

基于 ACS 运动控制的 LED 晶片分选系统设计

张永昊, 宋华军, 武田凯, 韩旭

(中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东青岛 266580)

摘要: 为了提高 LED 晶片分选机的分选速度和精度, 设计了基于 IPC+ACS 运动控制的 LED 晶片分选系统; 分析了晶片分选过程直线电机定位、直驱电机旋转以及音圈电机拾取三部分的时序, 并结合电机性能分别规划了 3 类电机的定位时间; 以直驱电机为例分析了在 SPiiPlus MMI 软件环境中调试电机电流环、速度环和位置环以及频域稳定性的过程, 并最终给出 3 类电机的定位时间和定位误差; 设计了吸嘴和顶针接触式剥离拾取晶片的方案, 利用 ACSPL+ 语言编写拾取动作的程序, 并在速度环和位置环曲线中加以验证; 在 ZKMY-P10 型号的分选机分选平台进行了连续分选测试, 实验结果表明, 分选机的 X/Y 轴定位精度为 ± 0.5 mil, 晶片分选的平均速度为 125 ms/片。

关键词: 晶片分选; ACS 运动控制; SPiiPlus MMI; LED 分选机

LED Chip Sorting System Design Based on ACS Motion Control

Zhang Yonghao, Song Huajun, Wu Tiankai, Han Xu

(School of Ocean and Spatial Information, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: In order to improve the sorting speed and accuracy of the LED chip sorting machine, an LED chip sorting system based on IPC+ACS motion control is designed. The positioning of the linear motor, the rotation of the direct drive motor and the voice coil motor picks up the timing of the three parts, and combines the motor performance to plan the positioning time of the three types of motors. Taking the direct drive motor as an example, the debugging of the motor current loop, speed loop, position loop and frequency in the SPiiPlus MMI software environment is given. The process of domain stability verification, and finally the debugging results of the three types of motors are given. A plan for picking up the chip by contact peeling of the suction nozzle and thimble is designed, and the picking action program is written in ACSPL+ language and verified on the speed and position curve. The continuous sorting test was carried out on the sorting platform of the ZKMY-P10 type sorter. The experimental results show that the X/Y axis positioning accuracy of the sorter is ± 0.5 mil, and the average speed of chip sorting is 125ms/piece.

Keywords: chip sorting; ACS motion control; SPiiPlus MMI; LED sorting machine

0 引言

随着半导体技术的飞速发展, 全球的 LED 行业已经进入一个新时代, LED 以其省电、寿命长、响应速度快等优点, 已经广泛应用于信号灯、显示屏、舞台灯等领域。随着 LED 市场的迅速发展, LED 检测和分选设备的需求量越来越大, 对设备分选速度和精度的要求也越来越高^[1]。国际方面, 台湾威控自动化、荷兰 ASM 等公司在 LED 分选机技术研发上比较先进, 但是公司已经将设备模块化, 在软硬件方面有严格的保密制度, 使得技术很难被复制^[2]。国内方面, 广东志成华科光电有限公司、常州谱微光电有限公司等也正在研发分选机设备^[3], 但是在速度和精度方面和国外先进设备还是有一定差距。因此目前国内使用的 LED 分选机全部依赖进口。

LED 分选设备的核心技术主要包括机器视觉技术和运动控制技术。目前国际上运动控制系统种类繁多, 应用于

高精度控制的主要有美国的 PMAC、英国的 Trio、以色列的 ACS 等, 价格都比较昂贵^[4]。国内研发的 LED 分选设备大多采用 IPC+PMAC 运动控制卡的运动控制方案, 其中工控机作为上位机, PMAC 运动控制卡作为下位机, 二者通过 PCI 总线通讯, 在 PEWIN32 软件中设置电机的相关参数^[5]。近年来 ACS 运动控制系统发展迅速, 基于 ACS 控制器的双驱龙门平台定位精度可达 1 微米, 强大的 ServoBoost 算法极大地提高了定位精度并缩短了定位时间。此外, 运动控制卡 SPiiPlus SC 可以嵌入在 Windows 操作系统的内核中^[6], 无需复杂的硬件连线。因此 ACS 运动控制方案已经被广泛应用于如晶圆切割、晶片检测等半导体行业^[7]。

在现有硬件条件下, 分选动作时序的配合对分选的速度有重要作用。分选动作主要包括工作台定位, 机械臂旋转和晶片拾取三步, 前两步的速度和精度主要由电机性能决定, 晶片拾取方案对分选的周期和准确度有重要作用。晶片拾取(又叫晶片剥离)过程主要依靠顶针上顶和吸嘴

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2020-11-19。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(18CX02109A); 电子测试技术重点实验室开放基金项目(6142001180514)。

作者简介: 张永昊(1996-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事高性能硬件系统设计以及运动控制等方向的研究。

通讯作者: 宋华军(1978-), 男, 山东威海人, 博士, 副教授, 主要从事高性能硬件系统设计以及无线通信, 实时目标跟踪等方向的研究。

引用格式: 张永昊, 宋华军, 武田凯, 等. 基于 ACS 运动控制的 LED 晶片分选系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 116-121.

