

波峰焊引发的PCBA翘曲仿真分析及对策

胡涛 周信芳 郑俊彬 李亮

(广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 广州 511434)

摘要: 针对试生产过程中的装配印制板(PCBA)翘曲而导致的安装困难问题进行初步分析,且通过特定的试验对比,找出了关键因素波峰焊。使用ABAQUS软件对波峰焊的过程进行热结构耦合有限元仿真分析,得出造成翘曲的原因有连接器基座材料耐温性差、基座材料与PCBA材料热膨胀系数相差大、工艺过程导致的受热不均等,同时出具了专业建议并制定了一系列验证方案,通过对各类方案的进一步验证和改进,最终成功地解决波峰焊导致的PCBA翘曲问题。

关键词: 有限元分析 波峰焊 PCBA 翘曲 热结构耦合

中图分类号: U466 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20230019

Simulation Analysis and Countermeasures of PCBA Warpage Caused by Wave Soldering

Hu Tao, Zhou Xinfang, Zheng Junbin, Li Liang

(GAC Automobile Research & Development Center, Guangzhou 511434)

Abstract: This paper analyzed the problem of difficult installation of Printed Circuit Board Assembly (PCBA) caused by warping during trial production and identified wave soldering as the key factor through specific test comparison. ABAQUS was applied to perform thermal-structural coupling FEA simulation analysis of wave soldering process, it was concluded that poor temperature resistance of connector base material, large difference in thermal expansion coefficient between connector base material and PCBA material, uneven heating caused by process were the causes of PCBA warpage. Therefore, professional suggestions were provided and a series of verification schemes were developed for verification and improvement, which eventually eliminated PCBA warpage caused by wave soldering.

Key words: FEA, Wave soldering, PCBA, Warpage, Thermal-structural coupling

1 前言

随着电子产品集成度的不断提高,连接器的数量以及连接器的基座Pin脚数也相应增加,进而导致带连接器基座的装配印制板(Printed Circuit Board Assembly, PCBA)安装困难,对外壳针孔的位置度、精度提出了更高的要求,这也对连接器基座的设计、波峰焊的工艺参数控制、PCBA翘曲度控制、外壳制造工艺提出了更严苛的标准。由于影响翘曲的因素众多,部分因素的排除难以通过试

验进行验证,部分影响因子的验证成本高、周期长,且不能量化因子的影响程度,而仿真可以弥补以上不足。

本研究通过ABAQUS软件对PCBA上的连接器基座波峰焊工艺过程进行模拟,确认了此工艺过程导致PCBA翘曲的原因及相关因子的影响程度。

2 问题现状

连接器作为电子控制单元(Electronic Control

作者简介:胡涛(1983—),男,工程师,硕士学位,研究方向为结构强度。

参考文献引用格式:

胡涛,周信芳,郑俊彬,等.波峰焊引发的PCBA翘曲仿真分析及对策[J].汽车工艺与材料,2023(12):20-25.

HU T, ZHOU X F, ZHENG J B, et al. Simulation Analysis and Countermeasures of PCBA Warpage Caused by Wave Soldering[J]. Automobile Technology & Material, 2023(12): 20-25.

Unit, ECU)基本组成部分,其与上盖和下盖的配合关系是决定整个ECU能否流畅安装的关键。大部分ECU的连接器数量较少且PIN针也少,其安装方向多为横向安装(图1),但也存在连接器和PIN针数量多且空间受限而不得不纵向安装连接器的情况(图2),此类安装引发安装问题的概率较其它类型要大,文中所涉及的ECU安装问题即为典型表现。



