

SMT 检测技术

王天曦 王豫明

清华-伟创力 SMT 实验室

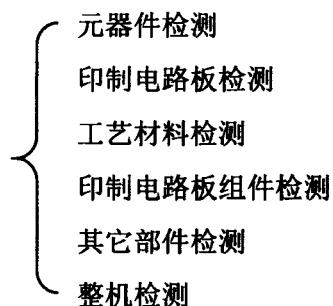
当前我国电子制造产业正处于由制造大国向制造强国发起冲击的关键时期，作为电子制造主流技术的 SMT,以工艺精细化保证产品高可靠是技术升级的核心。工艺精细化和产品高可靠的关键是工艺过程的高质量、高效率检测技术。

检测技术的历史与制造业的历史一样源远流长，在现代制造业中，设计是主导，材料是基础，工艺是关键，检测是保证。作为现代电子组装制造主流技术的 SMT，从元器件物料检验，到印制板组件制造的每一道工序，直到产品生命周期中出现的各种故障，每一个环节都离不开检测与分析技术。本文综合介绍当前电子组装技术中各种检测技术概况及应用，并对各种检测技术发展趋势进行了估测。

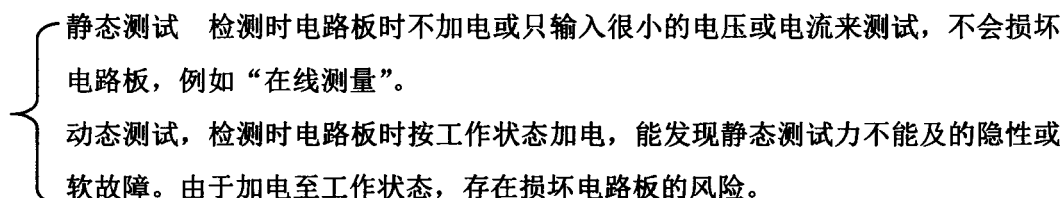
1 SMT 检测概述

1.1 SMT 检测分类

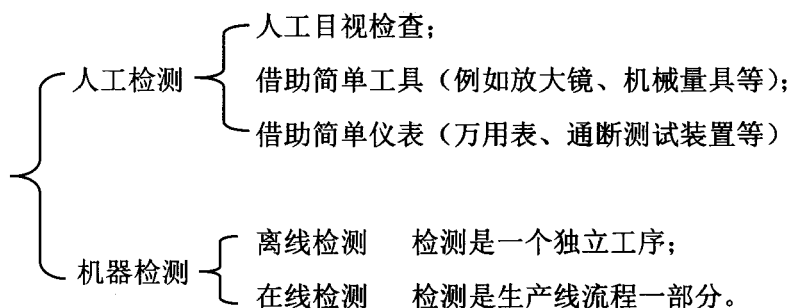
(1)、按检测对象与目标：



(2)、按检测技术层面



(3)、按检测方式



1.2、人工检测

电子组装中的人工检测，例如组装工艺检测中常用的人工目视检查，就是利用人眼或借助于简单的光学放大镜、工业显微镜等，对每一工序生产状况，例如元器件安装正确性、焊膏印刷质量、焊点缺陷等进行人工目视检查；另外，检查中，还可以借助金属针或竹制牙签，以适合的力量和速度划过 QFP 的引脚，依靠手感及目测来综合判断，特别是对 IC 引脚是否有虚焊或桥连的检查，有着良好的效果。。尽管目前各种机器测试装备日益完善、自动化程度不断提高，但对于中小企业以及多品种、小批量生产而言，仍然是一种投资少且行之有效的方法，特别是在工艺水平低、工艺装备和检测装备不完善的情况下，高水平人工检测具有灵活性，也是最基本的检测手段，对于改进设计、工艺和提高电路组件质量仍然具有重要作用。

在电子组装中，人工目视检查的项目包括 PCB 表面质量、胶点、焊膏印刷、贴装、焊点等。每一质量控制点都应制定有相应的检验标准，内容包括检验目标和检验内容。例如焊点可接受性目前业界认可 IPC——610 标准，一般企业根据自己产品和采用标准，制定本企业的具体标准和检测工艺卡，或者采用图示的方法，并给出具体判定标准。

不过由于人工目视检查局限性，例如如重复性差、不能精确定量地反映问题、劳动强度大等问题，一般不适应高品质产品和大批量集中检测。对于生产高端产品及产品批量很大的企业而言，还是尽可能选择现代化、自动化测试方法。

1.3、机器检测

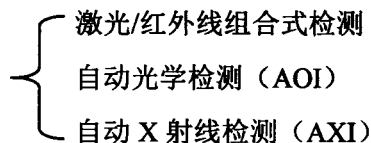
1.3.1、工艺检测

组装工艺检测是印制电路板组件最基本的底层检测，也称为连续性检测，它只检测 PCB 表面质量，即 PCBA 组装是否与 PCB 装配图符合，有没有漏装、错装、方向装反等安装问题，以及是否有桥接、立片、虚焊等各种焊接缺陷。它不管元器件是否内部失效（例如组装中静电伤害），也不管电气连接是否完整（例如由于焊接热应力造成连接过孔印制板内部

