

第八届

全国大学生集成电路创新创业大赛

报告类型：设计报告

参赛杯赛：华大九天杯

作品名称：基于多层感知器的参数化结构电容提取

队伍编号：CICC1512

团队名称：电子空穴 siusiu 配队

摘 要

随着制程技术的不断缩小，寄生效应对电路性能影响显著增加。准确的寄生提取对高性能集成电路设计至关重要。目前在芯片级寄生 RC 提取工具中，建立基本结构电容库需要使用场求解器求解大量的二维截面电容结构，消耗大量的时间。本队伍提出一种结合物理特征分析和机器学习的快速电容计算方法，以对参数化结构实现快速而精确的电容提取。通过深入分析二维结构特性，我们选择了多层感知器（MLP）算法以提高预测精度，并针对特殊结构进行模型拆分，从而精确捕捉局部特征。同时，为增强模型的泛化能力，我们进行了数据扩增。最终，训练得到的拟合模型能够在较短时间内准确计算电容值。本设计有效平衡了计算速度和精度，为参数化结构的电容提取提供了高效解决方案。

可执行文件路径：/home/jcuser10/jcuser10_CICC1512

目 录

1.赛题背景.....	1
2.解决方案.....	2
2.1 设计概要.....	2
2.2 算法流程.....	2
3.算法实现.....	3
3.1 参数提取.....	3
3.1.1 物理特征分析.....	3
3.1.2 具体算法实现.....	13
3.2 模型	16
3.3 采样点文件生成.....	19
4.实验过程.....	22
4.1 机器学习算法选择.....	22
4.2 数据集扩增.....	23
4.3 模型拆分.....	26
4.4 输入参数调整.....	27
5.测试结果.....	29
5.1 PLATE2L	29
5.2 PLATE3L	32
5.3 STACK3L	34
6.可执行文件说明.....	36
6.1 文件说明.....	36
6.2 使用说明.....	37
7.参考文献.....	39

1. 赛题背景

随着制程技术的不断缩小，集成电路中的互连线越来越小，集成密度也越来越高，越来越多的功能被集成到一个芯片上。这样的整合伴随着许多挑战。主要挑战之一是寄生效应的影响日益严重。

寄生效应是所有集成电路中不可避免地存在的有害效应，即寄生电阻、寄生电容和寄生电感。这些寄生效应主要与连接设备的金属线(互连线)有关。在最近的先进工艺技术节点中，互连寄生元件对集成电路的影响显著增加，降低了电路的整体性能，它们已经成为影响信号延迟和其他电路性能指标的关键因素。同时，当前的 IC 设计流程需要多次寄生提取和仿真运行以满足所需的电路规格。因此，如果寄生元素的提取不准确，就会产生误导性的仿真结果。这种误导的结果会降低成品率，增加电路设计的周转时间。此外，在先进的工艺技术节点，寄生电容提取的精度要求显著提高，这给寄生电容提取工具带来了更多的挑战。

因此，准确的寄生提取对于当今高性能集成电路设计的成功至关重要。寄生提取是指对带有寄生的导线之间的电磁效应进行建模，并计算这些 R/C 分量的值。电容的计算，即电容提取，由于其计算复杂性和数百万片上互连段之间的大规模耦合所带来的挑战而受到关注。

目前，寄生电容的提取方法主要有两种，分别是场求解法和基于模式匹配方法。

场求解法直接模拟静电场，具有较好的精度。然而，由于速度非常慢且容量有限，它只能解决一个小尺寸的结构，而不是一个电路模块或整个设计。另一方面，基于模式匹配的方法比场求解器要快得多，并且适用于大型或全芯片电路布局。这种方法将互连布局划分为小几何形状，然后使用预先建立的经验公式或电容查找表计算每个几何形状的电容。但是，此方法的求解精度逊于场求解法。

由此可见，目前寄生电容提取方法的改进方案大致有三种，一是设计更快速的场求解器，增加电容提取速度；二是改进基于模式匹配的方法，提高其求解精度；三是采用混合方法，可以预先使用基于模式匹配的方法对大型或全芯片电路布局进行快速分析，然后针对关键部分或小尺寸结构，采用场求解法进行精确建模和分析。

2. 解决方案

2.1 设计概要

本次赛题要求针对一组可参数化描述的二维结构及其对应的采样点，设计一套算法，在最短时间内准确计算所有采样点的结构对应的电容。我们的团队决定采用一种更符合参数化二维结构特性的拟合模型。

我们的设计思路为对结构特性的深入分析、选择合适的机器学习算法、对特殊结构进行模型拆分，并通过数据扩增提高模型的泛化性，最后，我们按照 80% 与 20% 的比例将数据集划分为训练集和测试集，对模型进行了训练。通过这一系列步骤，我们得到了最终的拟合模型，可以在较短时间内准确地计算二维结构对应的电容值。

具体做法如下：首先，我们对二维结构进行了物理特征分析，以确定影响导体间电容的相关物理量，从而确定模型的输入参数。这项分析为我们提供了深入理解结构特性的基础，并指导了后续模型构建的方向。随后，我们比较了不同机器学习算法的预测结果，最终选择了多层感知器（MLP）深度学习算法来预测电容，以确保较高的预测准确度。MLP 算法在处理非线性关系和复杂数据模式上具有较强的优势，能够更好地拟合参数化二维结构的复杂特征。为了进一步提高模型的精度和泛化能力，我们还针对特殊的二维结构进行了模型拆分，以构建更精细的拟合模型。通过将结构分解为更小的组件并针对每个组件进行建模，我们能够更准确地捕捉到结构的局部特征，从而提高整体拟合效果。此外，为了确保数据的多样性和数量，我们对原有数据集进行了数据扩增。通过增加数据的多样性，我们可以更好地覆盖不同参数范围下的情况，从而提高模型的泛化性和适用性。

2.2 算法流程

本团队设计的算法流程如图 1 所示：首先，输入采样点文件，并判断采样点的 `pattern` 种类。根据采样点所属的 `pattern`，分别调用不同的解析函数（Parser），以提取模型输入参数。随后，将提取的参数输入对应 `pattern` 的模型，最终得到

所需要的电容值并输出。

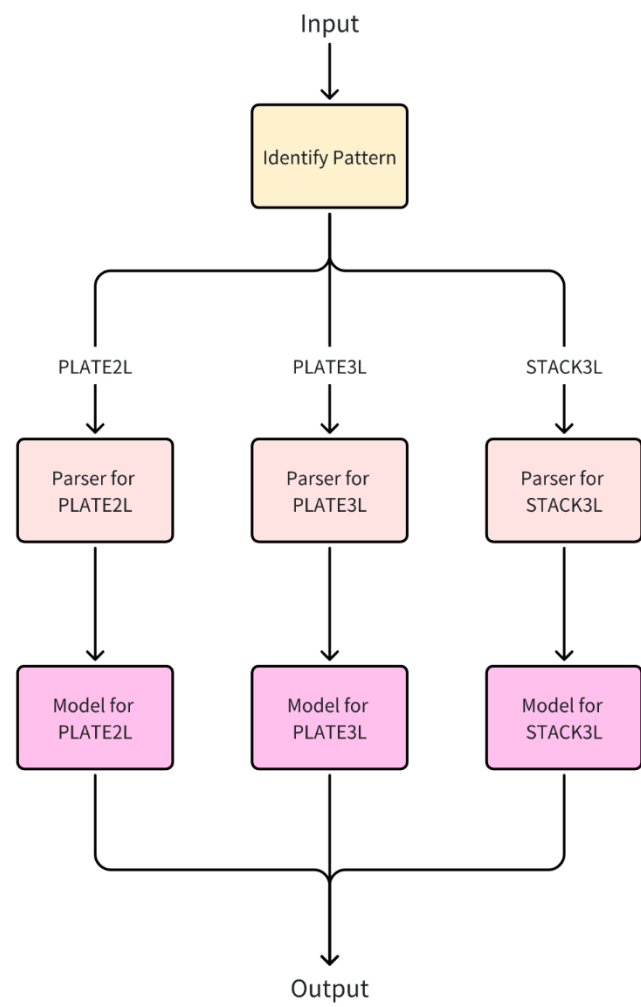


图 1 算法流程图
Fig.1 Algorithm flow chart

3. 算法实现

3.1 参数提取

3.1.1 物理特征分析

本节分析的目的是确定影响所求电容的物理量，并将其提取出来送入模型。金属导体之间的电场分布决定了电容的值^[1]，所以有必要从电场的分析开始。赛题中虽然导体很多，但是其导体间相互作用的基本类型可概括为“一个导体与上下平面层之间的电容”和“两个导体之间的电容”。所以，首先分析这两种基本

类型的电场分布，推导出电容的近似表达式，得到理想情况下有可能影响电容数值的物理量，再依据赛题情景加入实际非理想情况，以估计出实际计算电容需要的物理量。

符号说明	
ε	导体间电介质介电常数
W	矩形导体横向宽度
T	矩形导体纵向厚度
H_B	导体下边沿到 Bottom 上边沿的距离
H_T	导体上边沿到 Top 下边沿的距离
$S1$	$S1 = f\left(\frac{S}{2}, 0, H_B\right)$
$S2$	$S2 = f\left(\frac{S}{2}, H_B, H_B + T\right)$
$S3$	$S3 = f\left(\frac{S}{2}, H_B + T, 2H_B + 2T\right)$
$S4$	$S4 = f\left(S, \sqrt{T^2 + 2TH_T}, 2(H_B + T)\right)$
$f(x, a, b)$	$f(x, a, b) = \begin{cases} 0, & x < a \\ x - a, & a \leq x \leq b \\ b - a, & b < x \end{cases}$

表 1 物理量符号说明

Table 1 Description of physical quantity symbols

（注：表中公式与下文第（一）节中的分析推导来自参考文章^[1]，此处为了便于理解作品内容，对涉及的关键公式推导进行复述）

（一）两种基本的电容类型：

（1）一个导体与上下平面层之间的电容

理想情况为底层平面无限大，并且空间内电介质唯一且均匀，空间内仅有图示三个导体，此时电场示意图如图 2：（仅画出 cond1 与 Bottom 之间的电场分布，cond1 与 Top 之间的电场同理）

