

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.04.042

主动驱动条件下研磨轨迹均匀性的研究*

盛继生¹ 文东辉² 计时鸣²

(1. 金华职业技术学院机电工程学院, 金华 321017;

2. 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, 杭州 310032)

【摘要】 分析了主动驱动方式下平面研磨过程中工件的运动学特性,提出了研磨轨迹均匀性可以通过单位面积轨迹点的数量及其标准差来评价,理论分析了研磨盘和工件的转速比和偏心距对轨迹均匀性的影响。仿真表明,偏心距越小越有利于工件表面研磨轨迹的均匀分布,增大偏心距导致相对转速线速度偏差增大,不利于工件表面研磨轨迹的均匀分布。增大转速比使加工轨迹分布稀疏,轨迹曲线点的标准差大,加工均匀性差,研磨盘与工件具有相同的角速度时,更有利于轨迹均匀性的提高。

关键词: 平面研磨 主动驱动 均匀性 路径

中图分类号: TG580.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)04-0209-04

Uniformity of Kinematic Trajectory with Wafer Driving Initiatively in Plane Lapping Process

Sheng Jisheng¹ Wen Donghui² Ji Shiming²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinhua College of Profession and Technology, Jinhua 321017, China

2. Key Laboratory of Mechanical Manufacture and Automation, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract

Kinematic characteristic of wafer driving initiatively in plane lapping process was analysed based on the model of lapping geometry. A new rule was deduced for evaluate the uniformity of lapping trajectory by trajectory numbers of each unit wafer area. The effects of rotating ratio and eccentricity on the uniformity of the lapping trajectory were theoretically analysed. Lower eccentricity is helpful to improve the trajectory uniform distribution, for the errors of the relative rotating speed are augmented with large eccentricity. Forever, improvement of rotating ratio is also to enlarge the standard deviation of trajectory points in the same area, and make a bad uniformity. The same angular velocity for lapping plate as wafer is recommended to improve the trajectory uniformity.

Key words Plane lapping, Driving initiative, Lapping, Trajectory

引言

切削刀具材料的发展,促进了切削加工技术的发展,而研磨加工则一度停留在散粒慢速研磨阶段^[1]。

研磨加工已成为后续抛光和特种加工获取超光滑表面的必备工序。自动研磨加工过程中不能对研

磨运动进行直接干预,所以正确的研磨运动轨迹显得更为重要,它应该满足以下基本要求:工件和研磨盘不受强制性导引,允许随时中断加工;研磨运动的方向在每一个瞬时必须不断变化;研磨运动应该尽可能地使工件近似于理想的几何形状;研磨运动必须使工具面的几何形状尽可能地保持长久不变^[2]。

随着晶体衬底尺寸的增大,研磨均匀性的控制

收稿日期:2009-09-15 修回日期:2009-11-25

* 国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(2006CB932607),国家自然科学基金资助项目(50705088),浙江省高校中青年学科带头人、浙江工业大学重中之重人才和浙江工业大学机械电子工程重中之重开放基金资助项目(56310202037)

作者简介:盛继生,副教授,主要从事超精密加工、焊接技术研究,E-mail:shjs@jdxj.jhc.cn

变得越来越困难,研磨轨迹的均匀性已经成为研究热点。国内外学者对平面研磨过程中工件运动的随机性、偏心距、工件几何尺寸、接触压强分布等对磨具的均匀磨损和轨迹均匀性等进行了深入研究和分析^[3-7]。

至今研究研磨轨迹均匀性的评价方法,大多仍通过测量加工后工件的平面度来评价,既耗费大量的时间,也很难直观地判断研磨轨迹分布的合理性。本文定义研磨轨迹在研磨盘和工件表面上给定面积的通过次数为轨迹均匀性,提出研磨轨迹均匀性的定量评价方法,为获得更优的研磨轨迹分布提供准则。

1 主动驱动运动学模型

1.1 主动驱动的坐标系

单面研磨加工时,研磨盘绕自身轴线回转,工件由夹具把持,被加工面向下受压于研磨盘表面上,并绕夹具回转轴旋转。主动驱动式研磨加工是通过主动驱动电机来调节工件的回转速度。

