

自由曲面慢刀伺服车削及刀具参数确定方法*

关朝亮¹, 陈燕生², 彭文强¹

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073

2. 南京炮兵学院廊坊校区, 河北 廊坊 065000)

摘要: 自由曲面光学元件具有优越的光学性能, 在现代光学系统中得到越来越广泛的应用。慢刀伺服是单点金刚石车削自由曲面的新技术。由于自由曲面面形的复杂性以及慢刀伺服车削技术的特殊性, 刀具与工件的相对位置关系也更加复杂, 必须对刀具与工件表面的相对几何关系深入研究, 从而确定合适的刀具参数。从原理上对慢刀伺服车削技术的特殊性进行了分析。分别基于过轴心截面曲线特性和基于NURBS曲面整体特性研究了刀具参数确定方法。以正弦阵列表面工件为例, 验证了这两种分析方法。

关键词: 单点金刚石车削; 慢刀伺服; 自由曲面; 刀具参数

中图分类号: TP161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)05-0102-05

Freeform surface STS turning and tool geometry parameters determination method

GUAN Chaoliang¹, CHEN Yansheng², PENG Wenqiang¹

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Langfang Barrack of Nanjing Artillery Academy, Langfang 065000, China)

Abstract: Optical components with freeform surface can achieve excellent performance. It is used more and more widely in the modern optical system. Slow Tool Servo (STS) is a new technique to machining freeform surface. Due to the complexity of freeform surface and the particularity of STS, the relative position relationship between tool and work piece must be deeply researched. In this research, STS machining technique was introduced. Two tool geometry selection methods were proposed and researched on. One of the two methods was based on section curves and the other was based on whole surface using NURBS.

Key words: Single Point Diamond Turning (SPDT); slow tool servo; freeform surface; tool geometry parameters

自由曲面 (Freeform Surfaces) 光学元件有利于简化系统结构, 减少镜片数量, 显著减小镜片尺寸, 进一步提高成像质量, 并且还可获得特殊的光学性能, 给新产品设计带来了巨大的潜力。自由曲面光学元件在光电产品及光通讯产品中的应用日益广泛, 采用该类光学元件的彩色显像管、液晶显示器、数码相机、光纤通讯等产品已形成了一个数以万亿计的全球市场。在国防和军事运用中, 自由曲面光学元件在各种可见光瞄准器、头盔显示器、微光夜视器、精确打击运载工具和末制导智能炸药等系统中也有十分广泛的运用。

自由曲面光学元件加工一直是超精密制造领域亟待解决的问题。目前发展起来的有自由曲面磨削 (Freeform Grinding)、微铣削 (Micro Milling)、飞刀铣削 (Raster Milling)、快刀伺服 (FTS) 车削以及慢刀伺服 (STS) 车削技术^[1-3]。自由曲面磨

削和飞刀铣削是比较常见的加工方法, 可以获得很高的加工精度和表面质量。但是, 其加工周期长、初始对刀困难且刀具回转半径限制了工件面形。快刀伺服车削技术使用具有高分辨率、高刚度、高动态特性的辅助刀架, 已应用于自由曲面车削加工。但是, 快刀伺服存在的主要问题是: 滞后问题造成跟踪性能下降^[4]; 主轴位置估计误差引起加工轮廓混淆^[5]; 大多数快刀装置的行程都在 1mm 以下, 限制了其加工范围。近年来, 直线电机直接驱动技术使进给轴运动精度及动态响应能力大幅提高^[6]; 精密静压主轴轴向和径向精度可以达到 25nm 以内, 并且可以进行精确的位置伺服控制; 液体静压导轨具有更高的承载能力和更大的刚度。这些技术的发展促成了基于三轴联动的慢刀伺服车削自由曲面技术的产生。

无论是用快刀伺服技术还是慢刀伺服技术车

* 收稿日期: 2012-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51075393)

作者简介: 关朝亮 (1981—), 男, 讲师, 博士, E-mail: chlguan@nudt.edu.cn

削自由曲面,首要的问题是确定金刚石刀具的几何参数。自由曲面面形复杂,与普通的回转对称面形相比,不存在一条可以代表整个曲面的母线。因此需要对自由曲面整个表面进行分析以获得确定刀具参数的限制条件。

