

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407665

# 基于电磁扫描的电路板防护涂层覆盖性检测\*

马云鹏 郑伟 吴沁珂 刘建金 王超

(重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044)

**摘要:**防护涂层是保障印制电路板在复杂环境中可靠运行的关键措施,能有效防止外界因素的侵蚀和元器件老化。然而,目前的防护涂层检测技术仍不完善,难以实现涂层覆盖性的全面检测,从而影响了涂层的保护能力和长期稳定性。论文提出了一种基于电磁扫描和波动序列差异性度量的电路板防护涂层覆盖性检测方法。首先,分析了防护涂层的电磁屏蔽机理,为系统检测提供理论基础;其次,提出了改进的自适应波动序列差异性度量方法,该方法通过近场扫描获取电路板在涂层正常与薄弱状态下的电磁辐射数据,并应用小波分解进行数据降噪,进而运用改进的差异性度量算法计算两类波动序列距离值,以识别涂层缺陷区域。最后,通过仿真和实测实验验证该方法的有效性。实验结果表明该方法能有效提升涂层检测的准确性与可靠性,克服了传统检测手段在涂层覆盖性评估中的不足,为电磁屏蔽技术的理论研究与工程应用提供了新视角。

**关键词:**防护涂层;近场扫描;波动序列;差异性度量;覆盖性检测

**中图分类号:** TP274.5; TN98

**文献标识码:** A

**国家标准学科分类代码:** 460.4

## Detection technology of conformal coating coverage on circuit board based on electromagnetic scanning

Ma Yunpeng Zheng Wei Wu Qinke Liu Jianjin Wang Chao

(Department of Optoelectronic Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Technology&amp;Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Conformal coatings are essential for ensuring the reliable operation of printed circuit boards (PCBs) in complex environments, effectively preventing external corrosion and component aging. However, current conformal coating detection techniques remain inadequate, making it difficult to achieve comprehensive coverage assessment, which affects the coating's protective capability and long-term stability. This paper proposes a PCB conformal coating coverage detection method based on electromagnetic scanning and fluctuation sequence difference measurement. First, the electromagnetic shielding mechanism of the conformal coating is analyzed, providing a theoretical foundation for system detection. Next, an improved adaptive fluctuation sequence difference measurement method is proposed. This method acquires electromagnetic radiation data of the PCB under normal and weakened coating conditions through near-field scanning, applies wavelet decomposition for noise reduction, and uses an improved difference measurement algorithm to calculate the distance between two fluctuation sequences to identify coating defect areas. Finally, the effectiveness of this method is verified through simulations and experimental measurements. The results demonstrate that this method significantly enhances the accuracy and reliability of coating detection, overcoming limitations in traditional coating assessment methods and offering new perspectives for the theoretical research and engineering applications of electromagnetic shielding technology.

**Keywords:** conformal coating; near field scanning; fluctuation sequence; dissimilarity measure; coverage testing

## 0 引言

印制电路板是电子设备的关键组成部分之一。随着应用环境的复杂化,电子设备通常需在高温、高湿、高盐雾等特殊腐蚀环境中运行,易出现金属电化学腐蚀和非金属霉变等问题<sup>[1-2]</sup>。防护涂层是一种直接涂覆在印制电路板表面的保护性涂料,它形成的致密薄膜能够有效隔离电路与外部环境,从而延缓电子元器件的老化,提高其绝缘性能和电磁兼容性<sup>[3-4]</sup>。然而,防护涂层在涂敷过程中,由于受到材料特性和操作规范等因素的影响,极易导致涂层的不完整覆盖和不均匀分布,从而削弱了涂层的保护能力和长期有效性<sup>[5]</sup>。因此,进行防护涂层涂敷效果的检测至关重要。

目前,传统的检测方法包括破坏性检测、千分尺接触式检测<sup>[6]</sup>、 $\beta$ 反向散射法<sup>[7]</sup>、干膜测试仪检测<sup>[8]</sup>、涡流测厚法<sup>[9]</sup>和超声波测厚法<sup>[10]</sup>等,但这些方法往往局限于局部检测,无法实现整板涂敷效果的全面评估。国内外研究人员提出了很多的印制电路板防护涂层检测方法。Kogel-Hollacher M等<sup>[11]</sup>提出一种组合式自动光学检测检测系统,采用激光干涉和荧光指示剂结合的测量方法,能够实现涂层的覆盖性自动检测。然而,该方法依赖于涂层中引入荧光指示物,并且在采用激光干涉测量时,涂层表面的污染会很大程度干扰测量结果,导致检测精度下降。Shao等<sup>[12]</sup>提出了一种基于超高分辨率光学相干断层扫描技术的无损检测方法。该方案利用防护涂层和阻焊层之间的折射率不同,在超高分辨率的光学相干断层扫描下测量其厚度差异。然而,该方法需要严苛的工作环境,且设备的成本昂贵,难以转化为实际成果规模化应用。

电磁扫描是一种新兴的非接触无损检测技术,能够获取数字电路板完整的电磁辐射状况,具有高分辨率的优点。该技术通过对电路板电磁辐射情况的直观定位和分析,有助于实现电磁兼容性更强的产品设计,并有效检测相关电磁异常的故障。近年来,研究人员提出了基于电磁场的电路故障诊断方案,推动了电磁检测技术的研究进展<sup>[13]</sup>。此外,近场扫描技术在防护涂层覆盖性检测中展现出显著优势,通过评估印制电路板的电磁场分布,能够定位涂层中的潜在问题,从而提高电子设备的整体稳定性和可靠性。

## 1 电磁屏蔽基本理论

### 1.1 电磁屏蔽理论推导

随着微波集成电路的发展和高性能、低功耗传输线路的需求,1969年,C. P. Wen首次在中介衬底上制备了

共面波导(coplanar waveguide, CPW),并测量和计算了其特性阻抗和衰减特性。共面波导是一种高器件集成度的平面传输线结构,其最显著的特征是信号导带与接地制作在介质基片的同一表面。共面波导由中心金属导带、介质基板和两侧金属导体接地组成,其中 $S$ 是导带宽度, $W$ 是两侧的槽宽, $t$ 为导带和金属地板的厚度, $h$ 是介质基板的厚度, $\varepsilon_r$ 是介质基板的介电常数,其中令 $S = 2a$ ,  $2W + S = 2b$ <sup>[14]</sup>。在电路设计中,为了减小共面波导受到周围其他传输线产生的串扰信号的影响,通常会在共面波导底部添加金属地层,形成背覆导体共面波导结构(conductor-backed coplanar waveguide, CBCPW)。

如图1所示,展示了印制电路板工艺中正常状态和涂层覆盖下的背覆导体共面波导结构模型。其中 $\varepsilon_1$ 是介质基板的介电常数, $\varepsilon_2$ 是阻焊层的介电常数, $\varepsilon_3$ 是防护涂层的介电常数, $\varepsilon_0$ 是空气的介电常数,其有效介电常数由公式(1)计算得出。

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{C_{\text{CBCPW}}}{C_{\text{air}}} \quad (1)$$