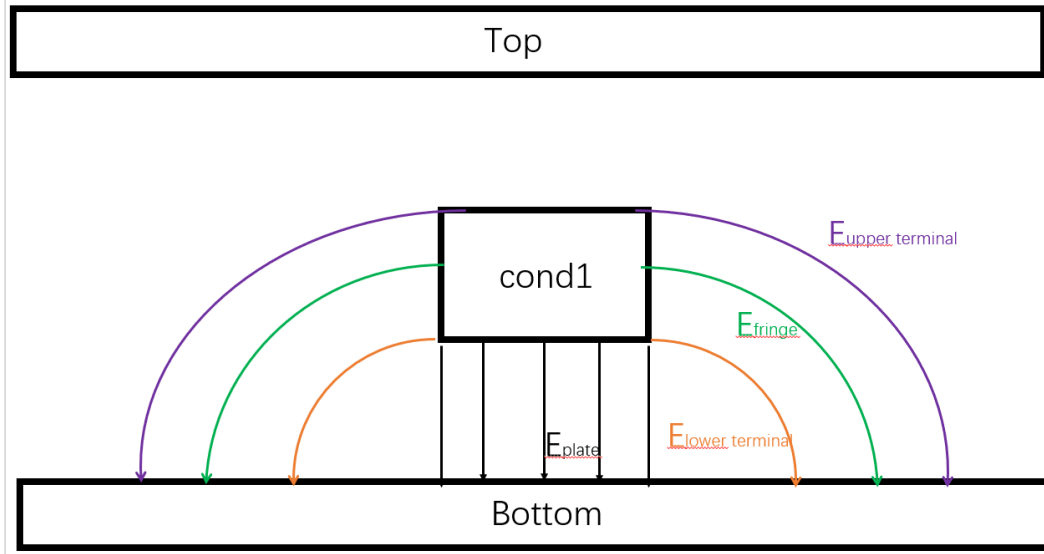


图 2 导体与下层无限大平面之间的电场分布示意图

Fig.2 Electric field distribution between the conductor and the underlying plate

每一个电场都对应了一个电容分量，各电容分量计算如下（仅计算 cond1 与 Bottom 之间的电容，cond1 与 Top 之间电容同理）：

$$\frac{C_{plate}}{\varepsilon} = \frac{W}{H_B}$$

$$\frac{C_{fringe}}{\varepsilon} = \int \frac{width}{distance} = \int_{H_B}^{H_B+T} \frac{dx}{\frac{\pi}{2}x} = \frac{2}{\pi} \ln\left(1 + \frac{T}{H_B}\right)$$

$$\frac{C_{lower\ terminal}}{\varepsilon} = \int \frac{width}{distance} \approx \int_0^{H_B} \frac{dx}{\frac{\pi}{4}(H_B + x)} = \frac{4}{\pi} \ln 2$$

其中对于 C_{fringe} 的推导是将 E_{fringe} 近似为圆弧形电场，圆心角 90°，再对微元平板电容进行积分。并且考虑到 cond1 边界处电场的分布被扭曲，选择用如下值对 terminal 处电容进行近似：

$$\frac{C_{lower\ terminal}}{\varepsilon} = \frac{2}{\pi}$$

$$\frac{C_{upper\ terminal}}{\varepsilon} = \frac{1}{\pi}$$

当 cond1 周围出现其它导体时，上述推导假设的理想情况不成立，此时需要

考虑电场屏蔽效应与电荷分享效应，如图 3 与图 4：

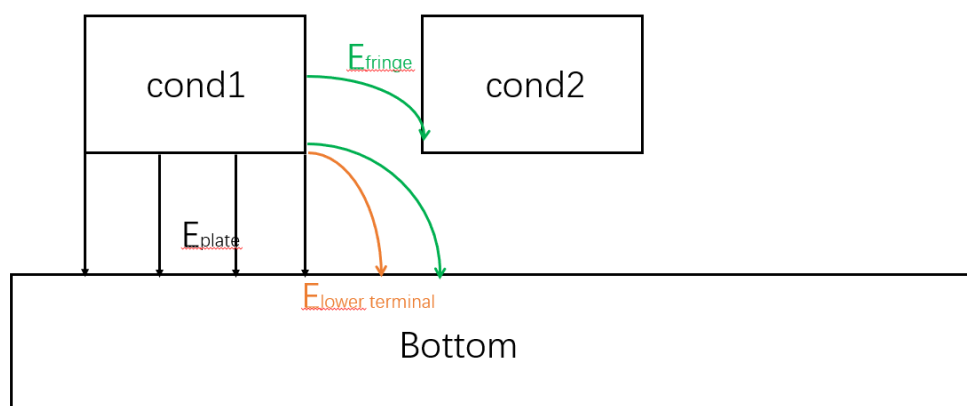


图 3 电场屏蔽效应示意图

Fig.3 Field shielding effect

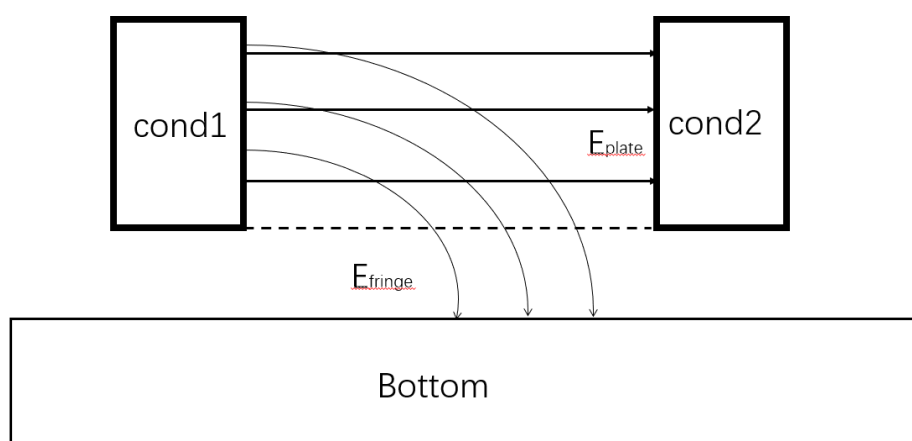


图 4 电荷分享效应示意图

Fig.4 Charge sharing effect

由于这两种效应的分析较为复杂，此处不做过多论述，各部分电场对应电容的物理公式概括如表 2^[1]：

Component	Model
$\frac{C_{lower-plate}}{\epsilon}$	$\frac{W}{H_B}$
$\frac{C_{lower-terminal}}{\epsilon}$	$\frac{\left[\frac{4}{\pi} \ln \left(1 + \frac{0.76S_1}{H_B} \right) \right]^2}{\frac{4}{\pi} \ln \left[\left(1 + \frac{0.76S_1}{H_B} \right) \left(1 + \frac{S_4/4}{H_T + T} \right) \right]}$
$\frac{C_{fringe}}{\epsilon}$	$\frac{2}{\pi} \ln \left[\left(\frac{H_B + S_2}{H_B} \right) \left(\frac{S + H_B}{S + H_B + S_2} \right) \right]$
$\frac{C_{upper-terminal}}{\epsilon}$ (Structure 1 only)	$\frac{4}{\pi} \ln \left(1 + \frac{S_3/4}{H_B + T} \right)$

表 2 导体与上下无限大平面之间的各个电容分量物理公式^[1]

Table 2 Capacitive component between the conductor and the upper and lower plates

(2) 两个导体之间的电容

理想情况电场示意图如图 5(仅画出上边沿之间的电场,下边沿间电场同理)

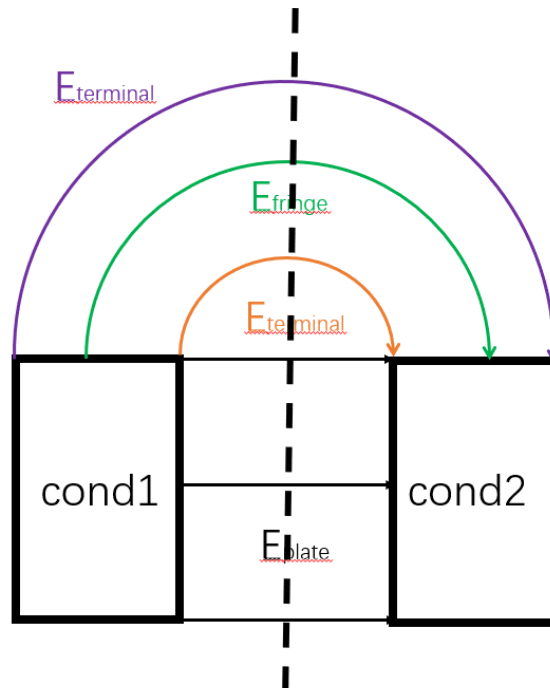


图 5 两个水平分布的导体之间的电场分布示意图

Fig.5 Electric field distribution between two parallel distributed conductors

对于该情况的电容,可以在 cond1 与 cond2 之间插入一个虚拟平面(图 5 中

虚线)，利用情况（1）中的分析得到 cond1、cond2 与虚拟平面之间的电容之后，再将两电容在水平方向串联，得到 cond1 与 cond2 之间的电容。如考虑两导体上方、下方存在的无限大平面带来的电场屏蔽与电荷分享效应，则各部分电场对应的电容公式如表 3^[1]：

Component	Model
$\frac{C_{plate}}{\epsilon}$	$\frac{T}{S} - \frac{2}{\pi} \ln \left[\left(\frac{H_B + 2S/\pi + T_1}{H_B + 2S/\pi} \right) \left(\frac{H_T + 2S/\pi + T_2}{H_T + 2S/\pi} \right) \right]$
$\frac{C_{lower-terminal}}{\epsilon}$	$\frac{\left[\frac{2}{\pi} \ln(1 + 1.2974 H_{B1}/S) \right]^2}{\frac{2}{\pi} \ln(1 + 1.2974 H_{B1}/S) + \frac{4}{\pi} \ln(1 + 0.3244 S/H_B)}$
$\frac{C_{lower-fringe}}{\epsilon}$	$\frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{(S + 2W_1)(S + 2H_B/\pi)}{S(S + 2H_B/\pi + 2W_1)} \right]$
$\frac{C_{upper-terminal}}{\epsilon}$	$\frac{\left[\frac{2}{\pi} \ln(1 + 1.2974 H_{T1}/S) \right]^2}{\frac{2}{\pi} \ln(1 + 1.2974 H_{T1}/S) + \frac{4}{\pi} \ln(1 + 0.3244 S/H_T)}$
$\frac{C_{upper-fringe}}{\epsilon}$	$\frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{(S + 2W_2)(S + 2H_T/\pi)}{S(S + 2H_T/\pi + 2W_2)} \right]$

