

具有特定频段的左手材料构造与设计优化*

高仁璟¹⁾²⁾ 王国明²⁾ 刘书田^{1)†} 唐祯安²⁾

1 (大连理工大学运载工程与力学学部, 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

2 (大连理工大学电子信息与电气工程学部, 大连 116024)

(2011 年 3 月 4 日收到; 2011 年 5 月 30 日收到修改稿)

为研究具有特定频段的左手材料设计方法, 首先基于传输线理论构造了一种左手材料微观构型, 采用 S 参数反演法进行数值仿真和等效传输线模型分析, 说明了该构型在特定的尺寸条件下具有左手特性, 并分析了尺寸参数对左手性能的影响. 进而给出了在给定频率附近具有最大带宽、较小损耗的左手材料设计优化问题的数学模型, 并给出了设计实例. 数值设计结果验证了优化模型的适用性和正确性.

关键词: 左手材料, 构型设计, 传输线理论, 优化设计

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf, 84.40.Az

1 引言

同时具有负磁导率和负介电常数的材料 (称为左手材料^[1]), 由于其具有负折射现象^[2]、逆 Doppler 效应^[3]、完美透镜效应^[4] 等奇异性质, 在电磁隐身^[5]、微带天线^[6] 等方面具有极大的应用前景. 自 2000 年 Smith 等^[7] 首次采用开口谐振环 (SRR) 和平行金属丝阵列 (Rod) 组合制作出具有负折射特性的左手材料后, 左手材料的特性分析及其构型的发现和设计成为重要的研究热点, 提出了一系列不同形状的左手材料结构^[8–12]. 例如, 基于传统的 SRR 或 Rod 构成的左手材料^[8–10]、单面“H”型左手材料构型^[11] 以及基于电谐振器对构成的左手材料^[12]. 这些结构虽然制作简单, 但其左手带宽较窄. 随着高新技术的发展, 对材料的左手性质的要求越来越高, 需要研究和发现新的左手材料. 因此, 左手材料微结构的设计理论和方法成为设计新的左手材料的关键.

传输线理论常作为左手材料的有效分析方法^[13], 该方法将电路理论与电磁场理论相结合, 开创了一个新的研究领域. 左手材料可以等效为一个复合左/右手传输线模型, 其中 LC 的并联谐振

频率和串联谐振频率分别决定了左手材料的负介电常数区域和负磁导率区域. 基于传输线理论, 本文以“巨”字形结构作为磁谐振器并与 Rod 组合构造了一种左手材料的微结构; 以微结构尺寸参数为设计变量, 建立了在给定频率值附近出现左手性质的频率带宽最大、损耗较小的左手材料微结构设计问题提法和求解方法. 作为算例, 给出了包含 10 GHz 频率左手材料最大带宽及较小损耗的设计.

2 左手材料微结构的构造与性能分析

2.1 左手材料构型的构造

尽管传输线理论包含纯左手传输线模型, 但很难寻找与纯左手传输线模型相比拟的左手材料微结构形式. 因此, 以复合左/右手传输线模型为基础, 以传输线模型与连续体构型的比拟关系, 构造左手材料的微结构构型. 电磁波在复合左/右手传输线中传播时, 当激发电谐振和磁谐振的频率存在部分重合时, 整个结构就表现出左手性质, 等效介电常数和等效磁导率同时为负值. 图 1 为单位理想复合左/右手传输线模型, 其等效介电常数和磁导率如

* 国家重点基础研究发展计划项目 (批准号: 2011CB610304) 和教育部博士学科点基金项目 (批准号: 20090041110023) 资助的课题.

