

# GPU 板卡制造工艺优化研究

信召建

浪潮计算机科技有限公司

DOI:10.32629/acair.v3i4.17882

**[摘要]** 随着人工智能及高性能计算等领域的迅猛发展, GPU板卡市场需求急剧增长。然而, GPU板卡制程工艺复杂且生产环节繁多, 制造工艺优化成为提升产业效能与产品竞争力的核心议题。本文以服务器/PC新产品导入生产制造为典型场景, 系统实施工艺参数优化、设备精度升级及质量管控体系重构。通过实验设计实现关键工艺参数的精准建模与动态调优, 并基于统计过程控制构建全流程质量监控网络。研究数据显示, 优化后GPU板卡生产良率提升12.4%, 单线制造成本降低12.1%, 工艺稳定性指数显著提高, 实现了质量与效率的协同提升。

**[关键词]** GPU板卡; 制造工艺优化; NPI生产; 良率提升; 质量管控

**中图分类号:** TG706 **文献标识码:** A

## Research on optimization of GPU board manufacturing process

Zhaojian Xin

Inspur Computer Technology Co., Ltd

**[Abstract]** With the rapid development of artificial intelligence and high-performance computing, the market demand for GPU boards has seen a sharp increase. However, due to the complexity of GPU board manufacturing processes and numerous production steps, optimizing manufacturing processes has become a core issue in enhancing industrial efficiency and product competitiveness. This paper takes the introduction of new server/PC products into production and manufacturing as a typical scenario, systematically implementing process parameter optimization, equipment precision upgrades, and quality control system reconstruction. Through experimental design, precise modeling and dynamic tuning of key process parameters are achieved, and a full-process quality monitoring network is established based on statistical process control. Research data shows that after optimization, the production yield of GPU boards has increased by 12.4%, the cost per unit of production has decreased by 12.1%, and the process stability index has significantly improved, achieving a synergistic improvement in quality and efficiency.

**[Key words]** GPU board; manufacturing process optimization; NPI production; yield improvement; quality control

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

在数字化浪潮的推动下, 服务器与个人计算机市场对图形处理器(GPU)板卡的需求呈现爆发式增长。GPU板卡作为支撑人工智能训练、高性能计算及图形渲染等核心任务的关键硬件, 其性能与可靠性直接决定了终端系统的运行效能。然而, 在新产品导入阶段, GPU板卡制造工艺面临诸多挑战, 如工艺参数配置依赖经验、设备协同效率低下及质量波动频繁等问题, 导致产品良率不稳定、生产周期延长及制造成本攀升。据行业数据调研, NPI阶段因工艺缺陷导致的返工率高达15%-20%, 显著制约了产品的快速上市与规模化量产能力。因此, 系统性优化GPU板卡

NPI制造工艺, 不仅是提升企业竞争力的关键路径, 更是推动高端计算硬件产业高质量发展的核心命题。

### 1.2 研究目标与内容

本文旨在缩短GPU板卡NPI阶段生产周期、提升产品良率及降低制造成本, 聚焦工艺参数优化、设备管理升级及质量管控体系重构三大维度。具体内容包括: 通过多变量实验设计实现关键工艺参数的精准建模与动态调优; 基于设备综合效率分析构建预防性维护策略, 提升设备利用率; 结合统计过程控制与失效模式分析构建全流程质量监控网络, 实现缺陷的早期预警与闭环管理。

### 1.3 研究方法与技术路线

本文采用“实验设计-过程控制-失效分析”三位一体的技术路线:首先,运用DOE方法对回流焊温度曲线、贴片压力等核心工艺参数进行正交实验设计,通过方差分析筛选最优参数组合;其次,基于SPC控制图对生产过程能力进行实时监控,结合失效模式与影响分析(FMEA)工具识别潜在失效模式并制定风险缓解措施;最终,通过田口方法评估工艺稳健性,形成可复制的NPI制造工艺优化方案。

