

圆弧圆柱蜗杆传动弹流润滑分析

张有忱 康 凯 张立仁
(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘 要: 计算了圆弧圆柱蜗杆传动在不同的蜗杆转角下的中心膜厚和最小膜厚。计算结果表明: 蜗杆在啮入端润滑状况较好, 容易形成润滑油膜。随着圆弧圆柱蜗杆啮合特性角的增大, 平均膜厚减小, 润滑状况变差。

关键词: 圆弧圆柱蜗杆副; 润滑; 磨损

中图分类号: TH 132.2

蜗杆传动润滑状况直接影响着轮齿的磨损和传动效率及齿面胶合。齿面间形成的油膜, 有助于减少摩擦损失, 降低油温, 提高蜗轮副的抗胶合性能。

圆弧圆柱蜗杆传动属于非均匀线接触问题, 若采用完全的数值解求解齿面油膜厚度分布是非常困难的, 所以本文采用与文献[1]相似的方法, 即采用较成熟的膜厚计算经验公式, 再进行一些必要的数学处理, 近似求解蜗轮副的油膜厚度。

1 模型建立

弹流润滑膜厚计算公式是在稳定状态下建立起来的, 也就是说, 各个物理量不随时间变化。然而, 蜗杆传动啮合过程相当复杂, 其接触线是空间曲线, 各点的速度、载荷和曲率半径又都不同, 因而, 油膜厚度也是变化的。这样, 接触线上的几何参数和运动参数不能直接代入润滑膜厚公式中直接求解齿面间的弹流膜厚。为此, 需要将蜗轮蜗杆接触情况作适当的简化, 建立适合弹流润滑计算的简化模型。

在线接触条件下, 可以将复杂的接触表面看作两个任意截面的柱体沿其母线的接触, 这样接触表面在接触点处可以用两个半径分别与接触点处曲率半径相等的两圆柱体代替, 进而简化为一个圆柱和一个平面来代替。蜗轮蜗杆啮合可以看成齿面在法截面内为两个圆接触, 因而, 可将蜗轮蜗杆的接触简化为一系列直径不等的短圆柱与平面的接触。

2 膜厚计算公式

文献[2]中采用 Roelands 粘压公式并采用复合直接迭代法, 对较广范围内的速度和载荷变化的线接触情况下得出弹流膜厚计算公式, 无论从所选择的粘压关系、解算方法和适合的参数范围, 还是从实验结果的吻合程度来分析, 杨沛然-温诗铸公式都比以前的膜厚公式更为合理。因此以杨-温膜厚公式为计算的依据, 其回归出的最小膜厚和中心膜厚公式为

$$h_{\min} = 6.76 \cdot 10^{-5} (\rho_0 \cdot v)^{0.75} E^{-0.06} R^{0.41} w^{-0.16} \quad (1)$$

$$h_c = 11.9 \cdot 10^{-5} (\rho_0 \cdot v)^{0.74} E^{-0.14} R^{0.46} w^{-0.20} \quad (2)$$

式中: w 为单位长度上的载荷, N/m, 计算方法可参见文献[3]; h_{\min} 为最小膜厚, m; h_c 为中心膜厚, m;

ρ_0 为粘压系数, m^2/N ; ρ_0 为大气压力下的粘度, Pa·s; v 为卷吸速度, m/s; E 为当量弹性模量, Pa, 其值可由式 $1/E = 0.5[(1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2]$ 计算, 其中 μ_1 、 E_1 和 μ_2 、 E_2 分别为蜗杆和蜗轮材料的泊松比和弹性模量; R 为当量曲率半径, m; 由文献[4]可知, 其值可由式 $R = 1/K^{(12)}$ 计算, 其中 $K^{(12)}$ 为啮合点处的诱导法曲率, m^{-1} 。

在计算膜厚时, 采用(1)、(2)两式作为计算依据。

3 假设条件

为计算方便, 假设齿面接触线有多微弧段组成, 同一微弧段上, 运动参数(速度), 几何参数(接触点实际半径、接触曲率半径), 润滑参数(润滑油粘度、

密度、温度、膜厚)都相同。

在蜗杆传动中,考虑到接触线上各点的载荷、综合曲率半径以及卷吸速度都是变量,因此在同一瞬时接触线上不同接触点膜厚也可能不相同,但若采用数值计算的方法来求解弹流膜厚是非常困难的,因此假定同一接触线上膜厚一致。