1 慢刀伺服车削技术

慢刀伺服车削典型的机床布局形式见图1,与

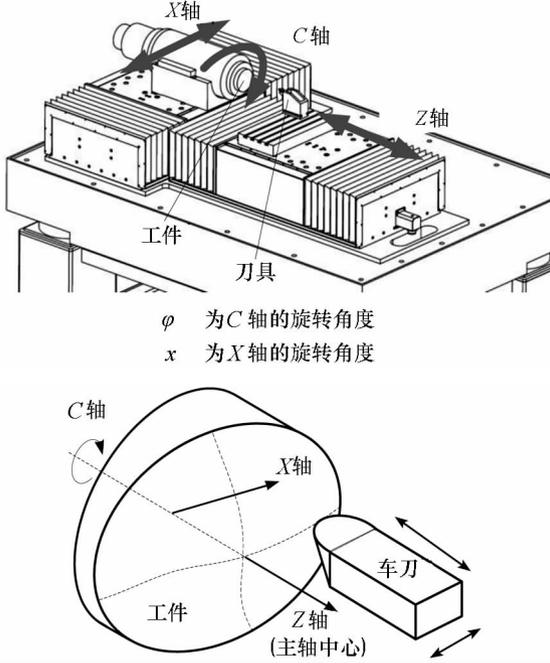


图1 慢刀伺服机床配置形式

Fig.1 Slow tool servo machine configuration

快刀伺服车削加工布局类似。两根直线轴呈“T”字形布局。工件主轴安装在“X”轴上。“X”轴的移动方向与工件主轴的旋转轴方向垂直。“Z”轴安装刀具,运动方向垂直于“X”轴并与工件主轴旋转轴线平行。工件安装在主轴上并且随之一起转动,金刚石刀具按照工件不同的角度 φ 和径向位置 x 相对于工件表面运动,即刀具运动应由圆柱坐标系 (X, Φ, Z) 来描述, $z = f(x, \varphi)$ 。若自由曲面设计面形基于笛卡儿坐标系 (X_d, Y_d, Z_d) 描述,则两套坐标系须进行转换。转换关系如下:

$$\begin{cases} x_d = x \cos(\varphi) \\ y_d = x \sin(\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \\ \varphi = \begin{cases} \arctan(y_d/x_d), & x_d \geq 0, y_d \geq 0 \\ \pi + \arctan(y_d/x_d), & x_d < 0, \\ 2\pi + \arctan(y_d/x_d), & x_d > 0, y_d < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

慢刀伺服加工与快刀伺服加工的不同之处在于:慢刀伺服中仅使用机床 Z 轴带动刀具运动,

而不采用任何附加伺服装置。另外,慢刀伺服中主轴采用精密位置伺服控制模式(此时称为 C 轴),而在快刀伺服技术中只是将圆光栅感测到的主轴位置信息给快刀伺服单元使用,并不将主轴置于位置伺服状态。慢刀伺服技术采用 C、X、Z 三轴联动的方式插补出工件表面曲线,从而完成自由曲面的加工。因此,多轴联动和插补技术是慢刀伺服技术实现的关键。

慢刀伺服的三轴联动不同于普通三轴联动数控技术。最关键的区别是慢刀伺服车削中主切削运动与轨迹运动合为一体。而普通的多轴(三轴或以上)联动一般是用于切削运动与进给运动相互独立的铣削、磨削等加工方式。一般来讲,为得到较好的表面粗糙度,要求主切削运动速度尽量较高,而要求进给运动速度尽量低。慢刀伺服中主轴的旋转运动既是主切削运动又是进给运动。为了保证刀具正常的车削运动条件,又要满足多轴联动的要求,所以慢刀伺服对进给轴的动态特性要求要比普通多轴联动高得多。尤其对“Z”轴,即使在同一半径下仍需根据“C”轴位置随工件表面的起伏往复运动。综上所述,主轴高精度位置伺服控制,直线轴往复运动高精度、高动态响应是慢刀伺服车削加工必备的关键技术条件。

2 基于过轴心截面曲线分析的刀具参数确定

根据加工材料的特性,可以选择金刚石刀具的前角(Rake Angle)。这里主要从几何的观点研究刀具半径(Radius)、圆弧包角(Include Angle)两个最基本参数(如图2),即最大允许刀具半径和最小允许圆弧包角。后角(Clearance Angle)参数则需要根据刀具安装方向和刀具路径在表面形貌仿真中以检测三维几何体相交的方法确定,本文不作讨论。