真空吸附协同完成, 根据顶针和吸嘴的动作逻辑不同, 又分为接触式和非接触式剥离^[8]。非接触式剥离对真空转换装置以及对拾取时电机的位置参数要求较高, 用户校准参数时难度较大, 并且容易造成分选晶片歪斜。本文设计了顶起和真空剥离相结合的接触式剥离方案。

1 系统总体结构

LED 分选机主要包括视觉系统和运动控制系统两部分, 整体结构如图 1 所示。系统采用 IPC+ACS 的运动控制方案, IPC 工控机一路连接视觉系统 (CCD 相机和图像采集卡), 另一路连接运动控制系统 (运动控制卡和电机驱动器)。运动控制卡 SPiiPlus SC 嵌入在多核 CPU 的一个内核中, 通过共享 TCP/IP 以及虚拟内存的方式和主机通讯。主机通过 Ethernet 网口级联包含多个电机驱动器的 EtherCAT 串行运动网络。整个系统有 6 个驱动器以及 15 个电机, 其中直线电机、音圈电机和直驱电机精度较高, 用于分选过程; 步进电机、直流电机和伺服电机精度较低, 用于装卸载盘片。

2 实验平台介绍

ZKMY-P10 型号的 LED 分选机分选平台的模型图如图 2 所示。实验平台包含两路 CCD 相机和 8 个电机, 其中两个 CCD 相机分别位于 Wafer 台和 Bin 台正上方, 负责待分选晶片的扫描和定位以及摆放晶片位置的检测^[9]; Wafer 台和 Bin 台 (4 个直线电机)、摆臂 (直驱电机) 以及吸嘴和推顶器 (3 个音圈电机) 负责晶片分选。其中 CCD 相机帧频为 120 帧/s, SPiiPlus 运动控制卡的伺服周期为 500 μs, 直线电机和音圈电机的光栅数字编码器精度为 2 μm, 直驱电机的 Sin-Cos 模拟量编码器精度为万分之一度, 硬件实验平台的保证了晶片分选的速度和精度。

3 LED 晶片分选方案设计

3.1 晶片分选流程

生产不同特性参数和不同功率的晶片, 切割晶片的尺寸也会有所不同^[10], LED 晶片的尺寸范围大约为 6 mil * 7 mil 到 160 mil * 160 mil。通常一片硅圆片上包含多个等级的 LED 晶片, 数量多达几千至数万个 LED 晶片。分选机分选晶片的实质是将晶片供给区 (称为 Wafer 区域) 中相同等级的晶片按照一定顺序分选至晶片摆放区^[11] (称为 Bin 区域), 如图 3 所示。

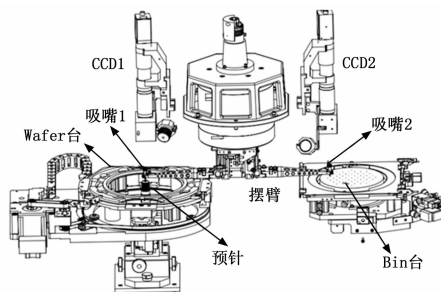


图 2 ZKMY-P10 分选机分选平台

7 mil 到 160 mil * 160 mil。通常一片硅圆片上包含多个等级的 LED 晶片, 数量多达几千至数万个 LED 晶片。分选机分选晶片的实质是将晶片供给区 (称为 Wafer 区域) 中相同等级的晶片按照一定顺序分选至晶片摆放区^[11] (称为 Bin 区域), 如图 3 所示。

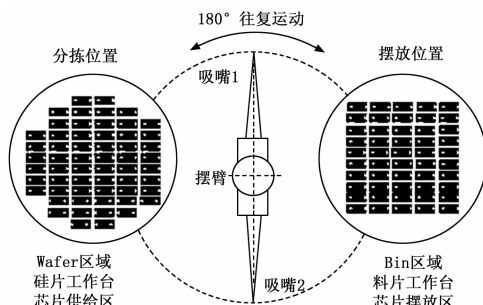


图 3 晶片分选示意图

LED 晶片分选过程主要包括工作台定位、摆臂电机旋转、晶片拾取和摆放三部分, 分选流程主要包括四步, 如图 4 所示。

- 1) 摆臂旋转到分拣位置并且吸嘴下落, 吸嘴 1 分拣, 吸嘴 2 摆放;
- 2) 吸嘴抬起, 吸嘴 1 吸附晶片, 吸嘴 2 空, 工作台移动;
- 3) 摆臂旋转到摆放位置并且吸嘴下落, 吸嘴 2 分拣, 吸嘴 1 摆放;
- 4) 吸嘴抬起, 吸嘴 2 吸附晶片, 吸嘴 1 空, 工作台移动。