图1 连接器横向安装的ECU

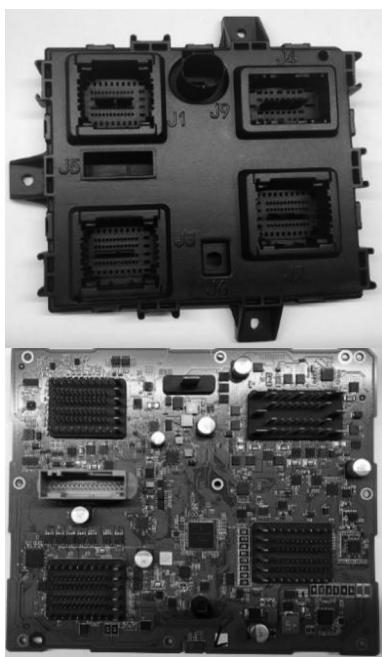


图2 连接器竖向安装的ECU

翘曲作为PCBA制作过程中不可避免的现象,容易造成焊点失效和芯片开裂损坏^[1],是造成PCBA品质不良及装配困难的关键因素。电子制造业协会行业内通常允收的翘曲度标准为0.75%^[2],在实际生产中为满足不同产品的需求,对翘曲度的要求有所不同。例如,某些手持类电子产品因其线路板“轻和薄”的特点,即使是平整的手机产品,印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)翘曲度一般要求 $\leq 0.5\%$ ^[3]。因此,如何针对特定的产品设

立特定的标准,即如何通过对设计布局优化、材料参数选择、工艺过程调整等措施尽可能地减小翘曲度便成了研究的重点。

3 问题解析

在取得R板样件后,通过外观查看发现PCBA有明显的翘曲,板子沿进板方向,四角向上翘曲,如图3所示。试装时装配困难。观察装配完的组件,发现连接器基座内凹变形,PIN针向基座中心倾斜靠拢,如图4所示,导致在PIN针过上盖孔位时产生干涉,难以对齐,装配困难。



图3 PCBA R板样件

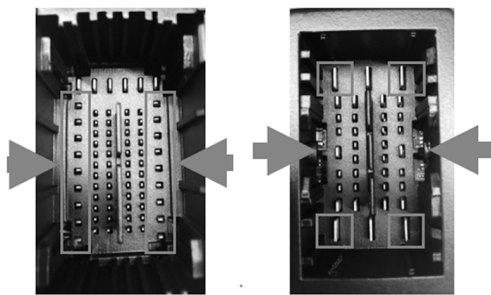


图4 PIN针向内倾斜

经比对同类型的PCBA后发现,此次样件翘曲度较大。进一步对比同类型PCBA制板工艺和生产工艺,发现了4个不同点,分别是制版厂家、拼板工艺、工艺边桥接方式和连接器焊接方式,如表1所示。

表1 同类型板的制板及生产工艺对比			
名称项目	T板	L板	R板
制板厂家	S厂家	S厂家	A厂家
拼板工艺	长边侧	长边侧	短侧边
工艺边	邮票孔	邮票孔	V-CUT
连接器焊接工艺	手焊	手焊	波峰焊
PCBA变形量	微	微	大

依据表中针对R板的不同点,分别对拼板工艺、桥接方式、板材、PIN针孔大小进行针对性的试验,发现皆能复现PCB向上翘曲的问题,而将波峰焊改为手动焊接后能有效降低翘曲度,由此判定

波峰焊为影响翘曲度的主要因素^[4]。

4 问题细究

PCB 产生翘曲的根本原因是制成 PCB 的原材料与半成品或与标贴封装基板、连接器基座等热膨胀系数 (Coefficient of thermal expansion, CTE) 不匹配,引起在生产过程和工艺过程中的热应力和机械应力不均衡,并因此而发生有规则和无规则的变形,最终导致各种形式的翘曲^[5-6]。经对比 T 板、L 板及 R 板,发现波峰焊比手焊多了预热时间,波峰焊焊头比手焊焊头大很多,因此,怀疑是预热温度及焊头大小引发的热传导速度的不同导致 PCB 与连接器基座热膨胀变形差异的扩大。

由于接插件基座材料为聚对苯二甲酸丁二酯加入 20% 玻纤 (Polybutylene Terephthalate with 20% Glass Fibre, PBT+GF20),其玻璃态转化温度 (Glass Transition Temperature, TG) 为 200 °C,而波峰焊工艺过程中焊接时的温度为 270 °C。在波峰焊的过程中,样件焊接速度较量产时的焊接速度低,且为单焊头 (量产时为多焊头)。以上可能是翘曲的重要原因。

为寻求问题产生的根本原因,加快验证速度,减少验证成本,基于 ABAQUS 软件对波峰焊的过程进行热结构耦合仿真分析,并根据实际情况进行优化,提出相应了对策和改进方向。

