

双支节调配器程序设计说明书

姓名：关小凯	学号：520021910099	分工：系统原理和整体设计
姓名：林佳俊	学号：520021910104	分工：代码编写和程序运行
姓名：曹天泽	学号：520030910280	分工：代码编写和程序完善
姓名：冯绍庭	学号：520021911362	分工：显示界面和交互设计
姓名：何茉晗	学号：520021911148	分工：程序设计说明书编写

目录

1 支节调配器原理	2
1.1 支节调配器基本原理说明	2
1.2 双支节调配器参量理论计算	3
1.3 双支节调配器的 Smith 圆图表示	4
1.4 双支节调配器的匹配盲区	5
2 程序设计思路	5
2.1 程序基本架构	5
2.2 具体模块实现	6
3 交互界面设计和演示	7
4 实践心得	8
5 补充说明	8
参考文献	9

1 支节调配器原理

阻抗匹配是射频/微波技术与天线工程中经常遇到的问题，其分为共轭匹配、无反射匹配。共轭匹配是指信源内阻抗 Z_g 与传输线输入阻抗 Z_{in} 的匹配以使信源有较大功率传输给传输线。无反射匹配是指负载阻抗 Z_L 与传输线特性阻抗 Z_c 恒等匹配，以达到无反射传输的条件。当无反射的信源匹配和负载匹配同时成立时，信源的共轭匹配也成立，所以在一般工程中，我们更加关心无反射匹配。因为无反射匹配的信源匹配与负载匹配的条件一致，我们便仅讨论负载的无反射匹配。

负载匹配的实质从传输线的角度来说说是使匹配器和负载分别引起的反射波等幅反向，使传输线处于行波工作状态；从阻抗变换的角度来看，是使原来不等于传输线特性阻抗的负载和匹配器相互作用整体可看做与特性阻抗相匹配。负载匹配最基本的匹配器包括 $\lambda/4$ 阻抗变换器和支节调配器。在本说明中主要讨论支节调配器。

1.1 支节调配器基本原理说明

支节调配器即在主传输线适当位置并联（或串联）终端短路或开路线，产生附加反射，抵消负载失配反射，实现匹配。在实际应用中，终端短路线并联在主传输线上最为常见。常用有单支节、双支节、三支节调配器，其示意图如图1所示。

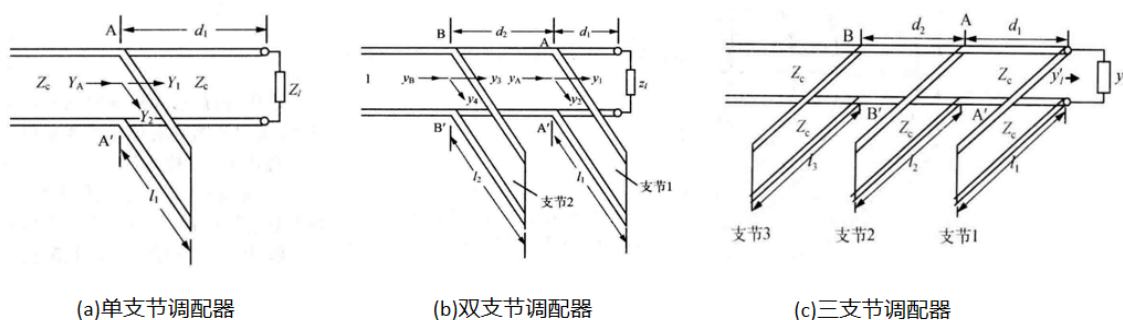


图 1: 常见支节调配器示意图

单支节调配器是在离终端适当位置并联一可调短路传输线构成，通过调节图1(a)中标示出的支节接入位置到负载的距离 d_1 和支节长度 l_1 达到匹配。调整 d_1 使得 AA' 右端的输入导纳为 $Y_1 = Y_c \pm jB_1$ （其中 Y_c 为主传输线的特性阻抗），在 AA' 处并联一个大小相等、性质相反的电纳 $Y_2 = \mp jB_1$ 的终端短路支节线，即可抵消 Y_1 中的电纳使得 AA' 右边的输入电纳为 $Y_A = Y_1 + Y_2 = Y_c$ ，即 $Z_A = Z_c$ ，达到匹配目的。虽然单支节调配器的原理和结构都比较简单，但是当负载发生变化时，需要调整支节线的接入位置。

