

嵌入式系统中 PCBA 硬件调试方法及性能优化研究

张 骏, 谭兴宇

(青岛鼎新电子科技有限公司崂山分公司, 山东 青岛 266100)

摘 要 本文分析了 PCBA 硬件调试的基本流程, 探讨了常见的调试技术, 包括示波器测试、电源测量等; 结合智能化和自动化调试技术, 提出基于 AI 分析、大数据监测等方法的优化方案, 以提高调试的精准度和自动化程度; 通过高速信号布局优化、动态功率管理、电磁干扰兼容性设计等措施, 提高了 PCBA 的稳定性和可靠性, 同时结合自动化测试治具与远程调试技术, 提升调试效率并降低硬件测试成本。研究表明, 结合智能调试技术的 PCBA 优化方案能够有效提升硬件调试效率, 提高信号完整性, 降低功耗, 并增强电磁兼容性, 为高性能嵌入式系统的硬件设计提供了重要参考。

关键词 嵌入式系统; PCBA 硬件; 调试方法; 性能优化

中图分类号: TN710

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.10.005

0 引言

嵌入式系统通常由硬件和软件两部分组成, 其中硬件平台的稳定性和可靠性直接影响整个系统的运行性能。PCBA (印制电路板组件) 作为嵌入式系统的核心硬件, 其质量、调试方法和优化策略决定了系统的可靠性、功耗、信号完整性以及电磁兼容性等关键参数。然而, 在 PCBA 硬件开发过程中, 由于电路复杂度增加、高速信号干扰增强、低功耗需求提升, 以及电磁兼容性要求日益严格, 传统的调试方法已难以满足高效、高精度的硬件优化需求。面对这些挑战, 研究更加智能、高效的 PCBA 调试方法, 并探索优化其硬件性能的策略, 对提升嵌入式系统的整体性能至关重要。

1 嵌入式系统中 PCBA 硬件调试方法的关键技术

1.1 PCBA 硬件调试的基本流程

1. 设计检查。在 PCBA 制造前, 需要进行设计检查, 以确保电路设计符合制造、装配和测试要求, 这些分析有助于减少生产缺陷, 提高制造效率, 并优化测试策略。面向制造的设计, 需要检查 PCB 布线规则、焊盘设计、过孔尺寸、阻抗匹配等, 确保 PCB 能够在批量生产时保持一致性和可靠性^[1]。面向装配的设计, 需要评估元器件的布局, 确保焊接工艺可行, 避免元件间距过小或安装方向错误等问题。面向可测试性的设计, 需要确保电路板预留测试点, 以便后续进行自动测试、边界扫描等调试手段, 提高测试的可行性和效率。

2. 电源测试与信号完整性分析。电源系统是 PCBA

的核心, 电源质量直接影响电路的稳定性, 因此电源测试是调试过程中必须优先进行的环节。同时, 信号完整性分析可确保高速信号在 PCB 上的传输质量。使用示波器、万用表、功率分析仪等工具测试电源电压、纹波噪声、负载能力等, 确保供电稳定, 避免过压或欠压影响芯片工作。利用高速示波器、网络分析仪等工具, 检测关键信号线的阻抗匹配、串扰、反射等问题, 优化 PCB 布线, 确保高速信号传输质量。

3. 元器件焊接与连接性测试。PCBA 生产完成后, 需要对焊接质量和电气连接进行检测, 以确保所有元器件正确安装并能正常工作。自动光学检测设备可检查焊点质量, 发现焊接缺陷, 如焊料不足、桥接、虚焊等。使用万用表、边界扫描测试等方法, 检查各元器件间的电气连接情况, 确保所有信号路径正常。

4. 功能性验证与故障诊断。在完成基础电气测试后, 需要进行功能性验证, 以确保 PCBA 能够按照设计要求正常工作。如果存在异常, 则需要进行故障诊断。通过加载嵌入式软件或测试程序, 验证 PCBA 各模块的功能是否符合设计要求。如果功能测试失败, 需要通过示波器、逻辑分析仪、热成像仪等工具分析问题, 会涉及短路、开路、信号干扰、电磁兼容性问题等。在故障诊断中, 要查看关键信号是否存在异常抖动、毛刺或过冲/下冲现象。通过功率分析仪检查电源消耗是否异常, 发现潜在短路或过载问题。使用热成像仪检测过热元件, 排查功率器件散热问题或异常电流导致的发热现象。

1.2 常见的硬件调试方法

示波器是硬件调试中最常用的仪器之一，主要用于测量和分析模拟信号、电源波动、高速数字信号质量等^[2]。检查信号是否存在毛刺、抖动、串扰、过冲/下冲等问题，特别适用于高速数字信号和射频信号的调试。电源质量测试可以评估电源轨的稳压情况，分析纹波和噪声，确保供电稳定性。利用高级示波器的触发功能，可以精准捕获偶发性故障，例如电路中的短暂异常信号。

