

文章编号: 1000-8055(2000)01-0075-03

弧齿锥齿轮加工参数的全局优化设计

田行斌 方宗德

(西北工业大学 十系, 陕西 西安 710072)

摘要: 本文通过局部综合法对齿面一阶和二阶接触参数进行预控, 在此基础上, 全面考虑了齿轮副在小端、中部、大端啮合时的接触印痕和传动误差, 通过对可选加工参数的优化设计, 消除了齿轮副的三阶接触缺陷, 从而实现了弧齿锥齿轮副啮合质量的全局控制。

关键词: 弧齿锥齿轮; 优化; 加工参数

中图分类号: TH 132. 416

文献标识码: A

1 前言

航空用弧齿锥齿轮副的啮合质量至关重要。弧齿锥齿轮副的啮合质量通常用接触印痕和传动误差来衡量。鉴于高可靠性的要求, 在实际生产中, 对齿轮副在小端、中部、大端啮合时的接触印痕一般都有一定的要求。为此, 常常需要操作人员多次进行机床调整、试切、滚检等步骤, 费时费力, 且依赖于操作人员的经验。然而即便如此, 由于实际生产中缺乏对传动误差的检测手段, 仅满足接触印痕要求的齿轮副在实际使用中仍未必能达到预定的要求。因此, 全面控制接触印痕和传动误差是提高弧齿锥齿轮副可靠性的关键。

本文采用局部综合法进行弧齿锥齿轮加工参数设计。该方法能严格保证预定的齿面一阶和二阶接触参数。在此基础上, 本文全面考虑了齿轮副在小端、中部、大端啮合时的接触印痕和传动误差, 并通过对可选加工参数的优化设计, 有效消除了齿轮副的三阶接触缺陷, 从而实现了弧齿锥齿轮副啮合质量的全局控制。

2 局部综合法

局部综合法是由 Litvin 教授提出并完善的^[1]。本文简述此处应用基本步骤^[2]: (1) 按切齿

调整卡确定大轮的加工参数, 并在大轮齿面上指定参考点的位置, 即预定齿面的一阶接触参数。(2) 根据产形轮和被加工大轮啮合时的线接触条件, 由大轮加工参数和产形轮与被加工大轮间的相对运动关系求得大轮齿面上参考点处的主曲率和主方向。(3) 根据小轮和大轮啮合时的点接触条件, 预定参考点处接触迹线的方向角、瞬时接触椭圆长轴长度和大轮相对于小轮的角加速度的值, 即预定齿面的二阶接触参数, 求得小轮齿面上参考点处的主曲率和主方向。(4) 根据产形轮和被加工小轮啮合时的线接触条件, 由小轮参考点处的主曲率和主方向的值, 确定小轮的加工参数。

3 弧齿锥齿轮加工参数的优化设计

按该法所得加工参数加工成弧齿锥齿轮副的齿面一阶和二阶接触参数能够被严格保证。但是, 齿轮副的三阶接触参数(参考点处的二阶接触参数在齿面相对滚动过程中及 v/H 检验时的变化率)并没有得到控制, 因此, 齿轮副仍有可能出现诸如菱形接触、鱼尾接触、S 形传动等三阶接触缺陷, 还应通过优化设计加工参数来避免。

3.1 优化变量

在局部综合过程中, 保证齿面的一阶和二阶接触参数所需的加工参数少于加工设备所能提供

收稿日期: 1999- 02- 08; 修订日期: 1999- 04- 26

基金项目: 航空科学基金资助项目(96C53037)

作者简介: 田行斌(1972-), 男, 西北工业大学, 博士研究生



的调整参数, 这才能通过对剩余参数的调整来实现优化过程。对于采用磨齿工艺加工的弧齿锥齿轮副, 可选的加工参数为小轮刀具齿形角、展成参考点时小轮滚比的一阶导数。

3.2 目标函数

通常认为理想的齿面接触情况是: 接触迹线是一根直线并近似与根锥垂直, 每一个瞬时接触椭圆的长轴大致相等, 并有相同的方向, 运动曲线呈中凸的抛物线形而且能够相交。为达到这个目标, 可通过三阶接触分析来进行优化方法设计^[3]。但该方法在齿面接触斑点较大时, 可能达不到理想的效果。本文采用如下方法来构造目标函数:

