

二维椭圆形散射转移斗篷的设计研究*

王战 罗孝阳 刘锦景 董建峰†

(宁波大学光纤通信与网络技术研究所, 宁波 315211)

(2012年5月15日收到; 2012年6月25日收到修改稿)

基于变换光学理论设计了椭圆形散射转移斗篷, 并推导了相应的本构参数张量表达式, 根据得到的本构参数, 利用基于有限元算法的软件分别对椭圆形介质柱、导体柱进行了全波仿真验证. 仿真结果证实了所得本构参数的正确性, 验证了散射转移斗篷可以模拟任意物体, 包括介质、导体的幻象, 这些结果为设计隐身斗篷提供了一种新的理论途径.

关键词: 变换光学, 椭圆形散射转移斗篷, 本构参数张量, 全波仿真

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.62.024101

1 引言

近年来, 利用变换光学的方法控制电磁波的传播方向引起了人们广泛的研究兴趣. 2006年 Pendry 等^[1]基于 Maxwell 方程在不同坐标系下形式的不变性原理提出了控制电磁场理论, 给出了设计隐身斗篷的方法, 并通过理论证明利用异向介质能够灵活地控制电磁波的传播方向, 从而导致利用电磁场的方法不能探测到斗篷内部物体的存在. 随后, Schurig 等^[2]在实验上证明了在微波段利用异向介质能够实现隐身. 此后, 利用变换光学的方法设计了很多具有特殊功能的变换光学器件, 例如电磁聚焦器^[3,4]、电磁旋转器^[5]、超棱镜^[6]、超散射体^[7]、超吸收体^[8]、电磁黑洞^[9]等, 其中最典型的应用是电磁隐身斗篷^[10–24].

电磁隐身斗篷是基于坐标变换的方法, 利用异向介质灵活地控制电磁波在斗篷中的传播路径, 从而使电磁波平滑地绕过隐身区域, 达到对外界隐身的目的. Pendry 基于变换光学的方法给出了圆柱形和球形隐身斗篷的电磁参数, 此后, 人们对电磁隐身斗篷进行了广泛的研究, 包括椭圆形隐身斗篷^[10]、任意多面体隐身斗

篷^[11]、非磁性隐身斗篷^[12,13]、外隐身斗篷^[14–18]、多区域隐身斗篷^[19]等. 所有的这些隐身斗篷都能够引导入射的电磁波平滑地绕过被隐身的物体而不会产生散射, 从而达到隐身的目的. 2009年, Lai 等^[20]利用折叠变换和互补媒质理论提出了幻觉光学的概念, 即利用折叠变换和互补媒质光学相消原来的空间, 原空间中的物体通过互补媒质中的“反物体”相消, 从而达到外部隐身, 实现光学相消以后在原来的基础上建立另外一个散射目标, 就可以达到“光学幻觉”, 也达到了对原物体隐身的目的. 2010年, Li 等^[21]研究了一种散射移动斗篷, 即把隐身目标的散射移位, 从而达到隐身. 最近 Luo 等^[22]研究了一种散射转移斗篷, 这种斗篷既不是为了提供完美隐身, 也不是为了减小物体的散射, 而是完全改变物体的散射模式, 即当电磁波入射到斗篷上时, 产生的散射完全等效于另外一个设定物体的散射, 这样就产生了电磁欺骗, 从广义上讲散射转移斗篷也起到了隐身的目的.

利用折叠变换和互补媒质建立的“幻觉光学”中, 被隐身的物体不能是导体、吸收体以及必须为被隐身的物体定制“反物体”. 在散射转移斗篷中, 被模拟的散射物体可以是导体、介质、甚至是吸收体, 而且不必为该物体定制“反物体”. 因此, 对散

* 国家自然科学基金(批准号: 61078060)、浙江省自然科学基金(批准号: Y1091139)、宁波市创新团队(批准号: 2009B21007)和宁波大学王宽诚幸福基金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: dongjianfeng@nbu.edu.cn

射转移斗篷的应用研究有很大的意义. Luo 等人给出了模拟圆柱以及任意导体线的散射转移斗篷. 对模拟椭圆的散射转移斗篷的研究目前还没有报道, 本文研究了椭圆形散射转移斗篷, 推导了相应的本构参数张量表达式, 根据得到的本构参数, 利用基于有限元算法的软件分别对椭圆形介质、导体柱进行了全波仿真验证. 仿真结果证实了所得本构参数的正确性, 验证了散射转移斗篷可以模拟任意物体, 包括介质、导体、吸波物体的幻象, 这些结果为设计隐身斗篷提供了一种新的理论途径.