断裂) 以及其它非组装因素缺陷。通俗地说就是只管装得是否符合装配图要求, 不管设计和原材料好坏。

在实际生产工艺中, 组装工艺检测可以在工艺流程的任何节点, 例如在表面贴装工艺中, 可以在印刷焊膏后、贴片后、回流焊后分别检测, 也可以只在回流焊后检测, 取决于产品和工艺要求。

组装工艺检测除人工目视检测外, 主要有 3 种机器检测方式:



目前在工艺生产中应用的主要是 AOI 和 AXI, 激光/红外线组合式功能与 AOI 类似, 由于性价不如 AOI, 实际生产中应用较少。

1.3.2 电路测试 (在线测试 ICT)

电路测试是针对电路的一种测试, 它通过一种在线测试(ICT, in-circuit testing)的方法, 测出印制电路板所装电阻、电感、电容、二极管、三极管、可控硅、场效应管、集成块等通用和特殊元器件的漏装、错装、参数值偏差、焊点连焊、PCB 开路或短路等故障, 并可检测出故障是哪个元器件, 开路或短路位于哪个点等故障信息。

在工业生产中, PCBA 电路测试有两种:

(1) 针床测试仪

针床测试仪是针对焊点和模拟元器件的检测方法, 又称为生产故障分析 (MDA—malfunction defect analyzer), 是早期的在线测试方法。

(2) 飞针 ICT

飞针 ICT 是新在线测试方法, 除了覆盖 MDA 功能 外, 还能对数字电路包括 VLSI 和 ASIC 等进行功能分析, 故障覆盖率和准确率较高, 适用于技术较复杂, 可靠性要求高的产品。

1.3.3 功能测试 (FT)

功能测试(FT— functional test) 是测试整个电路板是否能够实现设计目标的一种测试方法, 它将 PCB 上的被测单元作为一个功能体, 对其提供输入信号, 按照功能体的设计要求检测输出信号。这种测试不涉及细节, 只检测 PCB 是否按照设计要求正常工作。

功能测试通常是针对具体产品的专用测试仪器或装置。

2 在线检测

2.1 在线检测及其优势

在线检测（ICT，In-Circuit Test）是一种通过“在线测试仪”的设备对电路板进行静态测试的 PCBA 检测技术，与人工检测相比，优势非常明显：

- 速度快：例如一个 300 个零件的电路板只需 3-4 秒钟；
- 测试结果的一致性：ICT 的质量设定功能，能够透过电脑控制，严格控制质量；
- 可靠性高：ICT 有多种测试技术，高度的可靠性，检测不良品种、且准确；
- 操作容易：只要普通操作员，即可操作与维修；
- 可在线测试生成元器件库。

在线测试仪早期也称为“制造缺陷分析仪”（MDA, manufacturing defect analyzer）目前常用的有两种在线测试设备，分别是针床式 ICT 测试仪和飞针式测试仪。

2.2 在线检测机理与 PCBA 可测试性

2.2.1 在线检测机理简介

在线检测是一种电路测试，类似与我们用万用表通过电阻、电压等测试测量判断电路通断及元器件好坏，只不过用探针取代万用表表笔，用电动机械取代手动、用自动化仪器和计算机取代万用表和人工判断，图 1 所示是针床式在线检测机理示意图。

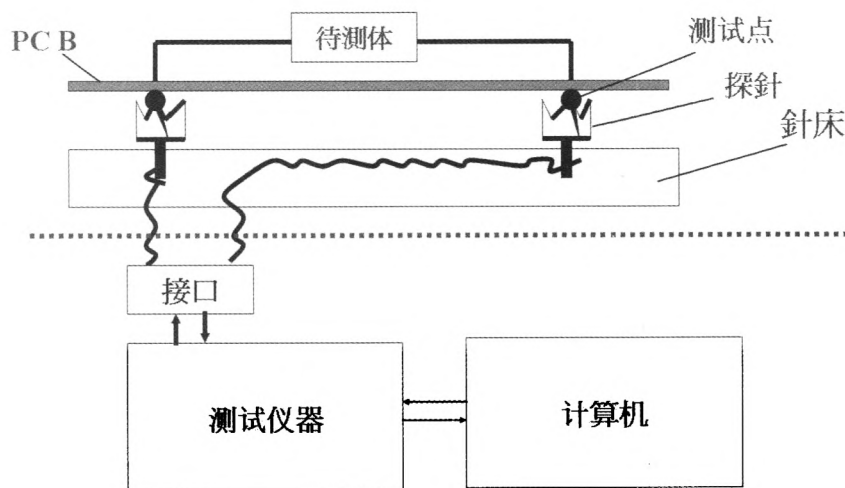


图 1 针床式在线检测机理示意图

显然，要进行在线测试，首先必须解决可靠“”测试点问题，如图 2a 所示探针是专门为进行在线测试二设计的，它具有尖端的头部和保证的弹簧，探针头部可以有多种形状和尺寸（图 2b），对测试点一定压力以保证接触良好。