表 3 两个水平分布的导体之间的各个电容分量物理公式^[1]

Table 3 Capacitive component between two parallel distributed conductors

（注：此处含数字下标的字母，表示对应导体 cond1 或者 cond2 的物理量）

（二）相邻梯形导体斜边电场修正

前文分析一个重要的假设是所有导体都为矩形，当两个矩形导体相距较近时，其侧边之间的电场可近似看作平板电容之间的水平匀强电场。但是赛题中的电容为梯形，当两个梯形相距较近的时候，斜边之间的电场分布用水平匀强电场近似不合适。由于导体表面是等势面，电场线总是垂直于导体平面，因此可以大致画出电场分布图如下：

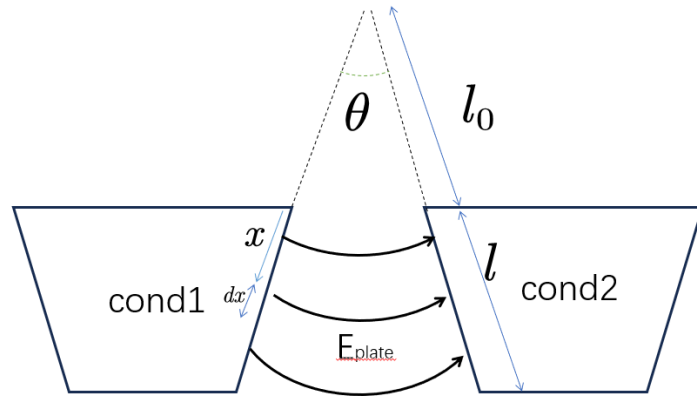


图 6 两个水平分布的梯形导体之间的电场分布示意图

Fig.6 Electric field distribution between two parallel trapezoidal conductors

对于上图梯形导体间的 E_{plate} 进行分析，假设图示两斜边长度都是 l ，夹角为 θ ，斜边端点与斜边延伸后的交点的距离都是 l_0 。如斜边间电场用标准圆弧近似，则两斜边之间的电容 C_{plate} 可用平板电容近似计算：

$$C_{plate} = \int_0^l \frac{dx}{(l_0 + x)\theta} = \frac{1}{\theta} \ln\left(1 + \frac{l}{l_0}\right)$$

可以看到该电容与夹角和斜边长度都有关，而此处夹角很小，满足等式：

$$\theta \approx \tan(\theta) = \frac{W_{上底宽度} - W_{下底宽度}}{2T_{厚度}}$$

斜边长 l 与延伸斜边长 l_0 都可借助 θ 与两导体的上底间距、下底间距计算。因此，两梯形导体斜边之间的电容与斜边的斜率以及上底、下底间距有关，输入特征应当加入这三个量。

（三）赛题二维结构电容分析

本节对各个 pattern 中的电容分别进行定性分析。

（1）PLATE2L

layer1-layer2_PLATE2L

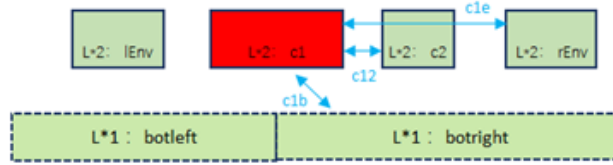


图 7 PLATE2L 二维结构

Fig.7 2D structure of PLATE2L

该种 pattern 所涉及到的电容有 $c1b$, $c12$, $c1e$

(a) $c1b$ 分析

该电容为导体与底层平面间的电容，与上文图 2 相似，不同之处在于此处的底层平面不是无限大平面，而是左侧固定在原点处而右边界向右延伸的半平面，因此 $c1$ 与该半平面之间相互作用的电场分量受到 $botright$ 这一半平面的宽度影响。此外， $c1$ 的周围有可能没有其它导体，也有可能有一个、两个或者三个导体，需要考虑这些导体之间的相互作用。因此， $c1$ 与 $botright$ 之间的电场分布比图 2 中情况更加复杂，还需要加入 $c1$ 与 $layer2$ 层多个环境导体之间相对位置的信息。

(b) $c12$ 分析

这个与上文图 5 的情况基本相同，区别在于需要考虑 $lEnv$ 和 $rEnv$ 对于 $c1$ 、 $c2$ 的影响。也需要描述导体之间的相对位置。

(c) $c1e$ 分析

这种情况与 $c12$ 的模型区别仅在于 $c1$ 和 $rEnv$ 两个导体中间夹了一个导体 $c2$ 。这个位于中间的导体会屏蔽 $c1$ 和 $rEnv$ 之间大部分的侧边正对电场 E_{plate} ，以及分享上下边沿之间的电场 E_{fringe} 。

本赛题中的电介质分布情况比较复杂，除了各层电介质之外，导体下方与左右还有可能存在保型介质。本模型是基于该工艺建立的，所以忽略各层主要电介质，但是由于保型介质仍有变化的可能，所以再额外考虑保型介质的信息。

综合上述分析得到，PLATE2L 中的三个电容增加了较为复杂导体间相互作用，而这些额外的相互作用主要来源于四周较多的环境导体，以及底层被截半的平面。为了简化建模过程，我们选择用版图直观的物理量作为模型的输入，并选

取与造成这些效应的导体有关的物理量。由此，得到 PLATE2L 的初步输入特征如表 4：

变量名	物理意义
Boundary rx	Boundary 右边界横坐标
Boundary lx	Boundary 左边界横坐标
Master width	主导体宽度（分别算梯形上下底宽度）
Master K	$\frac{W_{\text{上底宽度}} - W_{\text{下底宽度}}}{2T_{\text{厚度}}}$
Env_width	环境导体宽度（考虑每个环境导体，分别算上下底宽度）
Env_K	$\frac{W_{\text{上底宽度}} - W_{\text{下底宽度}}}{2T_{\text{厚度}}}$
Metal_H	Master 底部到 botleft 顶部的距离
Cond_thickness	layer2 层纵向厚度
Cond_sep	layer2 层所有导体间距（分别计算上底间距、下底间距，如缺失对应导体则设为 0.0）
Damage_width	保型介质宽度（如缺失介质则为 0.0）

表 4 从 PLATE2L 中提取的输入特征
Table 4 Input features extracted from PLATE2L

(2) PLATE3L

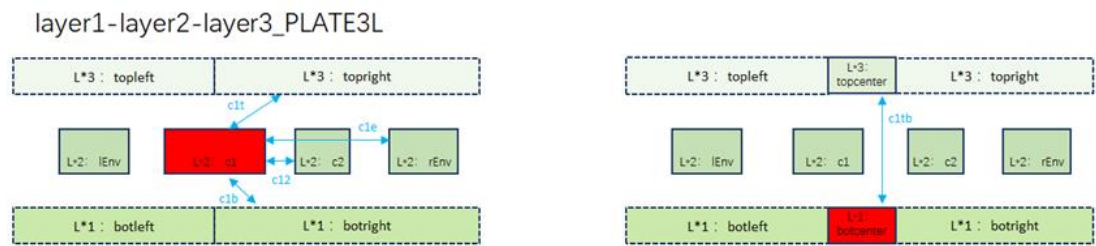


图 8 PLATE3L 二维结构
Fig.8 2D structure of PLATE3L

该种 pattern 相对于 PLATE2L 多了顶层 top，即 layer3，考虑到 top 对 layer2 导体的作用与 bottom 对导体的作用相似，则可以沿用 PLATE2L 的分析结果，并加入与 top 层相关的信息。

对于 botcenter 和 topcenter 之间的电容 c1tb，如果没有 layer2 的存在，那么

这是一个近似的平板电容，与之相关的物理量包括了 botcenter、topcenter 的宽度以及二者的垂直距离。现在加入了 layer2 后，layer2 的高度以及其中导体的宽度与水平位置对 botcenter、topcenter 间的电容有影响。

PLATE3L 的初步输入特征如表 5：

变量名	物理意义
Boundary rx	Boundary 右边界横坐标
Boundary lx	Boundary 左边界横坐标
Master width	主导体宽度（分别算梯形上下底宽度）
Master K	$\frac{W_{\text{上底宽度}} - W_{\text{下底宽度}}}{2T_{\text{厚度}}}$
Env_width	环境导体宽度（考虑每个环境导体，分别算上下底宽度）
Env_K	$\frac{W_{\text{上底宽度}} - W_{\text{下底宽度}}}{2T_{\text{厚度}}}$
Metal_H	Master 底部到 botleft 顶部的距离
Metal_top	Master 顶部到 topleft 底部的距离
Cond_thickness	layer2 层纵向厚度
Cond_sep	layer2 层所有导体间距（分别计算上底间距、下底间距，如缺失对应导体则设为 0.0）
Damage_width	保型介质宽度（如缺失介质则为 0.0）
Top_H	Topleft 底部到 Botleft 顶部的垂直距离
Botcenter_width	Botcenter 的宽度

表 5 从 PLATE3L 中提取的输入特征
Table 5 Input features extracted from PLATE3L

(3) STACK3L

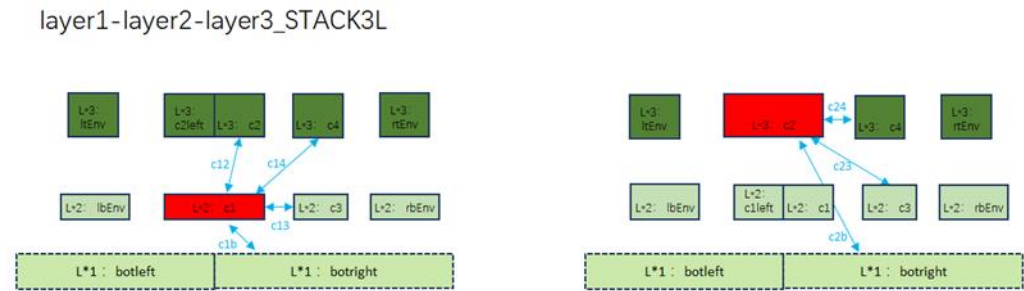


图 9 STACK3L 二维结构
Fig.9 2D structure of STACK3L

相对于 PLATE2L, 该种 pattern 的情况多了另一 metal 层 layer3, 需要考虑另一层 metal 中导体与 bottom 的相互作用, 以及两个 metal 层之间的相互作用。由于导体较多, 相互作用比较复杂, 如果完整地对版图中的导体相对位置进行描述需要增加很多信息, 且无法清晰的分析这些信息的合理性。因此, 可以先尝试简化物理特征描述, 在 PLATE2L 的基础上仅加入 layer3 与 bottom 之间相对位置的信息, 忽略 layer3 与 layer2 中各个导体相对位置的描述。

