

浅谈多层印制电路板的设计和制作

株洲电力机车研究所 蒋耀生 (412001)

摘要 从生产制作工艺的角度介绍了多层印制电路板(以下简称多层板)设计时应考虑的主要因素,阐述了外形与布局、层数与厚度、孔与焊盘、线宽与间距的影响因素,设计原则及其计算关系。文中结合生产实践对重点制作过程加以说明。

关键词 多层印制电路板 设计 制作 黑化 凹蚀 层压

Multiayer Printed Circuit Board Design and Manufacture

Jiang Yaosheng

Zhuzhou Electric Locomotive Research Institute

Abstract Form the production technology view point, the main factors should be considered during the multilayer printed circuit board and also detailed the effective factors, design rules and their relationship between profile and lay-out, line width and spacing, layers and board thickness, holes and land size. It is explained the manufacturing process with combination of the production practice.

Key words Multilayer printed circuit board Design Manufacture Black oxide Etchback Lamine

多层板是电子技术向高速度、多功能、大容量和便携低耗方向发展的必然产物。随着电力机车向高速度、微机控制方向的发展,多层板在机车电子工业上的应用亦愈来愈普遍。与双面板相比,多层板有以下四个方面的优越性:1) 多层板设计灵活,很容易在不同层数任何需要的地方保留铜箔,这些铜箔既可消除各关键电路之间的电耦合,使噪声干扰或信号串扰减到最低,也可用来屏蔽内层与外层的某些关键电路的干扰;还可以利用大面积铜箔来解决集成快散热问题;2) 多层板使线路走线路径缩短,从而提高信号传输速度,将多层板内层信号线与地网设计成传输线形式,很容易控制其特性阻抗;3) 多层板通过布线层数的变化,可缩小其面积,增加其电子产品的功能和容量;4) 多层板还增加了保密性,可以将线路全部设计到内层,使其它竞争者不易破坏其连线关系,最终提高了先进电子产品的生存期。

多层板因其密度和层数的关系,使加工制作过程难度增大,测试比较困难,可靠性保障程度相对于

单、双面板而言较低,一旦出现故障,几乎没有维修余地,因此生产成本较高。多层板的质量和可靠性,以及要取得合理价格,很大程度上与多层板的设计优良有关,作为设计者在将逻辑原理转成正确的网格布线,再将布线变成制造者能够投入生产的文件过程中,必须既要熟悉印制板有关设计标准和要求,又要熟悉了解有关印制板的生产制造工艺。

1 多层印制电路板的设计

由于多层板的成本、维修、可靠性等问题,在多层板的工程设计阶段从生产制作工艺上必须考虑所用的材料、层结构、板厚、外形与布局、孔径、孔位、焊盘、导体宽度、导体间距等多种要素及其相互关系。其设计要点为:

1.1 外形与布局

多层印制电路板的外形原则上可为任意形状,但从生产工艺角度考虑,应尽量简单,一般为长宽比例不太悬殊的长方形。同时,为便于生产,降低成本,应避免外形尺寸公差要求过严。一般外形尺寸

$\leq 10 \text{ mm}$, 允许公差为 $\pm 0.2 \text{ mm}$; 外形尺寸 $> 100 \text{ mm}$, 允许公差为 $\pm 0.3 \text{ mm}$ 。

布局时则应考虑散热区域、布线禁区、重元件位置以及与其它印制板的连接关系。

一般情况下, 多层板局设计是按电路功能进行, 在外层布线时, 要求在焊接面多布线, 元件面少布线。在面积的铜箔应比较均匀分敷在内、外层线路, 这将有助于减小板的翘曲度, 也使电镀时在表面获得均匀的镀层。为防止外形加工伤及印制导线和机械加工时造成层间短路, 外层布线区的导电图形和内层布线区的导电图形(包括电源层与地网层)离板边缘的距离应大于 1.25 mm (如图1)。