3.2 晶片拾取方案设计

分选过程吸嘴和顶针的位置以及拾取动作如图 5 所示。顶针的初始高度位于晶片正下方约 1.5 mm; 紧贴晶片下表面顶起晶片的位置是预备高度; 使晶片脱离蓝膜的位置是刺破高度。摆臂移动过程中吸嘴所在的位置是吸嘴的初始位置, 距离晶片约 2~3 mm; 吸嘴压紧晶片的位置是分拣位置, 初始位置下方约 1 mm 是吸嘴的预备位置。

- 晶片拾取过程主要分为 4 个步骤:
- 1) 吸嘴和顶针到达初始位;
 - 2) 吸嘴下降至分拣位置, 顶针上升

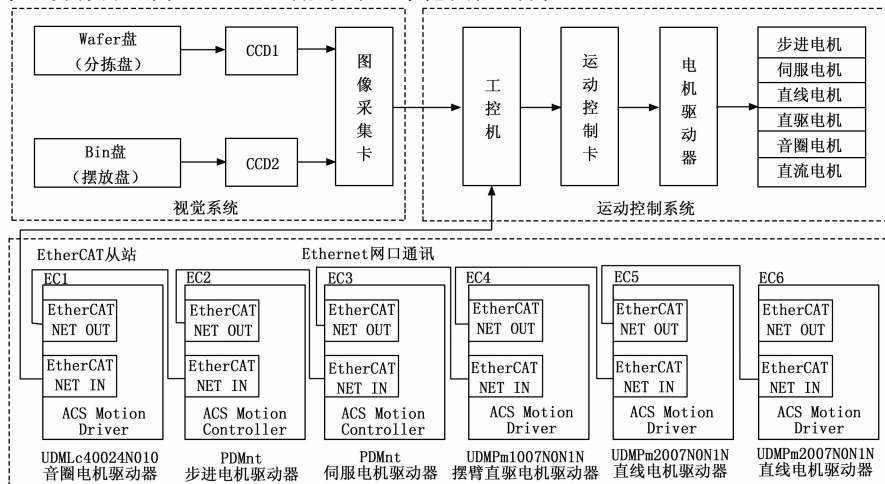


图 1 系统结构及原理

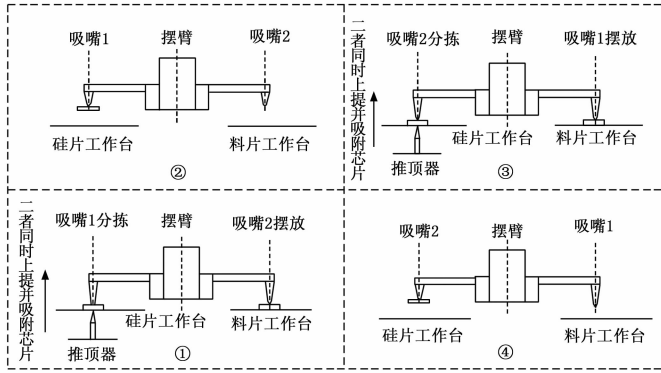


图 4 晶片分选流程

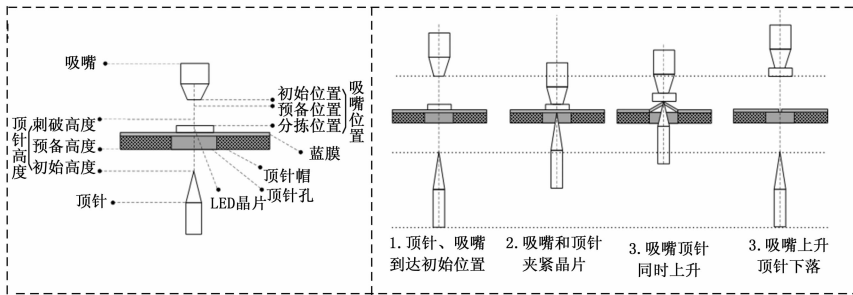


图 5 晶片拾取动作

到预备高度，吸嘴和顶针夹紧晶片；

- 3) 吸嘴顶针同时上升（顶针刺破蓝膜）；
- 4) 吸嘴上升，顶针下降。

根据 3.1 小节分选流程可知，晶片分选是在顶针和吸嘴的协同作用下完成的，吸嘴、顶针夹紧晶片同时上升使晶片脱离蓝膜是拾取成功关键。系统设定顶针的加速度大于吸嘴，这样能保证二者同时上升拾取晶片时吸嘴和晶片不发生滑落和位移^[12]，进而能准确拾取。