变量名	物理意义
Boundary rx	Boundary 右边界横坐标
Boundary lx	Boundary 左边界横坐标
Master width	主导体宽度（分别算梯形上下底宽度）
Master K	$\frac{W_{\text{上底宽度}} - W_{\text{下底宽度}}}{2T_{\text{厚度}}}$
Env_width	环境导体宽度（考虑每个环境导体，分别算上下底宽度）
Env_K	$\frac{W_{\text{上底宽度}} - W_{\text{下底宽度}}}{2T_{\text{厚度}}}$
Metal_H	Master 底部到 botleft 顶部的距离
Cond_thickness	Metal 层纵向厚度
Cond_sep	Metal 层所有导体间距（分别计算上底间距、下底间距，如缺失对应导体则设为 0.0）
Damage_width	保型介质宽度（如缺失介质则为 0.0）

表 6 从 STACK3L 中提取的输入特征
Table 6 Input features extracted from STACK3L
(注: 表 6 中的 master 指 c1 和 c2)

3.1.2 具体算法实现

整个 Parser 程序使用 python 实现, 程序框架分为导体类定义、读入 input 文件、计算物理特征、输出特征、封装 parser 函数这五个部分, 以下分别解释:

(一) 导体类定义

为了便于处理导体信息，程序中定义了各种导体类：

类名	主要成员变量	主要成员函数
Master	botLeft, botRight, topLeft, topRight, height, width	setBoundary()
Env		
Dielectric		
Bottom	Points, height, width	无
Top		
Boundary_polygan		

表 7 Parser 程序导体类定义说明

Table 7 Conductor class definition description of Parser

setBoundary()函数用于确定导体梯形四个角所对应的点 botLeft, botRight, topLeft, topRight, 这四个点都是长度为 2 的 list, 其中包含点的 x、y 坐标。该函数在对象初始化时会自动执行。

height、width 分别指高度、宽度，points 是 input 文件中对应的点坐标。

(二) 读入 input 文件

read_txt_file		
输入	file_path	所读文本文件的路径
输出	Master	主导体对象
	Bot_dict	Bottom 层导体字典，键为名称，值为导体对象
	Top_dict	Top 层导体字典，键为名称，值为导体对象
	Env_list	环境导体列表，包含 metal 层环境导体对象
	Dielectric_list	电介质列表，包含所有电介质对象
	Boundpoly	边界多边形对象
	T	文件所属 pattern 类型 (‘PLATE2L’ or ‘PLATE3L’ or ‘STACK3L’)

表 8 read_txt_file 函数说明

Table 8 Description of function “read_txt_file”

（三）计算物理信息

定义一个收集物理特征的类 Info_One_Input:

Info_One_Input 成员变量	
Master_top_width	Master_bot_width
Master_k	Env_top_width
Env_bot_width	Env_k
Metal_top	Boundary_lx
Boundary_rx	Top_H
Metal_H	Cond_sep
Damage_width	Cond_thickness

表 9 info_one_input 类定义说明

Table 9 Description of class “info_one_input”

定义函数如下:

process_data		
输入参数	Read_txt_file()返回的所有参数	/
	id	当前处理文件编号
输出参数	Info	用于收集物理特征的对象

表 10 process_data 函数说明

Table 10 Description of function “process_data”

（四）输出物理特征

此处单独定义一个函数用于整合输出,是为了方便对输出进行统一管理,例如对数值进行数学变换或者对信息进行取舍等。

output		
输入参数	Info	物理信息对象
	id	当前处理文件编号
	T	当前文件所属 pattern
	Model_T	读入文件属于 PLATE3L 中所分 4 类的类别
输出参数	re_info	一维 list, 包含单个文件需要输出的物理特征

表 11 output 函数说明

Table 11 Description of function “output”

(五) 封装 parser 函数

parser		
输入 参数	Single	是否读入单个采样点
	File1	单个采样点下的文件 1 路径
	File2	单个采样点下的文件 2 路径
	Pre	批量读入时的文件前缀
	Post	批量读入时的文件后缀
	Input_num	目录下文件总数
	Directory	目录路径
输出 参数	Feature_matrix	特征矩阵（二维矩阵，其中每一行对应每一个 input 文件的特征向量）
	Model_index	读入文件属于 PLATE3L 中所分 4 类的类别
	Pattern	读入文件所属 pattern

表 12 Parser 函数说明

Table 12 Description of function “parser”

3.2 模型

(一) 相关算法

(1) Batch Normalization

Batch Normalization（批归一化，以下简称 BN）是一种在训练深度神经网络时用于提高性能和稳定性的技术。在深度网络中，每层的输入分布可能会随着训练的进行而发生变化（内部协变量偏移），而使用 BN 进行规范化处理，能使得每层的输入分布保持稳定。同时，BN 由于减少了梯度消失或爆炸的问题，能够加快训练过程，并且允许更高学习率，有助于稳定训练过程，并减少对权重初始化的依赖，使得网络更具有鲁棒性。

$$y = \frac{x - E[x]}{\sqrt{Var[x] + \epsilon}} \cdot \gamma + \beta$$

(2) Leaky ReLU

Leaky Rectified Linear Unit（Leaky ReLU）是一种激活函数，它是传统的

Rectified Linear Unit (ReLU) 激活函数的一个变体。ReLU 因其计算简单和训练效率高而被广泛使用，但当输入为负数时，ReLU 的导数为 0，导致神经元在反向传播过程中不会更新，而 Leaky ReLU 则由于在负数区间有一个非零斜率，可以避免神经元完全不激活的问题，加速收敛，改善梯度流。

$$\text{Leaky ReLU}(x) = \begin{cases} \alpha x, & x < 0 \\ x, & x \geq 0 \end{cases}$$

(3) MLP

Multilayer Perceptron (多层感知机，以下简称 MLP) 是一种前馈人工神经网络模型，其将输入的多个数据集映射到单一的输出的数据集上。除了输入输出层，它中间可以有多个隐层。一个只含单层隐藏层的三层 MLP 数学表示如下：

$$y_j = f\left(\sum_{i=0}^n x_i w_{ij} + b_j\right)$$

(二) 深度神经网络设计

我们基于 MLP，设计了某种 Deep Neural Network (以下简称 DNN)，将经过 parser 提取后的 feature 映射到所需测试的电容，如图 10 所示：

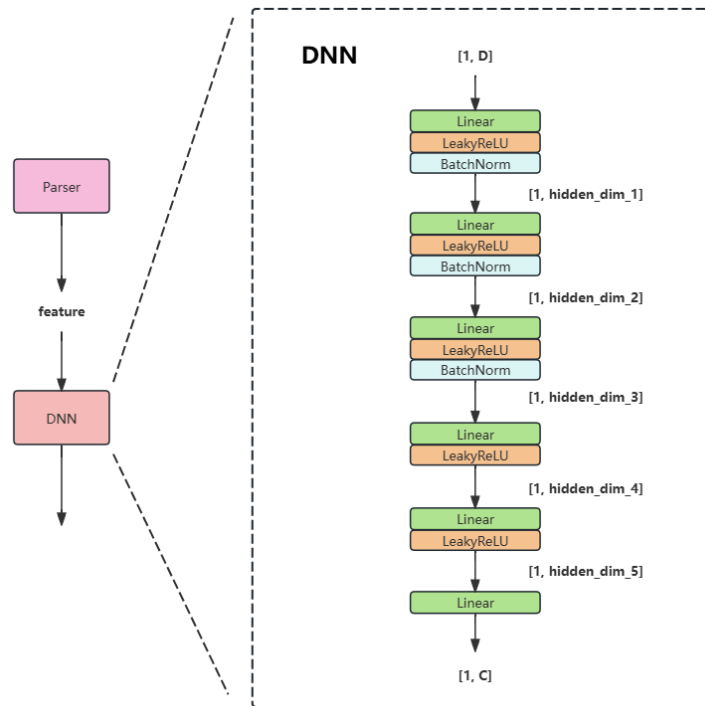


图 10 深度神经网络设计

Fig.10 Design of DNN for capacitance regression

(三) 深度神经网络实现

经过实验，我们发现，此 DNN 结构完全适用于三种 pattern，即我们仅仅只需要调整隐藏层的大小，采用适当的训练周期（epoch），批量大小（batch size），学习率（learning rate），权重衰减（weight decay），等等，即可使得模型在训练集上很好地收敛，并表现出较强的泛化性。具体的参数细节如下表：

a. PLATE2L

Name	D	hidden1	hidden2	hidden3	hidden4	hidden5	C
DNN	26	4096	1024	512	128	128	3

表 13 PLATE2L 模型隐藏层尺寸

Table 13 Hidden size of the model for PLATE2L

C=3，这是因为我们实际上只需要预测三个电容：c12, c1b, c1e

b. PLATE3L

经过实验，我们选择将 Pattern2 中的 DNN 再细分为 4 个 DNN，分别对应于 4 种导体情况（详见第 4.3 节表 26）：（i）lEnv, c1, c2, rEnv（ii）c1, c2（iii）lEnv, c1（iv）c1。

框图如下图 11 所示：

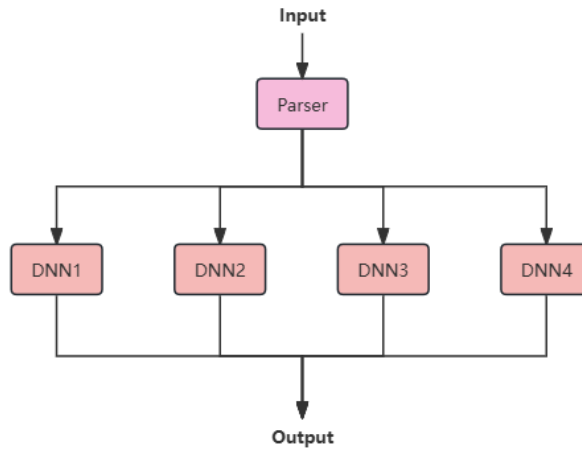


图 11 PLATE3L 模型设计框架

Fig.11 The framework of the design for PLATE3L

具体隐藏层参数量如下表所示：

Name	D	hidden1	hidden2	hidden3	hidden4	hidden5	C
DNN1	15	2048	1024	1024	512	128	3
DNN2	21	2048	1024	512	512	128	4
DNN3	20	3072	1024	512	512	256	3
DNN4	31	3072	1024	1024	512	128	5