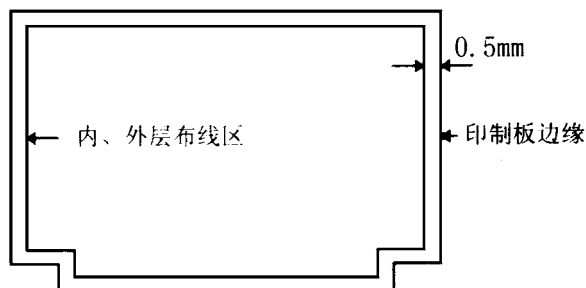


图1 布线区导电图形与印制电路板边缘的距离

至于6层及以上的多层板, 通常将细、密线条设计在内层。外层线路相对简单, 这样做的目的其一是在生产内层线路时, 若产生断线/短路, 可容易修补, 层压时可更换; 其二是层压后制作外层线路时, 减少了因断线而产生的报废, 从而提高产品的合格率。

在布线设计时, 相邻两层的印制导线, 宜相互垂直或斜交或变曲走线, 力求避免相互平行走线, 以防串扰。

印制导线布线尽可能短, 特别是电子管栅极、晶体管的基极和高频回路布线更要短。

1.2 层数与厚度

多层板成品板厚度及各导电层间的厚度由其电气和结构性能确定。导体图形之间半固化片的选择取决于介电常数和本身厚度及成品板的总厚度, 树脂填充量, 处理难易以及成本。

表1 环氧玻璃布半固化片性能参数

半固化型号	公称厚度(mm)	树脂含量(%)	介电常数
1080	0.053	55 ~ 65	4.4
2116	0.094	45 ~ 55	4.7
7628	0.173	38 ~ 48	5.0

目前, 多层板制作主要选用环氧玻璃布半固化片, 其性能参数见表1。

其中常选1080和7628两种, 2116选用较少。上表所列性能, 在成品板中随半固化片的制作和多层板的制作过程会有轻微的变化, 可以不予考虑。1080和7628选择原则为: 1) 要求热膨胀小, 尺寸稳定性好及随板厚增加, 选用树脂含量低的半固化片; 2) 由介电常数来确定。一般要求相邻导体层间的粘结片不得小于2张, 且层压固化后导体层间最近点的介质厚度不得小于 0.1 mm 。成品板厚度与板上最小孔孔径之比控制在3:1之内, 也可达5:1, 若厚径比更大, 则生产控制难度加大, 导致成本提高。

层数的决定作为设计者当然希望层数多一些好, 因为随着设计层数的增加, 布线设计变得容易, 线间距, 线宽可以加大, 使每一内层图形制作故障几率减小; 但层数增加, 板厚增厚, 多层板孔电镀质量出现问题的几率增加。故要权衡层数对生产成本、可靠性的影响, 以此来确定层数。

多层板的各层应保持对称而且最好是偶数铜层。因为不对称的结构潜伏危险, 即板易产生翘曲, 特别是对表面贴装的多层板, 更应引起注意。

多层板的各层结构不出差错, 在每一层电路板上必须有明确的层数标志。规定第一层(顶层)为元器件的主安装面, 即A面; 第n层(底层)为主焊接面, 即B面。n为多层板的层数。

1.3 孔径与焊盘

多层板上的元件孔及其孔径与所选元件的引脚尺寸(引角的标称直径)有关, 其计算式为:

元件孔的孔径 = 元件引脚直径(或对角线) + $(0.25 \text{ mm} \sim 0.70 \text{ mm})$ 。对于自动插装元件, 孔径的计算为:

孔径 = 有效引脚直径 + 孔的位置公差 + 0.20 mm

由上式确定的元件孔可以获得满意的焊接效果。若元件孔径过大, 则焊装时焊点不够饱满。

至于导通孔, 主要是起电气连接作用。其孔径的大小主要由成品板厚度来决定, 一般应控制在板厚/孔径 $\leq 3:1$ 比较理想。

多层板中焊盘大小主要受钻孔孔径、凹蚀大小、最小环宽和加工误差等因素的影响, 因此其设计计算式为:

焊盘尺寸 = 钻孔孔径 + $2 \times$ 最小环宽 + 凹蚀允许量 + 加工误差

其中:凹蚀允许量为 $0.005 \text{ mm} \sim 0.080 \text{ mm}$;

加工误差:当板面最大尺寸 $\leq 300 \text{ mm}$ 时,取 0.5 mm ;

当板面最大尺寸 $> 300 \text{ mm}$ 时,取 0.6 mm ;

最小环宽:内层功能盘取 0.05 mm ,外层电镀通孔取 0.05 mm ,但有导线相连处取 0.13 mm ,非支撑孔取 0.38 mm 。

多层板电源层和地网层上隔离盘主要受钻孔孔径、所要求的最小导体间距、凹蚀允许量和加工误差等因素的影响,其设计计算为:

隔离盘的直径 = 钻孔孔径 + $2 \times$ 所要求的导线间距 + 凹蚀允许量 + 加工误差

其中外层导体间的最小间距为 0.13 mm ;内层导体间的最小间距为 0.10 mm ;凹蚀允许量为 $0.005 \text{ mm} \sim 0.008 \text{ mm}$ 。

多层板中与电源层和地网层连接处,为增加其可靠性,减少焊接过程中大块金属吸热而产生虚焊,一般将连接盘设计成以下二种形状(如图 2)。其内圆直径的计算与信号层焊盘直径的计算公式相同,外圆直径比内圆直径大 0.50 mm ,与大块铜箔相联的腹板宽 $\geq 0.25 \text{ mm}$ 。

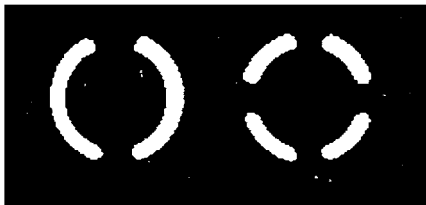


图 2 大面积电源区或接地区连接盘的形状

1.4 线宽和间距

一般的设计原则为:地线宽度 $>$ 电源线宽度 $>$ 信号线宽度。但大多数多层板是将电源层和地网层分开设计成独立的层,铜箔占满整个层(不与电源层和地网层连接的除外)。信号线宽的设计主要考虑:1) 电气性能要求;2) 载流量;3) 互连密度;4) 加工方法和生产效率。

内层信号线的设计主要考虑载流量和阻抗的要求。由于内层的制作是采用覆铜箔板直接腐蚀而制作出所需的线路图形,其信号线的厚度仅为基材铜箔本身的厚度,目前有 $18 \mu\text{m}$ 、 $35 \mu\text{m}$ 和 $70 \mu\text{m}$ 三种可供选择。其选择原则为:①当内层信号线很细 $\leq 0.13 \text{ mm}$ 或其公差要求很严 $\leq 0.013 \text{ mm}$ 时,选用

$18 \mu\text{m}$ 的铜箔。②当内层信号线流经大电流时,选用 $70 \mu\text{m}$ 的铜箔;③一般情况下,内层信号线选用 $35 \mu\text{m}$ 厚的铜箔。

外层线宽的设计是根据其流经的设计电流来定,其计算式采用比值方法获得。在温度为 25°C 时,单位导线横截面上(1 mm^2)可流经 25 A 的电流。即: $B \times h : I_{\text{设计}} = 1 : 25$

$$B \times h = \frac{I_{\text{设计}}}{25}$$

式中: B ——设计线宽(mm)

h ——设计线高(mm)

$I_{\text{设计}}$ ——设计电流(A)

设计线高 h 在无特别说明的情况下,其值 = 基材本身铜箔厚度 + 电镀铜厚度。基材本身铜箔厚度有二种选择: $18 \mu\text{m}$ 和 $35 \mu\text{m}$;电镀铜厚度平均值为 $25 \mu\text{m}$ 。设计时,①先确定线高 h ,利用上式求出线宽 B ;②在布线较密的情况下,利用上式求出的线宽 B 无法布通,则可根据其布线密度,确定线宽 B ,利用上式求线高 h ;然后委外加工时,对制作厂方提出其要求,一般要求内层和外层导线的最小宽度不得小于 0.10 mm 。

