

国产半导体装备自动化改造的系统集成方法论

夏家奇

海宁跨界国际半导体制造有限公司，浙江嘉兴，314400；

摘要：随着“国产替代”战略的持续推进，半导体产业链上游的国产装备正在快速发展。然而，面对高精度、高稳定性、高洁净度要求的现代半导体工厂，国产装备在自动化、柔性化、智能化水平上仍存在一定短板，难以直接匹配现有工艺流程和工厂管理系统。本文聚焦于国产半导体装备的自动化改造，提出一种系统集成的方法论框架，涵盖控制架构标准化、通信协议融合、设备智能升级三个核心层面，系统分析改造路径与关键技术，结合实际案例探讨可行性和成效，以期为半导体制造环节中的设备国产化与系统集成提供理论参考与工程支撑。

关键词：半导体装备；自动化改造；系统集成；国产化；设备互联；智能制造

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.056

引言

近年来，全球半导体供应链正经历重构，中国作为全球最大半导体消费市场，推动本土制造能力自主可控已成为国家战略重点。国产半导体装备在关键技术、产品种类和工程可靠性方面不断突破，但在实际应用中仍需通过系统集成和自动化能力的提升，才能更好地融入大型晶圆厂的生产节拍与管理体系。因此，构建一套适用于国产装备自动化改造的系统集成方法论，已成为当前行业亟待解决的技术难题。本文围绕“标准统一、通信融合、智能升级”三大核心路径，探讨在不同层级、不同设备类型中的集成策略与实施细节，并结合典型工程项目，提供改造技术路线和评估方法。

1 控制架构的标准化适配路径

1.1 控制器接口与运行平台统一

国产设备制造商于开发期间常常会运用多种 PLC 平台、嵌入式控制器以及自主操作系统，如此一来，工厂级控制系统要达成统一管理便存在困难。在改造之际，可采用标准化的开放式控制架构，就像依据 IEC 61131-3 编程标准所打造的软 PLC 那样，将上位机与下位机的指令接口以及数据结构予以统一。当进行系统集成之时，借助配置通用 API 的方式，让各类设备控制逻辑能够实现模块化，达到可调用的状态，并且使其适配主流的 MES、SCADA 平台，进而实现跨设备的指令下发以及数据回流。

1.2 执行逻辑与状态机建模模块化

为了降低由于控制逻辑方面不一致而引发的调试以及维护方面的复杂程度，应当把设备的运行流程给抽象成为状态机模型，这里面涵盖了像‘初始化、待命、

运行、故障、关机’等一系列通用的状态节点。在每一个节点之下还设置有子流程，并且赋予其统一的语义，以此来达成可视化建模以及运行可追溯的目标。与此同时，借助模型驱动工程（MDE）的方法，对设备之间的流程继承、复用以及调整予以支持，进而使得系统整体在可维护性以及扩展性这两方面都能够得到提升。

2 通信协议融合与互操作平台构建

2.1 多协议设备适配机制设计

当下国产半导体装备于研发以及工程化进程当中，形成了多源通信协议同时存在的状况。从以往传统的 RS485 串行接口、MODBUS RTU 协议，一直到诸如 EtherCAT、Profinet 这类新型工业以太网协议，再到 CAN 总线、CC-Link 等等协议，这样的“协议碎片化”情形，一方面使得系统集成的困难程度有所增加，另一方面还极大地抬高了后期维护所需成本以及联调方面的门槛。在针对系统集成展开改造的时候，务必要构建起一种统一的协议适配机制，其关键之处在于引入具备可扩展性的通信中间件层，借助驱动适配、协议封装以及数据抽象等操作，把底层运用多种协议的设备全部统一转化成标准的数据格式，比较推荐采用以 OPC UA 作为核心的信息模型封装手段。

在驱动适配层这边呢，系统得要能够支持动态地加载驱动插件，以此来达成兼容异构设备的目的。特别是针对那些老旧设备呀，可借助边缘转换器模块来开展协议桥接方面的工作，好让这些老旧设备也能够拥有现代通信的能力呢。而在协议抽象层那里，得去设计一种相对中性化的数据描述的方式，要对设备的运行状态、工艺参数以及控制命令等等这些内容来做统一的抽象处理，进而实现所谓“设备即服务”（Device-as-a-Serv

ice) 这样的互联接口。在这样的架构之下呀, 半导体工厂就能够实现针对国产设备的那种即插即用式的集成操作了, 还能够形成平台级别的设备资源池呢。并且呀, 它还可以支持未来新设备快速地上线、自动完成注册以及进行集中管理等一系列的操作, 如此一来呢, 就能够有效地打破通信标准方面存在的壁垒, 对整厂的集成效率以及运维能力起到提升的作用啦。