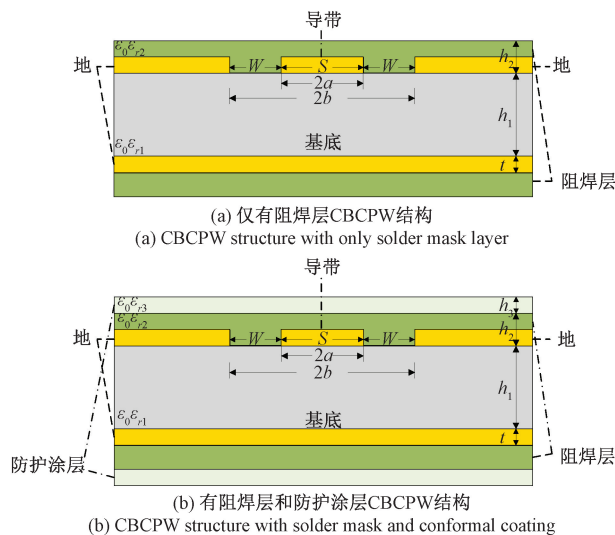


图1 CBCPW侧视图

Fig. 1 Side view of CBCPW

如图2和3所示,为了计算电路板结构的等效介电常数 $\varepsilon_{\text{eff}}$ 和特征阻抗 $Z_0$ ,论文将其进行模块划分,并针对每个模块采用保角映射理论进行评估,忽略金属导体的厚度 $t$ 。无防护涂层电路板CBCPW结构的总电容 $C_{\text{CBCPW}}$ 和防护涂层覆盖下电路板CCBCPW结构的总电容 $C_{\text{CCBCPW}}$ 可通过以下方式表示<sup>[15-16]</sup>:

$$C_{\text{CBCPW}} = C_1 + C_2 \quad (2)$$

$$C_{\text{CCBCPW}} = C_{c1} + C_{c2} + C_{c3} \quad (3)$$

正常状态下的模块划分如图2所示,其中 $C_1$ 是拆分的共面波导结构的电容, $C_2$ 是金属导体和阻焊层的结构电容, $C_{\text{air}}$ 为没有介电层存在时的电容。

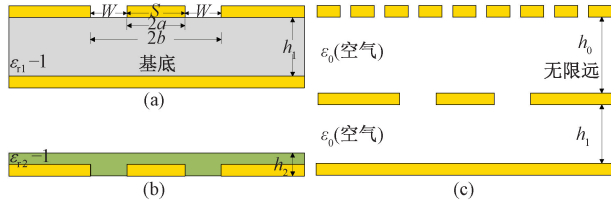


图 2 仅有阻焊层 CBCPW 的电容分解结果 (a) 结构电容为  $C_1$  (b) 结构电容为  $C_2$  (c) 结构电容为  $C_{air}$

Fig. 2 The capacitance division result of CBCPW with only solder mask layer (a) The structural capacitance is  $C_1$  (b) The structural capacitance is  $C_2$  (c) The structural capacitance is  $C_{air}$

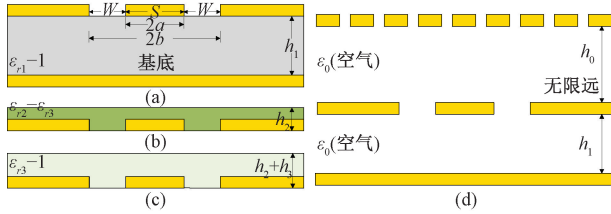


图 3 防护涂层状态下 CBCPW 的电容分解结果 (a) 结构电容为  $C_{C1}$  (b) 结构电容为  $C_{C2}$  (c) 结构电容为  $C_{C3}$  (d) 结构电容为  $C_{air}$

Fig. 3 The capacitance division result of CBCPW under conformal coating state (a) The structural capacitance is  $C_{C1}$  (b) The structural capacitance is  $C_{C2}$  (c) The structural capacitance is  $C_{C3}$  (d) The structural capacitance is  $C_{air}$

$$C_{air} = 2\varepsilon_0 \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} + 2\varepsilon_0 \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \quad (4)$$

$$C_1 = 2\varepsilon_0 \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} + 2\varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \quad (5)$$

$$C_2 = 2\varepsilon_0 (\varepsilon_{r2} - 1) \frac{K(k_2)}{K(k'_2)} \quad (6)$$

涂层覆盖下的电路结构划分如图 3 所示,其中  $C_{C1}$  是拆分的共面波导结构的电容,  $C_{C2}$  是金属导体和阻焊层的结构电容,  $C_{C3}$  是金属导体和涂层的结构电容,  $C_{air}$  为没有介电层存在时的电容。

$$C_{air} = 2\varepsilon_0 \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} + 2\varepsilon_0 \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \quad (7)$$

$$C_{C1} = 2\varepsilon_0 \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} + 2\varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \quad (8)$$

$$C_{C2} = 2\varepsilon_0 (\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r3}) \frac{K(k_2)}{K(k'_2)} \quad (9)$$

$$C_{C3} = 2\varepsilon_0 (\varepsilon_{r3} - 1) \frac{K(k_3)}{K(k'_3)} \quad (10)$$

椭圆微积分  $K(k_i)$  和  $K(k'_i)$  的模  $k_i, k'_i$  ( $i \in 0, 1, 2, 3$ ) 分别为:

$$k_0 = \frac{a}{b} \quad (11)$$

$$k_1 = \frac{\tanh(\frac{\pi a}{2h_1})}{\tanh(\frac{\pi b}{2h_1})} \quad (12)$$

$$k_2 = \frac{\sinh(\frac{\pi a}{2h_2})}{\sinh(\frac{\pi b}{2h_2})} \quad (13)$$

$$k_3 = \frac{\sinh(\frac{\pi a}{2(h_2 + h_3)})}{\sinh(\frac{\pi b}{2(h_2 + h_3)})} \quad (14)$$

$$k'_i = \sqrt{1 - k_i^2}, i = 0, 1, 2, 3 \quad (15)$$

无防护涂层电路板 CBCPW 结构的等效介电常数  $\varepsilon_{eff}$  和特征阻抗  $Z_0$  分别为:

$$\varepsilon_{eff} = 1 + q_1(\varepsilon_{r1} - 1) + q_2(\varepsilon_{r2} - 1) \quad (16)$$

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}} \left( \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} + \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \right)} \quad (17)$$

其中,

$$q_i = \frac{K(k_i)}{K(k'_i)} \left[ \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} + \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \right]^{-1}, i = 1, 2 \quad (18)$$

防护涂层覆盖下电路板 CCBCPW 结构的等效介电常数  $\varepsilon_{effcoating}$  和特征阻抗  $Z_{C0}$  分别为:

$$\varepsilon_{effcoating} = 1 + q_1(\varepsilon_{r1} - 1) + q_2(\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r3}) + q_3(\varepsilon_{r3} - 1) \quad (19)$$

$$Z_{C0} = \frac{60\pi}{\sqrt{\varepsilon_{effcoating}} \left( \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} + \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \right)} \quad (20)$$

其中,

$$q_i = \frac{K(k_i)}{K(k'_i)} \left[ \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} + \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \right]^{-1}, i = 1, 2, 3 \quad (21)$$

由此可以得出防护涂层涂敷后电路板的介电常数变化  $\varepsilon_\Delta$  为:

$$\varepsilon_\Delta = \varepsilon_{effcoating} - \varepsilon_{eff} = (\varepsilon_{r3} - 1)(q_3 - q_2) \quad (22)$$

通常情况下,防护涂层的介电常数大于 1。因此可以通过比较  $\frac{K(k_i)}{K(k'_i)}$  确定  $q_i$  的大小。将  $\frac{K(k_i)}{K(k'_i)}$  简化为几个基本算术模型,如式 (23) ~ (25) 所示。

$$f(x) = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}, (x > 0) \quad (23)$$

$$g(x) = \sinh(x), (x > 0) \quad (24)$$

$$h(x) = \frac{\sinh(ax)}{\sinh(bx)}, (b > a, x > 0) \quad (25)$$

通过分析这些公式易得 $f(x)$ 和 $g(x)$ 在工作区间内递增, $h(x)$ 在工作区间内递减,由此可以推理出 $\varepsilon_{\Delta} > 0$ ,即防护涂层使电路板的介电常数增大,而特性阻抗相对减小,且特性阻抗的变化相对于介电常数的变化较小。由电场辐射振子相关模型可以得出,电场的辐射强度与电路的介电常数呈反比趋势<sup>[17]</sup>。因此,在近场测量中,电磁探头与电路板表面的距离 $r$ 不变时,防护涂层能够减少电路板的电场辐射强度。此外,某些类型的防护涂层可能含有能够吸收或反射磁场的材料,从而达到削弱磁场的效果。这些表明防护涂层具有一定的电磁屏蔽功能。