† E-mail: stliu@dlut.edu.cn

下^[14]:

$$\varepsilon = C_R - \frac{1}{\omega^2 L_L}, \quad \mu = L_R - \frac{1}{\omega^2 C_L}. \quad (1)$$

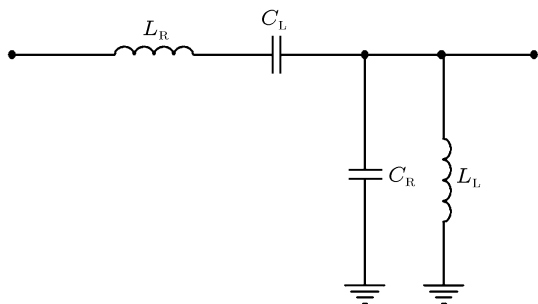


图1 单位理想复合左/右手传输线模型

图1 并联支路中的电容 C_R 和电感 L_L 决

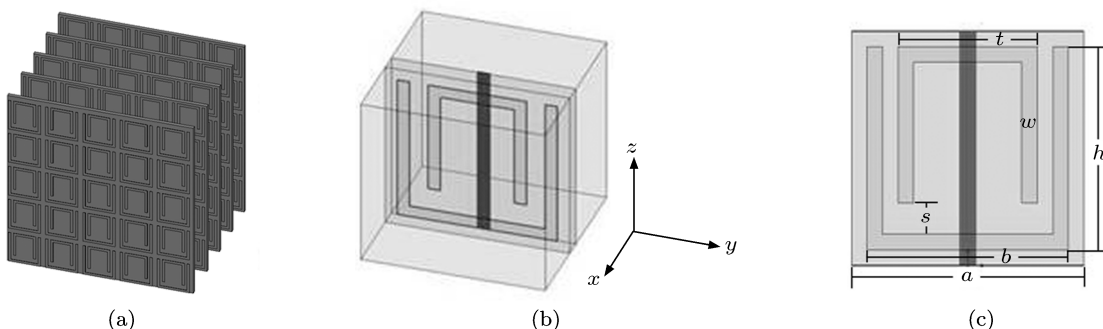


图2 左手材料结构 (a) 周期结构; (b) 单胞结构; (c) 单胞主视图

2.2 左手材料构型的仿真分析

为了验证所构造的结构具有左手特性, 采用高频仿真软件 HFSS 对所构造的结构进行电磁特性分析. 考虑到结构的周期性, 分析模型取为一个单胞 (图 2(b) 所示). 在波传播方向 (y 轴方向) 的两端口施加输入和输出条件, 在垂直于 z 轴的两面施加完美电边界, 垂直于 x 轴的两面施加完美磁边界. 通过高频仿真软件 HFSS 提取 S 参数, 并采用 S 参数反演法^[16] 得到结构的介电常数、磁导率及折射率.

作为例子, 本文将结构的周期单胞取为边长 $a = 3 \text{ mm}$ 的立方体, 其基板为介电常数 $\varepsilon = 4.4$ 的 FR4 板, 厚度为 0.3 mm , 印刷在基板上铜膜的厚度 d 为 0.02 mm . 图 3 给出了特定尺寸 (图 2(c) 中显示的各尺寸参数: 高度 $h = 2.6 \text{ mm}$, 线宽 $w = 0.2 \text{ mm}$ 、小环宽度 $t = 1.6 \text{ mm}$, 大环宽度 $b = 2.6 \text{ mm}$ 及尺寸 $s = 0.4 \text{ mm}$) 条件下的结构的等效介电常数、磁导率和折射率. 当频率 $f <$

定了媒质的介电常数, 其并联谐振频率 $\omega_{sh} = 1/\sqrt{L_L C_R}$. 由 (1) 式知, 当频率 $\omega < \omega_{sh}$ 时, 介电常数 ε 为负值. 串联支路中的电容 C_L 和电感 L_R 决定了媒质的磁导率, 其串联谐振频率 $\omega_{se} = 1/\sqrt{L_R C_L}$. 当频率 $\omega < \omega_{se}$ 时, 磁导率 μ 为负值.

基于上述理论, 只要构造出一种结构能够等效为图 1 所示的传输线模型, 就能在某频段内表现为左手特性. 采用 Rod 来等效图 1 并联支路中的电容和电感; 采用王甲富等^[15] 提出的“巨”字形磁谐振结构来等效图 1 串联支路中的电容和电感. 应用电路板蚀刻技术分别将“巨”形铜环和细铜线印覆在基板的两面, 经过周期性排列形成如图 2 所示的结构.

