

项目二、印制板组件工艺与寿命预测模型系统及应用

一、项目名称：印制板组件工艺与寿命预测模型系统及应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省科学技术厅

提名意见：

本项目面向印制板组件在恶劣环境中高可靠服役的需求，针对现有仿真模型准确度低，进行焊点可靠性分析时寿命预测困难等问题，通过开展印制板组件工艺与寿命预测模型系统研究及应用，深入分析印制板组件在多物理场耦合下的失效机理，将数字模型与实物验证相结合，构建了工艺模型和寿命预测模型，获取了产品可靠性关键指标与工艺控制参数之间的关系，在源头上消除了组件焊点的质量隐患，避免了由于焊点失效导致的印制板组件故障，提高了产品的质量与可靠性，从而节省大量时间和经济成本。该项目技术复杂，研究难度大，技术上有较大创新，拥有自主知识产权，自主可控。项目成果在军用印制板组件的装配与生产中得到广泛应用，效益显著。该项目所述内容真实，主要完成单位、主要完成人组成及排序无争议，申报材料属实。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖。

三、项目简介

本项目面向印制板组件在恶劣环境中高可靠服役的需求，针对现有仿真模型准确度低，进行焊点可靠性分析时寿命预测困难等问题，通过开展印制板组件工艺与寿命预测模型系统研究及应用，深入分析印制板组件在多物理场耦合下的失效机理，将数字模型与实物验证相结合，构建了工艺模型和寿命预测模型，获取了产品可靠性关键指标与工艺控制参数之间的关系，准确预测了焊点在不同环境载荷下的寿命，提高了产品的质量与可靠性。项目主要技术内容和创新性成果如下：

（1）提出了一种基于激光干涉、差值拟合的回流焊焊膏弹性模量测量方法，实现了焊膏弹性模量的原位测量，解决了焊膏在回流焊过程中挥发以及焊膏与铜箔发生的反应导致弹性模量难以测量的问题，为焊点成型过程的精确模拟仿真提供了重要的数据支撑。

（2）建立了印制板组件服役过程的热-力-电多物理场耦合数学模型，提出了基于损伤归一的多物理场耦合下焊点寿命预测方法，通过加载温循、振动、加电等多种载荷，实现了焊点寿命的精确预测。

（3）发明了基于纳米涂层钢网、架桥法预制焊料的特殊关键器件低空洞率焊接工艺方法，关键器件热风回流焊焊接空洞率降低至 10%，产品一次调试通过率提升至 98%。

基于本项目，授权专利 4 件，发表 SCI 论文 3 篇：

序号	知识产权类别	知识产权名称	授权号/期刊信息	专利国别
1	发明专利	基于差值法的回流焊过程中焊料弹性模量测量方法	ZL202010793383.8	中国
2	实用新型专利	一种 QFP 器件引脚变形校型工装	ZL202122469964.9	中国
3	实用新型专利	一种射频绝缘子焊接辅助装置	ZL202120433550.8	中国
4	实用新型专利	一种用于单片微波集成电路芯片批量共晶焊接的装置	ZL202120423394.7	中国
5	论文	Effect of the reflow process on IMC growth for different devices and complex	Smart Mater. Struct., 2022,31:115028	

6	论文	The reliability of the complex components under temperature cycling, random vibration, and combined loading	Crystals, 2023,13:473	
7	论文	The study of the reliability of complex components during the electromigration process	Micromachines, 2023,14:499	

本项目的技术指标主要包括（支撑材料见附件 14 成果鉴定证书、附件 17 项目验收测试报告）：

- （1）焊点回流焊模拟温度与实测温度误差 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ ；
- （2）焊点外形模拟结果准确度 $\geq 90\%$ ；
- （3）IMC 厚度模拟结果误差 $\leq 0.5\mu\text{m}$ ；
- （4）单环境载荷下（温循、振动、加电），寿命预测准确度 $> 92\%$ ；
- （5）热-力-电多物理场耦合环境载荷，寿命预测准确度 93%；
- （6）印制板组件焊点形态一致性 $> 91\%$ ；
- （7）LGA 器件焊接空洞率 $\leq 10\%$ 。

本模型系统在满足中电科 20 所印制板组件可靠性设计与工艺设计的需求的同时，亦可满足印制板组件行业可靠性设计与工艺设计需求，寿命预测模型系统在中电科瑞测公司、深圳市华盛通用科技有限公司等 3 家单位得到应用，仿真得到的寿命与试验寿命误差小，准确度高，可指导产品可靠性设计，改变了原来可靠性设计中需要开展大量环境试验的情况，节省了共计 1101 万元的可靠性试验费用；回流焊工艺模型在西安晶捷电子、西安铭朗电子科技有限责任公司等 5 家单位进行应用，模型得到的回流焊接曲线、焊点形态与实际结果偏差小，数据有效、准确可信，在印制板组件研制生产中，采用模拟仿真手段进行工艺参数的设计，替代了原有的工艺试验过程，节省了共计 1739 万元的工艺试验费用，节省成本共达到 2840 万元，效益显著。