1.2 常见材料的防护涂层特性

防护涂层的材料类型和厚度是影响印制电路板电磁

辐射强度的两个关键因素。不同材料的介电常数和厚度会影响涂层对电磁波的吸收能力,进而影响电路板的电磁辐射值。为探讨防护涂层材料对电路板参数的影响,本文查询了常见电路板使用的材料及其介电常数,相关数据如表 1 所示<sup>[18]</sup>。并依据表 2 中的相关参数,对涂层材料的影响进行了测试。在数据计算过程中,忽略了金属导体的厚度,以简化模型并集中关注涂层的影响。结果如图 4 所示,结果表明,涂敷涂层能够显著提高电路板的介电常数。此外,涂层的厚度也是影响电路板参数的重要因素。基于表 2 的参数,对防护涂层的厚度进行了调整,并进行了相关计算。如图 5 所示,结果表明,防护涂层的厚度也会提高电路板的介电常数,并随着涂层厚度的增加,电路板的介电常数增长速度逐渐减缓。

表 1 常见防护涂层材料的介电常数

Table 1 Dielectric constant of common conformal coating materials

| 涂层种类 | 含氟聚合类<br>(Fluoropolymer) | 聚对二苯类<br>(Parylene) | 硅树脂<br>(Silicone) | 丙烯酸类<br>(Acrylics) | 聚氨酯类<br>(Urethane) | 环氧树脂类<br>(Epoxy) |
|------|--------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 介电常数 | 2.1~2.4                  | 2.17~3.15           | 3.10~4.00         | 3.25~4.35          | 3.80~4.40          | 3.30~4.60        |

表 2 电路板相关参数的设定

Table 2 Setting of circuit board related parameters

| 种类 | 基底     | 基底介电常数 | 阻焊层    | 阻焊层介电常数 | 防护涂层厚度 |
|----|--------|--------|--------|---------|--------|
| 参数 | 1.2 mm | 4.4    | 0.2 mm | 3.5     | 0.3 mm |

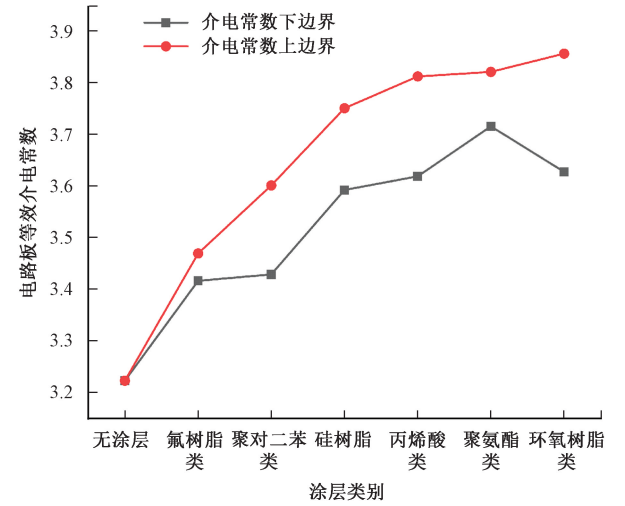


图 4 涂层介电常数的影响

Fig. 4 Influence of coating dielectric constant

2 近场扫描

近场扫描是一种基于近场电磁场测量的技术,广泛应用于电子器件和电路板的电磁特性分析<sup>[19]</sup>。其核心

原理是利用探头在被测表面附近的近场区域进行精确的电磁场探测,生成高分辨率的电磁场分布图,反映电路板或电子器件的电磁辐射特性和局部电磁环境<sup>[20]</sup>。防护涂层检测是维护电路板稳定工作的重要内容,近些年来防护涂层的检查主要是通过干膜测试仪等方法采样检测,然而采样方法不能全面评估防护涂层的覆盖性检测,从而给电路板的稳定工作带来安全隐患。针对该应用需求,论文基于电磁场空间分布广泛的特性提出了一种防

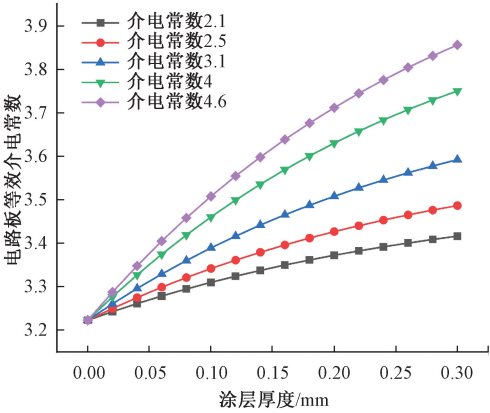


图 5 涂层厚度的影响

Fig. 5 Influence of coating thickness

护涂层覆盖性检测的方法。该方法通过差异性度量电路板全涂层覆盖和部分涂层覆盖的电磁辐射数据,确定电路板涂层较为薄弱的区域。

论文使用的近场扫描设备是作者所在实验室自主研发的仪器,已投入于工程应用中,符合国际电工委员会电磁发射测试标准 IEC61967-3 中的表面扫描测试设备要求。如图 6 所示,其组成主要包括电磁探头、三维平台、数据采集系统、信号处理单元和控制与分析软件等部分。该设备电磁频谱范围为 1 MHz~3 GHz,磁场检测的空间分辨率为 2.2~3.4 mm,电场检测的空间分辨率为 2~2.8 mm。该设备将电场磁场探头和温度探测功能集成为一体,使得近场扫描中对电场、磁场和温度可以在一台设备上完成。



图 6 电场-磁场-温度电路环境检测系统

Fig. 6 Circuit environment detection system for electric field, magnetic field, and temperature

### 3 差异度度量算法

#### 3.1 小波分解降噪

环境噪声在信号采集中不可避免,论文使用的电磁扫描平台是集电路板电场、磁场、温度场扫描为一体的电路板环境检测系统。该扫描平台外置金属壳体能够有效降低外部环境带来的噪声影响,因此电磁数据的噪声主要来源于系统内部的底噪。小波降噪是小波分析中的一个重要应用,能够显著提高数据的信噪比<sup>[21]</sup>。通过对电磁数据进行小波变换,可以将电磁数据分解为细节成分(高频部分)和近似部分(低频分量)。其中高频部分反映了信号的突变细节,低频部分反映了辐射的整体趋势,通过对分解结果进行阈值处理并重建,能够有效降低信号中的噪声<sup>[22]</sup>。

#### 3.2 基于自适应趋势的波动时间序列差异性度量

文献[23]提出了一种基于波动特征的时间序列差异性度量方法。波动序列具有数据浮动频率大的特征,常规度量算法难以实现形态上的匹配。波动特征提取有效地降低了数据维度,同时保留了序列的整体结构,在数据分类、聚类和异常检测领域有广泛的应用前景。该文明通过对波动特征进行属性标签划分,并依据这些标签进行距离度量,实现了序列良好的时间对齐特性和形态匹配效果。

然而,该算法在特征提取和趋势度量方面仍存在不足。其过度的数据筛选导致序列整体轮廓的畸变,未匹配点的舍弃放大了序列间的相似性。此外,算法在处理数据起伏和突变时对趋势信息的考虑不足,增加了序列分类误判的概率。针对上述缺陷,本文提出了一种基于自适应趋势的波动时间序列差异性度量方法(Trd\_SM),对原算法增加了新定义,增强序列的趋势信息,并给出了新的差异性度量指标。