(a) 求参考点啮合时大、小轮的接触信息: 在固定坐标系中, 设: 大轮的齿面方程为 $\vec{r}_2(\theta, \varphi, \psi_2)$, 法线方程为 $\vec{n}_2(\theta, \varphi, \psi_2)$, 其中 θ 和 φ 为大轮齿面曲面坐标, ψ_2 为大轮转角。小轮的齿面方程为 $\vec{r}_1(\theta, \varphi, \psi_1)$, 法线方程为 $\vec{n}_1(\theta, \varphi, \psi_1)$, 其中 θ 和 φ 为小轮齿面曲面坐标, ψ_1 为小轮转角。大、小轮连续接触应满足如下条件:

$$\left. \begin{aligned} \vec{r}_1(\theta, \varphi, \psi_1) &= \vec{r}_1(\theta, \varphi, \psi_2) \\ \vec{n}_1(\theta, \varphi, \psi_1) &= \vec{n}_1(\theta, \varphi, \psi_2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

参考点啮合时, 两齿面满足啮合方程:

$$\vec{n} \cdot \vec{v}^{(12)} = 0 \quad (2)$$

且此时传动比等于理论值, 即有: $\omega^{(2)}/\omega^{(1)} = N_1/N_2$ 其中 N_1 和 N_2 分别为小、大轮齿数。

(1) 式中两个矢量方程包含了 6 个标量方程, 由于 $\vec{n}_1$ 和 $\vec{n}_2$ 是单位矢量, 故独立的方程数为 5 个。(2) 式为一标量方程。将(1)式与(2)式联立, 可解得所有 6 个未知数: $\theta_0, \varphi_0, \psi_{10}, \theta_{20}, \varphi_{20}$ 和 ψ_{20} 。进而可由大轮齿面上的点 $\vec{r}_2(\theta_0, \varphi_0, \psi_{20})$ 经锥面展开法变换得到大轮齿面二维旋转投影图上的点的位置 (X_0, Y_0) , 并求得该点处瞬时接触椭圆长轴的长度 A_0 , 而该点处的传动误差为 0。

(b) 求有效边界内大、小轮的接触迹线终点处的接触信息: 在两相配齿面的有效边界内, 接触迹线分别起止于两齿轮的齿顶处。当两齿轮在大轮的齿顶处接触时, 仍有(1)式成立。此外, 还有下列方程成立:

$$\delta_{02} = \tan^{-1} \left[\sqrt{y_2^2 + z_2^2} / (x_2 + f_2) \right] \quad (3)$$

式中 δ_{02} 为大轮面锥角, (x_2, y_2, z_2) 为在与大轮固连的坐标系中的大轮齿面上点的三维坐标值, f_2 为大轮节锥顶点到面锥顶点的距离。将(1)式与(3)式联立, 又可解得 6 个未知数: $\theta_{01}, \varphi_{01}, \psi_{11}, \theta_{21}, \varphi_{21}$ 和 ψ_{21} 。进而可由大轮齿面上的点 $\vec{r}_2(\theta_{01}, \varphi_{01},$

$\psi_{21})$ 经锥面展开法变换得到大轮齿面二维旋转投影图上的点的位置 (X_{01}, Y_{01}) , 并求得该点处瞬时接触椭圆长轴的长度 A_{01} , 而该点处的传动误差为: $\epsilon_1 = (\psi_{21} - \psi_{20}) - (N_1/N_2)(\psi_{11} - \psi_{10})$ 。同理, 两齿轮在小轮的齿顶处接触时, 有下列方程成立:

$$\delta_{01} = \tan^{-1} \left[\sqrt{y_1^2 + z_1^2} / (x_1 + f_1) \right] \quad (4)$$

