

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.005

无理数转速比下的平面研磨轨迹均匀性研究^{*}

姬孟托, 洪滔, 文东辉^{*}, 陈珍珍, 蔡东海

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:平面研磨过程中磨粒与工件的相对运动轨迹分布对工件表面质量有重要影响。针对有理数转速比下的研磨加工过程中磨粒轨迹重复的问题,对磨粒相对工件的运动轨迹进行了研究,分析了典型的定偏心式主驱动方式平面研磨过程中磨粒轨迹对抛光均匀性的影响,提出了一种无理数转速比的平面研磨加工方法,利用 Matlab 工具对无理数转速比平面研磨加工进行了运动学仿真,理论分析了基于螺旋线磨粒排布的研磨盘在无理数转速比下的磨粒轨迹均匀性。仿真结果表明,无理数转速比下的磨粒轨迹线是开放的,其在均匀性方面优于有理数;对于不同无理数转速比,研磨轨迹均匀性随着转速比的增大而提高,但随着研磨时间的增加其均匀性趋于相同。该研究为无理数转速比平面研磨抛光设备的研制提供理论依据。

关键词:平面研磨;磨粒轨迹;无理数转速比;轨迹均匀性

中图分类号:TH16;TG580.6

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0532-05

Analytical study on uniformity of path distribution with irrational rotational speed ratio in plan lapping process

JI Meng-tuo, HONG Tao, WEN Dong-hui, CHEN Zhen-zhen, CAI Dong-hai

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The distribution of particle sliding trajectories on wafer surface possessed great importance in the machined work-piece surface quality. Aiming at the problem that particle sliding trajectories with rational rotational speed ratio was periodic, the trajectory simulations were carried out based on the kinematic analysis. Numerical simulations of particle sliding trajectories were performed to examine the influence of the kinematic parameters on the polishing uniformity of typical rotary-type lapping equipment. A method of plane lapping with irrational rotational speed ratio was presented. The kinematic analysis and numerical calculation were used to discuss the effect of the rotating speed ratio on the trajectory uniformity by using Matlab and the lapping plate with preferred helix arrangement of fixed particle was selected. The results indicate that the trajectory distribution with irrational rotational speed ratio is more intensive and complicate than that with rational rotational speed ratio. For different irrational rotational speed ratio, the uniformity of trajectory distribution increases with increasing of rotational speed ratio gradually but it is more uniform with increasing of lapping time. The research provides theoretical guide to the design and development of new plan lapping equipment with condition of irrational rotating speed ratio.

Key words: plane lapping; particle trajectory; irrational rotational speed ratio; trajectory uniformity

0 引言

高精度、低损伤的表面质量是磨粒加工领域发展的重要方向^[1-3]。平面研磨加工是获取光学元件、蓝宝石

衬底、单晶硅衬底等高精度表面的重要手段之一^[4-5],在电子、通信、计算机、激光、航空航天等技术领域有着广泛的应用。目前现有的平面研磨设备分为两大类,一类是单面研磨抛光设备,另一类是双面研磨抛光设备。其中单面研磨抛光设备按驱动方式又可分为

收稿日期:2016-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375457);浙江省自然科学基金资助项目(LY16E050013,Y14E050057)

作者简介:姬孟托(1988-),男,河南武陟人,硕士研究生,主要从事超精密加工方面的研究。E-mail: gary2111302036@126.com

通信联系人:文东辉,男,教授,博士生导师。E-mail: wendh@zjut.edu.cn

定偏心式^[6]、不定偏心式^[7]、直线式^[8]和摇摆式^[9]以及一种新的分形驱动方式^[10];双面研磨抛光设备最常见的是行星式双面研磨设备^[11]。

国内外不少学者对研磨加工均匀性的影响因素进行了一系列的研究,文东辉等^[12]研究了不同材质的研磨盘对工件表面均匀性的影响;田业冰等^[13]分析了一种硅片自旋转驱动方式对工件均匀性的影响;Haedo Jeong 和 Hyung-Jae Kim^[14]分析速度分布、压力分布和温度分布对材料去除率的影响。