##### 1) 候选波动点的提取

文献[23]为提取候选波动点,对极值序列  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  采用了阈值筛选的方法,阈值序列为  $\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_q\}$ ,当满足  $|e_j - e_{j-1}| > \varepsilon_k, (1 < j < m)$  时,将待测点  $e_j$  作为候选波动点。然而,极值序列已是序列降维的结果,对于间隔较大且幅值变化相对平缓的区域,仅通过阈值筛选会滤除许多关键信息,导致序列的形状和趋势发生改变。因此,本文提出了一种新的阈值筛选方法如式(26)所示。

$$(d_j - d_{j-1}) |e_j - e_{j-1}| > \alpha \varepsilon_k, (1 < j < m) \quad (26)$$

其中,  $d_j$  为  $e_j$  在原序列所处的横坐标,  $\alpha$  为距离系数。通过引入数据间隔作为评估因素,使序列中的许多重要特征得以保留。

##### 2) 趋势量化评估

在时间序列分析中,趋势特征对评估数据的动态特性和形态模式极为重要。传统的距离度量方法通常依赖于点对点的比较,忽略了序列的全局趋势和局部模式。而序列的差异往往体现在局部特征上,引入趋势特征能够更好地反映序列的整体形态和变化趋势,从而提高序列的时间对齐效果和模式识别鲁棒性。文献[24]提出了一种基于形态模式的时间序列度量方法,该方法能够较好地反映序列的趋势特征。然而,如表 3 所示,该方法采用的主观斜率阈值设置限制了其对不同时间序列斜率变化的自适应能力。为此论文构建了新的序列斜率和形态模式的关系,采用 K-means 聚类算法对斜率进行数据聚类,并设置了随机数种子和较高的迭代次数,以提高聚类结果的收敛性。如表 4 所示,改进方案能够增强序列间的局部差异和形态匹配能力,从而提高算法对不同时间序列的区分度。

表 3 基于固定斜率阈值的形态模式定义

Table 3 Morphological patterns definition based on fixed slope threshold

|              | $ k_i  > 1$ | $ k_i  = 1$ | $ k_i  < 1$ | $k_i = 0$ |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| $k_i \geq 0$ | 3           | 2           | 1           | 0         |
| $k_i < 0$    | -3          | -2          | -1          |           |

表 4 基于自适应斜率阈值的形态模式定义

Table 4 Morphological pattern definition based on adaptive slope threshold

| $k_i \geq 0$ | $k_i > \max(C_2)$ | $\max(C_1) < k_i \leq \max(C_2)$ | $0 < k_i \leq \max(C_1)$ | $k_i = 0$ |
|--------------|-------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------|
|              | 3                 | 2                                | 1                        | 0         |
| $k_i < 0$    | $k_i < \min(C_b)$ | $\min(C_a) < k_i \leq \max(C_b)$ | $\min(C_a) \leq k_i < 0$ |           |
|              | -3                | -2                               | -1                       |           |

下面对表 4 中的参数进行说明。设两条时间序列经过波动点提取后分别为  $F_1 = \{(t_1, v_1, Attr_1) \cdots (t_i, v_i, Attr_i) \cdots (t_m, v_m, Attr_m)\}$ ,  $F_2 = \{(s_1, u_1, Attr_1) \cdots (s_j, u_j, Attr_j) \cdots (s_n, u_n, Attr_n)\}$ , 其中  $F_1$  和  $F_2$  相同属性间的斜率集合为  $K_1 = \{k_1, k_2, \cdots, k_m\}$ ,  $K_2 = \{k_1, k_2, \cdots, k_n\}$ 。对  $K_1, K_2$  中的正向斜率集合 ( $k_i > 0$ ) 进行聚类, 所得聚类簇的值按递增顺序依次为  $C_1, C_2, C_3$ ; 同理, 对负向斜率集合 ( $k_i < 0$ ), 所得聚类簇的值按递减顺序依次为  $C_a, C_b, C_c$ 。参考表中的分段斜率和形态模式之间的关系, 生成对应的形态模式序列  $P_1 = \{p_1, p_2, \cdots, p_m\}$ ,  $P_2 = \{p_1, p_2, \cdots, p_n\}$ 。则序列点间的距离度量值为:

$$d(x_i, y_j) = \sqrt{(t_i - s_j)^2 + (p_{xi}v_i - p_{yj}u_j)^2} \quad (27)$$

### 3) 惩罚措施

文献[23]中采用滑动窗口和属性标签的方法来寻找最佳匹配点, 使序列波动点具有较好的时间对齐效果。然而, 主观舍弃未能匹配点的做法放大了序列间的相似性。针对上述局限性, 论文提出了一种相应的惩罚机制。设未匹配点  $f_i = (t_i, v_i, Attr_i, p_i)$ , 在对应的序列中寻找与  $t_i$  属性相同且最接近的两个点  $f_l = (s_l, u_l, Attr_l, p_l)$  和  $f_r = (s_r, u_r, Attr_r, p_r)$ , 其中  $Attr_i = Attr_l = Attr_r, s_l < t_i < s_r$ 。根据临近点补充一个匹配点作为惩罚点, 并对其间的距离进行度量, 从而补偿序列的相似性。

通过补充匹配点  $f_{inc} = (s_{inc}, u_{inc}, Attr_{inc}, p_{inc})$ , 其中令  $s_{inc} = u_i, Attr_{inc} = Attr_i, p_{inc} = p_l$ 。

$$u_{inc} = \frac{u_r - u_l}{s_r - s_l}(t_i - s_l) + u_l \quad (28)$$

其距离度量结果为惩罚距离为:

$$d_{pun} = |p_i v_i - p_{inc} u_{inc}| \quad (29)$$

### 4) 趋势信息下的距离度量

本文在文献[23]的基础上增加了新定义, 在形态模式和距离补偿上进行了改进。设长度为  $N$  的两条时间序列  $X = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$  和  $Y = \{y_1, y_2, \cdots, y_n\}$ , 经过波动特征提取和形态模式划分后的序列矢量为:

$$Tr\_d(X, Y) = \frac{1}{SMD_{X,Y}} (\sum d(x_i, y_j) + \sum d_{pun}) \quad (30)$$

由式(30)可以得出: 未匹配点越多, 序列形态差异越大, 序列间的距离值越大。即两条序列的差异性越高, 距离值越大, 反之则越小。上述差异度度量算法适用于波动点序列和非等长序列之间的相似度度量。

## 3.3 算法运行流程

在检测电路板防护涂层覆盖性方面, 论文提出的 Trd\_SM 算法是一种有效的工具。它通过对电磁近场扫描数据进行差异度度量, 能够准确地识别出涂层的缺陷区域。

如图 7 所示, 该算法首先获取电路板的电磁场扫描数据, 然后通过差异度量计算电磁数据的分布差异, 并通过设定适当的阈值, 能够定位出涂层的非连续性, 进而区分出可能存在缺陷的区域。最后, Trd\_SM 算法利用差异度量结果生成一幅反映涂层完整性的可视化图像。这个图像直观地展示了涂层的差异状态, 帮助技术人员迅速识别和修复涂层缺陷。

## 4 实验

### 4.1 仿真实验

为验证实验的有效性, 论文首先开展了关于涂层电磁屏蔽效果的仿真实验。这些仿真实验利用电磁仿真工具对不同涂层条件下的电磁屏蔽性能进行了深入分析和评估。通过仿真结果, 可以直观地展示涂层在电磁屏蔽方面的表现。在进行阻容网络的 PCB 仿真时, 首先, 将版图导入仿真软件。接着, 分别对正常状态和不同涂层状态的版图进行近场仿真。其中, 涂层状态的电路板在板层结构中增加了涂层板层。在仿真过程中, 保持所有元器件参数一致, 扫频范围设定为 5~500 MHz, 扫频点数为 100。最终, 获得了各个频点的扫频结果。

