

文章编号:1000-8055(2012)05-1159-07

采用碟形砂轮的面齿轮磨齿方法理论分析

彭先龙¹, 方宗德¹, 苏进展¹, 裴杉杉²

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072;

2. 中国兵器工业集团公司 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘 要: 为了制造出高精度硬齿面齿轮和获得抛物线传动误差并提高传动稳定性, 提出一种采用碟形砂轮加工面齿轮的磨齿方法. 分析了碟形砂轮磨削面齿轮的展成原理和碟形砂轮的运动, 根据展成原理推导了碟形砂轮的齿面方程, 使用渐开线失配的碟形砂轮和改变砂轮的运动, 推导出双向修形面齿轮的齿面方程. 建立了双向修形面齿轮和常规渐开线小齿轮啮合的齿面接触分析模型. 齿面计算和齿面接触分析实例表明, 采用碟形砂轮加工双向修形面齿轮的磨齿方法是可行的, 获得了面齿轮抛物线传动误差, 避免了边缘接触并提高了传动的稳定性.

关 键 词: 面齿轮; 碟形砂轮; 磨削; 展成; 修形; 齿面接触分析

中图分类号: V261.2⁺7; TH132.41

文献标志码: A

Theory analysis for application grinding disk in face gear grinding

PENG Xian-long¹, FANG Zong-de¹, SU Jin-zhan¹, PEI Shan-shan²

(1. School of Mechanical Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering,

China North Industries Group Corporation, Xianyang Shanxi 712099, China)

Abstract: A method of tooth grinding for face gear machining by using grinding disk was proposed with the purpose to manufacture hardened face gear with high precision and obtain parabolic transmission errors and increase transmission stability. The generation theory and grinding disk motion of face gear abraded by grinding disk were analyzed, the surface equation of grinding disk was deduced according to the generation theory, and the double crowned tooth surface equation of face gear was derived based on using grinding disk with mismatch involute and modified movement of grinding disk. The model of tooth contact analysis of double crowned face gear meshing with traditional involute pinion was established. Instances of tooth surface calculation and tooth contact analysis indicate that the method of gear grinding applied to manufacture double crowned face gear through grinding disk is feasible, parabolic transmission errors of face gear can be obtained, edge contact is avoided and is enhanced the stability of transmission.

Key words: face gear; grinding disk; grinding; generation; modification; tooth contact analysis

收稿日期: 2011-06-23; **网络出版地址:** www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120525.1516.201205.1159_028.html

基金项目: 国家自然科学基金(50875211)

作者简介: 彭先龙(1982—), 男, 安徽安庆人, 博士生, 主要从事机械传动方面的研究.

面齿轮传动用于直升机的主传动系统,能减轻齿轮箱质量并提高承载能力^[1],且可以简化分流-汇流传动结构^[2].

面齿轮的加工方法有插齿^[1,3-6]、蜗杆滚刀滚齿和蜗杆砂轮磨齿^[4,7-8]等加工技术.由于插齿加工的面齿轮齿面精度较低,不能用于航空面齿轮传动;蜗杆刀滚切、磨削面齿轮加工效率高,但蜗杆齿面受奇异性影响,会导致某些参数的插齿刀不存在对应蜗杆,且滚刀或砂轮制造复杂,砂轮磨损后的修整困难,另外利用蜗杆砂轮磨齿原理磨削面齿轮,其设备与刀具非常复杂,国内目前难于实现.

至今国内外只有格林森公司的 Hermann 论述过碟形砂轮磨削面齿轮的方法^[9].采用碟形砂轮磨削面齿轮具有砂轮结构简单、设计制造和修整方便且不受面齿轮设计参数限制的优点.

为了获得面齿轮传动的稳定性和避免边缘接触,通常对小齿轮实行双修形^[10-13],这会使接触椭圆长轴的长度大幅减小.用碟形砂轮磨削面齿轮可以在不降低加工效率的条件下方便地对面齿轮实行双向修形,面齿轮双向修形对接触椭圆长轴长度的影响较小,这对重载面齿轮传动来说有重要意义.

因此本文主要论述碟形砂轮磨削面齿轮的磨齿方法和用碟形砂轮对面齿轮实行双向修形.

