

文章编号: 1000-8055(2010)01-0224-04

弧线齿面齿轮的齿面设计与加工

方宗德¹, 曹雪梅², 沈云波¹

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072;

2. 河南科技大学 机电工程学院, 洛阳 471003)

摘 要: 提出了一种新型弧线齿面齿轮传动及其加工方法, 比直/斜齿形的面齿轮副具有更为优越的传动性能。弧线齿面齿轮传动是一种交错轴弧形齿圆柱齿轮与弧线齿面齿轮相啮合的传动。基于啮合理论, 研究了弧线齿面齿轮副的切削理论以及相应的齿面设计、制造方法; 建立了弧线齿面齿轮的加工模型, 推导了弧线齿面齿轮的齿面方程, 并建立了相应的有限元模型及三维仿真模型。提出了利用常规的格里森刀盘, 在国内已有的数控加工中心或数控齿轮机床上加工弧线齿面齿轮的方法, 制造工艺简单。

关 键 词: 弧线齿面齿轮; 机械传动; 弧线齿圆柱齿轮; 齿面展成法

中图分类号: V232. 8

文献标识码: A

Tooth surface design and manufacture for arcuate tooth trace face-gear

FANG Zong-de¹, CAO Xue-mei², SHEN Yun-bo¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: A new type of face-gear drive with intersected axes of rotation formed by an arcuate tooth trace face-gear and an arcuate tooth trace cylindrical pinion was proposed, which has better meshing performance than the helical and spur involute face-gear drives. An arcuate tooth trace spiral bevel face-gear drive used for transformation of rotation between intersected axes that was consisted of a spiral bevel face-gear and an arcuate tooth trace cylindrical pinion. By applying space engagement theory, the author developed the cutting principle, mathematical model of design and machining for arcuate tooth trace face-gear. The equations of tooth surface of arcuate tooth trace face-gear was deduced and a 3-D model of FEM(finite element method) was established for further analysis. Based on the analysis of the machining method, it is convenient to generating the tooth surface of arcuate tooth trace face-gear by using the common Gleason cutter head with the general multi-axle numerical control machine tool.

Key words: arcuate tooth trace face-gears; power driven;

arcuate tooth trace cylindrical pinion; generation of face-gears

面齿轮传动是一种圆柱齿轮与圆锥齿轮相啮合的齿轮传动。当两轮轴线夹角 $\gamma = 90^\circ$ 时, 圆锥

齿轮的轮齿将分布在一个圆平面上, 锥齿轮即成为面齿轮, 称为面齿轮传动。由于面齿轮副在分

收稿日期: 2008-12-19; 修订日期: 2009-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(50875211); 航空科技创新基金(07B53004)

作者简介: 方宗德(1948 -), 男, 上海人, 教授、博士生导师, 主要研究方向为机械设计及理论、车辆工程先进制造技术。

流/汇流传动中的独特性,使其在航空领域的应用表现出了潜在的优势.如果面齿轮应用于直升机主传动,比现有锥齿轮传动方式能使齿轮箱质量减轻 40%,承载能力提高 35%,对于提高直升机传动系统的推质比和可靠性有非常重要的意义.

国外已将直、斜齿形的面齿轮传动机构应用于直升机分流/汇流传动系统,并在进一步研究该类面齿轮的齿面几何结构、优化设计方法和制造技术,以及更为先进的面齿轮传动机构^[1-8],面齿轮传动逐渐成为航空领域较先进的传动方式;国内正在跟踪国外先进技术,启动了直、斜齿形的面齿轮传动啮合理论与制造技术的研究^[9-10].

弧线齿面齿轮传动是我们独立研发并具有自主知识产权的全新齿轮传动机构,已经申请了国家发明专利.弧线齿面齿轮在传动过程中,大小轮的凸、凹两啮合齿面为点接触,因此传动平稳,噪声小,并可以局部共轭理论方便地调整啮合特性(印痕)和动态特性(传动误差).这种齿轮啮合对于安装中的轴线误差较不敏感,在一定范围的安装误差或制造误差情况下,引起的接触区转移较小,不会造成大的应力集中,不易产生边缘接触.与直、斜齿形面齿轮相比,动态啮合性能好,接触疲劳强度和弯曲疲劳强度显著提高,使用寿命长.

