

# 基于工业物联网的智能电表数字化车间构建与应用

胡英军

浙江瑞银电子有限公司 浙江 杭州 311100

**【摘要】**：智能电表生产具有多品种、小批量、高精度及质量可追溯性强的特点，传统生产管理模式在效率、质量一致性和柔性响应方面已难以适应市场需求。本文探讨了智能电表生产车间开展数字化转型所面临的需求及其驱动因素，并设计了一套依托工业物联网的四层技术体系结构，包含感知层、网络层、平台层和应用层。进一步介绍了 SMT 生产线设备联网、装配车间数据上传、在制品自动追踪以及质量数据在线采集等关键数字化系统的开发及应用，并从设备综合效率分析、质量异常根因追溯、生产进度可视化以及能耗监测等方面说明了数据驱动下的生产管控及优化应用的效果。综上所述，在实际项目中应用数字化工厂可以提高产品合格率及产量并有效缩短交期，对今后智能电表厂商进行数字化工厂建设具有借鉴意义。

**【关键词】**：智能电表；数字化车间；工业物联网；生产管控

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.075

智能电表是电力物联网的关键终端产品之一，随着国内电网招标中对电表的产品性能提出更高的要求（如从 1 级向 0.5 级甚至 0.2 级发展，并增加远程通信、负荷控制、防窃电等功能），以及海外市场对电能表的多样化、差异化的需求，国内外技术标准不统一、通讯协议不兼容、外形尺寸有差别；以上特点都促使智能电表行业走向“多品种、小批量、频繁换型”的生产方式。传统智能电表车间存在如下痛点：设备孤岛化，SMT 贴片线、波峰焊线、装配线、测试线之间数据不通；人工记录检验结果，质量异常事后才发现；在制流转状态不明，生产进度靠人工报表层层汇总；工艺参数凭经验设置，缺少数据支持。以上这些问题，在产能爬坡以及订单波动的情况下会更为明显，是影响交付能力及交付质量的关键因素。

## 1 智能电表生产车间数字化转型的需求与驱动力



智能电表车间数字化改造的需求首先来自多品种、小批量

的生产方式。一块智能电表由上百种元器件组成，从单相表到三相表，从直接接入式到互感器接入式，不同型号之间物料清单、工艺路线以及测试规程都有差别。传统的刚性生产线在切换型号的时候，需要停机换线，需要数小时的时间，很难适应订单碎片化的发展趋势；利用数字化车间柔性制造的能力，实现快速换型、动态调度是提高响应速度的重要手段。二是质量一致性控制对于过程全溯源提出了硬性需求。

智能电表是法定计量器具，出厂误差必须控制在其标称等级内，并有完整的产品测试数据供稽查使用；一旦发生批量质量问题，应能迅速追溯到具体批次、生产设备、作业员、工艺参数等信息。这些都需要对产品的生产和检测过程进行全程记录并保存原始数据，而纸质单据和离散的数据文件难以实现这一目标，必须实现从物料入仓、SMT 贴装、组装、测试、打包全流程的可追溯信息流。第三，手工录入及管控的速度与准确度已不能满足需求。在典型的电表生产车间每天就会产生数万个测试数据、上千个工单流转数据、几百个设备状态点检数据。如果由人工进行录入，不但效率低而且会产生抄写错误、漏录以及迟录等情况。而用于管理决策的生产报表也往往落后一班或者一天，不能做到及时调度、快速应对异常。数字化转型利用自动的数据采集及实时看板，让管理视角从“事后复盘”转向了“事中控制”，甚至是“事前预警”。

## 2 工业物联网支撑技术体系与车间总体架构

工业物联网是数字化车间建设的基础，一般认为由感知层、网络层、平台层以及应用层组成。

其中涉及的关键技术有：采用各类传感器（温湿度传感器、震动传感器、电流电压传感器等），对生产设备状态信息以及生产环境的信息进行采集；基于射频标签和射频读写器实现制品、物料的自动识别与定位跟踪；利用二维码、条码实现单板及整机的一物一码；利用机器视觉进行外观缺陷检查及字迹、字母读取。感知层的关键在于采集的实时性、准确性和覆盖的全面性。智能电表车间一般为 SMT 贴片机、回流焊炉、自动测试台等固定设备采用工业以太网或者 Profinet 等现场总线进行组网，保证数据传输的实时性和确定性；对移动工位、AGV 小车以及手持终端采用 Wi-Fi 进行组网。以 5G 或 Wi-Fi 6 无线网络作为接入手段，提供灵活的接入方式。网络层兼顾带宽、时延、可靠性和安全性 4 个方面的要求。以工业物联网平台或者制造执行系统为核心软件平台，对上承载各类业务应用，对下连接各类设备和传感器。平台层应具有以下功能：多源异构数据接入及协议转换的能力；时序数据的高效率存储和检索的能力；设备数字孪生模型的构建与管理的能力；开放的应用编程接口，易于上层的应用开发及系统的集成。