四、客观评价

2023 年 12 月 21 日，中国电子科技集团有限公司对本项目进行了技术鉴定，经过专家质询与讨论，形成以下意见：

本项目针对印制板组件在恶劣环境服役时，焊点在综合应力下易开裂、现有仿真模型准确度低、寿命预测困难、特殊关键器件焊接空洞率高等问题，开展了工艺攻关，构建了工艺模型和寿命预测模型，获取了产品可靠性关键指标与工艺控制参数之间的关系，消除了组件焊点的质量隐患，提高了产品的质量与可靠性。形成的主要技术创新如下：

- 1.提出了一种基于激光干涉、差值拟合的回流焊焊膏弹性模量测量方法，实现了焊膏弹性模量的原位测量，为焊点精确成型过程的模拟提供了重要的数据支撑。
- 2.建立了印制板组件服役过程的热-力-电多物理场耦合数学模型，提出了基于损伤归一的焊点多物理场下寿命预测方法，通过加载温循、振动、加电等多种载荷，实现了焊点寿命的精确预测。
- 3.发明了基于纳米涂层钢网、架桥法预制焊料的特殊关键器件低空洞率焊接工艺方法，热风回流焊焊接空洞率降低至 10%，产品一次调试通过率提升至 98%。

本项目**技术复杂、研究难度大**，在印制板组件多物理场耦合建模及寿命预测方面具有**较大技术创新**，拥有自主知识产权，自主可控。项目总体达到**国内领先水平**，其中多物理场耦合下焊点寿命预测方法达到**国际先进水平**，成果已应用于印制板组件的装配生产与试验中，**效益显著**。

五、应用情况

印制板组件工艺与寿命预测模型系统已应用于中电科瑞测（西安）科技服务有限公司、西安铭朗电子科技有限责任公司、深圳市华盛通用科技有限公司等单位的印制板组件的实际装配生产与试验中，情况如下：

主要单位应用情况表

序号	单位名称	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	中电科瑞测（西安）科技服务有限公司	多个产品的可靠性试验、研究	2021 年 6 月 -2024 年 6 月	陆强/02988788341
2	西安铭朗电子科技有限责任公司	印制板组件回流焊生产过程	2021 年 6 月 -2023 年 6 月	杜铁军 /18602900368
3	西安晶捷电子技术有限公司	印制板组件回流焊生产过程	2021 年 10 月 -2023 年 12 月	赵俊伟 /13389209068
4	西安瑞特三维科技有限公司	多种器件焊点模型建立	2021 年 9 月 -2024 年 5 月	牛博/1896676876
5	陕西龙伸电气有限公司	印制板组件回流焊生产过程	2021 年 12 月 -2024 年 2 月	谭革/18992832868
6	深圳市华盛通用科技有限公司	多种器件焊点模型建立，印制板组件焊点寿命预测	2021 年 6 月 -2023 年 6 月	杨革/13902933352
7	芯派科技（东莞）有限公司	印制板组件可靠性试验过程	2022 年 3 月 -2023 年 5 月	吴桂昌 /13412473277
8	陕西华芯半导体科技有限公司	印制板组件回流焊生产过程	2022 年 1 月 -2023 年 7 月	郭军锋 /17792215032

六、主要知识产权和标准规范等目录

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	专利	基于差值法的回流焊过程中焊料弹性模量测量方法	中国	ZL202010793383.8	2023 年 03 月 10 日	5774491	西安电子科技大学	田文超；史以凡；陈勇；陈帅；王文龙
2	专利	一种 QFP 器件引脚变形校型工装	中国	ZL202122469964.9	2022 月 05 月 13 日	16516373	中国电子科技集团公司第二十研究所	金星；王文龙；陈帅；谭小鹏
3	专利	一种射频绝缘子焊接辅助装置	中国	ZL202120433550.8	2021 年 11 月 16 日	14714843	中国电子科技集团公司第二十研究所	刘志丹；赵志平；张飞；陈帅；罗小宇
4	专利	一种用于单片微波集成电路	中国	ZL202120423394.7	2021 年 12 月 28 日	15323809	中国电子科技	陈帅；赵文忠；吴