5 仿真分析

5.1 理论基础

翘曲产生的重要原因是热变形不均,ABAQUS 作为一种常用的热结构耦合仿真分析软件在此领域应用广泛,且能高效实现温度场与应力场的耦合^[7]。此处的温度场是指某一瞬间,空间或物体中所有各点温度分布的总称^[8]。温度场是个数量场,可以用一个数量函数表示。一般来说,温度场 T 是空间坐标和时间的函数,即:

$$T=f(x,y,z,t) \tag{1}$$

式中, x, y, z 为空间直角坐标; t 为时间。

此时,经过热传导、热对流、热辐射,在一定的热边界条件下,可得瞬态有限元方程:

$$C_T \dot{T} + K T = P \tag{2}$$

式中, C_T 为热容矩阵; \dot{T} 为温度场的梯度矩阵; K 为由单元热传导矩阵、单元热对流矩阵和单元热辐射矩阵组成的传热系数矩阵; P 为传导、对流、辐射给温度场的节点热流矢量及由内部热源产生的节点热流矢量组成的矩阵。

形变计算则是在弹性力学的平衡方程、几何方程和物理方程^[9]基础上,增加了温度载荷,计算出由温度引起的应变以及随之而产生的变形,服从热膨胀规律,即 $\varepsilon = \alpha(t_1 - t_0)$ 。由此可得,热弹性理论的物理方程如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z) + \alpha T] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z) + \alpha T] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_y + \sigma_x) + \alpha T] \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \\ \gamma_{xz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xz} \\ \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz} \end{cases} \tag{3}$$

式中, ε 为正应变; σ 为正应力; E 为弹性模量; μ 为泊松比; α 为热膨胀系数; γ 为切应变; τ 为切应力。

将式公式(1)、公式(2)所得温度场数值导入到公式(3)对应的数值模型,结合几何方程及平衡方程便可求出应变及位移。

5.2 仿真过程

为充分模拟波峰焊导致的翘曲过程,需尽量还原整个工艺过程,设置相对准确的输入条件和边界条件,选择合理的计算模块。基于经典波峰焊的工艺曲线过程^[10],采用瞬态热模块模拟波峰焊从预热到波峰焊再到冷却的整个过程。为简化计算模型,缩短计算周期,对仿真对象进行简化,将各对象材料力学属性设为各向同性,主板简化为光板,连接器基座简化为一根 PIN 针和一块基座,简化过程如图 5 所示。

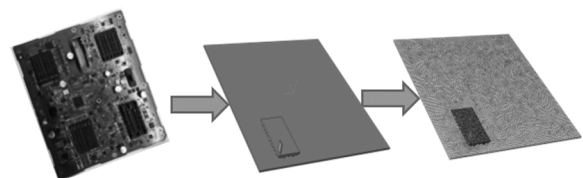


图 5 几何模型和数值模型

瞬态热计算分为3步,按照静电波峰焊工艺曲线,首先对PIN针一脚脚底部将预热温度由100℃加热到270℃,其次维持波峰焊温度270℃时间1.5s,最后自然冷却至100℃焊炉温度,如图6所示。

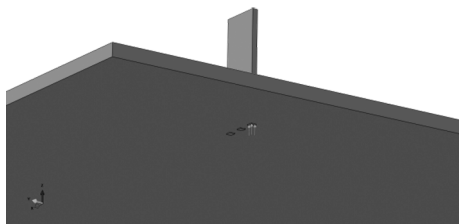


图6 温度施加点

通过瞬态计算,得到整个PCBA的瞬态温度场,将该温度场数据导入结构模块进行耦合,根据实际材料情况,设置相应材料的各向异性热参数,并以PCB远端一角进行约束,以减少对载荷施加端的影响,如图7所示。

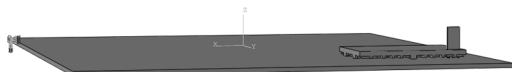


图7 边界约束

5.3 仿真结果

经计算可求得各时间点的温度场、各对象的应力云图和位移云图。由图8的温度云图可知,在焊头焊接完毕时刻,局部温度非常高,相对PCBA的其它部位温度差明显,势必导致高温部位的热变形高于其它部位。

