

文章编号: 1001-2486(2009)04-0001-04

计算机控制抛光中基于等面积增长螺旋线的加工路径*

周林, 戴一帆, 解旭辉, 李圣怡

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 目前计算机控制抛光工艺中使用的阿基米德螺旋线路径, 存在加工工件中心区域时工件转速过快的缺点。为了克服该缺点, 分析了螺旋线路径加工的特点, 分析表明工件的瞬时转速取决于加工点的驻留时间密度和螺旋线的面积增长速率。据此, 提出了一种新的螺旋线作为抛光路径, 该螺旋线的面积增长速率恒定, 因此也称为等面积增长螺旋线。利用该螺旋线路径, 加工转速趋于恒定, 可降低加工中心区域的转速, 从而降低对机床运动性能的要求, 降低设备成本和加工成本。实验结果证实, 阿基米德螺旋线路径加工中心区域容易产生过加工问题, 加工精度较低; 等面积增长螺旋线路径加工可避免中心区域过加工问题, 获得较高的加工精度。

关键词: 计算机控制抛光; 螺旋线路径; 离子束修形; 抛光

中图分类号: TH161 文献标识码: A

A Novel Path Used in Computer-controlled Polishing Process Based on Uniform-area-increment Spiral

ZHOU Lin, DAI Yi-fan, XIE Xu-hui, LI Sheng-yi

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Archimedes spiral path, which is widely used in computer-controlled polishing process, always brings about excessively high rotational speed, and consequently excessive machining when polishing central region of the work-piece. To resolve this problem, the characteristics of a universal spiral path are studied first. It shows that the instantaneous rotational speed of the work-piece depends on the local dwell-time density and the local increase rate of the area enclosed by the spiral. Based on this, a novel spiral was proposed as a polishing path. The increase rate of the area enclosed by this new spiral is constant, and therefore, it can be referred to as uniform-area-increment spiral. This spiral path can ensure the stableness of the rotational speed of the work-piece, and reduce the rotational speed in the central region. Consequently, it can reduce the demands on motion performance to machine, and reduce the cost for machine and process. Finally, experimental results verified that Archimedes spiral path causes excessive machining in the central region due to excessive demand for rotational speed, and results in lower precision, while the uniform-area-increment spiral path avoids the excessive machining in the central region and results in higher precision.

Key words: computer-controlled polishing; spiral path; ion beam figuring; polishing

现代光学加工技术的一个突破性进展, 是基于计算机控制的“小磨头”抛光原理的应用, 近来发展的磁流变抛光、液体射流抛光、气囊进动抛光、大气等离子体抛光和离子束抛光等技术, 全是基于这一原理的抛光技术^[1-8]。抛光路径研究对于基于小磨头抛光原理的抛光工艺具有重要意义, 抛光路径合理, 可以减小机床运动行程, 减小运动速度和加速度, 降低装备成本和加工成本, 并能缩短加工时间, 提高加工精度。目前的小磨头抛光工艺中, 有两种基本的加工路径^[9-10]: 光栅路径和螺旋线路径。对于光栅路径, 由于光学元件不做回转运动, 仅有 x 轴和 y 轴运动, 工艺控制简单, 被广泛采用^[8]。但是光栅路径要求加工设备 x 轴和 y 轴的行程要覆盖整个的光学镜面, 而且光栅路径中机床要反复换向, 运动不平稳, 增加了加工时间。最近, 有学者提出了一种新的加工路径——拼接加工路径^[11], 该路径可以看作是光栅路径的发展, 同样存在机床反复换向, 运动不平稳, 增加加工时间等问题, 不过该路径由于使用了拼接

* 收稿日期: 2009-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775215)

作者简介: 周林(1979-), 男, 讲师, 博士。

加工的思想,一次只加工 1/4 工件区域,缩短了加工对 x 轴和 y 轴的行程要求,扩展了设备的加工能力,但是该路径加工控制比较复杂,拼接边界上难以处理。

对于螺旋线路径,由于工件做回转运动,大大降低了对 x 轴和 y 轴的行程要求,并且加工中机床运动不需要换向,运动平稳,也能缩短加工时间,适于加工回转对称型光学元件。因此,螺旋线路径越来越多地被关注和应用。但是,目前使用的阿基米德螺旋线路径在加工工件边缘时转速过慢,在加工工件中心时转速过快。在实际加工中,当加工工件中心区域时,需要对过快的转速做截断处理,因此会导致工件中心区域过加工而降低加工精度。本文分析了螺旋线路径加工中转速的特点,并提出了一种新的螺旋线路径——等面积增长螺旋线路径,该路径克服了阿基米德螺旋线路径的缺点,降低了对机床运动性能的要求,对降低装备成本、提高加工精度具有重要意义。