1 碟形砂轮磨齿原理

1.1 面齿轮磨齿展成运动

碟形砂轮加工面齿轮的磨齿原理如图 1 所示.图中面齿轮 1 与虚拟插齿刀 2 啮合,虚拟插齿刀 2 同时与碟形砂轮 3 啮合,因此碟形砂轮能够与面齿轮正确啮合.在加工过程中,面齿轮绕其回转轴 z_2 旋转,同时砂轮绕 z_1 悬摆, z_1 重合于虚拟插齿刀轴线,砂轮的悬摆模拟了插齿刀的回转运动,这就是面齿轮磨齿的展成运动.砂轮悬摆速度 ω_1 ,悬摆角度 φ_1 与面齿轮转速 ω_2 和转角 φ_2 须满足式(1).

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{N_s}{N_2} = m_{2s} \quad (1)$$

式中 N_s, N_2, m_{2s} 分别是虚拟插齿刀的齿数,面齿轮的齿数和虚拟插齿刀与面齿轮的传动比.

1.2 磨齿切削运动和进给运动

为了应用展成原理磨削面齿轮,所用碟形砂轮的法截面齿廓 Σ_g 应该与虚拟插齿刀的端面齿

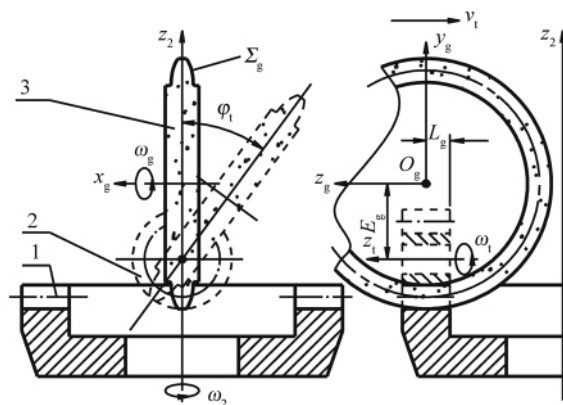


图 1 碟形砂轮磨削面齿轮原理

Fig. 1 Theory of grinding face gear by grinding disk

廓 Σ_s 相同,这样碟形砂轮与虚拟插齿刀之间形成了线接触,设其接触线为 L_{sg} .而虚拟插齿刀齿面 Σ_s 与面齿轮齿面 Σ_2 的啮合也是线接触,令其接触线为 L_{s2} .那么碟形砂轮 Σ_g 与面齿轮 Σ_2 的接触点是 L_{sg} 与 L_{s2} 的交点,碟形砂轮与面齿轮在每个瞬时是点接触.

由于 Σ_g 和 Σ_2 间的点接触,因此碟形砂轮悬摆一次只能切出面齿轮上的一个带状区域,要切出面齿轮的整个齿面,碟形砂轮的圆心 O_g 需要做平行于虚拟插齿刀轴线的往复移动 v_t ,以在面齿轮上形成一序列带状区域,由这些带状区域构成面齿轮的整个齿面.砂轮中心的往复运动就是进给运动,它独立于展成运动.

碟形砂轮磨削面齿轮的切削运动是砂轮绕其回转轴 x_g 的高速自转 ω_g ,它独立于展成运动和进给运动.

当切削完一个齿面后,面齿轮分度,切削下一个轮齿,实行逐齿加工,完成面齿轮所有轮齿的磨削.

据上述论述可知,采用碟形砂轮磨削面齿轮也是双参数包络法.但它不同于蜗杆砂轮磨削面齿轮,蜗杆砂轮磨削面齿轮的展成运动、进给运动和切削运动是相互关联的.而碟形砂轮磨削面齿轮的展成运动、进给运动和切削运动是相互独立的.因此采用碟形砂轮磨削面齿轮所用机床的传动链可以进一步简化.

2 小齿轮和碟形砂轮的齿面方程

2.1 齿条方程

直齿面齿轮传动由直齿圆柱小齿轮和面齿轮

组成. 面齿轮在实际加工中需经粗加工和精加工, 文中只讨论精加工, 即碟形砂轮磨齿. 据上文碟形砂轮的齿面需要用虚拟插齿刀的齿面来表示. 用于范成加工小齿轮和虚拟插齿刀的齿条齿廓如图2所示.