将拾取过程利用 ACSPL+ 语言编写电机动作逻辑，并调试好电机的性能，观察吸嘴和顶针的反馈速度和位置曲线，如图 6 所示。图 (a) 中实线和虚线曲线分别代表吸嘴 (BondHead) 和顶针 (Ejector) 的反馈位置，图 (b) 中实线和虚线曲线分别代表吸嘴和顶针的反馈速度，两图中 A—E 阶段分别对应不同的运动过程：A—B 段吸嘴运动到分拣位置，顶针运动到预备高度，吸嘴和顶针夹紧晶片；B—C 段二者到位，误差整定；C—D 段二者同时上升，顶针到刺破高度；D—E 段顶针下落吸嘴上升；E—F 段吸嘴吸附晶片，吸嘴和顶针分别运动到初始位置。

3.3 晶片分选周期分析

LED 晶片分选机的分选周期主要是由直线电机、摆臂电机、音圈电机的定位时间以及真空气压转换时间四部分决定。其中真空气压转换时间是由真空气压转换装置的性能决定的，电机高频运动的定位精度和定位时间^[13]是由运动控制系统的性能和分选方案决定的。电机的定位时间包括运动时间和整定时间^[14]两部分。本系统设计的分选过程 8 个电机联动的运动逻辑时序图如图 7 所示，从上到下分别

为定位工作台 (WorkTable)、摆臂电机 (Arm)、吸嘴 2 (BH2)、吸嘴 1 (BH1)、顶针 (Ejector)。

设单片分选的周期为 T_{Total} ，电机高频运动时间为 T_{Move} ，分选辅助时间包括气路转换以及其他动作时间为 T_{Other} ，三者满足公式 (1)：

$$T_{Total} = T_{Move} + T_{Other} \quad (1)$$

在式 (1) 中，电机高频运动时间 T_{Move} 包括摆臂、两个工作台和吸嘴顶针的运动三部分。摆臂和工作台电机可以同时运动，摆臂在旋转过程中为不允许吸嘴电机运动。设硅片工作台的定位时间为 T_{Ws} ，料片工作台为 T_{Bs} ，摆臂电机为 T_{As} ，它们各自的运动时间和整定时间分别为硅片工作台 T_g 和 T'_g ，料片工作台 T_p 和 T'_p ，摆臂电机 T_a 和 T'_a 。由

定位时间等于运动时间和整定时间之和，可得公式 (2) ~ (4)。

$$T_{Bs} = T_p + T'_p \quad (2)$$

$$T_{Ws} = T_g + T'_g \quad (3)$$

$$T_{As} = T_a + T'_a \quad (4)$$

由于两个工作台可以同时运动，所以 T_{Ws} 和 T_{Bs} 之中的最大值即为高频运动系统工作台部分的运行时间，设为 T_{Table_Move} ，

则满足公式 (5)。设 3 个音圈电机的动作时间为 T_{Vc} ，顶针上升和下降的定位时间分别为 T_{EjUp} 和 T_{EjDown} ，吸嘴上升和下降的定位时间为 T_{BHUp} 和 T_{BHDown} 。由于顶针上升和吸嘴下降同时进行，顶针下落和吸嘴上升同时进行，音圈电机动作时间 T_{Vc} 满足公式 (6)，

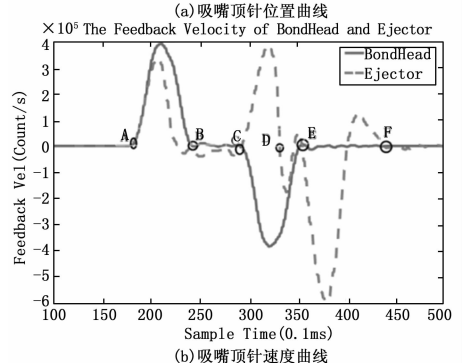
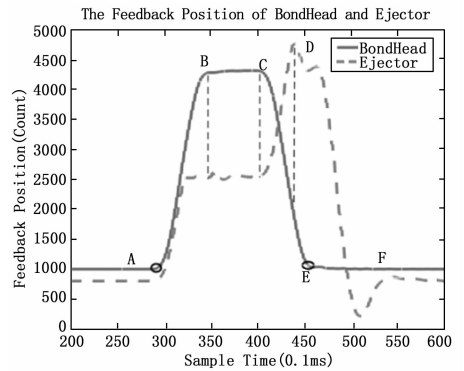