考虑到齿面的磨损量和油膜厚度呈相反的关系,即膜厚较小时磨损严重,膜厚较大时,磨损减轻。另外再考虑变形协调,则经充分跑合后,同一轮齿接触线上膜厚会趋于—比较接近的值。

4 油膜厚度计算

根据式(1)和(2)可得膜厚、载荷的关系,再考虑传递力矩的平衡条件,可得第 i 个齿面上的力矩 M_i 平衡方程为

$$M_i = \sum_{j=1}^n (x_1 n_{y1} - y_1 n_{x1}) (-0.4 - 0.74 v_{ij}^{-0.74} R_{ij}^{-0.46} E^{0.14} / 11.9)^{-5} l_{ij} \quad (3)$$

式中: x_1 、 y_1 为与蜗杆固连的坐标系上的坐标; n_{x1} 、 n_{y1} 为齿面的法向矢量在 x_1 、 y_1 轴上的投影; l 为某齿面上接触线长度微段;下标 ij 为第 i 个齿面接触线上第 j 段的量。

将此力矩与齿面载荷力矩相联立,并根据前面的平均膜厚假设,则得出第 i 个齿面上的中心膜厚如下

$$h_{c,i} = \left(\frac{M_i}{\sum_{j=1}^n (x_1 n_{y1} - y_1 n_{x1}) (-0.4 - 0.74 v_{ij}^{-0.74} R_{ij}^{-0.46} E^{0.14} / 11.9)^{-5} l_{ij}} \right)^{-0.20} \quad (4)$$

式中:
$$= \sum_{j=1}^n (x_1 n_{y1} - y_1 n_{x1}) (-0.4 - 0.74 v_{ij}^{-0.74} R_{ij}^{-0.46} E^{0.14} / 11.9)^{-5} l_{ij}$$

同理可得第 i 个齿面上最小膜厚计算公式

$$h_{\min,i} = \left(\frac{M_i}{\sum_{j=1}^n (x_1 n_{y1} - y_1 n_{x1}) (-0.53 - 0.75 v_{ij}^{-0.75} R_{ij}^{-0.41} E^{0.06} / 6.76)^{-6.25} l_{ij}} \right)^{-0.16} \quad (5)$$

式中:
$$= \sum_{j=1}^n (x_1 n_{y1} - y_1 n_{x1}) (-0.53 - 0.75 v_{ij}^{-0.75} R_{ij}^{-0.41} E^{0.06} / 6.76)^{-6.25} l_{ij}$$

为全面评价啮合过程的润滑情况,则需将齿面啮合过程中的膜厚求取平均值,此即为平均齿面膜厚,计算式如下

$$\overline{h_c} = \sum_{i=1}^m h_{c,i} / (e - s) \quad (6)$$

$$\overline{h_{\min}} = \sum_{i=1}^m h_{\min,i} / (e - s) \quad (7)$$

式中: $\overline{h_c}$ 和 $\overline{h_{\min}}$ 分别为齿面在啮合过程中的平均中心膜厚和平均最小膜厚, m; e 、 s 为啮出,啮入位置对应的蜗杆转角, rad; Δi 为蜗杆转角的微量, rad。

5 计算结果及分析

计算中蜗杆转速 $n_1 = 1\,000$ r/min,输入扭转力矩 $T_1 = 10$ N·m,计算分析采用的蜗杆传动的几何参数如表 1 所示。

表 1 蜗杆传动的几何参数(齿廓半径 $r = 15.5$ mm)

Table 1 Geometric parameter of worm drive (radius of flank profile $r = 15.5$ mm)

| 方案编号 | 啮合特性角 / (°) | 蜗杆头数 z_1 | 蜗轮齿数 z_2 | 模数 m /mm | 蜗杆直径 d_1 /mm | 变位系数 x_2 | 轴向齿形角 $\alpha' / (^\circ)$ | 中心距 a /mm |
|------|-------------|------------|------------|------------|----------------|------------|----------------------------|-------------|
| 1 | 48.1 | 1 | 39 | 3 | 35 | 1.333 | 23 | 80 |
| 2 | 54.3 | 1 | 39 | 3 | 35 | 1.167 | 23 | 79.5 |
| 3 | 59.2 | 1 | 39 | 3 | 35 | 1.000 | 23 | 79 |
| 4 | 66.2 | 1 | 39 | 3 | 35 | 0.833 | 23 | 78.5 |
| 5 | 59.5 | 1 | 39 | 3 | 35 | 1.000 | 23 | 80 |
| 6 | 65.0 | 2 | 40 | 1.75 | 16.5 | 1.000 | 21 | 80 |