1 弧线齿面齿轮齿面展成原理

弧线齿面齿轮与直齿、斜齿面齿轮相比,不仅是齿轮的齿线发生了改变,齿面的成形原理和加工方法均发生了较大的改变.弧线齿面齿轮和与之啮合的弧线圆柱齿轮采用间接展成法加工,即将产形齿条作为切削面分别加工这两个齿面,产形齿条的齿面与两个齿面同时共轭,加工出的两齿面就能正确啮合.图 1 所示为弧线齿面齿轮齿面和弧线圆柱齿轮齿面展成原理图.在此基础上还可以通过调整刀倾角、产形齿条与被加工齿轮的位置及加工过程中的传动比把齿面修正成局部共轭的,采用局部共轭理论方便地调整啮合特性(印痕)和动态特性(传动误差).

弧线齿面齿轮采用具有刀倾角的刀盘展成加工.刀盘绕自身轴线旋转形成切削锥面,刀盘的转动是独立的,与工件的展成无关.同时回转刀盘还做平移运动,形成假想齿条的一个轮齿.当工件即被加工齿轮与假想齿条以一定的传动比分别做圆周运动和直线运动,刀盘就会在工件轮坯上切出一个齿槽.弧线齿面齿轮的切削过程就像弧线齿面齿轮与齿条啮合过程一样,刀盘的切削面与被

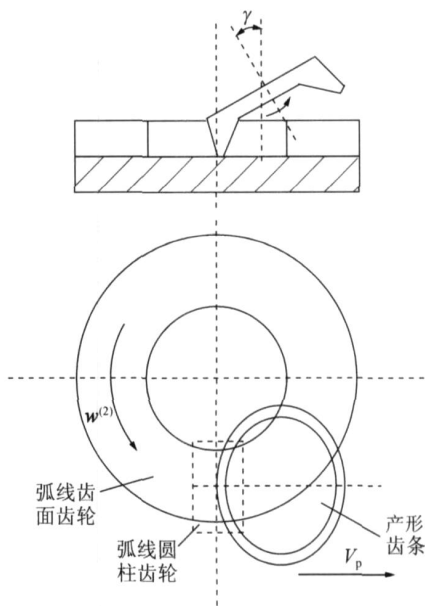


图 1 弧线齿面齿轮副展成原理图

Fig. 1 Generation of arcuate tooth trace face-gear drive

加工的轮齿曲面是一对完全共轭的齿面.为了防止加工过程中与面齿轮的轮齿发生干涉现象,刀盘采用一定的刀倾角 γ .

2 弧线齿面齿轮加工模型的建立

弧线齿面齿轮加工直接使用格里森刀盘,在经改造的摇台结构的铣齿机上加工完成.

图 2 所示为切齿模型.机床坐标系 $S_m\{O_m, X_m, Y_m, Z_m\}$ 固连于加工机床, $X_m O_m Y_m$ 平面位于机床平面内.

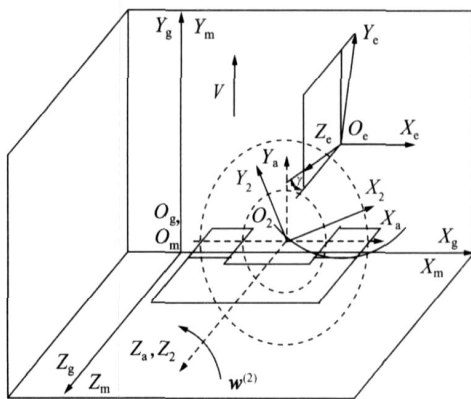


图 2 面齿轮加工坐标系

Fig. 2 Coordinate systems for generation of face-gear

摇台坐标系 $S_g\{O_g, X_g, Y_g, Z_g\}$ 固连于摇台,在切齿过程中,坐标系 S_g 与摇台一起沿坐标系 S_m 的坐标轴 Y_m 做直线运动, V 为摇台的移动速度.在初始位置, S_g 与 S_m 重合.

刀具坐标系 $S_e\{O_e, X_e, Y_e, Z_e\}$ 固连于刀盘. 其原点 O_e 位于刀盘中心, $X_e O_e Y_e$ 平面位于刀尖平面内, 坐标轴 X_e 与坐标轴 X_m 平行. 为了避免加工过程中刀具与面齿轮面锥的干涉, 采用刀倾机构. 刀盘回转轴即坐标轴 Z_e 与坐标轴 Z_m 的夹角 γ 为刀倾角. 坐标系 S_e 同时也固连于坐标系 S_g 上, 在加工面齿轮过程中随着摇台做垂直方向的直线运动.

辅助坐标系 $S_a\{O_a, X_a, Y_a, Z_a\}$ 用来描述被加工面齿轮在加工机床上的安装位置, 固连于坐标系 S_m . 其坐标轴与坐标系 S_m 的坐标轴平行.