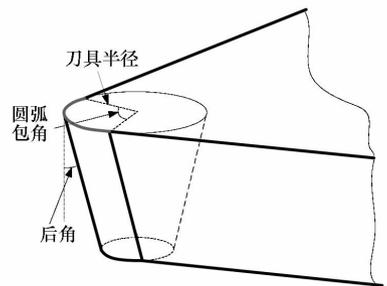


图2 金刚石刀具几何参数示意图

Fig.2 The geometry parameters of diamond tool

2.1 回转对称曲面车削中刀具参数确定

回转对称曲面由母线绕旋转轴旋转生成。因此回转对称曲面车削刀具参数的确定仅需考虑刀

具圆弧轮廓与一条母线的相对关系即可(如图 3)。为保证刀具轮廓不与被加工工件面形发生干涉,刀具半径不能超过母线凹陷处曲率半径。只要找出母线凹处最小的曲率半径,即可确定最大允许刀具半径。车削过程中由于母线外法线方向的变化,刀具圆弧与母线切触点沿刀具圆弧变化。只要确定切触点相对于刀具圆弧中心角度变化的范围,即可确定最小允许刀具圆弧角度。

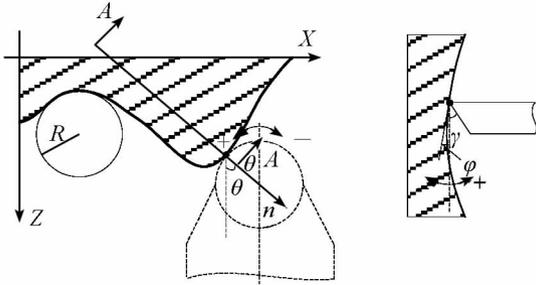
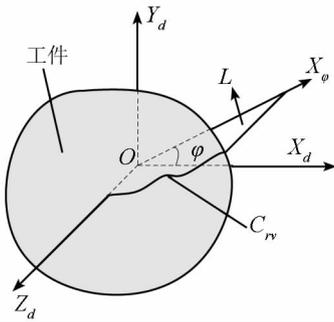


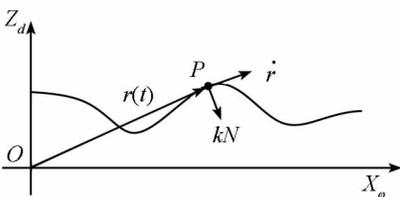
图 3 回转曲面母线与圆弧刀具相对关系
Fig. 3 The relationship between workpiece generatrix and tool tip circle

2.2 自由曲面车削中刀具参数确定

自由曲面没有回转对称中心,不存在代表整个曲面的母线。但是自由曲面车削刀具参数确定可以按照回转曲面中的方法,分析所有过主轴中心的截面与工件表面的交线。遍历所有角度过主轴轴心的截面交线,可得到最大允许刀具半径和最小刀具圆弧角度。



(a) 过轴心剖面与工件表面相交图
(a) The work surface cut with the section plane



(b) 交线 C_{rv} 在平面 P 内的示意图
(b) The curve in the P plane

如图 4(a)所示,工件表面与过轴 Z_d 的平面 L 相交得到交线 C_{rv} ,平面 L 与平面 $X_d O Z_d$ 的角度为 φ 。为方便表示,将曲线 C_{rv} 在二维坐标系中绘出得到图 4(b)。

若工件表面面形以柱坐标函数 $z = S(r, \varphi)$ 的形式给出,则只需指定 $\varphi = \varphi_i$ 即可得到曲线 C_{rv} 的表达式;若工件面形以笛卡儿直角坐标系形式 $z_d = S(x_d, y_d)$ 指定,则可利用(2)式的变换关系得到柱坐标函数形式;若工件面形以空间离散数据点给出,则可通过插补得到 L 平面内曲线 C_{rv} 的离散数据表示,再经过 NURBS 曲线拟合得到参数化的曲线表达式。不失一般性,假设曲线 C_{rv} 的矢量表示为

$$\mathbf{r}(t) = (x_d(t), y_d(t), z_d(t)) \quad (3)$$

根据计算几何公式^[3]可知曲线 C_{rv} 上任意点处的曲率矢量表达式为

$$k\mathbf{N} = \frac{(\dot{\mathbf{r}} \cdot \dot{\mathbf{r}})\ddot{\mathbf{r}} - (\dot{\mathbf{r}} \cdot \ddot{\mathbf{r}})\dot{\mathbf{r}}}{(\dot{\mathbf{r}} \cdot \dot{\mathbf{r}})^2} \quad (4)$$