5.1 中心膜厚计算与分析

根据式(4)计算的结果见图 1~6,结果表明在不同的蜗杆转角 ϕ 下,中心膜厚值 h_c 不同,就总体而言,呈从大到小的变化趋势,即啮入时油膜厚度较大,啮出时油膜厚度较小,其原因为,在啮入端接触

线的形状较啮出端好,容易形成润滑油膜。

5.2 最小膜厚计算与分析

最小膜厚变化与中心膜厚变化相同,呈从大到小的变化趋势,即啮入时油膜厚度较大,啮出时油膜厚度较小,其原因与中心膜厚分析相同。

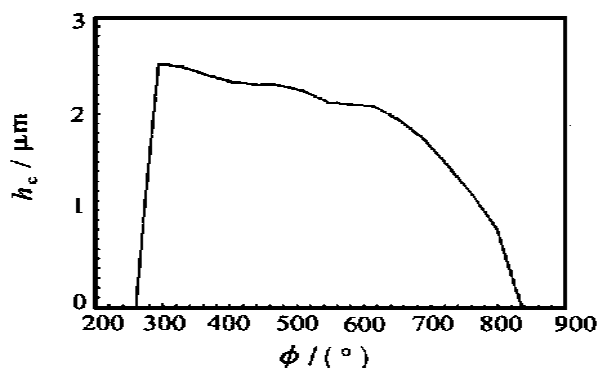


图1 方案1中心膜厚

Fig. 1 Central film thickness of case 1

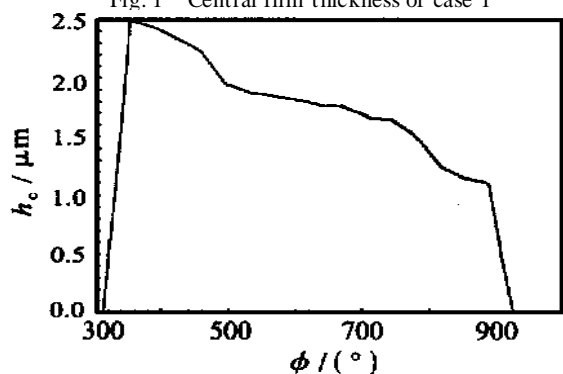


图2 方案2中心膜厚

Fig. 2 Central film thickness of case 2

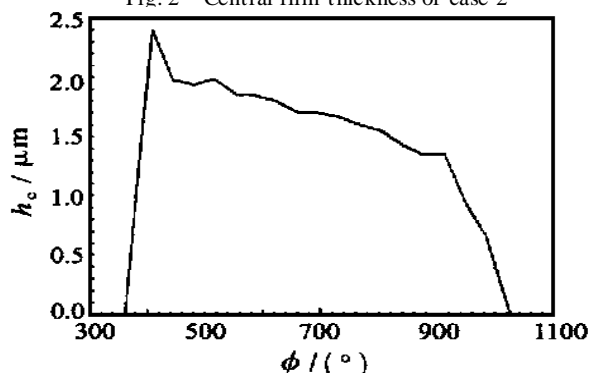


图3 方案3中心膜厚图

Fig. 3 Central film thickness of case 3

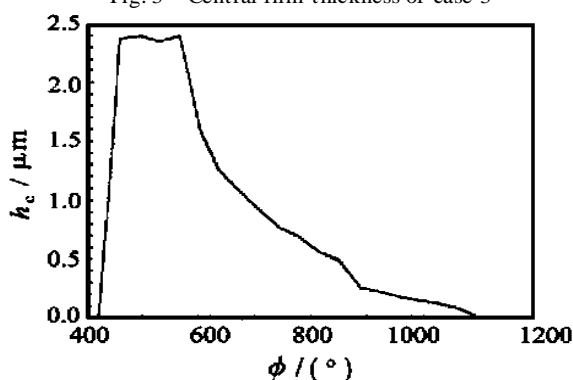


图4 方案4中心膜厚

Fig. 4 Central film thickness of case 4

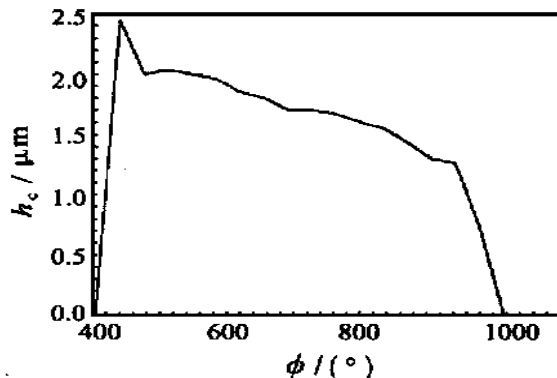


图5 方案5中心膜厚

Fig. 5 Central film thickness of case 5

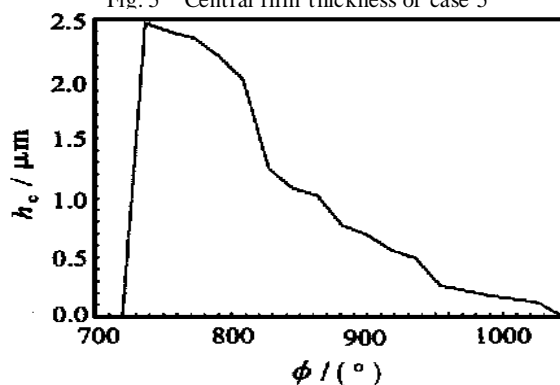


图6 方案6中心膜厚图

Fig. 6 Central film thickness of case 6

5.3 平均膜厚计算与分析

根据式(6),式(7)计算的结果见图7。由图7可见,平均膜厚随啮合特性角增大而逐渐减小。究其原因,是因为随啮合特性角的增大,使得接触线的形状变得不利于液体动压油膜的形成。

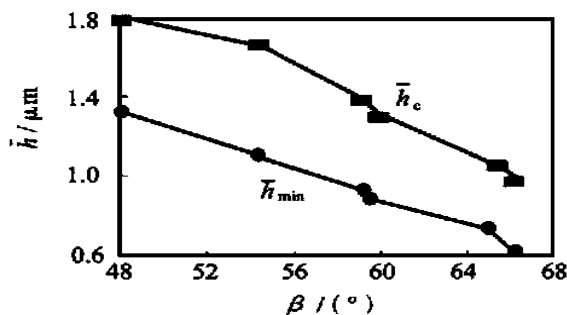


图7 平均膜厚

Fig. 7 Average film thickness

6 结 论

(1) 计算了圆弧圆柱蜗杆传动在不同的蜗杆转角下的中心膜厚和最小膜厚。总体上看,在啮入端润滑状况较好,容易形成润滑油膜。

(2) 随着圆弧圆柱蜗杆啮合特性角的增大,

平均膜厚减小,润滑状况变差。

参 考 文 献

- [1] 张有忱,孟惠荣,张立仁. 蜗杆传动的弹流润滑研究. 机械设计,1999(10):24~25,34
- [2] 温诗铸,杨沛然. 弹性流体动力润滑. 北京:清华大学出版社,1992.122~128
- [3] 张有忱,孟惠荣. 平面二次包络环面蜗杆传动齿面接触线上载荷分布研究. 机械设计,1999(11):21~23
- [4] 胡来蓉. 空间啮合原理及应用(下). 北京:煤炭工业出版社,1987.1~32

Analysis of the elastohydrodynamic lubrication (EHL) of arc cylindrical worm drive

ZHANG You-chen KANG Kai ZHANG Li-ren

