

# 半导体智能工厂的 IT-OT 深度融合系统架构设计

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：**随着半导体制造复杂度和精密度不断提升，传统以信息系统（IT）与运营技术（OT）相互割裂为特征的工厂管理模式已难以支撑对工艺稳定性、产能弹性、资源优化和智能决策的综合需求。实现 IT-OT 深度融合，构建一体化的智能工厂系统架构，已成为半导体企业推动精益制造、柔性协同与智能化运维的关键路径。本文围绕半导体行业高洁净度、高精密度、高节拍制造的特殊需求，探讨了 IT 系统与 OT 系统融合的核心挑战，提出了“边缘控制-中台协同-云端治理”三层联动的融合架构模型，并详细阐述了数据贯通、标准化接口、统一模型驱动等关键技术路径。通过结合实际场景与系统构建案例，验证该架构在支持工艺优化、质量追溯、设备预测性维护及智慧决策等方面的显著价值。

**关键词：**半导体制造；IT-OT 融合；系统架构；智能工厂；MES；边缘计算；工业数据平台

**DOI：**10.64216/3080-1508.25.02.050

## 引言

在智能制造发展理念推动下，半导体工厂迫切需要构建从设备控制到生产计划、从工艺调度到质量分析的一体化架构，实现“感知—传输—理解—决策—执行”闭环运行。而这一愿景的实现，必须打破 IT 与 OT 之间的技术壁垒，建立一个统一标准、统一平台、统一数据模型支撑的融合体系。本文结合半导体生产线工艺流程、设备类型、数据复杂性与管理要求，提出一套基于多层分布式协同的融合架构模型，并从平台构建、关键技术、系统联动等方面展开分析，为半导体智能工厂构建提供可行路径与方法参考。

## 1 IT-OT 融合背景下的半导体工厂需求重构

### 1.1 半导体制造场景对系统融合的核心挑战

在全球制造业领域，半导体工厂当属自动化程度颇高且洁净标准极为严苛的工业场景之一。其生产过程中汇聚了高度精密的诸多设备，同时工艺流程也是复杂多样的。生产流程起始于硅片的原始制备阶段，而后要历经数百道工序，像光刻、刻蚀、化学气相沉积（CVD）、物理气相沉积（PVD）、离子注入、抛光（CMP）以及清洗等等，如此才能够完成前段晶圆制程。而中段的探测环节以及后段的封装测试环节，对于控制精度、环境参数的稳定性还有流程的同步性等方面，均提出了相当高的要求。在各个阶段，针对温湿度、静电释放（ESD）、气流扰动、设备振动，甚至是空气分子污染等情况，都设有极为严格的管控标准。正是这些要求的存在，使得生产现场需要布置大量的自动化设备以及传感器设备，以便开展数据采集工作并能做出实时响应。与此同时，各核心装备，诸如 ASML 光刻机、LAM 刻蚀设备、TEL 清洗设备等等，通常来

讲都是高度闭源的系统，它们具备独立的通信协议、定制化的控制逻辑以及自主诊断模块，并且这些系统之间缺乏通用的数据互通标准。

在同一时间里，为了能够保障像制造管理、订单交付、质量控制以及资源调度等等这些上层的运营管理方面的各项功能得以有效实现，半导体企业在自身的运营过程中，普遍地去部署像 MES 也就是制造执行系统、ERP 即企业资源计划、QMS 也就是质量管理体系、WMS 即仓储管理系统等等一系列的业务级 IT 系统。这些业务级 IT 系统呢，它们需要从生产现场去收集大量的生产数据，这些数据包含了诸如设备状态、工艺参数、良率指标、运行日志等等方面的内容，其目的就是为了可以达成像实时调度、报警联动、质量追踪等等这样一些功能。不过呢，设备层和管理层这两个层面在协议标准、数据结构、时间精度、逻辑控制等等诸多方面存在着极为巨大的差异，这就使得 IT 系统想要获取 OT 系统所产生的那种高频的、实时的且结构还很复杂的数据流变得极为困难，与此同时，OT 系统也没办法去察觉到 IT 系统针对业务所做出的那种动态调整方面的需求。最终呈现出来的状况就是设备在运行的时候是处于一种相对孤立的状态，各个系统之间的协同效率十分低下，数据呈现出严重的碎片化情形，管理层很难去构建起从生产现场一直到经营管理这样一个完整的闭环控制体系，而这就成为了限制半导体实现智能化升级的最为关键的核心瓶颈所在。

### 1.2 IT 与 OT 系统角色分工与融合趋势演进

在传统的制造架构里面，OT 系统向来是被当作是“生产过程的神经系统”来看待的。这里面包含了像 PLC（可编程控制器）、DCS（分布式控制系统）、S

CADA（监控与数据采集系统）以及 HMI（人机界面）等等这些部分。它最为核心的职能，就是要确保设备能够依照工艺逻辑，安全并且高效地运行起来，同时，对实时性、鲁棒性以及容错性这几个方面也极为看重。IT 系统更多的是充当着“企业运营的大脑”这样一个角色。它所涉及的范围涵盖了订单处理、生产计划、人员管理、数据分析还有经营预测等等诸多的维度。并且它所追求的是标准化、结构化、流程导向以及智能化这些方面。从功能边界的角度来讲，这两者它们的服务对象以及技术路径在很长的一段时间里都是各自分开、并行着去发展的，最终就形成了那种“各自为政”的这么一种状态。

