

关于六阶拓展盒型拓扑结构的说明

图 1 所示的六阶拓展盒型是耦合腔体滤波器中能够实现 2 个传输零点的一种拓扑结构，由于“横平竖直”的耦合关系，该拓扑结构在物理实现时具有一定的优势。该拓扑结构具有多解，当传输零点关于中心频率非对称分布时，通常有 4 种该拓扑结构耦合矩阵的耦合系数不同但 S 参数响应相同。

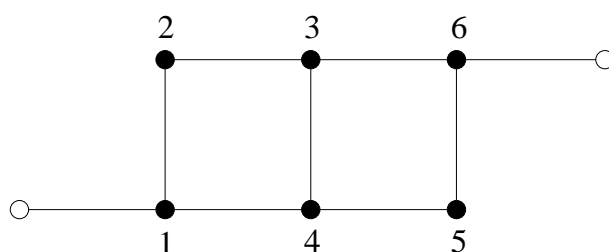


图 1 六阶拓展盒型拓扑结构示意图

在图 1 中，非相邻谐振器之间的交叉耦合包含 M_{14} 与 M_{36} ，注意到互换图 1 中两个谐振器的编号，即互换耦合矩阵中的第 i 行与第 i 列以及第 j 行与第 j 列，并不会改变耦合矩阵对应的 S 参数响应，也不会改变耦合矩阵的拓扑结构。文献[1]*与文献[2]**给出了如何通过规范折叠型拓扑通过 Givens 变换旋转至六阶拓展盒型拓扑结构的详细过程，在变换的过程中有一个旋转角

*文献[1]: Cameron R J, Kudsia C M, Mansour R R. Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications[M]. John Wiley & Sons, 2018.

**文献[2]: Jianzhong Chen, Senyu Zhu, Qingqiang Wu, and Liang Li, Filter synthesis approach for the extended box section networks, Electronics Letters[J], September 2021 Vol. 57 No. 20.

度 θ 未知，需要通过求解最优化问题来确定。使用文献[2]的变换顺序，可以将优化变量设置为 θ ，优化目标设置为最小化变换后耦合系数 M_{23} 或 M_{34} 或 M_{45} 的幅度值（若旋转角度选取合适，变换后这些耦合系数中的一个最终将为 0，此时拓扑结构对应六阶拓展盒型）。图 2 给出了某一六阶拓展盒型拓扑结构滤波器上述耦合系数幅度值关于 θ 变化的曲线图，图中的 4 个零点对应于 4 种不同的耦合矩阵解。根据曲线的特点可采用等间隔搜索结合一维优化算法的方式来求解该最优化问题。

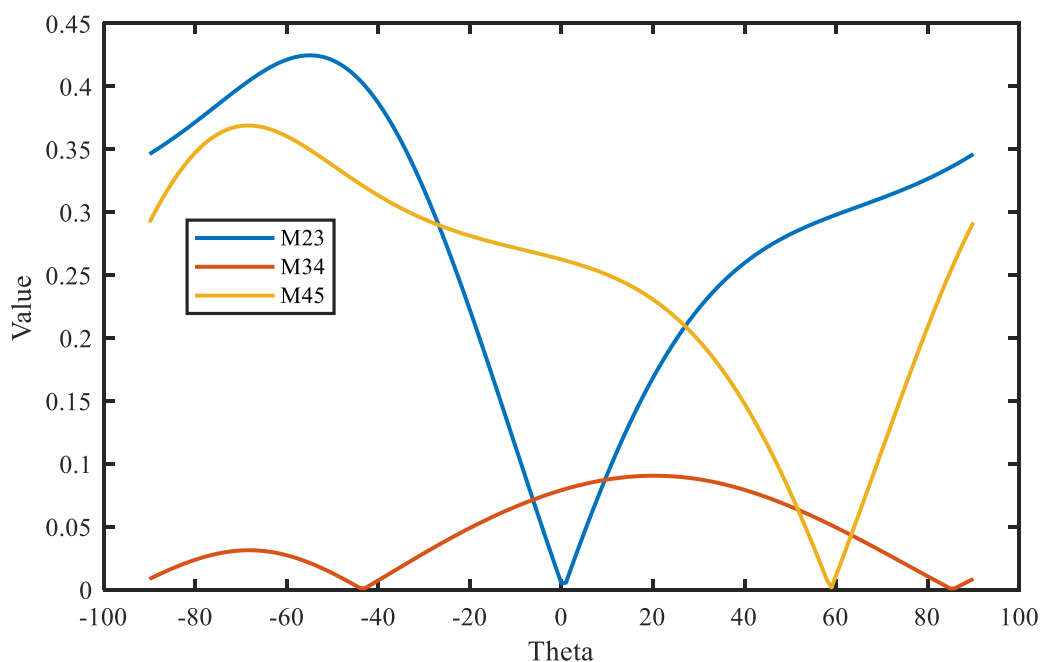


图 2 耦合系数幅度值关于 θ 变化的曲线图

旋转角度 θ 成 180° 周期性变化，因此等间隔搜索阶段可以在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 范围内间隔 1° 进行极小值粗略搜索。在得到的所有极小值 θ_{\min} 处，选取精细搜索范围为 $[\theta_{\min} - 1^\circ, \theta_{\min} + 1^\circ]$ ，并利用

黄金分割搜索算法在所有极小值附近寻找零点。当拓扑结构对应的 2 个传输零点非对称分布时，可以找到 4 个零点，分别对应于 4 种耦合矩阵解。

注意，有时图 2 的曲线会变得剧烈震荡，可能会寻找到多于 4 个极小值，这些解中有一些是错误的，需要对变换完成后的耦合矩阵进一步筛选。最后，若需要将耦合矩阵的谐振器编号变换成与图 1 一致，对于 $M_{23}=0$ 的解，可以通过互换编号 3、5 来实现；对于 $M_{34}=0$ 的解，可以通过互换编号 2、4 与 3、5 实现；对于 $M_{45}=0$ 的解，可以通过互换编号 2、4 来实现。