

自由曲面光学元件的慢刀伺服车削加工技术

关朝亮 戴一帆 尹自强

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 自由曲面光学元件具有许多优异的光学性能, 越来越多地应用到现代光学系统设计中。而自由曲面光学元件制造的复杂性和不确定性是制约其应用的瓶颈之一。慢刀伺服单点金刚石车削是一种可以加工很高精度自由曲面光学表面或非回转对称光学曲面的新技术。机床伺服执行能力是自由曲面能否加工的基本条件。金刚石刀具几何参数的选择、刀具路径规划及刀具半径补偿是确保加工精度的关键。在理论上, 对伺服执行能力进行了分析; 发展了基于曲面特性分析的刀具参数确定方法; 研究了稳定 X 轴的刀具圆弧半径补偿及刀具路径生成技术。使用慢刀伺服技术加工了多种典型的自由曲面光学元件, 取得了较好的结果。

关键词 自由曲面; 单点金刚石车削; 慢刀伺服; 刀具路径

中图分类号 T161 OCIS 220.5450 240.6700 文献标识码 A

Freeform Surface Optical Components Machining by Slow Tool Servo Diamond Turning

Guan Chaoliang Dai Yifan Yin Zqiang

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The inclusion of freeform elements in an optical system provides opportunities for numerous improvements in performance. However, designers are reluctant to utilize freeform surfaces due to the complexity and uncertainty of their fabrication. Single diamond turning is a novel machining process capable of generating freeform optical surfaces or rotationally non-symmetric surfaces at high levels of accuracy. In order to achieve good results with this technology some key parameters need to be satisfied. These parameters include tool geometry, tool path generation, tool radius correction, and servo system performance. The servo capacity of slow-tool-servo machine is analysed, and a method to determine tool geometry parameter based on surface analysis is developed. The methods of tool radius compensation and tool path generation to ensure the stability of X-axis are researched. Experiment results show that slow-tool-servo machining technology can be used in preparation of optical free form surfaces element.

Key words freeform surface; single point diamond tuning; slow tool servo; tool path

1 引言

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、传真机、扫描仪、激光雕刻机、光电显示器和光纤通讯等产品已形成了一个数以万亿计的全球市场。在国防和军事应用中, 非回转对称曲面光学元件在各种可见光瞄准器、头盔显示器、微

收稿日期: 2009-04-03; 收到修改稿日期: 2009-09-07

基金项目: 部委级基金(9140A18070108KG0147)资助课题。

作者简介: 关朝亮(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事精密工程、机械电子工程等方面的研究。

E-mail: chlguan@nudt.edu.cn

导师简介: 戴一帆(1966—), 男, 教授, 主要从事精密工程、微机电系统等方面的研究。E-mail: dyf@nudt.edu.cn

光夜视器、红外探测设备、精确打击运载工具和末制导智能炸药中也将得到十分广泛的运用。

虽然自由曲面光学元件比传统的球面或非球面光学曲面元件有许多显而易见的优点，但其加工却非常困难，这大大限制了它的应用范围。自由曲面加工传统上采用手工修磨的加工方法，这种方法周期长，加工过程不能量化描述，工件质量难以控制，更多的自由曲面光学零件甚至无法用手工加工。自由曲面的加工一直是超精密制造领域亟待解决的问题。自由曲面光学元件现代制造技术路线可分为两类：超精密微磨技术和游离磨料确定性微磨、抛光加工技术；超精密单点金刚石切削。其中，超精密单点金刚石切削又包括飞刀铣削、快刀伺服车削以及慢刀伺服车削技术。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，初始对刀困难且飞刀铣削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，已应用于自由曲面和光学微结构阵列车削加工^[1,2]。但是，快刀伺服存在的主要问题是大多数快刀装置的行程都在 1 mm 以下，限制了其加工范围。慢刀伺服车削技术作为光学自由曲面加工的一种方法可用于光学阵列元件加工^[3]。L. Li 等^[4-6]已经使用慢刀伺服技术加工了自由曲相位板和微透镜阵列等一系列工件。由于使用 Z 轴带动刀具其运动范围较大，并且对刀过程简单、性价比高，单点金刚石慢刀伺服车削加工可以用于加工很高精度的工件^[7]。由于光学阵列元件表面形状的复杂性，需要合理确定刀具几何参数。因为在不同的刀具圆弧半径补偿方式下，机床运动对伺服轴的动态响应能力的要求也不相同，需要选择合适的刀具半径补偿方式，以使刀具路径适应慢刀伺服车削机床动态性能的要求。本文从理论上对慢刀伺服机床的伺服执行能力进行了分析，发展了基于曲面特性分析的刀具参数确定方法，研究了稳定 X 轴的刀具圆弧补偿技术。最后使用慢刀伺服技术加工了多种典型的自由曲面光学元件。