2 椭圆形散射转移斗篷设计原理及本构参数的计算

散射转移斗篷不是减小被隐身物体的散射, 而

是完全改变物体的散射模式, 使斗篷的散射模式等效于另外任意物体的散射. 散射转移斗篷有两个变换区域, 首先, 利用变换光学理论将幻觉物体变换到散射转移斗篷的内壳; 然后将幻觉物体的外部空间变换到散射转移斗篷的外壳. 其中, 内层变换媒质体现了幻觉物体的信息, 外层变换媒质是保持空间一致. 任意物体可以是介质、导体, 甚至是吸波物体.

2.1 椭圆形散射转移斗篷设计原理

本文首先以模拟介质物体的散射为例研究椭圆形散射转移斗篷, 为了简单化, 只考虑二维的情况, 以图 1 所示的模型介绍散射转移斗篷的设计原理.

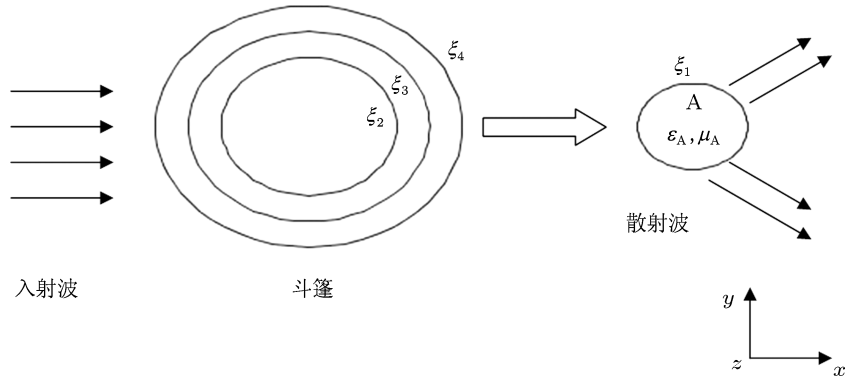


图 1 椭圆散射转移斗篷模型

首先, 通过坐标变换将幻觉物体 A 压缩到斗篷的内壳中, 其内外边界分别为 ξ_2, ξ_3 . 坐标变换可一般性地表示为

$$\xi' = f_{\text{inner}}(\xi, \eta, z), \quad \eta' = \eta, \quad z' = z, \quad (1)$$

对应的边界条件为

$$\begin{aligned} \xi'|_{\xi_2} &= f_{\text{inner}}(\xi, \eta, z)|_{\xi=0}, \\ \xi'|_{\xi_3} &= f_{\text{inner}}(\xi, \eta, z)|_{\xi=\xi_1}, \end{aligned} \quad (2)$$

其次, 为了保持变换后前后空间一致, 幻觉物体的外部空间设为 $\xi_1 < \xi < \xi_{\text{out}}$, 变换到斗篷外壳中, 其内外边界分别为 ξ_3, ξ_4 . 其坐标变换可一般性的表示为

$$\xi' = f_{\text{outer}}(\xi, \eta, z), \quad \eta' = \eta, \quad z' = z, \quad (3)$$

对应的边界条件为

$$\begin{aligned} \xi'|_{\xi_3} &= f_{\text{outer}}(\xi, \eta, z)|_{\xi=\xi_1}, \\ \xi'|_{\xi_4} &= f_{\text{outer}}(\xi, \eta, z)|_{\xi=\xi_{\text{out}}}. \end{aligned} \quad (4)$$

当幻觉物体的外部空间为 $\xi_{\text{out}} < \xi < \xi_1$ 时, 意味着幻觉物体 A 比所设计的斗篷尺寸大, 此时对应的空间变换是折叠变换, 以上的分析依然适用, 为了保持空间阻抗匹配, $\xi_{\text{out}} = \xi_4$.