### 3 车间关键数字化系统的设计与实现

#### 3.1 SMT 生产线的设备联网与状态实时采集

SMT 生产线为生产智能电表的第一道工序，包含设备众多，有锡膏印刷机、贴片机、回流焊炉以及自动光学检测设备；而各厂家、不同时期设备所采用的通讯口和通讯协议差别很大，这对设备的接入提出了挑战。统一接入的方案为：对新上设备如果支持标准 SECS/GEM 协议，则直接使用以太网接入到 MES 中；对只有串口或者简单的数字量输入输出的一些老设备，则通过加装工业网关实现协议转换并上传数据。采集的数据有设备状态（运行、待机、故障、停机）、当前生产工单和产品型号、当前产量及抛料率以及一些重要的工艺参数如回流焊各温区温度、链速等。对于不同类型的数据有不同的采集频率，对于设备状态按秒级进行更新；对于一些重要的工艺参数则按分钟级进行更新，而对于产量和抛料率则按每块板来触发。收集的数据经过边缘节点预处理后发送到 MES 上进行 OEE 计算和报警产生。

#### 3.2 装配车间工位级的作业指导与数据上工

装配车间以人工作业为主，数字化建设的重点是工位级的作业指导与数据采集。每个装配工位配置工业平板电脑，通过有线或无线网络连接制造执行系统。工位 PC 的作用主要有：电子化显示作业指导书，根据当前工单自动调取相应的装配工艺文件及图纸；数据上工，由操作工对每一道工序进行完成确认，可通过扫入工单条形码或者手动输入件数的方式将完工情况及时上传到系统中；异常提报，当操作工发现缺料、不良品、机器设备出现问题时，平板电脑一键上报，自动推送至相关人员。数据上工的价值在于让生产进度在工位级别可视化。MES

可以对所有工单每道工序完成件数进行统计，并判断出哪些工序没有完成，甚至可以判断出哪些工单已经超期了。与人工统计不同的是，MES 数据上工使得数据传递时间由几小时缩短到几秒钟，从而保证了动态排序有最新的数据支持。

#### 3.3 在制品的自动化追踪与工序流转控制

在制品的自动追踪是质量追溯的基础。智能电表生产采用单板级追溯策略：每块印制电路板在 SMT 产线入口激光打上二维码，该二维码携带产品型号、生产日期、批次号等信息。在后续每道工序，通过固定式或手持式扫码器自动记录在制品的工序通过时间、操作人员、设备编号及关键测试数据。工序流转控制是指在关键工序设置防错和防漏机制。如烧录环节中，只允许扫码通过的 PCB 进入烧录程序；高温老化前自动判断本批次是否已过完前面各道工序，避免漏做工序的现象发生。若在制件在某一工序滞留的时间超出了标准工时规定时间的一定范围，则系统会自动报警提醒管理人员注意是否存在瓶颈工序或存在异常现象。

#### 3.4 质量检测数据的在线采集与 SPC 分析

测试是智能电表生产的中心环节，主要包括 ICT 测试、功能测试、精度测试、耐压测试等。数字化改造的重点是实现测试机台的数据自动采集。测试机台一般都有串口或者网口，通过开发专门的数据采集软件，把每一个板子的测试结果、测试值以及失败项目号上传到 MES。根据收集到的质量信息，建立 SPC 应用程序。即时统计每组合合格率及各主要缺陷占比，合格率低时发出预警信号；对重要质量特性（准确度、角度误差）建立 X-bar-R 控制图，判断过程是否出现异常波动；从不同机台、站别、时间范围等对不合格情况进行分类，辅助制定整改措施。SPC 的应用将质量控制由“检验把关”提前到“过程受控”的状态，并实现质量缺陷的早期发现及预防。