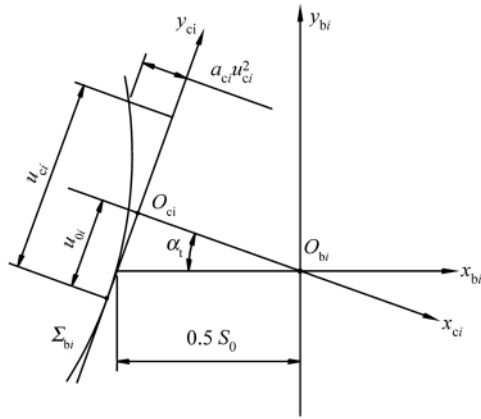


图2 齿条刀抛物线齿廓

Fig. 2 Rack-cutter of parabolic profile

坐标系 S_{ci} , S_{bi} 均位于齿条刀的端截面内, $i=1, s$ 分别指定用于加工小齿轮和虚拟插齿刀的坐标系或齿面参数. $S_0 = \pi m/2$ 为齿条分度线处的齿槽宽, α_t 是齿条端面压力角, u_{ci} 为齿条齿面参数, a_{ci} 是齿条修形系数, 其绝对值反映了修形程度, 当其值等于 0 时, 可以范成常规非修形齿轮, u_{0i} 是抛物线与直齿廓切点的位置参数, 可以控制共轭接触点在齿面上的位置. 齿条齿面 Σ_{bi} 在坐标系 S_{bi} 中可以由式(2)和式(3)表示.

$$R_{ci}(u_{ci}, l_{ci}) = [a_{ci}u_{ci}^2 \quad u_{ci} - u_{0i} \quad l_{ci} \quad 1]^T \quad (2)$$

$$R_{bi}(u_{ci}, l_{ci}) = M_{bici} \cdot R_{ci} \quad (3)$$

式中 l_{ci} 是沿齿条长度方向的齿面参数, M_{bici} 是坐标系 S_{ci} 到坐标系 S_{bi} 的坐标变换矩阵. 齿条的单位法矢为

$$n_{bi}(u_{ci}, l_{ci}) = \frac{\partial R_{ci}}{\partial u_{ci}} \times \frac{\partial R_{ci}}{\partial l_{ci}} \bigg/ \left| \frac{\partial R_{ci}}{\partial u_{ci}} \times \frac{\partial R_{ci}}{\partial l_{ci}} \right| \quad (4)$$

2.2 小齿轮和虚拟插齿刀的齿面方程

虚拟插齿刀和小齿轮的齿面 Σ_s, Σ_l 可以分别由齿条齿面 Σ_{bs}, Σ_{bl} 包络而成, 如图3所示. 图3中的圆和坐标轴 x_{bi} 分别重合于齿轮的分度圆和齿条的分度线, S_{bi}, S_i 分别与齿条和齿轮固联, S_n 是固定坐标系, $\phi_i, \phi_i r_{pi}$ 分别是齿轮的转角和齿条的位移, r_{pi} 是齿轮分度圆的半径. 由此小齿轮或虚拟插齿刀在坐标系 S_i 中的齿面方程可以由式(5)和啮合方程式(6)联立表示.

$$R_i(u_{ci}, l_{ci}, \phi_i) = M_{ibi}(\phi_i) \cdot R_{bi}(u_{ci}, l_{ci}) \quad (5)$$

$$f(u_{ci}, l_{ci}, \phi_i) = n_{bi}(u_{ci}, l_{ci}) \cdot v_{bi}^{ibi} = 0 \quad (6)$$

式中 M_{ibi} 是坐标系 S_{bi} 到坐标系 S_i 的坐标变换矩阵, v_{bi}^{ibi} 是坐标系 S_{bi} 中齿条齿面 Σ_{bi} 和齿轮齿面 Σ_i 接触点的相对速度. 齿轮齿面法矢为

$$n_i(u_{ci}, l_{ci}, \phi_i) = L_{ibi}(\phi_i) \cdot n_{bi}(u_{ci}, l_{ci}) \quad (7)$$

式中 L_{ibi} 由删除 M_{ibi} 最后一行和最后一列得到.