至于研磨加工均匀性的评价方法,已经有了一个系统的评价方法。在整个半导体加工行业,尤其是化学机械抛光(CMP)领域里,早先广泛使用的是49点极坐标法。后来随着CMP技术的飞速发展,其评价方法改为更优秀的52点笛卡尔坐标法^[15],尽管这种方法存在边界失真问题。Pei-Lum Tso等^[16]研究了基于双面行星轮平面研磨机的磨粒、工件的相对运动,并认为磨粒轨迹线的不均匀性是影响工件表面粗糙度的重要因素,采用52点笛卡尔坐标法评价磨粒轨迹均匀性。J. X. Su等^[17]研究了基于摇摆式研抛机的磨粒在硅片上的轨迹均匀性,通过研磨盘上60颗磨粒的轨迹仿真,采用52点笛卡尔坐标法划分工件,以片内不均匀系数WIWNUL为评价标准,得出了磨粒轨迹分布的不均匀直接影响硅片表面材料去的不均匀的结论,并进一步指出研磨盘和工件的转速比对片内不均匀系数WIWNUL影响很大。

由此可知,研磨磨粒的轨迹的分布对工件的加工质量有重要的影响,磨粒运动轨迹分布不均匀导致工件材料去除不均匀,影响工件加工表面的平面度和表面粗糙度。

因此,本研究以主驱动平面研磨为基础,从单颗磨粒运动轨迹研究入手,探讨平面研磨中无理数数转速比对磨粒轨迹均匀性的影响。

1 磨粒运动轨迹模型的建立

1.1 单颗磨粒相对运动模型

所谓主驱动平面研磨就是在研磨过程中,工件盘和研磨盘绕各自的轴线旋转,偏心距保持不变,并且工件盘和的转速可以自由调节。

研磨加工前工件固定在工件盘上,工件被加工面向下受压于研磨盘表面上;研磨加工时,加入工作液,研磨盘上磨粒通过对工件表面的磨削作用去除工件材料,实现高效率、高精度的研磨加工。

主驱动平面研磨设备结构简图如图1所示。

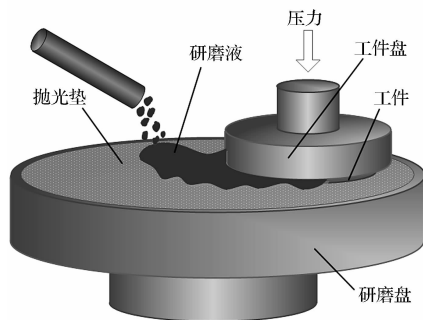


图1 主驱动平面研磨设备简图

研磨盘与工件的相对运动是有研磨盘和工件各自的回转运动合成的。稳定加工时,设研磨盘和工件的转速分别为 ω_p 和 ω_w ,单位为rad/s,定义 ω_p/ω_w 为平面研磨的转速比,记为 i 。本节主要针对研究研磨盘上任一点相对于工件盘的运动轨迹,该轨迹的特性直接影响工件被加工表面的平面度、表面光洁度、纹理分布等。

为便于研究磨粒相对于工件的运动规律,本研究建立以研磨盘回转中心 O_1 为原点的绝对坐标系 $\sigma_1 = [O_1, x_1, y_1]$ 和以工件盘回转中心为原点的相对坐标系 $\sigma_2 = [O_2, x_2, y_2]$ 。

单颗磨粒运动学模型如图2所示。

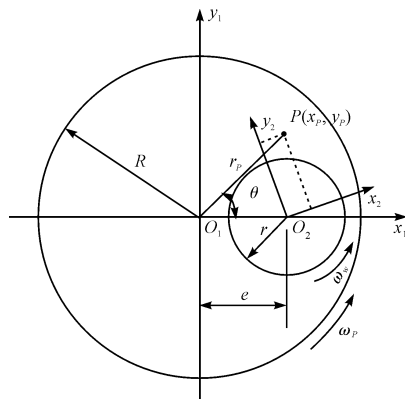


图2 单颗磨粒运动学模型

该坐标系 σ_2 以 ω_w 随工件旋转,已知研磨盘上任意一颗磨粒 P 的初始相位角为 θ ,磨粒 P 到 O_1 的距离为 r_p ,研磨盘和工件盘的中心距为 e ,如图2所示。

