

晶片抛光机压力加载系统分析*

赵文宏¹, 周海军¹, 宋 闯², 程城远¹, 徐乐俊¹, 袁巨龙¹

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014;
2. 丽水学院 计算机与信息工程学院, 浙江 丽水 323000)

摘要: 在晶体薄片的双面抛光加工中, 实现抛光压力的精确、多模式控制对获得晶片高平面度和无损伤、超平滑的加工质量至关重要。为此, 提出了一种基于步进电机的压力加载系统。在简述压力加载系统组成及原理的基础上, 对该压力加载系统进行了整体数学建模, 并通过 Simulink 对系统性能进行了仿真分析; 最后对石英晶片进行了加工实验。实验结果初步验证了所设计的抛光压力加载系统可以较好地实现抛光压力的动态加载及平稳保持, 并获得了平滑的晶片抛光表面。

关键词: 步进电机; 压力加载; 数学建模

中图分类号: TH161; TP273; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)02-0171-03

Analysis of pressure loading system for chip polishing machine

ZHAO Wen-hong¹, ZHOU Hai-jun¹, SONG Chuang², CHENG Cheng-yuan¹,

XU Le-jun¹, YUAN Ju-long¹

(1. Ministry of Education & Zhejiang Province Key Laboratory of E&M,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. College of Computer and Information Engineering, Lishui University, Lishui 323000, China)

Abstract: In order to realize the precise, multi-mode control of polishing pressure for getting a high planeness and no damaging super-smooth surfaces in wafer's double-sided polishing processing, a polishing pressure loading system which based on stepping motor was put forward. After the analysis of system's composition and principle, the mathematical modeling was established. A method of simulation in Simulink was presented to analyze its performance. The real control effects of polishing pressure were evaluated on the processing experiment of quartz wafer, the accuracy and stability of the polishing pressure loading system were tested. The experimental results show that the pressure loading system based on stepping motor is feasible and it can get a smooth polishing surface of wafers in polishing processing.

Key words: stepping motor; pressure loading; mathematical modeling

0 引 言

在超精密加工领域, 双面抛光技术作为一种获得晶片高平面度和无损伤超光滑加工质量行之有效的技术手段, 在实际生产中得到了广泛应用。在双面抛光机的技术研发及产品化方面, 美、日、英等发达国家走在了前列, 开发了 NanoSurface DL9B5L/T、SPEED-FAM 9B-5P-42 等典型产品; 相对国外, 航空精密机械

研究所、长春光学机械研究所等国内科研单位都对超精密抛光技术进行了一些研究, 并取得了一定的成果^[1]。产品化企业有深圳宏达、兰州瑞德等, 代表产品如 X61/2 640B2M-5 型双面研磨/抛光机。鉴于气压系统本身的洁净、廉价和易于维护, 目前石英晶片抛光设备多采用气压加载方式, 即通过气缸连杆带动上抛光盘运动实现压力加载。为了实现连续精密的气动压力加载, 多采用价格昂贵的伺服阀^[2-3]。

收稿日期: 2011-09-02

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y108685); 浙江省科技计划资助项目(2009C31019)

作者简介: 赵文宏 (1969-), 男, 浙江浦江人, 教授级高级工程师, 主要从事单片机、控制系统算法和嵌入式系统方面的研究。E-mail: zwh2010@vip.sina.com

由于伺服阀存在对工作环境敏感、输出压力较小等缺点,同时考虑到气源压力的稳定性、运动速度控制实现的难易程度等因素,笔者提出一种基于步进电机的压力加载系统,并建立系统的数学模型,通过Simulink仿真对其性能进行分析。最后,结合实验对系统进行初步验证。