2 慢刀伺服车削技术

慢刀伺服车削典型的机床布局形式如图 1 所示，与普通单点金刚石车削以及快刀伺服车削加工布局类似。两根直线进给轴呈“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。刀具安装在 Z 轴，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同转动，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， $z = f(x, \varphi)$ 。

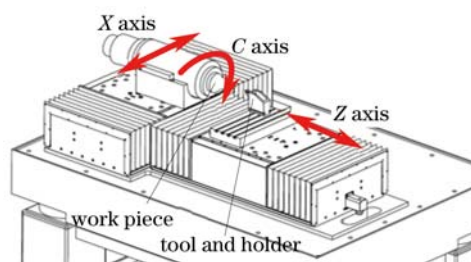


图 1 慢刀伺服机床配置形式
Fig.1 Configuration of slow-tool-servo turning lathe

这种在普通超精密车削机床基础上发展起来，通过将主轴运动由速度控制改为位置控制，利用 C, X, Z 轴联动在极坐标或圆柱坐标系内实现非回转对称曲面加工的方法，由于带动刀具运动的 Z 轴最高只能达到几十赫兹，相比快刀几百甚至上千赫兹的运动较慢因此称为慢刀伺服技术。

慢刀伺服与快刀伺服的相同之处在于：工件安装在主轴上并且随主轴一起转动，金刚石刀具按照工件不同的轴向和径向位置相对于工件表面运动。不同之处在于：慢刀伺服中仅使用机床 Z 轴带动刀具运动，而不需要附加的伺服装置。另外，慢刀伺服相对快刀伺服来说其行程长但加速度相对较低，比较适合非回转

对称连续表面的加工, 而快刀伺服具有较大的加速度, 更适合非连续表面的加工。在控制方案上, 慢刀伺服中主轴采用位置控制模式(C轴), 而在快刀伺服中只是将主轴编码器的位置信号传给快刀伺服单元使用而并不将主轴置于位置伺服状态。慢刀伺服采用X, Z, C三轴联动的方式插补出工件表面曲线(如图1所示), 从而完成非回转对称光学表面的加工。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又有别于普通三轴联动数控。其一, 慢刀伺服属超精密加工, 直线轴分辨率达纳米级, 旋转轴分辨率达 $0.05''$, 普通的多轴联动数控难以胜任; 其次, 普通的多轴(三轴或以上)联动数控是针对铣削、磨削等加工方式, 一般这些机械切削方式, 其主切削运动与进给运动是独立的, 而对慢刀伺服来说, 主轴的旋转运动既是主切削运动又是进给运动, 因此, 普通的多轴联动数控程序也不能直接使用。超精密金刚石慢刀伺服车削加工的数控代码需采用专门的软件生成。

3 机床轴伺服执行能力建模

伺服轴的执行能力是判断自由曲面能否使用慢刀伺服车削加工的必备条件。以Z轴为例, 其执行能力的限制主要是行程、最大速度、最大加速度三个因素。假设如下: 1) Z轴为液体静压导轨, 摩擦力极小, 故不考虑摩擦力; 2) 微量切削时切削力也可以忽略不计; 3) 导轨水平布置, 不需克服重力分量。导轨行程是最显而易见的限制, 即伺服轴运动范围不能超过导轨的行程 L 。设伺服轴的运动轨迹为 $P(t)$, 则

$$P(t)_{\max} - P(t)_{\min} \leq L. \quad (1)$$

为了保证机床运行安全, 通常设定最高运行速度 V_{\max} , 即有,

$$P'(t) \leq V_{\max}. \quad (2)$$

伺服电机系统是物理系统, 其能量是有限的, 电机的出力不可能是无限大。一般而言, 电机会有一个峰值力矩和一个连续力矩。为了简化考虑, 这里认为电机超过峰值力矩就进入了非线性区, 达到了电机执行能力的极限。设移动部分总质量为 M , 直线电机峰值推力为 F_{\max} , 根据牛顿第二定律有

$$MP''(t) \leq F_{\max} \quad (3)$$

假设Z轴运动为单频正弦形式, 即 $Z(t) = A \sin(2\pi ft)$ 。其中, A 代表正弦运动幅值, f 表示正弦运动频率。分别考虑(1), (2), (3)式, 可获得运动幅值与正弦频率之间的限制关系

$$A \leq \min \left\{ L/2, \frac{V_{\max}}{2\pi f}, \frac{B_{\max}}{2f^2} \right\}, \quad (4)$$