经计算,计算出 t 时刻磨粒 P 相对于工件盘 $\sigma_2 = [O_2, x_2, y_2]$ 的运动轨迹方程为:

$$\begin{cases} x_p = r_p \cos[\theta + (\omega_p - \omega_w)t] - e \cos(\omega_w t) \\ y_p = r_p \sin[\theta + (\omega_p - \omega_w)t] + e \sin(\omega_w t) \end{cases} \quad (1)$$

1.2 多颗磨粒相对运动模型

在研究多颗磨粒运动轨迹均匀性的过程中,磨粒在研磨盘上的排布方式对轨迹均匀性的影响较大。本研究组前期定量地研究了3类17种磨粒排布方式对轨迹均匀性的影响^[18]。

本研究采用较为优秀的磨粒排布方式。该排布方式为螺旋排布方式,磨粒径向分布在螺旋线上,螺旋线方程为 $\rho = 40 + 15\theta/\pi$,其中: $\theta \in [0, 12\pi]$ 周向角度分配分别为 20° 、 30° 和 40° ,依次类推,共有 91 颗磨粒,螺旋线磨粒排布研究磨盘如图 3 所示。

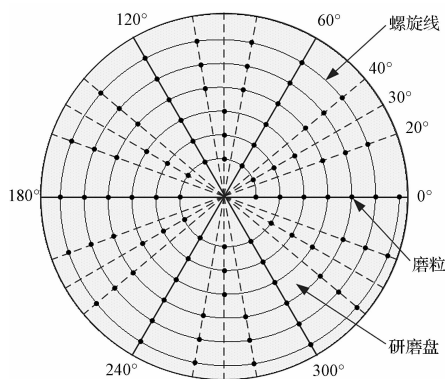


图 3 螺旋线磨粒排布研究磨盘

设第 j 颗磨粒在研磨盘上的位置为 (θ_j, ρ_j) , 则 t 时刻磨粒相对于工件盘 $\sigma_2 = [O_2, x_2, y_2]$ 的运动轨迹方程:

$$\begin{cases} x_j = \rho_j \cos[\theta_j + (\omega_p - \omega_w)t] - e \cos(\omega_w t) \\ y_j = \rho_j \sin[\theta_j + (\omega_p - \omega_w)t] + e \sin(\omega_w t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\rho_j = 40 + 15\theta_j/\pi, j = 1, 2, \dots, 91$ 。

2 轨迹均匀性评价新方法

在平面研磨加工过程中,影响被加工工件表面质量的因素有很多,如驱动方式、压力、工作环境等等。笔者主要研究不同性质转速比对工件加工质量的影响,为更有效地反映研磨轨迹的分布情况,做出如下假设:

- (1) 磨粒在不同或相同区域的磨削量相同;
- (2) 磨粒经过相同区域的磨削量线性累加;
- (3) 磨粒被当成质点。

于是,工件表面区域划分策略为通过水平、竖直线将工件均分成若干边长为的正方形区域(边缘部分除外),如图 4 所示(S_1 区域)。

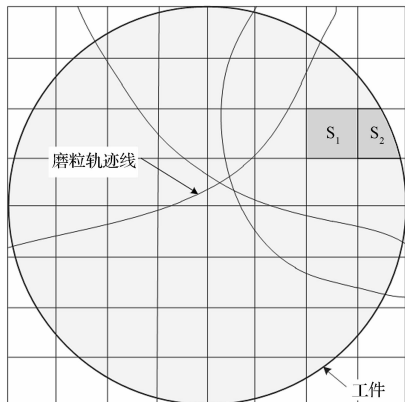


图 4 工件网格划分

在研磨过程中,材料的去除量公式^[19]为:

$$M = \int_0^T M dt = KP \int_0^T V dt \quad (3)$$

式中: K —常量, P —压力, V —磨粒相对工件速度。

由于不考虑压力 P 的影响, K 为常量, 得出 $M \propto \int_0^T V dt$ 。因此,某一区域内轨迹线长度和反映该区域的磨削量,进而得出合理的统计策略为统计正方形区域内所有轨迹线的长度和,进一步地,鉴于仿真采样点的时间间隔 $\Delta t = 0.001$ s 内有如下不等式:

$$\begin{cases} |x_p(t + \Delta t) - x_p(t)| \ll L \\ |y_p(t + \Delta t) - y_p(t)| \ll L \end{cases} \quad (4)$$

