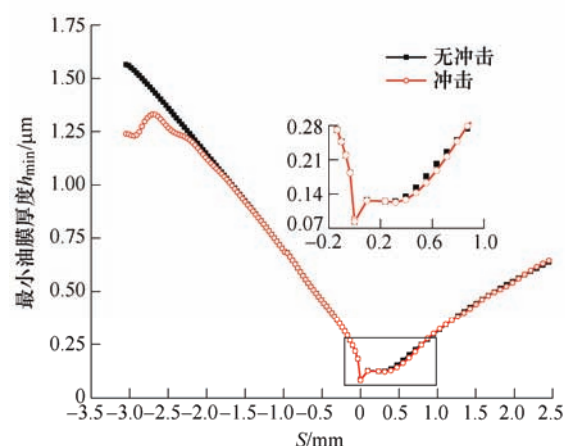
在冲击载荷作用下，非对称齿轮的润滑油膜压力和膜厚情况如图 11 所示。与不考虑冲击的情况相比，在齿轮副刚进入啮合时，由于冲击载荷的作用，中心油膜压力略高，中心油膜厚度和最小油膜厚度略小。冲击载荷使油膜压力和油膜厚度产生一定程



(a) 中心压力沿啮合线的变化



(b) 中心膜厚沿啮合线的变化



(c) 最小膜厚沿啮合线的变化

图 11 有无冲击载荷工况下的油膜压力与膜厚比较

度的振荡, 中心油膜压力受冲击载荷的影响最为显著, 最小油膜厚度和中心油膜厚度主要受啮入冲击影响。根据 CRUZ 等的研究^[19-20], 油膜压力及油膜厚度的振荡在一定程度上会加剧齿轮系统的振动及噪声, 因而应对齿轮进行修缘, 以减小啮入冲击。

5 结论

(1) 换向工况下换向点属于齿轮润滑失效的危险点, 为避免润滑失效导致齿轮传动故障的发生, 应格外注意换向点的润滑情况。

(2) 非对称齿轮与对称齿轮相比能改善齿轮的弹流润滑性能, 可有效降低润滑油膜的中心压力, 增大润滑油膜厚度, 可采用非对称的齿形设计改善齿轮的弹流润滑性能。

(3) 选用正弦减速至零反向正弦加速的变速形式完成齿轮的控制换向, 能够较大限度地改善非对称齿轮在换向工况下的弹流润滑。

(4) 冲击不利于非对称齿轮的润滑, 易在齿轮啮入以及换向点造成油膜压力与膜厚的波动, 在实际应用中优化齿轮的设计制造, 减小冲击对于非对

称齿轮换向过程中润滑性能的不利影响。

参 考 文 献

- [1] 张建蓉, 钱心筠, 钱雄伟. 塑料直齿圆柱齿轮的静态传动误差有限元研究[J]. 塑料科技, 2020, 48(10): 89-92.
ZHANG Jianrong, QIAN Xinyun, QIAN Xiongwei. Finite element study on static transmission error of plastic spur gear[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(10): 89-92.
- [2] 卢泽华, 刘怀举, 朱才朝, 等. 润滑和载荷状态对聚甲醛齿轮服役性能的影响[J]. 中国机械工程, 2021, 32(17): 2047-2054.
LU Zehua, LIU Huaiju, ZHU Caichao, et al. Effects of lubrication and loading levels to the POM gear durability performance[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(17): 2047-2054.
- [3] 宋开利, 王优强, 黄丙习, 等. 塑料与钢制齿轮啮合的弹流润滑研究[J]. 润滑与密封, 2005(1): 50-51+54.
SONG Kaili, WANG Youqiang, HUANG Bingxi, et al. The study on EHL of plastic pinion engaging with steel gear[J]. Lubrication Engineering, 2005(1): 50-51+54.
- [4] 王发辉. 基于理想模型的齿轮传动弹性流体动力润滑研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
WANG Fahui. Gearing elasto-hydrodynamic lubrication based on the ideal model[D]. Nanchang: Nanchang University, 2008.
- [5] SEKAR P R. Performance enhancement of spur gear formed through asymmetric tooth[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019, 233(9): 1361-1378.
- [6] PANDIAN K A, GAUTAM S S, SENTHILVELAN S. Experimental and numerical investigation of the bending fatigue performance of symmetric and asymmetric polymer gears[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2020, 234(6): 819-834.
- [7] CAO Wen. Influence of surface roughness on the mixed elastohydrodynamic lubrication performance of vehicle gears contact area[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1629(1): 012092.
- [8] 夏伯乾, 高磊, 张绍林, 等. 线接触弹流摩擦副的动特性研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(4): 493-499.
XIA Boqian, GAO Lei, ZHANG Shaolin, et al. Research on dynamic characteristics of line contact EHL friction pair[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(4): 493-499.