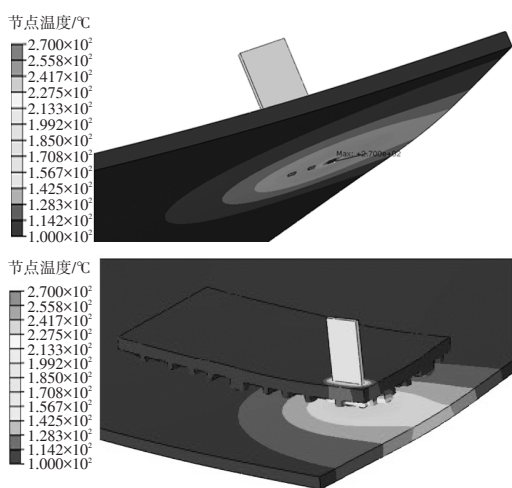
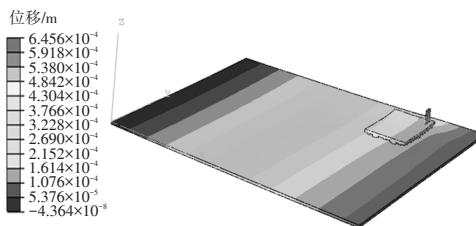


图8 PCBA波峰焊过程温度云图

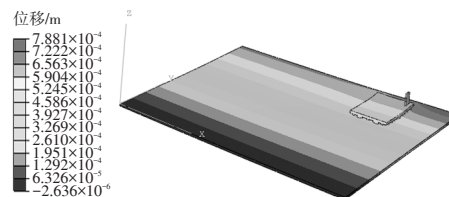
为更清楚地研究翘曲真因,着重关注PCBA在焊接完时刻3个方向的位移云图,如图9所示。

从图9可知,连接器基座与PCB在3个方向的位移值不一致,PCB的位移值相对偏大,如此便导

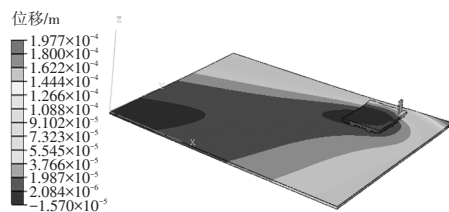
致PCB膨胀比连接器基座更大而引发翘曲。此外,由图9可知,基座和PCB在X和Y方向的位移差距非常小,而在Z方向的差距较大。原因在于X和Y方向的位移主要是由预热温度所产生的热膨胀差异,而Z方向除了已有的预热温度,还有波峰焊焊头施加的270℃高温。由于焊头的持续焊接时间约为1.5s,且PIN针材料为铜合金,导热系数远大于基座和PCB。此外,Z方向是厚度方向,导热路径相对较短,因此,Z向温度不均衡性要比其余2个方向大的多。



(a) X方向变形



(b) Y方向变形



(c) Z方向变形

图9 PCBA 3个方向位移云图

对Z方向云图放大且量化后如图10所示,基座连接器内凹且上端面的相对位移值约为0.3mm,目测翘曲现象明显。

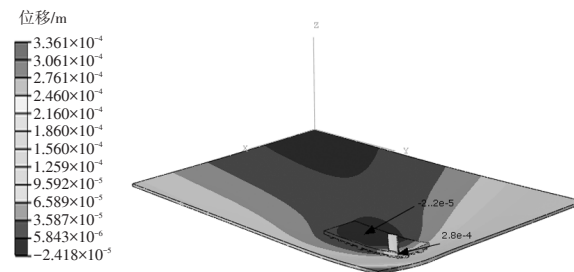


图10 Z向位移差

5.4 建议对策

通过仿真分析可知,PCBA过波峰焊后翘曲的

根本原因是连接器基座和 PCB 的材料热膨胀系数不一致,且在过波峰焊时 PCB 和基座的局部高温导致热变形差距进一步加大。因此,针对以上仿真分析结果提出下列优化建议。

a. 基座和 PCB 采用热膨胀系数更相近的材料以减小各个方向上的热变形差,从而降低因此而产生的翘曲。

b. 抬高针脚、降低基座接触温度以加长热的传递路径,从而降低传递到连接器基座的热量。通过仿真对比可知,当针脚加长 2 mm,抬高基座连接器后,基座底部与 PIN 针连接处的温度可降低 17 ℃(图 11),有利于减小热变形。