于是,正方形区域内所有轨迹线的长度和可以用区域内所有轨迹线上的采样点个数近似代替。由于工件形状为圆形,工件边界部分不能得到均匀的正方形划分,如图 4 所示(S_2 区域)。

因此,本研究采用虚拟补全正方形的方法,求出工件内非正方形区域内所有轨迹线上的采样点个数,然后通过非正方形区域(如 S_2 区域)和补全区域的面积比求出边界假想正方形区域内采样点个数。

综上所述,本研究通过区域划分策略和区域统计策略得出工件上所有经过第 k 个划分区域内轨迹线上的采样点个数 $Q_k (k = 1, 2, \dots, N)$ 。从而,求得不同转速比下 Q_k 的均值 $\bar{Q}$ 和标准差 S_Q 。

值得注意的是,虽然标准差能客观准确地反映一组数的离散程度,但是对于不同的样本,标准差就缺乏可比性,因此本研究引入离散系数来评估轨迹的均匀性。 CV 越大,轨迹均匀性越差;反之,轨迹均匀性越好。这里的 CV 表示单位均值上的方差,即: $CV = S_Q / \bar{Q}$ 。

3 仿真结果

3.1 单颗磨粒仿真结果

在单颗磨粒运动轨迹仿真中,研磨盘的半径 $R = 230$ mm,工件的半径 $r = 90$ mm,偏心距 $e = 130$ mm,磨粒的初始相位角 $\theta = 0^\circ$,磨粒距研磨盘中心的距离 $r_p = 130$ mm。仿真时间 $t = 100$ s,转速比 i 分别为 0.5 、 1.3 、 1.4 、 $\sqrt{2}$ 、 $\sqrt{3}$ 和 $\sqrt{5}$ 。

不同转速比下单颗磨粒运动轨迹仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可得出如下结论:

(1) 有理数转速比下的磨粒轨迹线为封闭曲线,如图 3(a~c) 所示,而无理数转速比下的磨粒轨迹线为开放曲线,如图 3(d~f) 所示,点 P 为仿真结束时的

点。随着仿真时间的增加,磨粒的轨迹线越来越密,而且永不重复。

(2)对比图3(b)与3(d)可知,虽然有理数 $i=4/3$ 和无理数 $i=\sqrt{2}$ 都是无限数,但无理数和有理数还是有本质的区别,前者轨迹曲线封闭,后者轨迹曲线

