

文章编号:1006-852X(2004)02-0020-05

轴对称非球面加工进给速度控制技术研究^{*}

RESEARCH ON FEED VELOCITY CONTROL MODEL OF AXISYMMETRIC ASPHERIC

黄浩 郭隐彪 王振忠 谢仁宁

(厦门大学机电工程系,福建 厦门 361005)

Huang Hao Guo Ynbiao Wang Zhenzhong Xie Renning

(Dept. of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

摘要:本文根据轴对称非球面的加工误差特性,通过分析轴对称非球面磨削加工中砂轮磨削线速度、进给速度对加工精度影响的条件,提出控制砂轮进给速度使轴对称非球面工件各点磨削量均匀的方法。该技术避免了传统加工方法中原理上固有的磨削量差异缺陷,提高了系统的加工精度。研究表明:进给速度控制方法针对轴对称非球面加工中常用的平面砂轮、圆弧砂轮、球面砂轮,均得到了良好的控制效果;采用新方法的数学模型更接近于理论计算轨迹,可以进一步提高工件的加工精度;新方法进给速度由外沿加工至中心部分,进给速度逐渐加快,并且变化率也逐渐增大。

关键词:轴对称非球面;加工精度;进给速度;控制;砂轮

中图分类号:TG 76 **文献标识码:**A

Abstract: According to the axisymmetric aspheric machining error feature, this paper analyses the parameters which influence the machining accuracy of workpiece, such as grinding linear velocity and feed velocity of grinding wheel in axisymmetric aspheric machining. And a new technology that controls the feed velocity to uniform the grinding removal quantity in axisymmetric aspheric machining is put forward. The technology can avoid the defect of the differential machining removal quantity existed in the traditional grinding methods and improve the process accuracy of the system. The research results show that: The control method is aimed at the plane grinding wheel, arc grinding wheel and sphere grinding wheel commonly used in the aspheric grinding, and achieve good control effect all. New method of mathematic model is closer to calculating locus in theory. It can further improve the machining accuracy. The new feed velocity control method would speed up while the machining is from the fringe to the center, and the change ratio would gradually increase accordingly.

Key words: axisymmetric aspheric surface; machining accuracy; feed velocity; control; grinding wheel

在超精密金刚石砂轮磨削加工中,误差产生的原因多种多样。为了以现有的硬件设备条件达到更高的精度。必须对加工中各种影响因素进行建模分析。对于轴对称非球面加工,除了砂轮的形状精度、尺寸精度及机床误差的影响^[1],砂轮磨削线速度及进给速度也是影响加工精度的一项重要因素。由于轴对称非球面加工特性,加工中砂轮各加工点磨削线速度及砂轮于非球面各区域停留时间均不相同。这就造成了砂轮在各加工点磨削量差异,从而影响加工精度。

按传统补偿方法,以机床进给精度为 $0.1\mu\text{m}$ 则精度一般收敛于 $3\sim 5\mu\text{m}$,而以机床进给精度为 $0.01\mu\text{m}$ 则最高精度极限 $1.5\mu\text{m}$ ^{[2][3]}。为了进一步提

高精度,本文提出了砂轮进给速度控制模型,在加工中只需控制砂轮进给速度不断改变,就可以使轴对称非球面各加工点磨削量均匀。

1 匀速加工误差分析

1.1 轴对称非球面

轴对称非球面为旋转体。加工中,砂轮加工点运动轨迹为工件母线轨迹,而工件绕旋转轴旋转。轴对称非球面母线公式有多种表达方式,其可表达为^[4]:

$$z = - \frac{CX^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)C^2X^2}} - \sum_{i=1}^n (a_i X^i) \quad (1)$$

式中: $C = \frac{1}{R}$, R ——非球面基础曲率半径

* 国家 863 资助项目 (8638042416)

a_i ——非球面系数

式(1)中 z 轴为旋转轴, z 轴左半部为母线, 非球面顶点为原点。当 $k < -1$ 时, 表示双曲面; 当 $k = -1$ 时, 表示抛物面; $-1 < k < 0$ 时, 表示以椭圆的长轴对称的半椭球面; $k = 0$ 时, 表示球面; $k > 0$ 时, 表示以椭圆的短轴对称的半椭球面。