研磨盘与工件间的相对运动是由研磨盘和工件各自的回转运动合成的。设研磨盘和工件的转速分别为 ω_p 和 ω_w 。研磨轨迹可划分为两类:工件上一定点相对于研磨盘的运动轨迹 S_1 ;研磨盘上一定点相对于工件的运动轨迹 S_2 。 S_1 对于揭示研磨盘研磨均匀性具有重要意义,而 S_2 直接关联着工件被加工表面的形貌特征、纹理分布。

本文主要分析轨迹 S_2 ,即求出任一时刻研磨盘上 P 点在工件坐标系中的坐标。令 P 点与旋转中心点 O 的距离为 r_p ,偏心距为 e , P 点坐标为 $(r_p \cos \theta_p, r_p \sin \theta_p)$,并假定 P 相对于研磨盘作匀速圆周运动,平面研磨运动学模型如图1所示。 P 点与 x 轴夹角为 θ_p ,向径为 r_p ,其运动方程为

$$\begin{cases} x_1 = r_p \cos(\theta_p - \omega_p t) \\ y_1 = r_p \sin(\theta_p - \omega_p t) \end{cases} \quad (1)$$

由运动学或坐标变换可推导出,研磨盘上任一点 P 对工件的相对运动方程,即研磨轨迹为

$$\begin{cases} x' = r_p \cos(\theta_p + \omega_w t - \omega_p t) - e \cos \omega_w t \\ y' = r_p \sin(\theta_p + \omega_w t - \omega_p t) - e \sin \omega_w t \end{cases} \quad (2)$$

1.2 研磨轨迹的均匀性评价

将工件和研磨盘表面进行区域划分,考查各个区域内研磨轨迹点的数量,以判断被加工区域内研磨轨迹经历的次数,通过比较各个区域内研磨轨迹点的分布均匀程度来表征研磨轨迹在加工表面分布的均匀性。轨迹均匀性评价过程为:由运动分析得出研磨过程中工件与研磨盘间的相对运动参数;将加工表面进行区域划分;根据运动方程求出不同

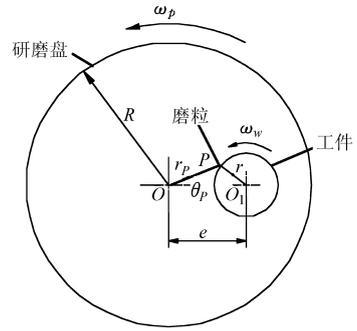


图1 平面研磨运动学模型

Fig. 1 Kinematic model of plane lapping process

时刻工件与研磨盘接触点的坐标,得到研磨轨迹点;统计各区域内轨迹点个数,所得结果记为 $Q_i (i = 1, 2, \dots, N)$;用各个区域内研磨轨迹点数量 $\{Q_i\} (i = 1, 2, \dots, N)$ 的标准差 S_Q 来表征轨迹均匀性:

$$S_Q = \left\{ \left[\sum (Q_i - \bar{Q})^2 \right] / (n - 1) \right\}^{1/2} \quad (3)$$

其中, \bar{Q} 为各个划分区域内轨迹点数量的平均值。标准差 S_Q 是各数据偏离平均数的距离(离均差的平均数,标准差 S_Q 能反映一个数据集的离散程度,其大小反映了一组数值的波动。 S_Q 值越大,轨迹均匀性越差, S_Q 值越小,轨迹均匀性越好。

最佳区域划分的网格密度通过如下方法解决:将采样点固定不变,增加固定区域的划分密度并计算其标准差,如表1所示。从表中可以看到随着网格密度的增加,标准差越来越大。当采样点随着网格增加时,计算量也相应的呈几何级增加,很浪费时间。因此,在不失真的情况下根据采样点的个数将表面区域划分为100个网格,此时其标准差为最小值0.11。

表1 不同网格密度对应的标准差

Tab.1 Standard error for different grid density

网格数	50	100	150	200	250	300	350	400
标准差	0.72	0.11	0.14	0.16	0.17	0.20	0.21	0.23

根据坐标变换方法,将轨迹点的笛卡儿坐标系转换成极坐标的形式,将半固着磨具或工件的半径5等分,再将磨具圆周20等分,总共分割成100个区域,并由内向外将各个区域标上号,以便能精确计算各个区域轨迹点的个数(图2)。