为了进一步验证涂层材料与厚度对电路板电磁屏蔽

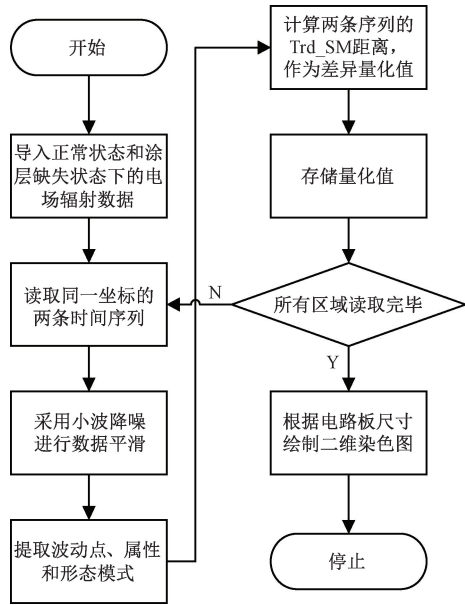
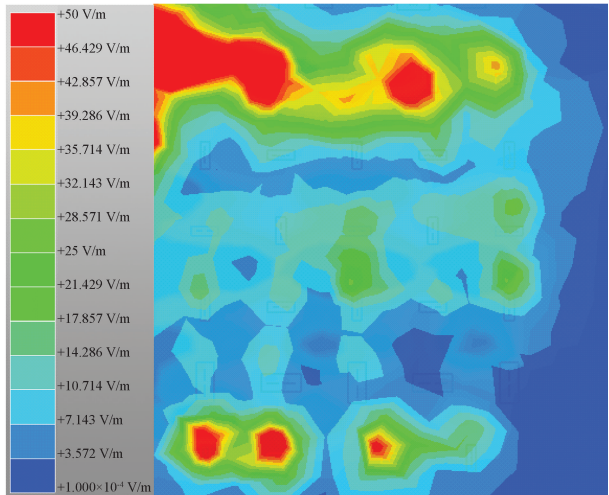


图 7 涂层覆盖性检测算法流程图

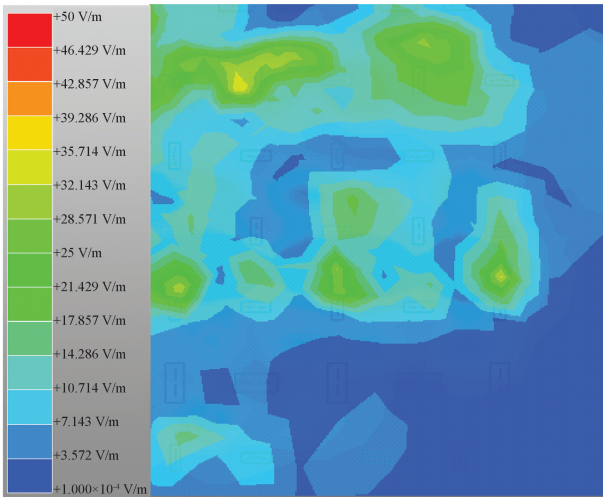
Fig. 7 Flowchart of coating coverage detection algorithm

效果的影响,论文采用控制变量法进行了仿真实验。首先,在相同厚度为 100  $\mu\text{m}$  的条件下,对不同介电常数的涂层材料进行了仿真分析,结果如图 8 所示,展现了涂层介电常数对电磁屏蔽性能的影响。随后,在固定介电常数为 3.1 的条件下,通过改变涂层厚度进行了仿真,以探讨涂层厚度对屏蔽效果的影响,仿真结果如图 9 所示。通过这两组仿真结果,可以探究涂层材料与厚度对电磁屏蔽性能的影响规律,为电路板电磁屏蔽设计和优化提供了依据。

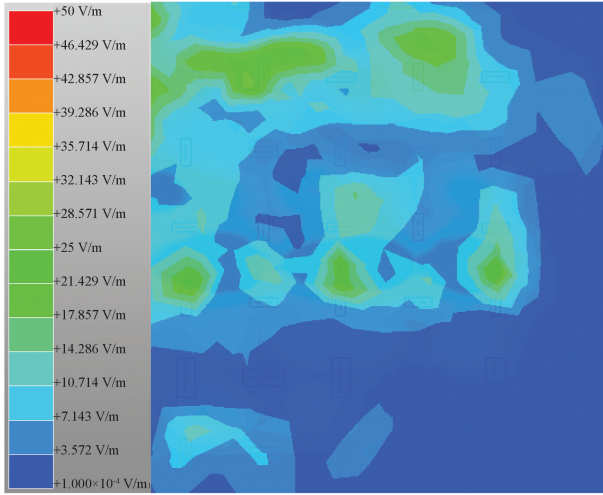
如图 8、9 所示,通过仿真电场分布可以清晰观察到,防护涂层对电场辐射的屏蔽效果明显,电路板的电场辐射强度逐渐减弱。且随着涂层介电常数和厚度的增加,



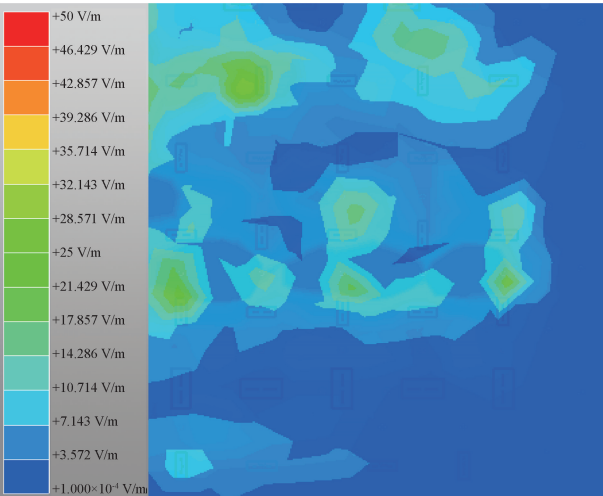
(a) 无涂层结果  
(a) Results without coating



(b) 涂层介电常数为2.1  
(b) The dielectric constant is 2.1



(c) 涂层介电常数为3.1  
(c) The dielectric constant is 3.1

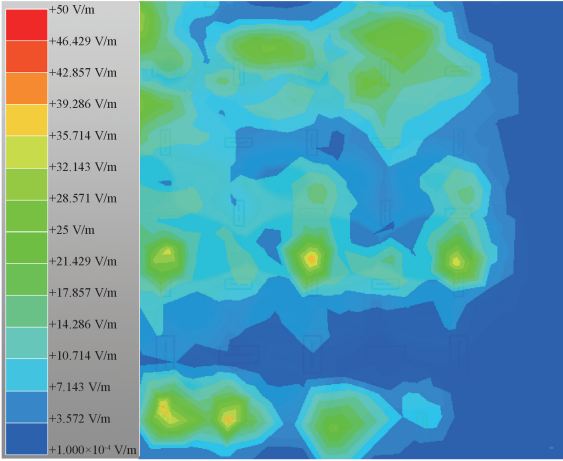


(d) 涂层介电常数为5  
(d) The dielectric constant is 5

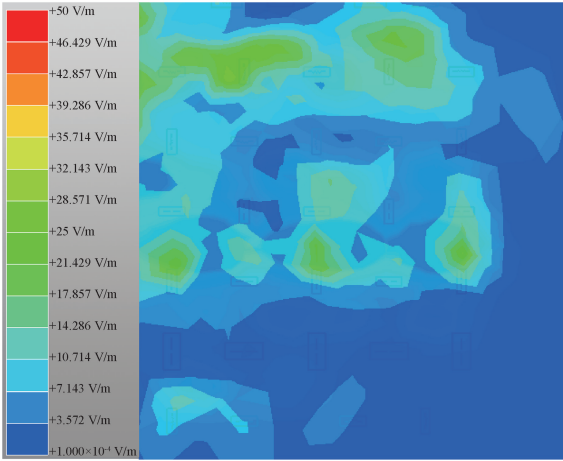
图 8 不同涂层介电常数的电场仿真结果

Fig. 8 Simulation results of electric fields with different coating dielectric constants