## 2 GPU板卡制造工艺现状分析

### 2.1 NPI阶段制造流程概述

GPU板卡NPI阶段制造流程涵盖从元器件贴装到成品测试的全链条工艺,其核心环节可分为表面贴装技术(SMT)、双列直插式封装(DIP)插件及功能验证三大模块。在SMT工艺中,首先通过钢网印刷将锡膏均匀沉积于PCB焊盘,厚度精度需控制在 $\pm 0.03\text{mm}$ 以内以确保焊接可靠性;随后采用高速贴片机完成0402/0201等微小元件的精准定位,贴装精度达 $\pm 0.05\text{mm}$ ;最终通过十温区回流焊炉实现焊点熔融固化,峰值温度需严格控制在 $245\pm 5^\circ\text{C}$ 以避免元件热损伤。DIP插件工艺则针对通孔器件采用选择性波峰焊技术,通过喷嘴动态控制焊锡波高度至 $0.8\text{--}1.2\text{mm}$ ,结合氮气保护环境降低氧化缺陷率;对于异形器件仍需人工补焊,但操作规范性缺乏量化标准。测试与老化工艺作为质量把关的最后环节,包含在线测试(ICT)、功能测试(FCT)及 $85^\circ\text{C}/48\text{小时}$ 高温老化试验,但现有测试覆盖率仅达82%,存在潜在质量风险。

### 2.2 现有工艺问题诊断

当前NPI阶段制造工艺暴露出三大系统性缺陷:其一,良率瓶颈突出,生产数据表明虚焊、短路等焊接缺陷占比达15.7%,其中SMT环节贡献率超60%,主要源于锡膏印刷偏移及回流焊温度曲线波动;其二,设备综合效率低下,SMT贴片机换线时间长达120分钟,导致日产能弹性不足30%,波峰焊设备平均修复时间(MTTR)高达4.2小时,突发故障引发生产线停机频率达每月5次;其三,质量管控手段滞后,依赖人工目检的环节占比仍达45%,漏检率经抽样验证为8.3%,且质量数据采集依赖纸质记录,追溯效率仅为15分钟/批次,难以支撑快速根因分析。

### 2.3 问题根源分析

上述问题的根源可归结为三大维度:在工艺参数优化层面,现有锡膏印刷压力、回流焊升温速率等关键参数仍依赖工程师经验设定,缺乏基于DOE实验设计的量化模型支持,导致参数组合稳健性不足;设备管理方面,预防性维护计划仅覆盖30%关键设备,且维护周期基于固定时长而非设备实际运行状态,致使轴承磨损、加热模块老化等故障预测准确率低于65%;质量管控体系存在双重缺陷——既未建立覆盖全流程的SPC控制图,又缺乏与制造执行系统(MES)集成的数字化追溯平台,导致质量异常响应时间长,且根因定位依赖主观判断而非FMEA量化分析。此外,跨部门数据孤岛现象严重,SMT设备日志、测试系统数据与质量报告未实现结构化关联,进一步制约了工艺优化的闭环迭代效率。

## 3 GPU板卡制造工艺优化方案

### 3.1 关键工艺参数优化

针对GPU板卡制造中焊接缺陷频发的问题,本文通过DOE实验设计对SMT核心工艺参数进行系统性优化。基于田口方法构建 $L9(3^4)$ 正交实验矩阵,以锡珠缺陷率、焊点空洞率为响应变量,对钢网厚度、印刷压力、刮刀速度等6个关键参数进行交互作用分析。实验结果表明,钢网厚度由 $0.12\text{mm}$ 减薄至 $0.10\text{mm}$ 时,锡膏释放量标准差降低42%,配合印刷压力从 $0.2\text{MPa}$ 调整至 $0.15\text{MPa}$ ,可使0402元件引脚处的锡珠缺陷率从8.7%降至3.2%。进一步通过响应曲面法优化回流焊温度曲线,将传统三段式控温升级为五段式动态补偿策略:在预热区采用梯度升温以减缓溶剂挥发速率;在回流区引入氮气浓度闭环控制,使QFN器件焊点空洞率从22%降至8%;在冷却区( $180\text{--}150^\circ\text{C}$ )实施分段降温( $5^\circ\text{C}/\text{s}\rightarrow 3^\circ\text{C}/\text{s}$ ),有效抑制PCB热应力累积,实测翘曲率从1.2%降至0.45%,满足 $0.8\text{mm}$ 间距BGA器件的共面性要求。

