

# 齿轮磨损寿命预测方法

潘冬<sup>1</sup>, 赵阳<sup>1</sup>, 李娜<sup>2</sup>, 王兴贵<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 150001 哈尔滨; 2. 北京卫星制造厂, 100190 北京)

**摘要:**以渐开线直齿圆柱齿轮为研究对象,通过理论推导,研究齿轮啮合过程中轮齿间各状态参量随啮合角的变化规律.引入磨损步长,对连续磨损过程进行离散化处理,通过磨损步长内的准静态模型代替数学上无法求解的动态非线性磨损模型,实现了对齿轮磨损问题的数值仿真.其中应用 Achard 磨损模型,充分考虑了齿轮负载及转速对齿轮副齿面磨损的综合影响,建立了齿轮磨损寿命预测模型,编制了相关程序,可实现对不同齿轮、不同工况下磨损寿命的预测,从理论上解决了齿轮磨损寿命的预测问题,具有一定的理论价值及工程应用前景.

**关键词:** 齿轮磨损; 数值仿真; 磨损寿命; 预测方法

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)09-0029-05

## The wear life prediction method of gear system

PAN Dong<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>1</sup>, LI Na<sup>2</sup>, WANG Xing-gui<sup>1</sup>

(1. Dept. of Astronautics, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2. Beijing Spacecrafts, 100190 Beijing, China)

**Abstract:** A numerical prediction on wear life formation is carried out in involute spur gear. The sliding velocity and contact pressures are computed along the contact zones at each rotational gear position, then the Continuous wear process are discretized by introducing wear step. A quasi-static model instead of the nonlinear wear model in the wear step is used to simulate the gear wear problem based on a generalized Achard wear equation which takes full account of the load and speed combined effects. A gear wear life prediction model is established, and then the procedures are developed which can predict the wear life of different gears or under different operating conditions.

**Key words:** gear wear; numerical simulation; wear life; prediction method

磨损是影响机械寿命的主要因素之一,对于齿轮系统,轮齿的过度磨损不仅会影响齿轮的传动精度和效率,还会造成机构振动、产生噪声等,严重时甚至会使轮齿断裂,造成重大事故.磨损具有缓慢的渐进性特点,对机械系统性能的影响也是一个渐进性缓慢失效过程,与突发性失效相比往往容易被忽视,但其危害性却很大<sup>[1]</sup>,齿轮的耐磨寿命预测、磨损状态监测及轮齿参数优化是

目前齿轮磨损问题研究领域中的3大难题.

对于齿轮磨损问题国内外学者作了多年的研究<sup>[2-10]</sup>,但由于磨损问题的复杂性,至今仍没形成一套成熟有效的方法,以往的研究主要是以实验为主,通过实验测量磨损量或根据磨粒的铁谱分析、尺寸分析来预测齿轮轮齿的磨损程度<sup>[11-12]</sup>,但是由于实验成本高,周期长,且不同的齿轮副、不同的工况条件其磨损特性也不一样,实验获得的结果缺乏普适性.基于理论分析,结合物理实验,应用数值仿真技术研究齿轮的磨损问题将是一条行之有效的途径.

文中以渐开线直齿圆柱齿轮为研究对象,以理论分析为基础,研究齿轮啮合过程中轮齿间各状态参量的变化规律,并通过离散化处理,实现了

收稿日期: 2011-07-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975056;11072066);

微小型航天器技术重点实验室开放基金资助.

作者简介: 潘冬(1984—),男,博士研究生;

赵阳(1968—),男,博士,教授,博士研究生导师.

通信作者: 潘冬, pandongjit@163.com.



