# 课题进展情况：

本课题的总目标是实现一种高效可靠的基于S参数的多导体传输线（MTL）RLCG参数提取算法. 自开题以来，本课题通过文献检索、理论推导和仿真验证，已初步形成了一种适用于单线和多线的RLGC参数提取算法，并使用MATLAB编程初步实现了该算法. 在单端、差分线和四线三种情形下对算法作了测试，重点测试算法在谐振区间的表现. 测试结果表明，本课题所提出的算法的性能已接近国际主流的仿真工具，但还存在优化空间. 基于目前获得的测试数据，对造成算法性能下降的原因作了初步分析，提出了可能的优化方向.

# 课题研究已取得的阶段性成果：

## 1. 编制了实现算法的MATLAB程序

本课题在前期文献整理和理论推导的基础上，已构建出一种从传输线的S参数提取RLGC参数的详细算法，现已初步完成该算法的MATLAB实现.

下面不加推导地列出算法构建过程中涉及的部分关键公式.

从传输线的S矩阵（记参考阻抗为）到Z矩阵和ABCD矩阵的转换：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1) |

其中是单位阵.

在频率点处对矩阵作相似对角化：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2) |

其中矩阵的各列是的2-范数为1的右特征向量，对角阵的各对角元素是的特征值. 需要特别指出，的列和的对角元素须依一定规则仔细确定顺序；本课题目前已通过理论推导和实例测试，给出了对其必要性和详细规则的论证.

复传播常数矩阵与矩阵的关系：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3) |

其中是传输线长，是须依一定规则（本课题目前已给出论证）仔细选值的对角阵，函数作用于对角阵相当于标量函数分别作用于该对角阵的对角元素.

特征阻抗矩阵与矩阵和矩阵的关系：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4) |

其中同(2)(3)式中的，函数作用于对角阵相当于标量函数分别作用于该对角阵的对角元素.

## 2. 完成对算法在单端线、差分线和四线情形下的测试

本课题已制作了用于测试算法性能的三个数据集和MATLAB例程.

作为算法的输入的传输线S参数集使用业界流行的PCB传输线建模工具Polar Si9000和三维电磁仿真软件HFSS获得，作为算法性能评价主要参照的参考RLGC参数集用业界流行的信号完整性仿真工具Cadence Sigrity PowerSI提取得到.

下面展示在四线情形下，用本课题所提出的算法提取的RLGC参数中的L项与参考RLGC参数集的对比情况. 由图1可见用本课题算法提取的参数与参考数据一致性良好.



图1 用本课题所提出的算法提取的L参数与参考L参数对比

# 存在的问题及解决思路：

本课题的研究已取得阶段性成果，但距离任务书规定的目标尚有差距. 现将本课题在前期研究中存在的问题总结如下.

## 1. 算法在谐振区间表现不佳

**问题1** 算法提取的RLGC参数在谐振区间存在异常抖动. 本课题目前认为，算法在谐振区间性能下降的主要原因是：从输入S参数到输出RLGC参数的误差传递系数在谐振区间附近显著升高. 对此，本课题暂时采取的方案是：在首次参数提取时去除谐振区间，然后利用提取得到的非谐振区间的参数，对各谐振区间作简单线性插值. 然而，该方案舍弃了输入数据集含有的许多可能有用的信息，且未考虑RLGC参数本身应具有的理论性质，显然不可靠.

**解决思路** 对谐振区间的处理主要有三类方案：一是利用性质修正算法的输入数据集，主要是S参数；二是利用性质修正算法中间参数，主要是和；三是利用性质修正首次提取的RLGC参数，包括改善插值或外推方法. 下阶段，本课题拟通过广泛查阅文献，在梳理现有方案的基础上，探索进一步优化的可能.

## 2. 测试数据集局限于四线及以下

**问题2** 由于未能熟练使用仿真工具，本课题目前制作的三个测试数据集均采用四线或以下MTL结构，不能满足深入研究和进一步优化算法的需要.

**解决思路** （1）继续学习仿真工具HFSS和ADS，重点掌握传输线建模和仿真的一般步骤，利用上述软件导出与仿真所得S参数对应的RLGC参数作为参考数据. 主要资料是市面上的中文入门教程和官方文档. （2）要了解常见MTL的几何特性. 可模仿相关文献的数值验证部分所用的MTL结构，制作线数更多、频率更高的MTL数据集和测试例程. （3）还应关注MTL方程的基本假设及由此导出的RLGC参数适用条件，尤其是对MTL横向尺寸的约束. 研究破坏这种约束对RLGC参数性能的影响.

## 3. 对S参数的无源性，RLGC参数的因果性和直流特性研究不充分

**问题3** 目前，数据集中的S参数的无源性检查和修正由仿真工具自动完成. 出于研究的完整性考虑，应对无源性的基础理论作适当的补充研究. 另外，本课题目前未考虑RLGC参数的因果性约束，未提取低频（直流）RLGC参数. 而上述两点在MTL时域仿真中尤为重要.

**解决思路** 已检索到一些相关文献. 注意到，对S参数或RLGC参数引入因果性约束或有利于问题1的解决. 下阶段应梳理现有方法并回顾相关基础理论，力求知其然更知其所以然.

## 4. 未进行时域仿真验证

**问题4** 本课题目前所作的讨论全部是在频域进行，未对提取的RLGC参数作时域性能验证.

**解决思路** （1）学习Hspice等仿真工具的使用，了解S参数和RLGC参数等数据的标准组织形式. （2）查阅文献，了解时域仿真的基础理论和主要指标.

# 下一阶段的工作计划和研究内容：

本课题针对前期研究中存在的问题，拟在下一阶段重点开展以下工作.

## 1. 进行文献回顾，梳理现有的处理MTL参数谐振现象的方法

谐振现象的存在是制约算法性能的主要因素，对谐振区间的处理是RLGC参数提取的难点之一. 针对问题1，本课题已检索到部分涉及谐振现象的文献. 下阶段拟梳理现有的处理谐振现象的方法，比较各种方法的性能，探索进一步优化的方向.

## 2. 学习主流仿真工具的使用，扩充测试数据集，增加时域仿真验证

针对问题2和问题4，下一阶段拟继续学习HFSS，ADS，Hspice等仿真工具的使用，尤其是它们在MTL建模中的应用. HFSS和ADS主要用于获取MTL的S参数和参考RLGC参数，Hspice主要用于对提取出的RLGC参数作时域仿真. 学习仿真工具的主要途径是阅读市面上的中文教程，查阅官方文档和例程，以及请教有经验的使用者.

## 3. 在算法中引入无源性检查、因果性约束，并实现直流参数提取

作为算法输入的MTL的S参数应作无源性检查. 提取得到的RLGC参数应满足因果性约束. 准确的直流RLGC参数对时域仿真尤为重要，但其难以简单地通过原始S参数提取得到. 针对问题3，下阶段拟通过查阅经典文献或著作，了解无源性、因果性的相关基础理论；梳理直流RLGC参数提取方法；最终用MATLAB实现无源性检查、因果性约束和直流RLGC参数提取.

## 4. 完善理论推导，使本课题所涉概念、公式和方法体系化

本课题力求对RLGC参数提取及相关理论作系统完整的叙述. 下一阶段，计划从MTL方程的基本假设、导出和求解出发，给出RLGC参数的定义、物理意义和适用条件；叙述从S参数提取RLGC参数所涉公式的理论推导；叙述S参数、Z参数、ABCD参数等网络参数的定义、物理意义和变换关系；叙述无源性、因果性的相关理论；对本课题所涉的必要的数学背景给出简洁的说明.