式中 δ_{01} 为小轮面锥角, (x_1, y_1, z_1) 为在与小轮固连的坐标系中的小轮齿面上点的三维坐标值, f_1 为小轮节锥顶点到面锥顶点的距离。将(1)式与(4)式联立, 也可解得 6 个未知数: $\theta_{02}, \varphi_{02}, \psi_{12}, \theta_{22}, \varphi_{22}$ 和 ψ_{22} 。在此基础上, 由大轮齿面上的点 $\vec{r}_2(\theta_{02}, \varphi_{02}, \psi_{22})$ 经锥面展开法变换得到大轮齿面二维旋转投影图上的点的位置 (X_{02}, Y_{02}) , 并求得该点处瞬时接触椭圆长轴的长度 A_{02} , 而该点处的传动误差为: $\epsilon_2 = (\psi_{22} - \psi_{20}) - (N_1/N_2)(\psi_{12} - \psi_{10})$ 。

(c) 求出大、小轮在 V/H 检验时的接触信息: V/H 检验是生产实践中常用的检验齿轮副啮合质量的一种方法。当调整 V/H 值使齿轮副在大轮齿面小端中点共轭接触时, 设小端中点在旋转投影图上的位置为 (X_{00}, Y_{00}) , 则有:

$$x_2 = X_{00}, \quad \sqrt{y_2^2 + z_2^2} = Y_{00} \quad (5)$$

可由(5)式解得大轮齿面上小端中点处的曲面坐标 $\theta_{00}, \varphi_{00}$ 。又有:

$$\left. \begin{aligned} \vec{r}_1 - \vec{r}_2 &= f(\theta, \varphi, \psi_1, \psi_2, V, H) \\ \vec{n}_1 - \vec{n}_2 &= f(\theta, \varphi, \psi_1, \psi_2) \\ \vec{n} \cdot \vec{v}^{(12)} &= f(\theta, \varphi, \psi_1, \psi_2, V, H) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(6) 式中共有 6 个方程, 可解得: $\theta_{00}, \varphi_{00}, \psi_{10}, \psi_{20}, V_{00}$ 和 H_{00} 六个未知数, 在此基础上, 可求得小端中点处瞬时接触椭圆长轴的长度 A_{00} , 而该点处的传动误差为 0。在此条件下, 重复(b)中的过程, 可求得齿轮副在小端啮合时, 接触迹线终点处的接触信息。计有: 在大轮齿顶接触时齿面旋转投影图上的点的位置 (X_{01}, Y_{01}) 、该点处瞬时接触椭圆长轴长度 A_{01} 及传动误差 ϵ_{01} ; 在小轮齿顶接触时齿面旋转投影图上的点的位置 (X_{02}, Y_{02}) 、该点处瞬时接触椭圆长轴长度 A_{02} 及传动误差 ϵ_{02} 。同理, 求得齿轮副在大端啮合时的接触信息, 计有: $(X_{h0}, Y_{h0}), A_{h0}; (X_{h1}, Y_{h1}), A_{h1}, \epsilon_{h1}; (X_{h2}, Y_{h2}), A_{h2}, \epsilon_{h2}$ 。

至此, 求得了齿面上共 9 点处的接触信息, 据此可形成目标函数进行优化, 以消除三阶接触缺陷。如: 取 $|A_{01} - A_{00}| + |A_{02} - A_{00}|$ 最小, 可避免菱形接触; 取 $|X_{01} - X_{00}| + |X_{02} - X_{00}|$ 最小, 可避免鱼尾接触; 对于航空齿轮, 为了尽可能地减少在载荷作用下产生边缘接触的可能性, 可取 $|\epsilon_1 - \epsilon_2| + |\epsilon_{01}$