双支节调配器可以实现在固定支节调配器位置的情况下实现阻抗匹配。在图2(b)中， z 和 y 分别为归一化阻抗和归一化导纳。为满足阻抗匹配条件，需使从 BB' 右端向负载看去的归一化输入导纳 $y_3 = y_c \pm jb_3$ 。通过调节 l_2 的长度，使 $y_4 = \mp jb_3$ ，此时 $y_B = y_3 + y_4 = y_c$ ，BB' 左侧的传输线处于无反射工作状态。为使 $y_3 = y_c \pm jb_3$ ，需要根

据选定 d_2 的值合理选取 l_1 的取值（即 y_A 的取值）从而获得匹配。据此便可以通过传输线的导纳计算公式导出双支节调配器各支节线的长度和可以获得匹配的条件。

1.2 双支节调配器参量理论计算

因为归一化负载导纳 $y_l = 1/z_l = g_l + jb_l$ ，其中 g_l 、 b_l 分别为归一化负载的电导和电纳。于是从 AA' 右端向负载看去的归一化导纳 y_1 为

$$y_1 = \frac{y_l + j \tan \beta d_1}{1 + jy_l \tan \beta d_1} = g_1 + jb_1 \quad (1)$$

根据式(1)，从 AA' 右端向负载看去的归一化电导 g_1 和归一化电纳 b_1 为

$$g_1 = \frac{g_l (1 + \tan^2 \beta d_1)}{(1 - b_l \tan \beta d_1)^2 + (g_l \tan \beta d_1)^2} \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{b_l (1 - \tan^2 \beta d_1) + (1 - b_l^2 - g_l^2) \tan \beta d_1}{(1 - b_l \tan \beta d_1)^2 + (g_l \tan \beta d_1)^2} \quad (3)$$

而第一个分支线的归一化导纳 y_2 以及从 AA' 左端向负载看去的归一化导纳 y_A 分别为

$$y_2 = jb_2 = -j \cot \beta l_1 \quad (4)$$

$$y_A = y_1 + y_2 = g_A + jb_A = g_1 + j(b_1 + b_2) \quad (5)$$

于是，从第二个支节线接入处 BB' 右端向负载看去的归一化导纳 y_3 为

$$y_3 = \frac{y_A + j \tan \beta d_2}{1 + jy_A \tan \beta d_2} = \frac{(y_1 + jb_2) + j \tan \beta d_2}{1 + j(y_1 + jb_2) \tan \beta d_2} = g_3 + jb_3 \quad (6)$$

根据式(6)，从 BB' 右端向负载看去的归一化电导 g_3 和归一化电纳 b_3 为

$$g_3 = \frac{g_A (1 + \tan^2 \beta d_2)}{(1 - b_A \tan \beta d_2)^2 + (g_A \tan \beta d_2)^2} \quad (7)$$

$$b_3 = \frac{b_A (1 - \tan^2 \beta d_2) + (1 - b_A^2 - g_A^2) \tan \beta d_2}{(1 - b_A \tan \beta d_2)^2 + (g_A \tan \beta d_2)^2} \quad (8)$$

第二个分支线的归一化导纳 y_4 和从第二个支节线处 BB' 左端向负载端看去的归一化导纳 y_B 为

$$y_4 = jb_4 = -j \cot \beta l_2 \quad (9)$$

$$y_B = y_3 + y_4 = g_B + jb_B = g_3 + j(b_3 + b_4) \quad (10)$$

为获得匹配，需要使 $g_B = 1, b_B = 0$ 。将 $g_B = 1$ 代入式(7)中，可以解得

$$b_2 = \frac{1 - b_1 \tan \beta d_2 \pm \sqrt{g_A \sec^2 \beta d_2 - (g_A \tan \beta d_2)^2}}{\tan \beta d_2} \quad (11)$$

由 b_2 可以确定第一个支节线的长度 l_1 为

$$l_1 = \frac{1}{\beta} \arctan \left(-\frac{1}{b_2} \right) \quad (12)$$

在 l_1 已知后，便可以确定 b_3 的值，进而确定与之相对应抵消的第二个支节线的长度 l_2 为

$$l_2 = \frac{1}{\beta} \arctan \left(\frac{1}{b_3} \right) \quad (13)$$

1.3 双支节调配器的 Smith 圆图表示

章节1.1中描述的双支节调配器的原理流程也可以通过导纳圆图较为直观地表示出来。图2为匹配过程中传输线和 Smith 圆图的对应关系（用相同颜色表示对应）。 d_1 和 d_2 传输线段相当于在等反射系数圆上运动， l_1 和 l_2 支节匹配段相当于在等电导圆上运动，最终通过参量调节达到 Smith 圆图的原点即匹配点。