其次，由于元器件是在线状态，其测试特性与独立时不同，例如一个电阻，接入电路

后再测量，电阻值就不是原来数值了，因此进行在线测试要能隔离周围器件对被测元器件的影响。隔离的方法是利用电路原理和测量技术，针对不同元器件采用不同方法，例如电阻的等效电路隔离法、数字电路的矢量测试、脉冲测试法、边界扫描法等技术，其详细描述可参考有关专著。

最后，所有探针是连接在线测试仪内部测量仪器模块和被测试节点，因测试可以是模拟、数字和数模混合的，每个测试针都能在测试程序控制下与模拟或数字测量仪表模块相连。

每个测试仪内部有两组控制开关，一组连接任一测试点和测量仪表总线；另一组连接测量仪表总线和测量仪表模块。测试仪在计算机控制自动进行测试并将测试结果输出。

实际测试时还要注意对被测试电路板放电处理，防止静电对测试结果的影响，同时要求被测试电路板具有可测试性。

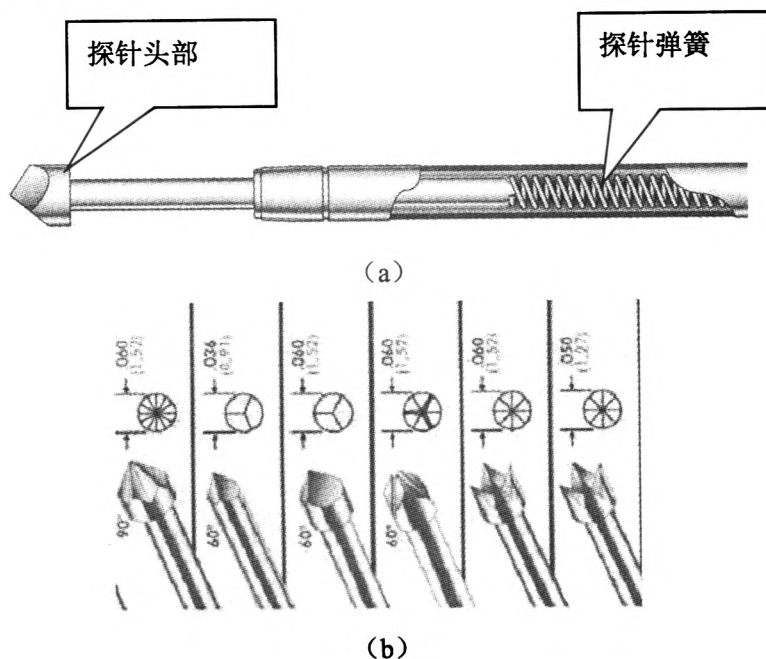


图 2 探针

2.2.2 PCBA 可测试性

PCBA 可测试性设计是电路板设计的重要内容，如果一种电路板要采用在线测试，则从电路板设计开始。

- 每一个测试节点都应该设计独立的测试点（焊盘）；
- 测试点（焊盘）要保证探针运动和接触空间；
- 测试点表面镀层保护；
- 测试焊盘上不能有阻焊剂等影响探针接触的涂层。

2.3 针床式与飞针式在线测试仪

针床式与飞针式在线测试仪是 ICT 的两种基本模式，各有特点，实际应用中是互补关系，由于飞针式是在针床式之后出现的，具有成本和灵活性方面优势，目前应用较多。

2.3.1 针床式在线测试仪

针床式在线测试仪是有一个特殊的测试部件——针床而得名的，有人也把针床式成为“在线测试仪 (ICT)”。针床上有数百到数千弹性小，测试随着针床移动，所有探针同时触及测试点进行测试，图 3 所示是一种针床在线测试仪及测试夹具。