逻辑分析仪主要用于捕获和分析数字信号，适用于并行数据总线和高速串行通信的调试。逻辑分析仪可同时监测多个数字信号通道，便于分析信号时序关系。时序分析通过检查数字电路时钟同步问题，避免因时钟漂移或信号延迟导致的通信错误。

JTAG是一种标准的边界扫描调试技术，广泛用于嵌入式系统的硬件测试和调试，适用于微控制器等芯片。JTAG调试器通过TAP接口连接目标设备，并通过串行扫描链控制芯片内部寄存器，实现电路板的在线测试和调试。JTAG可直接访问处理器和存储器，支持单步调试、断点设置、寄存器和变量读取等功能。利用JTAG的边界扫描功能，可检测PCB上的断线、短路、焊接不良等问题，无需物理探针。JTAG接口可用于向Flash存储器或微控制器烧录固件，在产品量产和维修中具有重要作用。

2 PCBA 硬件调试的智能化与自动化优化

2.1 智能调试技术的引入

人工智能(AI)技术的快速发展，使其在PCBA调试过程中能够辅助自动化故障检测，提高调试效率并降低人为误判的可能性。AI辅助自动化调试主要依赖于机器学习、计算机视觉和智能诊断算法，能够识别和预测硬件故障模式。基于历史调试数据，机器学习算法可训练模型识别常见故障模式，如短路、断路、信号畸变等。利用AI建立故障预测模型，分析测试数据趋势，提前发现潜在问题，减少调试时间。根据历史测试结果，AI技术可优化测试参数，减少不必要的测试，提高测试效率。自动光学检测可以使用计算机视觉检测焊点、元器件极性和布线完整性，提高检测精度。AI技术可以结合已有的调试经验，提供最优的故障排查路径，并自动推荐修复方案，如调整电源管理、优化信号布线、增加滤波电路等。

在传统PCBA调试流程中，测试数据往往被单独处理，缺乏系统性分析。大数据技术的引入可以帮助优化测试流程，提高整体调试效率。基于大数据分析，可以识别常见的故障模式，并追溯其可能的根本原因，

例如设计缺陷、生产工艺误差、元器件质量问题等。利用大数据挖掘，分析PCBA在不同环境条件下的故障率，预测发生的问题并提前优化设计^[3]。通过分析大量历史测试数据，发现冗余测试项，优化测试流程，提高效率。利用数据挖掘技术，自动分析关键测试点，减少冗余测量，提高测试效率。基于实时数据反馈，自动调整测试流程，如动态改变电源加载条件、调节信号采样速率等。将测试结果反馈至设计阶段，实现硬件调试与设计优化的闭环，提高产品整体质量。

2.2 自动化调试平台的设计与实现

2.2.1 自动化测试治具的应用

自动化测试治具是自动化调试平台的核心组件，其通过硬件和软件结合，实现PCBA的全自动电气测试和功能验证。自动化测试治具主要由测试硬件、控制系统、软件平台三部分组成，测试硬件包括高速探针、自动夹具、信号采集模块等，保证测试的高精度和高稳定性。

控制系统利用嵌入式控制器进行测试指令控制、数据采集和实时分析。软件平台，结合开发自动化测试程序，自动识别故障点并生成报告。

自动化测试治具系统通过自动夹具对PCBA进行精准连接，避免人工接线错误。电源测试可以检测PCBA电源轨的电压、电流是否符合设计要求。采用高速示波器、逻辑分析仪，分析时序误差、串扰、反射等问题。自动化测试治具自动执行输入信号，并检测输出是否符合预期逻辑，结合数据库比对，自动分析故障模式，生成调试建议。自动化测试治具系统可以实现批量自动化测试，提高测试一致性，可以并行测试多个PCBA模块，加快生产效率。

2.2.2 远程调试与云端数据监测

随着工业互联网和云计算的发展，远程调试技术使得PCBA硬件调试突破了时间和地域的限制，工程师可以远程访问、实时监测PCBA状态，并进行数据分析和调优。远程调试系统由本地PCBA硬件、远程服务器、云端数据库组成，采用WebSocket等协议进行低延迟数据传输。PCBA连接传感器、示波器、功率计等仪器，实时采集调试数据。云端数据分析将PCBA的电压、电流、波形数据上传至云端，通过AI算法分析故障模式。工程师可通过网页或APP远程访问PCBA，执行测试指令、上传固件、调整参数。

采用SSL/TLS加密，确保调试数据不被泄露或篡改。实时波形传输结合数据压缩算法和边缘计算，实现高速波形传输，减少云端延迟。远程固件升级支持对PCBA进行远程固件更新，优化硬件功能或修复Bug。企业可远程协助工厂进行PCBA硬件调试，无需工程师现场操