为使图2中 BB' 左边的传输线上无反射，必须使从 BB' 向负载看去的归一化输入导纳 $y_3 = 1 \pm jb_3$ ，即应使 y_3 落在 $g_3 = 1$ 的单位圆上。选取 $y_3 = 1 + jb_3$ 进行讨论，则 y_3 应落在 $g_3 = 1$ 的圆上 d 点，通过调节 l_2 的长度，使 $y_4 = -jb_3$ ，此时 $y_A = y_3 + y_4 = 1$ ，BB' 右边的传输线处于无反射工作状态。为使 y_3 落在单位圆上，就要求 y_A 落在一个辅助圆上。若选取 $d_2 = \lambda/8$ ，则通过调节 l_1 的长度辅助圆上的某 c 点处。同理，若选取 $y_3 = 1 - jb_3$ ，则 y_3 和 y_A 应分别落在图中的某 d' 和 c' 点处。

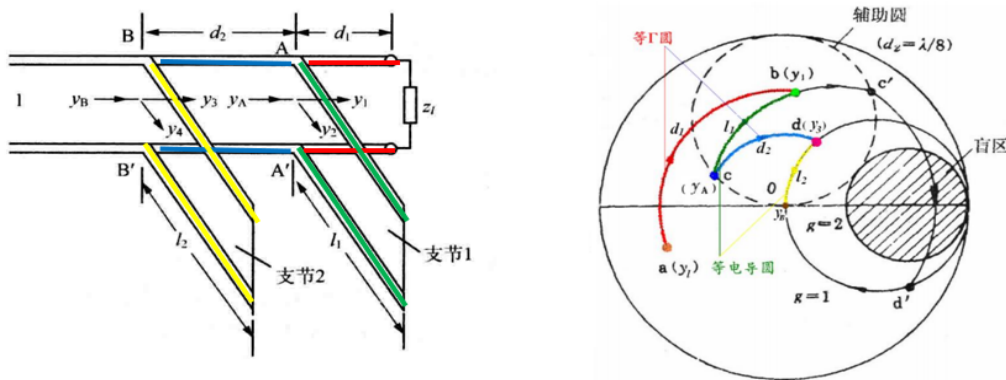


图 2: 双支节调配器的 Smith 圆图表示

1.4 双支节调配器的匹配盲区

双支节调配器存在着不能匹配的区域——匹配盲区，其大小由双支节的间距 d_2 确定。由式(4)知，要实现匹配，则 $b_2 = -\cot\beta l_1$ 必为实数，由式(11)有

$$g_A \sec^2 \beta d_2 - (g_A \tan \beta d_2)^2 \geq 0 \quad (14)$$

即

$$0 \leq g_A \leq \csc^2 \beta d_2 \quad (15)$$

当传输线终端负载能够使 g_A 满足式(15)时，可以通过调节支节线长度 l_1 、 l_2 实现匹配。由式(15)知，当 $d_2 = \lambda/8$ 时， $g_A > 2$ 为匹配盲区；当 $d_2 = \lambda/4$ 时， $g_A > 1$ 为匹配盲区。在 Smith 圆图中，根据上述关系式也可以较为容易的将匹配盲区表示出来，图3中展示了 $d_2 = \lambda/8$ 时的匹配盲区区域。

2 程序设计思路

2.1 程序基本架构

根据章节1.2和章节1.3的原理说明，我们可以利用 Matlab 软件设计双支节匹配器的计算程序和 Smith 圆图示意程序，我们所编写程序的调用关系如图3所示。