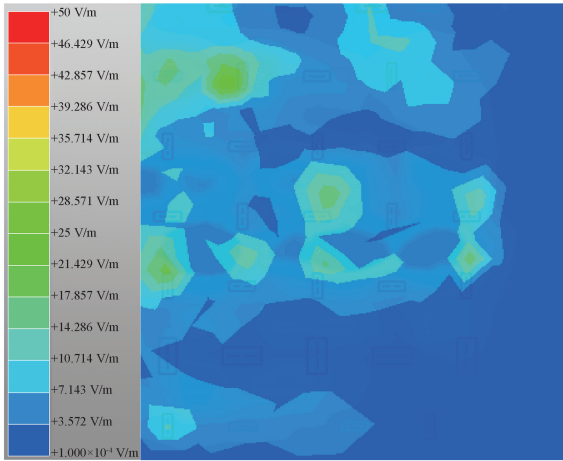
电路板的电磁辐射值的衰减速度逐渐减缓。这与 1.2 节提到的电路板等效介电常数随介电常数和厚度增加而增长速度逐渐减缓的趋势相对应。结果表明电路板整体电磁屏蔽性能的提升效果会随涂层的厚度和介电常数的增加逐步趋于平缓。



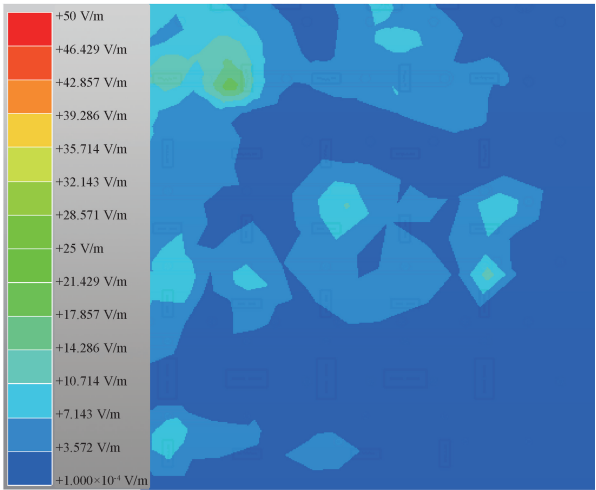
(a) 涂层厚度为50微米  
(a) The thickness is 50 microns



(b) 涂层厚度为100微米  
(b) The thickness is 100 microns



(c) 涂层厚度为150微米  
(c) The thickness is 150 microns



(d) 涂层厚度为200微米  
(d) The thickness is 200 microns

图 9 不同涂层厚度的电场仿真结果  
Fig. 9 Simulation results of electric fields with different coating thicknesses

综上表明,通过电场数据进行涂层覆盖性检测是一种可行的方案。具体而言,电磁数据能够揭示涂层覆盖对电场分布和强度的影响,从而实现对电路板防护涂层覆盖性的评估和检测。尽管涂层对磁场有一定的减弱效果,但其辐射值较为微弱,减弱效果并不明显。因此,本文未使用磁场数据。

4.2 实测实验一

电磁数据在每个频段上表现出较大的波动性,这一特征与波动序列的特性高度契合。在电磁数据的上下文中,这种波动性直接反映了电磁场中不同频率成分的强度变化。如图 10 所示,正常状态下电磁序列的幅值整体上高于涂层覆盖状态下的幅值,且均有较大的波动性。因此,使用本文提出的 Trd\_SM 算法具有较好的度量效果。

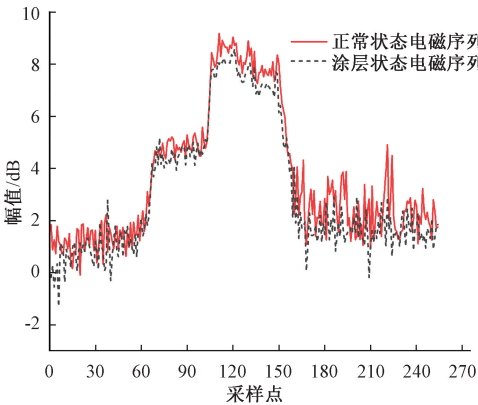


图 10 正常状态和涂层状态的电磁序列  
Fig. 10 Electromagnetic sequence of normal state and coating state

通过度量全涂层覆盖下和部分涂层覆盖下的电路板电磁数据差异,实现电路板防护涂层的覆盖性检测。为验证本文方法的可行性,本文针对阻容电路进行了实测实验。阻容网络能够提供一个相对稳定和可控的实验环境,使得测量结果主要反映防护涂层覆盖情况对电磁数据的影响。该实验避免了复杂电路和其他环境因素的干扰,能更准确地验证 Trd\_SM 差异性度量算法在检测电路板防护涂层覆盖性方面的有效性。

由于电路板在正常工作过程中,其电磁辐射状态会随着运行的应用程序运行位置不同而发生变化。为避免这种动态变化对实验结果的影响,本文通过设置低幅激励信号使电路板处于非工作状态,仅对电路板相同坐标的静态电磁特性进行测量与评估。这种方法能够有效隔离电路板在不同工作状态下产生的电磁辐射波动,确保涂层电磁屏蔽性能的评估更具一致性与可靠性,从而准确地反映出涂层的涂敷效果。

近场扫描时,将电路板固定在实验平台内并选择左下方一固定点为坐标原点。扫描步距为 5 mm,探头测量的垂直距离设置为 1 mm 电磁探头位于采样点中心区域。从坐标(0 mm, 0 mm)处至(55 mm, 60 mm)处结束,共扫描了 156 块区域。以每个区域的电磁数据作为一条波动时间序列,为方便实验结果的展示,选取图 11 中区域进行实验分析。按照图 7 流程对样板电场数据进行处理,分区域对样板涂层厚度均为 60  $\mu\text{m}$  的全覆盖状态下和部分覆盖下的电场数据进行差异性度量,求出样板相同区域两种状态下的电场波动序列的差异值,并根据该图进行差异性染色分析,如图 11 所示,在实验中,部分涂覆了防护涂层的阻容电路板中,选定以坐标(5, 20)、(15, 50)、(35, 10)和(40, 45)为中心,半径为 2.5 mm 的圆形区域不涂敷涂层,与完全涂覆涂层的电路板进行对比。