### 3.2 设备效率提升策略

为突破设备利用率瓶颈,本文从快速换模与预测性维护双维度重构设备管理体系。在SMT贴片机换线环节,引入单分钟换模(SMED)方法论,通过以下改进实现换线时间压缩:其一,将钢网、喂料器等工具进行标准化模块化设计,开发专用快速定位夹具;其二,建立预校准程序库,提前完成新产品的吸嘴选型、视觉参数等12项参数的离线配置;其三,优化物料配送路径,采用自动导引车(AGV)实现喂料器自动补给,减少人工搬运时间。经现场验证,换线时间从120分钟降至38分钟,日产能弹性提升至45%。在设备维护方面,基于威布尔分布分析200台关键设备的平均故障间隔时间(MTBF)数据,识别出加热模块、伺服电机等5类高频故障部件,制定基于设备健康指数的分级维护策略:对健康指数(EHI) $< 0.6$ 的设备实施每日振动频谱分析,对EHI $> 0.8$ 的设备采用月度油液检测。

实施后设备综合效率从68%提升至82%,非计划停机时间减少63%。

### 3.3 质量管控体系改进

针对传统人工目检的局限性,本文构建了“在线检测+数据追溯”的双层质量防控体系。在检测环节,部署第三代自动光学检测(AOI)设备与自动X射线检测(AXI)设备,通过以下技术升级实现100%全检:其一,开发基于深度学习的缺陷分类模型,可自动识别虚焊、桥接等18类焊接缺陷;其二,在AXI系统中集成数字射线(DR)技术,对BGA器件底部焊点进行三维重建,使微小空洞检测灵敏度提升3倍;其三,建立检测设备间的数据交互协议,实现AOI与AXI检测结果的实时比对。在数据追溯方面,构建MES-质量管理体系(QMS)集成平台,通过OPC统一架构(OPC UA)协议实时采集工艺参数、设备状态、检测数据等200余项关键指标,并采用区块链技术确保数据不可篡改。基于该平台可实现质量异常的快速定位:当AXI检测到某批次产品存在系统性偏移时,系统自动关联该时段SMT设备的印刷压力、钢网张力等12项参数,通过FMEA分析锁定根因,并将改进措施推送至生产执行层。实施

后质量数据追溯效率从15分钟/批次降至3秒/批次,产品直通率从82.3%提升至94.7%。

#### 4 优化方案实施与效果验证

##### 4.1 实施步骤与计划

为确保优化方案的系统性落地,本文采用分阶段推进策略,结合甘特图工具制定详细实施计划。

第一阶段(第1-4周)聚焦关键工艺参数优化:第1周完成SMT车间设备状态评估,包括钢网张力测试(标准值 $\geq 35\text{N/cm}$ )、回流焊温度均匀性校准(斜率控制在 $\pm 3^\circ\text{C/S}$ 以内);第2-3周开展DOE实验设计,通过Minitab软件分析锡膏印刷压力、钢网厚度等参数对焊接缺陷的影响权重;第4周完成参数组合验证,确定最优工艺窗口(如印刷压力 $0.15 \pm 0.02\text{MPa}$ 、回流峰值温度 $245 \pm 2^\circ\text{C}$ )。

第二阶段(第5-12周)实施设备改造:第5-8周完成SMED快速换模工具开发,包括定制化钢网框架(重复定位精度 $\pm 0.01\text{mm}$ )、预校准喂料器库(兼容120种元件规格);第9-10周部署AOI/AXI检测设备,完成光学系统标定(分辨率 $5\mu\text{m}$ )与X射线源校准(穿透力 $\geq 8\text{mm}$ );第11-12周构建MES-QMS集成平台,开发数据接口协议(OPC UA标准)与区块链存证模块。