根据以上的分析,采用Matlab对半固着磨具和工件表面的研磨轨迹进行仿真。仿真步骤为:设置机构参数 $r_p, e, \theta, \omega_p, \omega_w$;按式(2)计算研磨轨迹点;绘制研磨轨迹点。

2 研磨轨迹均匀性仿真

2.1 研磨轨迹仿真

根据主动驱动机构的实际情况,设 $e = 100 \text{ mm}$,

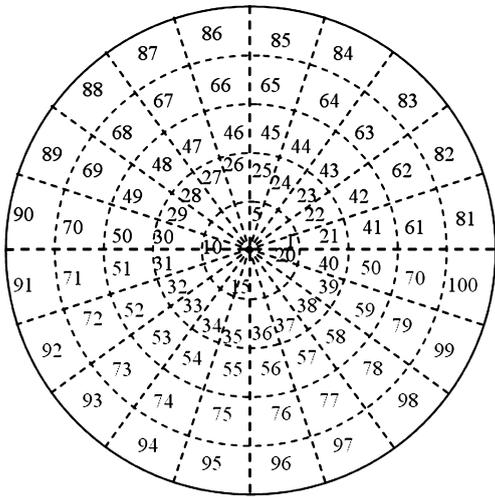


图 2 工件表面区域的划分

Fig. 2 Sub-area zones of lapped wafer surface

由式(2)可以得到不同转速比 $k(k = \omega_p / \omega_w)$ 下单颗磨粒的运动轨迹,如图 3 所示,研磨盘与工件旋转方向相同(ω_p, ω_w 均为正),图中大圆圈表示研磨盘,小圆圈表示工件。研磨轨迹与转速比 k 、初始时刻点 P 的位置(包括 r_p 和 θ_p)、研磨盘或工件的转速、偏心距 e 有关:即转速比 k 决定了研磨轨迹的“花瓣”个数;随 r_p 增大,研磨轨迹的最大向径增大,即初始时刻点 P 越靠近研磨盘的边缘,其研磨轨迹的“花瓣”就越大,图 3 的仿真结果表明“花瓣”个数为 k 的取值,而 P 点的位置即偏心距的大小与研磨轨迹的半径范围直接关联。

2.2 偏心距 e 对加工均匀性的影响

根据式(2),利用计算机可模拟出研磨盘表面的一系列磨粒与工件表面间相对运动的运动轨迹曲线,令 $\Delta\theta = \pi/5, \Delta R = 30 \text{ mm}$,设置仿真时间为

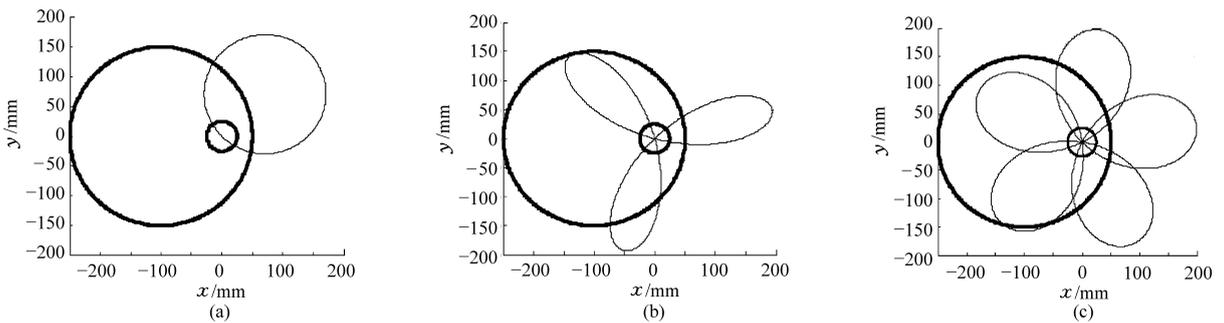


图 3 单颗磨粒的运动轨迹仿真结果

Fig. 3 Simulated trajectory of single abrasive grain

(a) $k=1$ (b) $k=3$ (c) $k=5$

500 s,时间间隔 $t = 0.01 \text{ s}$ 。依次取偏心距 e 值为 60 mm、90 mm、120 mm 进行仿真,保持 $k = 1$ 不变,得出的轨迹曲线及其标准差阶梯图如图 4 所示。

