

双圆弧齿轮接触迹间载荷分配状况分析*

太原理工大学 武宝林** 邵家辉
中国矿业大学 孟惠荣

【摘要】 基于圆弧齿轮的啮合传动原理, 提出了研究双圆弧齿轮传动的各接触迹间载荷分配状况的动态分析计算方法并编制了相应的计算程序。实际分析计算了各主要影响因素对双圆弧齿轮接触迹间载荷分配状况的影响情况。

主题词: 圆弧齿轮 接触面 动力学
分类号: TH132.41

1 前 言

圆弧齿轮作为轴向共轭、点接触齿轮传动, 它只有轴向重合度, 而无端面重合度。为了使用时有较多的接触迹同时参与啮合, 则需增大轴向重合度。所以, 圆弧齿轮的齿宽一般都比较宽。而在实际传动过程中, 由于齿轮制造和装配误差、轮齿和轴系受载变形和轮齿综合啮合刚度变化等因素的影响, 使得齿轮所传递的实际载荷并不能在各接触迹之间均匀分配。为此, 在双圆弧齿轮的强度计算中, 引入一个接触迹间载荷分配系数 K_1 来考虑这种影响。目前由于理论研究水平和实验条件的制约, 双圆弧齿轮强度计算中的接触迹间载荷分配系数 K_1 是参照渐开线齿轮的齿向载荷分布系数 K_β 再加以必要的经验修正而得到的^[1]。并且双圆弧齿轮的接触迹之间的载荷分配状况还涉及到齿轮的跑合、修形、润滑的计算等重要方面。因此, 开展这方面的研究工作具有重要的理论和实际意义。

由于工作过程中齿轮的制造安装误差、运转速度等因素的影响, 使得齿轮之间总的实际相互作用力偏离名义上的相互作用力, 这种实际相互作用力并不能均匀分配于相啮合轮齿上的各个接触迹之间, 所以研究双圆弧齿轮的接触迹间载荷分配状况也应该从动态状况出发。

本文提出了研究双圆弧齿轮各接触迹之间载荷分配状况的动态计算分析方法, 并编制了相应的软件。通过改变齿轮的设计参数、所传递的静载荷以及齿轮精度等, 分析计算了七组不同齿轮设计参数下, 双圆弧齿轮的接触迹间载荷分配系数 K_1 的变化情况。

2 双圆弧齿轮的接触迹间载荷分配系数及主要影响因素分析

双圆弧齿轮的接触迹间载荷分配系数可定义为:

$$K_1 = \frac{\text{因误差、变形等的影响所导致的接触迹上的最大实际载荷}}{\text{考虑重合度后按理想分配的接触迹上的载荷}} \geq 1 \quad (1)$$

1998 年 10 月收稿; 1998 年 12 月收到修改稿。

* 本文系机械传动国家重点实验室开放基金资助项目及山西省青年科学基金资助项目(编号: 961020)

** 男 36 岁 博士 副教授 山西省太原市太原理工大学(北区) 齿轮研究所 030024

影响双圆弧齿轮接触迹间载荷分配系数的主要因素有: (1) 轮齿啮合刚度; (2) 齿轮所承受的载荷; (3) 齿宽; (4) 螺旋角误差、齿距误差、轴线平行度误差、螺旋线波度误差等; (5) 小齿轮轴的扭转变形等。

在上述的主要影响因素中, 螺旋线波度误差在齿轮未跑合和跑合初期, 对圆弧齿轮接触迹间的载荷分配有直接影响, 但经过良好跑合后则可消除它的影响。小齿轮轴的扭转变形相当于增大或减小了螺旋角误差; 而螺旋角误差和轴向齿距误差是相互依存的。可见, 在实际的计算分析过程中, 上述误差项目并不需要全部考虑。因此, 本文只考虑轴向齿距误差 Δf_{px} 、周向齿距误差 Δf_{py} 、轴线平行度误差 Δf_x 及 Δf_y 等三项误差对双圆弧齿轮接触迹间载荷分配状况的影响。在计算过程中选择它们的误差量时全部按相应精度等级下的极限偏差来选取, 且按照文献[3, 4]所提出的方法均将其转化为传动误差后, 代入动力学方程求解^[2]。

