

印制电路板微电阻及特性阻抗的精度控制

周海平 周 晨

昆明船舶设备研究试验中心 云南 昆明 650000

摘 要: 在电子产品的持续发展下, 印制电路板微电阻及特性阻抗控制精度的要求越来越高。特性阻抗精度与产品质量、过程控制及测量技术等紧密相关, 阻抗测试失真或评估误差过大, 将影响产品的过程控制, 同时导致产品质量出现问题。为了保证印制板制造质量, 需满足印制电路板调节延时及系统时序要求, 保证印制电路板在传输高速信号时的信号稳定, 提高信号线的微电阻和特性阻抗控制精度。但高精度控制难度较大, 这为印制电路板设计及制造带来很大挑战。基于此, 对印制电路板微电阻和特性阻抗的精度控制进行研究和提供参考。

关键词: 印制电路板; 微电阻; 特性阻抗; 控制精度

Precision control of micro resistance and characteristic impedance of printed circuit board

Zhou Haiping, Zhou Chen

Kunming Marine Equipment Research and Test Center, Kunming, Yunnan, 650000

Abstract: With the continuous development of electronic products, the control precision of microresistance and characteristic impedance of printed circuit board is more and more demanding. The accuracy of characteristic impedance is closely related to product quality, process control and measurement technology. Too large impedance distortion or evaluation error will affect the process control of products and lead to product quality problems. In order to ensure the manufacturing quality of the printed board, it is necessary to meet the requirements of the PCB adjustment delay and system timing, ensure the stability of the printed circuit board when transmitting high-speed signals, and improve the control precision of the microresistance and characteristic impedance of the signal line. However, high precision control is difficult, which brings great challenge to PCB design and manufacture. Based on this, the precision control of microresistance and characteristic impedance of printed circuit board is studied.

Keywords: Printed circuit board; Micro resistance; Characteristic impedance; Precision control

1 印制电路板的微电阻和特性阻抗

印制电路板中的微电阻也就是电路导体电阻对直流电流的阻碍程度, 其作用模式与常规电阻对电路的影响相同, 可理解为一种电阻。印制电路板微电阻和导体材料、长度及横截面积相关, 可用欧姆定律表示, 即 $R=U/I$, 电阻率的计算表达式 $\rho=RS/L$, ρ 就是电阻率, L 为材料的长度, S 为面积, R 是电阻值。可以看出, 材料的电阻大小与材料的长度成正比, 即在材料和横截面积不变时, 长度越长, 材料电阻越大; 而与材料横截面积成反比, 即在材料和长度不变时, 横截面积越大, 电阻越小。

印制电路板特性阻抗是指电路中电阻导体与交流电流的作用关系, 特性阻抗越大对交流电流的阻碍作用就越明显。特性阻抗包括电阻、电感及电容的矢量之和, 通常用 R_0 代表。相对印制电路板而言, 特性阻抗以信号线、介质层、接地层来作为载体, 特性阻抗通常有多种模块, 最常见的是微

带线及带状线。需要注意的是, 特性阻抗与电阻及微电阻的概念不同, 特性阻抗与传输线长度并没有关系, 也无法通过欧姆定律求取特性电阻。特性电阻和阻抗也并非是完全相同的概念, 印制电路板的阻抗是特性阻抗的简称, 可理解为阻抗就是印制电路板的特性阻抗。

2 印制电路板微电阻和特性阻抗精度控制的影响因素

2.1 印制电路板微电阻精度控制的影响因素

以印制电路板微电阻控制要求的递增为例, 一个印制电路板最初的微电阻控制要求为 200Ω , 随后按照 $25-200\Omega \rightarrow 5-100\Omega \rightarrow 35-85\Omega \rightarrow 40\pm 5\Omega$, 到最后的 $1.0-5.0\Omega$ 。从该印制电路板微电阻控制要求可知, 其要求逐渐增高, 对精度控制的要求愈发严格。