式中 $B_{\max} = F_{\max}/M$ 为最大加速度限制。

(1), (2), (3)式是对伺服轴限制的最基本形式, (4)式则是对导轨行程、最高速度、最大加速度(电机最大出力)三个限制的综合。对于Z轴来讲, 主轴一转之内表面形状的起伏对应Z轴运动的幅值, 起伏次数和主轴速度则大致对应Z轴运动的频率。根据(4)式可初步分析自由曲面面形是否可以通过慢刀伺服车削加工。同理, 可对X轴和C轴执行能力限制建模。

4 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, 即最大允许刀具半径和最小允许圆弧包角, 其几何示意图如图2所示。

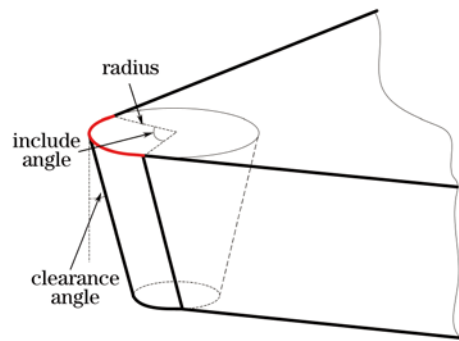


图 2 金刚石刀具几何角度示意图
Fig.2 Shape of diamond turning tool

在回转表面车削加工中只需要考虑一条母线形状即可得到最小的圆弧包角和最大的刀具半径。再考虑在纵切面内刀具与工件的相互位置关系即可确定后角的大小。对于非回转表面，刀具半径和圆弧包角的确定可以仿照回转表面的方法。但是由于非回转表面没有绕一条回转轴旋转的母线，因此要遍历所有过主轴轴心的剖面截线。将剖面截线用 NURBS 曲线拟合后，可利用 NURBS 曲线分析理论计算出法线方向和曲率，从而确定刀具圆弧包角和最大刀具半径。实际计算中为了保证一定的精度需要尽量加密剖切面数量，但这势必大大增长计算时间。并且过中心取剖面截线的做法还存在工件中心区域分析点过密而边缘分析点稀疏的问题。

将整个曲面使用 NURBS 曲面拟合，根据计算几何理论中曲面的第一、第二基本公式和 Meusnier 定理可以单独对表面上某一点所在的任意截面曲线的曲率和法线进行分析，从而可减小计算量，并使等分辨率分析成为可能。

后角大小的确定比较复杂。从几何方面讲，非回转表面在圆周方向上曲面的斜率在不断变化，车刀后角的大小可能造成刀具体与已加工表面的干涉。要找到不发生干涉的最小后角，从计算几何的角度看这是一个三维相交的问题，并且也有许多经典算法。然而要保证整个加工过程中都不发生干涉，就需要在所有刀位点处进行计算，这必然涉及到算法效率和算法精度的问题。如果能从理论上分析得出最容易发生干涉的点(或区域)，便可以大大简化整个搜索过程。获得刀具路径的基础上，使用计算几何中判断三维相交的方法，搜索满足整个刀具轨迹上不发生干涉的最小后角。

5 刀具圆弧半径补偿及刀具路径生成

刀具轨迹生成的通常做法是根据一定的规则(等参数法、回形路径等)得到刀具与被加工表面的实际接触点(称为刀触点)，而后考虑刀具半径补偿等因素得到刀位点。因此刀触点的获得是刀具路径生成中的关键。根据非回转表面车削加工的原理知，刀具路径近似于空间螺线的形式。使用螺旋卷曲的柱面与工件设计表面求交可得到刀触点曲线。在回转表面的车削加工中为提高加工精度和表面质量需要根据母线斜率对刀触点的选取密度进行优化，而非回转表面刀触点选择需要根据圆周和径向两个方向上的斜率变化进行优化。补偿计算后得到的刀具路径可能由于非回转对称曲面法线突变而超出机床加工能力，因此还需对刀具路径进行优化。

通常，按法线方向对刀具半径补偿。这就要求在机床 X 轴机床 Z 轴两个方向上同时进行补偿。因此，随着法线方向的改变刀具将在 X 轴方向有一个微小振动。因为光学阵列元件经常出现表面法线方向突变情况，这时 X 轴将突然出现补偿量。又考虑到图 1 中机床 X 轴上装有主轴，因此其动态相应能力大大受到限制，可能会出现 X 轴超出执行能力范围而不能加工的情况。