图 6 吸嘴顶针的速度和位置环

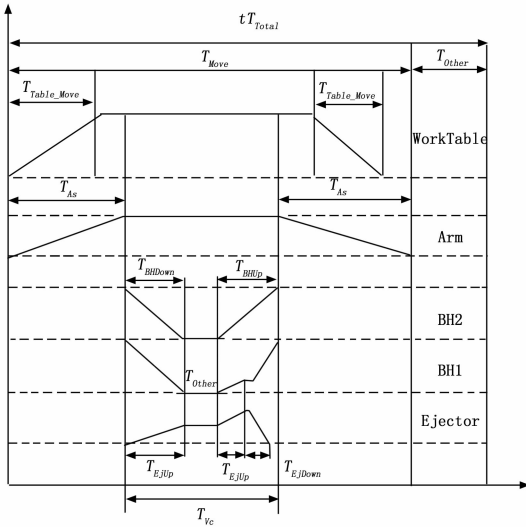


图 7 电机运动时序图

所以整个运动系统的运动时间满足公式 (7)。

$$T_{Table_Move} = \max(T_{W_s}, T_{B_s}) \quad (5)$$

$$T_{V_c} = \max(T_{EjUp}, T_{BHDdown}) + \max(T_{EjDown}, T_{BHUp}) \quad (6)$$

$$T_{Move} = \max(T_{B_s}, T_{W_s}, T_{A_s}) \quad (7)$$

综上所述, LED 晶片分选机分选晶片的周期主要由电机的定位时间决定。

4 电机性能调试

分选过程涉及到 3 种类型 8 个电机, 本节以摆臂电机为例, 给出电机性能的调试过程, 主要包括电机的 3 环 (电流环、位置环、速度环) 控制以及开环 FRF 频域稳定性验证, 结果如下。

1) 电流环:

根据控制系统的 3 环控制原理, 电流环的响应速度是最快的, 因此首先调整电流环。电流环能保证电机以较快的速度响应参考速度, 又不至于产生过流现象对设备造成损坏^[15]。调节电流环积分增益 (SLIKI) 和电流环比例增益 (SLIKP) 使得实际电流响应曲线无限逼近于参考曲线, 调试结果如图 8 所示。从图中可以看出, 实际响应曲线未超调且逼近于参考曲线。

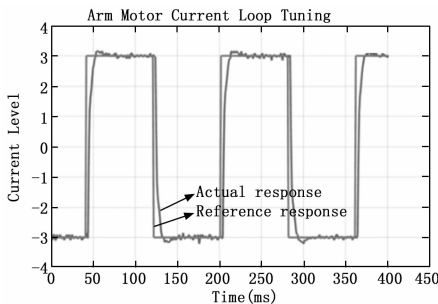


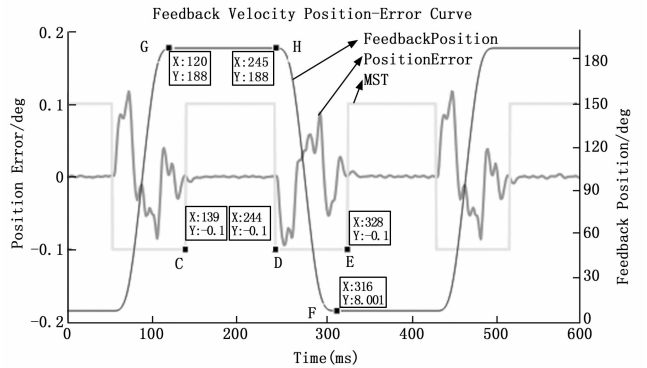
图 8 摆臂电机的电流环

2) 速度环和位置环:

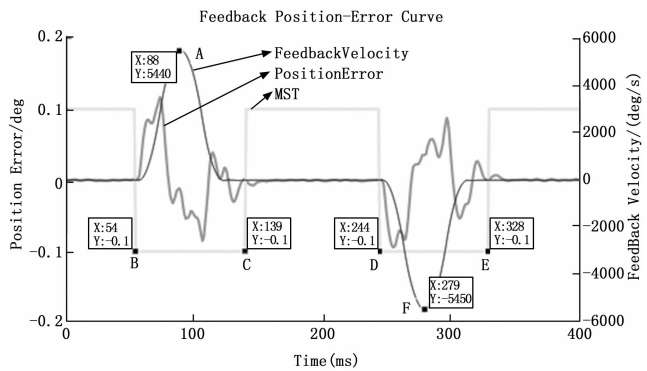
速度环和位置环是电机速度控制和定位误差准确性的

重要体现。设定好电机运动模型参数, 在 Scope 图中追踪 PE (Position Error, 位置误差)、Feedback Velocity (反馈速度)、Feedback Position (反馈位置) 和 MST (电机到位) 4 个变量。不断调节 SLPKP (位置增益)、SLVKP (速度增益)、SLVKI (积分增益)、SLSOF (低通滤波器)、SLAFF (加速度前馈) 使反馈速度不出现很大震荡, 稳态位置误差不超过设置的允许误差。