$f_{EP} = 12.18 \text{ GHz}$ (电等离子体频率) 时, 等效介电常数为负值; 当频率大于谐振频率 ($f_M = 10.15 \text{ GHz}$) 而小于磁等离子体频率 ($f_{MP} = 12.0 \text{ GHz}$) 时, 等效磁导率为负值. 如图 3 所示, 负介电常数频段包含负磁导率频段, 说明在负磁导率频段材料具有双负性质, 该频段内的折射率也为负值. 这说明本文构造的结构在合适的尺寸情况下具有左手特性.

2.3 左手性质的产生机理

本文提出的材料结构可近似等效为图 4 所示的传输线模型. 其中 L_R 为“巨”形环的等效总电感, C_{L1} , C_{L2} 分别为“巨”形环两侧形成的电容, 且 $C_{L1} = C_{L2} = C_L$, C_{s1} , C_{s2} 为小环两侧与大环底边 (距离 s) 形成的电容, 且 $C_{s1} = C_{s2} = C_s$, R 为“巨”形环的等效电阻. C_R , L_L 分别为 Rod 的等效电容和电感, C_g 为基板前后 Rod 与“巨”形环所形成的电容, G 为 Rod 的等效导纳. 图 4 中 L_R , R , C_{L1} , C_{L2} , C_{s1} 及 C_{s2} 的谐振频率 f_M 决定了负磁导

率区域的下限^[17], 即当 $f_M < f < f_{MP}$ 时, $\mu < 0$. f_M 由下式给出:

$$f_M = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R(C_L + C_s)/2}}. \quad (2)$$

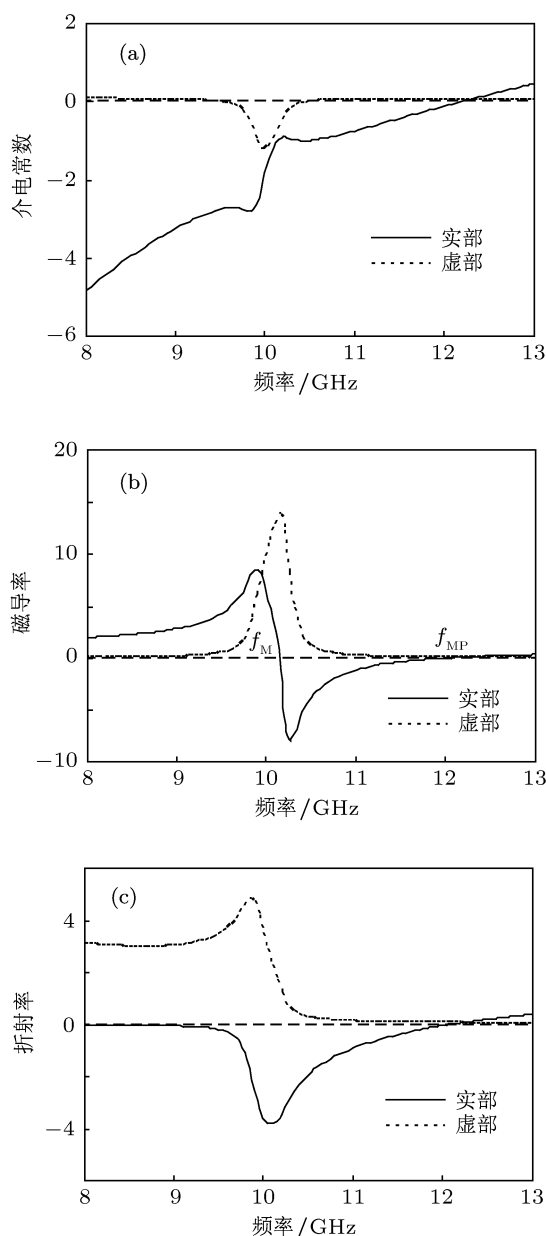


图3 初始值时结构的介电常数、磁导率及折射率曲线
(a) 介电常数曲线; (b) 磁导率曲线; (c) 折射率曲线

在保持 Rod 的尺寸不变的条件下, 结构的左手性质将依赖于“巨”形环的尺寸. 此时, 各电容和电感参数可近似表示为^[18]