### 4 基于数据驱动的生产管控与优化应用

#### 4.1 设备综合效率的实时计算与瓶颈分析

设备综合效率作为 SMT 生产线运行的重要指标之一。其中： $\text{设备综合效率} = \text{开动时间率} \times \text{运行性能率} \times \text{产品合格率}$ 。根据实时收集到的设备的状态信息，可以自动计算出每小时、每天、每周甚至每个班次、每个产品型号对应的设备综合效率以及各个子项目效率情况。而瓶颈分析就是在设备综合效率的基础上进行的进一步分析。根据同一条生产线上不同设备之间的 OEE 对比情况，找到 OEE 最低的设备为当前瓶颈。再细分瓶颈设备的损失组成：是因为换型时间太长而导致的低时间开动率？还是因为小停机太多而造成的低性能开动率？或者是由于抛料率太高而导致的低合格率？然后根据不同的损失采取不同的改善对策，例如改善换型作业、进行预防性保养或者修正贴装参数等。

#### 4.2 质量异常根因追溯与工艺参数反向调优

对于质量问题来说,如何尽快找出故障源头至关重要,避免造成更大的损失。在数字化工厂中实现了成品不良至各工序工艺参数的追溯功能,在某一型号产品整机测试阶段发现大量产品存在偏差超标的现象后,可直接根据产品批次查找相关产品的加工信息,并追踪出相应工位的相关检测记录以及相关作业人员的信息。高阶应用为工艺参数逆优化,提取以往数据中的“工艺参数-质量效果”关系,并基于此进行回归或者拟合,找出主要影响质量的关键工艺参数以及关键工艺范围。例如,分析发现回流焊峰值温度与某项电参数误差存在相关性,系统可建议将峰值温度从240℃调整至243℃。调优建议经工艺工程师确认后,通过制造执行系统下发至设备,形成“数据采集—分析—决策—执行”的闭环。

#### 4.3 生产进度可视化与动态排程辅助决策

生产进度可视化针对车间管理人员和计划调度人员提供多层次实时看板。车间级看板显示当前所有在制工单总进度、计划达成率以及异常工单数;产线级看板显示各条产线实时产出速度、在制品分布情况和预计完工日期;工位级看板显示各工位实时负荷和排队长度。结合可视化信息,动态排程辅助决策工具可以帮助计划员应对插单、设备故障、物料短缺等扰动。异常发生后,系统自动分析影响到的工单延期的风险以及重排建议,例如是否将后面的工单提优先级、是否有备件可用或者是否需要物料应急调度。辅助决策并不取代人的决策,但是极大地降低了计划人员的响应时间及寻优的时间成本。

#### 参考文献:

- [1] 蔡永翔,邓松,赵春雪,等.基于用户智能电表大数据的配电台区数字化建模[J].电力大数据,2024,27(03):42-49.
- [2] 谢晖,周国辉,程威,等.智能电表数字化工厂中自动生产线设计与优化研究[J].现代制造工程,2018,(08):36-41+154.
- [3] 谢晖,任磊,王杭燕,等.数字化工厂在智能电表自动化生产线中的应用研究[J].制造业自动化,2018,40(06):30-35.

#### 4.4 能耗监测与绿色制造初步实践

数字化车间的建设也为能耗监测和绿色制造提供了基础。在关键用能设备(回流焊炉、波峰焊机、空压机及空调系统)加装智能电表,通过工业物联网平台实时采集功率、电流、电压及累计用电量。能耗数据与生产工单关联,可计算出单位产品的能耗成本,识别高耗能工序和时段。前期的绿色制造尝试有:按产线负荷调节空压机运行台数,减少空载耗能;回流焊炉当无板经过时处于待机保温状态,减少待机能耗;对历史能耗数据分析,查找非生产时段异常耗能点并进行整改等等。能耗监控不仅是为了降本,更是实现“双碳”目标及满足客户绿色供应链的要求。

#### 5 结论

以工业物联网为依托开展的智能电表数字化车间建设,是解决多品种、小批量订单下质量一致性差以及快速响应等问题的可行方案之一。文章研究了数字化改造需求及其驱动因素,并提出了包括感知层、网络层、平台层、应用层在内的四层信息化技术框架及设备层、控制层、执行层、决策层在内的四层制造体系架构,在核心系统落地实施方面有以下几点。主要介绍了SMT设备联网、装入数据上工、在制品跟踪以及质量在线采集设计思路。以数据为基础进行优化利用,包括设备效能分析、质量问题溯源、施工过程看板以及能源消耗监控等方面,在实际项目中证明了数字化工地可以提高工作效率、工作质量和履约能力,下一步可以在智能化方面深入研究如何运用大数据技术实现工艺参数自动调优、机器故障预警、施工计划智能安排等工作。提升智能电表制造智能化水平。