论啮合点处的接触应力为

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{F_k}{\pi \rho_k \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (11)$$

式中:  $F_k$  表示在啮合点  $K$  处轮齿单位接触长度上所受载荷;  $\rho_k$  为在啮合点  $K$  处的综合曲率半径,  $E_i (i = 1, 2)$ 、 $\mu_i (i = 1, 2)$  分别为主动轮及从动轮材料的弹性模量和泊松比。

根据主动轮所受力矩载荷可求得

$$F_k = \frac{T_1}{r_d \cdot b} \quad (12)$$

式中:  $b$  为轮齿在节圆处的齿宽, 由于在整个齿廓上接触应力变化很小, 用分度圆半径  $r_d$  作为平均的力臂, 且假设轮齿的重合度  $\varepsilon$  接近于 1, 忽略双齿啮合区影响。

啮合点处综合曲率半径  $\rho_k$  与主、从动轮曲率半径  $\rho_{1k}$ 、 $\rho_{2k}$  有如下关系

$$\rho_k = \frac{\rho_{1k} \rho_{2k}}{\rho_{1k} + \rho_{2k}} \quad (13)$$

根据图 2 中几何关系可知

$$\rho_{ik} = r_{bi} \tan \alpha_{ki} \quad (i = 1, 2) \quad (14)$$

将(6)、(14)式代入(13)式整理得

$$\rho_k(\alpha_{k1}) = r_{b1} \tan \alpha_{k1} - \frac{r_{b1} z_1}{(z_2 + z_1) \tan \alpha} \tan^2 \alpha_{k1} \quad (15)$$

由此, 将式(12)、(15)代入式(11)即可得到接触应力  $\sigma_k$  随啮合角  $\alpha_{k1}$  的变化情况。

### 3 齿轮副轮齿间磨损模型

关于机械材料的磨损计算公式很多, Meng 和 Ludema 在文章中曾对此进行过总结<sup>[10]</sup>, 但是绝大部分模型都仅适用于具体对象和具体问题, 从模型的广义上讲, 目前应用最广泛的磨损计算公式是 Archard 磨损模型, Archard 磨损模型是由实验获得的, 主要计及了接触力、滑移速度、材料硬度等因素的影响。本文针对齿轮副轮齿间的磨损就采用 Archard 磨损模型进行计算。

Archard 磨损模型的表达式为

$$\frac{W}{s} = \frac{k F_n}{H} \quad (16)$$

式中:  $W$  为体积磨损量,  $s$  为滑移距离,  $k$  为无量纲的磨损系数,  $F_n$  为法向接触力,  $H$  为材料的硬度。

在齿轮运行过程中, 齿轮副轮齿间接触点是不断变化的, 从而不同时刻接触点的接触力和滑移距离都是不同的, 因此实际计算时采用如下的微分形式

$$\frac{dW}{ds} = \frac{k F_n}{H} \quad (17)$$

考虑到  $dh/ds$  代表任意时刻的线磨损率, 且实验证明线磨损率与压力成正比, 与相对滑移速度无关<sup>[1]</sup>, 则(17)式可写为

$$\frac{dh}{ds} = \frac{kp}{H} \quad (18)$$

式中:  $h$  为磨损深度,  $p$  为接触压强。

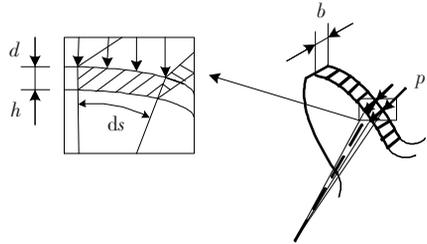


图3 齿廓离散化示意图

齿轮轮齿接触是一连续过程, 为了实现数值计算, 求取轮齿每一接触点处的磨损深度, 需对轮齿齿廓进行离散化处理, 即取一微小时间段  $\Delta t$  为磨损步长, 在磨损步长范围内, 假定各点磨损深度相同, 将连续时变的磨损过程在磨损步长内用准静态模型代替, 设定的磨损步长越短仿真结果越接近实际情况, 当磨损步长无限小时则认为能真实地反应实际情况。齿廓的离散化如图 3 所示。

将(18)式进行变换整理得

$$\frac{dh}{dt} = \frac{dh}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{kp}{H} v \quad (19)$$