1 晶片抛光机压力加载系统的组成及原理

基于步进电机的压力加载系统主要由步进电机传动机构、弹簧均压执行机构组成。具体结构如图1所示。

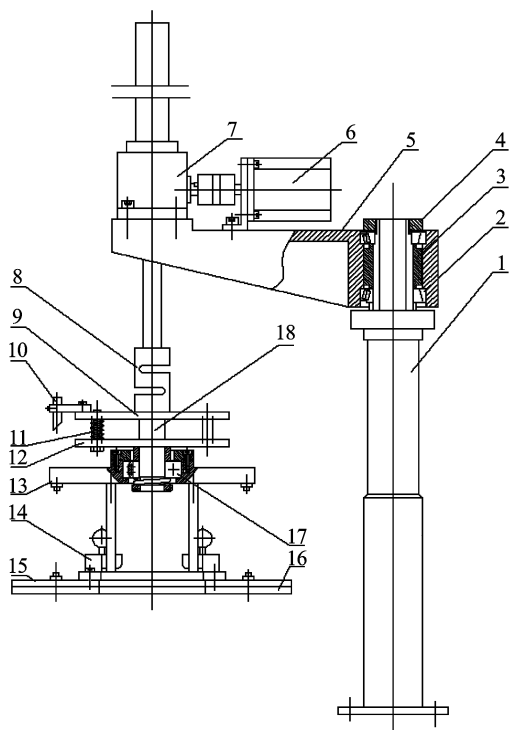


图1 抛光压力加载系统机械结构图

1—立柱;2—圆锥滚子轴承;3—定位轴套;4—压紧螺母;5—横梁;6—步进电机;7—丝杠升降机构;8—压力传感器;9—上法兰;10—磨削液组件;11—均压弹簧;12—下法兰;13—轴承座体;14—传动组件;15—基盘;16—半固着磨具;17—双列向心推力球轴承;18—心轴

基于嵌入式微控制器的抛光压力加载过程如下:

综合抛光压力的设定值、加载模式及压力传感器的反馈信号,嵌入式微控制器通过控制步进电机的运动实现上抛光盘的上下移动及抛光压力的加载。步进电机通过丝杠升降机构将旋转运动转化为丝杠的垂直移动,从而改变安装在上、下法兰间均压弹簧的变形量,而均压弹簧变形量的变化引起加载到上抛光盘的抛光压力的改变。抛光压力通过压力传感器实时反馈到嵌入式微控制器,以实现抛光压力的闭环调节与精确控制。

2 压力加载系统数学建模

2.1 步进电机传动机构数学模型

步进电机传动机构主要包括步进电机与丝杠升降机构两部分。分析中将丝杠升降机构与弹簧均压执行机构的转动惯量折算到电机转子轴上,建立电机传动机构的数学模型。

由于磁滞、涡流、磁导分布等非线性因素的存在,使得步进电机数学模型比较复杂。采用线性化方法简化后步进电机的静态整步转矩 T_e 可近似为^[4-7]:

$$T_e = -K_e(\theta_o - \theta_i) = K_e(\theta_i - \theta_o) \quad (1)$$

式中: K_e —与电机结构有关的常数, θ_i —给定的平衡位置, θ_o —步进电机的转角。

步进电机的电压平衡方程和运动方程^[8]为:

$$u = iR + K_e \Omega \quad (2)$$

$$T_e = J \frac{d\Omega}{dt} + B_1 \Omega - T_l \quad (3)$$

式中: K_e —励磁绕组的反电动势系数; Ω —机械角速度; J —转子及负载的转动惯量; B_1 —机械阻尼系数; T_l —静负载转矩; u, i, R —励磁绕组的电压、电流和电阻。

联立式(1~3),令 $T_l = 0$,作拉氏变换求得步进电机的传递函数为:

$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{K_e}{Js^2 + B_1s + K_e} \quad (4)$$

