基于现有标准的汽车电子产品生产全流程质量及可靠性验证

周舟 谢家佩 黄梓彬 方贵练 何骁

（工业和信息化部电子第五研究所，广州 510610）

摘要：为系统研究汽车电子产品生产制造流程质量与可靠性验证方法，结合AEC-Q系列标准、ISO/IEC国际标准及主流主机厂标准，设计了汽车电子产品从元器件到印制板组件再到模块整个生产过程的验证方法与关键技术要求，将质量及可靠性要求嵌入生产过程中，形成了整体验证方案，清晰梳理了汽车电子产品在各个阶段需开展的质量及可靠性验证项目。

关键词：汽车电子 元器件 印制板组件 模块 质量与可靠性

中图分类号：U463.6；TN40 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250332

Design of Quality and Reliability Verification Scheme for the Entire Production Process of Automotive Electronic Products Based on Existing Standard System

Zhou Zhou, Xie Jiapei, Huang Zibin, Fang Guilian, He Xiao

(China Electronic Product Reliability and Environmental Testing Research Institute, Guangzhou 510610)

Abstract: To systematically investigate the quality and reliability verification methodologies for automotive electronics manufacturing processes, this study designs a comprehensive validation framework spanning from discrete components and printed board assemblies to finished modules, in accordance with AEC-Q series standards, ISO/IEC international standards, and mainstream OEM requirements. By integrating quality and reliability requirements directly into the production workflow, an overall verification scheme is established, which explicitly delineates the specific quality and reliability testing items required at each stage of the automotive electronics lifecycle.

Key words: Automotive Electronics, Components, Printed Circuit Board Assembly, Modular, Quality and reliability

1 前言

汽车电子产品是汽车的动力和底盘控制系统、车身及车载电子控制装置的总称[1-5]。汽车电子根据其生产加工的层级可以分为汽车电子元器件、汽车电子印制板组件及汽车电子模块。与传统消费电子相比，汽车电子产品面临更严苛的工作环境和更高的可靠性要求[6]。因此，汽车电子产品从元器件选型到最终模块应用各环节均需系统性的质量与可靠性验证。

目前，汽车工业已形成较为完善的质量及可靠性标准验证体系。如元器件的AEC-Q系列标准、零部件的ISO 16750、GB/T 28046等标准体系及通用、福特、现代等主机厂自用标准[7-14]。但现有标准体系或针对元器件、或针对模块，体系之间相对独立。因此，本文基于汽车电子可靠性验证的

作者简介：周舟（1993—），男，硕士学位，高级工程师，研究方向为电子产品封装、微组装及装联设计及其可靠性研究。

参考文献引用格式：

周舟，谢家佩，黄梓彬，等. 基于现有标准的汽车电子产品生产全流程质量及可靠性验证[J]. 汽车工艺与材料，2026(9)：67-72.

ZHOU Z, XIE J P, HUANG Z B, et al. Design of Quality and Reliability Verification Scheme for the Entire Production Process of Automotive Electronic Products Based on Existing Standard System[J]. Automobile Technology & Material, 2026(9): 67-72.

最新标准与实践，结合元器件从生产到使用的全流程梳理构建覆盖元器件、印制板组件及模块的全流程验证体系，为汽车电子产品的质量及可靠性验证提供理论依据和实践参考。

2 元器件质量与可靠性验证方法

如图1所示，汽车电子元器件、汽车电子用印制板组件及汽车电子模块之间通过生产装配工序实现递进式演变。元器件作为汽车电子的基本组成单位，是保障汽车电子产品质量及可靠性的底层基石。随着集成电路的发展，元器件的集成度越来越高，由此带来的工艺难度越来越大。产品的合格率随着工艺复杂程度的升高而降低，及时识别不良品、筛选可靠性不满足要求的风险品愈发重要。本节基于AEC-Q系列标准，系统梳理了元器件芯片设计、晶圆制造、封装及测试需要关注的质量及可靠性项目，形成元器件从生产到量产再到出厂全流程验证体系，如图2所示。