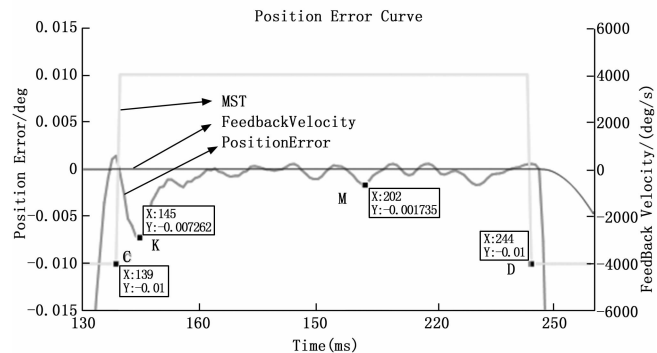
最终调试的电机的反馈位置—误差曲线如图 9 所示。从图 9 (a) 中得出, 反馈位置 H—F 段电机运动时间为 71 ms, 而 MST 曲线显示 D—E 段的实际定位时间为 84 ms, 二者的差值 13 ms 为整定时间。反馈位置曲线 G—H 段电机停留时间为 125 ms, 而实际检测到的到位停留时间 C—D 为段 85 ms, 这说明电机在加速运动以及减速停止时有较大的误差。



(a) 反馈位置—位置误差曲线



(b) 反馈速度—位置误差曲线



(c) 反馈速度—位置误差局部放大图

图 9 摆臂电机的速度环和位置环

电机的反馈速度—位置误差曲线如图 9 (b) 所示, 从图中可以看出电机的运动模型为三角形模型, 反馈速度曲线较为平滑且没有很明显的震荡, 速度最大值 F 点 $5\ 450\ \text{deg/s}$ 。MST 曲线上 B—C 段和 D—E 段定位时间均为 $85\ \text{ms}$ 左右。C—D 段电机定位完成, 有稳态误差, C—D 段电机定位完成后的误差曲线局部放大如图 9 (c) 所示, K 点稳态误差最大为 27 角秒 ($1^\circ=3\ 600$ 角秒), 并在 $10\ \text{ms}$ 后误差趋于稳定并维持在 10 角秒以内。

3) FRF 频域稳定性验证:

系统开环传递函数的 Bode 图如图 10 所示, 上图是幅频特性曲线, 下图是相频特性曲线。从图中可得, 在 $0\ \text{dB}$ 穿越点 (A 点) 的相位裕度为 32.1° , 在 -180° 穿越点 (B 点) 的幅值裕度 $15.6\ \text{dB}$ 。在截止频率为 $98.7\ \text{Hz}$ 时, 相位裕度大于 30° 。从相位图中可以看出在 $0\sim 30\ \text{Hz}$ 的低频段内摆臂电机有较高的增益, 因此摆臂电机的参数满足系统稳定性。

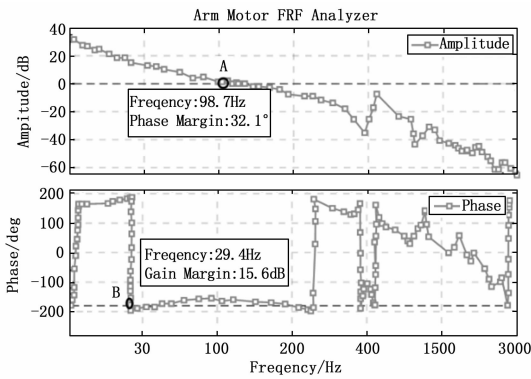


图 10 摆臂电机的 FRF 频域 Bode 图

以上以摆臂电机为例给出了电机 3 环调试以及频域稳定性验证的过程, 其它 7 个电机的调试过程和上述过程类似, 在此不再赘述, 最终调试结果如表 3 所示。

表 1 电机的运动时间和定位误差调试结果

电机	定位时间/ms	定位误差
吸嘴 12	30	30 Count
推顶器	25	30 Count
硅片 & 料片台 X	40	25 Count
硅片 & 料片台 Y	35	20 Count
摆臂	85	30 角秒

说明: $1\ \text{Count} = 0.5\ \mu\text{m}\ 1^\circ = 3\ 600$ 角秒

经测试 ZKMY—P10 型号 LED 分拣机设备的真空气压转换时间大约为 $10\ \text{ms}$, 根据 3.3 小节运动时序分析的公式 (1) 和公式 (7) 以及表 1 中电机运动时间的调试结果计算出单片分拣的周期在 $125\sim 130\ \text{ms}$ 左右。