图1为常见的印制电路线路, 依照电阻计算公式 $R=\rho L/S$, 推算出印制电路板线路中微电阻计算公式(1):

$$R=2.09 \times 10^{-13} \times L [T \times (W+W_1)] \quad (1)$$

式(1)中,L为电线路长度,T为线路厚度,W为线路宽度。相对于内层线路来说,线路厚度及线路长度不变时,同时将线路宽度对不同设计参数的蛇形线微电阻控制影响纳入考量范围。在此情况下,若 $W_1-W=A$,将上述公式微分处理,可得到下式:

$$\Delta R = -(4.18 \times 10^{13} \times L/T) \times [\Delta W/(2W+A)^2] \quad (2)$$

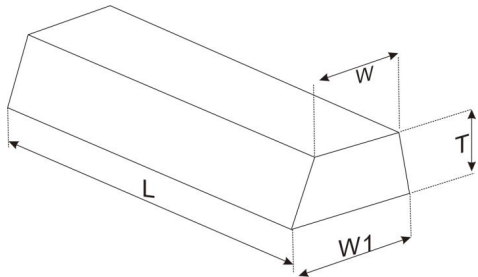


图1 印制电路线路

如果对线路铜厚度的影响忽略不计,采用不同线宽及线长,分别计算微电阻,详见表1。

表1 微电阻与材质关系表

材质	线路长度	微电阻 ΔR
0.5oz 铜箔	$1.27 \times 10^{-5} \text{m}$ (0.5mil)	$-3.29 \times 10^{18} \times L \times [\Delta W/(2W+A)^2]$
1.0oz 铜箔	$2.793 \times 10^{-5} \text{m}$ (1.1mil)	$-1.49 \times 10^{18} \times L \times [\Delta W/(2W+A)^2]$
2.0oz 铜箔	$6.220 \times 10^{-5} \text{m}$ (2.45mil)	$-0.66 \times 10^{18} \times L \times [\Delta W/(2W+A)^2]$

从表1可以看出,当铜箔小于0.5oz时蛇形线路长度与微电阻控制精度之间的关系更加明显,意味着小于0.5oz的铜箔蛇形线路长度对微电阻控制精度影响较大。

2.2 印制电路板特性阻抗精度控制

假设印制电路板特性阻抗公差原始值为 $\pm 15\%$,现精度控制要求增高,从原始值缩小到 $\pm 10\% \rightarrow \pm 8\% \rightarrow \pm 5\%$ 。当特性阻抗公差为 $\pm 5\%$ 时,差动阻抗呈现出低与高设计值阻抗控制两个要求。印制电路板特性阻抗的影响因素,包括介电常数、介质厚度、铜箔厚度、生产控制等。依照阻抗结构图及关联因素公式,可判断出不同设计因素对特性阻抗的影响程度,按照大小可排列为:介电常数<油墨厚度<导线厚度<介质厚度<导线宽度。对此,在印制电路板设计中需按照不同因素的影响程度优化设计。

3 印制电路板微电阻及特性阻抗精度控制的提高措施

3.1 参数设计

依照印制电路板生产工艺及生产场所具体情况,对试验数据进行更新及优化,例如针对不同生产条件下的线路宽度进行补偿,同时设计出不同孔径对应的铜箔厚度,不同材料的介电常数等。通过各类数值,为试验的顺利开展提供保障。

3.2 印制电路板微电阻控制精度的提高措施

结合上述经过细化的参数,可以证明不同盎司量、不同线路长度的蛇形线路微电阻控制,在蛇形线路长度不同的情

况下,微电阻经过处理后,微电阻变化幅度存在差异。在参数设计中,只要保证线宽补偿及侧蚀量满足要求,不同线宽蚀刻过程中按照线宽公差 $\pm 10\%$ 控制微电阻,在此基础上线路设计阶段为留有微电阻提高空间,不同盎司量铜箔微电阻控制公差可完全控制在10%以内。针对线路长度在6.35m以内的线路,微电阻控制线路微电阻控制精度可在5%以内。为了最大限度提高微电阻控制精度,可在生产中对其进行控制。