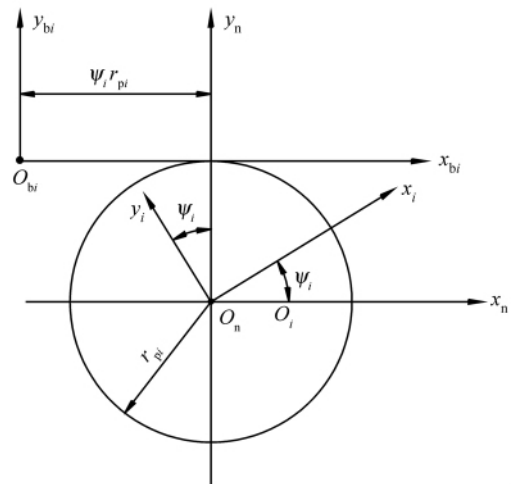


图3 小齿轮和插齿刀展成坐标系

Fig. 3 Coordinate system of pinion and shaper generation

2.3 碟形砂轮的齿面方程

碟形砂轮是用来加工面齿轮的刀具, 其齿面为一旋转曲面, 它的产形线是当 $z_s = 0$ 时虚拟插齿刀 R_s , 即式(5), 表示的端面截线, 当 a_{cs} 不等于 0 时, 虚拟插齿刀将是非渐开线齿廓, 因此碟形砂轮变成失配渐开线旋转曲面. 确定碟形砂轮齿面 Σ_g 的坐标系如图4所示, 粗实线即为碟形砂轮的产形线. 图4中 S_k 为固定坐标系, 坐标系 S_g, S_s 分别与碟形砂轮和虚拟插齿刀固联. E_g 是虚拟插齿刀和碟形砂轮的中心距, ϕ_g 是砂轮的齿面参数. 令齿条 Σ_{bs} 齿面参数 $l_{cs} = 0$, 在坐标系 S_s 中砂轮的产形线可由式(5)和式(6)表示, 碟形砂轮齿面 Σ_g 位矢及法矢分别由式(8)和式(9)确定.

$$R_g(u_{cs}, \phi_s, \phi_g) = M_{gk}(\phi_g) M_{ks} \cdot R_s(u_{cs}, \phi_s) \quad (8)$$

$$n_g(u_{cs}, \phi_s, \phi_g) = L_{gk}(\phi_g) L_{ks} \cdot n_s(u_{cs}, \phi_s) \quad (9)$$

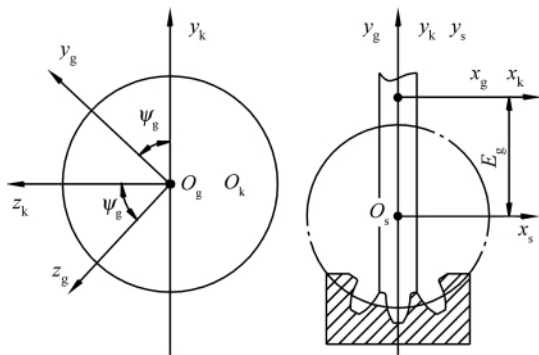


图 4 确定碟形砂轮

Fig. 4 Determination of grinding disk

3 面齿轮齿面方程

3.1 面齿轮的双向修形

面齿轮齿面 Σ_2 由碟形砂轮齿面 Σ_g 包围而成, 图 5 是面齿轮展成坐标系. 坐标系 S_g, S_2 分别与碟形砂轮和面齿轮固联, S_m, S_p 是辅助坐标系, 与机架固联, 动坐标系 S_t 实际上与虚拟插齿刀的坐标系重合 (见图 1). φ_t, φ_2 分别是碟形砂轮和面齿轮的转角, L_g 是碟形砂轮中心位置参数. a_f 齿向抛物线修形系数, δ 齿向修形方向参数, 确定在 x_t 和 y_t 方向的修形量. L_{g0} 为齿向抛物线顶点参数, 用于控制齿面共轭接触点的位置. γ_m 是轴夹角, L_0 是齿宽中点半径.

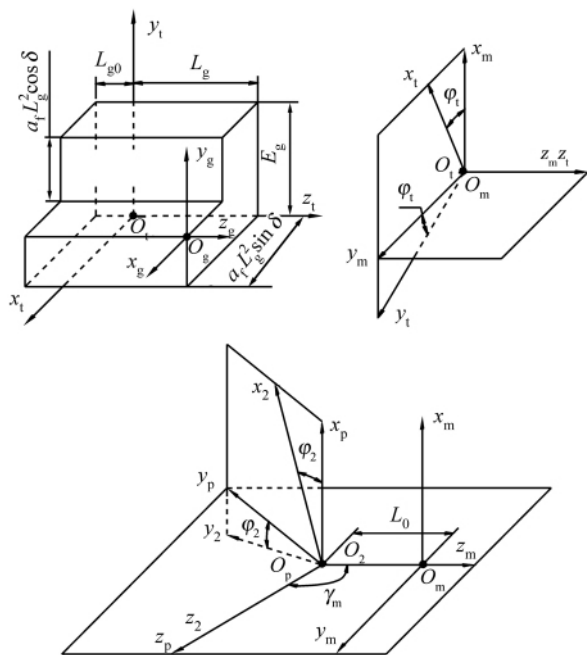


图 5 面齿轮展成坐标系

Fig. 5 Coordinate system for face gear generation

用碟形砂轮加工面齿轮, 面齿轮的双向修形很容易实现. 据上文可由齿条刀对虚拟插齿刀实行齿廓修形, 赵宁等人用有齿廓修形的插齿刀加工面齿轮, 获得齿廓修形的面齿轮^[10]. 而碟形砂轮法截面与虚拟插齿端截面有相同的齿廓, 因此可用碟形砂轮对面齿轮进行齿廓修形.