间距的设计则应满足电气安全的要求。外层导线的最小间距不得小于 0.13 mm ,内层导线的最小间距不得小于 0.10 mm 。在布线能排下的情况下,线宽、线间距尽量取大值,以提高生产时的成品率。随着线宽的增加,其电阻值及温升都小,但电容耦合较大,因此在不需要有耦合的地方,关键导线要窄,并且要保证足够的间距。

2 多层印制板的制作

2.1 常规多层板的制作工艺过程

常规多层板的制作工艺过程如图 3。

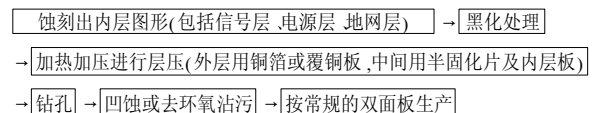


图 3 工艺过程图

2.2 多层板重点制作工艺简述

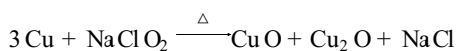
a. 黑化处理

内层图形黑化处理的作用是使非极性的铜表面形成带极性的 CuO 与 Cu_2O ,使之与极性的环氧树脂(半固化片)之间形成良好的结合。同时,在铜的表面形成细致、均匀、微观上看其形貌属于树枝状结

晶,增加了比表面。在后续(layering)工序时,流动的树脂嵌入这些表面,确保铜表面与半固化片结合坚固,受热冲击时,界面处不发生分层。

黑化处理工艺流程:碱性除油($\theta = (60 \pm 5)^\circ\text{C}$, $t = 4 \text{ min} \sim 6 \text{ min}$) → 水洗 → 水洗 → 粗化($\theta = \text{室温}$, $t = 2 \text{ min} \sim 3 \text{ min}$) → 水洗 → 预浸($\theta = \text{室温}$, $t = 1 \text{ min} \sim 2 \text{ min}$) → 水洗 → 水洗 → 黑色氧化物($\theta = (80 \pm 5)^\circ\text{C}$, $t = 4 \text{ min} \sim 6 \text{ min}$) → 水洗 → 水洗 → 热水洗($\theta = (50 \pm 10)^\circ\text{C}$, $t = 1 \text{ min} \sim 2 \text{ min}$) → 烘干。

黑化反应机理为:



黑化过程中必须严格控制黑化时间,若时间过长,则生成的黑化膜增厚,容易发生黑化层疏松现象,反而引起层间结合不牢。

b. 层压

层压的目的是借助于B-阶粘结片(半固化片)把各层电路粘结成整体的一种加工手段。这种粘结是通过界面上大分子之间的互相扩散和渗透而产生交织来实现的。

层压工艺流程:叠片 → 层压

1) 叠片

根据工艺要求,将制作好图形的内层板、外层板或铜箔、缓冲层、半固化片、不锈钢隔离板等按顺序放置于上、下模板之间(如图4),之后置于层压机压模开口处,然后进行层压。

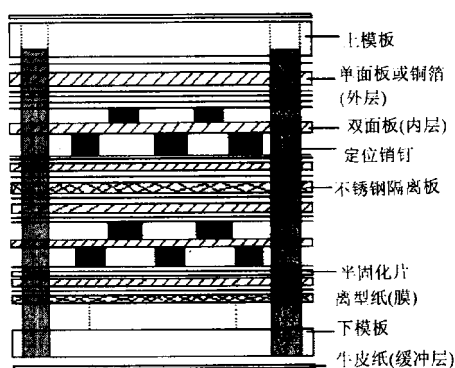


图4 叠片细节示意图

2) 层压

多层板的层压根据层压机的层压过程分为:一般层压和真空层压两种。无论采用什么型式的层压机,必须保证加压模平整,温度和压力均匀。如果压模不平整,压力不均匀,易造成层压板局部缺胶或树脂气泡赶不尽,成品板厚度偏差较大现象。若温度