所以在一微元时间段内接触点处的磨损深度为

$$\Delta h_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \frac{kp}{H} v dt \quad (20)$$

齿轮运行过程中如果某轮齿区间内发生  $n$  次接触则总的磨损深度为

$$h = \sum_1^n \Delta h_i \quad (21)$$

齿轮副材料一般相同, 所以磨损量在接触点平均分配到主动轮与从动轮上, 主动轮与从动轮的一对轮齿啮合, 首先是从动轮的齿顶与主动轮的齿根接触, 最终在从动轮的齿根与主动轮的齿顶处分离, 所以主动轮齿根处与从动轮齿顶处磨损深度对应相同。齿轮轮齿某区间内发生  $n$  次接触后, 曲率半径变为

$$\rho = \rho^* - h/2 \quad (22)$$

式中:  $\rho^*$  为接触点处磨损前曲率半径。

由于齿轮副要实现一定的传动比, 主动轮与从动轮的轮齿齿数一般不同, 在齿轮工作过程中, 小齿数齿轮上各点发生啮合接触的次數多, 所以磨损相对严重, 在计算分析时应予以注意。

## 4 齿轮磨损寿命预测

### 4.1 磨损阈值确定

进行齿轮磨损寿命预测,首先需要确定齿轮的磨损阈值,所谓的磨损阈值即为齿轮不足以传递预定动力或传动精度达不到要求时的极限磨损量,齿轮的磨损寿命可由下式确定:

$$S_{1i} + S_{2i} \geq S. \quad (23)$$

式中: $S_{1i}$ 、 $S_{2i}$  分别表示主、从动轮在接触点  $i$  处的磨损量, $S$  为齿轮的磨损阈值即最大组合磨损量,当轮齿上任意接触点的主、从动轮磨损量之和大于磨损阈值时,则认为达到了齿轮的磨损寿命.

磨损阈值的确定可由物理实验或通过计算机对齿轮系统进行运动/动力学仿真求得.

### 4.2 寿命预测

齿轮磨损寿命预测即是根据齿轮当前的工作状态,分析其磨损规律,预示将来的磨损情况,从而预测齿轮系统磨损量达到磨损阈值时的工作时间即磨损寿命.其具体过程如图4所示.

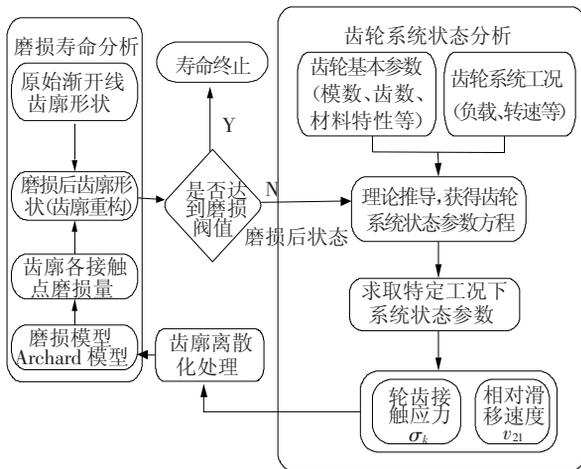


图4 齿轮磨损寿命预测流程

按照图4的流程可求取齿轮副在特定工况下的磨损寿命,但一对齿轮副在其工作寿命内可能需要不同时段工作在不同工况下,在不同的负载转矩、转速条件下,同一对齿轮副的磨损寿命将有显著区别,齿轮副的磨损寿命可由下面的函数关系表示.

$$L_w = f(T, \omega, \eta). \quad (24)$$

式中: $L_w$  为齿轮副磨损寿命; $T$  为齿轮负载转矩; $\omega$  为齿轮转速; $\eta$  为齿轮工作环境、温度等其他因素影响.

齿轮传动过程中,啮合接触点不断变化,磨损过程瞬间完成,可以不考虑摩擦引起的热效应,故本文中不考虑  $\eta$  对齿轮磨损寿命的影响.根据式(24)即可求取齿轮副在任意工况条件下的磨损寿命.