另外轴对称非球面母线公式还可表达为:

$$x^2 = b_1 / z + b_2 z^2 + b_3 / z^3 + b_4 z^4 + b_5 / z^5 + \dots \quad (2)$$

式中: $b_1 = 2R$, R ——非球面基础曲率半径

1.2 磨削深度与速度关系

如图 1 所示, 加工中轴对称非球面工件绕 z 轴逆时针旋转, 与此同时砂轮沿 x 轴正方向从 A 点进给至原点 O。当 x 轴加工进给速度为匀速时, 称其为匀速进给加工。此时由于工件旋转角速度、砂轮进给速度不变, 则可得非球面工件旋转一周砂轮进给距离始终保持不变。所以可知工件表面加工俯视轨迹为一螺旋线。

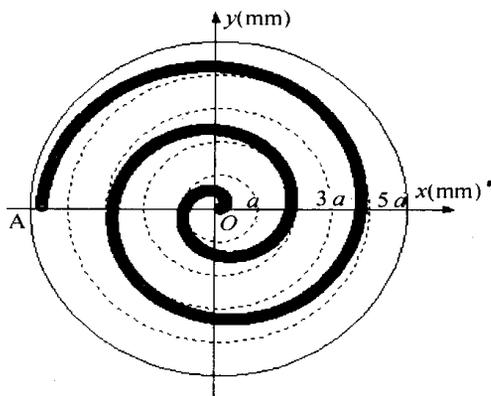


图 1 加工轨迹俯视图

由于工件的去除量与砂轮在该点的停留时间、该点磨削线速度成正比^[6]。则可以推出区域磨削原理: 砂轮在一固定区域的磨削深度与砂轮停留时间 t 成正比、与工件和砂轮之间线速度 GV 成正比、与该区域的面积 S 成反比。

$$= K \times \frac{GV \times t}{S} \quad (3)$$

1.3 匀速加工误差分析

在轴对称非球面加工中, 如果使用匀速进给加工, 在等时间所加工的区域面积中心部分将远远小于外沿部分。则根据区域磨削原理可得: 匀速进给加工将在工件中心点产生较大的磨削深度。从而影响加工精度。这与实际加工中产生的误差形式相符。如图 2 所示, 使用匀速进给加工时, 无论加工精度如何, 加工误差于工件中心部分总有一急剧的凹下部分。

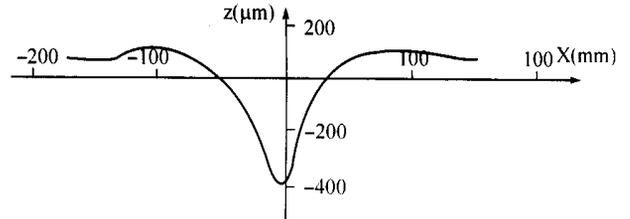


图 2 匀速加工误差图

2 进给速度控制模型

在高精度磨削加工中, 由于主轴转速变化对温度有较大影响, 容易引起主轴热胀冷缩, 一般砂轮及工件主轴转速轻易不能改变。且主轴转速控制精度较低, 如在加工中控制主轴转速, 极易引入误差。所以本文所提出的控制方法将砂轮及工件主轴转速设为恒定, 而控制砂轮进给速度来达到控制加工误差、提高加工精度的目的。

根据式(3)可得: 为提高加工精度, 必须考虑磨削线速度、磨削区域面积、砂轮停留时间。减小工件上各加工磨削量差值。

2.1 加工线速度计算模型

磨削区域磨削加工线速度由两部分组成: 工件加工点线速度、砂轮加工点线速度。

加工大型轴对称非球面工件时, 由于工件半径较大, 其外围加工点线速度与砂轮加工点线速度是同一个数量级, 必须予以考虑。

轴对称非球面加工中, 工件匀速旋转, 其表面点线速度方向始终与半径垂直; 而砂轮沿轴对称非球面母线进给, 其加工线速度方向也始终垂直于半径。所以工件加工点线速度与砂轮加工点线速度只有同向或反向。当它们同向时, 他们之间的相对线速度即该点加工线速度为它们之间的差值; 反向时, 加工线速度为它们的和。

