

中凹盘铣刀数控端铣弧齿锥齿轮

李更更¹, 魏冰阳², 邓效忠²

(1. 河南科技大学 车辆与交通工程学院, 河南 洛阳 471003;

2. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 为了解决当前数控加工中通用刀具加工弧齿锥齿轮存在的加工效率低、易切削颤振等问题,提出了中凹盘铣刀数控端铣弧齿锥齿轮的方法. 基于对弧齿锥齿轮齿面几何结构的研究,通过选择大直径、刀底内凹的盘形铣刀,主动改变刀具姿态角的设置顺序,并分离了前倾角和侧倾角的功能,可以实现弧齿锥齿轮的齿底无干涉和大切削带宽加工. 先以切触点位置确定侧倾角避免过切齿槽底面,再以平底刀加工自由曲面的思想分别确定两侧齿面的前倾角,保证大的切削带宽和高加工效率. 结果表明:以一个弧齿锥齿轮大轮为例,中凹盘铣刀端铣轮两侧齿面分别以 7 次、6 次切削完成加工,最大加工误差分别为 0.0394 mm 和 0.0418 mm. 采用该方法加工弧齿锥齿轮,具有刀具耐用度高,切削带宽大,走刀次数少和加工精度高等优点.

关 键 词: 弧齿锥齿轮; 中凹盘铣刀; 数控加工; 主动控制刀位; 大切削带宽

中图分类号: V232.8; TH132.41

文献标志码: A

Computer numerical control face milling spiral bevel gears by application of disc cutter with concave end

LI Geng-geng¹, WEI Bing-yang², DENG Xiao-zhong²

(1. Vehicle and Transportation Engineering Institute,
Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China;

2. School of Mechatronics Engineering,
Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: In order to solve the poor machining efficiency and cutting chatter problem during computer numerical control (CNC) machining of spiral bevel gears by universal cutter, a machining method of face milling spiral bevel gears by a disc cutter with concave end was presented. Based on the research of spiral bevel gears geometry structure, a bigger diameter disc cutter with concave end was selected, and the setting order of cutter orientation angles was changed actively, then the functions of cutter tilt and yaw angle were separated, so the tooth surfaces machined with big cutting strip width and without bottom land gouge could be realized. Through the cutter yaw angle determined by cutting contact point positions in tooth surface machined, the bottom land gouge interference can be avoided effectively. Then through the tilt angles of both side tooth surfaces determined by the theory of sculptured surfaces machined by flat end cutter respectively, big cutting strip width and high machining efficiency can be ensured. The results show that with a spiral bevel gear as an example, the cutting times of two tooth flanks with a disc cutter with concave end are 7 and 6, and the maximum machining errors are 0.0394 mm and 0.0418 mm, respectively. This method has advantages such as longer cutter life and bigger cutting strip width, fewer cutting

收稿日期: 2013-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(51205108, 51305126); 河南科技大学博士科研启动基金(09001755)

作者简介: 李更更(1975—), 男, 河南洛阳人, 讲师, 博士, 主要从事齿轮的数字化制造研究.

刀齿、良好的切削条件和更长的寿命.然而,一般底部水平的端铣刀,刀具前倾之后,必须让刀尖平面高于被加工曲面的切平面,否则易造成曲面的过切,这导致刀具包络面与被加工曲面的相对法曲率增大、切削带宽小和加工次数多.王小椿教授曾提出一种新型的端铣刀——中凹盘铣刀,如图 2 所示.

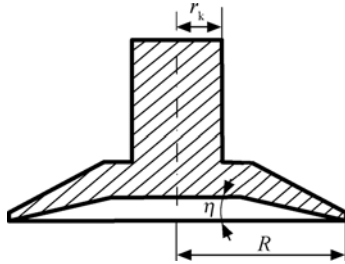


图 2 中凹盘铣刀示意图

Fig. 2 Disc cutter with concave end

中凹盘铣刀和平底端铣刀的主要区别在于刀底的锥形内凹,这种结构可以实现刀具的反向前倾,实现刀尖轨迹圆低于曲面的切平面的刀具位置,减小刀具包络面与被加工曲面的相对法曲率,而且刀底不干涉被加工曲面.基于曲面加工理论和齿面的完整加工,中凹盘铣刀的刀尖半径如下所示:

$$(2h + a)m + r_k < R < [\max(|k_1|, |k_2|)]^{-1} \quad (2)$$

式中 R 是刀尖半径; h 是齿高系数; a 是顶隙系数; m 是齿轮模数; r_k 是刀杆半径; k_1 和 k_2 是齿面的两个主曲率.