其中, k 为曲率, $k \geq 0$; \mathbf{N} 为单位主法矢, \mathbf{N} 与 Z_d 轴正方向夹角为锐角时,此处曲线为凹,夹角为钝角时为凸。曲线 C_{rv} 上每一点处所允许的最大刀具半径为

$$R = \begin{cases} \inf k\mathbf{N} \cdot \mathbf{e}_{zd} \leq 0 \\ \frac{1}{k} & k\mathbf{N} \cdot \mathbf{e}_{zd} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

因此,得到整个曲面最大允许刀具半径为 $R_{\max} = \min\{R_\varphi \mid R_\varphi = \min(R), \varphi \in [0, 2\pi)\}$

$$(6)$$

由图 4 知,切触点 P 在刀具圆弧轮廓上的角度 θ 值可由此处曲线的外法线 \mathbf{n} 与 Z_d 轴正方向夹角来确定。角度 θ 的符号可用外法线 \mathbf{n} 与 X_φ 轴正方向的夹角确定,为锐角时, θ 取正值,为钝角时, θ 取负值。

$$\theta = \text{sgn}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_{x_\varphi}) \times \arccos(\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_{zd}) \quad (7)$$

其中,单位外法线与单位主法线的关系为

$$\mathbf{n} = \begin{cases} \mathbf{N}, & \mathbf{N} \cdot \mathbf{e}_{zd} \geq 0 \\ -\mathbf{N}, & \mathbf{N} \cdot \mathbf{e}_{zd} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

则最小允许圆弧包角为

$$\theta_{\min} = \theta_{\max} - \theta_{\min} \quad (9)$$

其中

$$\theta_{\max} = \max\{\theta_{\max\varphi} \mid \theta_{\max\varphi} = \max\{\theta\}, \varphi \in [0, 2\pi)\} \quad (10)$$

$$\theta_{\min} = \min\{\theta_{\min\varphi} \mid \theta_{\min\varphi} = \min\{\theta\}, \varphi \in [0, 2\pi)\} \quad (11)$$

实际计算中,为保证一定的精度,需尽量加密剖切面。但这可能会造成计算时间过长,且靠近

图 4 基于剖面截线的自由曲面刀具参数确定图

Fig. 4 Tool parameters detection based on section curves

主轴轴心区域分析点过密,而工件边缘分析点稀疏。从工件曲面的统一参数表达式出发推导曲面最小曲率半径和主法矢方向则可解决这个问题。

3 基于曲面特性分析的刀具参数确定

从第2节的分析可知,确定最大允许刀具半径和最小允许圆弧包角时最基本的是要计算工件表面上任意一点 P 处在 POZ_d 平面内的曲率半径和主法矢方向。

NURBS(非均匀有理B样条)曲线曲面表达是自由曲面建模中的重要方法。它可以用统一的表达式同时精确表示标准解析曲面和自由曲面^[7]。因此,使用NURBS曲面表述工件表面 S , 则曲面的二维参数表示如下^[8]

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) w_{i,j} V_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) w_{i,j}} \quad (12)$$

其中, $V_{i,j}$ 为控制顶点, $w_{i,j}$ 为权因子, $N_{i,k}(u)$ 和 $N_{j,l}(v)$ 分别为B样条基函数。

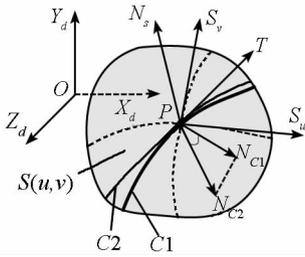


图5 基于曲面分析的刀具参数确定图

Fig.5 Tool parameters detection based on whole surface NURBS method

如图5所示,假设 $P(P_x, P_y, P_z)$ 是 S 面上的一点, P_x, P_y 不同时为零。 P 点处 u 向线和 v 向线的切矢分别为 S_u, S_v 。