3 接触迹间载荷分配系数的计算方法及程序实现

根据圆弧齿轮啮合点处的齿面法向变形 δ_{ni} 与轮齿沿啮合线方向的相对振动位移 x 和传动误差 $e_i(t)$ 的关系, 当某一瞬时 t 有 n 对接触迹参与啮合时, 在啮合平面内轮齿的法线方向上, 各相啮合的接触迹之间的相互作用力可表示为^[2]:

$$f_{i(t)} = k_{ni}(t)[x - e_i(t)] \sin \beta_g > 0 \quad (i = 1, n) \quad (2)$$

则在 t 瞬时各相啮合的接触迹之间总的相互作用力可表示为:

$$F(t) = \sum_{i=1}^n k_{ni}(t)[x - e_i(t)] \sin \beta_g \quad (3)$$

式中: β_g 为齿轮在啮合平面内的螺旋角; $k_{ni}(t)$ 为 t 瞬时轮齿的单齿对法向啮合刚度。

上述的 $f_{i(t)}$ 和 $F(t)$ 的变化周期均为齿轮的啮合周期 T_z 。为此, 将一个啮合周期相应分为 m 个时间步长 Δt , 在文献[2]计算得到每个啮合瞬间 j ($j = 1, m+1$) 时啮合振动稳态解的位移 x 的基础上, 再计算各接触迹之间的相互作用力 $f_{ij}(t)$ ($i = 1, n$) 以及相啮合轮齿之间总的作用力 $F_j(t)$; 然后将各接触迹之间的作用力 $f_{ij}(t)$ 进行比较, 得到该瞬时所有参与啮合的接触迹中最大的作用力 $f_{vj} = \max_{i=1, n} f_{ij}(t)$ 。最后根据式(1)接触迹间载荷分配系数的定义, 求出该瞬时 j 的接触迹间载荷分配系数 $K_{vj}(t)$ 。以此类推, 当计算完一个啮合周期后, 则得到 m 个时间步长 Δt 的 $m+1$ 个 $K_{vj}(t)$ 。对这 $m+1$ 个 $K_{vj}(t)$ 进行比较, 得出在该工况下双圆弧齿轮的接触迹间载荷分配系数 $K_1 = \max_{j=1, m+1} K_{vj}(t)$ 。

在理论计算过程中, 考虑重合度影响时, 在 j 瞬时轮齿之间总的相互作用力 $F_j(t)$ 如何平均分配到各接触迹上, 也是一个比较复杂的问题。有必要作进一步的分析。

由双圆弧齿轮的重合度 ϵ_β 计算公式:

$$\epsilon_\beta = \mu_\epsilon + \Delta\epsilon \quad (4)$$

式中: μ_ϵ 为重合度 ϵ_β 的整数部分; $\Delta\epsilon$ 为 ϵ_β 的尾数部分。

当 $\Delta\epsilon = 0$ 或 $\Delta\epsilon$ 不大时, 在双圆弧齿轮的啮合过程中, 多数时间有 $2\mu_\epsilon$ 个完整的接触迹在承受载荷。这时, 在凸、凹齿啮合线上各个接触迹上所受的平均作用力为:

$$f_{jm}(t) = F_j(t) / 2\mu_\epsilon \quad (5)$$

当 $\Delta\epsilon$ 较大时, 由于受重合度尾数部分 $\Delta\epsilon$ 的影响, 同时参与啮合的接触迹数目除了上述的 $2\mu_\epsilon$ 个完整的接触迹外, 还存在随啮合时间变化的数目不等的不完整接触迹。且由于弹性变形的影响, 这些不完整的接触迹的承载面积随啮合时间发生变化。尽管在啮合刚度计算中, 已

考虑了这种不完整接触迹对刚度的影响^[2],但为了计算各接触迹之间的平均载荷分配而考虑同时参与啮合的接触迹数目时,这些不完整接触迹数也是不容忽视的。文献[5]引入了接触迹系数 $K_{\Delta\epsilon}$ 来考虑重合度尾数 $\Delta\epsilon$ 所导致的接触迹数目变化对双圆弧齿轮承载能力的影响。由此,可得同时参与啮合的各接触迹在 j 瞬时所承受的平均作用力为:

$$f_{jm}(t) = F_j(t) / (2\mu\epsilon + K_{\Delta\epsilon})$$

(6)

4 螺旋角、重合度、静载荷等对接触迹间载荷分配系数的影响

基于上述分析计算双圆弧齿轮接触迹间载荷分配状况的原理和方法,我们编制了相应的计算软件。应用该软件通过对七组不同参数的GB12759- 91 型其传动进行计算来研究双圆弧齿轮接触迹间载荷分配状况的变化情况。

计算齿轮参数为: 中心距 $a= 150\text{ mm}$, 模数 $m_n= 4\text{ mm}$, 传动比 $i= 1.0$, 其它参数如表 1。

表 1 计算齿轮参数

齿轮编号	1	2	3	4	5	6	7
螺旋角	16°15'35"	21°02'22"	24°57'05"	28°21'27"	31°25'26"	34°14'32"	36°52'12"
齿数 z_2/z_1	36/36	35/35	34/34	33/33	32/32	31/31	30/30