2.2 OPC UA 统一建模与设备数字孪生映射

OPC UA 乃是国际标准的工业互联协议, 其不光有着不错的跨平台兼容性以及安全机制, 它面向对象的信息建模能力同样给设备的数字化表达给予了结构化的根基。在开展自动化改造工作之时, 要把 OPC UA 模型当作蓝本, 针对每一台国产设备去构建完备的信息表达体系, 这一体系要包含设备的诸多方面, 比如其物理特征, 像设备 ID、尺寸、功耗这些; 还有动态属性, 像是状态码、运行时间、温湿监控等情况; 以及控制命令, 像启动、停止、复位之类的; 再加上报警信息, 例如故障码、报警优先级、时间戳等内容。该模型可不单单是设备层与系统层之间进行通信的桥梁, 它更是数字孪生体的核心映射单元, 能够达成设备物理实体和其虚拟模型二者之间的实时同步状态。

在实际开展部署工作的时候, 以 OPC UA 来进行建模的设备数据能够直接接入到数字化工厂平台之中。通过和 MES、SCADA、LIMS 等这类系统达成集成的关系, 进而实现场景层级的数据联动效果。如此一来, 便能够支持操作员借助可视化仪表盘来对设备状态展开实时的监控工作, 而且还可以依靠历史数据分析模块去开展诸如产能趋势预测、故障根因溯源、能耗异常定位等等一系列的智能决策方面的操作。另外, OPC UA 模型自身所具备的层级结构特性, 让它天然就和边云协同架构十分适配。在边缘端可以完成初步的数据处理工作以及模型实例化的相关操作, 而在云端则能够开展高阶建模以及全局调度方面的工作, 通过这样的方式, 最终构建起以数字孪生作为核心的弹性生产控制系统。

2.3 多系统集成的时序与同步控制机制

半导体工厂开展自动化生产之际, 对于时间精度以及多设备同步协同方面, 着实提出了相当高的要求。特别是在像晶圆传输、对位、检测以及后工艺处理这些区域, 它们有着高节拍、高洁净度的要求, 在这些地方, 哪怕仅仅是微秒级的动作出现了偏差, 都极有可能致使产品良率下滑, 或者使得设备出现异常停机的状况。要想满足这样的需求, 那么在系统集成过程当中, 就有

必要去构建一套以高精度时钟同步作为核心的多系统调度控制机制。比较推荐的做法是采用 IEEE 1588 精密时间协议 (PTP), 依靠它在整个工厂范围内构建起统一的时间基准, 进而达成多设备之间毫秒级甚至微秒级的同步控制。而在执行层面呢, 边缘控制器得具备软实时调度的能力, 以便针对设备动作指令、信号响应以及工艺反馈等内容来展开动态的时序管理工作。

在通信这一层面, 得凭借分布式缓存机制来对跨网段或者跨协议的数据一致性以及流量调控加以协调, 要保证哪怕是处在高并发的场景之中, 那些关键的控制命令也依然能够稳稳当当地得以执行。并且, 为了去应对高频交互场景下所出现的数据碰撞还有延迟方面的问题, 可以选择在边缘网关上布置基于事件驱动的异步调度引擎, 借助它来达成各类国产设备相互之间的逻辑联动以及软硬件协同操作的目的。整个控制系统是要能够支持可配置的同步策略的, 以此来契合不同工艺段对于动作同步、工艺联锁、过程保持等多个维度的需求, 进而构建起一个既稳定又高效还具备可扩展性的协同控制平台。

3 设备智能化升级与运行优化策略

3.1 感知单元升级与边缘数据处理

在早期阶段, 由于受到成本控制方面的限制, 再加上系统成熟程度还不够高, 一部分国产半导体设备在感知能力的设计环节出现了一些问题, 具体表现为冗余度比较低, 传感器的部署不够密集, 显得较为稀疏, 而且反馈路径也存在滞后的情况。如此一来, 便对这些设备在复杂环境当中的实时响应能力以及和系统联动的能力都产生了影响。若要提升这类设备的智能化水平, 那么自动化改造工作就得围绕‘感知增强’以及‘边缘处理’这两个方向的策略来开展。首要的举措就是增设通用且标准化的感知模块, 比如可以运用工业级摄像头来进行物料识别以及对位检测方面的工作, 利用 MEMS 传感器去采集震动与位移方面的相关数据, 还可以通过红外传感器以及超声传感器对温湿气流的各项参数展开监控等等。

为了能够降低中心系统所承受的负荷, 对于这些感知数据而言, 应当优先在本地的边缘节点完成预处理的操作, 并且要结合数据压缩、滤波以及聚合等相关算法, 把无效的数据给过滤掉, 只将那些关键的指标以及报警事件上传到云端。除此之外, 边缘网关还需要集成 AI 加速模块, 并且部署一些诸如图像识别、异常轨迹分析、声音频谱判定之类的轻量型推理模型, 以此来实现毫秒