所以砂轮加工点于轴对称非球面母线上插补点 x_{i-1} 与 x_i 之间的加工时, 工件线速度为:

$$GV_i = \omega_1 \cdot \left(\frac{|x_i| + |x_{i-1}|}{2} \right) \quad (4)$$

式中: ω_1 ——工件转速

而使用不同砂轮, 其加工点的线速度并不相同。对于平形砂轮, 砂轮各加工点线速度是完全一致的; 而对于圆弧砂轮, 位于外沿部分的砂轮加工点线速度较小, 而中心部分较大; 对于球面砂轮, 球面中心点线速度为零, 而中心点附近的线速度极小, 不适合加工, 而外沿部分线速度较快。为提高加工精度, 加工中使砂轮转速为恒定, 设其为 ω_2 。

(1) 平形砂轮各加工点线速度计算

设平形砂轮半径为 r , 则平面砂轮各加工点线速度均为 $\omega \cdot r$ 。

(2) 圆弧砂轮各加工点线速度计算

如图 3 所示, 设圆弧砂轮圆弧部分半径为 r , 中

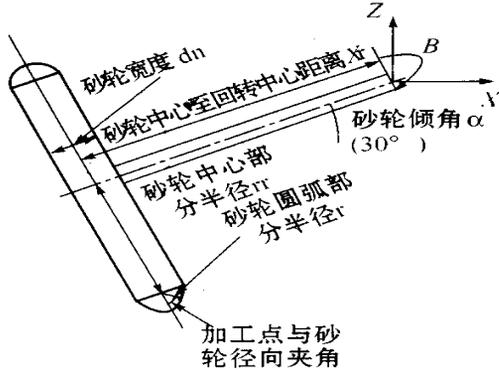


图 3 圆弧砂轮加工原理图

心部分半径为 r_r , 圆弧砂轮加工点与圆心连线和砂轮径向夹角为 β 。则对于圆弧砂轮加工, 该加工点线速度为 $\omega \cdot (r_r + r \cos \beta)$ 。非球面于某点 $(x_i, f(x_i))$ 的法向角度为 $\arctg(f'(x_i))$, 设砂轮倾角为 α , 则 $\beta = \alpha - \arctg(f'(x_i))$ 。

对于圆弧砂轮, 一般使砂轮倾角恒定, 以减少所需控制的轴, 提高加工精度。所以砂轮线速度变化只与工件当前加工点坐标及工件导数有关。

所以使用圆弧砂轮加工时, 砂轮加工轴对称非球面母线上插补点 x_{i-1} 与 x_i 之间区域的加工点线速度:

$$GV_i = \omega \cdot \left(r_r + r \cdot \frac{\arctg(f'(x_i)) - \arctg(f'(x_{i-1})) \cdot \cos d}{\arctg(f'(x_i)) - \arctg(f'(x_{i-1}))} \right) \quad (5)$$

解得:

$$GV_i = \omega \cdot \left(r_r + r \cdot \frac{\sin(\arctg(f'(x_i)) - \alpha) - \sin(\arctg(f'(x_{i-1})) - \alpha)}{\arctg(f'(x_i)) - \arctg(f'(x_{i-1}))} \right) \quad (6)$$

(3) 球面砂轮各加工点线速度计算

与圆弧砂轮类似, 设球面砂轮半径为 r , 则可得砂轮加工点线速度为:

$$GV = \omega \cdot r \cdot \sin \theta \quad (7)$$

式中: θ ——加工点与主轴夹角。

根据球面砂轮加工的特性关系, 可得:

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \arctg(f'(x)) \quad (8)$$

则可得:

$$GV = \omega \cdot r \cdot \cos(\alpha - \arctg(f'(x))) \quad (9)$$

对于球面砂轮, 必须不断旋转砂轮倾角以使球面砂轮与轴对称非球面相切。加工中砂轮倾角减去轴对称非球面加工点法向角度就是球面砂轮加工角。采用等角度旋转加工。取砂轮倾角上下限。