针床式在线测试仪主要优点：

- 测试速度快；
- 大批量时每个板的测试成本低；
- 具有数字与功能测试能力；
- 良好的诊断能力、快速和彻底的短路与开路测试；
- 易于编程。

主要缺点：

- 需要较多编程与调试时间；
- 每种电路板都需要专用夹具、提高了测试成本；
- 对小批量多品种生产，使用成本较高，缺乏柔性。

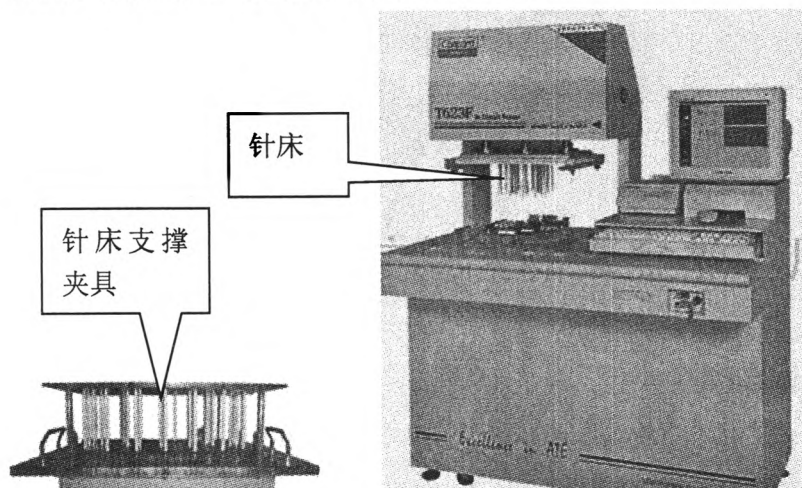


图 3 一种针床在线测试仪

2.3.2 飞针式在线测试仪

飞针式测试仪是对传统针床在线测试仪的一种改进，它用探针来代替针床，在 X-Y 机

构上装有可分别高速移动的 4~8 根测试探针,利用运动控制结构使探针在 X-Y 方向飞速移动,按照测试程序移动到测试点时再 Z 方向运动接触测试点,进行相应测试点元器件或电路通断等状况测试。

飞针测试仪可检查短路、开路和元件值。在飞针测试上也使用了一个相机来帮助查找丢失元件。用相机来检查方向明确的元件形状,如极性电容。随着探针定位精度和可重复性达到 5-15 微米的范围,飞针测试机可精密地探测高密度电路板。图 4 是飞针式测试仪进行测试的情况。

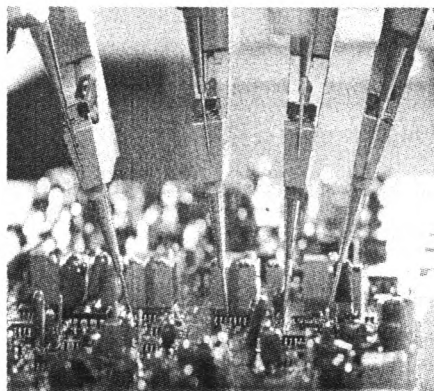


图 4 飞针式测试

飞针测试机的主要优点:

- 可快速反应,能够在数小时内测试原型样机装配;
- 灵活性好,适应多品种小批量;
- 不用夹具,降低了成本;
- 良好的诊断和易于编程。

主要缺点:

- 测试速度低
- 故障覆盖面有限;

2.4 飞针测试和针床测试的互补

应该看到,相对针床测试来说,飞针测试是一种还在不断发展中的新技术。随着无线通信和无线网络的发展,越来越多的 PCB 将增加无线接收能力。目前的针床测试仪只适用于低频频段,在射频(RF)频段的探针将变成小天线,产生大量的寄生干扰,影响测试结果的可靠性。针床在线测试仪只能检测 RF 电路在低频下的特性,RF 电路的测试由后续的功能测试仪去执行,这样必然降低 PCB 的缺陷覆盖率。飞针在线测试仪的探针数很少,较容易采取减少 RF 干扰的措施,实现 PCB 的低频和 RF 的在线测试,提高覆盖率。

飞针在线测试仪与针床在线测试的功能可以互补，因而，有些 PCB 在线测试的供应商考虑合并飞针和针床技术，在同一台在线测试仪内融合飞针和针床结构，使优势互补，达到提高测试速度、降低编程难度、降低成本的目的。

飞针测试系统仍然在发展之中，目前还不能替代针床在线测试仪，但是飞针在线测试仪的性能已达到 PCB 批量生产的要求，例如自动送料，增加 PCB 底部的固定探针数目，编程时间缩短到 1 人·天。飞针在线测试仪正得到 EMS 企业的重视，既用于电子产品的开发，亦用于多品种、中小批量 PCB 的在线测试。

3 AOI、SPI 与 AXI

AOI (Automated Optical Inspection, 自动光学检测)、SPI (Solder Paste Inspection, 锡膏测厚仪) 与 AXI (Automated X-ray Inspection, 自动 X 射线检测) 是近年在电子组装中应用较多的三种 PCBA 组装工艺检测设备，特别是用于代替人工目视检测，对于提升工艺能力、提高生产效率和提高产品质量具有重要意义。