Stadtfeld, Litivin 等人通过控制碟形砂轮中心的运动来获得直齿圆柱齿轮^[9, 12-13]、斜齿圆柱齿轮的齿向修形. 面齿轮的齿向修形也可以通过控制砂轮中心的运动来获得. 如图 5 所示, 当碟形砂轮的圆心仅做平行于 z_t 轴的直线运动时, 即 $a_f = 0$, 则得到非齿向修形的面齿轮; 当碟形砂轮中心不仅沿 z_t 平移, 而且还在 x_t 或 y_t 方向、或同时在 x_t 和 y_t 方向做抛物线运动, 则得到齿向抛物线修形的面齿轮.

3.2 面齿轮的齿面

坐标系 S_2 中碟形砂轮齿面 Σ_g 的曲面族可以表示为

$$R_2(u_{cs}, \psi_s, \phi_g, \varphi_2, \varphi_t, L_g) = M_{2p}(\varphi_2) M_{pm} \cdot M_{mt}(\varphi_t) M_{tg}(L_g) \cdot R_g(u_{cs}, \psi_s, \phi_g) \quad (11)$$

式中 $M_{tg} \sim M_{2p}$ 是 S_g 到 S_2 的坐标变换矩阵, φ_t, φ_2 满足式(1), 两个运动参数 L_g, φ_t 与碟形砂轮齿面参数 u_{ci}, ϕ_g 则须满足啮合方程式(12)、式(13).

$$f_1(u_{cs}, \phi_g, L_g, \psi_s) = n_g(u_{cs}, \psi_s, \phi_g) \cdot v_g^{Og} = 0 \quad (12)$$

$$f_2(u_{cs}, \phi_g, \psi_s, \varphi_t) = n_g(u_{cs}, \psi_s, \phi_g) \cdot v_g^{g2} = 0 \quad (13)$$

式中 v_g^{Og}, v_g^{g2} 分别是在 S_g 中碟形砂轮中心运动速度和面齿轮与碟形砂轮的相对速度. 式(11)~式(13)表示碟形砂轮在 S_2 中的包络, 也就是面齿轮的齿面方程. 面齿轮的齿面法矢为

$$n_2(u_{cs}, \phi_g, \psi_s, \varphi_t, L_g) = L_{2p}(\varphi_2) L_{pm} L_{mt}(\varphi_t) \cdot L_{tg}(L_g) \cdot n_g(u_{cs}, \psi_s, \phi_g) \quad (14)$$

式中 $L_{tg} \sim L_{2p}$ 由相应矩阵 $M_{tg} \sim M_{2p}$ 删除最后一行和最后一列得到.

4 齿面接触分析(TCA)

齿面接触分析是指对两连续啮合齿面 Σ_1 和 Σ_2 的啮合过程进行计算机模拟, 以获得两齿轮的啮合特性. 用于齿面接触分析的坐标系如图 6 所示, S_1 和 S_2 分别与小齿轮和面齿轮固联, ϕ_1, ϕ_2 是它们的转角. S_f 为固定坐标系, 小齿轮和面齿轮齿面 Σ_1, Σ_2 将在 S_f 中切触. 坐标系 S_e, S_q, S_d 用来模拟安装误差 $\Delta q, \Delta \gamma, \Delta E, B$ 是虚拟插齿刀

与小齿轮分度圆半径之差, $\gamma = \pi - \gamma_m$ 是轴夹角, $\gamma_f = \gamma_m + \Delta\gamma$. 小齿轮和面齿轮齿面位矢和法矢在 S_f 中由式(15)~式(18)表示.

$$R_{2f}(u_{cs}, \psi_s, \phi_g, \varphi_t, L_g, \Phi_2) = M_{fq} M_{qe} \cdot M_{e2}(\Phi_2) R_2(u_{cs}, \psi_s, \phi_g, \varphi_t, L_g) \quad (15)$$

$$n_{2f}(u_{cs}, \psi_s, \phi_g, \varphi_t, L_g, \Phi_2) = L_{fq} L_{qe} \cdot L_{e2}(\Phi_2) n_2(u_{cs}, \psi_s, \phi_g, \varphi_t, L_g) \quad (16)$$

$$R_{1f}(u_{cl}, l_{cl}, \psi_l, \Phi_1) = M_{fl}(\Phi_1) R_1(u_{cl}, l_{cl}, \psi_l) \quad (17)$$

$$n_{1f}(u_{cl}, l_{cl}, \psi_l, \Phi_1) = L_{fl}(\Phi_1) n_1(u_{cl}, l_{cl}, \psi_l) \quad (18)$$

式中 M_{fq}, M_{qe}, M_{e2} 是坐标系 S_2 到 S_f 的坐标变换矩阵, M_{fl} 是坐标系 S_1 到 S_f 的坐标变换矩阵, $L_{fq} \sim L_{fl}$ 由相应矩阵删除最后一行和最后一列得到.