5 连续分选测试结果

系统设计了两组实验, 分别对 $17 * 34\ \text{mil}$ 和 $10 * 20\ \text{mil}$ 两种不同大小的晶片进行 7 组连续分选测试。实验选取了

大约 $13\ 000$ 片晶片进行连续分选测试, 在实验过程中利用软件系统统计平均分选时间, 并通过摆放盘的晶片摆放情况统计晶片漏检数量, 最终的测试结果如表 2 所示。

从表格中数据可得, 测试不同数量分选的平均时间维持在 $130\ \text{ms}$ 以内, 分选的漏检率维持在为 1% 左右。在同一片晶圆片上相同等级的晶片物理位置基本是连续的, 当测试数量较少时, 硅片工作台单次移动的距离基本都是相邻晶片的间隔, 此时工作台移动时间小于摆臂运动时间, 因此平均分选时间小; 当测试数量较多时, 硅片工作台单次移动的距离变大, 当工作台移动时间大于摆臂时间时, 单次分选时间边长, 因此平均分选时间会比测试数量少的时候略长, 维持在 $130\ \text{ms}$ 之内。

表 2 连续分选测试结果

晶片规格		$17 * 34\ \text{mil}$		$10 * 20\ \text{mil}$	
测试数量	试验次数	平均时间	漏检率 (%)	平均时间	漏检率 (%)
50	10	123	0	121	0
100	10	125	0	122	0.63
200	8	123	1.25	124	0.63
300	6	129	2.12	125	2.12
500	5	124	0.80	124	2.50
1000	3	125	0.70	127	0.50
2000	2	130	1.00	129	1.25

国内使用较多的 LED 分选机的速度和定位精度如表 3 所示^[16]。ASM 的 MS100plus 型号分选机在速度方面还是有显著的优势, 跟国内的现有的设备相比, ZKMY—P10 分选机的平均分选速度略低但是有更高的定位精度, 这对未来分选尺寸更小的 Mini LED 晶片更有优势。

表 3 不同型号 LED 分选机的指标

设备厂商	设备型号	分选速度/ms	定位精度/mil
中电 45 所	DB—8002S	350	± 2.8
威控自动化	LS—368D	120	± 1.0
宇强光电	HS—200	100	± 1.5
ASM	MS100plus	85	± 1.5
ZKMY	ZKMY—P10	125	± 0.5

6 结束语

本文介绍了 ZKMY—P10 型号分选机的结构和分选实验平台, 分析了晶片分选流程, 结合现有硬件条件设计了分选过程各部分的运动时间和运动时序并在 SPiiPlus MMI 软件中调试电机的性能参数。设计了吸嘴和顶针接触式剥离拾取晶片的方案并利用 ACSPL+ 语言编写 8 个电机联动的运动逻辑代码。在基于 ZKMY—P10 型号的分选机实验平台下进行两种不同规格大小晶片的连续分选实验测试。

实验结果表明, ZKMY—P10 型号分选机的分选速度和定位精度和国内现有的设备基本持平, 虽然比国际上现有主流的 ASM 分选机的分选速度低, 但是在定位精度上更有

优势。因此, ZKMY-P10 型号分选机进一步的研发对目前国内半导体分选设备研发和工业化具有重要意义。

参考文献:

- [1] Wu T, Li B, Wang L W, et al. Analysis on mechanisms and performance of on-line angle correction in LED die sorting [A]. International Conference on Mechatronics & Automation [C]. IEEE, 2010.
- [2] 魏 康. 高速 LED 晶片分选装备高频运动系统柔性加减速规律研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [3] 王明松. LED 晶粒自动点测台系统研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2011.
- [4] Wang Ziyue, Gong Shihua, Li Delong, et al. LED chip visual servo positioning control under variable system parameters using adaptive dual rate Kalman filter with adaptive recursive least squares [J]. ISA Transactions, 2020, 103: 280-294.
- [5] Wang L, Li B, Wu T. Study on pre-correction method for LED chip declination in sorting system [A]. International Conference on Mechatronics & Automation [C]. IEEE, 2010.
- [6] SPiPlus MMI Application Studio User Guide [Z]. 2013.
- [7] Li X, Zhao H, Zhao X, et al. Contouring compensation control based on high accuracy contour error estimation for multi-axis motion systems [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93 (5-8): 2263-2273.