忽略丝杠齿间间隙等因素影响,由等功原理计算丝杠升降机构及上磨盘折算到电机转子轴上的转动惯量 J_l ^[9]可得:

$$J_l = M \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2 \quad (5)$$

式中: M —弹簧均压执行机构的总质量, P —等效丝杠螺距,即电机每转一周丝杠升降的直线距离。

2.2 弹簧均压执行机构数学模型

弹簧均压执行机构主要由弹簧缓冲机构、半固着磨具上抛光盘组成。因半固着磨具弹性模量较大,在压力加载范围内可等效为刚体。当晶片受到抛光压力时,由于半固着磨具上抛光盘已与晶片接触,在受到弹性力 $f_k(t)$ 和粘性阻尼力 $f_b(t)$ 时不会产生加速度,故

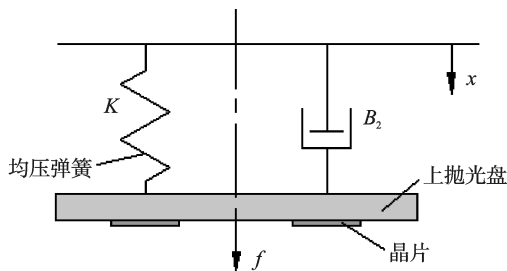


图2 弹簧均压执行机构等效系统图

可以将其重量等效加入到弹簧的形变中,此时可将弹簧均压执行机构等效为弹簧-阻尼系统(如图2所示)。

根据以上分析,系统产生的抛光压力 f 可表示为:

$$f = Kx + B_2 \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

其中,丝杠直线位移 $x = \theta_0 P / 2\pi$ 。

本研究对式(6)作拉氏变换,求得弹簧均压执行机构的传递函数为:

$$\frac{F(s)}{X(s)} = K + B_2 s \quad (7)$$

2.3 压力加载系统数学模型

联立式(4,7),求得压力加载系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{F(s)}{\theta_i(s)} = \frac{(K + B_2 s) K_{eP}}{2\pi (Js^2 + B_1 s + K_e)} \quad (8)$$

3 压力加载系统控制器设计及仿真

本研究加入拉压双向传感器构成抛光压力闭环控制系统,在Simulink中建立系统的仿真框图如图3所示。

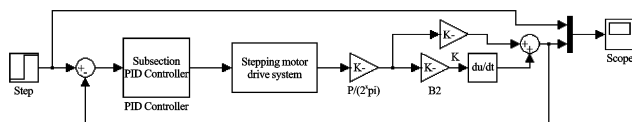


图3 晶片抛光压力加载系统Simulink仿真框图

仿真参数^[10-11]: $K=25.8 \text{ N/mm}$, $K_e=602$, $J=7.38 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $B_1=B_2=0.035$, $P=0.5$ 。

为实现抛光压力的快速、精确、稳定控制,本研究采用PID控制器进行抛光压力校正。考虑到晶片抛光的工艺过程,在实际控制中,在晶片批一致性差别较大的粗抛阶段,为了缩短响应时间,系统响应允许有一定的超调量,此时可采用单一PID控制,仿真结果如图4(a)所示;而在精抛阶段,为了提高晶片的表面精度、减少划痕,同时避免输出变量因饱和和效应可能出现的系统明显超调,本研究采用积分分离法进行分段PID控制,即在压力偏差 e 进入门限 ε 范围时,积分器才起作用,在 ε 范围外,仅相当于PD调节器,仿真结果如图4(b)所示。

由图4(a)可以看出,粗抛时,系统单位阶跃响应

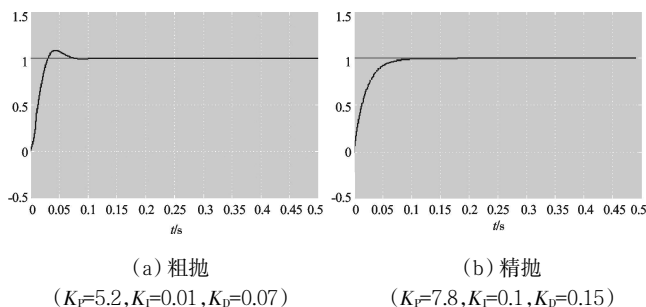


图4 压力加载系统单位阶跃函数响应曲线图

超调量 $\sigma=8\%$,稳定建立时间 $t_s=0.08 \text{ s}$;精抛时,如图4(b)所示,在单位阶跃信号激励下,起始阶段系统在PD调节作用下快速响应,当响应误差小于设定门限时,系统响应趋缓(避免了因积分饱和使系统超调量大和稳定时间长),直至达到稳定值。此过程中系统响应无超调且稳定建立时间为 0.13 s 。综合图4(a)、(b),该压力加载系统可以达到预期控制效果。

