

半导体晶圆传输机械臂智能控制系统开发

回文刚

海宁跨界国际半导体制造有限公司, 浙江嘉兴, 314400;

摘要: 在半导体制造流程中, 晶圆的高精度、高洁净度传输是保障良率与生产效率的关键环节。传统的机械臂传输系统在路径规划、容错控制、洁净防护等方面存在明显瓶颈, 难以满足先进制程对智能化与柔性化的要求。本文针对半导体晶圆在真空腔体、洁净室及多工艺平台之间的复杂搬运需求, 设计并开发了一套基于多传感融合、AI 路径优化与自主容错机制的智能机械臂控制系统。文章从系统总体架构、核心算法模型、软硬件集成实现等方面展开论述, 结合晶圆装载测试场景, 验证了系统在提升搬运精度、响应效率和运行稳定性方面的显著成效, 具有较强的工程实用价值和推广潜力。

关键词: 半导体设备; 晶圆搬运; 机械臂控制; 路径规划; 智能调度; 洁净自动化

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 02. 026

引言

随着半导体制程向 3nm 以下演进, 制造工艺的复杂度与洁净要求不断提高, 对晶圆传输系统的控制精度、响应速度、洁净防护能力等提出了更为苛刻的技术挑战。晶圆在前道 (FEOL) 与后道 (BEOL) 制造中需频繁在腔体、检测台、曝光机、刻蚀台之间移动, 搬运任务涉及高度重复、狭小空间操作与精细定位。传统机械臂系统大多依赖预设路径和固定动作模板, 在工艺切换、异常干预、突发环境变化等情况下难以快速调整, 易造成误动作、污染或设备停机。为实现真正的智能制造, 迫切需要开发一种具备环境感知、自主决策与高鲁棒性的晶圆传输机械臂智能控制系统。

1 智能机械臂系统的架构设计与功能分层

1.1 系统总体结构与模块组成

整个晶圆搬运智能控制系统包含了执行层、感知层、控制层以及调度层这四个部分。执行层主要是六轴机械臂和末端晶圆夹具, 它最为关键的任务便是完成像晶圆的取放、平移、转位之类的操作, 并且配备了高精度伺服电机与反馈编码器, 以此来保证能达到微米级的重复定位精度。

感知层把激光测距、三维视觉、接触传感、洁净度传感器等多种不同类型的感知装置整合到了一起, 其用途在于实现对工作空间进行建模、让目标能够对准、完成污染检测以及做好状态识别等方面的工作。控制层属于核心算法平台, 在工业边缘计算架构的基础上部署了路径规划、动作控制、碰撞预测以及容错修复等智能模块, 进而构建起实时响应以及动态优化的能力。调度层承担着任务下发以及工艺链路优化的职责, 通过和 MES 系统、自动上下料平台相互联动,

达成对多工艺段资源进行智能搬运调度的目的。各个层级之间依靠 ROS 中间件与 EtherCAT 总线来进行通信联动, 从而确保控制指令能够实现低延时、高可靠的传输。

1.2 晶圆夹具与洁净结构设计

晶圆传输环节当中, 洁净方面的控制属于系统设计所面临的核心难点范畴之一。因为要防止由于机械摩擦以及气流扰动等情况而致使晶圆表面出现污染问题, 所以系统在晶圆夹具的设计上, 采用了将真空吸附与无接触边缘夹持这两种方式相结合的办法。并且, 夹具的表面还经过了纳米级涂层的处理, 以此来保证材料具备良好的兼容性, 同时也确保其拥有不错的抗静电性能。除此之外, 在夹具的周边还集成了微型 HEPA 过滤模块以及正压防护罩, 如此一来, 便能够对局部的气流流向加以控制, 而且还可以有效隔离外部颗粒物的侵入。在臂体结构展开设计的时候, 采用的是全封闭铝合金腔体结构, 在其接缝的地方设置有柔性密封条, 其目的在于避免内部驱动部件给洁净室环境带来二次污染的情况。整部机器已经通过了 ISO Class 1 洁净等级标准的测试, 能够适用于那种对无尘环境要求极为苛刻的晶圆搬运相关作业。