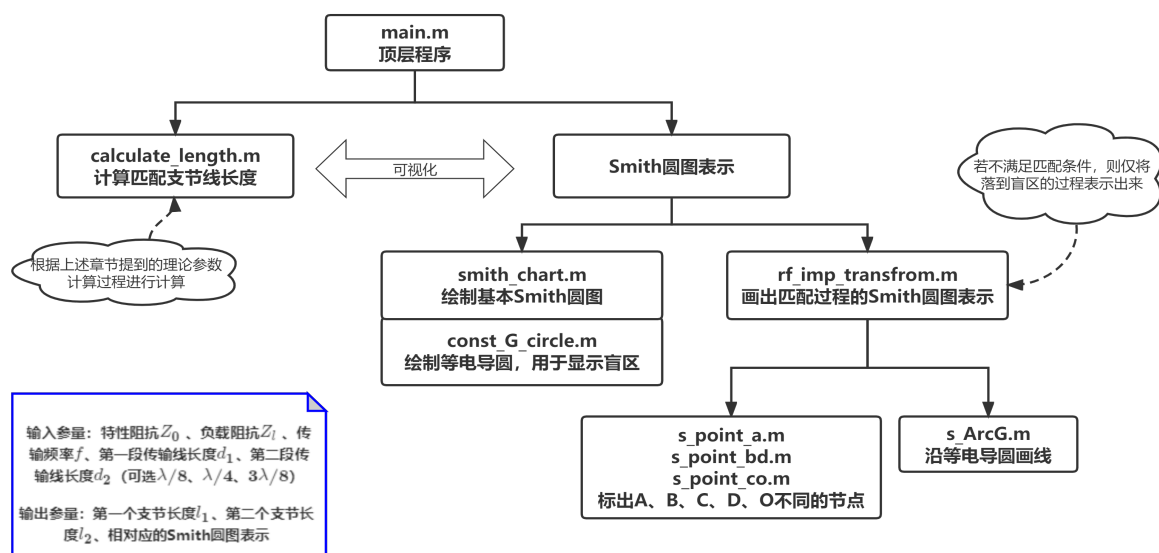


图 3: 程序设计基本调用关系示意

在已知传输线的特性阻抗、负载阻抗、工作频率/波长、第一段传输线长度以及有限选择的第二段传输线长度（在我们的设计中， l_2 可选 $\lambda/8$ 、 $2\lambda/8$ 和 $3\lambda/8$ ）后，首先根据章节1.2中的匹配支节长度 l_1 、 l_2 的计算公式可以计算出用户输入参量条件下的匹配支节

长度（由函数 `calculate_length.m` 实现）。之后根据已经求得的支节长度将完整的匹配实现过程呈现在 Smith 原图上，实现可视化。首先通过 `smith_chart.m` 画出基本的 Smith 阻抗原图，并根据所选 d_2 的取值利用 `const_G_circle.m` 函数将盲区在 Smith 圆图上表示出来。通过式(15)判断当前输入负载是否对应落在盲区不能匹配。若可以进行匹配，则通过 `rf_imp_transform.m` 函数将匹配过程表示出来（由于辅助圆上点的取值有两个，则会有两种情况，对应输出两张 Smith 圆图）；若不能匹配，则通过 `rf_imp_transform.m` 函数将落到盲区的过程表示出来。

2.2 具体模块实现

- **calculate_length.m**

输入参数：两段传输线长度 d_1 、 d_2 ，归一化负载导纳 $y_{l,mode}$ (对应两种匹配情况)
输出参数：对应 mode 下的两段匹配支节长度 l_1 、 l_2 根据输入参数 mode 的值确定式(11)中的“±”号的取值，由此可以确定 b_2 。进一步根据公式即可以计算得到 l_1 、 l_2 。

- **smith_chart.m**

输入参数：option(对应不同的圆图种类)

输出参数：figure(smith 圆图)

根据输入参数 option 的值确定输出阻抗圆图、导纳圆图或者是阻抗和导纳圆图的组合。例如，在阻抗圆图中可以根据公式 $(\Gamma_r - \frac{r}{1+r})^2 + \Gamma_i^2 = (\frac{1}{1+r})^2$ 和 $(\Gamma_r - 1)^2 + (\Gamma_i - \frac{1}{x})^2 = (\frac{1}{x})^2$ 得到归一化电阻圆族和归一化电抗圆族，在本设计中，默认输出阻抗圆图并以此为基础进行分析。

- **const_G_circle.m**

输入参数：电导 g 、表示线型

输出参数：Smith 原图中对应输入电导 g 的电导圆表示

根据电导圆在阻抗圆图中的表示公式 $(\Gamma_r + \frac{g}{1+g})^2 + \Gamma_i^2 = (\frac{1}{1+g})^2$ 可以得到对应的电导圆，即盲区区域。

- **rf_imp_transform.m**

输入参数：工作频率、对应输出图的序号、特性阻抗 Z_0 、表征匹配模式的结构体
输出参数：Smith 原图中匹配过程的表示

根据输入参数中的结构体参数可以选择匹配线形式（例如传输线、短路线、断路线等）、匹配线连接方式（串联、并联），在本设计中，默认为短路线并联到主传输线中并以此为基础进行分析。在本函数中，会计算出 d_1 、 l_1 、 d_2 、 l_2 每一节点的特性阻抗，并分别计算出其实部和虚部显示在 smith 原图中。其中点和连接弧线的显示通过调用 `s_point.m`（显示对应点并标出对应文字）系列函数和 `s_ArcG.m` 函数（利用等电导圆的公式画出一段弧线）实现。此函数实现效果如图4所示。