为了避免上述问题，可采用稳定 X 轴的半径补偿技术。主要思想是：将补偿量全部集中到负载较小、

驱动力较大、动态响应能力相对较高的 Z 轴上, 如图 3 所示。设 L_2 点是仅对 P 点 Z_d 坐标补偿的刀具路径点。则有

$$L_2 = P + m e_z. \quad (6)$$

式中 $m \geq 0$ 为补偿量, L_2 表示点 L_2 的空间三维坐标矢量, P 表示点 P 的空间三维坐标矢量, e_z 表示 z 轴单位矢量。 L_2 到曲线 C_2 的距离为 R , 即刀具圆心位于 L_2 处时刀具圆弧仍然与曲线 C_1 相切。实际上, L_2 是曲线 C_1 的等距曲线 C_2 上的一点。可使用搜索的办法确定 m 值, 这里不作赘述。

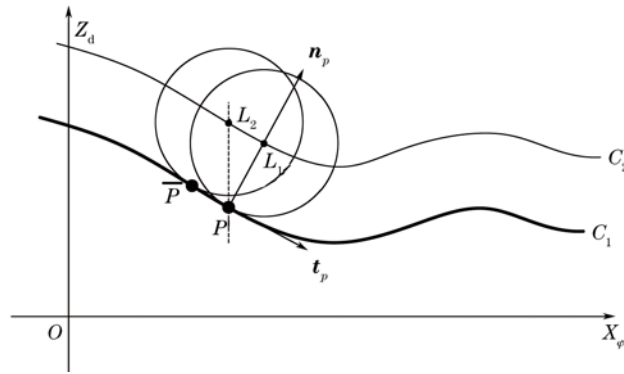


图 3 切削平面内刀具与工件表面相对位置关系
Fig.3 Relationship between tool and workpiece in cutting plane

6 实 验

以一个 1×2 的凹球面阵列为例来说明光学阵列的慢刀伺服车削加工过程, 如图 4 所示。凹球面半径 300 mm, 口径 18 mm, 中心间隔 15 mm。材料选择为 6061 铝。利用第 4 节刀具参数确定的方法发现刀具圆弧只要大于 4.1251° , 圆弧半径小于 299 mm 即可。因此, 根据商品化的刀具规格选择刀具半径 0.9789 mm, 圆弧轮廓角 120° , 后角为 10° 。数控程序生成时选择主轴为 C 轴, 转速选择为 120 r/min, 横向进给量 $10 \mu\text{m/r}$, 每转等角度间隔取 120 个刀触点。分别使用两种刀具半径补偿方式计算其刀具路径。按法线方向对刀具圆弧半径补偿时得到的刀具路径发现: X 轴行程和速度均在机床 X 轴极限能力之内, 但加速度超出机床极限值 2000 mm/s^2 。按稳定 X 轴的方法对刀具圆弧半径补偿时得到的刀具路径发现: X 轴运动的加速度几乎为零, 使用稳定 X 轴的刀具圆弧半径补偿方式, 有效地避免了光学阵列表面法线突变时造成的 X 轴方向的极大加速度运动。对 X 轴的运动加速度分析如图 5 所示。