然而，伴随着物联网（IoT）、工业以太网、5G、TSN、云计算、边缘计算等新一代信息基础设施不断快速走向成熟，IT 系统渐渐拥有了和现场展开实时互动的能力，其不但能够从 OT 系统那里获取到原始数据，而且还能够参与到流程控制当中，还能进行策略的下发以及实现和模型的联动，这种融合能力将会直接对智能工厂建设的成败起到决定性作用，进而成为未来工厂建设环节里的一项基础性工程。

### 1.3 半导体智能工厂系统融合的目标框架

要达成从现场感知一直到企业运营全链路的数字化这一目标，半导体工厂在 IT 与 OT 融合这个层面上，应当去构建具备‘统一数据模型、统一服务平台以及统一调度逻辑’这样特点的系统目标。具体来讲涵盖了如下几个方面：首先得要实现针对制造设备的全方位数据采集工作以及对其状态的感知，进而构建出实时的设备健康画像；其次呢，要凭借标准化协议以及中台所具备的能力，促使 OT 设备和 MES 等 IT 系统实现低耦合式的互联；再者，需要打通从排产计划、工艺流程一直到工位执行的指令路径，以此来实现跨层级的协同作业；然后，要构建起统一的数据中台以及工业模型，让多源数据能够实现标准化处理并且达到可视化呈现的效果；最后，借助 AI 以及规则引擎的力量，实现工艺预测方面的优化、异常情况的预警以及为决策提供辅助，这样一来便可促使工厂在交付能力、质量管理以及能效优化等诸多方面实现综合层面的跃升。

## 2 融合架构体系与关键技术构建路径

### 2.1 多层协同的融合系统整体架构设计

为契合半导体制造呈现出的高度离散化特点，还有设备专业化以及控制复杂化这些特征，本文推出了以“边缘控制—中台协同—云端治理”作为核心要点的 IT - OT 融合系统所具备的三层架构形式。在边缘这一层面当中，会去布置工业边缘网关、嵌入式采集

器以及边缘 AI 模块，依靠它们来完成针对设备层数据展开的协议解析工作、在边缘进行的预处理操作以及针对异常事件所做的初步判断事宜；在平台层面呢，要着手建设起统一的数据中台以及工业服务总线，将来自 PLC、SCADA、MES、QMS 等诸多不同类型系统的数据汇聚到一起，以此达成数据的标准化、使其能够实现建模化并且可以进行共享；而在云端治理层面上，则会部署大数据仓库以及 AI 模型平台，以此来为设备生命周期管理、能效分析、排产优化以及质量闭环管理等一系列功能模块提供有力支撑，进而实现从“采集—分析—优化”这样一个完整的价值闭环过程。与此同时，该系统会凭借工业总线（比如 OPC UA、MQTT、Modbus TCP）以及 RESTful API 的方式来让横向异构系统实现相互连接，从而保证数据能够顺畅地流动起来，确保服务具备可插拔的特性，也让平台拥有可扩展的能力。

### 2.2 工业数据建模与实时总线技术方案

在 IT 与 OT 相融合之际，要让来源于不同地方、有着不同频率以及不同语义的数据实现统一建模，这可是极为关键的前提条件。系统会着手去构建那种面向设备、工艺还有任务的多维数据模型，把标签命名规范以及元数据格式都给统一起来，进而形成从设备级到工艺级再到产线级的数据图谱架构。凭借着这样的模型，中台就能够达成对数据的聚合分析以及多维映射，以此来为指标监控、状态预测以及流程驱动等处于上层的应用提供有力支撑。在实时通信这个方面，系统会采用那种有着低延迟且高吞吐特性的工业消息总线，如 Kafka Stream 和 OPC UA 混合而成的结构，从而保证像温控反馈、流量控制以及启停信号这类高频数据能够以毫秒级的速度推送至 MES 或者调度系统，与此同时，还能保障像维护日志、能耗报表这样的慢变数据可以进行批量上传，并且在查询的时候能有相应的响应。

### 2.3 边缘计算与 AI 能力的嵌入式融合策略

考虑到半导体设备存在响应时延要求颇高以及工艺容忍度偏低这样的实际状况，系统把 AI 推理模块下移至边缘一侧，以此达成‘就近处理’的效果，同时还构建起涵盖模型下发、策略配置以及反馈验证等环节的闭环机制。边缘节点拥有多路采集的功能，并且能够实现多模型共存，还具备容错切换的能力，其能够对图像进行识别从而完成缺陷检测，也能针对传感数据开展预测以实现参数漂移预警，还可进行工艺优化来完成实时策略调整等诸多能力。在平台层面，AI 模型平台主要负责实现集中训练以及策略管理方面的工作，借助模型生命周期管理机制来保证模型版