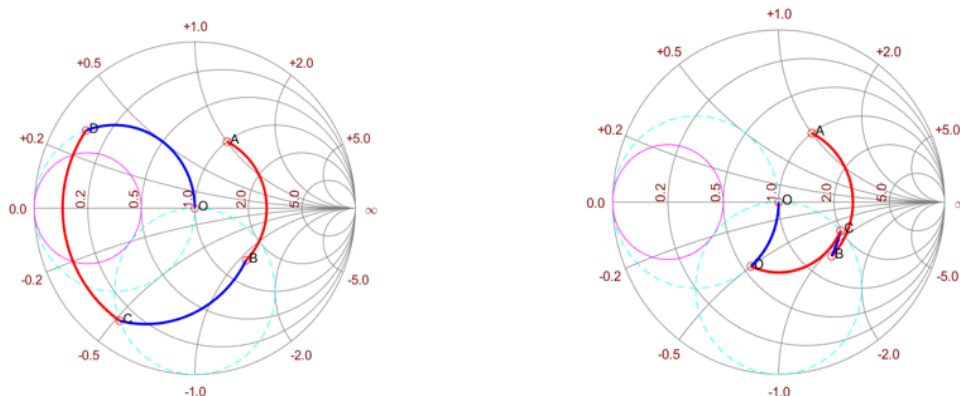


图 4: rf_imp_transform.m 函数实现效果示意图

3 交互界面设计和演示

我们将章节2中的程序设计进行进一步的打包和设计，使得用户可以由交互界面输入特性阻抗、带匹配负载、工作频率等等参数，并依据用户输入参数将匹配结果直观的进行表示出来。打开应用程序文件，首先看到的软件初始界面如图5所示，交互界面及其基本解释介绍如图6所示。

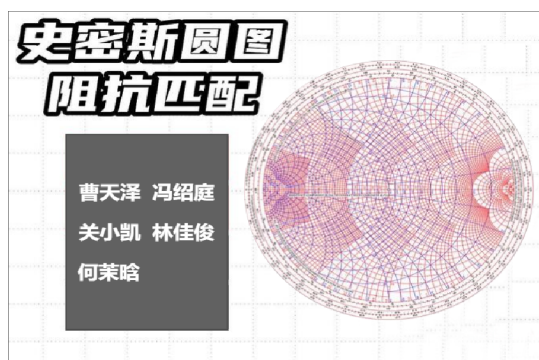


图 5: 软件初始界面

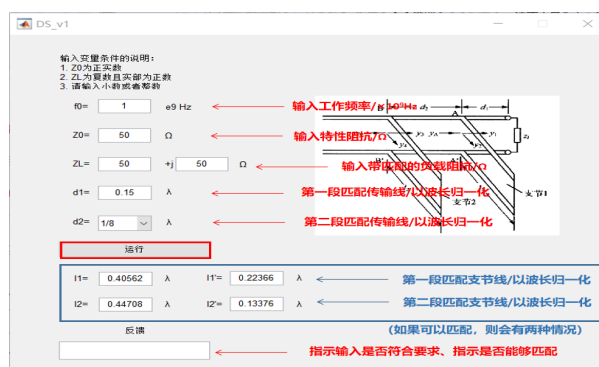


图 6: 软件交互界面及功能解释

通过此界面，用户可以输入传输线工作频率、特性阻抗、带匹配的负载阻抗、第一段传输线的长度和第二段传输线的长度（可选 1/8、2/8、3/8 三个参数，分别对应不同的匹配盲区和匹配过程），点击“运行”按钮，便可以得到两组计算得到的匹配支节线的长度，同时弹出对应的 Smith 圆图窗口。

示例如下：输入 $f_0=1(\text{e9Hz})$, $Z_0=50(\Omega)$, $z_l=50+(j)50(\Omega)$, $d_1=0.15(\lambda)$, $d_2=0.125(\lambda)$ ，点击“运行”，得到的结果界面如图7所示。从中可以看出在该条件下有两组解可以实现匹配，分别为： $l_1=0.40562(\lambda)$, $l_2=0.44708(\lambda)$; $l_1'=0.22366(\lambda)$, $l_2'=0.13376(\lambda)$ 。对应的 Smith 圆图匹配过程同时展现在界面上。