级别的响应以及自闭环反馈。借助‘边缘自治’加上‘中心调度’这样的多层感知架构,便能够在很大程度上提升设备的运行透明度以及响应的敏捷性,进而为接下来的智能决策以及预测维护工作提供高质量的数据支撑。

3.2 运维诊断模型构建与预测性维护

在实际的应用场景当中,设备突然出现故障的情况常常会变成影响产品良率以及产能稳定的一个主要的潜在隐患。去构建那种依靠数据来驱动的智能诊断以及预测性维护方面的机制,这可是让设备能够从以往的‘被动修复’状态转变为‘主动预警’状态的极为关键的一个环节呀。系统所集成的平台是可以凭借设备在运行过程里的多维度数据来开展相关工作的,这里面的数据包含像电机电流、控制电压、轴承震动、工作时候的温升、气压的流速、故障发生的频率等等一系列的参数,通过这些来构建起一个统一的运行健康指标体系。接下来再引入诸如随机森林、XGBoost 或者 LSTM 时间序列模型这样的机器学习算法,利用它们对历史的运行数据展开相应的训练操作,从中提取出在故障发生之前的那些典型的模式,进而达成对异常状态提前做出预判的目的。

通过多台设备之间进行横向的对比并且建立起相应的模型,还能够发现同一类别的设备在不同的工作工况之下所存在的性能方面的差异,以此来指导关于维修优先级的排序工作以及部件更换方面的策略制定。平台是应当要具备持续学习的能力的,能够自动地对模型的参数进行更新处理,以此来提升诊断的精准程度以及泛化方面的能力,防止出现‘过拟合’或者‘漏判’这样的情况。最终便能够形成一套集成在边缘与云端协同运作的运维系统,支持管理人员在工厂的大屏上面、移动终端之中或者故障工单系统里及时地获取到预测出来的相关信息,并且能够据此采取对应的干预措施。

3.3 基于 AI 的工艺参数自适应调整

半导体制造最为关键之处就在于要对那复杂的工艺窗口予以精准的把控,不同批次的原材料情况、环境方面出现的扰动以及设备的老化等,均会导致出现虽然微小但却极为致命的工艺偏移状况。以往那种依靠人工经验来对参数进行调整的方法,存在着效率不高、响应迟缓以及波动幅度较大等诸多问题。所以呢,经过自动化改造之后的设备,应当搭建起基于人工智能的工艺能够自适应调整的相关机制,以此来达成工艺过程得以持

续优化的目的。系统会针对多工艺段所产出的结果展开采集与分析工作,像是晶圆成膜的厚度、掺杂的均匀性、蚀刻的深度以及表面缺陷率等一系列指标,再结合 AI 建模的方法来构建起工艺参数和品质指标两者之间所存在的映射关系。

运用回归类的模型(比如神经网络、SVR)去开展预测活动,并且通过强化学习或者贝叶斯优化算法,在在线的状态下去寻觅最为合适的参数组合,进而实现对每批次工艺进行动态调整的要求。这种机制能够在不影响主控逻辑的前提条件之下,以辅助的模式来运行,当检测到有批次漂移的趋势出现之后,便会自动地推荐参数调节的策略,待工程师确认之后再实施。与此同时,系统还能够结合设备运行的相关特征,对工艺稳定性波动的源头加以判断,从而为工艺工程师提供追寻原因的依据,这样一来,便能够在确保质量的前提之下,将良率和产能最大化,推动生产节拍朝着智能闭环优化的方向发展。

4 结语

在全球半导体供应链日益复杂、地缘政治风险频发的背景下,提升国产半导体装备的自动化与系统集成水平已成为保障产业安全的核心环节。本文从控制架构标准化、通信协议融合与设备智能化升级三方面,构建了国产设备自动化改造的方法论框架,旨在解决现阶段国产装备在集成适配中的关键难题。未来,应加强软硬件协同开发、跨企业标准共建与平台化集成技术研究,推动国产装备更高效、更安全地融入世界一流半导体工厂的自动化体系中。

参考文献

- [1] 李天奎,冷卫杰,苏志军. 多媒体通信与自动化控制集成通信的关联[J]. 中国宽带,2025,21(02):148-150. DOI:10.20167/j.cnki.ISSN1673-7911.2025.02.50.
- [2] 杨建明. 集成电路技术在自动化控制系统优化中的应用[J]. 集成电路应用,2025,42(01):44-45. DOI:10.19339/j.issn.1674-2583.2025.01.016.
- [3] 肖振华. 电气自动化系统的信息化集成与智能控制技术研究[J]. 中国信息界,2024,(08):219-221.
- [4] 汪琦. 集成电路验证自动化现状及展望[J]. 软件和集成电路,2024,(08):2-7. DOI:10.19609/j.cnki.cn10-1339/tn.2024.08.002.
- [5] 温杏. 持续集成中自动化测试的设计与实现[J]. 无线互联科技,2024,21(09):72-74.