通过变换光学理论可知, 变换后空间的本构参数可由下式计算得到

$$\begin{aligned} \epsilon' &= \Lambda \epsilon \Lambda^T / \det(\Lambda), \\ \mu' &= \Lambda \mu \Lambda^T / \det(\Lambda), \end{aligned} \quad (5)$$

其中, Λ 为 Jacobian 变换矩阵. 因此, 斗篷内壳的变

换媒质参数可表示为

$$\begin{aligned}\varepsilon' &= \frac{\Lambda \varepsilon_A \Lambda^T}{\det(\Lambda)}, \\ \mu' &= \frac{\Lambda \mu_A \Lambda^T}{\det(\Lambda)},\end{aligned}\quad (6)$$

其中, Λ 是由 (2) 式计算得到的 Jacobian 矩阵.

由于自由空间中的介电常数 ε 和磁导率 μ 均为 1, 因此, 斗篷外壳的变换媒质参数可表示为

$$\varepsilon' = \mu' = \frac{\Lambda \Lambda^T}{\det(\Lambda)}, \quad (7)$$

其中, Λ 是由 (4) 式计算得到的 Jacobian 矩阵. 内层的变换媒质体现了幻觉物体的信息, 外层变换媒质用于空间匹配.

2.2 椭圆形散射转移斗篷本构参数计算

在自由空间中, 椭圆形截面散射转移斗篷如图 1 所示, 图中 ξ_1 边界、 ξ_2 边界、 ξ_3 边界、 ξ_4 边界对应的椭圆的 x 轴长度设为 a, b, c, d , 对应的 y 轴长度设为 ka, kb, kc, kd , 其中 k 为椭圆的轴比. 用沿着 y 轴的径直比 k 来度量整个平面, 在 $y = ky_k, x = x_k$ 表示的 k 刻度坐标系下, 椭圆截面就变成了圆形截面; 最后沿着 y 轴求逆, $y' = (1/k)y'_k, x' = x'_k$, 将 k 刻度坐标还原为直角坐标系, 就可以将圆形截面还原为椭圆形截面.

在 k 刻度坐标系下, 斗篷内壳变换的边界条件为 (2) 式, 相应的空间变换关系为 $(0 \leq r \leq a) \rightarrow (b \leq r \leq c)$, 坐标变换选择为

$$r' = \frac{c-b}{a}r + b, \quad (8)$$

坐标变换的 Jacobian 矩阵可表示为

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \frac{r' \sin^2 \theta + rg \cos^2 \theta}{r} & \frac{(rg - r') \sin \theta \cos \theta}{kr} & 0 \\ \frac{k(rg - r') \sin \theta \cos \theta}{r} & \frac{rg \sin^2 \theta - r' \cos^2 \theta}{r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中 $g = (c - b)/a$, $\theta = \arctan(y/kx)$, $r = \sqrt{x^2 + (y/k)^2}$, $r' = \sqrt{x'^2 + (y'/k)^2}$.

椭圆形幻觉物体 A 的材料参数表达式设为

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix},$$

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & 0 \\ \mu_{xy} & \mu_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

将 (9), (10) 两式代入到 (6) 式, 得到斗篷内壳的材料参数:

$$\begin{aligned}\varepsilon'_{xx} &= [(16bk^2r' \cos^2 \theta' - 8k^2r'^2 \\ &\quad - 8b^2k^2 \cos^4 \theta') \cdot \varepsilon_{xx} \\ &\quad + 8bk \sin 2\theta' (r' - b \cos^2 \theta') \cdot \varepsilon_{xy}, \\ &\quad - 2b^2 \sin^2 2\theta' \cdot \varepsilon_{yy}] \\ &\quad \times (8bk^2r' - 8k^2r'^2)^{-1},\end{aligned}\quad (11a)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon'_{xy} &= [4bk^2 \sin 2\theta' (r' - b \cos^2 \theta') \cdot \varepsilon_{xx} \\ &\quad + (8bkr' - 8kr'^2 - 4b^2k \sin^2 2\theta') \cdot \varepsilon_{xy} \\ &\quad + 4b \sin 2\theta' (r' - b \sin^2 \theta') \cdot \varepsilon_{yy}] \\ &\quad \times (8bkr' - 8kr'^2)^{-1},\end{aligned}\quad (11b)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon'_{yy} &= [-2b^2k^2 \sin^2 2\theta' \cdot \varepsilon_{xx} \\ &\quad + 8bk \sin 2\theta' (r' + b \sin^2 \theta') \cdot \varepsilon_{xy} \\ &\quad + (16br' \sin^2 \theta' - 8r'^2 - 8b^2 \sin^4 \theta') \cdot \varepsilon_{yy}] \\ &\quad \times (8br' - 8r'^2)^{-1},\end{aligned}\quad (11c)$$

$$\varepsilon'_{zz} = (r' - b) \cdot \varepsilon_{zz} \times (r'g^2)^{-1}, \quad (11d)$$

$$\begin{aligned}\mu'_{xx} &= [(16bk^2r' \cos^2 \theta' - 8k^2r'^2 \\ &\quad - 8b^2k^2 \cos^4 \theta') \cdot \mu_{xx} \\ &\quad + 8bk \sin 2\theta' (r' - b \cos^2 \theta') \cdot \mu_{xy} \\ &\quad - 2b^2 \sin^2 2\theta' \cdot \mu_{yy}] \\ &\quad \times (8bk^2r' - 8k^2r'^2)^{-1},\end{aligned}\quad (12a)$$

$$\begin{aligned}\mu'_{xy} &= [4bk^2 \sin 2\theta' (r' - b \cos^2 \theta') \cdot \mu_{xx} \\ &\quad + (8bkr' - 8kr'^2 - 4b^2k \sin^2 2\theta') \cdot \mu_{xy} \\ &\quad + 4b \sin 2\theta' (r' - b \sin^2 \theta') \cdot \mu_{yy}] \\ &\quad \times (8bkr' - 8kr'^2)^{-1},\end{aligned}\quad (12b)$$

$$\begin{aligned}\mu'_{yy} &= [-2b^2k^2 \sin^2 2\theta' \cdot \mu_{xx} \\ &\quad + 8bk \sin 2\theta' (r' + b \sin^2 \theta') \cdot \mu_{xy} \\ &\quad + (16br' \sin^2 \theta' - 8r'^2 - 8b^2 \sin^4 \theta') \cdot \mu_{yy}] \\ &\quad \times (8br' - 8r'^2)^{-1},\end{aligned}\quad (12c)$$

$$\mu'_{zz} = (r' - b) \cdot \mu_{zz} \times (r'g^2)^{-1}, \quad (12d)$$

其中, $\theta' = \arctan(y'/kx')$.

斗篷外壳的坐标变换的边界条件为 (4) 式, 对应的空间映射为 $(a \leq r \leq d) \rightarrow (c \leq r \leq d)$, 坐标变

换选择为

$$r' = \frac{d-c}{d-a}(r-a) + c. \quad (13)$$

将 (13) 式代入到 (7) 式, 得到本构关系参数为

$$\begin{aligned} \epsilon'_{xx} = \mu'_{xx} = & \left[k^2 r'^2 - 2ck^2 r' \cos^2 \theta' + 2afk^2 r' \cos^2 \theta' \right. \\ & \left. + (af-c)^2 (k^2 \cos^4 \theta' + \cos^2 \theta' \sin^2 \theta') \right] \\ & \times \left[k^2 r'^2 (af-c+r') \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\begin{aligned} \epsilon'_{xy} = \mu'_{xy} = & \cos \theta' \sin \theta' (af-c) \\ & \times [r' + r'k^2 + (af-c)(\sin^2 \theta' + k^2 \cos^2 \theta')] \\ & \times [kr'(af-c+r')]^{-1}, \end{aligned} \quad (14b)$$

