关于 CQ 拓扑结构的说明

图 1 所示的级联四元组（Cascaded Quadruplet，CQ）是耦合腔体滤波器中能实现 2 个传输零点的常用拓扑结构。该拓扑结构具有多解，有无穷多个该拓扑结构耦合矩阵的耦合系数不同但 S 参数响应相同。

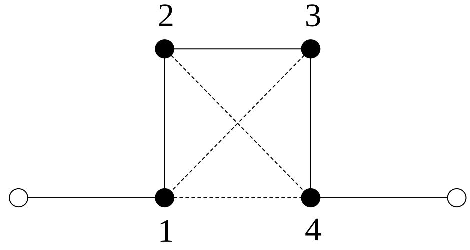

图 1 CQ 拓扑结构示意图

在所有解中，图 2 给出了三种常用解的拓扑结构示意图。结构（a）中 $M_{13}=0$，结构（b）中 $M_{24}=0$，这两种结构的交叉耦合数量最小，物理实现的代价最小。当 CQ 结构产生的 2 个传输零点关于中心频率对称时有 $M_{13}=M_{24}=0$，对称的传输零点能够同时增强高频、低频阻带的频率选择性。在实际物理电路中，往往由于寄生耦合或耦合的色散等原因使得传输零点不对称分布，此时提取物理电路耦合矩阵时会得到非零的 M_{13} 与 M_{24}。由于物理电路是对称的，如果将不对称的传输零点分布归结于寄生耦合，那么产生的寄生耦合也应该对称分布，提取的耦合矩阵具有图 2 中结构（c）所示的拓扑结构。因此，在提取具有对称 CQ 结构耦合腔体滤波器耦合矩阵时可能会使用到结构（c）。

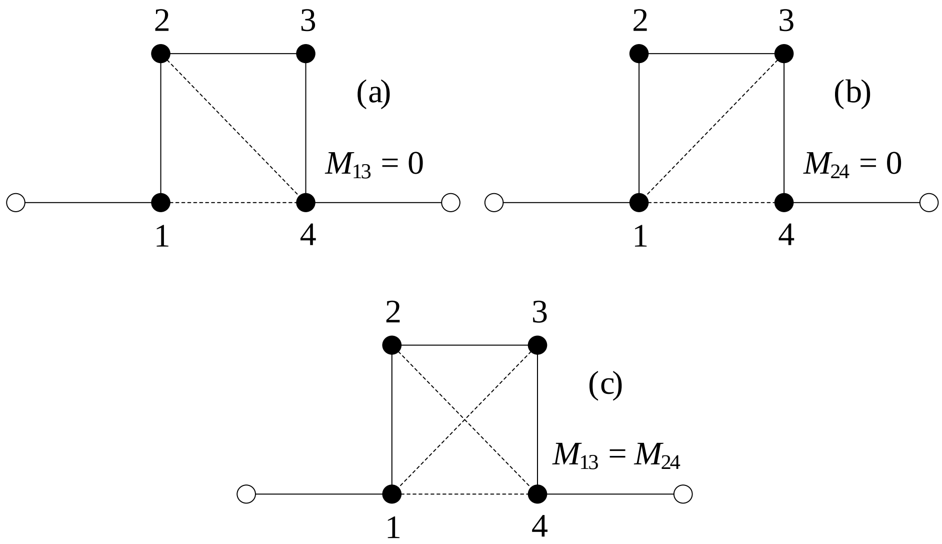

图 2 三种常用的 CQ 拓扑结构示意图

文献[1]*介绍了如何由两个级联三元组（Cascaded Triplet，CT）变换至图 1、图 2（a）以及图 2（b）所示的 CQ 结构。接下来，将介绍如何通过矩阵的 Givens 变换将耦合矩阵由图 1 结构变换至图 2 结构（c）。以[1, 2]、[1, 4]、[2, 3]与[3, 4]为支点都能改变耦合矩阵中 M_{13} 与 M_{24} 的值使其相等，但为避免在变换后不产生额外的非零耦合系数，需要使用[2, 3]为支点。以[2, 3]为支点，假设旋转角度为 θ，经过变换后可计算出新耦合矩阵中 $M_{13\mathrm{new}}$ 为 $\sin\theta M_{12} + \cos\theta M_{13}$，$M_{24\mathrm{new}}$ 为 $\cos\theta M_{24} - \sin\theta M_{34}$，其中 M_{12}、M_{13}、M_{24} 与 M_{34} 为变换前耦合矩阵中的耦合系数。令 $M_{13\mathrm{new}} = M_{24\mathrm{new}}$，可计算所需旋转角度 $\theta = \mathrm{actan}[(M_{24} - M_{13}) / (M_{12} + M_{34})]$。

---

*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.