$$C_L = \frac{2\varepsilon(h-s-w)d}{b-t-2w},$$

$$C_s = \frac{\varepsilon wd}{s},$$

$$L_R = \mu_0 S_1 / a, \quad (3)$$

其中, S_1 为大环面积, 将 (3) 式带入 (2) 式得:

$$f_M = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{2as(b-t-2w)}{\varepsilon\mu_0 S_1 d [2s(h-s-w) + w(b-t-2w)]}}. \quad (4)$$

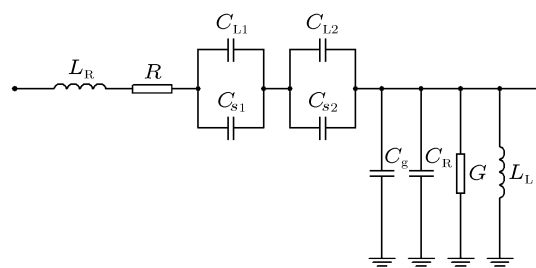


图4 新型左手结构等效传输线模型

3 结构尺寸参数的影响

以上分析知, 改变结构的尺寸可改变传输线模型中元件的性能参数 (电容和电感), 从而引起谐振频率的变化, 相应地影响结构的左手性质. 图5以及表1—表4给出了具有不同尺寸的结构性能.

3.1 线宽的影响

表1列出了当其他尺寸不变时, 线宽 w 的变化对结构左手频段和左手带宽的影响. 由表1知, 随着线宽 w 的增加, 结构的左手频段和左手带宽几乎不变, 线宽对结构的左手频段影响不大. 因此, 在下文的分析中, 线宽取一恒定值 (0.2 mm).

3.2 大环宽度 b 的影响

表2给出了当其他尺寸不变时, 大环宽度 b 的变化对结构左手频段和左手带宽的影响.

由表2可知, 随着大环宽度变大, 左手频段先向高频方向移动, 当大环宽度增大到一定数值时, 左手频段开始向低频方向移动. 其原因如下: 设 $F(b) = \frac{1}{f_M^2}$, 对其求导得

$$F'(b) = c_0 \left[c_3 - \frac{c_1 c_2}{(b - c_1)^2} \right], \quad (5)$$

其中常数 $c_0 = \frac{4\pi^2 \varepsilon \mu_0 d h}{a}$, $c_1 = t + 2w$, $c_2 = h - s - w$, 由 (5) 式知, 在 b 刚开始增大阶段, $F'(b) < 0$, 则 f_M 为递增函数, 随着 b 增大, f_M

增大; 当 b 增大到一定数值时, $F'(b) > 0$, 则 f_M 为 递减函数, 随着 b 增大, f_M 减小.

表1 线宽 w 对结构左手频段的影响

w/mm	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
左手频段/GHz	10.3—12.0	10.2—12.0	10.2—12.0	10.2—11.9	10.2—11.9
左手带宽/GHz	1.7	1.8	1.8	1.8	1.7

表2 大环宽度 b 对结构左手频段的影响

b/mm	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
左手频段/GHz	10.0—11.3	10.2—11.7	10.4—12.0	10.3—12.0	10.2—12.0	9.9—11.7
左手带宽/GHz	1.3	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8

3.3 小环尺寸的影响

图 5 为不同尺寸结构的等效介电常数及磁导率实部曲线. 当其他尺寸不变, s 增大时, 结构的负磁导率区域向高频移动, 如图 5(b) 所示; 当其他尺寸不变, t 增大时, 结构的负磁导率区域向低频移动,

如图 5(d) 所示. 由 (4) 式知, s 增大或 t 增大将导致谐振频率 f_M 增大或减小, 从而使负磁导率区域向高频或低频移动. 图 5(a) 和图 5(c) 表明, 无论 s 和 t 的尺寸如何改变, 结构的负介电常数区域几乎不变, 因为 Rod 的尺寸未变, 即并联谐振频率 f_{sh} 不变. 仿真结果与等效模型的结果相符合.