2.3 刀位主动控制

由式(2)所确定的中凹盘铣刀半径大于齿槽深度,若采用通用端铣加工方法,刀具先前倾后侧倾,则包络齿面的刀尖很可能过切齿槽底面,故必须主动控制刀具的位置和姿态,改变刀具前倾和侧倾的顺序,确保齿侧面和齿槽底面的合格加工.由于刀位的主动控制改变了两个刀具姿态角的设置顺序,刀具的侧倾不变化,但是前倾轴线发生了方向的改变.中凹盘铣刀前倾轴线方向的确定如下所示.

1) 通用端铣模型中,刀具姿态的转换矩阵

$$\mathbf{L}_{12} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta & \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

2) 人为规定刀具侧倾后,前倾轴线与 t 之间存在一个夹角 θ ,如图 3 所示.

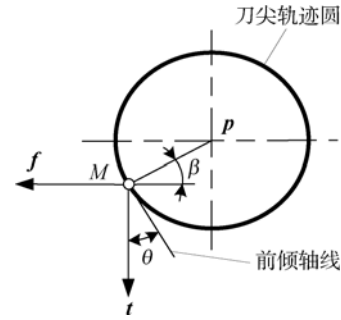


图 3 刀具前倾轴线

Fig. 3 Cutter tilt axis

根据 Euler-Rodrigue 公式,可以得到刀具侧倾的旋转矩阵

$$\mathbf{L}_3 = \begin{bmatrix} V & U \sin \theta \cos \theta & \cos \theta \sin \alpha \\ U \sin \theta \cos \theta & U + 2 - V & \sin \theta \sin \alpha \\ -\cos \theta \sin \alpha & -\sin \theta \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中

$$U = \cos \alpha - 1$$

$$V = \sin^2 \theta + \cos \alpha \cos^2 \theta$$

刀具先侧倾后前倾之后,转换矩阵的乘积为

$$\mathbf{L}_{23} = \mathbf{L}_3 \mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} A \cos \beta - C \sin \beta & -A \sin \beta - C \cos \beta & \sin \alpha \cos \theta \\ B \sin \beta - C \cos \beta & C \sin \beta + B \cos \beta & \sin \alpha \sin \theta \\ -\sin \alpha \cos (\theta - \beta) & -\sin \alpha \sin (\theta - \beta) & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中

$$A = \sin^2 \theta + \cos \alpha \cos^2 \theta$$

$$B = \cos^2 \theta + \cos \alpha \sin^2 \theta$$

$$C = (1 - \cos \alpha) \cos \theta \sin \theta$$

比较 $\mathbf{L}_{23}$ 和 $\mathbf{L}_{12}$, 可以得出结论

$$\theta = \beta \quad (6)$$

2.4 侧倾刀具

由图 1 可知,刀具侧倾后,刀尖轨迹圆被过 M 点的弦分成一段优弧和一段劣弧,若以切触点与齿槽底面的距离为刀尖轨迹圆劣弧弓高来确定刀具侧倾角,则可以实现刀尖不过切齿底.

根据切触点位置矢量 $\mathbf{r}_M$ 和单位矢量 $\mathbf{t}$ 所确定的直线 L_i 表示如下:

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_M + \mathbf{t}v \quad (7)$$

式中 v 为曲线参数.