随着电子制造产业的突飞猛进，PCBA 向着超薄型、小元件、高密度、细间距方向快速发展，板上元器件组装密度提高，PCB 的线宽、间距、焊盘越来越细小，复合层数越来越多。传统的人工目测 (MVI) 和针床在线测试 (ICT) 检测因“接触受限”（电气接触受限和视觉接触受限）已不能完全适应当今制造技术发展的需要，AOI 和 SPI 已经成为 PCB 板制造业的必然需求，不但用于 PCB 制造行业中，并扩展到 SMT 组装线、MCM 基片组装线、玻璃模板、胶片模板的制造、多层陶瓷的封装、元器件高密度互连、TBGA（载带球栅阵列封装）封装等领域；AXI 则不仅可以用于上述各领域，而且可以广泛用于各种产品的无损检测和故障分析；它们对于产业技术升级和品牌战略具有极其重要作用。

3.1 AOI、SPI 与 AXI 系统的硬件结构

AOI、SPI 和 AXI 实质上都属于自动光学检测系统，只不过 AOI 与 SPI 使用可见光或激光及 CCD 摄像系统，而 AXI 使用不可见的 X 光和 X 射线传感器成像系统。硬件结构核心除了光源（射线源）-摄像及图像采集、分析和处理系统外，交流伺服控制 x、y 工作台及计算机控制系统都基本一致，不过由于 X 射线强大的穿透力和对人类健康的危害，AXI 系统的防护要求要复杂和严格得多。

AOI/SPI/AXI 系统结构如图 5 所示。

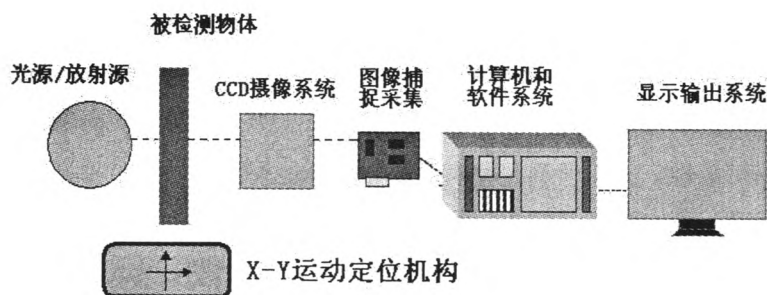


图 5 AOI/AXI 系统结构

测试仪器如果插入生产线作为工艺流程的一个工序、称为在线式，则为了适应流水线节奏对于检测速度要求一般比较高，相应运动机构增加传输和夹紧机构；不插入生产线的称为离线式，对检测速度就没有严格要求。AO、SPI 和 AXI 都有在线式和离线式两种，图 6 所示是两种 AOI 的外形实体，SPI 和 AXI 也有类似结构。

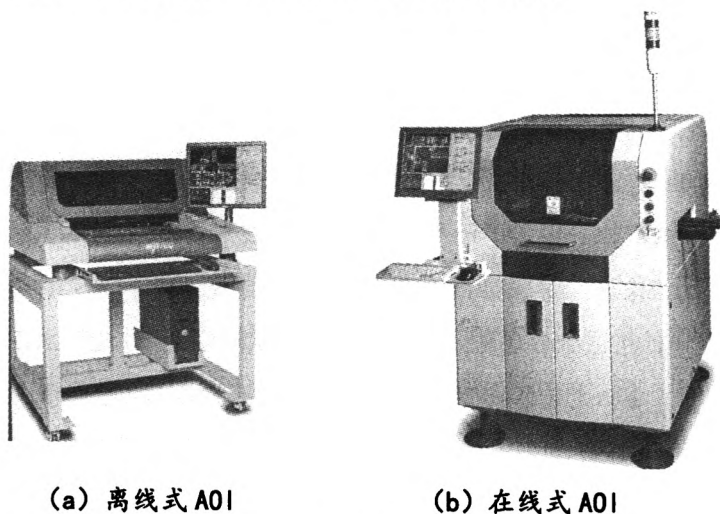


图 6 两种 AOI 外形

3.2 AOI、SPI 与 AXI 系统的软件特点

本质上，AOI、SPI 和 AXI 系统都属于计算机仪器，其技术核心必然是软件。选择和应用高效适用的故障检测诊断模式系统，为每个测试对象建立数学模型，采用合理目标图像的检测判断算法，具有自学习功能，方便灵活的编程操作等等，都是构建先进测试系统软件，提高检测质量和效率必不可少的。

由于 AOI、SPI 和 AXI 应用机制的差异，成像后检测分析软件侧重点也各不相同。AOI 和 SPI 是代替人工目视检测的组装工艺测试，其目的主要检测焊膏/元器件组装的正确性和从外观判断组装质量，监控具体生产状况，并为生产工艺的调整提供必要的依据，各

种档次和复杂度的产品都适用，因此检测速度与准确性是关键；而 AXI 则是解决人工目视无能为力的内部透视，其目的主要检测 BGA、QFN 等底部引线元器件及 PCB 内层等部位的焊接质量，从而为这些元器件组装工艺的调整提供依据，多用于中高端复杂产品判断产品，重点在产品可靠性，因而检测的精确度和分辨率是关键。