理论上球面砂轮倾角上下限分别为 0° 与 90° 。但是球面砂轮中心部分加工中线速度为零, 而其周围部分线速度亦较小, 所以砂轮倾角不能达到 90° , 而球面砂轮最外沿亦一般不做加工用。球面砂轮倾角必须大于砂轮切线角度。即加工点与砂轮圆心连线和主轴的夹角小于 90° 。

则可得球面砂轮于 x_{i-1} 进给至 x_i 砂轮加工点线速度:

$$GV_i = \omega \cdot r \cdot \frac{\arctg(f'(x_i)) - \arctg(f'(x_{i-1})) \cdot \cos d}{\arctg(f'(x_i)) - \arctg(f'(x_{i-1}))} \quad (10)$$

解得:

$$GV_i = \omega \cdot r \cdot \frac{\sin(\arctg(f'(x_i)) - \alpha) - \sin(\arctg(f'(x_{i-1})) - \alpha)}{\arctg(f'(x_i)) - \arctg(f'(x_{i-1}))} \quad (11)$$

2.2 有效磨削面积计算模型

设砂轮于 x 轴进给速度为 v , 进给步长为 dx 。则可得工件转一圈砂轮进给距离为恒定值 $v \cdot \frac{2\pi}{1}$, 而砂

轮进给 dx 工件转过弧度为 $\frac{dx}{v}$ 。

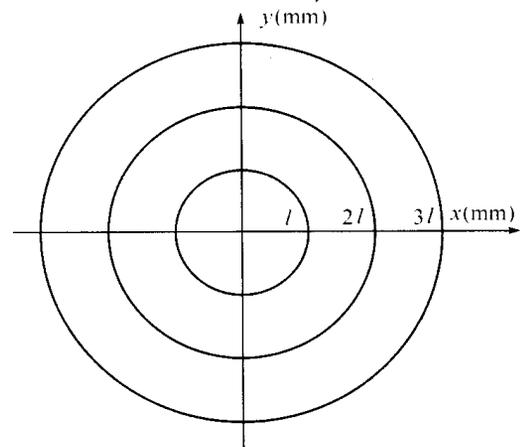


图 4 加工区域分析图

以区域分割步长 l 将轴对称非球面分割为 n 个区域, 其中 l 为砂轮进给步长 dx 的倍数。设这些区域由里至外依次为 A_1 至 A_n , 则中心部分 A_1 为圆, 其面积为 l^2 , 其余区域均为圆环。设在区域 A_i ($1 \leq i \leq n$) 中, 砂轮磨削到的有效磨削面积为 S_i 。

假定工件上所有区域, 砂轮于一次进给均可加

工到。则如图 4 所示,砂轮在加工区域 A_i 时,其实际磨削面积为:

$$S_i = (2i - 1) l^2, 1 \leq i \leq n \quad (12)$$

2.3 进给速度控制模型

根据加工误差分析可知:当磨削线速度恒定时,于各加工点使用不同的加工进给速度,控制砂轮于某区域的停留时间,改变有效磨削面积。可以减小各个加工点之间的磨削量差值,提高加工精度。

设轴对称非球面工件 x 轴分割值为 l ,则为了使各加工区域磨削深度一致,根据式(3)可知,必须使加工线速度 GV 、加工面积 S 、加工时间 t 乘积恒定。所以可得:

$$\frac{GV_i \times T_i}{S_i} = \frac{GV_{i+1} \times T_{i+1}}{S_{i+1}} \quad (13)$$

对于某个确定工件,当加工方式及分割值确定后,即可确定该分段内加工线速度 GV_i 。

又
$$T_i = \frac{l}{v_i} \quad (14)$$

式中: l ——工件分割值
 v_i ——砂轮进给速度

则可以得一下两式:

$$V_i = \frac{GV_i \times S_1 \times V_1}{GV_1 \times S_i} \quad (15)$$

$$V_i = \frac{GV_i \times S_{i-1} \times V_{i-1}}{GV_{i-1} \times S_i} \quad (16)$$