开放。
(3)对比图3(c)与3(d)可知,当某有理数转速比趋近无理数转速比值时,该有理数转速比下的磨粒轨迹线也将趋近于无理数转速比下的磨粒轨迹线。

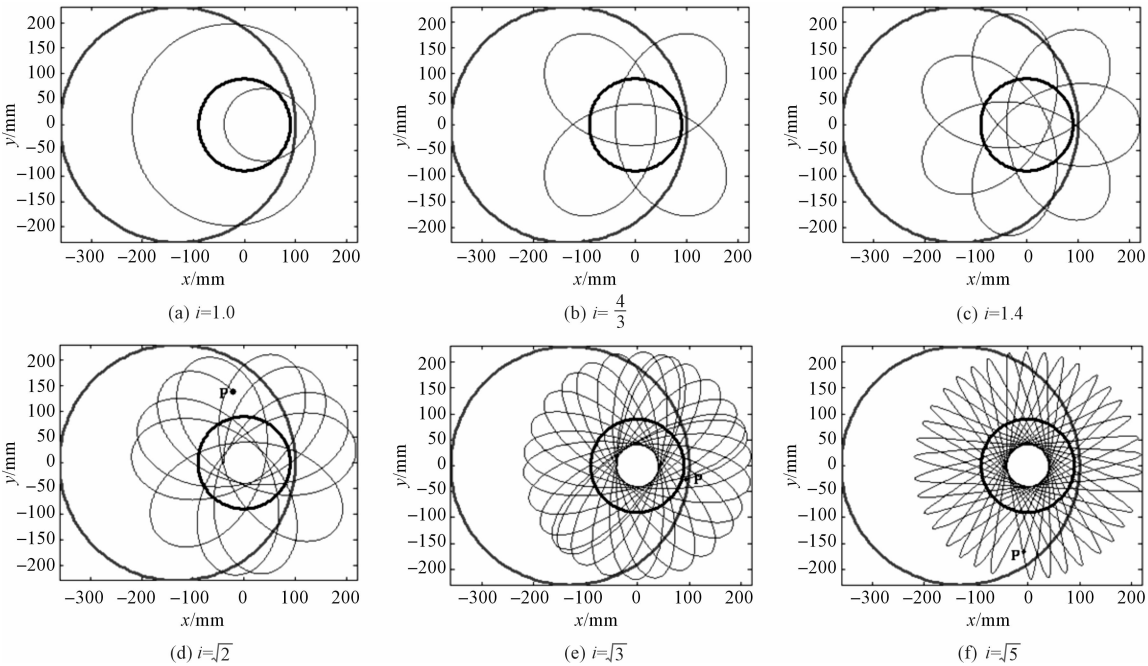


图5 单颗磨粒运动轨迹

3.2 多颗磨粒仿真结果

在多颗磨粒运动轨迹仿真中,仿真的转速比分别为1.0、1.3、1.4、 $\sqrt{2}$ 、 $\sqrt{3}$ 和 $\sqrt{5}$,工件盘的转速均为10 r/min,可以得出转速比为1.0、1.3和1.4的周期分别为6 s、18 s和30 s,无理数转速比轨迹没有周期。接下来探讨不同转速比时,离散系数随时间的变化规律。

离散系数 CV 随时间变化图如图6所示。

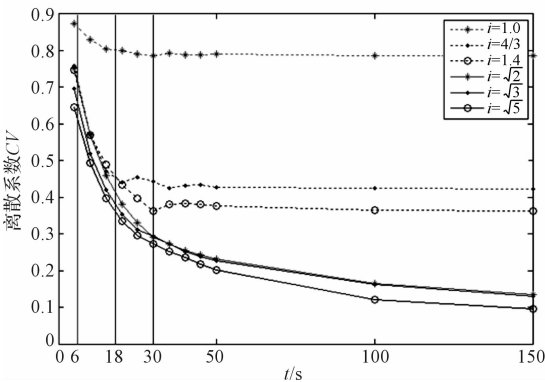


图6 离散系数 CV 随时间变化图

图6中,无理数转速比下的离散系数较低,磨粒轨迹更加均匀。进一步分析可知,对于有理数转速比(如

$i=10, 1.3$ 和 1.4)而言,当仿真时间大于自身的周期时,随着仿真时间的增加,它们的离散系数变化甚微,说明其轨迹的纹理和致密性并没有变化;而无理数转速比则不然,其轨迹的均匀随着仿真时间的增加而减少。

由于离散系数反应单位均值的方差,从研磨加工的角度看,仅从研磨轨迹单方面来讲,无理数转速比下的研磨加工,单位磨削量下其磨削的量分布的更加均匀,工件表面质量也更好,这也正是研究无理数转速比的意义所在。

而对于不同的无理数转速比,随着仿真时间的增加,它们的离散系数差别趋于一致,这可以对后续无理数转速比机构的设计制造提供指导意义。

4 结束语

本研究改进了研磨轨迹区域划分方法,解决了圆形工件表面均匀正方形区域划分中边界部分由于无法均匀划分而导致失真的问题;提出了一种新的统计方法,即统计划分区域内所有轨迹线的长度和,并近似地以轨迹线上采样点的数量为统计目标;引进了统计学中的离散系数 CV 来评价研磨轨迹的均匀性,修正了传统的仅以标准方差来评价研磨轨迹均匀性的不足。

得到如下结论:

(1) 无理数转速比下的磨粒轨迹为开放的曲线,且随着的时间增加,磨粒轨迹线越来越密,进一步指出无理数转速比下的磨粒轨迹均匀性更好;