表 14 PLATE3L 模型隐藏层尺寸
Table 14 Hidden size of the model for pattern2

c. STACK3L

Name	D	hidden1	hidden2	hidden3	hidden4	hidden5	C
DNN	42	4096	1024	1024	128	128	7

表 15 STACK3L 模型隐藏层尺寸
Table 15 Hidden size of the model for pattern3

3.3 采样点文件生成

参考已有的 BEM_INPUT 文件，编写一个 python 程序 Gen_BEM_INPUT，实现调整导体横向与纵向参数并生成 BEM_INPUT 文件的功能，用于后续数据扩增工作。

程序分为类定义，初始化介质分布，导体层生成，文件生成四个部分。

（一）类定义：

类名	成员变量	成员函数
Conductor	name , coordinates , points_num	update_name , update_all_x , update_all_y
ConductorSystem	conductors	add_conductor, get_conductor
Dielectric	name, dielectric_constant, sub_dies, dielectric_count, points_num	update_name , update_all_x , update_all_y , update_dielectric_constant , add_sub_dielectric
DielectricSystem	dielectrics, die_num	add_dielectric, get_dielectric
BottomSys	left, right, bottoms	get_bot , update_left , update_right
Boundary	left , right , top , coordinates, points_num	update_left , update_right , update_top

表 16 BEM_INPUT 文生成程序类定义
Table 16 Class definition of Gen_BEM_INPUT

（二）初始化介质分布：

根据已有 BEM_INPUT 文件得到未插入金属导体的初始介质分布文件
读取此文件，写入 DielectricSystem 类中。

initialize_normal_die	
输入	die_file_path
输出	initialized_die_system

表 17 BEM_INPUT 生成程序初始化介质函数
Table 17 Function “initialize_normal_die” of Gen_BEM_INPUT

（三）导体层生成函数：

（1）PLATE2L:

generate_conductor_layer		
输入	points	导体层上底点坐标
	boundary	边界坐标
	conductor_num	导体数量
	metal_num	金属层种类
	is_c1_lenv	是否只有导体 “c1” 和 “lEnv”
输出	conductors	导体
	bottoms	下平行板导体
	damage_die	保形介质
	splited_die	由于导体插入而被分割的介质
	new_boundary	以主导体中心点为原点的边界坐标

表 18 BEM_INPUT 生成程序 PLATE2L 导体层生成函数
Table 18 Funtion “generate_conductor_layer” of PLATE2L

（2）PLATE3L:

generate_conductor_layer		
输入	points	导体层上底点坐标
	center_width	center 宽度
	boundary	边界坐标

	conductor_num	导体数量
	metal_num	导体金属层种类
	top_metal_num	上平行板导体金属层种类
	is_c1_lenv	是否只有导体“c1”和“lEnv”
	tag	文件 1 或 2
输出	conductors	导体
	bottoms	下平行板导体
	damage_die	保形介质
	splited_die	由于导体插入而被分割的介质
	new_boundary	以主导体中心点为原点的边界坐标

表 19 BEM_INPUT 生成程序 PLATE3L 导体层生成函数

Table 19 Funtion “generate_conductor_layer” of PLATE3L

(3) STACK3L:

generate_conductor_layer		
输入	points	下层导体层上底点坐标
	top_points	上层导体层上底点坐标
	boundary	边界坐标
	conductor_num	单层导体数量
	metal_num	下层导体金属层种类
	top_metal_num	上层导体金属层种类
	is_c1_lenv	单层是否只有导体“c1”和“lEnv”
	tag	文件 1 或 2
输出	conductors	下层导体
	top_conductors	上层导体

	bottoms	下平行板导体
	damage_die	保形介质
	splited_die	由于导体插入而被分割的介质
	new_boundary	以主导体中心点为原点的边界坐标

表 20 BEM_INPUT 生成程序 STACK3L 导体层生成函数

Table 20 Funtion “generate_conductor_layer” of STACK3L

（四）文件生成函数：

根据设定的横向与纵向参数批量生成 BEM_INPUT 文件

generate_files		
输入	output_dir	输出文件夹
	init_die_sys	初始化介质

表 21 BEM_INPUT 生成程序文件生成函数

Table 21 Funtion “generate_files” of Gen_BEM_INPUT

4. 实验过程

4.1 机器学习算法选择

根据金属导体的几何信息进行电容预测，本质上属于回归问题，使用机器学习的方法可以对其进行有效求解。我们首先在赛题最初所给的 type1_data 的 64 个采样点中，随机选取了 60 个采样点进行拟合训练，对剩下 4 个采样点进行预测。根据 table 表，输入为一维向量 x

$$x = [w1, rightSpace, leftSpace, edgeSpace]$$

输出的一维向量为所要预测的电容 y

$$y = [c12, c13, c1e, c1tr, c1tl, c1br, c1bl]$$

我们分别使用了几种代表性的机器学习算法进行比较，结果如表 22：

Algorithm	Average Test Error	Description
Polynomial Regression	2.0692%	degree=3
Decision Tree Regression	13.7050%	max depth=10,

		min sample split=2
Random Forest Regression	19.0830%	max depth=10, max leaf nodes=10, min sample split=3
XGBoost	4.9580%	subsample=1, colsample_bytree=0.6, n_estimator=100
Gradient Boosting Regression	2.3670%	subsample=1, n_estimator=100
Multilayer Perceptron	1.8512%	2 layers, act=LeakyReLU

表 22 几种机器学习算法的预测结果

Table 22 Prediction results of several machine learning algorithms

由此，我们决定使用 MLP 深度学习算法进行对电容的预测，以保证较高的的准确度。

4.2 数据集扩增

为了更好地训练模型以适应各种不同的输入情况，以提高模型的泛化能力和性能，我们在主办方提供的数据集的基础上，对数据进行了扩增。

通过分析二维结构的介质分布规律，可以得到金属层的分布情况。借此，我们保持横坐标不变对数据进行纵向扩增，从而丰富导体在不同介质层的情况。具体实现如下：

（一）PLATE2L:

扩增 layer2 导体层在 IMD4d1+IMD4d2、IMD5d1+IMD5d2、IMD6d1+IMD6d2 介质层的情况。将扩增后的数据集按照 80%和 20%的比例划分为训练集和测试集，并利用此数据集进行模型训练，并将训练结果与使用主办方提供的未扩增的数据集进行训练的结果进行比较。

	采样点占比/%				Mean error
	Errors < 1%	Errors 1% to 3%	Errors 3% to 5%	Errors > 5%	
未扩增	72.31	27.69	0	0	0.007331
扩增后	80.72	19.28	0	0	0.006625

表 23 PLATE2L 数据集未扩增与扩增后拟合模型的预测结果

Table 23 Prediction results of fitted models of PLATE2L without and after amplification of the dataset

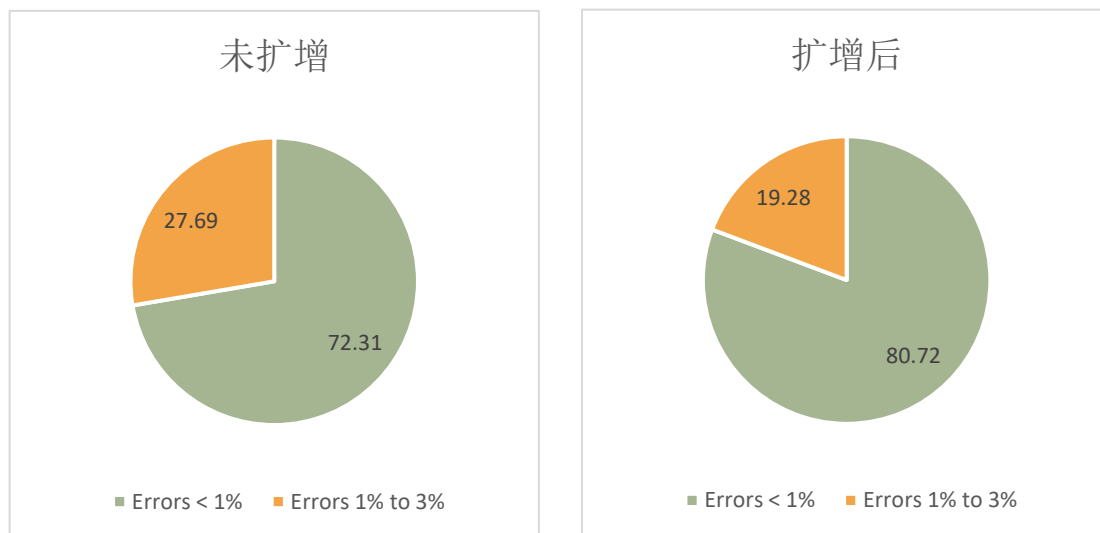


图 12 PLATE2L 数据集未扩增与扩增后拟合模型的预测效果对比图

Fig.12 Comparison of the prediction effect of the fitted model of PLATE2L without and after amplification of the dataset

由表 23 和图 12 可见，误差小于 1% 的测试采样点占比增加至 80%，整体平均误差下降，说明 PLATE2L 使用扩增后的数据集训练得到的模型测试效果得到提升。

（二）PLATE3L:

扩增 layer2，layer3 导体层在 IMD4d1+IMD4d2、IMD5d1+IMD5d2、IMD6d1+IMD6d2 介质层的情况。对数据集做出相同处理，并比较训练结果。

	采样点占比/%				Mean error
	Errors < 1%	Errors 1% to 3%	Errors 3% to 5%	Errors > 5%	
未扩增	63.59	30.26	2.56	3.59	0.01267
扩增后	35.49	57.82	4.84	1.85	0.01495

表 24 PLATE3L 数据集未扩增与扩增后拟合模型的预测结果

Table 24 Prediction results of fitted models of PLATE3L without and after amplification of the dataset