被加工面齿轮动坐标系 $S_2\{O_2, X_2, Y_2, Z_2\}$ 固连于被加工面齿轮, 面齿轮的回转轴线 Z_2 与坐标轴 Z_m 平行, 坐标原点 O_2 位于被加工面齿轮的回转轴线上, 与齿顶的距离为齿顶高 h_{a2} . 在加工过程中, 坐标系 S_2 和被加工面齿轮一起绕坐标系 S_2 的 Z_2 坐标轴旋转, $w^{(2)}$ 为被加工面齿轮旋转角速度. 在初始位置, S_2 与 S_a 重合. 角 ϕ_2 为坐标系 S_2 和被加工面齿轮的当前转角.

面齿轮的转动与摇台(带刀盘)沿坐标轴 Y_m 的直线运动构成了面齿轮的展成运动, 相当于齿轮与齿条的展成运动.

3 弧线齿面齿轮齿面表达

1) 面齿轮刀具切削锥面及其法线的方程在坐标系 S_e 中表示为

$$\mathbf{r}_e = \begin{bmatrix} (r_g - u_g \sin \alpha_2) \cos \theta_g \\ (r_g - u_g \sin \alpha_2) \sin \theta_g \\ -u_g \cos \alpha_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$r_g = 0.5 D_g \pm 0.5 P_w \quad (2)$$

$$\mathbf{n}_e = \begin{bmatrix} -\cos \alpha_2 \cos \theta_g \\ -\cos \alpha_2 \sin \theta_g \\ \sin \alpha_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 r_g 为刀尖半径(在 $X_e O_e Y_e$ 平面内度量), 采用双面法加工, 正号对应外刀(即面齿轮凹面), 负号对应内刀(即面齿轮凸面). u_g 和 θ_g 是曲面坐标, α_2 为刀具齿形角. D_g 为刀盘直径, P_w 为刀顶距.

2) 将面齿轮刀具切削面方程经坐标变换表示在坐标系 S_2 中(见图 1)

$$\mathbf{r}_2(u_g, \theta_g, \phi_2) = [M_{2,a}][M_{a,m2}][M_{m2,g}][M_{g,e}]\mathbf{r}_e \quad (4)$$

式中 ϕ_2 为被加工面齿轮转角; $[M_{g,e}]$ 为刀具坐标系

S_e 到摇台坐标系 S_g 的坐标变换矩阵; $[M_{m,g}]$ 为摇台坐标系 S_g 到机床固定坐标系 S_m 的坐标变换矩阵; $[M_{a,m}]$ 为机床固定坐标系 S_m 到辅助坐标系 S_a 的坐标变换矩阵; $[M_{2,a}]$ 为辅助坐标系 S_a 到被加工面齿轮动坐标系 S_2 的坐标变换矩阵.

3) 面齿轮加工过程中有啮合方程成立

$$\mathbf{n}_a \cdot \mathbf{v}_a^{(2g)} = f_{2g}(u_g, \theta_g, \phi_2) = 0 \quad (5)$$

式中 $\mathbf{n}_a$ 为刀具切削面在坐标系 S_a 的法线, $\mathbf{v}_a^{(2g)}$ 为刀具切削面与被加工面齿轮齿面上接触点的相对速度.

4) 联立方程式(4)和式(5)求解, 即可得到面齿轮齿面方程的表达式

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_2(\phi_2, \theta_g). \quad (6)$$

图 3 所示为产形齿条切削面齿轮齿面时, 每一瞬时产生的切削线.

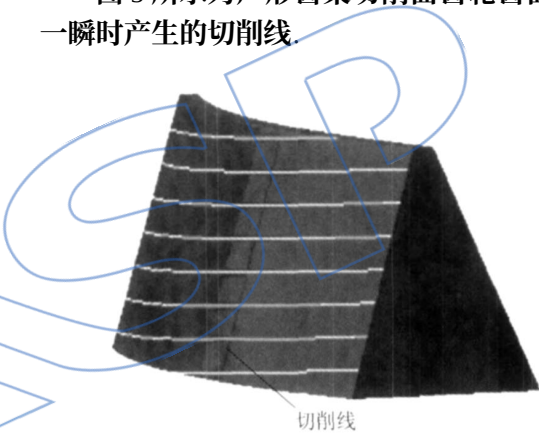


图 3 面齿轮齿面上的切削线
Fig. 3 Generated lines on the tooth surface of face-gear

4 算 例

刀盘采用格里森标准刀盘, 刀盘直径为 304.8 mm, 刀顶距为 3.048 mm, 刀倾角为 6° . 表 1 为弧线齿面锥齿轮参数, 三齿有限元模型如图 4 所示, 图 5 为弧线齿面齿轮三维仿真图.