(2) 随着仿真时间的增加,不同无理数转速比下的离散系数 CV 的差别越来越小,并且离散系数 CV 趋于平稳。这对后续无理数转速比机构的设计制造提供指导意义,可以选取较为容易实现的无理数作为无理数转速比平面研磨装置的转速比。

后续研究将围绕无理数转速比平面研磨装置的设计展开,进一步研究无理数转速比下磨粒的相对速度、研磨时间对轨迹均匀性的影响。

参考文献 (References):

- [1] 袁巨龙,张飞虎,戴一帆,等.超精密加工领域科学技术发展研究[J].机械工程学报,2010,46(15):161-177.
- [2] 袁哲俊,王先奎.精密和超精密加工技术[M].1版.机械工业出版社,1999.
- [3] 陈智利,杨绍培,阳志强,等.环带式磁流变抛光装置设计[J].兵工自动化,2014,33(5):50-53.
- [4] 孙磊,郭伟刚,袁巨龙,等.超薄石英晶片超精密抛光实验的研究.机电工程,2013,30(9):1055-1058.
- [5] 纪宏波,彭 岩,周芬芬,等.氧化锆陶瓷平面零件超精密研磨实验的研究.机电工程,2013,30(9):1059-1062.
- [6] 靳永吉.CMP抛光运动机理研究[J].电子工业专用设备,2005,34(9):37-41.
- [7] 苏建修,郭东明,康仁科,等.硅片化学机械抛光时运动形式对片内非均匀性的影响分析[J].中国机械工程,2005,16(9):815-819.
- [8] Matsuo T, Touge M, Yamada H. High-Precision Surface Grinding of Ceramics with Superfine Grain Diamond Cup Wheels [J]. **Annals of CIRP**, 1997, 46(1):249-252.

- [9] 郑文.摇摆式圆盘研磨机研磨轨迹型态的研究[J].中国重型装备,2005(2):1-3.
- [10] 简志伟.平面研磨加工路径分析研究[D].中国台湾:淡江大学,2000.
- [11] 吴宏基,曹利新,刘 健.基于行星式平面研磨机研抛过程的运动几何学分析[J].机械工程学报,2002,38(6):144-147.
- [12] 文东辉,鲁聪达,周兆忠.蓝宝石衬底研磨加工中研磨盘材质的影响[J].机械工程学报,2009,45(2):247-250.
- [13] 田业冰,金沐吉,康仁科,等.硅片自旋转磨削的运动几何学分析[J].中国机械工程,2005,16(20):1798-1802.
- [14] Kim H, Jeong H. Effect of process conditions on uniformity of velocity and wear distance of pad and wafer during chemical mechanical planarization [J]. **Journal of electronic materials**, 2004, 33(1):198-200.
- [15] Bibby T FA, Haewood R, Schey D, et al. Cartesian coordinate maps for chemical mechanical planarization uniformity characterization [J]. **Thin Solid Films**, 1997, 308-309(11):512-517.
- [16] Tso P L, Wang Y Y, Tsai M J. A study of carrier motion on a dual-face CMP machine [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2001, 116(2-3):194-200.
- [17] Su J X, Guo D M, Kang R K. Modeling and analyzing on nonuniformity of material removal in chemical mechanical polishing of silicon wafer [J]. **Materials Science Forum**, 2004(471-472):26-31.
- [18] 李 刚,杨庆华,文东辉,等.金刚石磨粒排布方式对交叉微流道形成规律的影响[J].中国机械工程,2015,26(10):1374-1380.
- [19] HoCheng H, Tsai H Y, Tsai M S. Effects of kinematic variables on nonuniformity in chemical mechanical planarization [J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2000, 40(11):1651-1669.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

姬孟托,洪 滔,文东辉,等.无理数转速比下的平面研磨轨迹均匀性研究[J].机电工程,2016,33(5):532-536.

Ji Meng-tuo, HONG Tao, WEN Dong-hui, et al. Analytical study on uniformity of path distribution with irrational rotational speed ratio in plan lapping process [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2016, 33(5):532-536.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>