1 螺旋线路径分析

假设小磨头抛光所采用的螺旋线路径极坐标方程为 $r(\theta)$, 驻留时间密度函数^[10]为 $\tau(r, \theta)$, 那么工件转速

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{dQ}{\tau(r, \theta) dA} = \frac{1}{\tau(r, \theta)} \cdot \frac{1}{\omega} \quad (1)$$

其中, $\omega \cdot \frac{dA}{d\theta}$, 定义为螺旋线所围面积的增长速率,如图 1 所示。

由式(1)可见,工件转速取决于加工点的驻留时间密度和螺旋线的面积增长速率。螺旋线 $r(\theta)$ 的面积增长速率 ω 的计算公式为

$$\omega = \frac{1}{2} [r^2(\theta) - r^2(\theta - 2\pi)] \quad (\theta \geq 2\pi) \quad (2)$$

对于阿基米德螺旋线,其极坐标方程为

$$r = a\theta \quad (3)$$

其中 a 为控制螺旋线间距的参数,阿基米德螺旋线的优点是在径向上螺旋线是等间距的。根据式(2)可以计算出阿基米德螺旋线的面积增长速率为

$$\omega = 2\pi a^2 (\theta - \pi) \quad (4)$$

可见,阿基米德螺旋线的面积增长速率是随着角度的增加而线性增加的。假设驻留时间密度函数为常数,简记为 τ , 物理意义为在被加工面上均匀地去除一层材料。那么,加工中工件的转速根据式(1)计算得

$$\omega = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{1}{2\pi a^2 (\theta - \pi)} \quad (5)$$

或者

$$\omega = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{1}{2\pi a (r - a\pi)} \quad (6)$$

可见,随着角度或半径的增加,转速减小;角度或半径减小,则转速增加。这导致阿基米德螺旋线路径加工的特点就是加工元件边缘时工件转动过慢,而加工中心区域时,工件转动过快。

当工件中心转速要求快于系统容许转速时,通常有两个方法解决:一是使用系统的最大转速代替过大的转速进行加工;二是在整个加工面上均匀地增加一层额外的加工量,使整个加工中的转速得以下降。第一种方法无疑会降低加工精度,第二种方法增加了材料去除量和加工时间。可见两种解决方法都存在不足。

导致阿基米德螺旋线路径加工工件边缘时转速过慢,而加工中心时转速过快的原因是阿基米德螺旋线的面积增长速率是变化的,随着半径增大而增大。为了克服阿基米德螺旋线的这一缺点,我们设计了一种新的螺旋线路径,相应的螺旋线取名为等面积增偿螺旋线^[12]。