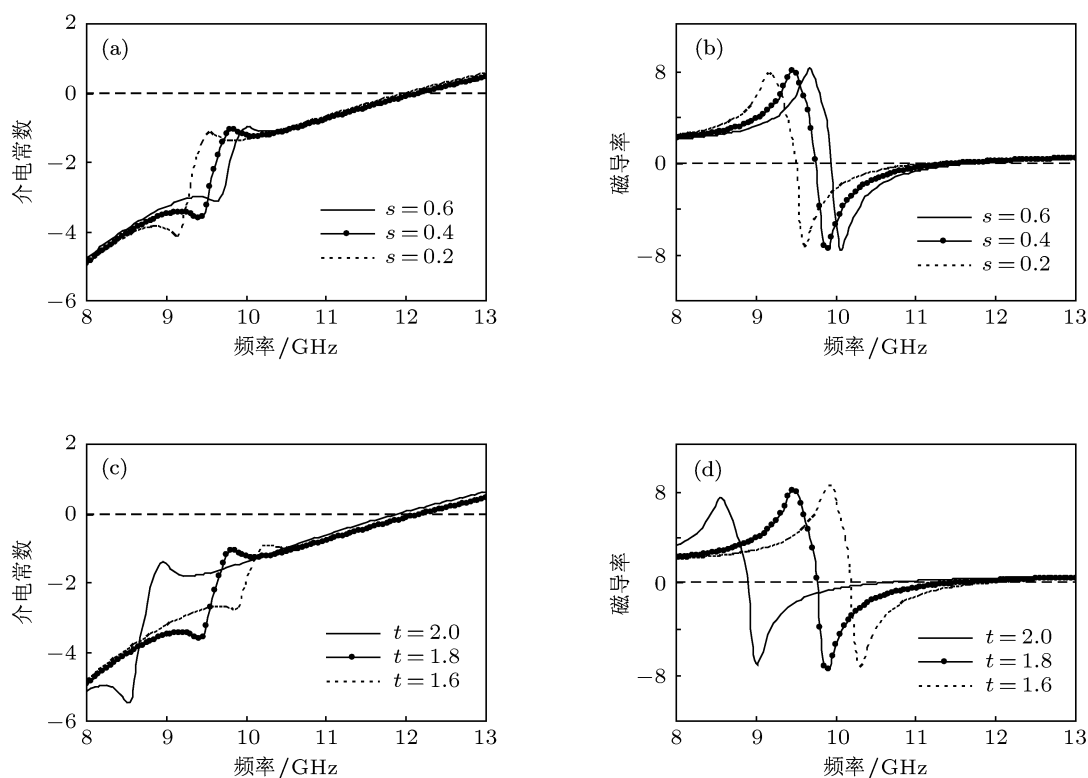


图 5 不同尺寸结构的等效介电常数及磁导率 (a) 当 $t = 1.8 \text{ mm}$, $s = 0.2, 0.4, 0.6 \text{ mm}$ 时结构的等效介电常数; (b) 当 $t = 1.8 \text{ mm}$, $s = 0.2, 0.4, 0.6 \text{ mm}$ 时结构的等效磁导率; (c) 当 $s = 0.4 \text{ mm}$, $t = 1.6, 1.8, 2.0 \text{ mm}$ 时结构的等效介电常数; (d) 当 $s = 0.4 \text{ mm}$, $t = 1.6, 1.8, 2.0 \text{ mm}$ 时结构的等效磁导率

表 3 和表 4 给出了当其他尺寸不变, 小环宽度 t 及尺寸 s 的改变对结构左手频段和左手带宽的影响. 由表 3 可知, 随着 t 的增大, 左手频段向低频

方向移动, 左手带宽随着 t 的增大先逐渐变宽然后又逐渐变窄. 由表 4 可知, 随着 s 的增大, 左手频段向高频方向移动, 左手带宽随着 s 的增大几乎不变.