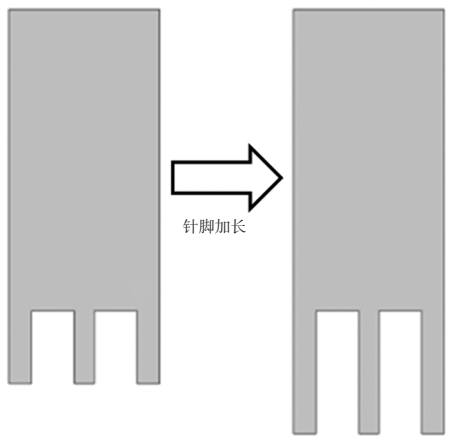


图 11 加长针脚长度

c. 降低焊接温度。在工艺允许范围内,尽可能地降低波峰焊焊头的温度。

d. 提高焊接过程中 PCBA 受热的均匀度。可通过改变焊接顺序使 PCBA 整体温度的相对均匀。

e. 尽可能扩大 PCB 的 PIN 脚孔。由于 PCB 和连接器基座热变形不一致而引发 PIN 针受到挤压而倾斜,可通过增加 PIN 针与孔的间隙尽可能地抵消 PCB 和基座的热变形差异,减小倾斜度。

f. 波峰焊过后,增长冷却时间,给予针脚和基座应力释放的时间,通过应力释放提高变形回弹。

6 对策制定及验证

6.1 对策制定

根据仿真优化建议,结合实际工艺条件和能力,针对性制定如下对策:

a. 将基座材料由 PBT+GF20(耐温 200 ℃)改为尼龙 VICNY R6133(耐温 275 ℃)。

b. 改变基座基底结构,结构底面减料设计以减小与 PCB 的接触面积,同时增加底面散热空间,如图 12 所示。

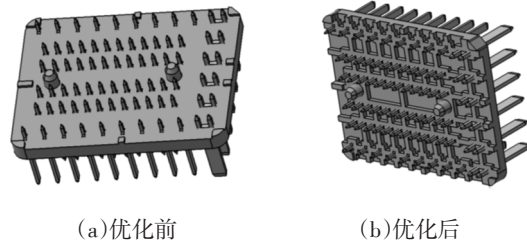


图 12 连接器基座结构优化

c. 因结构限制,无法通过抬高针脚增大基座到 PCB 的距离,此建议暂未采纳。

d. 扩大插针孔,但因尺寸限制,扩大范围有限。

e. 调整波峰焊曲线,将焊接速度由原来的 1.8 mm/s 改为 3 mm/s,焊接温度由 270 ℃降为 260 ℃。

f. 改变焊接工序,如图 13 所示。改变传统的从左到右的顺序,优先焊接 4 个基座连接器的粗针,即黑色粗线部分,再错位焊接各接插件的小针,即细线部分。目的是减少单个接插件的持续受热时间,使 PCBA 在整个焊接过程中受热相对均匀。

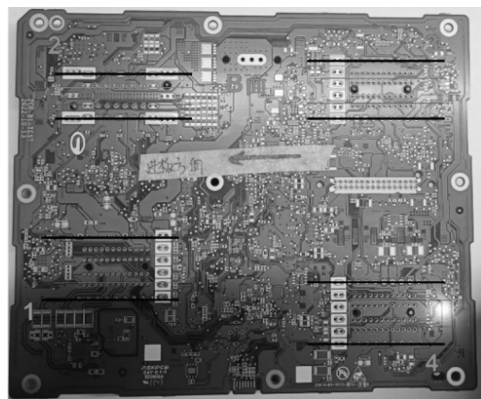


图 13 波峰焊焊接顺序

g. 优化焊接完成后降温手段,采用自然冷却方式,不执行风扇降温,延长冷却时间。

6.2 验证效果

依据上述对策,结合试验条件,特制定验证方案,如表 2 所示。其中旧工艺焊接速度为 1.8 mm/s、焊接顺序从左到右、由前至后;新工艺焊接速度为 3 mm/s,焊接顺序如图 13 所示;旧基座采用 PBT+

GF20 材料,结构不变;新基座采用尼龙 VICNY R6133,结构优化如图 12 所示。

方案	基座版本	波峰焊工艺	焊头温度/℃	冷却方式	翘曲对比
1	旧基座	旧工艺	270	风扇降温	无改善
2	旧基座	新工艺	270	风扇降温	有小改善
3	旧基座	新工艺	260	自然冷却	有小改善
4	新基座	新工艺	270	自然冷却	明显改善
5	新基座	新工艺	260	自然冷却	达标