4 晶片抛光实验

通过在行星式双面抛光机上加工 $9 \times 24.5 \text{ mm}$ 石英晶片的实验验证,在保证对晶片冲击小的前提下,笔者设计的基于步进电机的抛光压力加载系统可以较好地实现抛光压力的快速加载及恒定压力的平稳保持。系统压力加载的范围为 $0 \sim 500 \text{ N}$,压力分辨率为 5 N 。本研究根据安捷伦34970A数据采集器记录的抛光压力值所绘制的抛光压力实测曲线如图5所示。

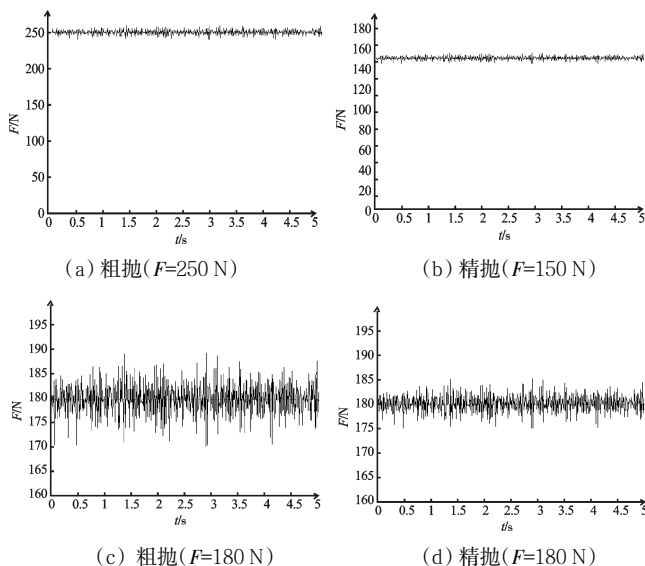


图5 抛光压力实测曲线

5 结束语

本研究介绍了一种基于步进电机控制的晶片抛光机抛光压力加载系统,笔者在阐述抛光压力加载原理的同时对其动态模型进行了仿真分析,并通过石英晶片抛光加工实验,验证了此抛光机压力加载系统结构稳定、动态特性良好,能较好地实现抛光压力的精确、多模式加载;实验中最终获得了平滑的抛光表面。

参考文献(References):

- [1] 邱志成, 谈大龙. 气压伺服及气液连动控制发展概况综述[EB/OL].[2006-02-15]. http://www.jdzj.com/datum/showart.asp?art_id=1744.

(下转第187页)

表1 裂纹长度在线测量数据及分析结果

次数	显微镜读数/mm	摄像头测量值/mm	偏差/mm
1	12.726	12.584	-0.142
2	14.962	14.841	-0.121
3	17.584	17.465	-0.128
4	20.108	19.970	-0.138
5	24.362	24.257	-0.105
6	28.742	28.594	-0.148
7	30.586	30.444	-0.142
8	32.184	32.058	-0.126