作, 就可以实现 PCBA 生产过程中的实时检测与优化^[4], 也支持智能硬件的远程故障诊断和软件修复, 提高设备可用性。

2.2.3 在线调试与边缘计算结合的优化策略

在实时性要求高的 PCBA 调试环境中, 仅依赖云端计算会导致数据延迟和带宽消耗问题。因此, 边缘计算结合在线调试的方式, 可优化数据处理效率, 提升 PCBA 硬件调试的智能化水平。在 PCBA 端搭载嵌入式计算单元, 减少对云端的依赖, 提高调试响应速度。AI 本地分析通过部署轻量级机器学习模型, 在本地执行信号完整性分析、故障预测, 提高调试自动化能力。低带宽优化通过数据预处理和压缩技术, 仅上传关键信息至云端, 降低通信成本。

智能触发机制结合边缘计算分析 PCBA 数据, 仅在检测到异常时触发深度测试, 减少测试资源浪费。边缘计算节点可根据实时调试数据, 动态优化自动化测试治具的测试电压、采样速率等关键参数。本地缓存与断点续测可以避免网络异常导致测试中断, 提高远程调试的稳定性。

3 PCBA 性能优化方法

3.1 电路设计优化

在 PCBA 设计中, 高速信号容易受到串扰、反射、时序误差等问题的影响, 导致系统性能下降。采用 50 Ω 或 100 Ω 的阻抗匹配设计, 可以防止信号反射和畸变。差分信号对必须等长, 以确保信号同步。走线间距要尽量保持恒定, 避免信号不均衡造成的共模噪声。高速信号拐角尽量采用 45° 斜角或圆弧, 避免信号反射。重要信号下方应该有完整的地平面, 避免信号跨分割区导致阻抗突变。关键电源和地之间增加足够的去耦电容, 降低电源噪声对信号的干扰。在信号反射中, 阻抗不匹配会导致信号畸变, 影响数据传输质量, 需要在源端或接收端增加终端匹配电阻, 降低信号反射影响。高速信号之间相互干扰, 影响数据准确性, 需要提高信号间距, 设置信号间距 ≥ 5 倍走线宽度, 或者采用屏蔽地线或多层 PCB 布线降低串扰。

功耗优化对于嵌入式系统至关重要, 特别是在物联网、移动设备、低功耗微控制器等领域。合理的动态功率管理可以有效降低系统功耗, 提高电池续航能力。可以选用低功耗存储芯片, 采用多级电源管理, 支持不同功耗模式, 通过软件优化动态电源管理, 根据需求调整功率状态^[5]。根据工作负载动态调整电压和频率。例如, 在低负载时降低 CPU 频率, 以减少功耗。

关闭不必要的时钟域, 减少无效功耗。采用中断驱动而非轮询, 降低 CPU 空闲时的功耗, 利用定时器和低功耗模式实现设备按需唤醒。

3.2 PCB 制板工艺优化

多层 PCB 的电磁兼容性优化主要从信号完整性、电源完整性和电磁干扰控制入手。在层叠设计优化中, 关键信号层靠近接地层, 减少回路面积, 降低电磁干扰辐射。电源与地层相邻, 形成平面电容效应, 降低电源噪声。高频信号回流路径要短, 避免长路径回流形成天线效应, 增加电磁干扰, 关键信号下方保持完整的接地平面, 减少回流阻抗。在布线优化中, 要尽量避免跨电源区域布线, 防止电位差引起电磁系干扰问题。高速信号走线采用等长匹配, 降低时序误差和反射问题。

高密度互连 PCB 是一种高密度布线技术, 适用于智能手机、5G 设备、医疗电子等高端应用。高密度互连 PCB 采用微盲孔、埋孔设计, 减少过孔占用空间, 提高布线密度。通过降低信号路径长度, 提高高速信号完整性。微盲孔减少过孔高度, 降低高速信号损耗, 通过减少信号层变化次数, 可以降低信号反射和串扰。

4 结论

在嵌入式系统中的 PCBA 硬件调试方法中, 示波器、逻辑分析仪等手段可以优化信号完整性测试、电源管理测试, 提高故障定位效率。通过引入 AI 智能调试、自动化测试平台等前沿技术, 优化传统调试方法, 可以提升调试效率与硬件可靠性。通过优化高速信号布局、电源管理、散热设计, 可有效提高 PCBA 的稳定性与耐久性。AI 驱动的自动化调试和远程调试技术将进一步降低硬件测试成本, 提高调试精准度。

参考文献:

- [1] 黄侃, 徐勇, 李艳荣. 虚拟 GDB 远程调试技术及其在硬件仿真器中的应用[J]. 河北科技大学学报, 2023, 44(03): 211-218.
- [2] 马超. 面向可重构密码芯片的硬件调试器设计[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [3] 刘鹏, 刘杰, 贾讯. 一种嵌入式硬件辅助调试机制研究与实现[J]. 计算机工程, 2022, 48(09): 139-145.
- [4] 金生仁, 雷淑琴, 权岗, 等. DPZ1 型综合集成硬件控制器硬件安装与软件调试[J]. 气象水文海洋仪器, 2020, 37(01): 110-113.
- [5] 程晓鹏. 试析嵌入式系统硬件调试方法的研究与设计[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(11): 157, 159.