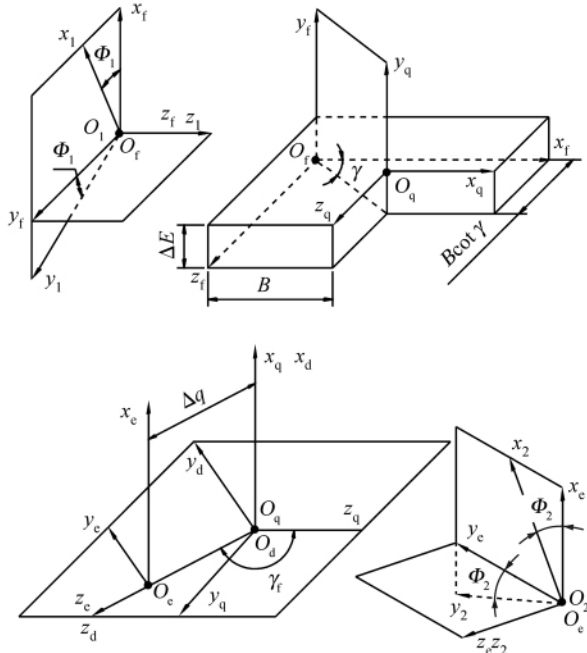


图6 齿面接触分析坐标系

Fig. 6 Coordinate for tooth contact analysis

根据齿轮啮合理论,两齿面上的接触点在固定坐标系 S_f 中位矢和法矢分别相等,即

$$\begin{cases} R_{2f}(u_{cs}, \psi_s, \phi_g, \varphi_t, L_g, \Phi_2) = R_{1f}(u_{cl}, l_{cl}, \psi_l, \Phi_1) \\ n_{2f}(u_{cs}, \psi_s, \phi_g, \varphi_t, L_g, \Phi_2) = n_{1f}(u_{cl}, l_{cl}, \psi_l, \Phi_1) \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中共10个参数,而 ψ_s, ψ_l 满足式(6),可解出 $\psi_i = \psi_i(u_{ci}, l_{ci})$,对于面齿轮 $l_{ci} = 0$,由式(12)可解出 $\phi_g = \phi_g(u_{cs}, L_g, \psi_s)$,由于法矢的模等于1,因此式(19)和式(13)提供6个独立的方程,当选定 Φ_2 做输入参数时,即可解出其他6个参数,获得

面齿轮传动的啮合迹线.

5 算例及分析

5.1 齿面计算

根据上文的推导,编写了面齿轮齿面的MATLAB计算程序.面齿轮的设计参数见表1,计算得到了用碟形砂轮加工面齿轮的数字齿面如图7所示,其齿面与用插齿刀计算得到的面齿轮数字齿面完全相同,这说明了用碟形砂轮磨削面齿轮的可行性.

表1 面齿轮传动设计参数

Table 1 Design parameters of face gear driver

面齿轮传动参数	设计值
小齿轮齿数 N_1	25
虚拟插齿刀齿数 N_s	28
面齿轮齿数 N_2	160
端面压力角 $\alpha_t / (^\circ)$	25
模数 m / mm	6.35
轴夹角 $\gamma_m / (^\circ)$	90
面齿轮内径 L_1 / mm	480
面齿轮内径 L_2 / mm	560
中心距 E_g	200

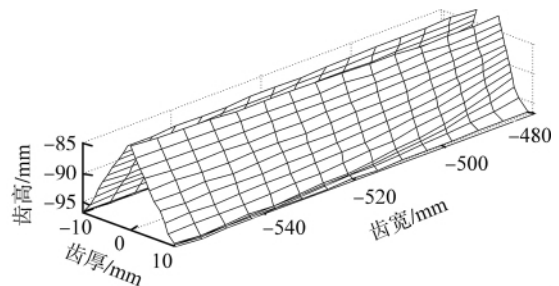


图7 碟形砂轮磨削的面齿轮齿面

Fig. 7 Surface of face gear grinded by grinding disk

5.2 齿面接触分析

根据第4节编写的面齿轮传动齿面接触分析程序.无修形无安装误差的齿面接触印痕如图8(a)所示,无修形有安装误差的齿面接触印痕如图8(b)所示,其安装误差为: Δq 等于 0.15 mm, $\Delta\gamma = 0.01 \text{ rad}$, $\Delta E = 0.4 \text{ mm}$,下文分析中若有安装误差,为便于比较,也取这些数值.