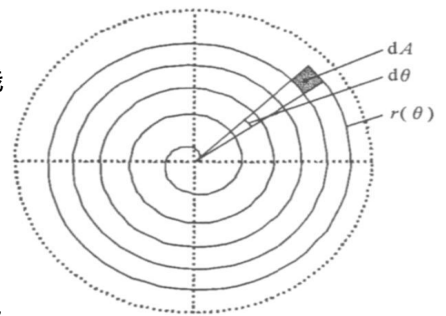


图 1 螺旋线路径示意图
Fig. 1 Sketch of universal spiral path

2 等面积增长螺旋线路径

等面积增长螺旋线的极坐标方程为

$$r = b\theta^{1/2} \quad (7)$$

其中, 参数 b 控制螺旋线的面积增长速率。图 2 所示为阿基米德螺旋线与等面积增长螺旋线的对比。

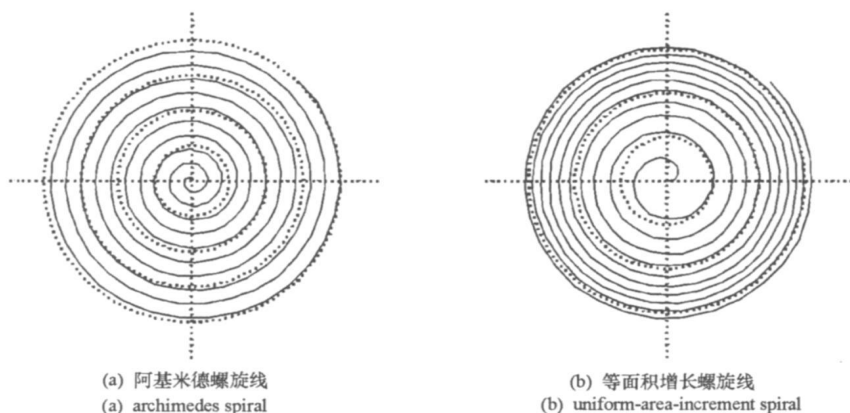


图 2 两种螺旋线路径对比
Fig. 2 Comparison of two spiral paths

根据式(2)可以计算出等面积增长螺旋线的面积增长速率为

$$\omega = \pi b^2 \quad (\theta > 2\pi) \quad (8)$$

可见该螺旋线所包围的面积增长速率是恒定的, 这也正是我们称之为等面积增长螺旋线的原因。

根据式(1)可以计算出应用等面积螺旋线路径时工件的转速为

$$\omega = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{1}{\pi b^2} \quad (9)$$

可见, 得益于面积增长速率恒定, 等面积增长螺旋线路径加工时工件的转速是恒定的。加工工件中心区域和工件边缘区域时工件的转速一样, 避免了阿基米德螺旋线加工时边缘转速过慢、中心转速过快的缺点。从而等面积增长螺旋线可以降低对装备的运动性能要求, 降低装备成本和加工成本。

3 实验

验证试验在离子束抛光系统 KDIFS-500^[8] 上进行, KDIFS-500 同时具备阿基米德螺旋线路径和等面积增长螺旋线路径的加工能力。验证实验设计为分别用阿基米德螺旋线路径和等面积增长螺旋线路径对直径 100mm、初始面形相差不大的两块微晶玻璃平面样镜进行加工。

样镜 1 的初始面形误差如图 3(a) 所示, 初始面形误差的 RMS (Root Mean Square) 值是 0.024λ ($\lambda = 632.8\text{nm}$)。样镜 1 使用阿基米德螺旋线路径加工, 加工时间为 23min, 加工后的面形误差如图 3(b) 所示, 加工后误差的 RMS 值为 0.015λ 。由加工结果可见, 样镜 1 表面上大部分区域的面形误差都被修正了, 但是在工件的中心处产生了过加工, 最终加工精度不高。

样镜 2 的初始面形误差如图 4(a) 所示, 初始面形误差的 RMS 值是 0.051λ 。样镜 2 使用等面积增长螺旋线路径加工, 加工时间为 27min, 加工后的面形误差如图 4(b) 所示, 加工后误差的 RMS 值达到了 0.007λ 。由加工结果可见, 样镜 2 整个表面上的面形误差都得到了有效修正, 加工精度较高。

4 结论

螺旋线加工路径中工件转速取决于加工点的驻留时间密度和螺旋线的面积增长速率。由于阿基米德螺旋线的面积增长速率是随着角度的增加而线性增加的, 因此应用阿基米德螺旋线路径时加工工件边缘转速过慢, 而加工中心转速过快, 因此对机床运动性能要求过高。