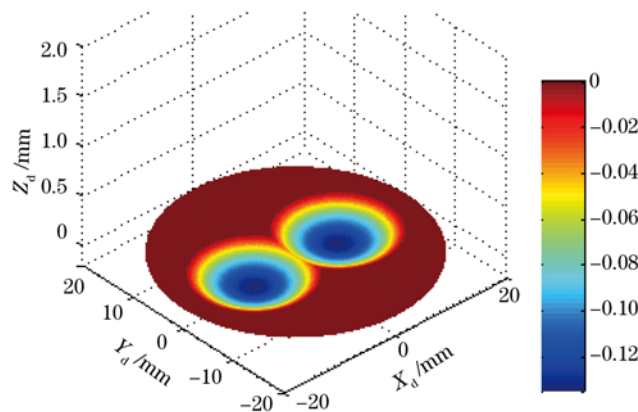


图 4 光学阵列模型
Fig.4 3D model of array lens

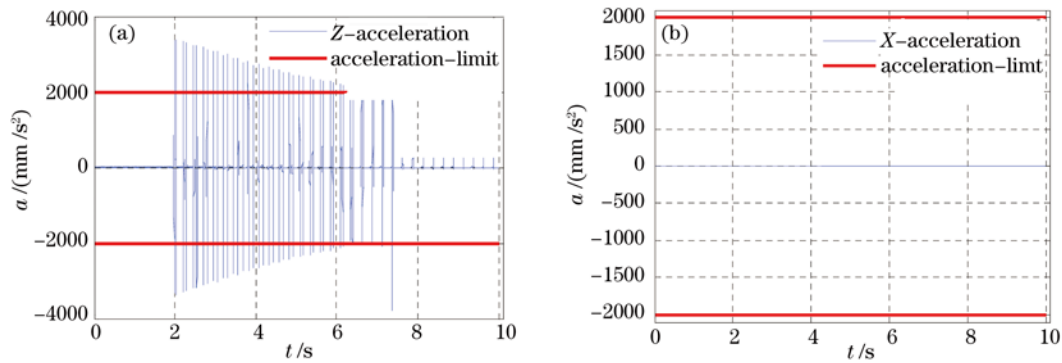


图 5 X 轴运动加速度分析。(a)按法线补偿；(b)按稳定 X 轴补偿

Fig.5 Acceleration analysis of X axis. (a) compensation using normal method; (b) compensation using steady X method

凹球面阵列的加工结果，如图 6 所示。凹球面中之一的形状误差如图 6(b)所示，另一凹球面形状误差的分布和数值都与此接近。其中，从车削中心产生的有规律的射线状误差分布是由于刀具路径生成时等角度取点造成的。粗糙度测量结果如图 6(c)所示，可以看出划痕、残留微小切屑以及车削纹路。

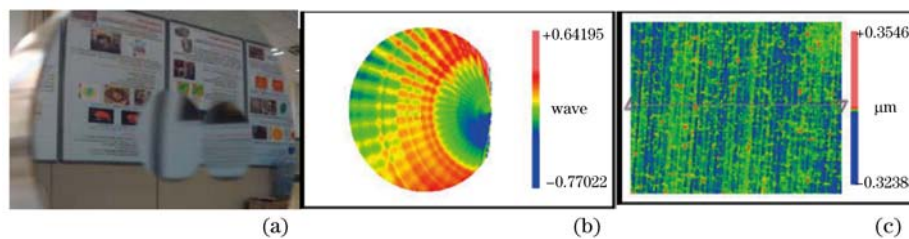


图 6 光学阵列加工结果。(a)实物照片；(b)凹球面形状误差；(c)粗糙度值

Fig.6 Machining result of array lens. (a) picture; (b) figure error of concave sphere; (c) roughness error

7 结 论

慢刀伺服单点金刚石车削是加工自由曲面光学元件的新技术。研究认为：1) 慢刀伺服车削加工可以实现多种光学自由曲面的加工；2) 刀具参数快速确定是自由曲面车削中首先要解决的问题。通过曲面分析的方法可以快速合理地确定出刀具几何参数范围；3) 慢刀伺服车削加工对 Z 轴动态响应要求很高；分析 Z 轴的伺服执行能力，可以确定出慢刀伺服加工的限制范围；4) 结合进给轴的伺服能力，合理的刀具半径补偿方式选择在不同种类自由曲面工件加工中显得尤为重要。

参 考 文 献

- 1 H. S. Kim, E. J. Kim, B. S. Song. Diamond turning of large off-axis aspheric mirrors using a fast tool servo with on-machine measurement[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, **146**(3): 349~355
- 2 W. Gao, T. Araki, S. Kiyono *et al.*. Precision nano-fabrication and evaluation of a large area sinusoidal grid surface for a surface encoder[J]. *Precision Eng.*, 2003, **27**(3): 289~298
- 3 A. Y. Yi, L. Li. Design and fabrication of a microlens array by use of a slow tool servo[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(13): 1707~1709
- 4 L. Li, C. N. Huang, A. Y. Yi. Fabrication of micro and diffractive optical devices by use of slow tool servo diamond turning process [C]. *ASPE*, 2005
- 5 A. Y. Yi, T. W. Raasch. Design and fabrication of a freeform phase plate for high-order ocular aberration correction[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(32): 6869~6876
- 6 C. N. Huang, L. Li, A. Y. Yi. Design and fabrication of a micro alvarez lens array with a variable focal length [J]. *Microsyst. Technol.*, 2009, **15**(4): 559~563
- 7 Y. E. Tohme, J. A. Lowe. Machining of freeform optical surfaces by slow slide servo method [C]. *ASPE*, 2003