表 2 试验方案的实施效果如图 14 所示,可以看出翘曲缝隙逐渐减小。因此,新的工艺、降低焊头温度、新的基座能一定程度改善翘曲,自然冷却也能有效使翘曲变形回弹,但是单个因素所起作用有限,需同时改进多个因素,在综合作用下,最终有效改善翘曲。经多轮的测试验证,方案 5 翘曲度达标率 100%,成功实现 PCBA 与壳体的流畅安装。

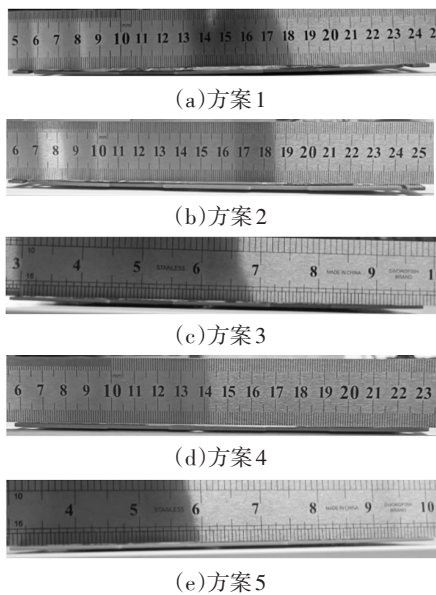


图 14 各方案 PCB 翘曲情况

7 结束语

通过对 PCBA 翘曲度调查、排查,找到了问题的主要原因,利用仿真工具高效地还原了翘曲现象,理清了根本原因,并对根本原因进行分析,提出了针对性的改进建议并予以实施,最终在无设计成本和工艺成本增加、无工艺效率降低的前提下,成功改善了翘曲度,达到预期标准,现总结如下。

a. 连接器基座尽量选用 TG 高于焊头温度的

材料。

b. 尽量使选用热膨胀系数相近的的 PCB 材料和连接器基座材料。

c. 波峰焊的焊接速度尽量快,焊接温度在合理范围内尽量低。

d. 基座设计需考虑底部波峰焊时的散热性能。

e. 适当改进波峰焊顺序,能有效改善 PCBA 受热均匀性,降低热变形差。

f. 延长波峰焊后冷却时间能有效降低残余应力,提升 PCBA 翘曲后的回弹量。

参考文献:

- [1] 龙庆文, 敖荟兰. PCB 线宽检测设备的发展现状与趋势[J]. 印制电路信息, 2011(7): 66-70.
- [2] 中国人民解放军总装备部. 刚性印制版通用规范: GJB 362B—2009[S]. 2009.
- [3] 张军杰, 韩启龙. PCB 焊接过程中翘曲原因探究与改善[J]. 电子工艺技术, 2013, 34(5): 284-288.
- [4] 林金塔. PCB 翘曲度成因与对策[J]. 印制电路信息, 1999(1): 29-32.
- [5] 蔡长庚. 降低覆铜板翘曲度的方法[J]. 印制电路信息, 1998(3): 8-9.
- [6] CHARLES U, TIMOTHY M, JEFFREY T GATRO. Finite Element Analysis of PWB Warpage Due to the Solder Masking Process[J]. IEEE Transactions on Components Packaging, and Manufacturing Technology, 1997, 20(3): 295-306.
- [7] NIU Z R, WENDLAND W L, WANG X X, et al. A Semi-Analytical Algorithm for the Evaluation of the Nearly Singular Integrals in Three-Dimensional Boundary Element Methods[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194(9/10/11): 1057-1074.
- [8] 戴钢生. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [9] 王勖成, 劭敏. 有限单元法基本理论和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [10] Guidelines for Temperature Profiling for Mass Soldering Process (Reflow & Wave): IPC-7530-2001[S]. [2023-02-01]. <https://webstore.ansi.org/standards/ipc/ipc75302001#:~:text=IPC%207530-2001%20Guidelines%20for%20Temperature%20Profiling%20for%20Mass,and%20various%20techniques%20and%20methodologies%20for%20temperature%20profiling.>