3.3 AOI 特点与应用

3.3.1 AOI 特点

(1) 检查并及时消除 PCB 缺陷，在过程进行中发现缺陷比在最终测试和检查之后才发现缺陷成本要低得多。

(2) 能尽早发现重复性错误，如贴装位移或料盘安装不正确等。

(3) 为工艺技术人员提供 SPC 资料。AOI 技术的统计分析功能与 SPC 工艺管理技术的结合为 SMT 生产工艺的适时完善提供了有力的武器，PCB 装配的成品率进而得到明显的提高。随着现代制造业规模的扩大，生产的受控越来越重要，对 SPC 资料的需求也不断增长。AOI 系统的应用将越发显出其重要性。

(4) 能适应 PCB 组装密度进一步提高的要求。随着电子产品组装密度的大幅提高，一些传统的测试技术，如 ICT 等，已不能适应 SMT 技术的发展要求，0402 片式组件的出现已经使得 ICT 无法检测，而 AOI 则不会受这些因素的影响。

(5) 测试程序的生成十分迅速。AOI 设备的测试程序可直接由 CAD 资料生成，十分快捷。与 ICT 相比，由于无须制作专门的夹具，其测试成本也大幅降低。

(6) 能跟上 SMT 生产线的生产节拍。目前许多工厂在生产过程中对 PCB 组件进行检验主要依靠人工目视检查，但是随着 PCB 尺寸的加大和组件数的增多，这种方式已经不堪重负。而 AOI 目前能达到 1 幅 / s 的检测速度，可以满足在线测试的要求。

(7) 检测的可靠性较高。检测的要素是精确性和可靠性，人工目视检查始终有其局限性，而 AOI 则避免了这方面的问题，能保持较好的精确性和可靠性。

3.3.2 AOI 应用

AOI 系统的作用是检测 PCB 在制造过程中的缺陷或缺陷防止，进行过程控制，通过改正工艺来消除或减少缺陷。通常把 AOI 系统置于生产线上的关键位置，监控具体生产状况，并为生产工艺的调整提供必要的依据。如进行贴片质量检验、印刷质量检验、焊接质量检验及多层陶瓷基片封装质量检验等。

在 PCB 制造过程中，通常用 AOI 检测的项目有焊盘缺陷，如短缺垫、缺口及直径减

小、针孔、压陷、凹陷、突出等；线条缺陷，如短路、断路、线宽/线距、缺口、突出、凹陷、铜渣、针孔、尺寸或位置错误，孔堵塞等。

AOI 在电子组装中，除了焊接后检测外，还可用于焊膏印刷质量检测，贴片质量检测以及 PCB 组装前（俗称光板或裸板）的检测。对于焊膏印刷质量检测，目前已经有将 AOI 嵌入焊膏印刷机，组成带检测功能的焊膏印刷机。

3.4 SPI 及其应用

SPI（锡膏测厚仪）是利用光学的原理，通过三角测量的原理把印刷在 PCB 板上的锡膏厚度分布测量出来的一种 SMT 检测设备。

3.4.1 SPI 在 SMT 工艺的位置

如图 7 所示，锡膏印刷处于 SMT 工艺中的前端，据统计资料，74%的 SMT 工艺缺陷来自锡膏印刷，因而及时监测锡膏印刷质量，是保证 SMT 工艺质量的关键。

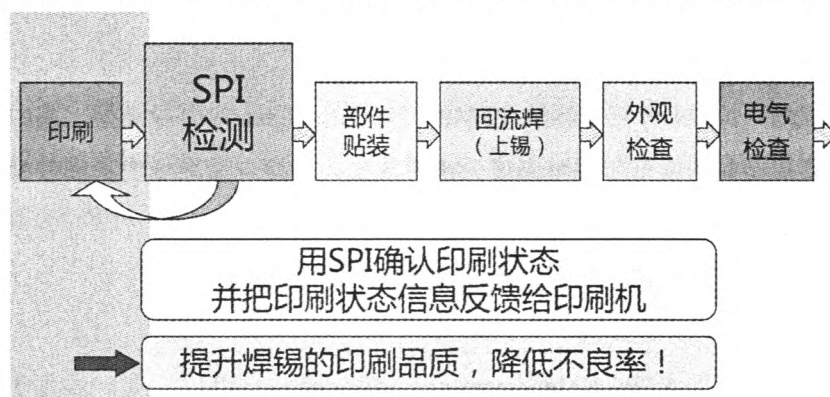


图 7 SPI 在 SMT 工艺的位置

使用 SPI 可尽早发现不良、尽早维修以节约维修成本，可帮助工程师调整印刷机（前后挂刀位置、下压力、脱模速度、锡膏稳定时间、网板擦拭间隔时间等等），并且获得有关焊膏印刷详尽的 SPC 统计数据和报表，满足现代生产管理的必备测量统计工具。