齿槽底面属于齿根圆锥面,被表示为

$$g = x_i - \frac{\sqrt{y_i^2 + z_i^2}}{\tan \delta_i} \quad (8)$$

式(8)中 (x_f, y_f, z_f) 是圆锥面上一点的坐标; δ_i 是

齿轮的根锥角。

式(7)和式(8)联立,求解确定直线 L_i 与齿根圆锥面的交点,并计算交点与切触点之间的距离 l 。

由图 3 可以确定侧倾角的计算公式为

$$\beta = \arcsin(1 - l/R) \quad (9)$$

2.5 前倾刀具

对于凸齿面,充分利用中凹盘铣刀的结构特点,通过让刀具包络面和被加工齿面沿单位矢量 t 的诱导法曲率为零来计算刀具前倾角,可以获得大的切削带宽。

利用 Euler 方程确定齿面的法曲率 k_i

$$k_t = k_1 \cos^2 \delta + k_2 \sin^2 \delta \quad (10)$$

其中 δ 为单位矢量 t 和齿面第一主方向的夹角; k_i ($i=1,2$) 为齿面的主曲率。

刀具包络面沿 t 方向的法曲率如下所示。

1) 在 ftn 标架中,初始刀位处刀尖轨迹圆的表达式如下所示:

$$c = [R(\cos \psi - 1) \quad R \sin \psi \quad 0]^T \quad (11)$$

其中 ψ 为曲线参数。

2) 对刀位进行主动控制,刀具先旋转侧倾,再前倾,最终,在 ftn 标架中,刀尖轨迹圆如下所示:

$$c_1 = L_{23} c = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha (R \cos \theta - R) - R \sin \beta \sin \theta \\ \sin \beta \cos \alpha (R \cos \theta - R) + R \sin \beta \sin \theta \\ - \sin \alpha (R \cos \theta - R) \end{bmatrix} \quad (12)$$

3) 刀位确定后,将刀尖轨迹圆向 tn 平面进行投影,投影曲线在切触点 M 处的曲率如下所示

$$k_M = \frac{\sin \alpha}{R \cos^2 \beta} \quad (13)$$

联立式(10)和式(13),求解确定凸齿面加工时刀具的前倾角。

由于凹、凸齿面几何结构的不同,凹齿面加工时,刀具前倾角参照 Struz 法确定

$$\alpha = \arcsin(k_e D/2) + \epsilon \quad (14)$$

其中 ϵ 一般取 2° ; k_e 的值等于齿面切触点两个主曲率的最大值; D 为刀尖直径。

刀具的两个姿态角确定后,刀位如下所示^[9]:

$$u = n \cos \alpha + f \sin \alpha \cos \beta + t \sin \alpha \sin \beta \quad (15)$$

$$p = r_M + R(n \sin \alpha - f \cos \alpha \cos \beta - t \cos \alpha \sin \beta) \quad (16)$$

式中 u 为刀具轴线矢量; p 为刀尖轨迹圆圆心位置矢量; r_M 是切触点 M 的位置矢量。

3 加工和测量实验

为验证中凹盘铣刀端铣齿面加工方法的正确性,以一对弧齿锥齿轮副的大轮为例,以通用后置处理方法^[8]将式(15)和式(16)所确定的端铣刀位转换为数控加工程序,在 DMU100 型五轴数控机床上进行了切齿加工,预设切削残留高度为 0.01 mm,轮齿凹面 6 次切削、凸面 7 次切削完成加工。

弧齿锥齿轮的几何参数如表 1 所示,传统加工参数如表 2 所示。

表 1 弧齿锥齿轮几何参数

Table 1 Geometry parameters of spiral bevel gear

参数及说明	数值及说明
齿数	46
模数	8.22
压力角/(°)	20
螺旋角/(°)	35
齿宽/mm	48.97
旋向	右旋
轴交角/(°)	90

表 2 弧齿锥齿轮传统加工参数

Table 2 Tradition machining parameters of spiral bevel gear

参数	数值
刀顶距/mm	5.08
刀盘半径/mm	152.4
刀具倾角/(°)	凸面 22 凹面 18
径向刀位/mm	149.8403
角向刀位/mm	56.4232
床位/mm	0
滚比	1.0501