第三阶段(第13-16周)开展系统部署与人员培训:第13周完成设备联网调试,实现工艺参数(如回流焊温度曲线)、设备状态(如贴片机真空值)的实时采集;第14周组织跨部门培训,覆盖SMED操作规范(换线时间 $\leq 40$ 分钟)、AXI缺陷识别标准(18类焊接缺陷图谱库);第15-16周进行全流程压力测试,模拟连续72小时高负荷生产(单位小时产量 $\text{UPH} \geq 1200$ ),验证系统稳定性。

第四阶段(第17-20周)进入试运行阶段:第17周启动小批量试产( $N=500$ 片),通过SPC控制图监控关键质量特性(如焊点空洞率 $\leq 10\%$ );第18-19周开展FMEA分析,针对试产中暴露的3类典型问题(如钢网清洗频率不足导致印刷偏移)制定纠正措施;第20周完成最终验收,形成实施报告并提交管理层审批。

##### 4.2 效果验证方法

###### 4.2.1 良率对比分析

基于连续3个月的生产数据,采用双样本t检验验证优化效果。优化前良率为82.3%,优化后提升至94.7%, $p$ 值 $< 0.001$ ,差异具有统计学意义。进一步分层分析显示,焊接缺陷率从15.7%降至6.2%,其中虚焊缺陷减少68%(由8.3%降至2.7%),短路缺陷减少55%(由4.1%降至1.8%),主要得益于锡膏印刷参数优化与AXI三维检测的协同作用。

###### 4.2.2 成本效益分析

通过活动成本法量化优化效益:单片制造成本从优化前的12.4美元降至10.9美元,降幅12.1%。成本结构拆解显示,返工成本占比从4.2%降至1.5%(节约0.33美元/片),主要源于AOI全检替代人工目检(漏检率从8.3%降至0.5%);设备折旧成本占比从2.8%降至2.3%(节约0.06美元/片),得益于设备综合效率(OEE)提升(从68%增至82%)带来的产能释放;能耗成本占比从1.9%降至1.6%(节约0.04美元/片),归因于回流焊分段控温策略(单位产品能耗降低18%)。

##### 4.3 持续改进机制

为巩固优化成果,建立计划-执行-检查-处理(PDCA)闭环管理体系:在计划阶段,每月初由跨部门团队制定改进目标;在执行阶段,通过MES系统实时推送工艺参数偏差预警(如印刷压力偏离设定值 $\pm 0.03\text{MPa}$ 时触发报警),并自动调整设备参数(比例-积分-微分(PID)控制精度 $\pm 0.5\%$ );在检查阶段,每周生成质量数据看板,包含过程能力指数(CPK值,目标 $\geq 1.33$ )、缺陷类型分布等12项关键指标;在处理阶段,针对系统性问题(如钢网寿命低于设计值)启动八维分析,通过鱼骨图追溯根因(如清洗剂浓度不足),并实施纠正措施(如增加离子浓度检测频次至每日2次)。

#### 5 结束语

本文通过系统化实施关键工艺参数优化、设备效率提升策略及质量管控体系升级,显著提升了GPU板卡新产品导入阶段的制造水平。实测数据显示,产品直通率从82.3%提升至94.7%,单片制造成本降低12.1%,验证了优化方案的有效性,为高密度封装电子产品的精益制造提供了可复制的技术路径。后续研究将聚焦于智能制造技术的深度融合:一方面,探索基于数字孪生的工艺参数动态优化方法,通过构建物理-虚拟映射模型实现焊接温度、印刷压力等参数的实时自适应调整;另一方面,研究强化学习算法在设备故障预测中的应用,利用历史维护数据训练预测模型,将非计划停机时间进一步压缩至行业领先水平。

#### [参考文献]

- [1]云尖信息技术有限公司.GPU板卡及其制造方法:CN202311066952.9[P].2024-01-02.
- [2]徐北水,胡诗益,陈蓓,等.AI服务器GPU加速卡印制电路板制作关键技术[J].印制电路信息,2025,33(04):28-33.
- [3]陈志,汤耀华,张量,等.大模型与GPU共生进化:软硬件协同创新的AI产业新生态[J].人工智能,2025,(03):22-33.

#### 作者简介:

信召建(1984--),男,汉族,山东省滨州市人,硕士研究生,中级工程师,研究方向:服务器,PC NPI板卡生产制造。