$$\begin{aligned} \epsilon'_{yy} = \mu'_{yy} = & [(af-c)^2 (k^2 \cos^2 \theta' \sin^2 \theta' + \sin^4 \theta') \\ & + 2afr' \sin^2 \theta' - 2cr' \sin^2 \theta' + r'^2] \end{aligned}$$

$$\times [r'(af-c+r')]^{-1}, \quad (14c)$$

$$\epsilon'_{yy} = \mu'_{yy} = (af-c+r') \times (r'f^2)^{-1}, \quad (14d)$$

$$\text{其中 } f = \frac{d-c}{d-a}.$$

3 仿真验证与讨论

上一节给出了椭圆形散射转移斗篷的设计原理以及本构参数张量, 为了验证结果的正确性, 利用基于有限元算法软件, 进一步验证所得本构关系的正确性. 分别取 $a = 0.08 \text{ m}$, $b = 0.12 \text{ m}$, $c = 0.16 \text{ m}$, $d = 0.2 \text{ m}$, $k = 0.6$, 入射波为 TM 波, 频率为 3.2 GHz . 入射波从左至右分别入射到物体和斗篷上. 首先对均匀各向同性的椭圆柱介质进行模拟, 仿真结果如图 2 所示.

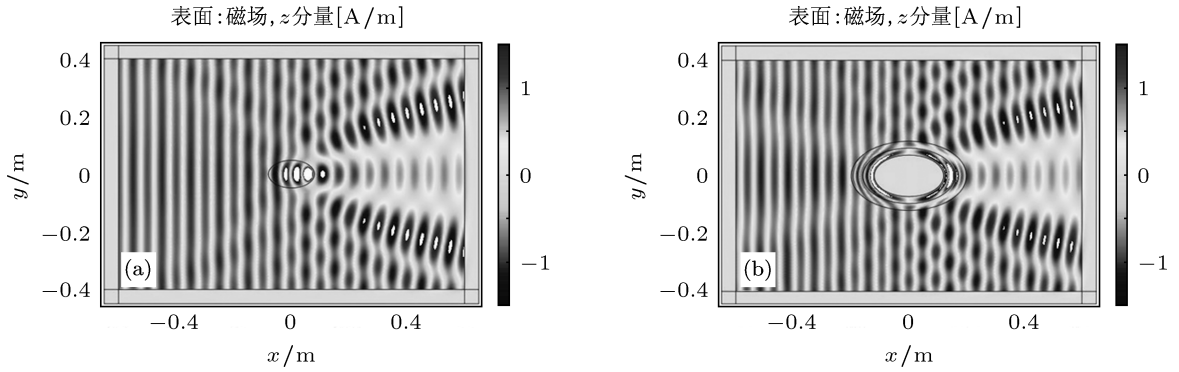


图 2 各向同性介质与散射转移斗篷的磁场分布 (a) 材料参数为 ($\epsilon = 2, \mu = 1$) 的各向同性均匀椭圆形介质柱磁场分布; (b) 入射到对应散射转移斗篷时的磁场分布

从图 2(a), (b) 中可以看到斗篷的磁场分布与幻觉物体的磁场分布相同, 表明散射转移斗篷模拟了椭圆形介质, 即从外界观察斗篷与观察椭圆形介质的效果是一样的. 下面从不同的方向观察斗篷的模拟效果, 同样是模拟均匀各向同性椭圆形介质, 得到的仿真结果如图 3.

从图 3 的仿真结果看出, 对于入射波从 y 轴正方向和 45° 方向入射到物体和斗篷上, 物体的磁场分布都与斗篷的磁场分布相同, 这表明斗篷模拟出了介质的幻象.

为了进一步验证所推导的本构参数的正确性, 下面对各向异性介质进行模拟. 仅考虑电磁波从左向右入射的情况, 仿真结果如图 4 所示.

从图中可以看出散射转移斗篷的磁场分布与要模拟的各向异性椭圆形介质的磁场分布相同. 从而进一步验证了所推导的椭圆形散射转移斗篷

本构参数的正确性.