图 4 表明,对主动驱动平面研磨方式而言,增大偏心距 e 不利于工件表面研磨轨迹的均匀分布。这是因为随着偏心距 e 的增大,相对转速线速度偏差增大。

2.3 转速比 k 对加工均匀性的影响

转速比 k 依次取值为 1、2、3,偏心距 e 为固定值 60 mm,从而可以得到轨迹曲线及其点分布的标准差阶梯图,如图 5 所示。

当研磨盘与工件具有相同的角速度时,更有利于工件平面度的提高。当转速比 k 增大时,轨迹分布越稀疏,轨迹曲线点的标准差越大,加工均匀性越差。综合图 4、5 可知:工件加工表面呈现台阶状离散分布,中心处被加工的次数更多,从而使得工件表面将趋向于漏斗状连续分布。因此,采用定偏心平面研磨方式,工件的平面度不仅不会随研磨加工时

间的增加而改善,反而会愈加恶化。

3 结论

(1)提出了研磨轨迹均匀性的评价方法,分析主动驱动方式下平面研磨过程中工件的运动学特性,揭示了研磨盘和工件的转速比和偏心距对加工均匀性的影响。

(2)主动驱动平面研磨方式下偏心距 e 越小越有利于工件表面研磨轨迹的均匀分布。增大偏心距 e 不利于工件表面研磨轨迹的均匀分布。这是因为随着偏心距 e 的增大,相对转速线速度偏差增大。

