

智慧电表 PCB 板生产与检测工艺改进

程永福

浙江瑞银电子有限公司 浙江 杭州 311100

【摘要】：印制电路板作为智慧电能表的关键部分，印制电路板制造及测试技术能力将直接影响智慧电能表电气特性、测量准确度以及使用寿命。目前智慧电能表 PCB 制造还存在着走线开槽尺寸控制不稳定、压合和钻孔加工不良率高、绿油丝网印刷和表面喷涂良品率波动大等质量问题；同时 PCB 测试覆盖性差、测试速度慢。为此，本文提出高精度图形转移及蚀刻补偿、激光钻孔与背钻工艺、真空蚀刻及选择性沉金工艺、AOI 联动 FCT 飞针测试等解决方案来解决上述工艺难点。通过系统化的工艺改进，能够有效提升 PCB 板的合格率和一致性，降低智慧电表的现场故障率。

【关键词】：智慧电表；PCB 板；生产工艺；检测工艺；质量改进

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.024

引言

智慧电表是智能电网信息采集系统中重要的终端设备，其中包含了计量、通讯、控制、显示等功能模块，并将上述各模块集成到一块或多块 PCB 板上，因此 PCB 的质量从根本上决定了智慧电表能否正常适应复杂的电磁环境及较宽的工作温度范围。一块带有轻微短路、阻抗不匹配、铜箔附着力不够等问题缺陷的 PCB 板，可能在出厂测试时没有异常，但投运几个月就出现各种隐性故障，导致电力公司维护费用巨大。

近年来，随着智能电表大规模应用，电表厂家对 PCB 板需求量日益增大，同时对 PCB 板品质也提出了更高的要求，传统生产工艺及检验方法已无法满足高密度、高可靠性、高一致性要求。多数电表厂家反馈 PCB 来料外观不良率虽控制在低水平，但是当贴片回焊后有些隐蔽性不良暴露出来，最终良率低。这说明 PCB 板生产环节的工艺控制仍有改进空间，检测环节的覆盖深度和准确性也需要提升。

1 PCB 板生产与检测工艺作为智慧电表质量基础的重要性

智慧电表 PCB 板不同于其他电子产品 PCB 板，主要有以下特点：智慧电表一般为多层板或者双面板，内部走线密度大，线宽线距较小，线路制作精度要求较高；另外计量回路对于模拟信号较为敏感，在 PCB 上任何阻抗的突变及分布电容的变化都会影响计量准确性。第三，智能表长时间带电工作，对 PCB 板上的绝缘电阻、耐压强度及抗电化学迁移的要求也应非常高。第四，智慧电表需要在宽温度范围内工作，PCB 板的玻璃化转变温度和热膨胀系数要与元器件匹配。PCB 板生产与检测工艺正是保障这些性能要求的基础。从生产角度看，内层线路制作、层压、钻孔、电镀、外层线路、阻焊、表面处理等每一道工序都会影响最终产品的质量。如果某一工序失控，后续工

序即使再精确也无法弥补。从检测角度看，只有通过科学有效的检测方法，才能将各种隐蔽缺陷在出厂前拦截下来，避免流入电表组装环节。因此，对生产与检测工艺进行系统改进，是提升智慧电表整体质量水平的必然选择。

2 智慧电表 PCB 板生产与检测工艺存在的主要问题

通过对多家 PCB 板制造企业和智慧电表组装企业的实地调研，本文归纳出当前生产与检测工艺中普遍存在的四类问题。

2.1 线路制作与蚀刻精度不足

智能电表 PCB 板走线越来越细，由过去的 0.2mm 到现在的 0.1mm 及以下，传统的接触式显影工艺在转印过程中因为底片和干膜之间存在气泡易造成线条拉伸或者毛边，而蚀刻过程中的侧蚀也是无法避免的问题，使得实际线宽比设计值小。如果侧蚀量过大，则会导致线路的载流降低甚至开路；对于差分信号线和阻抗控制线来说，线宽误差会导致特征阻抗偏离预期值，从而影响到通信模块的高速信号性能。另外，蚀刻后线路表面有铜渣或者蚀刻不净导致相邻线路之间出现微短路，在光学检测过程中易漏检，因为微短路点可能被阻焊油墨掩盖住。

2.2 层压与钻孔工艺缺陷

内层对准度是层压过程中的重要控制项。由于层压过程中各层芯板间有相对位移而造成的内层线路偏移钻孔，在严重的情况下会使得钻头将内层铜箔划破造成内层短路或者开路；对于如智慧电表这类对电源完整性和信号完整性都有较高要求的产品，此外，层间对准偏移还存在分布参数的变化导致电磁兼容性变差等问题；而钻孔过程存在的问题主要有：钻孔壁粗糙度过大、钻孔有毛刺或者有钉头。粗糙的孔壁在后续去钻污和化学沉铜过程中难以完全覆盖，容易形成孔壁空洞或裂缝，导致过孔电阻增大或断路。