4.1 螺旋角对接触迹间载荷分配系数的影响

当保持齿轮传动的重合度 $\epsilon_\beta= 1.5$ 、精度 7 级不变的条件下,通过对表 1 齿轮参数的计算来研究螺旋角和输入扭矩 T_1 变化对双圆弧齿轮接触迹间载荷分配系数 K_1 的影响。

计算结果如图 1 所示。通过分析发现,在相同的精度和重合度下,(1)螺旋角相同时,载荷增大, K_1 的值降低是比较明显的。(2)载荷相同时,接触迹间载荷分配系数 K_1 随螺旋角的增大呈单峰状变化趋势。当螺旋角较小时, K_1 值随螺旋角的增大而增大;尔后随着螺旋角的进一步增大, K_1 值呈缓慢下降的趋势。

4.2 重合度(齿宽)、静载荷对接触迹间载荷分配系数的影响

在保持计算齿轮其它几何参数不变的条件下,通过改变重合度来分别研究齿轮的精度、所传递的静载荷等变化对双圆弧齿轮接触迹间载荷分配系数 K_1 的影响。限于篇幅,本文只给出了第一组计算齿轮参数下的相关计算结果。图 2 是当输入扭矩 T_1 为 $600\text{ N}\cdot\text{m}$, 齿轮精度为 6~8 级时,重合度和齿轮精度变化对接触迹间载荷分配系数 K_1 的影响曲线;图 3 是保持齿轮精度为 7 级,而输入扭矩 T_1 分别为 $400\text{ N}\cdot\text{m}$, $600\text{ N}\cdot\text{m}$ 及 $800\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,重合度和所传递的扭矩变化对其接触迹间载荷分配系数 K_1 的影响情况。对本文的七组不同参数齿轮的计算结

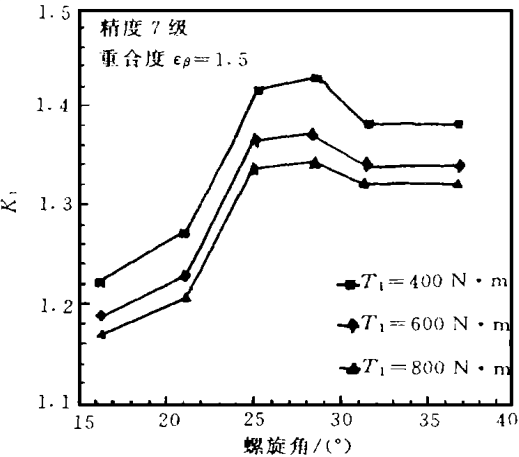


图 1 螺旋角对 K_1 的影响

果表明: (1) 相同精度和载荷下, 随着重合度(齿宽)的增大, 齿轮的接触迹间载荷分配系数 K_1 的值是增大的。(2) 在重合度(齿宽)和载荷相同时, 齿轮精度越低, 导致接触迹之间的载荷分配愈不均匀, 从而使得 K_1 值上升。(3) 在相同的重合度、精度下, 增大齿轮传递的静载荷有利于各接触迹之间载荷的均匀分配, 使得 K_1 值下降。