## 5 算例分析

以一直齿圆柱齿轮为研究对象,应用上述方法,求取齿轮副的磨损寿命.齿轮副的基本参数如表1所示.

将表1中齿轮副的参数代入到前面求取的函数表达式中,进行数值仿真,所得结果如图5~7所示.其中各曲线的横坐标均为齿轮啮合过程中啮合角的变化,啮合角与齿廓上的啮合点一一对应,这样更有利于看出各啮合点的状态变化情况.

图5为齿轮副轮齿间啮合点处相对滑移速度随啮合角变化曲线,由于齿轮副的实际啮合线限制,啮合角有一定的取值范围,从图中可看出齿轮副轮齿间相对滑移速度当主动轮的齿根与从动轮的齿顶刚接触时最大,随着啮合点的移动相对速度逐渐减小,在节圆处达到最小为零,这是由于理想齿轮副在节圆处轮齿间为纯滚动,过了节圆,相对滑移速度又逐渐变大,但是方向变为负向.

表1 齿轮副基本参数

参数名称	$m/mm$	$z$	$\alpha/rad$	$b/mm$	$\omega/(rad \cdot s^{-1})$	$h_a^*$	$T/(N \cdot m)$	$E/GPa$	$\mu$	$H/HBS$	$k$
主动轮	4	38	0.35	20	4pi	0.5	200	206	0.3	187	6.25e-6
从动轮	4	55	0.35	20		0.5		206	0.3	187	6.25e-6

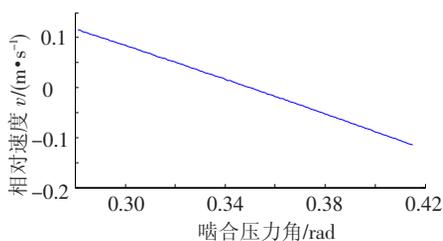


图5 啮合点处相对速度

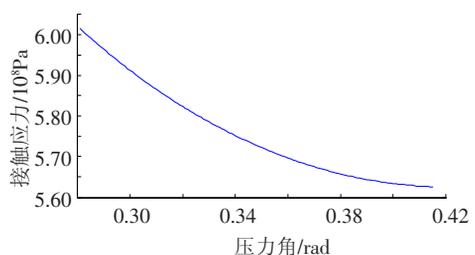


图6 啮合点处接触应力

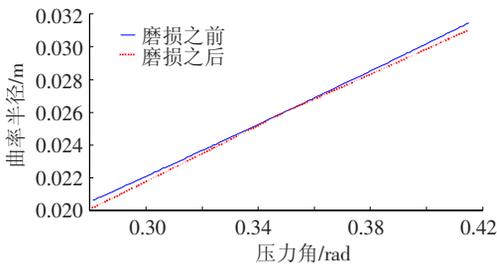


图7 磨损后曲率半径变化

图6为齿轮副轮齿间接触应力曲线,随着啮合压力角的增大,即主动轮上的啮合点从齿根向齿顶逐渐移动,齿轮副轮齿间接触应力逐渐减小,但是数值的变化并不大,这说明齿轮稳定工作过程中,轮齿上各点所受接触应力相差不多。

图7为轮齿上各点磨损一段时间后,曲率半径的变化情况,其中实线为磨损前各点曲率半径,而虚线为磨损后的曲率半径,通过图中的对比可明显看出,由于磨损,齿廓上各接触点曲率半径均变小,且齿根与齿顶处变化比较大,而节圆处变化很小,这也反映齿轮啮合过程中,齿根与齿顶附近磨损严重,是导致齿轮磨损失效的关键部位。