由图8可以看出,采用碟形砂轮加工面齿轮与用插齿刀加工面齿轮的齿面接触特性没有不同,这从另外一个侧面说明两种加工方法获得的

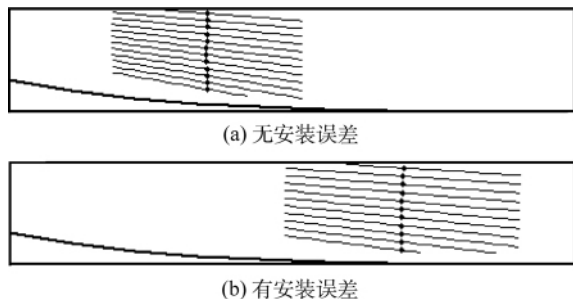


图 8 无修形面齿轮齿面接触印痕

Fig. 8 Contact path of no modification face gear

齿面完全一致. 以下分析三类修形面齿轮传动的啮合性能, 面齿轮修形参数示于表 2.

表 2 面齿轮修形参数

Table 2 Modification parameters of face gear

序号	a_{cs}	$u_{0s}/$ mm	a_t	$L_{g0}/$ mm	$\delta/$ rad
I	-0.0004	2	0	0	0
II	-0.0004	4	-0.00004	40	0
III	-0.0028	0.7	0.00004	-80	$\pi/12$

I 类修形面齿轮只有齿廓修形, 其接触路径如图 9(a) 所示, 修形系数分别取正、负值时, 接触路径则分别向齿面小端和大端倾斜 (限于篇幅此处只给出了一种情况), 并且与常规非修形面齿轮相比, 图 8(a), 齿面在进入啮合到退出啮合接触点数明显增加, 即齿轮重合度增加了. 这时还可以获得抛物线传动误差, 对减小振动有积极意义, 其接触椭圆长轴长度有所减小, 但减小的幅度不大.

I 类修形面齿轮在安装误差下的接触路径如图 9(b) 所示, 与图 9(a) 相比, 安装误差并没有改变修形面齿轮的啮合特性, 只是使接触路径在齿面上做了个平移. 与图 8(b) 相比, 在安装误差下, 由于接触路径发生倾斜, 齿廓修形面齿轮比常规非齿廓修形面齿轮更容易接近边缘接触, 但这种边缘接触可以通过下述方法消除.

图 9(c) 是在安装误差下, II 类修形面齿轮, 即双向修形面齿轮的啮合印痕. 由图 9(c) 可以看出, 安装误差下, 齿廓修形面齿轮的边缘接触, 能够通过面齿轮齿向修形消除, 并且该类修形没有明显减小接触椭圆长轴的长度, 其传动误差是图 10 中较短的抛物线.

III 类修形面齿轮在安装误差下的接触印痕如图 9(d) 所示. 这种修形形式的面齿轮副传动对安

装误差很不敏感, 在一定误差范围内, 能保证有足够的接触点. 但接触椭圆长轴长度过短, 传动误差也较大, 图 10 中较长的抛物线.