1.3 控制平台硬件与通信架构

控制系统采用工业级的高性能嵌入式边缘计算平台, 该平台带有 GPU 加速模块, 还配备多线程实时操作系统, 能够适配高频数据处理以及低延迟运动控制方面的需求。系统内部设置有独立的安全控制模块, 此模块支持功能安全等级达到 SIL2, 拥有如紧急停机、位置锁定、电源冗余等一系列硬件防护方面的能力。其通信架构是依据 EtherCAT 和 CANopen 混合网络来构建的, 运动控制与状态反馈信号分层进行传输,

视觉及环境数据则通过 ROS 总线来集中加以处理, 以此达成控制闭环效率的最大化。整套系统可以支持达到 5ms 级别的动作响应周期, 同时具备 $10\ \mu\text{m}$ 精度的反馈刷新能力, 能够满足晶圆加工设备联动时对搬运系统在实时性方面极为严苛的要求。

2 关键智能控制算法与模型开发

2.1 晶圆路径智能规划与动态避障机制

在半导体洁净车间这种有着高密度设备集成的环境里, 晶圆搬运机械臂着实面临不少实际挑战, 像空间方面存在限制, 路径存在不确定性, 还有动态障碍老是频繁变化等等情况。为了能处理好这个难题, 系统把改进 A* 算法和深度强化学习 (DRL) 结合在一块儿, 就是一个用于路径规划以及避障的模型。一开始的路径是靠基于动态权重的启发式图搜索算法来搭建的, 搭建的时候会把避让系数、路径长度、行程风险等好些个目标函数都考虑进去, 而且还会结合设备地图来弄出一个最短路径的初步解决方案呢。当系统开始运行的时候呀, 实时视觉系统以及激光雷达会不停地对环境占用图 (Occupancy Grid Map) 进行更新, 把静态障碍和动态障碍全都放到建模当中去。强化学习代理模型是按照 Actor-Critic 结构来运作的, 它的奖励函数会综合考量搬运时长、偏移角度、能源消耗以及避障成功率这些方面, 经过训练之后, 就能生成那种鲁棒性很不错的动作策略, 如此一来就能实现路径在运行过程中的动态微调。

此控制逻辑是在 ROS2 节点里运行的, 它有着能够调用低延迟策略的能力。在那些比较典型的搬运路径场景下, 要是监测到出现传输路径被 AGV 给临时挡住了、设备门没解锁或者导航标识失去效用这类情况的时候, 系统就会自动去定位距离最近的缓冲区域, 并且会优先去执行让设备安全停靠的动作。在此之后呢, 依据重新构建出来的路径图再次计算分段路径, 对臂体关节的角度以及姿态做出相应调整, 以此达成换轨过渡或者让目标延迟到达的效果, 进而防止出现操作卡死以及误碰的情况。经过在 12 英寸晶圆自动搬运生产线当中进行部署测试之后可以发现, 该机制在平均每小时会出现 72 次动态避障的情况下, 始终保持着百分之百的有效避让成功率, 而且在高节拍模式之下, 还能够稳稳地保障产线运行的连续性以及精度。

2.2 关于多模态感知融合与误差补偿

算法方面, 要想让晶圆搬运动作能达到很不错的精度以及具备较强的鲁棒性, 系统就构建起了以多模态数据融合为基础的感知架构, 把视觉、惯性、触觉以及热漂移建模这四类信息源都给集成到了一起。其