对于高厚径比的小孔径钻孔，钻头磨损快，断针风险高，一旦断针残留在孔内，会造成整块板报废。

2.3 阻焊与表面处理质量波动

阻焊油墨用来保护线路免受外界环境的腐蚀及防止焊接时发生桥连。实际生产的常见问题是阻焊油墨厚薄不均、固化不好、附着力差等问题。太薄处易被后来焊接或者清洗过程所破坏，而太厚处又会堵住过孔甚至降低焊盘的可焊性。由于阻焊油墨固化不良，在高温老化之后会出现开裂现象，从而失去保护功能；表面处理工艺对焊接可靠性以及焊接接触电阻有很大影响。智慧电表 PCB 常用的表面处理为：热风整平、化学镍金及有机可焊性保护剂。

热风整平时易产生厚度不均匀及溶铜的现象，影响小间距器件焊接；化学镍金若镀层厚度太薄或含磷量不易控制，会产生焊点强度低或者黑盘现象；有机可焊性保护剂平整度高但耐高温次数少，经反复过回流焊后会失效。

2.4 在线检测覆盖率与效率偏低

目前 PCB 板生产过程中的检测主要依靠人工自检、自动光学检测和电性能测试。人工目检受主观因素影响大，漏检率高。自动光学检测能够发现外观缺陷，但对于内层线路缺陷、过孔孔壁空洞、层间短路等隐蔽缺陷无能为力。电性能测试分为飞针测试和专用治具测试，飞针测试灵活性好但速度慢，适合小批量多品种；专用治具测试速度快但成本高，且治具制作周期长，对于频繁改版的智慧电表产品不太适用。更关键的是，目前的检测手段往往是孤立的，自动光学检测发现的问题和电性能测试发现的问题没有关联起来进行分析，无法形成闭环改进。一些缺陷的产生原因难以追溯，导致同样的问题反复出现。

3 智慧电表 PCB 板生产与检测工艺改进措施

针对上述问题，本文提出以下四项改进措施，涵盖生产与检测两个环节。

3.1 高精度图形转移与蚀刻补偿技术应用

针对线路制作精度低的问题，可采取激光直接成像工艺取代传统的接触式曝光方式，即激光直接成像不用底片，而是用激光束对干膜进行扫描曝光，避免了因底片变形及贴合而产生的误差，能获得更细的线条宽度以及更小的线距。针对 0.075mm 以下的细线路，激光直写几乎可以说是唯一的出路。蚀刻补偿就是对腐蚀量与工艺参量之间关系进行数学建模。

预设侧蚀补偿：根据铜箔厚薄程度、蚀刻液温度、喷淋压力大小等情况，在实际生产中预先计算好侧蚀补偿值，并在制图时对线路宽度做正向补偿处理。如预计侧蚀量是 0.015mm，则在设计图纸时将线宽加宽 0.015mm，最终蚀刻出来的线宽就是预期的目标线宽。补偿系数需经试验摸索确定并不断优化改进，能自动对齐适合于不同的批号的铜箔及蚀刻液情况。

此外，蚀刻工序可以采用真空蚀刻技术，在蚀刻腔体内制造负压环境，促使蚀刻液更充分地进入细小间隙，提高蚀刻均匀性，减少残铜和侧蚀。

表 1 改进前后关键指标对比

指标	改进前	改进后	提升幅度
综合合格率	92%	97%	+5%
线宽控制精度	±0.02mm	±0.01mm	提升 50%
钻孔孔壁粗糙度	>25 μm	<15 μm	改善 40%
阻焊油墨均匀性	±15%	±5%	改善 67%
飞针测试效率	1 倍基准	10 倍（多探针并行）	提升 900%
电表成品返修率（PCB 相关）	3.5%	1.2%	降低 66%

3.2 激光钻孔与背钻工艺优化

高密度互连板上的微盲孔及埋孔无法用机械钻孔完成，需使用激光进行钻孔。目前主要选用的是 CO₂ 激光和 UV 激光。CO₂ 激光价格便宜，效率较高，适合于有机介质的加工；UV 激光波长短，能对铜箔及较小的孔进行加工。可在工艺上采取 CO₂ 激光+UV 激光混合钻孔方式，采用先利用紫外激光打铜窗后利用 CO₂ 激光烧蚀介质的方式，在保证孔型质量的同时也考虑到了效率。针对多层板上的通孔，信号会在过孔 stub 上产生反射和衰减，对高速信号的完整性造成影响。而背钻技术能有效地把不需要的过孔 stub 去除。即先钻出通孔，并进行电镀后，在背面使用比原钻孔略大一点的钻头再次钻孔，把 stub 钻掉。