3.3 印制电路板特性阻抗控制精度的提高措施

3.3.1 优化特性阻抗线路设计

印制电路板布线方式及线路间距对特性阻抗有一定影响。与此同时,当按照正常模式布线时,玻纤叠层设计方面具有一个树脂较多的位置,这个位置的介电常数需整批材料相比较小。为了解决蚀量线路方向的差异和线路玻纤平行对介电常数的影响,特性阻抗控制面板利用倾斜布线的方式,以此提高精度控制水平。

3.3.2 选择适当的线路设计模式

除了按照规定要求设计印制电路板时,信号线容易受到电磁场作用影响,特性阻抗精度控制能力还和细节优化的水平相关。在线路设计方面,可对比阻抗控制与“水渠输水”的模式,选取合适的方案。水渠输水与阻抗控制模式的传输对象分别为水流、高频信号,区别是高频信号相比水流复杂程度更高,传播速度更快;二者理想状态均为阻抗不受长度影响,但二者在信号传输方面存在线损不同的情况。水渠输水模式的实际状况是渠道拐弯、变宽变深、渠道突然停止,阻抗控制模式的实际情况是线路拐弯、线宽线厚发生变化、终端负载不匹配,当利用水渠输水模式时,水流易产生波纹,信号线传输信号的过程中,易将信号强度减弱,并且受电磁场的影响十分明显。

3.3.3 线宽补偿

对此,为了提高印制电路板特性阻抗控制精度,需注重信号线线宽补偿问题。如果其余参数保持恒定,需确定最优的控制精度,部分测试数据详见表2。

表2 线宽阻抗及误差关系表

线宽 比值 类别	特性阻抗		阻抗误差	
	单线阻抗	双线阻抗	单线阻抗	双线阻抗
0.191W/7.5mm	51.92 Ω	103.48 Ω	2.61%	3.48%
0.192W/7.55mm	51.66 Ω	108.82 Ω	2.37%	2.84%
0.193W/7.6mm	51.54 Ω	102.27 Ω	2.11%	2.27%
0.194W/7.65mm	51.40 Ω	102.11 Ω	1.85%	2.12%
0.196W/7.7mm	51.28 Ω	101.95 Ω	1.58%	1.97%

当线宽为0.203W/8.0mm时,单线阻抗及双线阻抗误差均为0%,随着线宽的增加,阻抗误差由正误差转变为负误差。由上述数据可知,导线宽度的偏差对阻抗的影响程度不同,其影响随着误差的加大从最初的正误差变为负误差。正

偏差对特性阻抗的影响相对较小,若线宽偏差量相同,对差动阻抗的影响明显。所以,如果对特性阻抗精度控制要求较高,需将导线宽度控制在线宽补偿的正偏差之内,同时对多种类型的阻抗线路进行针对性补偿。

3.3.4 优化布线

在印制电路板设计中,需避免相邻布线面平行或重叠,这是因为平行布线的方式很容易让信号反馈受到电磁干扰,易出现耦合,影响电阻数值的测试,从而导致电阻误差超出测量误差的允许值。在布线中,应在两根平行线之间增加单条底线,或是适当增强阻抗控制公差,让测量结果满足要求。除此之外,信号线设计中,易出现拐角较多的问题,其等同于复杂的滤波器,会让高速信号失真,尤其是垂直的拐角位置的信号。拐角位置由于面积在增加,易出现电容寄生的问题,让信号部分损失。为了解决这一问题,利用优化设计的方式让拐角角度为 135° ,或设计成原型或弧形的拐角,从而提高特性阻抗的控制精度。