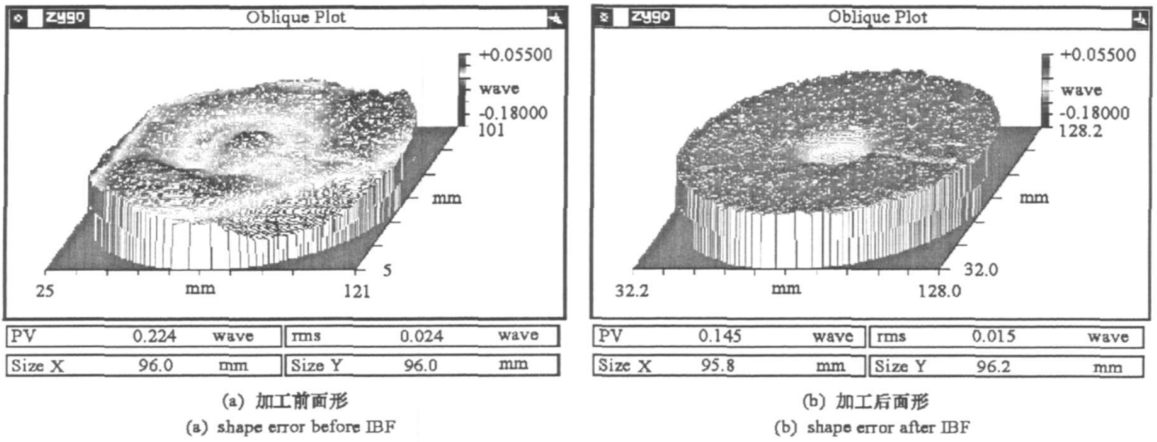


图3 阿基米德螺旋线路径加工试验

Fig. 3 Experimental result with Archimedes spiral path

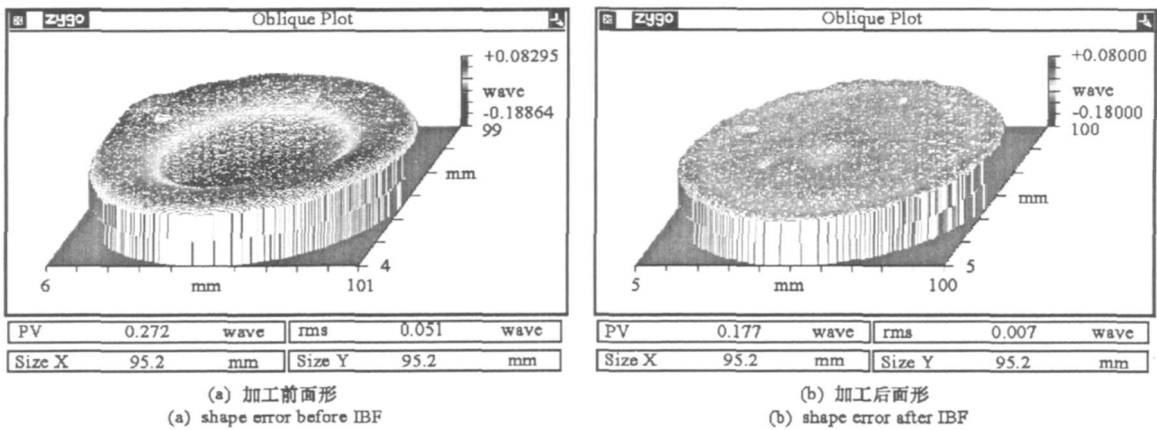


图4 等面积增长螺旋线路径加工试验

Fig. 4 Experimental result with uniform-area-increment spiral path

等面积增加螺旋线路径得益于螺旋线的面积增长速率恒定,该螺旋线路径加工时工件的转速趋于稳定,从而可以降低对装备的运动性能要求,降低装备成本和加工成本。

实验结果证实,阿基米德螺旋线路径加工工件中心容易产生过加工问题,加工精度较低;等面积增长螺旋线路径加工可避免中心过加工问题,使整个镜面的面形误差有效收敛,获得较高的加工精度。

参考文献:

- [1] 张峰,余景池,张学军. 磁流变抛光技术[J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 1- 7.
- [2] 戴一帆,袁征,陈浩锋,等. 热压多晶氟化镁的磁流变抛光研究[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(5): 99- 102.
- [3] 高波,姚学英,谢大纲,等. 气囊抛光进动机构的建模与仿真[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 101- 104.
- [4] 范斌,万勇建,陈伟,等. 能动磨盘加工与数控加工特性分析[J]. 中国激光, 2006, 33(1): 128- 132.
- [5] 郭培基,方慧,余景池. 液体喷射抛光技术研究[J]. 激光杂志, 2008, 29(1): 25- 27.
- [6] 张巨帆,王波,董申. 用于超光滑表面加工的常压低温等离子体抛光系统设计[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(3): 222- 226.
- [7] 彭小强,戴一帆,李圣怡,等. 基于矩阵的回转对称非球面磁流变抛光驻留时间算法研究. 国防科技大学学报, 2004, 26(3): 89- 92.
- [8] 戴一帆,周林,解旭辉,等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1131- 1135.
- [9] Tricard M, Dumas P, Forbes G, et al. Recent Advances in Sub-aperture Approaches to Finishing and Metrology[C]// Proceedings of SPIE, 2006, 6149(3).
- [10] Drueding T W, Bifano T G, Fawcett S C. Contouring Algorithm for Ionfiguring[J]. Precision Engineering, 1995, 17: 10- 21.
- [11] 李圣怡,解旭辉,焦长君,等. 离子束加工光学元件的拼接加工方法[P]. 中国发明专利, 申请号: 200910042430. 9.
- [12] 戴一帆,李圣怡,周林,等. 一种离子束抛光路径的规划方法[P]. 中国发明专利, 公开号: CN 101274822.