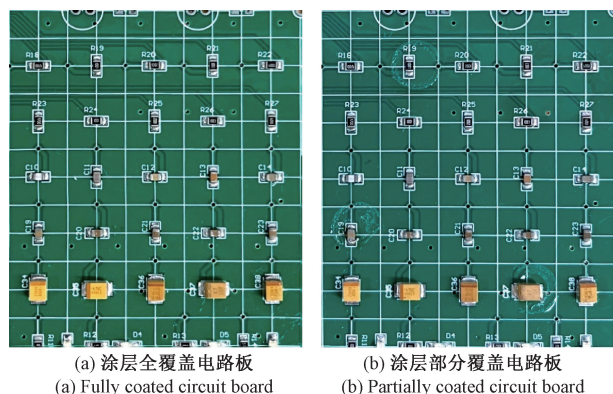


图 11 阻容网络电路板

Fig. 11 Resistance capacitance network circuit board

如图 12 所示,算法的计算结果得到了可视化呈现。其中,颜色越鲜艳的区域表示距离值越大,波动序列差异

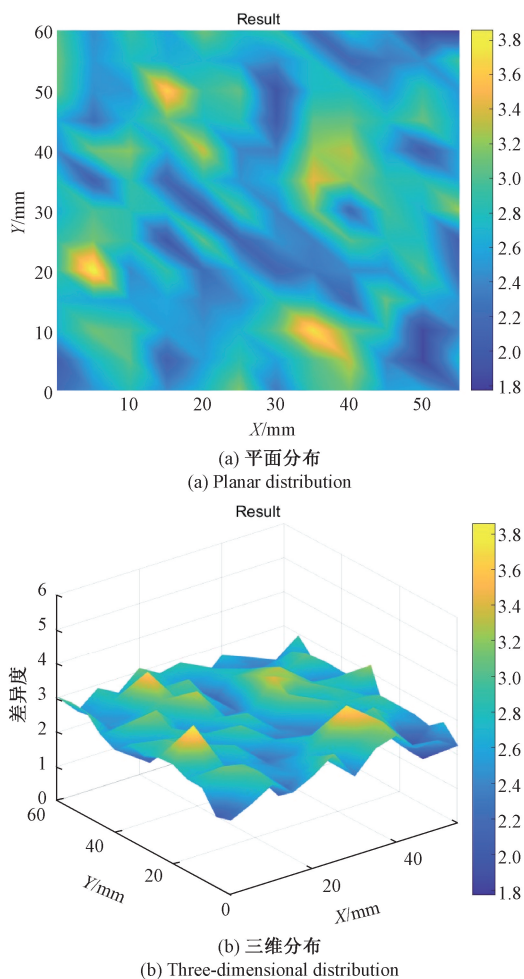


图 12 电路板差异性度量结果

Fig. 12 Measurement results of circuit board differentiation

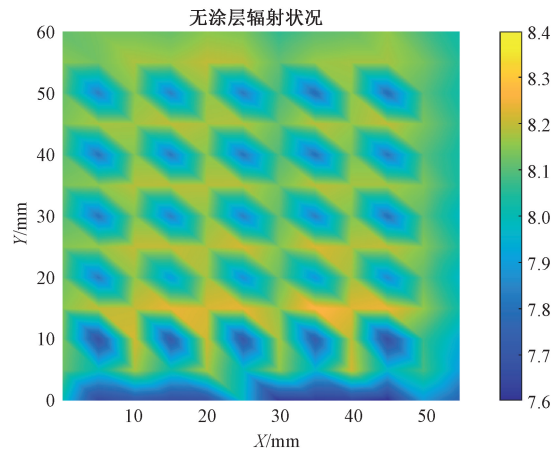
度越大;反之,颜色越淡的区域表示距离值越小,时间序列差异性越小,裸露器件的可能性越低。在图 12(a)中标记为“\*”的点表示理论涂层故障的中心位置。通过观察结果可以看出,局部区域的电磁辐射增大会导致其周围区域的辐射水平也相应增加。由于电磁探头的尺寸和步进距离的限制,局部区域的测量结果存在微量偏差,如坐标为(35, 10)偏差为 2 mm。但总体而言,测试结果与实际涂层的涂敷情况基本一致,验证了论文提出的测试方法的有效性。

#### 4.3 实测实验二

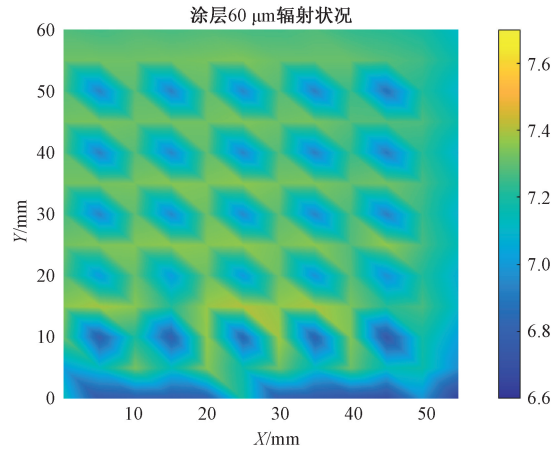
为验证涂层厚度对电路板电磁辐射的影响,论文设计了不同涂层厚度的实测实验。实验中分别选取涂层厚度为 60  $\mu\text{m}$ 、120  $\mu\text{m}$  和 180  $\mu\text{m}$  的电路板进行实验。在相同实验环境下,采集了每个厚度下电路板的静态模式电磁辐射水平。并选取辐射谐波周围 20 个点的均值作为电磁场的辐射强度,结果如图 13 所示。

由于电磁场的采集是通过电磁探头进行近场扫描,

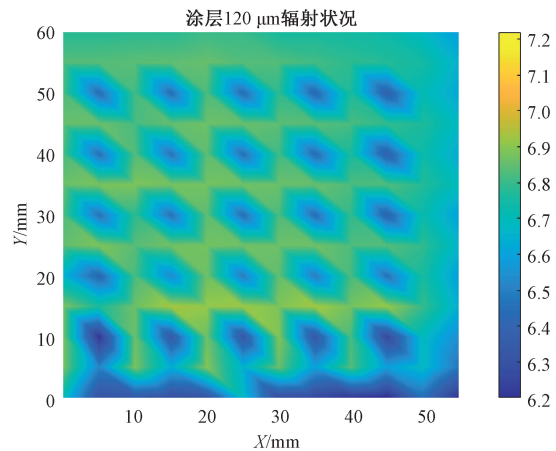
且器件位置相对较高,导致该区域的电磁辐射测量值较弱。论文分别选取坐标(15,40)、(35,30)和(20,20)的原始数据进行分析,坐标分别对应为电阻、电容和无器件,数据结果如图 14 所示。



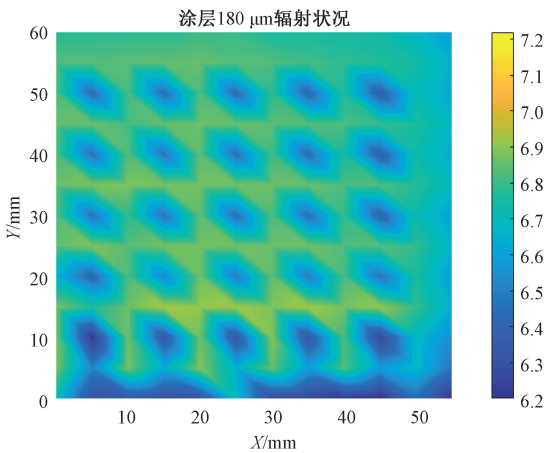
(a) 无涂层  
(a) Results without coating



(b) 涂层厚度60 μm  
(b) The thickness is 60 microns

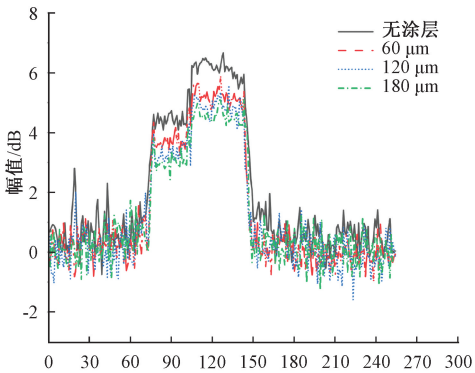


(c) 涂层厚度120 μm  
(c) The thickness is 120 microns

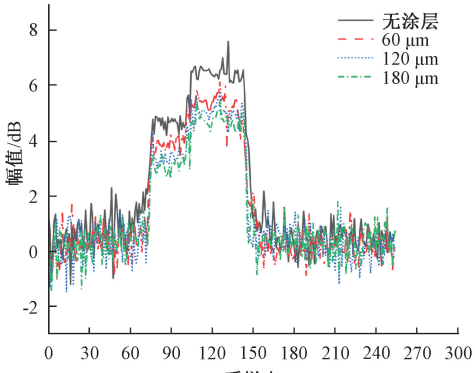


(d) 涂层厚度180 μm  
(d) The thickness is 180 microns

图 13 不同涂层厚度的电路板电磁辐射强度图  
Fig. 13 Electromagnetic radiation intensity diagram of circuit boards with different coating thicknesses