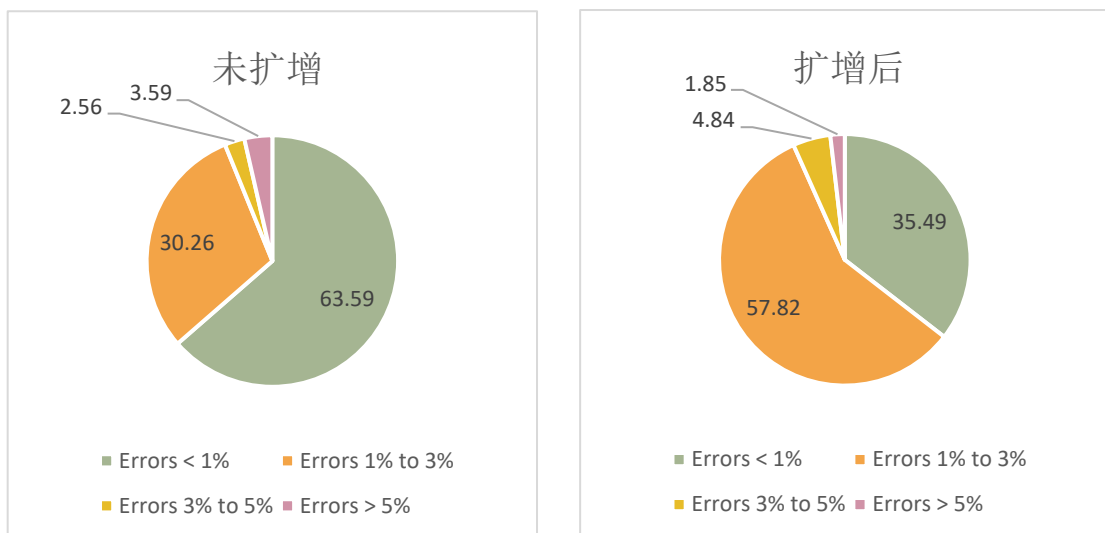


图 13 PLATE3L 数据集未扩增与扩增后拟合模型的预测效果对比图

Fig.13 Comparison of the prediction effect of the fitted model of PLATE3L without and after amplification of the dataset

由表 24 和图 13 可见，误差小于 1% 的测试采样点占比减少，平均误差增大，说明 PLATE3L 使用扩增的数据集训练得到的模型测试效果并没有变好，准确率反而下降了。

(三) STACK3L:

扩增 layer2，layer3 导体层在 IMD4d1+IMD4d2、IMD5d1+IMD5d2、IMD6d1+IMD6d2 介质层的情况。对数据集做出相同处理，并比较训练结果。

	采样点占比/%				Mean error
	Errors < 1%	Errors 1% to 3%	Errors 3% to 5%	Errors > 5%	
未扩增	43.68	40.23	11.49	4.6	0.01763
扩增后	80.79	19.21	0	0	0.006983

表 25 STACK3L 数据集未扩增与扩增后拟合模型的预测结果

Table 25 Prediction results of fitted models of STACK3L without and after amplification of the dataset

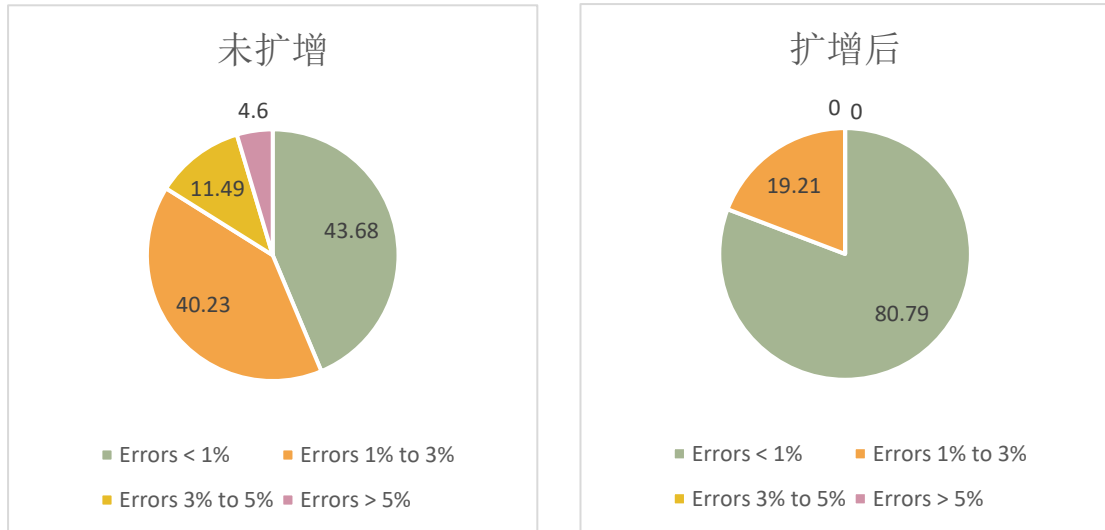


图 14 STACK3L 数据集未扩增与扩增后拟合模型的预测效果对比图

Fig.14 Comparison of the prediction effect of the fitted model of STACK3L without and after amplification of the dataset

由表 25 和图 14 可见，误差小于 1% 的测试采样点占比明显增大，平均误差大幅降低，说明 STACK3L 使用扩增的数据集训练得到的模型测试效果明显变好，准确率得到显著提升。

综上，PLATE2L 和 STACK3L 使用扩增数据集训练的模型测试效果得到提升。而 PLATE3L 的模型测试效果并没有得到改善，为此，我们引入下文的方法。

4.3 模型拆分

我们最初的方案是为每个 pattern 建立一个模型。然而，我们发现有些 pattern 当导体数量和种类发生变化时，单一模型无法提供准确的预测，导致测试效果不佳，如 PLATE3L。因此，为了更好地应对导体数量和种类的变化，我们决定根据每个 pattern 构建四个不同的模型。具体实现如下：

根据主办方提供的数据集中 layer2 中导体的数量与种类，可分为以下情况：

编号	导体数量	导体种类
1	4	lEnv, c1, c2, rEnv
2	2	c1, c2
3	2	lEnv, c1
4	1	c1

表 26 layer2 导体的数量与种类情况

Table 26 Number and types of conductors in layer 2

（一）PLATE3L:

根据以上四种情况，我们分别设计四套不同的模型输入，并设计四套不同的模型（见表 14）。

四种情况的测试效果如下：

编号	采样点占比/%				Mean error
	Errors < 1%	Errors 1% to 3%	Errors 3% to 5%	Errors > 5%	
1	80.64	19.36	0	0	0.006789
2	82.49	17.51	0	0	0.006697
3	85.19	14.81	0	0	0.006726
4	77.78	22.22	0	0	0.007878
Total	81.38	18.62	0	0	0.006788

表 27 PLATE3L 四种拟合模型预测结果

Table 27 Prediction results of four fitting models of PLATE3L

由表 27 可见，拆分成四个模型后，误差小于 1% 的测试采样点占比达到 80% 以上，总体的平均误差小于 1%，说明 PLATE3L 的测试效果明显提升。

（二）PLATE2L 和 STACK3L

这两种 pattern 由于拆分模型后单个模型的训练数据量过少，无法正常训练，且在单一模型的情况下已经有较好的测试效果，因此我们决定不采用拆分模型的方法。

4.4 输入参数调整

在采用拆分模型的方法时，我们需要对每个模型的输入参数进行调整。

（一）第一版输入

PLATE3L 中 layer2 的导体分布情况有四种类型（见表 26）：只有 c1，只有 c1 和 lEnv，只有 c1 和 c2，c1、c2、lEnv、rEnv 都存在。以下对于这四种情况分别分析其电容相关的物理量，以确定模型的输入。

（1）layer2 层只有 c1 的情况

这种情况与上文图 2 情况基本符合，但是 botright 非无限大，所以需要考虑 botright 横向宽度对电容的影响。同时，还需要考虑 botcenter 与 topcenter 之间的

平板电容，由于 c1 的存在会影响该平板电容，所以需要描述 c1 与 bottom、top 之间的相对位置关系。最后，由于此种情况下 layer2 没有其它导体，所以 layer2 水平方向上的导体间电场不需要考虑，为了简化输入，可以将 c1 的斜率信息删去。综上，得到输入特征如下：

变量名	物理意义
Boundary rx	Boundary 右边界横坐标
Boundary lx	Boundary 左边界横坐标
Master width	主导体宽度（分别算梯形上下底宽度）
Metal_H	Master 底部到 botleft 顶部的距离
Metal_top	Master 顶部到 topleft 底部的距离
Cond_thickness	layer2 层纵向厚度
Damage_width	保型介质宽度（如缺失介质则为 0.0）
Top_H	Topleft 底部到 Botleft 顶部的垂直距离
Botcenter_width	Botcenter 的宽度

表 28 当 layer2 层只有 c1 时提取的物理特征
Table 28 Physical features extracted when only c1 in layer2

（2）layer2 层只有 c1 和 lEnv、layer2 层只有 c1 和 c2 和 layer2 层四个导体都存在

这三种情况在 c1 周围都有其它导体，需要考虑导体在水平方向的相互作用，所以沿用此前 PLATE3L 情况下的输入。

（二）第二版输入

为了提高准确率，可以考虑对输入进行变换。变换的主要目的是让输入模型的数据更符合电容的数值分布趋势，以便模型更好的从输入中学习电容的变化规律。此处所作的变换主要有两个方面：依据前述物理分析进行变换，依据误差的分布进行变换。实验过程中，发现以下两个变换可以略微提升最终的预测精度：

（1）依据误差分布对导体间水平间距进行变换

记两导体水平间距为 sep，则进行如下变换：

$$sep' = \ln(1 + sep)$$

在此前进行实验时，发现模型对于 layer2 层有四个导体的情况下误差相对较大，而其中误差大的点主要分布在间距较大的情况中。本变换的目的是将较大的间距值映射为较小值，而保持较小的间距值几乎不变。变化后发现，对于 layer2 层有四个导体的情况的预测精度略有提升。

（2）对导体厚度与宽度进行变换

依据上文物理分析的结论，导体侧边电容 C_{fringe} 满足关系式

$$C_{fringe} = \frac{2}{\pi} \ln \left(1 + \frac{T}{H_B} \right)$$

此处利用该式对导体厚度与导体高度信息进行预处理，将二者的比值作为输入。

5. 测试结果

Golden 数据说明：按照 4.2 节中的方法，使用 3.3 节中的 GEN_BEM_INPUT 程序对主办方提供的原始数据集进行数据扩增。接下来，利用主办方提供的 bem2dsolver 场求解器计算扩增后的 BEM_INPUT 文件的电容，从而生成扩增后的 tbl.txt 文件。随后，将扩增后的数据与原始数据混合，并按 80% 和 20% 的比例划分为训练集和测试集。

$$\text{average weighted error} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{|c_i^*|}{\sum_{i=1}^n |c_i^*|} * \frac{|c_i - c_i^*|}{|c_i^*|} \right) = \frac{\sum_{i=1}^n |c_i - c_i^*|}{\sum_{i=1}^n |c_i^*|}$$