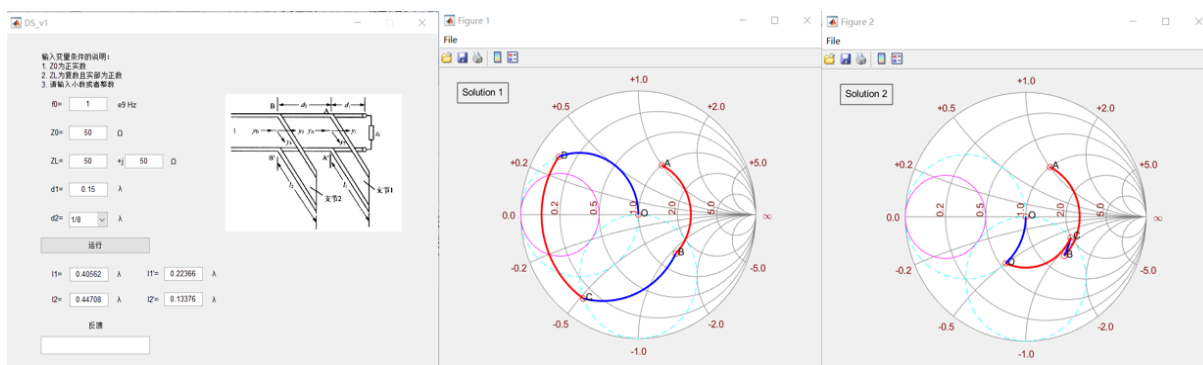


图 7: 示例结果运行界面

在“反馈”一栏中，我们考虑到用户的输入情况，对错误的输入做出提示反馈。包括输入阻抗 Z_0 的值小于 0、输入带匹配负载的实部小于 0 以及恰好落在匹配盲区的情况，如图8所示。若落在匹配盲区，会弹出一幅 Smith 圆图直观表示落到匹配盲区的过程。

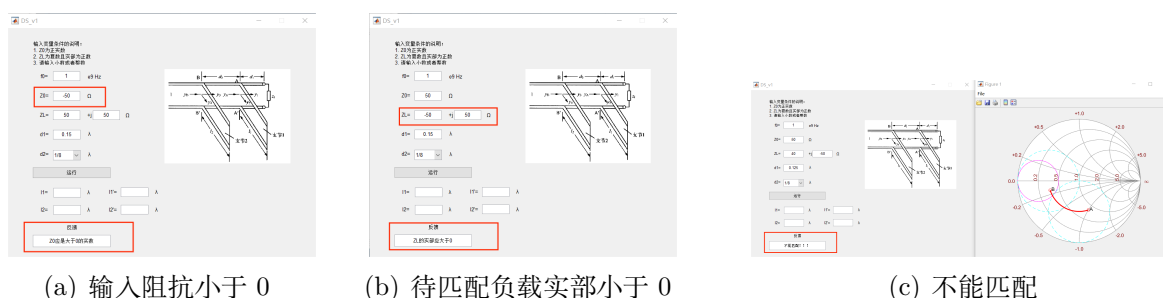


图 8: 特殊输入情况反馈提示示意

4 实践心得

在本次完成大作业的过程中，我们小组分工合作，每个人都从中学习到了理论知识和实践技巧。在本次大作业过程中，我们对于 Smith 圆图、传输线工作原理、支节匹配器工作原理都有了更加深刻的了解，并实现了将课堂内容运用于实际，帮助解决实际问题。在制作软件的过程中，我们对于 Matlab 编程语言和其交互界面设计都有进一步的熟悉，受益匪浅。

5 补充说明

在文件 readme 文档中我们给出了软件使用方法：

• 安装 Matlab Runtime:

双击运行 for_redistribution 中的 MyAppInstaller_mcr.exe 文件并按提示进行安装；如果之前有安装过，此步或许可以跳过；

- **运行设计软件：**

双击运行 for redistribution files only 中的 Double_Stub.exe 文件。首次在个人电脑上运行可能需要等待较长时间。

参考文献

- [1] 周希朗. 微波技术与天线（第三版）[M]. 南京：东南大学出版社.2015
- [2] 袁斌老师. 微波与天线课程讲义 [EB]. 上海交通大学.2022
- [3] Reinhold Ludwig, Pavel Bretchko.RF Circuit Design:Theory and Applications[M].Prentice Hall.1999