图1 汽车电子整体验证层级

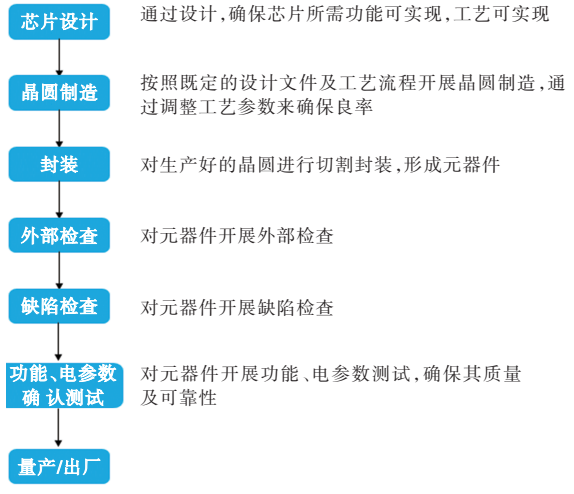


图2 元器件设计、生产制造及测试流程

2.1 晶圆制造

研究发现，许多影响元器件长期可靠性的根本性缺陷，如栅氧完整性不足、金属互连线电迁移以及工艺差错导致的参数漂移等，其根源均始于晶圆制造环节。因此，在晶圆制造阶段开展验证工作可有效确保芯片质量及可靠性，避免潜在缺陷被带入最终产品中。在晶圆制造阶段，需要开展的验证项目包括：

a. 芯片制造可靠性测试：热载流子注入（Hot Carrier Injection，HCI）测试、负偏置温度稳定性（Negative Bias Temperature Instability，NBTI）测试、应力迁移（Stress Migration，SM）测试、电迁移（Electromigration，EM）测试、经时击穿（Time Dependent Dielectric Breakdown，TDDB）测试。

b. 电性能验证：故障分类（Fault Grading，FG）、特征特性（Characterization，CHAR）。

c. 缺陷筛查：过程平均测试（Process Average Testing，PAT）、统计良率/分Bin分析（Statistical Bin/Yield Analysis，SBA）。

2.2 封装

封装可为芯片提供物理保护、散热通路及电气连接，使晶圆成为独立元器件[15]。若此阶段不对质量进行管控，即使晶圆性能正常，仍可能因封装过程引入的缺陷导致产品失效。这些缺陷包括但不限于键合线虚焊或断裂、焊球与基板连接不良、焊球脱落等。上述问题将导致后续电路板组装和最终产品使用出现异常。因此，在封装阶段进行严格验证，能够有效确保芯片的封装质量。

在封装阶段，需开展的验证项目主要为封装完整性测试，具体包括键合线剪切（Wire Bond Shear，WBS）测试、键合线拉脱（Wire Bond Pull，WBP）测试、焊球剪切（Solder Ball Shear，SBS）测试。

2.3 外部检查

完成封装后，元器件生产流程已结束，后续均为验证质量及可靠性的环节。首先是外部检查阶段，本阶段需对样品进行外部检查以识别明显的外部缺陷，快速筛选出存在外观异常的元器件，以避免流入缺陷检查阶段，浪费测试资源。

该阶段常用的外部检查手段均为无损检查，包括外观检查及X光检查。

2.4 缺陷检查

元器件缺陷检查是确保芯片功能性完好、

筛除潜在不良品的核心环节。制造过程中的工艺缺陷如可焊性不良、引线不牢固等在前述工序难以发现,会直接导致芯片功能失效或性能不达标。因此,缺陷检查确保了交付给客户的芯片均符合既定的要求,从根源上保障了终端产品的质量。

在缺陷检查阶段,需要开展的验证项目依旧属于封装完整性测试,但具体项目与上文封装阶段存在差异,包括可焊性(Solderability,SD)检查、物理尺寸(Physical Dimensions,PD)检查、引线完整性(Lead Integrity,LI)检查。