3.4.2 3D 检测技术

理论上，AOI 也可用于锡膏印刷质量检测，但 AOI 通常是用于检测 2D 图形，对于锡膏厚度检测容易造成误判。图 8 表示焊膏设计值与实际可能得到的焊膏对比，面积接近但体积相差很大。如图 9 所示的锡膏印刷缺陷，只有采用 3D 检测技术的 SPI 才能胜任。

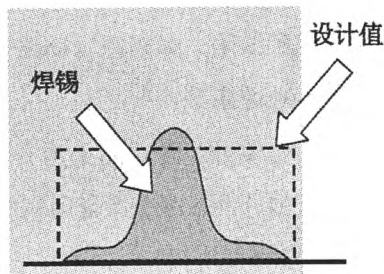


图 8 焊膏设计值与实际对比

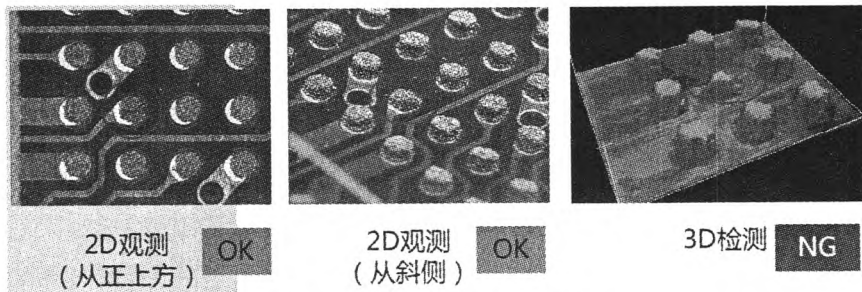


图 9 锡膏印刷缺陷检测

3.4.3 主流 SPI 技术与设备

按检测原理划分，SPI 有相位测量（PMP）和激光（Laser）两种类型，其中激光方式虽然检测速度快但检测精度低、锡膏高度分辨率较低、获得容易图像失真或模糊不清，并且易受 PCB 表面颜色干扰，已经退出主流技术行列。

相位测量（PMP）是当前 SPI 的主流技术，其原理与特点如下：

（1）原理

相位调制轮廓测量技术(Phase Measurement Profilometry, PMP)，是一种基于结构光栅正弦运动投影，离散相移获取多幅被照射物光场图像，再根据多步相移法计算出相位分布，最后利用三角测量等方法得到高精度的物体外形轮廓和体积测量结果，如图 10 所示。

PMP 技术实现锡膏的三维测量，在保证高速测量的同时，大幅度的提高测量精度。

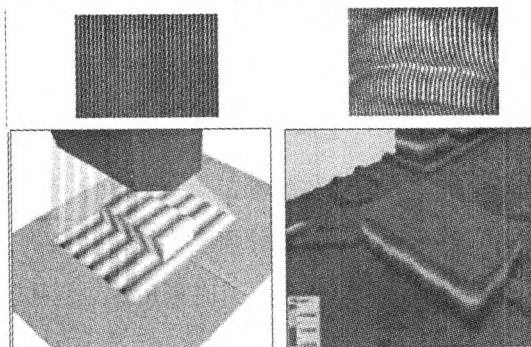


图 10 PMP 测量技术示意图

(2) 特点:

- 通常具有较高的高度分辨率;
- FOV 视野可以做得较大, 具备高速高精度检测的条件;
- 数字取像, 重复精度高、但相对容易受外界光照影响;
- 2D 与 3D 需分开拍照成像;
- 清晰的 2D 图像, 具备仿真真实色彩 2D 图像的能力;
- 不受 PCB 表面颜色干扰。

图 11 是采用主流技术的 Janus 系列 SPI 设备之一。

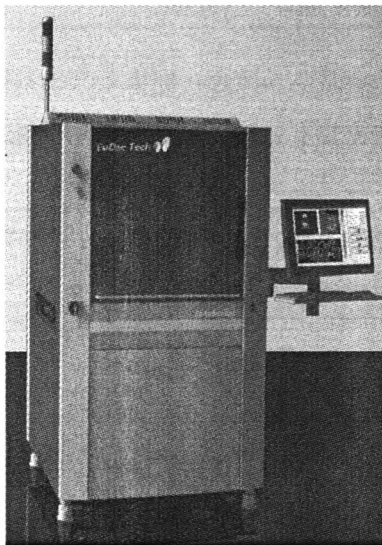


图 11 Janus 系列 SPI 设备 (由深圳市复蝶智能科技有限公司提供)

(3) 关键技术

- 多投影头: 克服阴影遮挡带来的检测障碍 (图 12);