		芯片批量共晶焊接的装置					集团公司第二十研究所	昕雷；刘志丹
5	论文	Effect of the reflow process on IMC growth for different devices and complex components	欧洲	2022,31:115028	2022 年 11 月 01 日	Smart. Mater. Struct.	西安电子科技大学；中国电子科技集团公司第二十研究所	崔昊；田文超；赵旭涛；陈帅；陈志强
6	论文	The Reliability of the Complex Components under Temperature Cycling, Random Vibration, and Combined Loading for Airborne Applications	欧洲	2023,13:473	2023 年 03 月 09 日	Crystals	西安电子科技大学	崔昊；田文超；徐汉阳；王恒；黄家波；彭春喜；陈志强
7	论文	The Study of the Reliability of Complex Components during the Electromigration Process	欧洲	2023,14:499	2023 年 02 月 21 日	Micromachines	西安电子科技大学	崔昊；田文超；张一名；陈志强
8	论文	Effect of Electromigration on Interfacial Reaction In Ni/Sn63Pb37/Cu BGA Solder Joints	美国	2021	2021 年 09 月 14 日	2021 22 nd ICEPT	中国电子科技集团公司第二十研究所	张飞；陈帅；刘志丹；王文龙
9	论文	Reflow Soldering Process Optimization	美国	2021	2021 年 09 月 14 日	2021 22 nd ICEPT	中国电子科技集团公司第二	金星；王文龙；赵文忠；张雨婷；谭

		Based on Surface Evolver Solder Joint Shape Simulation and Finite Element Analysis of PCB Assembly					十研究所；西安电子科技大学	小鹏；陈帅
10	论文	LGA 器件焊点缺陷分析及解决措施	中国	2021,1,52	2021 年 01 月 01 日	印制电路信息	中国电子科技集团公司第二十研究所	王文龙；陈帅；谭小鹏

七、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
陈帅	1	无	高级工程师	中国电子科技集团公司第二十研究所	中国电子科技集团公司第二十研究所	总体方案设计，组织项目实施
田文超	2	无	教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学	模型算法构建
赵文忠	3	副总工程师	研究员	中国电子科技集团公司第二十研究所	中国电子科技集团公司第二十研究所	系统方案设计，技术顾问
张飞	4	无	高级工程师	中国电子科技集团公司第二十研究所	中国电子科技集团公司第二十研究所	寿命预测模型构建
金星	5	无	高级工程师	中国电子科技集团公司第二十研究所	中国电子科技集团公司第二十研究所	焊点形态模型构建
王文龙	6	无	高级工程师	中国电子科技集团公司第二十研究所	中国电子科技集团公司第二十研究所	传热模型构建、回流焊接曲线仿真
崔昊	7	无	讲师	大连交通大学	西安电子科技大学	加速寿命试验设计

八、主要完成单位及创新推广贡献

完成单位	排名	对本项目科技创新和应用推广情况的贡献
中国电子科技集团公司第二十研究所	1	中国电子科技集团公司第二十研究所为主承研单位，负责项目总体方案设计，技术研究、关键技术与难点攻关，组织项目的实施、监督与验收。

		在本项目中，中国电子科技集团公司第二十研究所突破基于最小能量原理的焊点成型过程模拟技术，基于损伤归一的焊点多物理场耦合下寿命预测技术关键技术，参与电场条件下焊点原子迁移仿真技术关键技术研究，提出了“基于损伤叠加的热-力-电多物理场耦合下焊点寿命预测方法”和“基于纳米涂层钢网、架桥法预置焊料的特殊关键器件低空洞率焊接工艺方法”。申请发明专利《一种 LGA 器件低空洞率焊接工艺方法》、《一种底部可视化 BGA 工艺器件制作方法》、《微波集成电路芯片共晶焊接工艺方法》，实用新型专利《一种 QFP 器件引脚变形校型工装》、《一种射频绝缘子焊接辅助装置》、《一种用于单片微波集成电路芯片批量共晶焊接的装置》。
西安电子科技大学	2	西安电子科技大学为联合承研单位，参与项目总体方案设计，负责研究和关键技术与难点攻关，按照要求开展项目研究与实施工作。 在本项目中，西安电子科技大学突破电载荷下基于迁移散度方程的焊点空洞演化仿真技术，建立焊点在电载荷下的损伤模型，参与基于最小能量原理的焊点成型过程模拟技术，基于损伤归一的焊点多物理场耦合下寿命预测技术等关键技术研究，提出了“基于激光干涉、差值拟合的回流焊焊膏弹性模量测量方法”。申请发明专利《基于差值法的回流焊过程中焊料弹性模量测量方法》。

九、完成人合作关系说明

本项目主要 7 位完成人来自中国电子科技集团公司第二十研究所与西安电子科技大学，均为任务来源课题的项目组成员。第一完成人陈帅是本项目的负责人，从 2019 年开始牵头对任务来源课题进行论证，全程负责项目的论证、实施、结题验收以及成果鉴定。第二完成人田文超为本项目团队核心成员，全程参与项目的论证、实施与结题验收。第三完成人赵文忠，第四完成人张飞，第五完成人金星，第六完成人王文龙均来自中国电子科技集团公司第二十研究所，是任务来源课题的核心成员。第七完成人崔昊是第二完成人田文超的博士生，全程参与了任务来源课题实施，7 名完成人均有专利授权或论文发表。