中凹盘铣刀端铣弧齿锥齿轮齿面的加工瞬间以及加工完成的弧齿锥齿轮如图 4、图 5 所示。加工后的齿轮齿面光滑连续、表面粗糙度低。

将加工完成的弧齿锥齿轮大轮在 JD45+型齿轮测量中心进行了齿面坐标的测量。测量图片和测量结果,如图 6 和图 7 所示,具体数值如表 3、表 4 所示。

从齿面测量的结果看,大轮凸面最大误差出



图 4 端铣加工瞬间

Fig. 4 Face machining instant



图 5 加工完成的弧齿锥齿轮

Fig. 5 Machined spiral bevel gear



图 6 齿面测量

Fig. 6 Tooth surface measurement

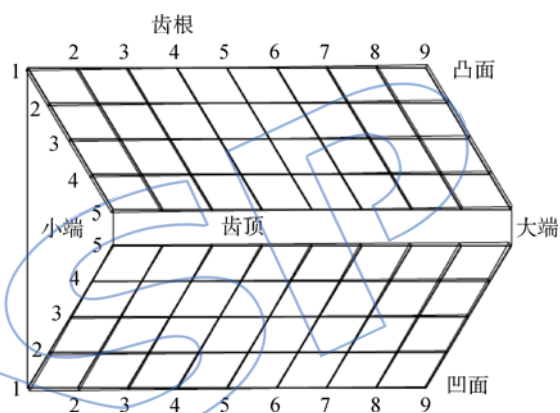


图 7 齿面测量结果

Fig. 7 Results of tooth surface measurement

表 3 凸面误差

Table 3 Convexity error

mm

齿面网格 齿形编号	齿面网格齿向编号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-0.0326	-0.0251	-0.0172	-0.0090	-0.0004	0.0085	0.0178	0.0275	0.0376
2	-0.0326	-0.0249	-0.0170	-0.0087	-0.0001	0.0090	0.0184	0.0282	0.0384
3	-0.0328	-0.0251	-0.0171	-0.0087	0	0.0091	0.0187	0.0286	0.0390
4	-0.0334	-0.0257	-0.0176	-0.0091	-0.0002	0.0090	0.0187	0.0288	0.0393
5	-0.0344	-0.0266	-0.0183	-0.0097	-0.0008	0.0008	0.0185	0.0287	0.0394

表 4 凹面误差

Table 4 Concavity error

mm

齿面网格 齿形编号	齿面网格齿向编号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	-0.0101	-0.0129	-0.0162	-0.0198	-0.0238	-0.0280	-0.0324	-0.0370	-0.0418
4	0.0088	0.0043	-0.0005	-0.0053	-0.0104	-0.0155	-0.0208	-0.0262	-0.0316
3	0.0224	0.0169	0.0114	0.0057	0	-0.0058	-0.0116	-0.0175	-0.0234
2	0.0326	0.0266	0.0205	0.0144	0.0082	0.0021	-0.0041	-0.0103	-0.0166
1	0.0404	0.0341	0.0277	0.0213	0.0149	0.0084	0.0020	-0.0044	-0.0109

times and higher processing precision for machining spiral bevel gears.

Key words: spiral bevel gear; disc cutter with concave end;
computer numerical control (CNC) processing;
active control cutter location; big cutting strip width

弧齿锥齿轮由于具有传动平稳、承载能力强等优点而被广泛应用于汽车、航空、航天、航海、工矿机械、机床等工业领域。传统的弧齿锥齿轮加工采用专用的刀具和机床,设计和生产加工周期较长。随着通用刀具数控包络自由曲面技术的发展,采用多轴联动机床控制通用刀具包络齿面的技术逐渐进入了弧齿锥齿轮的加工领域^[1-6]。当前采用的主要刀具是球头铣刀和圆柱/圆锥铣刀,然而,球头铣刀端铣无法避免切削带宽小、加工效率低的问题,而圆柱/圆锥铣刀侧铣则容易出现切削颤振。平底端铣刀包络自由曲面具有切削带宽大、加工次数少、刀具刚度高、寿命长等优点,故成为了近年来曲面数控加工技术的研究热点^[7-15]。然而,平底刀的加工对象一般为平坦、敞口类曲面,研究重心仅关注提高切削带宽和加工效率,而弧齿锥齿轮由于齿面结构复杂、两侧齿面与齿底曲面相连且相对分布、齿槽空间狭小等原因,故传统的平底刀加工理论难以直接应用于加工弧齿锥齿轮。本文提出的中凹盘铣刀数控端铣弧齿锥齿轮方法,紧密结合弧齿锥齿轮的特殊结构,采用底部内凹型端铣刀,通过刀位的主动控制,合理利用两个刀具姿态角以避免齿槽底面的过切和实现较大的切削带宽,达到实现弧齿锥齿轮无干涉、高效率加工的目的。