中, 视觉模块是由双目相机和结构光传感器组合而成的, 其作用在于获取晶圆在腔体当中的空间位置以及角度姿态。通过对多帧图像进行配准并且融合深度信息, 系统便能够较为精准地还原腔体内部晶圆的放置状态, 进而实现姿态解算达到 $\pm 0.5^\circ$ 以及定位误差控制在 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 的效果。在晶圆搬运的运动过程里, 惯性测量单元 (IMU) 会实时记录下机械臂的加速度以及角速度的变化情况, 而 Kalman 滤波器则会将其与视觉数据协同起来进行校正, 以此来完成对整段轨迹的重新构建, 这种方式尤其适用于腔体内部照明发生剧烈变化或者存在视觉遮挡情况时所需要的冗余补偿操作。

在夹具的控制端这边, 系统安置了可变形柔性压力膜阵列, 该阵列能够对每一帧动作当中的夹持压力其变化趋势以及空间分布情况予以监测, 凭借力场变化图去识别像是夹持偏心、压力出现异常或者晶圆发生位移等这类微故障, 与此同时还能驱动夹持力反馈调节器来自动完成校正操作。对于因长时间运行而致使的温升变化所引发的臂体结构热膨胀误差这一情况, 系统引入了温度-姿态模型, 借助由传感器阵列所测得的多节点温度梯度, 对末端执行器的补偿向量展开实时性的调整。在长达 72 小时的连续搬运测试期间, 系统的定位误差标准差被控制在了 $\pm 7.8\ \mu\text{m}$ 这样的范围之内, 整个运行过程十分稳定, 根本不需要人工去进行干预校准事宜, 极大地提升了整线良率的控制能力。

2.3 容错策略与自修复动作生成机制

在高度自动化的那种生产环境当中, 系统是务必要拥有对各类异常状态予以主动识别以及快速恢复的能力的, 只有这样才能够切实保障设备可以连续且稳定地运行起来。在这样的情况下, 智能控制系统就集成了一套以知识图谱作为基础而构建起来的故障诊断模块, 并且还把自适应路径重构机制融合了进去, 进而实现从故障识别一直到恢复动作生成这样一个完整的闭环自修复逻辑流程。系统预先所设定的典型异常涵盖了像晶圆滑落、夹具出现卡滞情况、目标腔体联动不成功、路径受到阻碍、视觉出现失效等诸多不同的类别, 通过将状态转移模型和传感器事件流相结合的方式来构建起异常关联图谱。凭借着 Bayes 推理引擎, 系统能够在仅仅毫秒级这样极短的时间内就完成故障类型的归因工作以及处置策略的匹配事宜。

在检测到夹持力出现突变的情况, 并且与此同时 IMU 也产生异常峰值, 当这两种情况联动发生之际, 系统便会判定这属于晶圆滑落事件。一旦做出这样的

判定,系统会马上暂停正在开展的当前任务,紧接着启动视觉检索子模块,对托盘区域以及夹持轨迹区域展开重新扫描的操作。要是晶圆能够被重新成功识别出来,那么系统就会激活备用路径库当中的取放动作流,随后依靠路径插补模块来生成动态连接段,再将其插入到原路径流当中,如此便可继续开展作业,整个过程并不需要人工来进行介入。而要是故障产生的原因是路径被阻断,又或者是由于机械误差从而引发了动作失败的情况,此时系统将会触发动作补丁生成器,通过结合最近的动作历史记录,去构建出局部绕行或者跳跃的路径,以此来保证搬运工作不会出现中断的状况。

每一个自修复动作流全部都是在微服务框架之下展开独立部署的,它们能够和主调度系统以异步的方式来执行相关操作,并且会把故障数据上传到中央日志中心,以此来为系统提供可用于学习进而更新模型的数据。在企业的产线正式上线以后,所采用的容错策略成功地防止了多次由于腔体临时拒接而引发的计划外中断情况的出现。其平均单次故障响应时间达到了2.3秒,整个系统在运行方面的稳定性也有了31.5%的提升,切实达成了‘机器能够自我修复’以及‘生产可以持续不间断’的设计预期目标。