S 曲面 P 点处的单位法矢可通过下式求出

$$N_s = \frac{S_u \times S_v}{|S_u \times S_v|} \quad (13)$$

POZ_d 平面与 S 面交线 $C1$ 在 P 点处的切线 $T = (P_x, P_y, \alpha)$, α 的值可以通过 $T \cdot N_s = 0$ 来确定。法线 $n_{C1} = (P_x, P_y, \beta)$, β 的值可通过 $n_{C1} \cdot T = 0$ 来确定。若 $\alpha = 0$, 则可设 $n_{C1} = (0, 0, 1)$ 。

矢量 T 和 N_s 在 P 点处构成的平面与 S 面的交线 $C2$ 称为法截线。根据曲面第一基本公式和曲面第二基本公式^[9] 可求得 $C2$ 的曲率矢量为

$$k_n N_{C2} = \frac{L + 2M\lambda + N\lambda^2}{E + 2F\lambda + G\lambda^2} N_s \quad (14)$$

其中, k_n 为法截线的曲率; N_{C2} 为 $C2$ 单位主法矢;

$E = S_u \cdot S_u, F = S_u \cdot S_v, G = S_v \cdot S_v$ 为第一基本量; $L = S_{uu} \cdot N_s, M = S_{uv} \cdot N_s, N = S_{vv} \cdot N_s$ 为第二基本量; $\lambda = \frac{|S_u| |S_v \cdot T|}{|S_v| |S_u \cdot T|}$ 代表矢量 T 和 N_s 在 P 点处构成的平面的方位。

根据 Meusnier 定理^[9], $C1$ 的曲率矢量可通过下式确定:

$$k N_{C1} = \left(k_n N_{C2} \cdot \left(\frac{n_{C1}}{|n_{C1}|} \right) \right) \cdot \left(\frac{n_{C1}}{|n_{C1}|} \right) \quad (15)$$

其中, $k \geq 0$ 为 $C1$ 曲率; N_{C1} 为单位主法矢。用(5)式和(7)式可计算得到 P 点所允许的曲率半径值, 以及作为切触点在刀具圆弧上的角度。

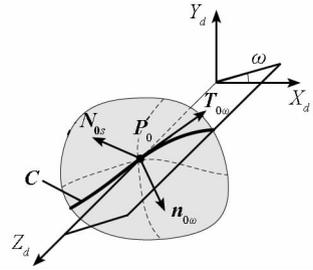


图6 曲面轴心点 P_0 处刀具参数确定图

Fig.6 Tool parameters detection at point P_0

如图6所示,假设 $P_0(0, 0, P_{0z})$ 点即主轴轴心对应的工件表面上的点, 在每一个主轴角度对刀具参数的要求都可能不同。过轴 Z_d 的平面与 X_dOZ_d 平面的夹角为 ω , 需要在 $\omega \in [0, 2\pi)$ 范围内确定对刀具参数的限制。交线 C 在 P_0 点处的切线可记作 $T = (\cos\omega, \sin\omega, \alpha)$, α 可通过 $T_{0\omega} \cdot N_{0s} = 0$ 来确定。法线可记作 $n_{0\omega} = (\cos\omega, \sin\omega, \beta)$, β 的值可通过 $n_{0\omega} \cdot T_{0\omega} = 0$ 来确定。利用(14)、(15)、(5)、(7)式可计算出 P_0 点处不同 ω 值下所允许的曲率半径值, 以及作为切触点在刀具圆弧上的角度。

$$R_{\max} = \min\{R | P \in S\} \quad (16)$$

$$\Theta_{\min} = \max\{\theta | P \in S\} - \min\{\theta | P \in S\} \quad (17)$$

4 刀具参数确定实验

在正弦表面阵列的加工中, 分别使用上述两种确定刀具参数的方法, 并从理论上对设计的正弦阵列表面进行了分析。如图7所示, 正弦阵列表面可用方程表示为

$$z = A \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cos\left(2\pi \frac{y}{\lambda}\right) \quad (18)$$

其中, A 表示正弦阵列幅值; λ 表示正弦阵列空间波长。作为例子, 这里假设 $A = 0.1\text{mm}, \lambda = 10\text{mm}$, 工件为 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的矩形。