(College of Mechanical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Minimal film thickness and central film thickness of arc cylindrical worm drive were calculated under different rotation angle. The result of calculation shows clearly that lubrication status is better during starting engagement and oil film is easy formed. The average film thickness is thinner and lubrication status is worse when meshing characteristic angle of arc cylindrical worm becomes bigger.

Key words: ZC₁ worm pair; lubrication; wear

(上接第 51 页)

A study on the mechanism of localized corrosion of stainless steel by tungstate

XU Chun-chun WU Xiao-mei LIU You-ping

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Simulated Occluded Corrosion Cell(OCC) was used to study the changes of chemical state within the OCC of 304 stainless steel in neutral solution of 0.5 mol/L NaCl containing various tungstate ion concentration at 50℃. Anodic polarizing occluded specimen to simulate reaction current between outside and inside of OCC. It was found that when WO_4^{2-} anion was added into the bulk solution, it migrated into OCC, and the migration quantity increased with the concentration and the time, the migration rate decreased with the time. WO_4^{2-} was in competition with Cl^- on migration, It can retard the migration of Cl^- effectively above a certain concentration, The higher the concentration, the more efficient it is. WO_4^{2-} can retard pH fall and decrease the multiples of Cl^- enrichment effectively.

Key words: Occluded Corrosion Cell; 304 stainless steel; localized corrosion; tungstate