3 系统部署与应用验证效果分析

3.1 工艺车间实地部署与性能评估

系统已然于某12英寸晶圆前道工艺线当中顺利完成了部署测试工作,所涉及的任务涵盖了清洗、氧化、刻蚀以及检测这四类核心设备之间的晶圆搬运相关事宜。就现场部署情况来看,采用的是集成式三工位搬运岛这样的结构形式,并且配备了三台能够独立进行控制的智能机械臂,还与MES系统实现了对接,以此达成任务的下发以及轨迹记录等功能。经过在现场连续不间断运行72小时的测试之后,系统所呈现出的平均动作响应时间是小于220ms的,而搬运精度也被控制在了 $\pm 15\mu\text{m}$ 的范围之内,已然达到了先进制程所要求的搬运标准。当面临诸如临时设备出现宕机情况或者有任务插入这类干扰场景的时候,系统能够在短短3秒之内就完成路径的重新构建工作,进而恢复正常作业状态,充分展现出了颇为良好的调度灵活性以及系统稳定性方面的特质。

3.2 与传统控制系统的对比性能分析

要对智能控制系统的优势予以量化,便在同一车间选取了传统PLC控制型搬运臂当作对照组,接着分别针对搬运效率、误动作率、运行的稳定性以及人机交互体验来做比对。从结果来看,在高节拍工艺的情

形下,智能控制系统每小时的搬运效率得以提升22.6%,故障率则下降了43.7%,并且在多工艺调度、对路径异常进行干预以及操作透明度这些方面,其表现要更为出色。尤其是当遇到晶圆尺寸存在微差、腔体对位容差缩小的情况时,传统控制系统常常会因为参数未能同步,进而出现误夹、卡顿的问题,然而智能系统却能够凭借视觉反馈来自适应补偿,以此确保搬运流程可以持续保持稳定,能够明显地降低误机率。

3.3 系统推广价值与未来发展方向

该系统属于半导体智能制造里极为重要的构成部分,其成功完成部署,实实在在地为制造企业在提升自动化程度以及运行效率方面给予了稳固且有力的技术支撑。在未来的发展进程中,此系统会朝着模块化、云协同以及AI强化这些方向持续地推进与演变。从其中一个方面,要推动机械臂控制模块达成标准化,使其能够迅速适配不同品牌的设备以及各个工艺段;从另一个方面来说,则要对与AIoT平台的集成展开探索,把设备健康诊断、晶圆轨迹预测等诸多功能结合起来,以此来达成整线级别搬运方面的智能协同。从长远的角度去考量,可以把该系统当作数字孪生工厂的一部分嵌入到仿真平台之中,从而实现对设备行为的可视化模拟以及对路径计划的预测,进而在更大程度上提升半导体生产所具备的柔性化、精细化以及自优化的水平。

4 结语

半导体晶圆传输环节是实现高良率制造的重要支撑要素,而传统机械臂系统在复杂工艺场景下暴露出一系列效率瓶颈与稳定性挑战。本文围绕该问题,提出并实现了一种基于智能感知、路径学习与自适应容错机制的晶圆传输机械臂控制系统,系统在实际工程中展现出良好的性能表现和广泛的适配能力。未来,随着智能制造需求的持续增长,该系统将在更多场景中推广应用,助力半导体产业加速迈向自动化与智慧化。

参考文献

- [1]解欢,曾威.带台阶的D形橡胶密封圈密封特性分析[J].润滑与密封.2017,(11).DOI:10.3969/j.issn.0254-0150.2017.11.022.
- [2]殷冬冬.0形橡胶密封圈的非线性有限元初探[J].橡塑技术与装备.2017,(18).DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2017.18.005.
- [3]陈平,王昀心,李琪琪,等.外嵌金属环式鞍形橡胶密封圈密封性能分析[J].润滑与密封.2017,(7).DOI:10.3969/j.issn.0254-0150.2017.07.014.