表 3 小环宽度 t 对结构左手频段的影响

t/mm	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
左手频段/GHz	11.0—12.4	10.8—12.3	10.6—12.2	10.2—12.0	9.9—11.6	8.1—9.7
左手带宽/GHz	1.4	1.5	1.6	1.8	1.7	1.6

表 4 尺寸 s 对结构左手频段的影响

s/mm	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
左手频段/GHz	10.1—11.8	10.2—12.0	10.4—12.1	10.5—12.3	10.6—12.4	10.7—12.5
左手带宽/GHz	1.7	1.8	1.7	1.8	1.8	1.8

4 特定频段左手材料最大带宽、较小损耗设计优化

实际需求往往要求材料表现出左手性质的频率范围(带宽)尽可能的宽; 除此之外, 有时需要在特定的频率范围表现出左手性质, 并且在该频率范围内损耗尽可能小. 目前的相关工作大都是针对一定结构形式的左手材料, 进行左手材料性质的分析, 寻找具有所需要性质的左手材料结构形式方面的研究工作相对较少. 以下讨论特定需求下的左手材料的结构设计优化问题的提法和求解方法.

4.1 优化问题的数学模型

本文的目的是在给定的结构构型条件下, 寻求合适的结构尺寸, 以使结构具有所要求的性能. 因此, 设计变量为描述结构的特征参数. 对于图 2 所示的结构形式, 其几何表述参数包括: 线宽 w , 大环宽度 b , 小环宽度 t , 以及距离 s . 此时设计变量可表示为

$$X = (w, b, t, s)^T. \quad (6)$$

左手特性出现的频率范围可由仿真分析获得的等效介电常数和磁导率随频率的变化关系确定. 对于本文所考虑的结构, 由于包含 Rod 结构的等效负介电常数的频率范围涵盖负磁导率的频段. 因此, 负磁导率的频段宽度可用来描述左手频段宽度(左手带宽). 左手带宽可表示为

$$f_{\text{FL}}(X) = f_{\text{MP}} - f_{\text{M}}, \quad (7)$$

其中磁等离子频率 f_{MP} 和谐振频率 f_{M} 由等效磁

导率与频率变化曲线与零水平线的交点确定(如图 3(b) 所示). 对于最大带宽设计问题, 其设计目标可设定为带宽最大.

实际问题对性能的要求除带宽大外, 对左手频段出现的位置也有要求. 例如, 要求在某特定频率 f_0 附近具有最大的带宽设计. 此时的设计目标是保证左手频段包含指定频率的条件下, 带宽最大. 该项约束可通过以下条件实现:

$$f_{\text{M}} - f_0 \leq 0. \quad (8)$$

如果有进一步的要求, 例如, 要求从某个频率开始出现左手性质, 约束条件可表示成

$$f_{\text{M}} - f_0 = 0. \quad (9)$$

另外, 在实际问题的应用中, 必须考虑左手材料的损耗. 对于本文提出的结构, 损耗主要由图 4 所示的串联支路决定, 对于 RLC 串联谐振电路, 其品质因数为

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (10)$$

品质因数 Q 越大损耗越小. 由 (10) 式知, 为了减小损耗, 则要增大电感或减小电容, 结构中的等效电阻 R 主要由电导率和频率决定. 对此, 设计左手材料时, 结构的材料选择及结构尺寸的设计至关重要. 在结构的左手区域, 可由下式代替品质因数来衡量损耗特性^[19]:

$$Q' = \left| \frac{\text{re}(n)}{\text{im}(n)} \right|. \quad (11)$$

在某特定频率 f_0 附近具有最大的带宽的同时, 还要求在该特定频率附近具有较小的损耗. 对损耗

的要求可通过使品质因数 $Q'(f_0)$ 大于或等于某一要求的数值 Q'_0 实现. 此时, 该项约束可表示为

$$Q'(f_0) - Q'_0 \geq 0. \quad (12)$$

综上, 对于特定频段的左手材料最大带宽设计问题, 可通过以下两种提法实现.