(a) 电阻器件  
(a) Resistance



(b) 电容器件  
(b) Capacitance

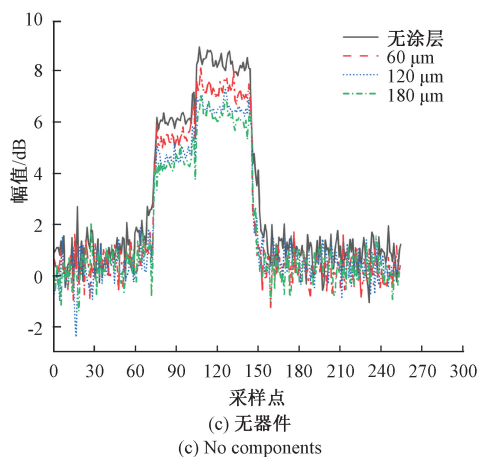


图14 电路板不同位置电磁数据

Fig. 14 Electromagnetic data at different positions of the circuit board

实验数据表明,在一定程度上,涂层厚度的增加会增强电路板的电磁屏蔽能力,且随着涂层厚度的增加电磁辐射值衰减速度逐步减弱,与上文涂层厚度增加电路板介电常数的增长速度逐渐减弱相对应。综上所述,防护涂层的涂敷效果与电路板的电磁辐射衰弱情况呈正相关,根据电路板的电磁辐射值评估防护涂层的涂敷效果具有可行性。

## 5 结论

论文通过理论推导、仿真模拟及实测实验详细阐述了防护涂层在电磁屏蔽中的作用机制。为解决传统涂层检测方法仅能局部检测、无法全面评估整板涂敷效果的局限性,提出了一种基于近场扫描技术的新型防护涂层评估方法。该方法通过比较电路板在全涂层覆盖和部分涂层覆盖条件下的电磁辐射数据差异性,有效识别涂层覆盖不足的区域。本研究不仅克服了传统涂层检测方法难以全面评估涂层效果的不足,还为电磁屏蔽技术的理论和实际应用提供了新视角和方法。

## 参考文献

- [1] 吴鹏. 电子材料在大气环境下的腐蚀模拟[D]. 南京:南京邮电大学, 2022.  
WU P. Corrosion simulation of electronic materials in atmospheric environments[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [2] 李丽, 李在兴. 新型电子产品保护涂料系列产品的研制[J]. 化学与黏合, 2014, 36(3): 199-201.  
LI L, LI Z X. Development of a new series of protective coatings for electronic products[J]. Chemistry and Adhesion, 2014, 36(3): 199-201.
- [3] BATH J. Lead-free Soldering Process Development and Reliability[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2020.
- [4] 王有亮. 三防漆及其去除技术的研究综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2014, 32(4): 39-44.  
WANG Y L. Overview of research on conformal coating and its removal technology[J]. Electronics Product Reliability and Environmental Testing, 2014, 32(4): 39-44.
- [5] 王帆, 张金才, 程芳琴. 电磁屏蔽涂料的研究进展[J]. 功能材料, 2022, 53(1): 1033-40.  
WANG F, ZHANG J C, CHENG F Q. Research progress on electromagnetic shielding coatings[J]. Functional Materials, 2022, 53(1): 1033-40.
- [6] JONES A, UGALLA L, LI K, et al. Continuous in-line chromium coating thickness measurement methodologies: An investigation of current and potential technology[J]. Sensors, 2021, 21(10): 3340.
- [7] GIURLANI W, BERRETTI E, INNOCENTI M, et al. Measuring the thickness of metal coatings: A review of the methods[J]. Coatings, 2020, 10(12): 1211.
- [8] CHOIKHRUE M, PROMBANPONG S, SRIYOTHA P. An effect of coating parameters to dry film thickness in spray coating process[J]. Key Engineering Materials, 2016, 709: 95-98.
- [9] 黄卫. 基于涡流检测的涂层测厚仪研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2020.  
HUANG W. Research and design of coating thickness gauge based on eddy current testing[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2020.
- [10] 黄胜清. 超声波测厚技术的应用[J]. 化工管理, 2015(9): 47-8.  
HUANG SH Q. Application of ultrasonic thickness measurement technology[J]. Chemical Industry Management, 2015(9): 47-48.
- [11] KOGEL-HOLLACHER M, BREIER M, SCHRÖDER D, et al. The next level-controlled conformal coating processes: Intelligent combination of sensor technologies for calibrated inspection of coating thickness and fault detection-directly integrated into the production line[J]. Optik Photonik, 2017, 12(3): 18-21.
- [12] SHAO X, CHEN X, YU X, et al. Nondestructive measurement of conformal coating thickness on printed circuit board with ultra-high resolution optical coherence tomography[J]. IEEE Access, 2019, 7: 18138-18145.
- [13] 梁志义, 郑伟, 徐庆, 等. 基于近场扫描和相似性度量的电路板故障区域检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 111-120.

- LIANG ZH Y, ZHENG W, XU Q, et al. Detection of fault areas on circuit boards based on near-field scanning and similarity measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 111-120.
- [14] SIMONS R N. Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems [M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004.
- [15] GONG Z-T, SUN D-X, LIU Y-N. Effects of a conformal coating on the signal integrity of space electronics systems[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging Manufacturing Technology, 2022, 12(11): 1882-1889.
- [16] MAJUMDAR P, VERMA A K. CAD models of dispersion and losses for multilayer coplanar waveguide [C]. 2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). IEEE, 2016: 1-4.
- [17] 李瑶. 拓展低频带宽的电磁干扰近场扫描测量系统设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.
- LI Y. Design of an electromagnetic interference near-field scanning measurement system for expanding low-frequency bandwidth [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2019.
- [18] MAGAGNIN L. Coating materials for electronic applications[J]. Corrosion, 2004, 60(5): 512.
- [19] 徐自翔. 基于近场扫描的电磁干扰源定位算法研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2022.
- XU Z X. Research on electromagnetic interference source localization algorithms based on near-field scanning [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [20] 丁力. 基于近场扫描的电磁干扰诊断 [D]. 杭州:浙江大学, 2022.
- DING L. Electromagnetic interference diagnosis based on near-field scanning [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [21] 孙世政, 秦鸿宇, 何盛港, 等. 基于信号特征分析和多小波变换的机械手滑动觉感知研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 299-307.
- SUN SH ZH, QIN H Y, HE SH G, et al. Research on slip perception of manipulators based on signal feature analysis and multi-wavelet transform [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2023, 44(8): 299-307.
- [22] 张宇宁. 基于小波变换的心音信号降噪方法研究 [D]. 延吉:延边大学, 2021.
- ZHANG Y N. Research on noise reduction methods for heart sound signals based on wavelet transform [D]. Yanji: Yanbian University, 2021.
- [23] CHEN H, GAO X. A new time series similarity measurement method based on fluctuation features [J]. Tehniki Vjesnik, 2020, 27(4): 1134-41.
- [24] 王瑞, 贾瑞玉. 基于形态模式的时间序列相似性度量算法[J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(9): 253-256, 305.
- WANG R, JIA R Y. Similarity measurement algorithm for time series based on morphological patterns [J]. Computer Applications and Software, 2017, 34(9): 253-256, 305.

### 作者简介



马云鹏, 2022 年于重庆大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为电路板故障诊断。

E-mail: ah\_yunpeng@163.com

**Ma Yunpeng** received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Chongqing University. His main research interest includes circuit board fault diagnosis.



郑伟(通信作者), 1998 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2004 年于中国运载火箭技术研究院获得硕士学位, 2008 年获得北京航空航天大学博士学位, 现为重庆大学教授, 主要研究方向为智能仪器与自动测试系统、嵌入式系统软硬件平台、工程结构安全监测。

E-mail: zw3475@cqu.edu.cn

**Zheng Wei** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 1998, M. Sc. degree from China Academy of Launch Vehicle Technology in 2004, and Ph. D. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2008. Now he is a professor of Chongqing University. His main research interests include intelligent instruments and automatic test systems, embedded system software and hardware platforms, and engineering structure safety monitoring.