1 齿面数字化表征

根据传统的切齿加工理论,以坐标转换和啮合原理为工具,弧齿锥齿轮的齿面可以被表达成标准的两参数曲面方程形式^[16]

$$r(\theta, \varphi)$$

式中 θ 和 φ 是曲面参数。

通过齿面旋转投影变换,并进行投影齿面网格规划:齿廓为 m 行,齿向为 n 列,形成 mn 个网格节点。建立关联网格点平面坐标和空间坐标的非线性方程组

$$\begin{cases} X = x \\ Y = \sqrt{y^2 + z^2} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 x, y, z 是网格点径向矢量的坐标轴分量; (X, Y) 是齿面网格节点的平面坐标。

求解式(1),网格节点的曲面参数值被首先确定,进而空间坐标也被确定。

根据弧齿锥齿轮的几何结构,凸齿面沿齿形和齿向的弯曲方向相同,都指向外法向矢量负方向,而凹齿面,沿齿形和齿向的弯曲方向相反。齿面网格点的 2 阶几何参数一般是通过产形轮和被加工齿轮的线性关系,由产形轮的 2 阶几何参数确定^[17-18]。

2 中凹盘铣刀的位置和姿态

2.1 通用端铣加工模型

在刀尖和被加工曲面的切削接触点 M 处,建立由被加工曲面外法向矢量 $\mathbf{n}$ 、进给方向单位矢量 $\mathbf{f}$ 以及单位矢量 $\mathbf{t}$ ($\mathbf{t}$ 垂直于 $\mathbf{n}$ 和 $\mathbf{f}$ 所决定的平面)所构成的活动标架。在刀具的起始位置,刀尖与被加工曲面上仅在 M 点接触,刀具轴线矢量 $\mathbf{u}$ 和 $\mathbf{n}$ 平行,则被加工曲面的切平面 π 与刀尖所在平面重合。刀具绕 $\mathbf{t}$ 旋转前倾,刀尖平面与 π 之间的夹角 α 被称为刀具前倾角;接着,刀具绕 $\mathbf{n}$ 旋转,形成刀具的侧倾角 β ,如图 1 所示。图中 p 点表示刀尖轨迹圆心。

需要注意的一点是不能随意改变两个刀具姿态角的设置顺序,否则刀尖轨迹圆会干涉设计曲面。

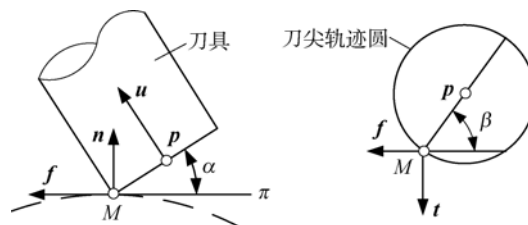


图 1 刀具姿态角

Fig. 1 Cutter orientation angles

2.2 中凹盘铣刀

指状刀具加工齿面时,刀具的全部刀齿必须进入窄小的齿槽中间,这限制了指状刀具的半径,而盘状的端铣刀加工齿面时,仅有部分刀尖进入齿槽之中,因此加工相同的齿轮时,端铣刀的直径会远大于指状刀具,这就决定了端铣刀有更多的

现在大端齿顶,为0.0394 mm;凹面最大误差亦出现在大端齿顶,为-0.0418 mm,整体误差分布情况基本一致.与设计的切削误差(0.01 mm)相比较,齿面误差偏大,这主要是由于中凹盘铣刀的切削刃强度不足,在加工时出现让刀所致.

4 结 论

1) 通过改变传统的数控加工刀位设置顺序,分离刀具前倾角和侧倾角的功能,合理利用刀具的侧倾保证齿槽底面无过切,充分利用刀具前倾实现大的切削带宽,将平底端铣刀的曲面加工理论引入弧齿锥齿轮的加工领域.

2) 采用中凹型端铣刀,与指状铣刀相比,刀具刚度高、寿命长、切削次数少.