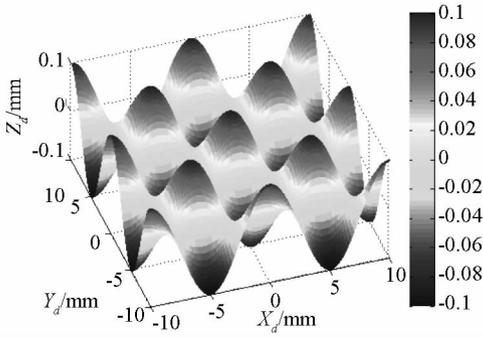


图 7 正弦阵列曲面
Fig.7 Sine array surface

方法一为过轴心截面曲线分析的方法,方法二为基于曲面分析的刀具参数确定方法。它们分析的结果与理论值对比见表 1。

为了保证足够的面形表示精度,方法一取 401×401 的点阵表示。每条截面曲线上取 100 个分析点以保证径向分析点最大间隔小于 0.2mm,每 3° 取一条截面曲线以保证圆周方向分析点最大间隔小于 0.8mm。使用 Matlab 软件实现方法一,其计算每条截面曲线的时间是 9.006637s,分析整个面型则需要约 18min。方法一分析得出,最小允许刀具圆弧角度为 7.2399° ,最大允许刀具半径为 25.2974mm。

表 1 两种刀具参数确定方法分析结果对比

Tab.1 The result comparison of two tool parameters determination methods

	曲面表达	分析点	计算耗时	最小圆弧包角	最大刀具半径
方法一	401×401 点阵	每条曲线 100 点; 每 3° 1 条曲线	每条曲线 9.006637s	7.2399°	25.2974mm
方法二	41×41 点阵	80×80 点阵	整个曲面 8.744119s	7.1651°	25.2661mm
理论值	方程 18	任意点		7.1868°	25.3303mm

方法二仅需要 41×41 的点阵,就可以取得很好的曲面拟合精度。采用 80×80 的分析点阵就可以将横向和纵向分析间隔控制在 0.25mm。使用 Matlab 软件实现方法二,整个面分析需要的时间约为 8.744s。方法二分析得出,最小允许刀具圆弧角度为 7.1651° ,最大允许刀具半径为 25.2661mm。

将分析结果与理论结果对比发现,两种方法分析结果误差均在 1% 以内。但是方法一分析点在整个曲面上分布不均匀,距离轴心远的地方分布稀疏,近的地方过于密集。与之相比,方法二则在横向和纵向的分布是均匀的。另外,方法一计算耗时明显长于方法二。

5 结论

单点金刚石慢刀伺服车削技术可用于自由曲面加工。由于自由曲面面形复杂,需要将回转对称曲面超精密车削刀具参数确定的方法推广。数据仿真处理结果证明,对过轴心截面曲线进行分析的方法可以得到比较准确的分析结果,但存在曲面上分析点分布不均匀、计算时间过长等问题;基于曲面整体特性分析的 NURBS 方法克服了上述缺点,在计算精度和计算时间方面均得到了比较好的结果。

参考文献 (References)

- [1] Yi A Y, Raasch T W. Design and fabrication of a freeform phase plate for high-order ocular aberration correction [J]. Applied Optics, 2005, 44(32): 6869 - 6876.
- [2] Guan C L, Tie G P, Yin Z Q. Fabrication of array lens optical component by using of slow tool servo diamond turning [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31 (4).
- [3] Guan C L, Dai Y F, Yin Z Q, et al. Freeform turning lathe with direct drives and aerostatic bearing [C] // Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, 2009: 7282.
- [4] Lu X D, Trumper D L. Ultrafast tool servos for diamond turning [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005, 54(1): 383 - 388.
- [5] Lu X D, Trumper D L. Spindle rotary position estimation for fast tool servo trajectory generation [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 1362 - 1367.
- [6] Guan C L, Dai Y F, Xie X H, et al. Investigation on feedback control of linear motors in ultraprecision - machine feed - drive systems [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2009, 27(3): 1351 - 1354.
- [7] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
ZHU Xinxiong. Modeling technology of freeform curve and surface [M]. Beijing: Science Publication Company, 2000. (in Chinese)
- [8] Piegl L, Tiller W. The NURBS book [M]. 2nd Edition. New York: Springer - Verlag, 1997.