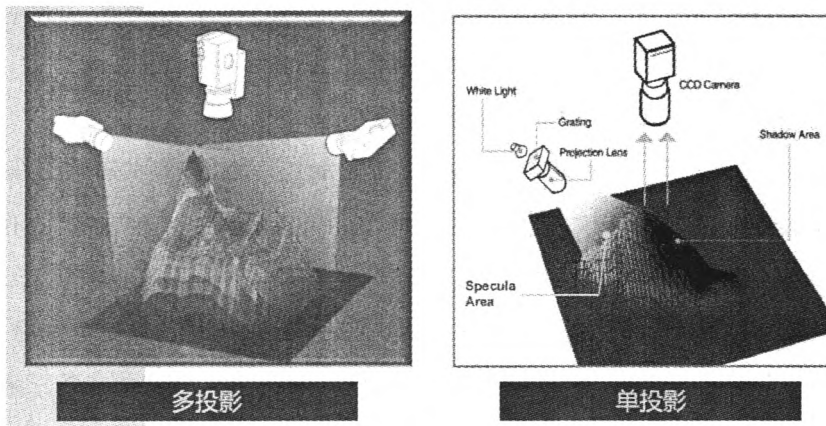


图 12 多投影头克服阴影遮挡带来的检测障碍示意图

- 多频率投影+精密 Z 轴控制仿形运动, 有效应对软板;

- 多角度投影：有效应对特殊角度锡膏的测量干扰；
- 一体化铸铁框架与更合理的机械设计：更好的刚性与使用寿命

4 SMT 综合测试技术

4.1 检测技术 各有千秋

各种检测技术都有其自身特点：

- 人工目测成本低廉，但可靠性低、速度慢；
- 在线测试(ICT)是目前最常用的测试方法，能准确定位 PCB 的元器件故障和较快的速度，但需要事先设计测试点；
- 功能测试(FT)对电路进行全面电气检查，但很难作出故障定位；
- 自动光学检测 (AOI/SPI) 不需要针床，具有自动化、高速化和高分辨率的检测能力，但不能检测电路电气错误；
- X 射线检测 (AXI) 可以对电路板进行全面检查，尤其可以检测 BGA 封装，但是成本高昂，也不能检测到电路的电气错误。

4.2 技术互补 势在必然

预测今后相当时间内，哪一种测试技术取代其它技术都很困难。使用多种测试技术，将会成为这一领域的测试首选。这是因为采用多种测试方法，一种技术可以补偿另一技术的缺点，相互取长补短，尽可能发现更多的缺陷。

(1) ICT/FT 互补

ICT/FT 互补将极大地提高 PCB 地成品率。在 PCB 生产线中 ICT 放置在波峰焊前后工段，FT 防止在终测工段。在一定条件下 ICT 和 FT 还可以共用针床夹具，降低设备使用成本。这种组合趋向和市场要求已经形成，这种综合测试系统亦开始供应。

(2) AOI/ SPI 和电气测试 (ICT 或 FT) 的组合

AOI/ SPI 和电气测试 (ICT 或 FT) 的组合已成为生产流程控制的有效工具。多年来，在线测试一直是 PCB 工艺检测的主要工具，但它的带电测试受到非电气故障和越来越少的物理探针可探测通路的影响。PCB 的功能测试是不可缺少，它是 PCB 最终电学性能的测试工具，但诊断精确性较差，缺陷覆盖率并不确定。因此，在 PCB 的工艺过程中增加 AOI/ SPI 检测非常重要，自动光学检测、在线测试和功能测试组成 PCB 工艺过程中的三道检测关口，它们的严格把关是 PCB 生产的最佳检测策略。

(3) AOI/ SPI / AXI 智能组合

AOI/ SPI 与 AXI 组合检测系统可检测所有缺陷（可视的和不可视的缺陷），智能组合的 AOI/ SPI / AXI 测试系统保证最大的测试覆盖率，并具有体积小、价格低、操作方便等优点，最终提供较快的检测速度和较高的成品率。

（4）AXI 和电气测试进行组合测试

使用 AXI 的经济效益取决于产品的规模和技术要求。一般来说,板面越大,越复杂,或者探查困难,AXI 在经济上的回报就越大。AXI 和电气测试互补, AXI 除了减少潜在的现场故障外,还能降低 ICT 和功能测试的返修率,加快产品面市时间,缩短制造周期,降低 ESS 故障率。

需要特别指出的是随着 AXI 技术的发展,目前 AXI 系统和电气测试系统可以“互相对话”,这种技术能消除两者之间的重复测试部分。这种组合,使得电气测试只需原来测试接点数的 30%就可以保持目前的高测试覆盖范围,从而缩短测试时间,降低电气测试夹具和编程费用。

目前,AXI 检测设备的价格是其它 AOI 纯光学检测系统的 3 到 4 倍。不过这种情况正在得到改善。AXI 技术需要的数字相机的成本正在迅速降低,以及处理器和存储器芯片价格的降低,使 AXI 系统已开始采用 PC 上的处理器进行图形处理,大大增强了它的计算能力。正因为上述这些优点,可以预见得到未来随着 AXI 系统成本的降低和性能的提高以及应对 BGA 等高密度封装元件广泛应用所带来的挑战,采用 AXI 组合测试技术会发挥越来越重要的作用。