（ c_i^* 为参考值， c_i 为计算值）。

图 15 误差计算公式

Fig.15 Error calculation formula

单个采样点的误差计算公式来自主办方，如图 15。以下为测试结果。

5.1 PLATE2L

（一）测试结果表格汇总

（1）平均电容误差

单个采样点的误差计算公式见图 15。表 29 中 Peak memory 为批量运行时的测量得到的数据。我们的可执行文件以采样点为输入，运行方式分为单个采样点

运行以及批量运行，具体说明见第 6 节。

Pattern	Average	Min	Max	2sigma	Peak memory
PLATE2L	0.006625	0.0001465	0.02966	2.1476e-05	642904 kbytes

表 29 PLATE2L 测试结果
Table 29 Test result of PLATE2L

(2) 单个电容加权误差

考虑到不同电容的电容值不同，这里的误差并非绝对误差，而是乘以系数

$$\left(\frac{|c_i^*|}{\sum_{i=1}^n |c_i^*|} * \frac{1}{|c_i^*|} \right)$$

即每个采样点每个电容加权后的误差，求和后得到（1）中的加权平均误差，参考图 15。

Capacitance	Average	Min	Max	2sigma
c12	0.004423	2.9317e-06	0.02504	1.6035e-05
c1b	0.001716	4.5121e-06	0.01525	3.8368e-06
c1e	0.001342	5.2744e-06	0.007946	1.8328e-06

表 30 PLATE2L 具体电容误差
Table 30 Errors per capacitance of PLATE2L

(二) 总体误差情况散点图

散点图中的误差为每个采样点的加权平均误差。下同。

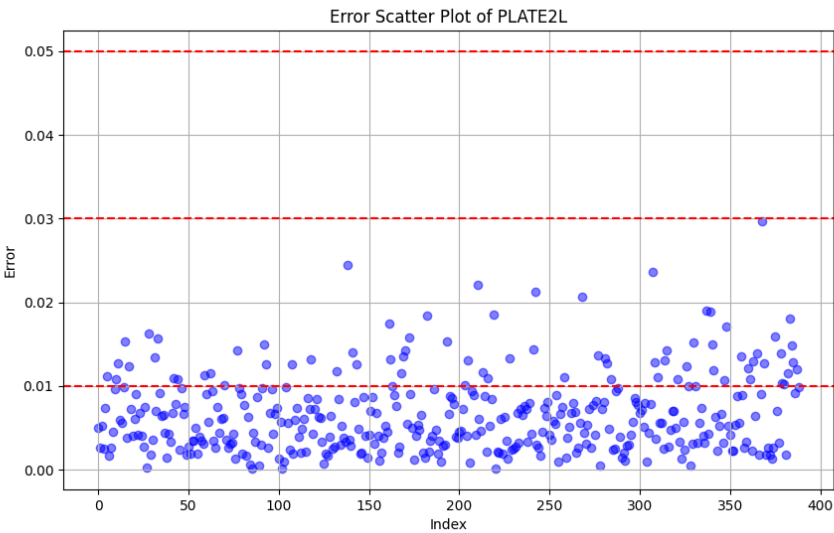


图 16 PLATE2L 测试采样点误差情况散点图
Fig.16 Sample point error case scatter plot of the test set of PLATE2L
(注：横坐标 Index 为测试采样点从 0 开始的编号，无实际意义)

（三）运行时间

PLATE2L 每个采样点仅包含一份文件，即求解一个采样点等价于求解一份文件。Task 1 为解析函数（Parser），Task 2 为模型预测（Model）。

（1）单个采样点运行

Task	Average	Min	Max	2sigma
Task 1(Parser)	0.001252s	0.0009851s	0.002852s	4.6563e-08
Task 2(Model)	0.06674s	0.05349s	0.1105s	0.0001727
Total time	0.06956s	0.05607s	0.1163s	0.0001767

表 31 PLATE2L 单个采样点运行时间表

Table 31 Single run-time of PLATE2L

散点图中运行时间为求解单个采样点的总时间。下同。

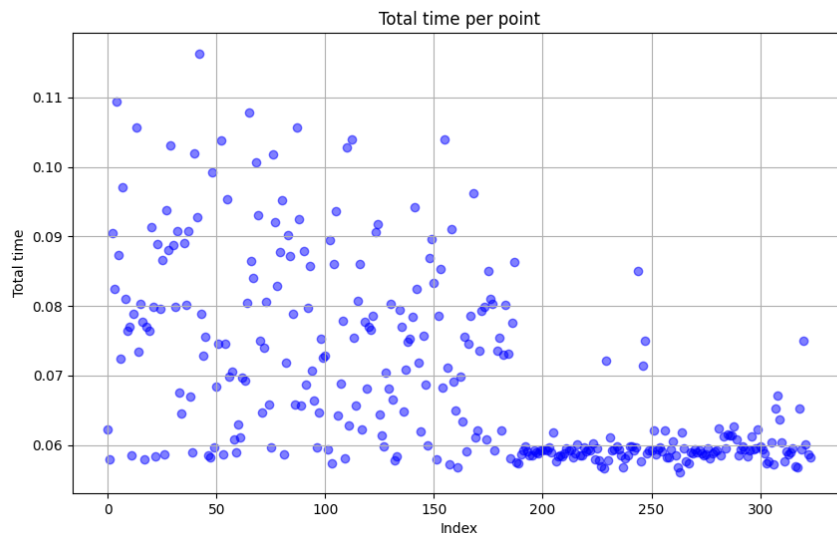


图 17 PLATE2L 采样点单个运行时间散点图

Fig.17 Single run-time scatter plot of PLATE2L

（2）批量采样点运行

批量运行指一次性求解一个 目录里的所有采样点。批量运行时只需要加载一次模型，因此平均每个采样点耗时较短。

Pattern	Number of points	Task1	Task2	Total time	Average per point
PLATE2L	324	0.3063s	0.1080s	0.4180s	0.001290s

表 32 PLATE2L 批量运行时间表

Table 32 Batch run-time of PLATE2L

5.2 PLATE3L

(一) 测试结果表格汇总

(1) 平均电容误差

Peak memory 的含义同 5.1 节。

Pattern	Average	Min	Max	2sigma	Peak memory
PLATE3L	0.006788	0.0007	0.02845006	1.6991e-05	734600 kbytes

表 33 PLATE3L 测试结果
Table 33 Test result of PLATE3L

(2) 单个电容加权误差

此误差的计算说明同 5.1 节。

Capacitance	Average	Min	Max	2sigma
c12	0.002682	1.6159e-06	0.02370	5.8723e-06
c1t	0.001586	1.6057e-07	0.01225	2.6342e-06
c1b	0.0009686	2.9020e-06	0.006800	1.1955e-06
c1tb	0.001226	9.408e-08	0.01871	3.9627e-06
c1e	0.0008376	6.0203e-06	0.006541	9.9026e-07

表 34 PLATE3L 具体电容误差
Table 34 Errors per capacitance of PLATE3L

(二) 总体误差情况散点图

同 5.1 节，此处误差为每个采样点的加权平均误差。

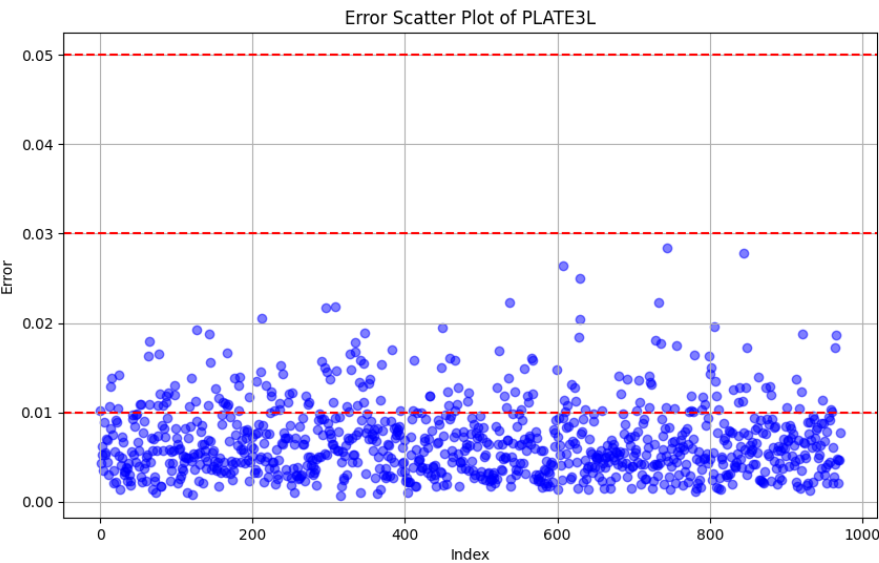


图 18 PLATE3L 测试采样点误差情况散点图
Fig.18 Sample point error case scatter plot of the test set of PLATE3L

（注：横坐标 Index 为测试采样点从 0 开始的编号，无实际意义）

（三）运行时间

需要指出的是，PLATE3L 每个采样点包含两份文件，即求解一个采样点时，实际上是求解两份文件。Task 1 和 Task 2 含义同 5.1 节。

（1）单个采样点运行

Task	Average	Min	Max	2sigma
Task 1(Parser)	0.001451s	0.0009721s	0.004363s	7.292e-08
Task 2(Model)	0.05234s	0.03969s	0.07076s	5.345e-05
Total time	0.05545s	0.04245s	0.07404s	5.7189e-05