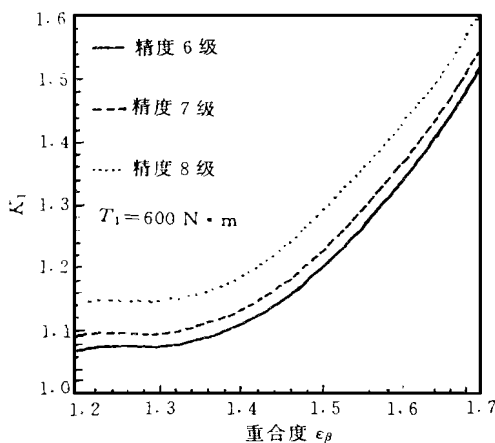


图 2 重合度、精度对 K_1 的影响

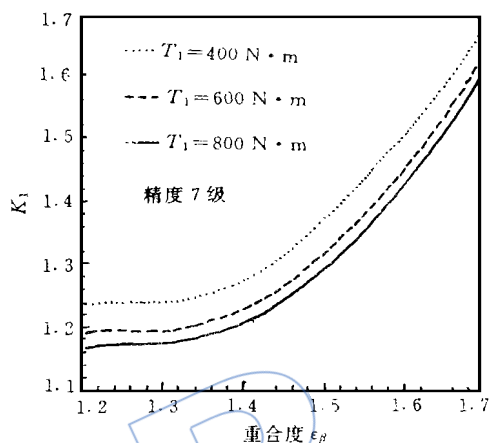


图 3 重合度、静载荷对 K_1 的影响

最后, 在保持输入扭矩、齿轮精度不变时, 通过分别改变齿轮转速、重合度和螺旋角来分析齿轮运转速度的变化对其接触迹间载荷分配系数 K_1 的影响。结果表明, 在常规转速范围内, 齿轮运转速度的高低对接触迹间的载荷分配状况几乎没有影响, 即对 K_1 没有影响。

5 结 论

本文提出了研究双圆弧齿轮接触迹间载荷分配状况的动态计算分析方法, 并编制了相应的计算机软件。其中考虑了齿轮的制造和安装误差、轮齿的受力变形和动态啮合力等因素的影响。通过对影响双圆弧齿轮接触迹间载荷分配系数 K_1 的主要因素进行分析计算发现: (1) 在载荷一定时, 相同精度下, 随着齿宽(重合度)的增大, 双圆弧齿轮的接触迹间载荷分配系数 K_1 也随之增大。(2) 在其它条件不变时, 齿轮的精度越低, 导致参与啮合的各接触迹之间的载荷分配愈不均匀, 从而使得 K_1 值增大。(3) 增大齿轮所传递的静载荷, 有利于接触迹之间载荷的均匀分配, 使得 K_1 值下降。(4) 在常规转速范围内, 齿轮运行速度的变化对 K_1 的值没有影响。

参 考 文 献

- 1 GB/T 13799- 92. 双圆弧圆柱齿轮承载能力计算方法. 北京: 中国标准出版社, 1993
- 2 Wu Baolin, et al. Theoretical Investigation on Meshing Vibration of W- N Gearing. Proc. of International Conference on Mechanical Transmissions and Mechanisms, Tianjin, China, 1997: 668- 671
- 3 武宝林. 双圆弧齿轮振动特性的理论和试验研究. [博士学位论文]: 中国矿业大学北京研究生部, 1997
- 4 Litvin F L, et al. Computerized Design and Generation of Low- Noise Helical Gears with Modified Surface Topology. ASME E. J. of Mechanical Design, 1995, 117(2): 254- 261
- 5 陈荣增等. 双圆弧齿轮的接触迹系数 $K_{\Delta c}$ 和齿端系数 K_{End} . 齿轮, 1989, 13(1): 1- 9, 33

and the boundary layer thickness and main velocity for internal flow more accurately than the two equation turbulence model. Therefore the "two layer" model is a powerful tool in engineering.

Key Words Turbulence Modelling Computational fluid mechanics

NUMERICAL SIMULATION OF ANTI- SWIRL ARRANGEMENTS FOR SUPPRESSING ROTOR/ SEAL INSTABILITY

He Lidong

(№703 *Research Institute of China Shipbuilding Co. , Harbin 150036*)

ABSTRACT A nonlinear oscillator model, which is usually used to study the dynamic characteristics of structures in flow, has been applied to the nonlinear dynamic characteristics of rotor/seal system. Emphasis is put on the effects of the nonlinear unsteady flow in the small clearance on the rotor dynamic characteristics. The mechanism of anti- swirl arrangements for suppressing rotor/seal instability is considered. The comparison between the theoretical and experimental results of a rotor/seal system is in a reasonable agreement and shows that this method provides a theoretical basis for application of anti- swirl technique to engineering practices.

Key Words Rotors Sealing Nonlinear vibration Numerical simulation

INVESTIGATION ON LOAD DISTRIBUTIONS AMONG CONTACT BEARINGS OF DOUBLE CIRCULAR ARC HELICAL GEARS

Wu Baolin and Shao Jiahui

(*Gear Research Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan*)

Meng Huirong

(*China University of Mining and Technology*)

ABSTRACT A dynamic analysis approach is provided to investigate the load distributions among contact bearings of double circular arc helical gears and a computer program is worked out for calculating the load distributions. The dependences of load distribution variation on the main factors are analyzed through a series of parametric studies. It can be concluded that the variation of the rotational speed of the gears has no effect on the load distribution factor in conventional range of rotational speed; However, the load distribution factor can be reduced by decreasing the contact ratio, increasing the transmitted torque as well as improving the gear accuracy; the load distribution factor has a peak which changes with the increase in the helix angle at the same transmitted torque and contact ratio.

Key Words Wildhaber- Novikov gears Load distribution Dynamics