(上接第 115 页)

- [2] 张 垠, 朱彬若. 基于决策树群的多维电能表状态检验技术及其应用 [J]. 电子器件, 2018, 41 (5): 1191-1195.
- [3] 罗 群, 刘春雨, 张家安, 等. 智能电能表状态检验评价指标体系及在线平台开发 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (17): 94-99, 111.
- [4] 范小飞, 王 波, 田 园. 电子式电能表可靠性预计系统的研制 [J]. 电测与仪表, 2015, 52 (11): 15-19.
- [5] 纪 静, 侯兴哲, 陈 红, 等. 基于层次分析法的智能电能表软件质量评价 [J]. 电测与仪表, 2015, 52 (8): 5-9.
- [6] 巨汉基, 袁瑞铭, 丁恒春, 等. 智能电能表全生命周期质量评价方法研究 [J]. 2015, 52 (16): 55-58.
- [7] 王学伟, 陈景霞, 朱 孟, 等. 智能电能表的全系统模型及其动态误差分析 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (21): 6214-6222.
- [8] 张景元, 何玉珠, 崔唯佳. 基于多应力退化模型的智能电表可靠寿命预估 [J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43 (8): 1662-1669.
- [9] 张俊伟. 电子式电能表可靠性预测方法的研究 [J]. 电力大数据, 2018, 21 (8): 71-74.
- [10] 查国清, 黄小凯, 康 锐. 基于多应力加速试验方法的智能电表寿命评估 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41 (12): 2217-2224.
- [11] 姚 力, 章江铭, 胡瑛俊, 等. 智能电能表运行可靠性数据处理方法研究 [J]. 科技通报, 2018, 34 (10): 125-129.
- [12] 张蓬鹤, 肖成东, 薛 阳, 等. 基于 MATLAB/SIMULINK 的智能电表寿命预测仿真模型 [J]. 电测与仪表, 2014, 51

- [8] 田 蓓. LED 晶粒的自动分选技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2010.
- [9] Zhong F, He S, Li B. Blob analyzation-based template matching algorithm for LED chip localization [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2015, 1-9.
- [10] Wang Z, Gong S, Li D, et al. Error analysis and improved calibration algorithm for LED chip localization system based on visual feedback [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 9-12.
- [11] 张碧伟. LED 晶粒全自动分选机的开发研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2012
- [12] Gong S, Lu H, Zeng Z, et al. Vibration suppression of rotating arm in LED chip sorter using feedforward-feedback control with an optimal curve [J]. Precision Engineering, 2019, 56: 513-523
- [13] Zhang E, Miao X. Designation of laser rapid prototyping machine based on ACS motion controller [A]. Control & Decision Conference [C]. IEEE, 2016.
- [14] Xiao Wu. Research of LED Chips Positioning System [J]. Advanced Materials Research, 2013, 1512-1517.
- [15] 韩善果. 开放式精密激光切割数控系统研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [16] 褚金星. 面向排列精度的 LED 高速分选工艺及优化 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [13] 张 垠, 朱彬若, 顾 臻, 等. 关于智能电能表运行仿真试验及评价方法的探讨 [J]. 华东电力, 2014, 42 (10): 2038-2042.
- [14] 李翰斌. 基于失效率等级的智能电能表可靠性预计应用方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- [15] 陈喜峰, 王海滨, 徐人恒. 基于贝叶斯网络的智能电能表可靠性预计研究 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (23): 99-104.
- [16] 赵 阳, 高 强. 基于 Web 远程监控系统的设计实现 [J]. 自动化仪表, 2015, 36 (1): 31-36.
- [17] 张自雷, 等. 一种矿用低压 SVG 的 PWM 调制方法及其谐波分析 [J]. 煤炭与化工, 2019, 42 (11): 85-89.
- [18] 孙玉红, 张元科, 孟 静, 等. 基于纹理和草图的图像铅笔画绘制 [J]. 计算机应用, 2016, 36 (7): 1976-1980.
- [19] 王 云. 51 单片机 C 语言程序设计教程 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
- [20] 刘少军, 王瑜瑜. 基于 GPRS 的红外防盗报警器的设计 [J]. 国外电子测量技术, 2015, 34 (4): 81-85.
- [21] 刘 鹏. 移动 Web3.0 时代 AJAX 技术在个性化开发中的作用 [J]. 电子技术与软件工程, 2018 (22): 59-60.
- [22] 王宏旭. AJAX 技术及其在 WEB 应用程序开发中的应用 [J]. 硅谷, 2013, 6 (9): 77-78.
- [23] 徐进强. 浅谈 AJAX 技术在 WEB 程序开发中的应用 [J]. 电脑知识与技术, 2012, 8 (26): 6241-6242, 6252.
- [24] 游丽贞, 郭宇春, 李纯喜, AJAX 引擎的原理和应用 [J]. 计算机工程与设计, 2011, 32 (9): 205-207.