表 1 弧线齿面锥齿轮参数
Table 1 Parameters of spiral bevel face-gear

参数	数值
模数/mm	3.175
分度圆压力角/(°)	22.5
大轮齿数	140
齿顶高系数	1.25
齿根高系数	1

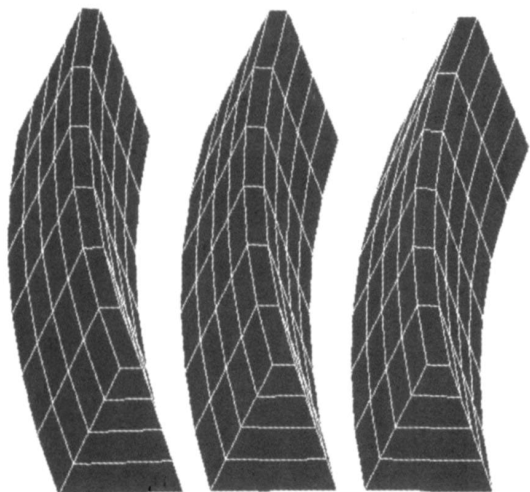


图 4 弧线齿面齿轮齿有限元模型
Fig. 4 Finite element model of teeth for
arcuate tooth trace face-gear

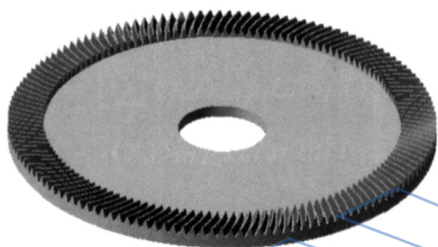


图 5 弧线齿面齿轮三维仿真图
Fig. 5 Three-dimensional of arcuate tooth trace face-gear

5 结 论

本文建立了弧线齿面齿轮的加工模型,用假想产形齿条分别加工弧线齿面齿轮和弧线圆柱齿轮,假想产形齿条与弧线齿面齿轮和弧线圆柱齿轮同时共轲啮合,从而确保加工出的弧线齿面齿轮与弧线圆柱齿轮能够正确啮合.展成过程中弧线齿面齿轮与产形齿条线接触,根据啮合理论确定弧线齿面齿轮的齿面方程.

本文提出的弧线齿面齿轮设计制造方法,与直齿面齿轮和斜齿面齿轮相比较,制造工艺相对简单,使用常规的格里森刀盘和国内已有的数控加工中心或数控齿轮机床即可完成齿轮加工.

参考文献:

- [1] Heath G F, Bossler R B. Advanced rotorcraft transmission (ART) program - Final report [R]. NASA CR-191057, Army Research Laboratory ARL-CR-14, January 1993.
- [2] Filler R R, Heath G F, Slaughter S C. Torque splitting by a concentric face gear transmission [R]. Montreal, Canada: The American Helicopter Society 58th Annual Forum, June 11-22, 2002.
- [3] Litvin F L, Fuentes A, Zanzi C. Design, generation, and stress analysis of two versions of geometry of face-gear drives[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37: 1179-1211.
- [4] Chang S H, Chung T D, Lu S S. Tooth contact analysis of face-gear drives[J]. Int. J. of Mechanical Science, 2000, 42: 487-502.
- [5] Litvin F L, Chen Y J, Heath G F, et al. Apparatus and method for precision grinding face gears: USA, 6146253 [P]. 2000-11-14.
- [6] Litvin F L, Gonzalez-Perez J, Fuentes A. Design, generation and stress analysis of face-gear drive with helical pinion[J]. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 2005, 194:3870-3901.
- [7] Litvin F L, Fuentes A, Hawkins M. Design, generation and TCA of new type of asymmetric face-gear drive with modified geometry[J]. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 2001, 190:5837-5865.
- [8] Guingand M, De Vaujany J-P, Jacquin C-Y. Quasi-static analysis of a face gear under torque[J]. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 2005, 194:4301-4318.
- [9] 朱如鹏,高德平. 在面齿轮设计中避免根切和齿顶变尖的设计方法的研究[J]. 中国机械工程, 1999, 10(11): 1274-1276.
ZHU Rupeng, GAO Deping. Study on the method of avoiding dedendum undercutting and addendum pointing in face gear design[J]. China Mechanical Engineering, 1999, 10(11):1274-1276. (in Chinese)
- [10] 鲁文龙,朱如鹏,曾英. 正交面齿轮传动中齿面曲率研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(4): 401-404.
LU Wenlong, ZHU Rupeng, ZENG Ying. Study on tooth surface curvature for orthogonal face-gear drives[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 32(4):401-404. (in Chinese)