- ϵ_2 | + | $\epsilon_1 - \epsilon_2$ | 最小为目标函数等等。实际应用中, 可将多个目标加权求和后得到目标函数。本文

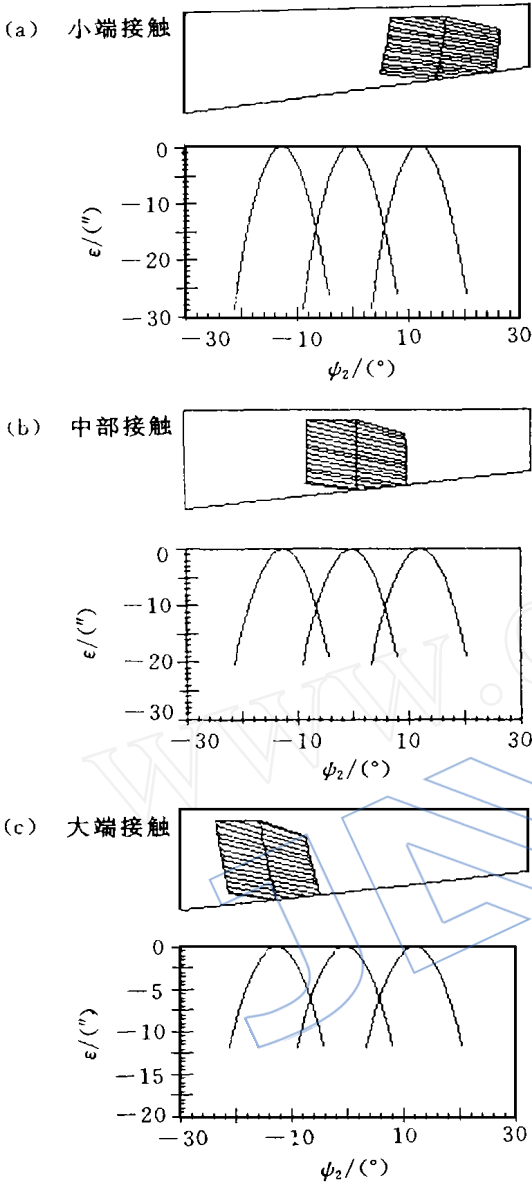


图 1 齿轮副在不同安装误差下的接触印痕与传动误差

算例中, 为简明起见, 取目标函数如下:

$$\min: |A_1 - A_0| + |A_2 - A_0| + |X_1 - X_0| + |X_2 - X_0| + |\epsilon_1 - \epsilon_2| + |\epsilon_1 - \epsilon_2|$$

3.3 优化方法及结果

根据优化变量和目标函数的性质, 采用轮流坐标搜索法^[4]进行优化。计算实例显示, 小轮刀具齿形角的改变, 主要对接触椭圆长轴长度影响较大, 即该优化变量对避免菱形接触作用较大, 而展成参考点时小轮滚比的一阶导数改变, 主要对接触路径及传动误差曲线的形状影响较大, 即该优化变量对避免鱼尾接触及 S 形传动作用较大。图 1 所示为采用本优化过程对某航空齿轮进行设计得到的 TCA 结果。上边依次为大端、中点、小端处的接触印痕图, 下边为相应的传动曲线图。由图中可以看出, 优化结果是较为满意的。

4 结 论

本文采用局部综合法进行弧齿锥齿轮加工参数设计, 在保证预定的齿面一阶和二阶接触参数的前提下, 通过对可选加工参数优化设计, 来消除齿轮副的三阶接触缺陷, 使弧齿锥齿轮副试切调整过程大为简化, 并可可靠地保证了其啮合质量。

参 考 文 献

- 1 Litvin F L. Gears Geometry and Applied Theory[M]. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall, 1994
- 2 方宗德, 杨宏斌. 准双曲面齿轮的优化切齿设计[J]. 汽车工程, 1998, 20(5): 302- 307
- 3 王小椿, 吴序堂. 弧齿锥齿轮和双曲线齿轮的三阶接触分析和优化切齿计算[J]. 齿轮, 1989, 13(2): 1- 10
- 4 王庆凯, 王肇明. 优化与最优控制中的计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 1986

(责任编辑 王震华)

Overall Optimization on Machine- Tool Settings of Spiral Bevel Gears

Tian Xingbin, Fang Zongde

(10th Dept Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract The first and second order contact parameters of a spiral bevel gear drive are precontrolled by using the local synthesis method. Considering the contact pattern and transmission errors on toe, middle, heel contacts, the third order contact shortcomings are eliminated by optimizing the machine- tool settings. The overall control of engagement quality is realized.

Key words: spiral bevel gear; optimization; machine- tool settings