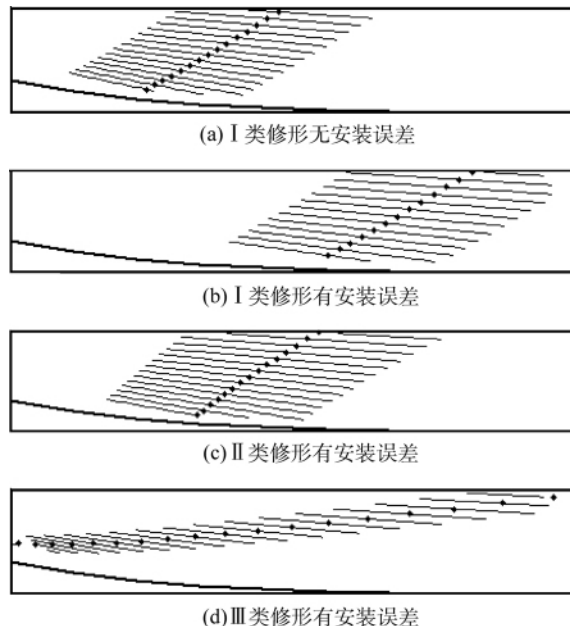


图 9 修形面齿轮啮合印痕

Fig. 9 Contact path of modified face gear

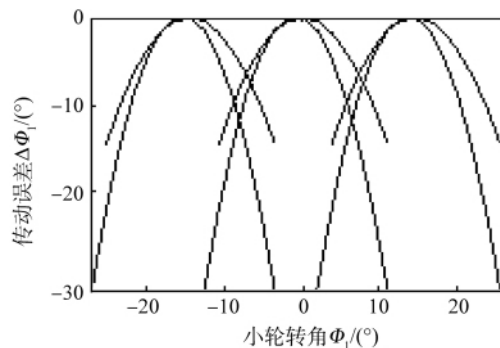


图 10 II 和 III 类修形在安装误差下的传动误差

Fig. 10 Transmission errors in case II and case III with errors of alignment

6 结 论

1) 分析了碟形砂轮加工面齿轮的磨齿原理, 推导了碟形砂轮的齿面方程, 通过坐标变换, 建立了碟形砂轮加工双向修形面齿轮的齿面方程.

2) 编程计算了碟形砂轮加工面齿轮的数字齿面, 碟形砂轮加工面齿轮的数字齿面与插齿加工的数字齿面完全相同.

3) 编程分析了碟形砂轮加工面齿轮的齿面接触状况, 与插齿的齿面接触情况完全一致. 结论 2) 和本结论说明采用碟形砂轮加工面齿轮以获得

高精齿面的磨齿方法是可行的,并为采用碟形砂轮磨削面齿轮提高了理论基础。

4) 通过控制碟形砂轮中心的运动能有效对面齿轮齿面实行双向修形。修形面齿轮传动接触分析表明:双向修形对于面齿轮传动获得抛物线传动误差,消除边缘接触,承受重载,调整啮合印痕位置,提高啮合质量和重合度具有重要意义。

参考文献:

- [1] Litvin F L. Gear geometry and applied theory[M]. New Jersey:PTR Prentice Hall,1994.
- [2] Bill R C. Summary highlights of the advanced rotorcraft transmission (ART) program[R]. AIAA-1992-3362,1992.
- [3] Litvin F L,Fuentes A,Howkins M. Design,generation and TCA of new type of asymmetric face gear drive with modified geometry[J]. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering,2001,190(43-44):5837-5865.
- [4] Litvin F L,Fuentes A. Gear geometry and applied theory [M]. New York:Cambridge University Press,2004.
- [5] 沈云波. 面齿轮传动齿面设计理论及插齿技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2009.
SHEN Yunbo. The design theory of tooth surface and technology of gear shaping of face-gear drive[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University,2009. (in Chinese)
- [6] Litvin F L,Perez I G,Fuentes A,et al. Design,generation, and stress analysis of face-gear drive with helical pinion [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2005,194(36-38):3870-3901.
- [7] 赵宁,曾晓春,郭辉,等. 斜齿面齿轮齿面仿真及其轮齿接触分析[J]. 航空动力学报,2008,23(10):1927-1932.
ZHAO Ning,ZENG Xiaochun,GUO Hui,et al. Tooth contact analysis of face gear drive with helical pinion and simulation of the tooth face[J]. Journal of Aerospace Power, 2008,23(10):1927-1932. (in Chinese)
- [8] 郭辉. 面齿轮滚齿加工方法及其啮合性能研究[D]. 西安:西北工业大学,2009.
GUO Hui. Research on hobbing face-gear and gearing performance[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2009. (in Chinese)
- [9] Stadtfeld H J. Coniface face gear cutting and grinding[EB/OL]. [2011-06-20]. <http://www.gearsolutions.com/article/detail/6020/coniface-face-gear-cutting-and-grinding>.
- [10] 赵宁,曾晓春,郭辉,等. 直齿面齿轮修形及承载接触分析[J]. 航空动力学报,2008,23(11):2142-2146.
ZHAO Ning,ZENG Xiaochun,GUO Hui,et al. Modification and loaded contact analysis of spur face gear[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23 (11): 2142-2146. (in Chinese)
- [11] Zanzi C,Pedrero J I. Application of modified geometry of face gear drive[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2005,194(36-38):3047-3066.
- [12] Litvin F L,Fuentes A,Zanzi C,et al. Design,generation, and stress analysis of two versions of geometry of face-gear drives[J]. Mechanism and Machine Theory,2002,37(10):1179-1211.
- [13] Litvin F L,Fuentes A,Perez I G,et al. Modified involute helical gears: computerized design, simulation of meshing and stress analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2003,192(33-34):3619-3655.