2.5　功能、电性能参数测试

元器件功能与电性能参数测试作为在元器件量产与出货前的最后测试阶段,是对芯片设计意图能否实现的最终确认。此验证阶段的作用是精确评估元器件在各种模拟工作环境下的表现及可靠性。在此环节出现的任何异常,都将对元器件的量产及出货带来影响,严重时需要重新设计。因此,严格的功能与电性能参数验证是确保元器件长期可靠的基本保障,具体验证项目包括:

a. 加速环境应力测试:温度-湿度偏置或偏置高加速应力(Temperature-Humidity-Bias or Biased HAST,THB/HAST)试验、高压釜或无偏置高加速应力试验或无偏置温度-湿度(Autoclave or Unbiased HAST or Temperature-Humidity(without Bias),AC/UHAST/TH)试验、温度循环(Temperature Cycling,TC)试验、功率温度循环(Power Temperature Cycle,PTC)试验、高温贮存(High Temperature Storage Life,HTSL)试验;

b. 加速寿命模拟测试:高温操作寿命(High Temperature Operating Life,HTOL)试验、早期失效比例(Early Life Failure Rate,ELFR)试验、非易失性存储器的耐久性、数据保持性及工作寿命验证(NVM Endurance, Data Retention, and Operational Life,EDR);

c. 电性能验证测试:短路特性(Short Circuit Characterization,SC)试验、软错误比例(Soft Error Rate,SER)试验、闩锁效应(Latch-UP,LU)试验、电分布试验(Electrical Distributions,ED)试验、电热导致栅极泄漏(Electrothermally-Induced Gate Leakage,GL)试验、电磁兼容(Electromagnetic Compatibility,EMC)试验、静电人体模型/机械模型(Electrostatic Discharge Human Body Model/Machine Model,HBM/MM)试验、充电器件模型(Electrostatic Discharge Charged Device Model,CDM)试验;

d. 封装腔体完整性测试:机械振动(Mechanical Shock,MS)试验、变频振动(Variable Frequency Vibration,VFV)试验、恒定加速度(Constant Acceleration,CA)试验、泄漏测试(Gross/Fine Leak,GFL)试验、封装跌落(Package Drop,DROP)试验、封盖扭矩(Lid Torque,LT)试验、芯片剪切(Die Shear,DS)试验、内部水蒸气(Internal Water Vapor, IWV)试验。

除此之外,还需再次开展2组统计分析类项目:

a. 电性能验证:故障分类统计(Fault Grading,FG)、特征特性统计(Characterization,CHAR);

b. 缺陷筛查测试:过程平均测试(Process Average Testing,PAT)、统计良率/分Bin分析(Statistical Bin/Yield Analysis,SBA)。

3　印制板组件质量与可靠性验证方法

印制板组件(Printed Circuit Board Assembly,PCBA)作为元器件加工形成的过渡产品,是元器件通过电子装联工艺与印制板(Printed Circuit Board,PCB)稳定连接后形成的组件。作为元器件到模组的中间态产品,其质量与可靠性直接影响后续成品。目前,与元器件、模块相比,PCBA专用的汽车电子领域标准较少,如2024年发布的AEC-Q007首次将PCBA纳入汽车电子可靠性验证体系,但该标准仅阐述了通过菊花链测试评估元器件上板后在温度循环条件下的失效分布[10];企业标准方面,仅有少数主机厂制定了专门针对PCBA可靠性验证试验的标准,如现代汽车标准ES90000-04[14]。

因此,本部分基于现有标准规范,结合工程实践及生产流程,设计了PCBA的质量及可靠性测试验证思路及验证项目。PCBA设计、生产及验证过程如图3所示。

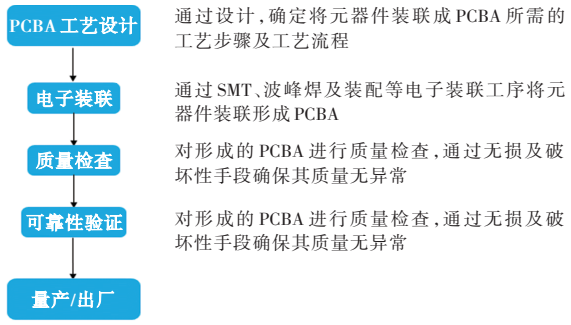


图 3 PCBA 设计、生产制造及测试流程

3.1 PCBA 质量检验

在汽车电子元器件的电子装联阶段开展质量检查是确保单个合格元器件构成可靠、稳定整车电子系统的关键步骤。此阶段的质量关注点将从元器件扩展到其与 PCB 之间的互连质量，包括是否存在桥接、虚焊、立碑等工艺缺陷，上述微小的质量问题，在汽车使用过程长时间的复合应力下，可能导致模组甚至整车功能衰退或性能故障。因此，PCBA 质量检查有助于及时识别制造过程的引入不良，改善工艺制程，进而提升产品质量。在该阶段开展的验证项目包括：