本、设备匹配以及效果评估等方面均处于可控的状态。这样的“边云协同”智能融合架构，切实兼顾了系统性能中的实时性与稳定性这两方面，也充分考虑到了局部敏捷与全局优化等相关性能表现。

### 3 典型场景落地与融合成效验证

#### 3.1 晶圆车间多设备协同调度实践

在半导体晶圆制造环节里，设备之间的任务流转相当频繁，调度逻辑也颇为复杂。那种依靠人工经验或者静态排程表来制定生产计划的传统方式，其效率十分低下，而且资源的利用率也高不起来。有一家12英寸的晶圆厂，在引入了本文所讲的融合系统架构之后，针对像光刻、刻蚀以及清洗这些关键工序段，开展了设备协同调度方面的改造工作。该系统借助对边缘设备状态的采集，能够实时感知到工位级别的状态，同时把设备的可用性、运行时的负载情况、保养计划等诸多信息，传送到中台的排产模块。然后由融合调度引擎结合MES生产任务，进而生成一个涵盖“任务-设备-时间”的三维优化调度矩阵。当任务下达之后，系统会自动操控传输臂、输送轨道以及晶圆舱盖开启等一系列物理设备的动作，以此来完成产品在各个设备之间有序的流转过程。从现场验证所得到的数据来看，通过采用这种调度机制，设备的平均利用率得以提升了12%，产线的负载均衡度也提高了18%，晶圆的流转周期更是缩短了大约8%，成功实现了从“单机管控”朝着“群体协同”的转变，极大地提升了制造方面的柔性以及运营的响应能力。

#### 3.2 缺陷检测与质量追溯闭环系统构建

半导体封装与测试这一领域中，其产品的种类极为丰富多样，所存在的缺陷类型也是相当复杂的。就传统的抽检手段而言，它有着周期比较长以及人工误判率偏高这些问题。融合系统是通过在边缘位置部署高精度的工业相机，并且结合卷积神经网络模型，以此来达成对引脚偏移、引线偏弯、焊球破损之类的典型缺陷进行在线检测的目的，而且单帧识别时间能够被控制在0.2秒以内，检测的准确率也稳稳地超过了95%。该系统还会把每一个检测结果和批次号、机台号、作业员ID、工艺参数等相关信息自动地关联起来，进而构建起基于图数据库的质量追溯路径。管理人员能够依据时间轴去回溯任何一个缺陷的形成过程，以及与之相关联的工序和根因设备，从而形成“缺陷发现—根因分析—工艺调整”这样一个闭环的

机制。在该系统完成部署之后，产品的返修率下降了38%，质量事故处理的周期也缩短了60%以上，与此同时，还为质量团队赋予了具备数据支撑的结构化决策能力，有力地助推了客户零缺陷交付目标的达成。

#### 3.3 运维预测与能效管理集成落地

在测试区以及动力系统区这块范围当中，设备具体的运行状态和生产稳定性以及能源消耗效率可是有着直接的关联呢。融合系统在这一环节里面着重部署了设备健康管理模块，同时还设置了能效评估子系统。它借助边缘传感器来收集像温度呀、电流呀、振动呀、噪声这类运行数据，再与边缘AI模型相结合，以此来开展健康评分以及对异常趋势做出预测。该系统针对轴承磨损、电源不稳定、温控出现异常等各类故障会提前发出预警，并且能够自动生成维保任务，还能给出故障处理方面的建议。从能效这个角度来讲，系统把配电监测、空调相关数据以及冷水机组控制数据都整合到一起，进而形成了车间级别的能源使用图谱。

### 4 结语

IT与OT的深度融合，不仅是半导体智能工厂实现精细管理与高质量交付的关键支撑，更是企业迈向智慧决策、绿色协同、柔性制造的重要路径。本文结合半导体行业实际，构建了一套“边缘感知—中台建模—云端治理”的系统架构方案，系统化阐述了从数据接入、模型融合到智能应用的全过程技术体系，并通过典型落地实践验证了架构的可行性与价值表现。未来，随着工业软件自主化、边缘AI芯片化、标准协议开放化的持续推进，该融合架构将不断拓展功能边界与平台能力，推动更多半导体制造企业实现从“数据流动”到“价值创造”的本质跃升。

#### 参考文献

- [1] 谢鹏寿, 冉玉翔, 冯涛, 等. 基于平衡Merkle树的工业OT网络访问授权溯源方法[J/OL]. 通信学报, 1-13[2025-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2102.TN.20250425.1357.020.html>.
- [2] 魏涛, 袁忠, 王雍, 等. OT和IT融合场景下网络安全威胁监测分析系统设计[J]. 信息安全与通信保密, 2024, (11): 85-94.
- [3] 龚淑娟. IT/OT无缝融合, 全面加速数字化转型——访西门子(中国)有限公司数字化工业集团汽车行业管理部总经理贾春鹏[J]. 汽车制造业, 2024, (05): 4-7.