- [9] 菅光霄, 王优强, 于晓, 等. 振动与接触冲击耦合作用下的齿轮弹流润滑研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(21): 226-232.
JIAN Guangxiao, WANG Youqiang, YU Xiao, et al. Elasto-hydrodynamic lubrication of gears under coupling of vibration and contact impact[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(21): 226-232.
- [10] 林国志, 梁良. 表面微织构对 WC-8Co 在往复摩擦磨损中粘结-扩散磨损特性的影响[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(5): 657-668.
LIN Guozhi, LIANG Liang. Effect of surface micro-texturing on adhesion-diffusion wear behavior of WC-8Co in reciprocating sliding[J]. Tribology, 2021, 41(5): 657-668.
- [11] 王冰清. 液压直线往复密封软弹流润滑理论与实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
WANG Bingqing. Theoretical and experimental study on soft elastohydrodynamic lubrication of hydraulic linear reciprocating seals[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [12] 袁玉鹏, 李权才, 刘忠明, 等. 低速重载开式齿轮齿条传动润滑状态分析[J]. 润滑与密封, 2015, 40(5): 98-103.
YUAN Yupeng, LI Quancai, LIU Zhongming, et al. Analysis on lubrication state of open pinion and rack drive under low-speed and heavy-load[J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(5): 98-103.
- [13] 徐彩虹, 王优强, 王立梅, 等. 齿轮齿条传动往复运动过程的润滑分析[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 114-120.
XU Caihong, WANG Youqiang, WANG Limei, et al. Lubrication analysis of gear rack transmission in reciprocating motion[J]. Surface Technology, 2017, 46(9): 114-120.
- [14] 王优强, 赵晶晶, 徐彩虹. 换向持续时间和换向点位置对往复运动齿轮齿条弹流润滑的影响[J]. 计算力学学报, 2019, 36(3): 389-394.
WANG Youqiang, ZHAO Jingjing, XU Caihong. Reversing time of duration and dead center position effects on the elastohydrodynamic lubrication of reciprocating spur gear rack[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(3): 389-394.
- [15] 谢奕浓, 王优强, 宋晓萍, 等. 海水润滑 UHMWPE 轴承不同加减速形式润滑分析[J]. 润滑与密封, 2019, 44(9): 77-82.
XIE Yinong, WANG Youqiang, SONG Xiaoping, et al. Lubrication analysis of seawater lubricated UHMWPE bearings with different acceleration and deceleration modes[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(9): 77-82.
- [16] 王优强, 畅通. 啮入冲击对直齿轮弹流润滑的影响[J]. 计算力学学报, 2010, 27(3): 527-532.
WANG Youqiang, CHANG Tong. The influence of approach impact load on elasto-hydrodynamic lubrication of involute spur gears[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(3): 527-532.
- [17] 赵晶晶, 王优强. 冲击载荷下不同载液磁流体直齿圆柱齿轮的弹流润滑数值分析[J]. 机床与液压, 2019, 47(22): 20-23+40.
ZHAO Jingjing, WANG Youqiang. Non-steady-state EHL analysis of impact load in involute spur gear under different carrier fluid ferrofluid[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(22): 20-23+40.
- [18] 谢奕浓, 王优强, 宋晓萍, 等. 启动振动与海浪冲击耦合时变 UHMWPE 轴承润滑分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(24): 144-149.
XIE Yinong, WANG Youqiang, SONG Xiaoping, et al. Transient lubrication analysis of UHMWPE bearings during start-up with vibration and shock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 144-149.
- [19] CRUZ M D L, CHONG W W F, TEODORESCU M, et al. Transient mixed thermo-elastohydrodynamic lubrication in multi-speed transmissions[J]. Tribology International, 2012, 49: 17-29.
- [20] JIAN Guangxiao, WANG Youqiang, ZHANG Ping, et al. Analysis of lubricating performance for involute spur gear under vibration[J]. Lubrication Science, 2020, 32(7): 344-357.

作者简介: 左名玉, 女, 1997 年出生。主要研究方向为齿轮的弹流润滑。
E-mail: zuomingyu0529@163.com

王优强(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。
主要研究方向为齿轮与轴承的弹流润滑。
E-mail: wyq1970301@126.com