不均匀,易造成层压板内树脂固化程度不一致,产生较大的内应力,成品板产生翘(扭)曲。

层压参数的确定。多层板层压的全过程包括预压、全压和保压冷却三个阶段。以真空层压机为例,其层压过程为:

抽真空(4 min ~ 5 min) → 开口闭合(预压)(17 min ~ 20 min) → 全压(高压)(60 min ~ 90 min) → 保压冷却(20 min ~ 30 min)。

层压的参数温度和压力是根据半固化片的树脂体系和多层板的结构来决定的。

在层压过程中,影响层压质量的主要因素是半固化片的性能、压力、温度,而且三者相互关联。

半固化片的性能,目前我们用于粘接的主要树脂是环氧树脂,它的流变曲线见图5和图6。

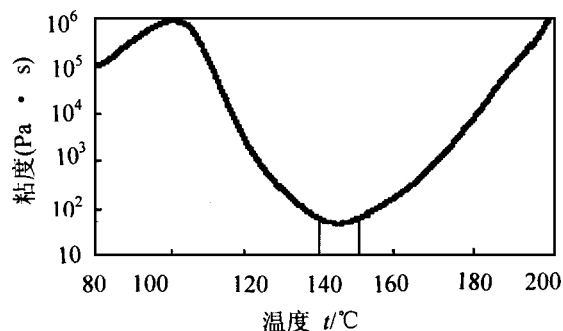


图5 FR-4半固化片层压过程中的流变曲线

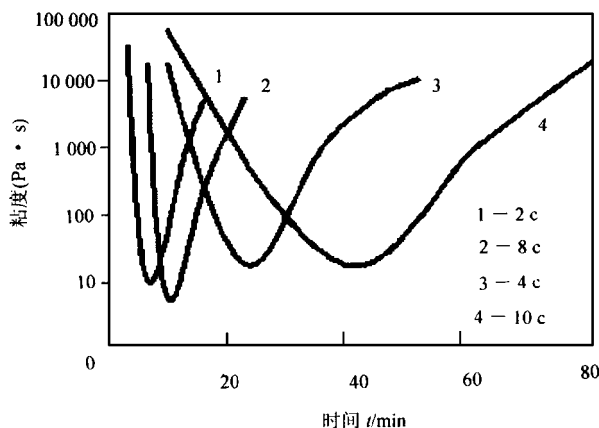


图6 FR-4半固化片的流变曲线

从图5中看出,为了保证粘连表面最大限度润湿,又要保证树脂不被过分流动,施加压力时间应选在 150°C 左右,考虑到工作实际,我们选择在 170°C (加热钢板温度)左右。

从图6看出,升温速度快,虽具有最小的粘度但树脂保持流动性时间短,不利于树脂的流动;升温速

度慢具有较大的粘度但熔融区域保持时间长,凝胶时间长,容易产生树脂过分流动。故升温速度应控制在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min} \sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 之间为宜。

压力的确定:层压所用的压力一般是根据粘接片供应商所供压力参数而确定。压力过大,容易产生压力不均衡,造成板子厚度不均匀,同时容易产生贫胶和变形,尤其对高流动度的半固化片更是如此;压力过小,造成铜箔表面湿润不充分,容易分层。根据我们的工作实际其压力计算为:

预压压力 = $(112 \sim 135) \times \text{板面积} + \text{起始压力}(\text{N})$

高压压力 = $(1\ 125 \sim 1\ 350) \times \text{板面积} + \text{起始压力}(\text{N})$

起始压力即闭合压模时,层压台和钢板的自重,其值为 $57\ 250\ \text{N} \sim 67\ 500\ \text{N}$ 之间,其具体值根据层压的模数决定(1~4),模数高取大值,模数低取小值。

c. 凹蚀(去环氧沾污)