提法 1 在谐振频率小于等于给定频率以及品质因数大于等于设定值的条件下, 通过设计结构的尺寸参数, 以使出现左手性质的频段宽度最大. 此时, 优化问题可表示为

$$\begin{aligned} \text{Find : } X &= (w, b, t, s), \\ \text{Max : } f_{\text{FL}}(X) &= f_{\text{MP}}(X) - f_{\text{M}}(X), \\ \text{s.t : } f_{\text{M}} - f_0 &\leq 0, \\ Q'(f_0) - Q'_0 &\geq 0. \end{aligned} \quad (13)$$

提法 2 在磁谐振频率等于给定频率以及品质因数大于等于设定值的条件下, 通过设计结构的尺寸参数, 以使出现左手性质的频段宽度最大. 此时, 优化问题为上式中第一约束条件取等号.

通过采用优化技术求解 (13) 式描述的优化问题, 可获得特定频段左手材料的最大带宽、较小损耗设计.

4.2 设计实例

作为特定频段左手材料设计的例子, 我们以图 2 给出的结构形式为背景, 通过调整结构的尺寸, 以使结构在 10 GHz 附近品质因数 Q'_0 不小于 9 的条件下表现出左手性质, 并且使左手带宽最大. 根据前文分析知, 小环宽度与大环宽度对左手性质的影响最大. 因此, 本算例中仅设计尺寸参数 t 和 b . 在线宽 w 和距离 s 分别为 0.2 mm 和 0.4 mm 的情况下, 求解优化问题 (13), 获得使左手频段最宽、损耗较小的尺寸参数 b 和 t . 求解过程中, 初始设计取为: $X_0 = 0.2 \text{ mm}, 2.6 \text{ mm}, 1.6 \text{ mm}, 0.4 \text{ mm}$, $Q'_0 = 9$, 此时对应的带宽范围为 10.15—12.00 GHz, 带宽宽度为 1.85 GHz, $Q'(10) = 1.02$, 但初始设计的左手频段不包含所要求的频率 10 GHz, 且 $Q'(10) < 9$, 是一个不可行解. 优化获得的最优设计为 $X = 0.20 \text{ mm}, 2.80 \text{ mm}, 1.80 \text{ mm}, 0.40 \text{ mm}$, 此时对应的带宽为 $f_{\text{FL}}(X) = 2.07 \text{ GHz}$, $Q'(10) = 9.40$.

优化后结构的等效介电常数、磁导率、折射率如图 6 所示; 品质因数 Q' 曲线如图 7 所示. 该结构从 8.99 GHz 开始表现为左手特性, 左手频段为 8.99—11.06 GHz, 该频段内介电常数、磁导率、折射率均为负值, 且 $Q'(10) = 9.40$. 说明通过优化, 可以从一非可行解得到一个可行解.