示。为了减少运算量,提高图像处理速度,该系统设计为一次标定,以标准 C(T)试样为例,选取缺口长度作为标定对象。则实际裂纹长度由图像的像素坐标与实物坐标之间的转换关系得:

$$L_r = L_p \cdot k = L_p \frac{0.25W + a_n}{L_{pb}} \quad (1)$$

式中: L_p —裂纹的像素长度, k —实际检测系统的分辨率, L_{pb} —标定像素长度,“ $0.25W + a_n$ ”—缺口实际长度。

裂纹长度-时间关系图如图12所示,对这些离散点进行拟合可以得到裂纹长度-时间曲线 $f(l, t)$,取拟合曲线的导函数,就能够得到裂纹的扩展速率,即:

$$V = \dot{f}(l, t) \quad (2)$$

裂纹长度测量误差的来源主要有成像畸变以及图像数字化导致的误差、标定误差、图像处理产生的误差;而裂纹扩展速率的误差主要是裂纹长度误差及拟合不当所致。

4 结束语

本研究从实际应用的角度,选用了合适的硬件设备和软件模块化设计方案,搭建了基于虚拟仪器及图像处理技术的疲劳裂纹检测系统。通过NI的IMAQ

Vision 图像处理软件包,笔者对金属疲劳裂纹检测的机器视觉技术的实现进行了比较系统的研究,实现了裂纹长度的自动化在线测量且获得了较准确的测量结果。实验数据的读取和分析验证了该方法的可行性,但系统的测量精度、数据管理功能及容错能力仍有待提高。

参考文献(References):

- [1] 熊峻江. 疲劳断裂可靠性工程学[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 尚绪强. 基于虚拟仪器和机器视觉的零件测量技术[D]. 青岛:山东大学机械工程学院,2008.
- [3] 张 念,温兆麟,章 沛. 基于虚拟仪器的在线机器视觉检测系统[J]. 机床与液压,2008,36(5):137-139.
- [4] GB/T 6398-2000 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法[S]. 北京:国家质量技术监督局,2001.
- [5] KANCHANOMAIA C, MIYASHITA Y, MUTOHA Y, et al. Low cycle fatigue test for solders using non-contact digital image measurement system [J]. **International Journal of Fatigue**, 2002, 17(24):57-67.
- [6] 刘文耀. 数字图像采集与处理 [M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [7] RELF C G. Image Acquisition and Processing with LabVIEW [M]. Florida: CRC Press, 2004.
- [8] 陈书海,傅录祥. 实用数字图像处理[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [9] STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. Machine Vision Algorithms and Application [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2008.
- [10] 徐洪安,费仁元,王 民. 用ADO构建LabVIEW中的数据库访问接口[J]. 北京工业大学学报, 2003, 29(2):138-140.
- [11] 李婷婷,赵登峰,高 旭. 虚拟仪器的信号生成与模入模出系统[J]. 机电工程技术, 2010, 39(1)26-27.

[编辑:李 辉]

(上接第173页)

- [2] 王祖温,詹长书,杨庆俊,等. 气压伺服系统高性能鲁棒控制器的设计[J]. 机械工程学报, 2005, 41(11):15-17.
- [3] 钱 宁,阮 健,李 伟. 双面抛光机气动伺服加载系统分析[J]. 机床与液压, 2006, 34(8):72-74.
- [4] HAN Guang-xian, WANG Zong-pei, CHENG Zhi. A precise non-linear simulation model for hybrid stepping motor [C] //Proceeding of the 5th international Conference on Electrical Machines and Systems. Shenyang, China: [s.n.], 2001:986-990.
- [5] HU B G, IMANN G K, GOSINE R G. A systematic study of fuzzy PID controllers-function-based evaluation approach[J]. **Submitted to IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, 2001, 9(5):699-712.
- [6] KENJO T. Stepping Motors Control of Linearizable Systems [M]. Oxford. V. K: Clarendon, 1984.
- [7] 王鉴光. 电机控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 1994.
- [8] 孙冠群, 于少娟. 控制电机与特种电机及其控制系统[M]. 北京:北京大学出版社, 2011.
- [9] 王积伟. 控制理论与控制工程 [M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [10] 刘慧英,范宝山. 基于STM32的多步进电机控制系统研究 [J]. 测控技术, 2010, 29(6):54-57.
- [11] 梁文祯. 基于STM32的TFT-LCD检测系统的设计与实现 [J]. 机电工程技术, 2011, 40(6):36-37.

[编辑:张 翔]