环氧沾污的形成与印制板机械性能,钻头的材料和几何形状,钻孔的工艺条件等因素有关,如不除去则可能导致下列情况。

1) 沾污使金属化孔和内层电路的连接因树脂污的隔离而造成断路或仅仅局部相连(见图 7)。

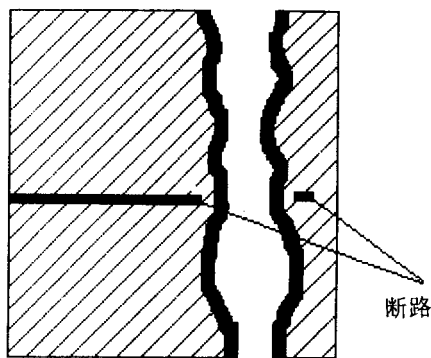


图 7 树脂沾污造成断路示意图

2) 环氧树脂玻璃布粉末(沾污)很疏松,并非牢固地粘附于孔壁上,如不除去,可能在孔金属化过程中脱落或部分脱落。

凹蚀的目的,使内层连接盘上、下表面的环氧树脂玻璃布被部分去除而露出铜面,使金属化形成三维空间的连接,大大提高了内层的连接面(见图 8)。

凹蚀(去环氧沾污)的工艺流程:膨化($\theta = (65 \pm 10)\text{ }^{\circ}\text{C}, t = 4\text{ min} \sim 6\text{ min}$) → 水洗 → 水洗 → 凹蚀($\theta = (75 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}, t = 7\text{ min} \sim 10\text{ min}$) → 水洗 → 水洗 → 中和($\theta = (37 \pm 8)\text{ }^{\circ}\text{C}, t = 4\text{ min} \sim 6\text{ min}$) → 水洗 → 水洗 → 调整($\theta = (40 \pm 10)\text{ }^{\circ}\text{C}, t = 4\text{ min} \sim 6\text{ min}$) →

水洗。

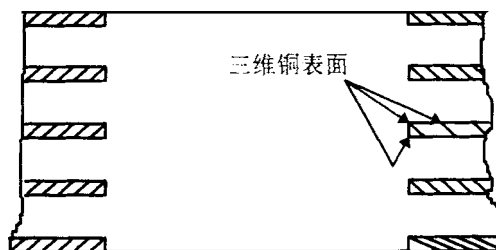
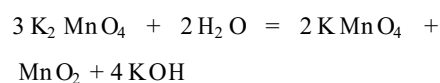
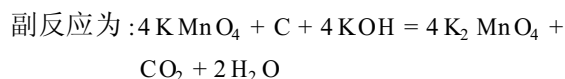
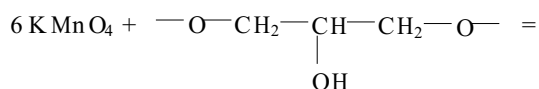


图 8 凹蚀示意图

反应原理:碱性高锰酸钾与环氧树脂分子结构中的烃基作用,使环氧树脂被腐蚀下来。其反应式为:



碱性高锰酸钾的沾污(凹蚀),在工作温度、处理时间确定后,定期用分光光度法测定高锰酸钾、锰酸钾的含量及氢氧化钠浓度(pH计),同时确保高锰酸钾浓度比锰酸钾的浓度高出 $30\text{ g/L} \sim 50\text{ g/L}$,且锰酸钾的浓度应少于 15 g/L 。

凹蚀的深度应合理控制并非越深越好,因为凹蚀越深,电镀时凹蚀的深处电力线不易达到,易形成薄铜层或镀层折叠等缺陷,反而使金属化孔的互连不可靠。一般控制在 $5\text{ }\mu\text{m} \sim 80\text{ }\mu\text{m}$ 之间,最合适的凹蚀深度为 $13\text{ }\mu\text{m}$,具体数值视内层绝缘层的厚度,即两层连接盘的间距而定。间距大,凹蚀可深一些;间距小,凹蚀要浅一些。

凹蚀后,其后续制作与双面板制作相同,在此不再叙述。

3 结论

在多层板的设计中,从生产制作工艺上应考虑外形与布局、层数与厚度、孔径与焊盘、线宽和间距;而在其制作过程中,严格控制黑化、层压、凹蚀等工序,从而达到降低多层板的制造成本,提高其可靠性。

收稿日期:1998-05-20