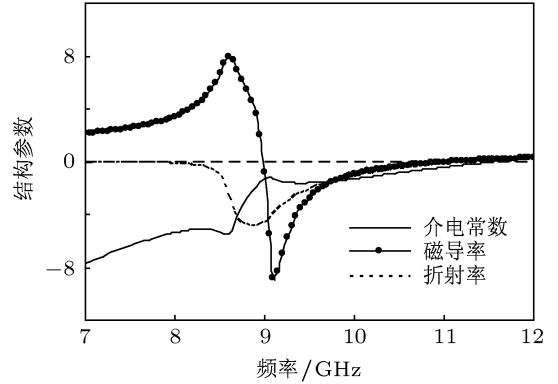


图 6 优化后结构的介电常数、磁导率及折射率实部曲线

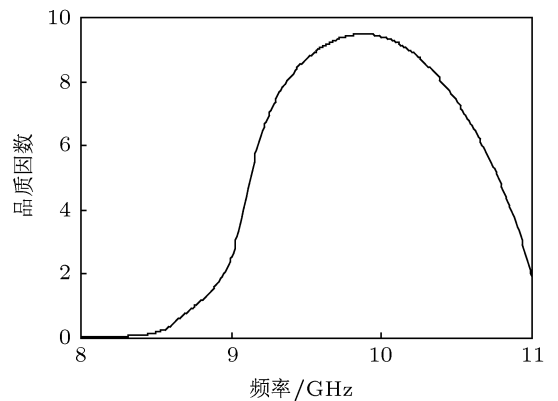


图 7 品质因数 Q' 曲线

5 结论

本文基于传输线理论构造了以“巨”字形谐振器与 Rod 组合的左手材料, 并建立了在特定频段具有最大带宽和较小损耗的左手材料构型设计的优化问题的模型. 数值模拟仿真和等效传输线模型的定性分析表明, 所构造的结构在特定的尺寸参数条件下具有左手性质; 采用所建立的优化模型, 可以获得给定频率的左手材料最大带宽、较小损耗设计. 所建立的优化设计方法对特定频段要求的左手材料设计具有重要的指导意义.

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [3] Seddon N, Bearpark T 2003 *Science* **302** 1537
- [4] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [5] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [6] Tang M C, Xiao S Q, Guan J, Bai Y Y, Gao S S, Wang B Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 074214
- [7] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [8] Sun M Z, Zhang C M, Song X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5444 (in Chinese) [孙明昭, 张淳民, 宋晓平 2010 物理学报 **59** 5444]
- [9] Zhang H X, Bao Y F, Lü Y H, Chen T M, Wang H X 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1645
- [10] Guo Y S, Zhang X F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8584 (in Chinese) [郭云胜, 张雪峰 2010 物理学报 **59** 8584]
- [11] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5883 (in Chinese) [刘亚红, 罗春荣, 赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5883]
- [12] Chen C H, Qu S B, Wang J F, Ma H, Wang X H, Xu Z 2011 *Chin. Phys. B* **20** 034101
- [13] Eleftheriades G V, Siddiqui O, Iyer A K 2003 *IEEE Microw. Wireless Components Lett.* **13** 51
- [14] Gao R J, Shi P F, Liu S T, Duan Y P, Tang Z A 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8566 (in Chinese) [高仁璟, 史鹏飞, 刘书田, 段玉平, 唐祯安 2010 物理学报 **59** 8566]
- [15] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Ma H, Yang Y M, Gu C 2008 *J. Air Force Eng. Univ.* **9** 79 (in Chinese) [王甲富, 屈绍波, 徐卓, 马华, 杨一鸣, 顾超 2008 空军工程大学学报 **9** 79]
- [16] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [17] Cui W Z, Ma W, Qiu L D, Zhang H T 2008 *Electromagnetic Metamaterials and its Applications* (Vol. 1) (Beijing: National Defense Industry Press) p58 (in Chinese) [崔万照, 马伟, 邱乐德, 张洪太 2008 电磁超介质及其应用 (第一版) (北京: 国防工业出版社) 第 58 页]
- [18] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 024915
- [19] Zhou J F 2008 *Ph. D. Dissertation* (Ames: Iowa State University)

Design and optimization of left-handed materials with specific frequency bands*

Gao Ren-Jing¹⁾²⁾ Wang Guo-Ming²⁾ Liu Shu-Tian^{1)†} Tang Zhen-An²⁾

1) (Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

2) (Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(Received 4 March 2011; revised manuscript received 30 May 2011)

Abstract

In this paper, a design optimization method for left-handed materials with specific frequency bands is proposed. A microstructure of the left-handed material is constructed based on the transmission line theory, and the properties of this material are simulated numerically with the *S*-parameter retrieval method and analyzed with equivalent transmission line model. The effects of the size parameters of the microstructure on the left-handed characters are analyzed. The analysis results verify that this structure does exhibit left-handed characteristics with appropriately sized microstructure. Then the mathematical model of the microstructure with maximized frequency band-width and lower loss at given frequencies is proposed, and examples are given. The design result confirms that the optimized model is applicable and accurate.

Keywords: left-handed materials, microstructure design, transmission line theory, design optimization

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf, 84.40.Az

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB610304) and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No.20090041110023).

† E-mail: stliu@dlut.edu.cn