3 结果分析

3.1 计算步骤

为提高加工精度,必须尽量使速度变化为连续变化。所以当非球面插补分割足够小,可以视进给速度变化函数 $F(x)$ 为连续函数。

由于机床原因,砂轮进给速度必须限定于一定范围以内。所以首先给定加工进给速度上下限,设最大进给速度为 F_{max} 最小进给速度为 F_{min} ,非球面起始点为 fp_x 。令 $F(0) = F_{max}$ 、 $F(fp_x) = F_{min}$ 。则可以求出区域分割数 m 。此时可根据公式(15)计算出各分割区域的进给速度。根据上述算法,编制程序,程序流程图如图 5 所示。

又由于控制进给速度必须以插补节点来控制。所以如果将工件分为 n 段进行插补,则可以选择控制进给速度的控制节点为 $n + 1$ 个。放弃控制的节点将自动保持上一节点的进给速度。由于区域分割步长 l 为进给步长 dx 的倍数,所以区域分割数 m 是插补分段个数 n 的倍数。只需适当选取其中 m 个插

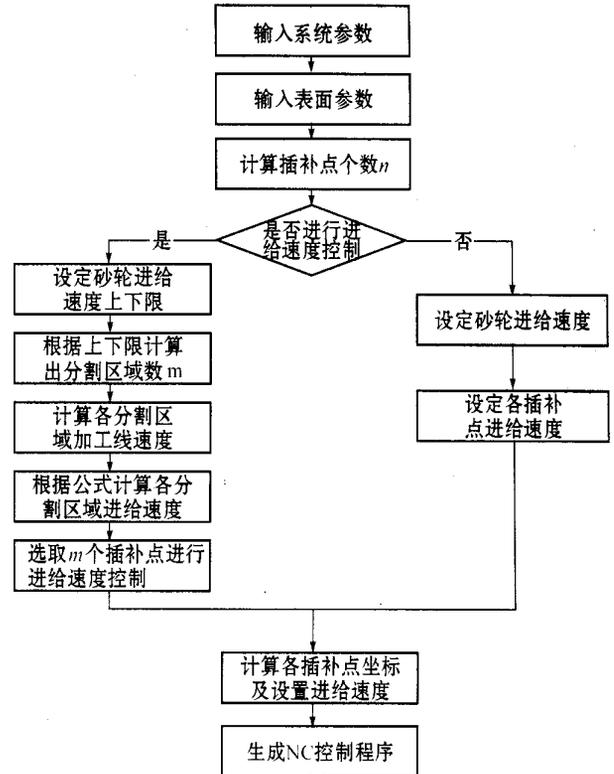


图 5 程序框图

补节点进行控制。

由于数控机床加工时必须以各插补点进行插补计算,所以实际加工中速度控制也必须以插补点为起点和终点。

3.2 计算结果

选择不同砂轮加工,加工系统参数如表 1 所示。而轴对称非球面工件公式为式(2),其参数如表 2 所示。

表 1 加工系统参数

系统参数	平面砂轮	圆弧砂轮	球面砂轮
砂轮圆弧半径 r/mm	/	60	125
砂轮中心半径 rr/mm	125	65	/
工件基础半径 R/mm	2268.839	2268.839	2268.839
进给步长 dx/mm	1.0	1.0	1.0
工件加工长 xx/mm	225.0	225.0	225.0
回转中心距 L/mm	120.0	120.0	120.0
砂轮有效宽度 B_0/mm	18.0	/	/
工件加工起始点 x/mm	- 225.0	- 225.0	- 225.0
砂轮宽度 B/mm	20.0	20.0	20.0
砂轮加工点距离 B_i/mm	10	/	/
加工倾角 $/^\circ$	/	30	30

表 2 工件表面参数

b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
4537.6775	-0.1252	2.9830e-4	-2.3408e-5	9.8747e-7

