寄生参数提取问题的并行有限元方法研究

顾卓然

摘 要

互连线寄生参数提取是重要的集成电路设计自动化（EDA）工具。随着集成电路制造工艺达到纳米尺度，复杂的工艺对寄生参数提取技术提出了更高的要求，需要兼顾高效率高精度，亟需发展新的寄生参数提取数值方法。

有限元方法采用非结构网格，可以很好地适应各种复杂几何结构，在许多电磁场问题中已经得到广泛应用。与此同时，自适应策略与并行化为有限元方法应用于大规模问题提供了便利。并行自适应有限元方法有望在寄生参数提取领域发挥重要的应用价值。

本文分别针对二维电容参数提取问题和三维高频电路电感参数提取问题开展并行自适应有限元方法、离散问题预条件方法研究，并研制相关计算程序。

针对电容参数提取问题，提出了一种新的自适应迭代收敛准则以及加密次数动态选择方法，提高了自适应方法的计算效率，设计了求解电容参数提取问题的新的并行自适应有限元方法。基于 Gmsh、MFEM 和 HYPRE 软件包，实现了二维电容寄生参数提取并行自适应有限元程序，且支持 GPU 加速计算。针对 2021 年集成电路 EDA 设计精英挑战赛的赛题十“先进工艺下互连线电容求解”提供的算例，进行了数值实验。针对复杂结构，在不使用 GPU 情况下，数值结果表明本文计算程序性能比赛题参考性能快 5 倍。同时，数值实验还表明 GPU 还可实现 2~24 倍的加速。

针对高频电路电感参数提取问题，本文提出了一种新的不包含 Lagrange 乘子的全波模型及其有限元离散格式。设计了求解离散问题的高效预条件迭代方法。基于 PHG 平台，本文研制了针对三维高频电路的电感参数提取并行有限元程序，并完成了电路频率从 10HZ~500GHZ，网格单元数最大超过 2×107，自由度数超过 5×107 的数值实验。本文所设计的预条件迭代法相比稀疏直接法求解器 MUMPS 在不同频率都表现出更优的求解性能，频率低于 200GHZ 时至少能实现 50% 以上的性能提升。

关键词： 寄生参数提取，有限元方法，并行计算，自适应，预条件