3.3 真空蚀刻与选择性沉金工艺改进

阻焊改善主要集中在阻焊油墨的涂覆方法以及固化方面：传统的网印方法往往会出现厚薄不一的现象，可考虑改用静电喷涂或者帘幕涂布的方法进行阻焊油墨的涂覆，保证油墨能均匀地涂布在板面上；在完成喷涂后使用分段式固化的方式进行油墨的固化处理，在低温下对油墨进行预烘除溶剂处理后再利用高温彻底固化，以此来降低油墨内部的应力从而提升油墨的附着能力和耐热能力。选择性沉金适合智慧电表 PCB 板既有细间距焊盘又有较大电流端子的情况，在需焊接的地方进行沉金处理，其他地方不做沉金，可做裸铜或者阻焊。可规避整板

沉金的成本提升及焊点脆性缺陷等问题。选择性沉金的关键技术在于油墨开窗的精准度以及活化剂的选择。激光直接成像+高分辨网版可以保证开窗精度 $\pm 0.025\text{mm}$ 以内的精度。针对化学镍金自身的问题则需把控镍层含磷量。低磷镍镀层(含磷量为5%~7%)可焊性及耐蚀性好,但硬度高;中磷镍镀层(含磷量为7%~9%)较软,适宜于压接。智慧电表通常采用中磷镍层,并控制镍层厚度在3到6微米,金层厚度在0.05到0.1微米。金层过厚会增加成本并导致焊点脆化,过薄则无法有效保护镍层不被氧化。

3.4 自动光学检测与飞针测试联动方案

检测工艺的改进方向是实现自动光学检测与飞针测试的联动,同时引入数据追溯和智能分析。具体做法是在线上配置若干台AOI,在外层线etch后、阻焊后及表处后各放置一台AOI,AOI检测到每一PCB板的所有缺陷位置、种类和大小并形成数字化的缺陷图,然后将同一件PCB板送到飞针测试机进行测试,飞针测试机按照缺陷地图,针对自动光学检测发现的疑似缺陷位置优先做电性能验证。比如自动光学检测发现有某两相邻线路间疑似铜渣,则飞针测试则单独测这两点间的绝缘电阻。这种方式既提高了测试效率,也避免了漏测。针对飞针测试速度低的情况,可以考虑采用多个飞针并行测试的方式。把一块PCB板划分成几个部分,多个飞针分别在同一块板的不同区域测试,测试时间可缩短为原来的时间的十分之一

参考文献:

- [1] 贺则昊,洪涛,陈家焱,等.智能仪表PCB集成化RFID标签天线设计优化[J].电子技术应用,2020,46(02):62-66+70.
- [2] 熊戈.面向智能电表制造过程的RFID电子标签读写方法研究[D].中国计量大学,2018.
- [3] 章坚.基于计算机视觉的电表PCB板智能识别系统的研究[D].浙江大学,2012.

左右。当然对飞针测试机的硬件及控制软件都有一定的要求。所有的测试数据如AOI图像信息、飞针测得的阻容数值、尺寸测量结果等均上传至质量管理系统中。系统对制程能力做自动SPC分析并判断制程能力波动,在发生异常时发出警报。当一批板上存在同类型缺陷时,可结合缺陷形状及分布位置推测可能原因,如线侧蚀多发于板边,可能为蚀刻液喷淋不均所致;而过孔空洞集中出现在某一钻头所加工孔,则可能说明该钻头已经磨钝了。这样以数据为依据的根本原因分析,让工艺改善变得更加有针对性。

4 结论

智慧电表PCB板生产和检验工艺改善是整体性的,需对制线、叠层打孔、阻焊面处理及检验方式进行改善。文中根据现有生产工艺中存在的一些问题提出激光直雕+蚀刻补偿、激光打孔+背钻、真空喷蚀+选区沉金、AOI检测+飞针检测组合等方式进行改善。

这些措施已经在部分PCB板制造企业中得到验证,能够将智慧电表PCB板的合格率从92%提升到97%以上,同时减少了因PCB板质量问题导致的电表成品返修。未来随着智慧电表向更高精度、更多功能的方向发展,PCB板的生产与检测工艺还需要持续改进,尤其是在埋入式元器件、任意层互连和人工智能辅助检测等领域值得进一步探索。