参考文献:

- [1] Suh S H, Lee J J, Kim S K. Multiaxis machining with additional-axis NC system: theory and development[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998, 14(12): 865-875.
- [2] Suh S H, Jih W S, Hong H D, et al. Sculptured surface machining of spiral bevel gears with CNC milling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(6): 833-850.
- [3] 凌文峰.螺旋伞齿轮新加工方法及关键技术的研究[D].北京:北京交通大学,2008.
LING Wenfeng. The study of spiral bevel gears new machining methods and crucial technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [4] 毛世民,郭宝安,李建刚,等.一种锥齿轮加工方法:中国,201010124341[P],2010-07-14.
- [5] Kawasaki K, Tsuji I. Analytical and experimental tooth contact pattern of large-sized spiral bevel gears in cyclo-paloid system[J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(4): 24-31.
- [6] Kawasaki K, Tsuji I, Abe Y, et al. Manufacturing method of large-sized spiral bevel gears in cycle-paloid system using multi-axis control and multi-tasking machine tool[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers: Series C, 2011, 77(3): 728-736.
- [7] Vichers G W, Quan K W. Ball-mills versus end-mills for curved surface machining[J]. Journal of Engineering for Industry, 1989, 111(2): 22-26.
- [8] 袁哲俊,刘雄伟,刘华明.五坐标端铣数控加工计算理论分析[J].机械工程学报,1993,29(1):31-37.
YUAN Zhejun, LIU Xiongwei, LIU Huaming. The theory analysis of five-axis NC end milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1993, 29(1): 31-37. (in Chinese)
- [9] 王小椿,吴序堂,李艳斌.密切曲率法:一种加工自由曲面的新概念[J].西安交通大学学报,1992,26(5):51-58.
WANG Xiaochun, WU Xutang, LI Yanbin. Curvature catering: a new concept for machining sculptured surfaces[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1992, 26(5): 51-58. (in Chinese)
- [10] Choi B K, Park J W, Jun C S. Cutter-location data optimization in 5-axis surface machining[J]. Computer-Aided Design, 1993, 25(6): 377-386.
- [11] Warkentin A, Ismail F, Bedi S. Intersection approach to multi-point machining of sculptured surfaces[J]. Computer Aided Geometric Design, 1998, 15(6): 567-584.
- [12] 樊文刚,王小椿,姜虹,等.一种开阔自由凹曲面五坐标加工多点刀位算法[J].西安交通大学学报,2010,44(9):69-73.
FAN Wengang, WANG Xiaochun, JIANG Hong, et al. Multi-point tool positioning strategy for five-axis machining of open sculptured concave surfaces[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(9): 69-73. (in Chinese)
- [13] 朱利民,丁汉,熊有伦.非球头刀宽行五轴数控加工自由曲面的三阶切触法: I 刀位规划原理[J].中国科学:技术科学,2010,40(12):1460-1467.
ZHU Limin, DING Han, XIONG Youlun. Third-order point contact approach for five-axis sculptured surface machining using non-ball-end tools: I third-order approximation of tool envelope surface[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2010, 40(12): 1460-1467. (in Chinese)
- [14] 樊文刚,李建勇,黄泽华,等.多点切触加工在复杂凸曲面中的应用[J].西安交通大学学报,2012,46(3):53-63.
FAN Wengang, LI Jianyong, HUANG Zehua, et al. Application of multi-point contact machining to convex sculptured surface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(3): 53-63. (in Chinese)
- [15] 王明海,李晓鹏.叶片型面曲率属性对数控铣削加工过程的影响[J].航空动力学报,2013,28(1):25-31.
WANG Minghai, LI Xiaopeng. Effect of curvature attribute of free-form surface on CNC milling process[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(1): 25-31. (in Chinese)
- [16] 李天兴,邓效忠,李聚波,等.螺旋锥齿轮齿面误差分析与自动反馈修正[J].航空动力学报,2011,26(5):1194-1200.
LI Tianxing, DENG Xiaozhong, LI Jubo, et al. Automatic feedback correction and deviation analysis for tooth surface of spiral bevel gear and hypoid gear[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 1194-1200. (in Chinese)
- [17] Litvin F L, Chen N X, Chen J S. Computerized determination of curvature relations and contact ellipse for conjugate surfaces[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995, 125(1): 151-170.
- [18] 田行斌.弧齿锥齿轮啮合质量的计算仿真和控制[D].西安:西北工业大学,2000.
TIAN Xingbin. Numerical simulation and control for meshing quality of spiral bevel gears[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000. (in Chinese)