3.3.5 降低干扰误差

在印制电路板设计中,为了提高特性阻抗控制精度,还需关注测试图形的异常设计问题。为了让介质层厚度处于平衡状态,同时提高分散电流电镀层的均匀性,应在特性阻抗线路周围增加可以平衡阻抗的铜箔,由于布线四周的平衡铜箔的位置与信号线相近,对线路有一定干扰作用,理论上是靠近信号线敷设铜箔会让走线特性阻抗减小。不同干扰因素会影响传输线路的信号准确性及完整性,例如,处于不理想状态时的地平面设计会影响地平面反弹噪声和开关噪声,此时将出现耦合效应,从而引发串扰问题。此类干扰在高速设计中,会让信号传播速度减缓,甚至出现延迟问题。为了解决这个问题,在设计中需考虑参考层间平衡铜点干扰和阻抗测量之间的关系,以最大限度消除误差。

4 印制电路板特性阻抗精度测试方法

由于微电阻精度测试方法相对普遍,因此主要探讨印制电路板特性阻抗精度测试方法。印制电路板的特性阻抗需控制在指定范围内,为了让产品信号的完整性得到提高,印制电路板生产厂家多使用讯号线的方式测试特性阻抗,所以对时域反射技术测试和信号完整性设计的关系作出阐释。

4.1 共面波导和时域反射阻抗测试

共面波导具有加工方面和性能优越的优势,它是一种微波传输线,其在电路中的应用随着科技水平的提高愈加广泛。共面波导模块讯号线不具备的性能优势,其辐射耕地、

耦合干扰更少。从常见的时域反射技术测试曲线中可知,电磁波与时域反射技术阻抗测试之间有着某种关联,如果对 50Ω 的共面波导模块基常见的带状线进行干扰测试,大多数情况下认为外界电磁对时域反射技术阻抗测试有一定影响,因为外界电磁影响了印制电路板的信号传输。由此可见,电磁干扰对阻抗测试的影响十分明显,但是共面波导模块讯号线的时域反射技术测试曲线较为平滑,可见它的抗干扰性十分普通。

4.2 过孔设计和时域反射技术阻抗测试

多层印制电路板的过孔本身具有寄生电容及电感。理论上过孔的电容会让信号上升时间有所延长,会让电路速度下降。过孔寄生电感会让旁路电容的影响减弱,同时削弱电源系统的滤波能力。如果系统为高速数字系统,过孔寄生电探会比寄生电容的危害更加明显。相对于线路旁侧有靠近的接地导通孔的讯号线,会显示出特性阻抗非连续现象,受讯号线旁侧导通孔的电感影响,时域反射技术测试图形成纤维局部上翘,会让特性阻抗出现超差现象,以此达到测试阻抗的效果。

5 结束语

为了让系统时序设计及传输信号的稳定性满足要求,印制电路板微电阻和特性阻抗控制精度十分重要。在印制电路板生产中,需持续优化设计参数,增加设计规则,完善控制措施。印制电路板微电阻批量生产中需将公差控制在 $1\%\sim 5\%$ 以内,对于高控制精度的特性阻抗板件需让阻抗控制处于高位水平,不断增强阻抗精度控制能力。

参考文献

- [1]严康,陈清,刘丽萍,王瑞祥,徐志峰,张忠堂.废旧电路板富氧顶吹熔炼过程热力学研究.中国有色金属学报:1-22[2022-11-11].
- [2]张文平,许校彬,邵勇,陈金星.印制电路板表面的选择性锡膏处理技术研究[J].印制电路信息,2022,30(10):13-16.
- [3]贾伟,陈志强,王发强,郭帆,邱爱慈.低阻抗负载强电磁脉冲驱动源一级脉冲压缩电路的参数设计[J].现代应用物理,2022,13(3):104-110.
- [4]张志荣,洪汉玉,章秀华.基于光谱共焦的电路板微型元器件三维高精度检测[J].计算机与数字工程,2022,50(9):2102-2108.
- [5]陈庆国,夏宝山,何莹,方少舟.印制电路板湿热环境试验失效案例分析[J].印制电路信息,2022,30(9):28-31.