表 35 PLATE3L 单个采样点运行时间表

Table 35 Single run-time of PLATE3L

同 5.1 节，散点图中运行时间为求解单个采样点的总时间。

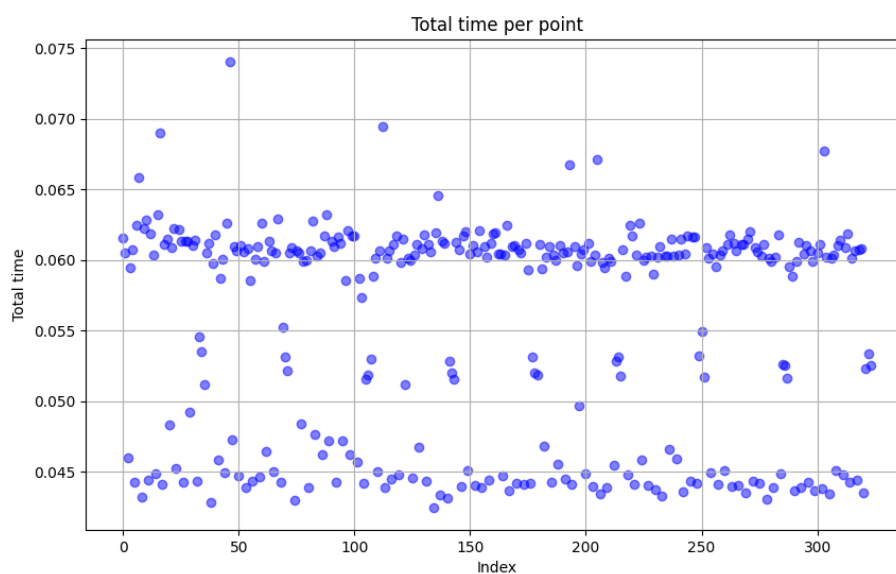


图 19 PLATE3L 采样点单个运行时间散点图

Fig.19 Single run-time scatter plot of PLATE3L

（2）批量采样点运行

批量运行含义同 5.1 节。

Pattern	Number of points	Task1	Task2	Total time	Average per point
PLATE3L	324	0.3717s	0.2478s	0.6209s	0.001916s

表 36 PLATE3L 批量运行时间表

Table 36 Batch run-time of PLATE3L

5.3 STACK3L

(一) 测试结果表格汇总

(1) 平均电容误差

Peak memory 的含义同 5.1 节。

Pattern	Average	Min	Max	2sigma	Peak memory
STACK3L	0.006983	0.001023	0.02846	1.4603e-05	651912 kbytes

表 37 STACK3L 测试结果
Table 37 Test result of STACK3L

(2) 单个电容加权误差

此误差的计算说明同 5.1 节。

Capacitance	Average	Min	Max	2sigma
c12	0.001036	3.4574e-06	0.008875	1.8387e-06
c13	0.001727	1.6714e-06	0.01126	2.2113e-06
c14	0.0008783	9.7599e-07	0.007550	1.1462e-06
c1b	0.001045	8.5085e-07	0.01214	2.0981e-06
c23	0.0006692	6.1978e-07	0.003649	5.1451e-07
c24	0.001539	2.2297e-05	0.01134	1.5839e-06
c2b	0.00069001	1.4264e-08	0.006903	1.03617e-06

表 38 STACK3L 具体电容误差
Table 38 Errors per capacitance of STACK3L

(二) 总体误差情况散点图

此处误差含义同 5.1 节。

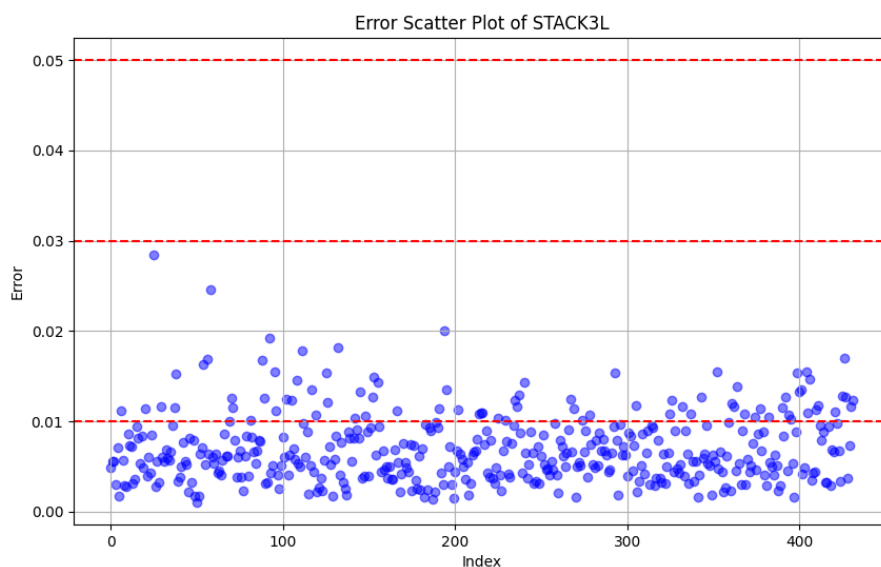


图 20 STACK3L 测试采样点误差情况散点图

Fig.20 Sample point error case scatter plot of the test set of STACK3L

（注：横坐标 Index 为测试采样点从 0 开始的编号，无实际意义）

（三）运行时间

STACK3L 每个采样点也包含两份文件，即求解一个采样点时，实际上是求解两份文件。Task 1 和 Task 2 含义同 5.1 节。

（1）单个采样点运行

Task	Average	Min	Max	2sigma
Task 1(Parser)	0.003092s	0.002135s	0.005963s	3.1640e-07
Task 2(Model)	0.06150s	0.05858s	0.08603s	7.4865e-06
Total time	0.06623s	0.06241s	0.09237s	8.6651e-06

表 39 STACK3L 单个采样点运行时间表

Table 39 Single run-time of STACK3L

同 5.1 节，散点图中运行时间为求解单个采样点的总时间。

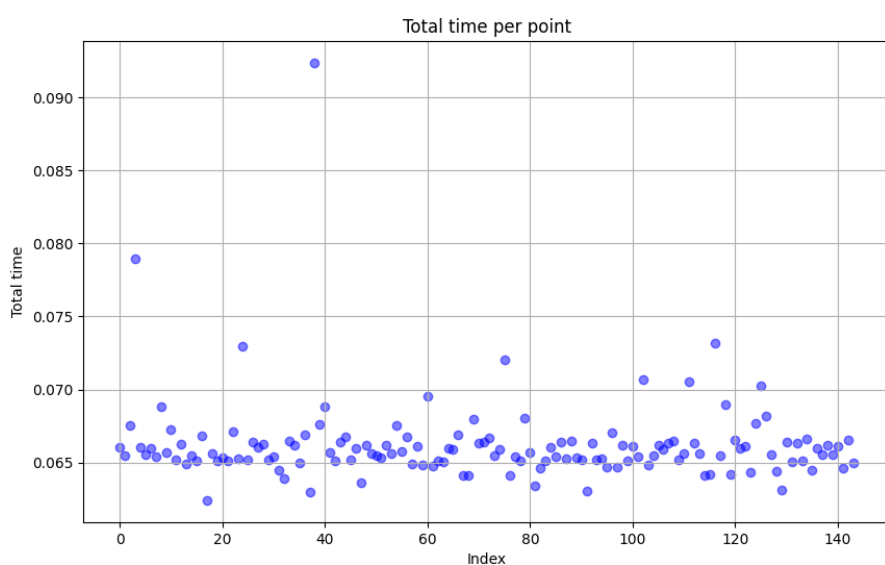


图 21 STACK3L 采样点单个运行时间散点图
Fig.21 Single run-time scatter plot of STACK3L

(2) 批量采样点运行

批量运行含义同 5.1 节。

Pattern	Number of points	Task1	Task2	Total time	Average per point
STACK3L	144	0.4072s	0.1037s	0.5139s	0.003569s

表 40 STACK3L 批量运行时间表
Table 40 Batch run-time of STACK3L

6. 可执行文件说明

6.1 文件说明

文件路径：/home/jcuser10/jcuser10_CICC1512

model 文件夹存放的是模型和权重。

util 文件夹存放的是工具，例如 parser。

predict.py 为可执行程序。

readme.txt 为使用说明。

6.2 使用说明

可执行程序运行方式分为单个采样点运行和批量运行。

(一) 命令行

命令格式: `python3 ./predict.py [options] [parameter]`

Options	Parameter	说明
--single	1	读入单个采样点
	0	批量读入目录下所有文件
--output_dir	[输出目录]	输出的所有文件位于该目录下
--input_dir	[输入目录]	批量输入的文件所在的目录路径
--input_num	[目录下文件总数]	
--file1_path	[文件 1 路径]	
--file2_path	[文件 2 路径]	仅读入一个文件时不需要该参数

表 41 命令行参数说明

Table 41 Description of command line parameters

(1) 计算单个采样点电容

(a) PLATE2L:

```
python3 ./predict.py --single 1 --file1_path [文件路径] --output_dir [输出目录]
```

(b) PLATE3L:

```
python3 ./predict.py --single 1 --file1_path [文件 1 路径] --file2_path [文件 2 路径] --output_dir [输出目录]
```

(c) STACK3L:

```
python3 ./predict.py --single 1 --file1_path [文件 1 路径] --file2_path [文件 2 路径] --output_dir [输出目录]
```

注: PLATE2L 中一个文件为一个采样点, 故单次只需读入一个文件。读入时需用"--file1_path"指明读入文件路径, 如用"--file2_path"会出错。PLATE3L 与 STACK3L 中两个文件为同一个采样点, 这两个文件的数字序号必须连续, 并且以 c1 为 master 的文件序号是奇数, 以 c2 或者 botcenter 为 master 的文件序号是偶数。否则会得到错误的结果。

(2) 批量计算采样点电容:

```
python3 ./predict.py --single 0 --input_dir [目录路径] --output_dir [输出目录] --  
input_num [目录下文件总数]
```

注: 目录下的文件命名格式需为 BEM_INPUT_<序号>_<数字后缀>.txt, 其中<序号>是文件的数字编号, 从 1 开始连续增长, <数字后缀>为数字, 没有值限制。对于存放 PLATE3L 和 STACK3L 类型文件的目录, 其中的文件同样需要满足两个文件为同一个采样点, 其中奇数文件的 master 是 c1, 偶数文件的 master 为 c2 或者 botcenter。

(二) 输出格式

每个输出文件对应一个同名输入文件。

(1) PLATE2L:

输出文件包含电容 c12, c1t, c1b, c1tb, c1e。

(2) PLATE3L:

奇数编号的输出文件包含对应输入文件的电容 c12, c1t, c1b, c1e, 偶数编号输出文件包含对应输入文件的电容 c1tb。

(3) STACK3L:

奇数编号的输出文件包含对应输入文件的电容 c12, c13, c14, c1t, c1b, 偶数编号输出文件包含对应输入文件的电容 c23, c23, c2t, c2b。

7. 参考文献

[1]W. Zhao, X. Li, S. Gu, S. H. Kang, M. M. Nowak and Y. Cao, "Field-Based Capacitance Modeling for Sub-65-nm On-Chip Interconnect," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 56, no. 9, pp. 1862-1872, Sept. 2009, doi: 10.1109/TED.2009.2026162.