(3)当研磨盘与工件具有相同的角速度时,更有利于轨迹均匀性的提高。增大转速比 k 使加工轨迹分布稀疏,轨迹曲线点的标准差大,加工均匀性差。

(4)轨迹均匀性评价方法可以通过单位面积轨迹点的数量,并依据公式求得其标准差来衡量。

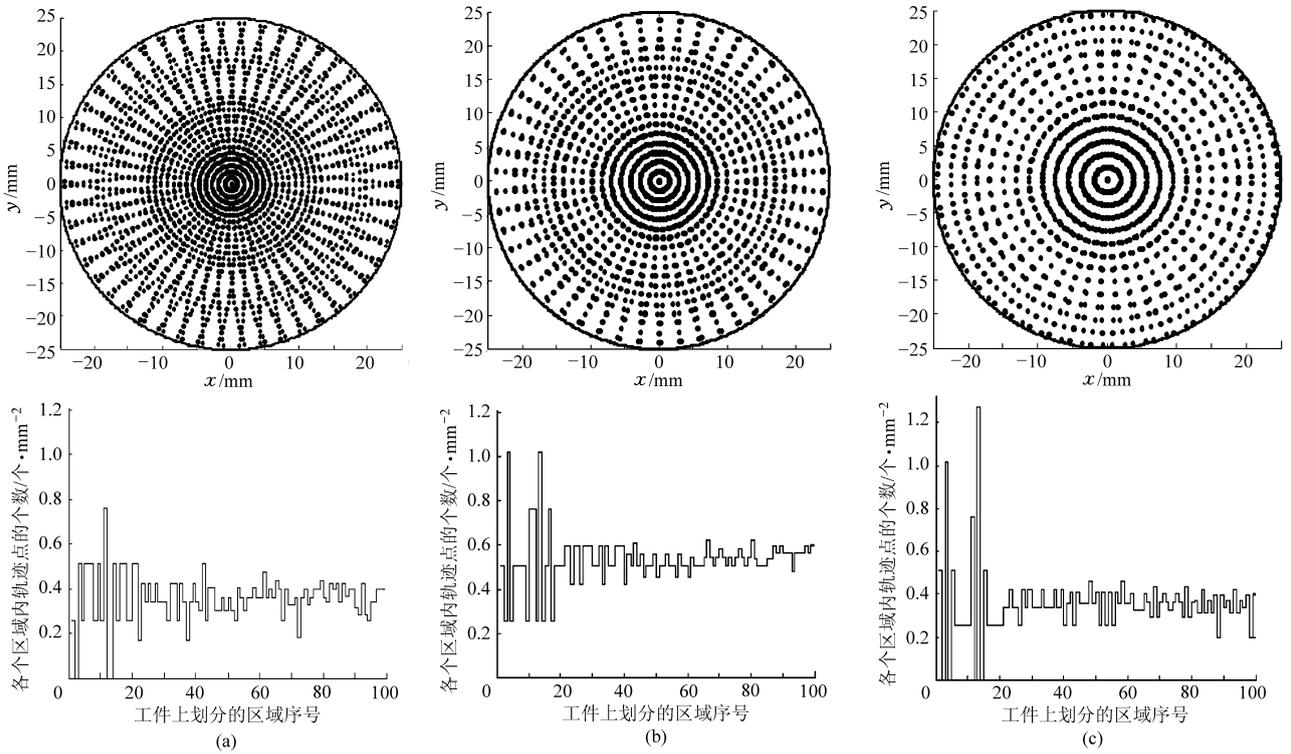


图4 不同偏心距研磨方式下的研磨轨迹

Fig. 4 Lapping trajectory under different eccentricities

(a) $e = 60 \text{ mm}, k = 1, S_Q = 0.10934$ (b) $e = 90 \text{ mm}, k = 1, S_Q = 0.14751$ (c) $e = 120 \text{ mm}, k = 1, S_Q = 0.15494$

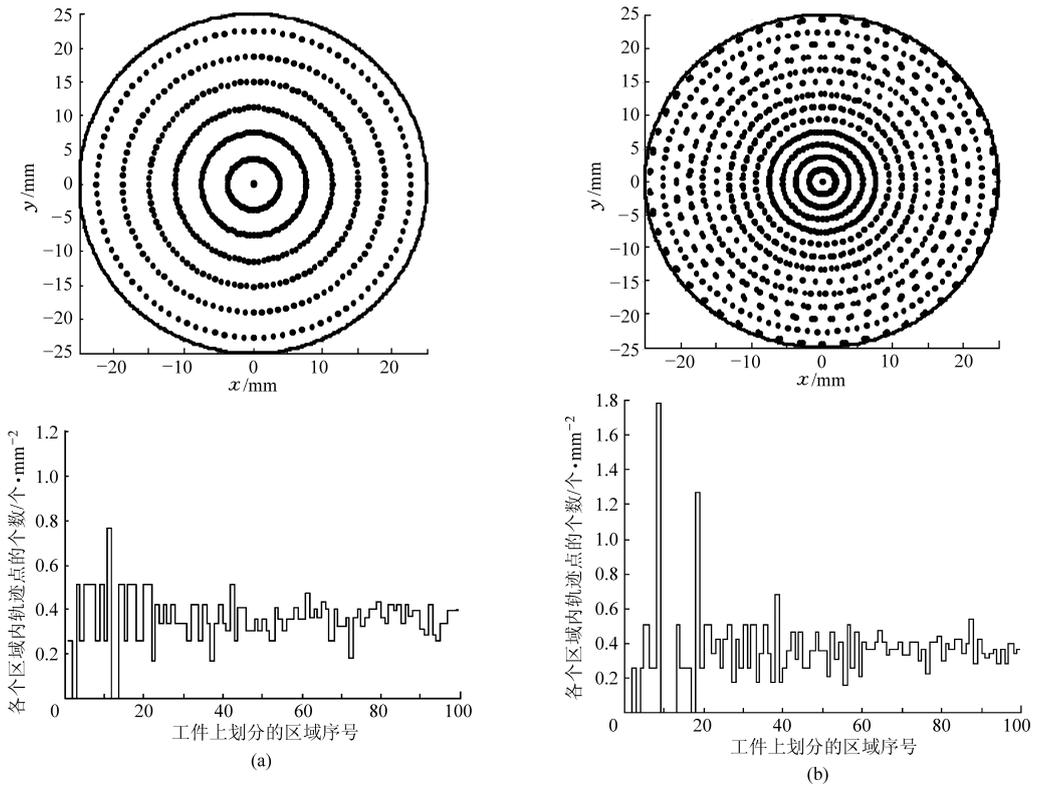


图5 不同转速比研磨方式下的研磨轨迹

Fig. 5 Lapping trajectory of different rotating ratio

(a) $e = 60 \text{ mm}, k = 2, S_Q = 0.11396$ (b) $e = 60 \text{ mm}, k = 3, S_Q = 0.17292$