进给速度上限为 1200mm/min, 下限为 400mm/min; 砂轮加工点线速度与工件加工点线速度同向。

以上述系统参数进行加工, 以 3mm 为速度控制步长。可得进给速度控制结果如图 6 所示。

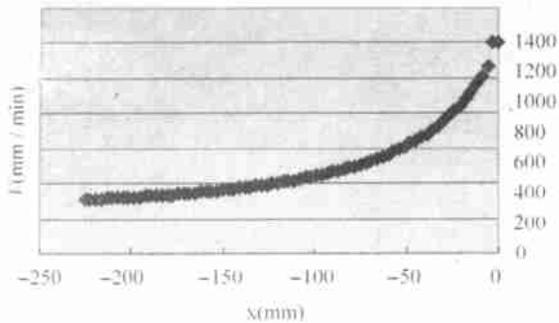


图 6 进给速度控制散点图

4 结论

根据轴对称非球面的加工误差特性, 通过分析不同砂轮进给速度对磨削量的影响, 提出砂轮进给速度

控制方法。该技术避免了传统加工方法中原理上固有的磨削量差异缺陷, 提高了系统的加工精度。研究结果表明:

(1) 该控制方法针对轴对称非球面加工中常用的平面砂轮、圆弧砂轮、球面砂轮。均得到了良好的控制效果。

(2) 采用该进给速度控制方法, 进给速度由外沿加工至中心部分, 进给速度逐渐加快; 并且变化率也逐渐增大。

参考文献

- [1] 郭隐彪, 杨继东, 梁锡昌等. 轴对称非球面模具加工中的补偿技术研究[J]. 中国机械工程, 2000, 10(4): 415~417.
 - [2] Masaru Saeki, Tsunemoto Kuriyagawa, Joo-Sang Lee, et al. Machining of Aspherical Opto-Device Utilizing Parallel Grinding Method [J]. ASPE Annual, 2001, 25: 433~436.
 - [3] J. Yan, K. Syoji, T. Kuriyagawa. Ultraprecision Machining of Brittle Crystals for Advanced Optical Applications [J]. Proceedings of ICME, 2000, 1~5.
 - [4] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- 第一作者简介: 黄浩, 男, 1980年12月出生, 厦门大学机电系硕士研究生, 主要研究方向: 超精密非球面加工。
E-mail: killers100@163.net

(收稿日期: 2004-01-28)

(编辑: 张慧)

(上接第 19 页)

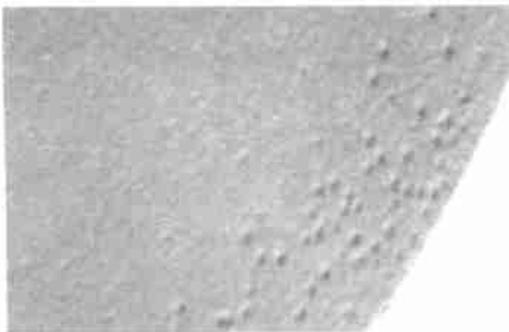


图 7 普通电源加工的大面积 PCD 表面



图 8 高能量、窄脉冲及等脉冲能量输出电源加工的大面积 PCD 表面

提高加工表面质量。已在生产实际中得到证实。

(2) 充分利用储能元件的特点, 不但可以得到很大的放电能量, 还可以达到节能降耗、提高能量利用率的目的。

参考文献

- [1] Cao, fengguo. A New Technology of High-Speed Machining Polycrystalline Diamond with Increased Electric Discharge Breakdown Explosion Force [C]. Proceedings of International Symposium for Electro-Machining (ISEM-9), Nagoya 1989: 309~312.
- [2] 北京市《金属切削理论与实践》编委会. 电火花加工[M]. 北京出版社, 1983: 20~40.
- [3] 赵万生, 刘晋春. 电火花加工技术[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2000: 44~49.
- [4] [苏] . . . 米夏兹著, 邵贵荣译. 大功率毫微妙脉冲的产生[M]. 原子能出版社, 1982: 9~14.

第一作者简介: 曹凤国, 研究员, 国际电加工学会 (ISEM) 技术委员会委员, 中国机械工程学会电加工分会副理事长, 中国发明协会创造学会副理事长, 北京市科学技术研究院院长, 北京精密特种加工技术研究中心主任兼首席专家, 北京工业大学博士生导师, 北京市自然科学基金委员会委员。主要从事精密特种加工、光机电一体化等现代制造技术的研究工作。

(收稿日期: 2004-01-17)

(编辑: 王琴)