图8为在转速一定的情况下,齿轮磨损寿命随转矩大小的变化曲线,其中带点线为在不同转矩工况下多次仿真分析求取的齿轮磨损寿命的原始曲线,而另一条曲线则是对原始曲线进行拟合得到的拟合曲线。相应的拟合函数表达式如下

$$L_w = -127.3 \ln(T) + 709.3 \quad (25)$$

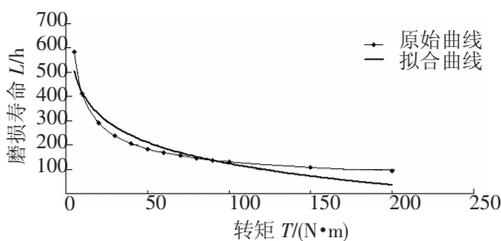


图8 不同转矩下齿轮磨损寿命

式(25)表明齿轮磨损寿命与转矩呈对数关系,通过该式可以求取转速不变、不同转矩情况下的齿轮磨损寿命。由图8中曲线可看出,转速一定,齿轮的磨损寿命随转矩的增大而减小,初始转矩由很小逐渐变大时,齿轮磨损寿命变化十分剧烈,减小的速度很快,当转矩达到一定大小时,齿轮磨损寿命变化缓慢趋于平稳。

图9为转矩一定,齿轮磨损寿命随转速的变化情况,其中带点线为原始数据曲线,而另一条为拟合曲线,齿轮磨损寿命与转速的函数关系表达式如下

$$L_w = 675.68e^{-0.1753\omega} \quad (26)$$

齿轮磨损寿命与转速的函数关系如式(26),两者之间呈指数关系。根据图9中曲线可知,转

矩一定情况下,齿轮磨损寿命随转速增加而减小,说明齿轮高速时磨损严重。

图10为齿轮磨损寿命随转矩、转速变化的三维曲面图,从图中可直观看出,齿轮磨损寿命随转矩、转速的增大而减小,说明齿轮在低速、轻载情况下磨损寿命长。

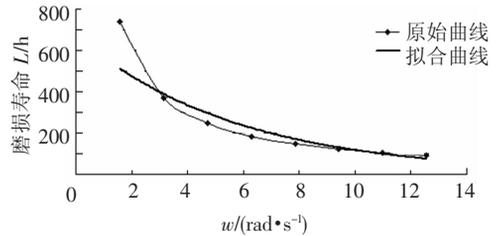


图9 不同转速下齿轮磨损寿命

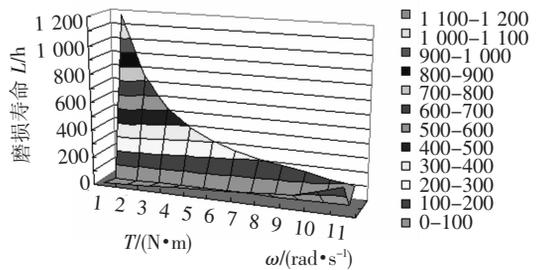


图10 不同转矩、转速下齿轮磨损寿命

## 6 结论

文中基于理论推导及计算机数值仿真技术,对复杂的齿轮磨损过程进行了仿真分析,并建立了一套系统的齿轮磨损寿命预测方法,通过具体实例验证了其有效性。所得结论如下:

- 1) 可通过离散化处理,用每小段离散区域内的准静态模型代替数学上无法求解的动态非线性磨损模型,实现了对齿轮磨损问题的数值仿真。
- 2) 齿轮啮合过程中,齿根与齿顶附近磨损较严重,是导致齿轮失效的关键部位,在设计及检修过程中应重点注意。
- 3) 选用合理的磨损模型,通过磨损分析求取啮合点处的磨损深度,确定磨损阈值,可实现对齿轮系统磨损寿命的预测。

4) 齿轮的磨损寿命受诸多因素影响,其中负载转矩及转速是影响齿轮磨损的主要因素,齿轮的磨损随负载的增加、转速的增大而加剧,通过对大量数值仿真数据进行拟合可建立齿轮副磨损寿命与各影响因素的函数关系,从而可实现对不同工况下不同齿轮副磨损寿命的预测。

## 参考文献:

[1] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社, 1990.