- based on morphological gradient[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 75~80. (in Chinese)
- 5 毛玲,孙即祥,张国敏,等. 基于形态滤波的心电信号基线校正算法[J]. 信号处理,2008,24(4):582~585.
Mao Ling, Sun Jixiang, Zhang Guomin, et al. An algorithm based on morphological filter for baseline normalization of ECG [J]. Signal Processing, 2008, 24(4): 582~585. (in Chinese)
- 6 Zhang Lijun, Xu Jinwu, Yang Jianhong, et al. Multiscale morphology analysis and its application to fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008,22(3): 597~610.
- 7 Goutsias J, Heijmans H J A M. Nonlinear multiresolution signal decomposition schemes-Part I: morphological pyramids[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(11): 1 862~1 876.
- 8 Heijmans H J A M, Goutsias J. Nonlinear multiresolution signal decomposition schemes-Part II: morphological wavelets[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2000, 9(11): 1 897~1 913.
- 9 章立军. 信号的数学形态学分析方法及其应用研究[D]. 北京:北京科技大学,2007.
Zhang Lijun. Research on mathematical morphology analysis of signals and its application[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2007. (in Chinese)
- 10 Rujiang Hao, Fulei Chu. Morphological undecimated wavelet decomposition for fault diagnostics of rolling element bearings [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 320(4~5): 1 164~1 177.
- 11 黄兵锋,沈路,周晓军,等. 基于形态非抽样小波分解的滚动轴承故障特征提取[J]. 农业机械学报,2010,41(2): 203~207.
Huang Bingfeng, Shen Lu, Zhou Xiaojun, et al. Fault feature extraction of rolling element bearing based on morphological undecimated wavelet decomposition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 203~207. (in Chinese)
- 12 崔屹. 图像处理与分析-数学形态学方法及应用[M]. 北京:科学出版社,2000.
- 13 于德介,程军圣,杨宇. Hilbert-Huang 变换在齿轮故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报,2005,41(6):102~107.
Yu Dejie, Cheng Junsheng, Yang Yu. Application of Hilbert-Huang transform method to gear fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 102~107. (in Chinese)
- 14 王学军,马辉,孙伟,等. 基于小波分析的转子碰摩故障特征提取[J]. 农业机械学报,2008,39(4):147~151.
Wang Xuejun, Ma Hui, Sun Wei, et al. Feature extraction of rotor fault based on wavelet analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(4):147~151. (in Chinese)

(上接第 212 页)

参 考 文 献

- 1 高道岗. 超精密加工技术[M]. 台湾:全华科技图书,2000.
- 2 袁哲俊. 精密和超精密加工技术[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- 3 杨建东,任长根,王长兴,等. 平面研磨中影响工件起动力矩的因素[J]. 光学技术,1998,24(5):30~41.
Yang Jiandong, Ren Changgen, Wang Changxing, et al. Factors affecting workpiece starting moment in plane lapping [J]. Optical Technique, 1998, 24(5):30~41. (in Chinese)
- 4 杨鑫宏,胡孝勇,张伟,等. 平面研磨过程中磨具均匀磨损的研究[J]. 中国机械工程,2003,14(18): 1 552~1 555.
Yang Xinhong, Hu Xiaoyong, Zhang Wei, et al. Research on uniform abrasion of the lapping tool in plane lapping process [J]. China Mechanical Engineering,2003,14(18): 1 552~1 555. (in Chinese)
- 5 赵萍,陶黎,王志伟,等. 平面研磨抛光轨迹研究[J]. 航空精密制造技术,2009,45(2):1~6.
Zhao Ping, Tao Li, Wang Zhiwei, et al. Review on trace of plane lapping / polishing [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2009, 45(2):1~6. (in Chinese)
- 6 查立豫. 平面光学零件加工中的相对线速度分布[J]. 仪器制造,1983,4(3):6~10.
Zha Liyu. Distribution of relative line speed during plane lapping of optic workpiece [J]. Instrument Manufacturing, 1983, 4(3):6~10. (in Chinese)
- 7 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): 1 651~1 669.
- 8 Tyan Feng. Nonuniformity of wafer and pad in CMP: kinematic aspects of view [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2007, 20(4): 451~463.