a. 焊接质量检查：外观检查、X 光检查、声扫检查、焊接形貌观察、焊点强度测试；

b. 电参数测试：通断检查（In-Circuit Test，ICT）、功能测试检查（Functional Test，FT）。

3.2 PCBA 可靠性检验

PCBA 可靠性检验用于识别通过前述质量检查的产品在长期严苛工况下的潜在工艺缺陷与薄弱点。此阶段通过模拟整车生命周期中所承受的极端环境应力来加速评估焊点、引脚、PCB 通孔及不同材料界面之间的连接耐久性。通过质量检查的焊点在长期使用过程中仍可能因潜在的质量风险而失效。因此，需通过前置的环境应力可靠性评价，确保所形成的 PCBA 满足汽车行业对安全性与耐用性的要求。可在该阶段开展的验证项目包括：

a. 耐机械应力可靠性测试：机械振动测试、机械冲击测试。

b. 耐热应力可靠性测试：温度循环测试、温度冲击测试、潮热测试、高加速寿命测试。

4 模块质量与可靠性验证

模块作为汽车电子产品装车前的最终形态，确保其质量及可靠性是对整个汽车电子生产全流程的最终保障，也是确保整车可靠运行的重要控制措施。从质量及可靠性角度，模块的生产制造及测试过程可简化为图 4 所示的分析-开发-验证（Analysis-Development-Verification，ADV）流程，从零件的确认及验证准备开始，需经历分析、开发、设计验证、生产验证，最后量产。在整个模块生产制造过程中，质量及可靠性验证项目需贯穿其中，以确保产品风险及时被发现、被纠正，避免流入下道工序中，增加后续识别及纠错成本，以提升产品质量及可靠性水平。

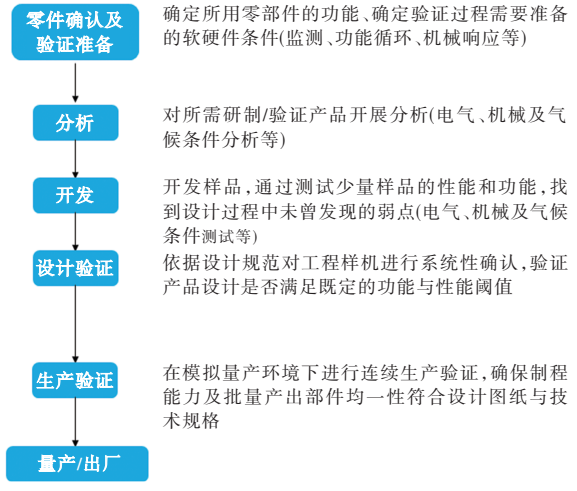


图 4 模块的生产制造及测试流程

4.1 零件确认及验证准备

零件确认及验证准备作为整个模块生产制造过程验证工作的筹备阶段，核心任务是确定生产所用零件（元器件、PCBA 等）的功能，确认后续验证过程所需的软硬件条件（监控、功能循环和机械响应条件等）。在此阶段，需明确测试计划，识别所有适用的标准与要求，准备必要的资源（如设备、样品数量及夹具等）。本阶段验证对象主要为模块所用零件，因此，常作为后续验证的先行步骤，需多次开展。具体项目包括：

a. 零部件测试：5 点功能/参数测试、1 点功能/参数测试、功能循环测试、外观检查、切片检查、尺寸确认。

b. 测试能力确认：连续监测能力确认、热循环曲线开发测试能力确认、振动响应测试能力确认、测试夹具需求。

4.2 分析

分析作为产品研制过程的理论奠基阶段，核

心任务是在产品设计之前,通过尽可能贴近实际工况的电气、机械、热力学等理论计算与仿真,系统性识别潜在的设计缺陷与薄弱环节,为后续的试验验证评估提供有效的试验条件及数据参考,是整个项目成功的基石。在该阶段需要开展的验证工作包括:

a. 电气工况分析:标称及最坏情况性能分析、短路/开路分析。

b. 机械工况分析:谐振频率分析、高海拔运输压力分析、塑料卡扣紧固件分析、冲击分析。

c. 气候条件分析:高海拔作业过热分析、印刷电路板组件与外壳的热机械疲劳分析、无铅焊点分析。

4.3　开发

开发是将设计思路转化为实物的阶段,该阶段首次出现实物产品,利用实物样品,通过一系列严苛的电、机、气候环境开发测试,主动激发并暴露设计的极限与故障模式。开发将理论分析转化为实际数据,为设计优化提供了最直接的依据,是提升产品质量、发现并解决设计缺陷的关键迭代过程。在该阶段需要开展的验证工作包括:

a. 电气性能测试:快速启动测试、极性反转测试、过压测试、状态变化波形表征。

b. 机械性能测试:高加速寿命(Highly Accelerated Life Test,HALT)试验。

c. 气候条件测试:温度测量、低温唤醒测试、结霜试验、高加速应力(Highly Accelerated Stress Test,HAST)试验。

4.4　设计验证

设计验证(Design Verification,DV)是对经过多轮设计迭代定型产品进行考核的阶段,在最终的原型件上,执行全面、定量的环境与耐久性测试,以验证其是否满足所有设计要求。此阶段用于验证产品设计是否能在预期的各种恶劣环境下可靠工作,是产品从设计转向试产的重要决策依据。在该阶段需要开展的验证工作包括:

a. 电气性能测试:寄生电流测试、电源中断测试、电池电压跌落测试、脉冲叠加电压测试、输入/输出对蓄电池和接地间歇性短路测试、输入/输出对蓄电池和接地持续短路测试、包括直通在内的多电源和多接地短路测试、断路-单线中断测试、断路-多线中断测试、接地偏移测试、电源偏移测试、离散数字输入阈值电压测试、过载-所有电路测试、过载-保险丝保护电路测试、绝缘电阻测试、曲柄脉冲能力和耐用性测试、切换电池线路测试、自动启动瞬态电压测试、电池线路瞬态测试。

b. 机械性能测试:带热循环的振动试验、机械冲击-闭合测试、机械冲击-坑洞测试、机械冲击-碰撞测试、外壳挤压-弯管载荷测试、外壳挤压-人脚载荷测试、连接器测试-端子卸出力测试、连接器测试-连接器插入力测试、连接器测试-连接器分离力测试、连接器测试-未自锁连接器分离力测试、连接器错误安装测试-侧向力测试、连接器错误安装测试-人脚的载荷测试、自由跌落测试、微动腐蚀退化测试。

c. 气候条件测试:高温退化测试、温度冲击-空气介质测试、功率温度循环测试、热冲击/溅水测试、湿热循环测试、恒定湿热测试、盐雾测试、非操作状态下最低温测试。

d. 外壳使用性能测试:耐灰尘测试、防水密封性测试、泄漏检查、结冰测试、功能耐糖水损伤测试。

4.5　生产验证

生产验证是对待量产或出厂产品开展的最终验证。除生产验证阶段需开展的包装验证外,该阶段需重复设计验证中最关键或曾出现问题的测试项目,核心目的是验证产线稳定性及一致性,确保生产线能够持续、一致地生产出符合设计标准的产品。

在设计验证阶段及前述阶段最关键或曾出现问题的项目,本文不再说明。生产验证阶段需要开展的项目包括:

a. 机械性能测试:带热循环的振动试验、船运过程振动测试。

b. 气候条件测试:湿热循环测试、恒定湿热测试。

本阶段验证完成,产品可开展量产工作及批量出货。至此,汽车电子产品生产全流程质量及可靠性验证整体框架已构建完成,如图5所示。

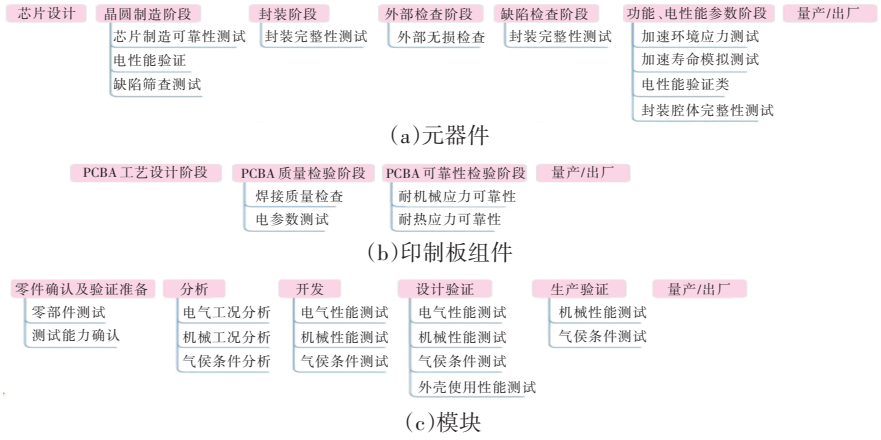


图5 汽车电子产品全流程质量及可靠性验证方法

5 结束语

本文基于AEC-Q系列标准、ISO/IEC国际标准、主机厂内部规范及工程实践经验，系统梳理了汽车电子产品从元器件到PCBA及模块的各生产验证阶段，构建了从元器件到模块全流程的协同验证体系。本体系明确了在汽车电子产品各阶段需开展的质量及可靠性项目，各阶段的验证项目可有效覆盖汽车电子产品的质量及可靠性需求。

由于本方案提供的验证思路及验证项目均基于现行的标准及工程经验，随着汽车智能技术的发展，车辆自动驾驶、路网协同能力进一步提升，汽车电子产品的复杂程度及可靠性要求必将进一步提升。因此，后续仍需结合未来的发展趋势，进一步完善本协同验证体系。

参考文献：

[1] 刘泽琨. 产业政策对城市产业集聚的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2025.

[2] 冯虎. 汽车电子技术发展趋势与创新应用研究[J]. 汽车测试报告, 2025(10): 16-18.

[3] 常君, 叶丹, 王寅冬, 等. 汽车电子PCB板级电磁兼容设计[J]. 汽车电器, 2025(5): 73-74+78.

[4] 巴泽英, 李天豪, 魏小雨, 等. 柔性电子技术在汽车上的应用与展望[J]. 汽车工艺与材料, 2025(7): 1-18.

[5] 陈一元, 周建文, 方刚. 智能汽车电子电器产品检测市场发展探析[J]. 质量与认证, 2025(11): 76-77+80.

[6] 任杰. 高低温载荷作用下车载电子焊点电迁移行为研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2022.

[7] Failure Mechanism Based Stress Test Qualification for Integrated Circuits: AEC-Q100 Rev-J1[S/OL]. [2025-12-14]. http://www.aecouncil.com/files/Documents/AEC%20Q100-Rev%20J1.pdf.

[8] Failure Mechanism Based Stress Test Qualification for Discrete Semiconductors (Base Document): AEC-Q101 Rev-E[S/OL]. [2025-12-14]. http://www.aecouncil.com/Documents/AEC_Q101_Rev_E_Base_Document.pdf.

[9] Stress Test Qualification for Passive Components (Base Document): AEC-Q200 Rev-E base[S/OL]. [2025-12-14]. http://www.aecouncil.com/Documents/AEC_Q200_Rev_E_Base_Document.pdf.

[10] Failure Mechanism Based Testing Guidelines for Components Mounted to A Printed Board: AEC-Q007[S]. [2025-12-14].

[11] Road Vehicles-Environmental Conditions and Testing for Electrical and Electronic Equipment Part 1: General: ISO 16750-1: 2023[S/OL]. [2025-12-14]. https://www.iso.org/standard/77578.html.

[12] 全国汽车标准化技术委员会. 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第1部分: 一般规定: GB/T 28046.1—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

[13] General Motors Corporation. General Specification for Electrical/Electronic Components - Environmental/Durability: GMW 3172[S/OL]. [2025-12-14]. https://standards.globalspec.com/std/14597165/GMW3172.

[14] HYUNDAI MOTOR. ES90000-04 Environmental Reliability Test Spec. Of Lead-Free Soldering for Vehicles[S]. 2015.

[15] 盛方辉, 梁澎坚, 马宝光, 等. 车规级芯片封装界面可靠性研究进展[J]. 汽车工艺与材料, 2025(7): 19-30.

AT&M