上文提到的利用折叠变换和互补媒质建立的“幻觉光学”中, 被隐身的物体不能是导体、吸收体以及必须为被隐身的物体定制“反物体”. 在散射转移斗篷中, 被模拟的散射物体可以是导体、介质、甚至是吸收体, 而且不必为该物体定制“反物体”. 对于导体而言, 由于导体的集肤深度非常小, 电磁波只能在导体表面被反射, 这时就不需要用 (1), (2), (6) 式做导体的幻觉映射, 只需要用一个很薄的导体层作为斗篷内壳来反射电磁波即可, 而变换媒质外壳仍然用 (3), (4), (7) 式来设计. 如果导体内壳用完美电导体 (PEC)/完美磁导体 (PMC) 边界条件来简化代替的话, 这时只需要通过坐标变换 (3), (4) 式将幻觉导体的边界映射到斗篷的边界即可. 图 5 给出了模拟导体的散射转移斗篷的仿真结果.

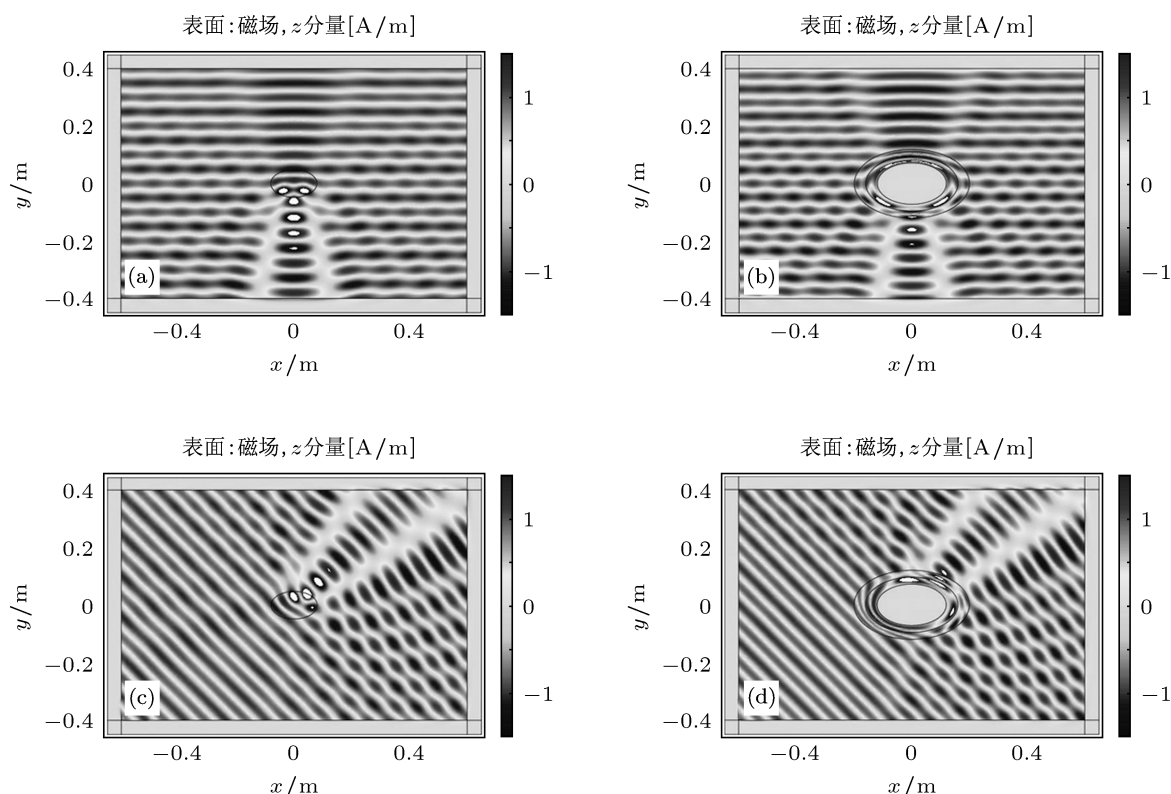


图3 不同入射方向上各向同性介质与散射转移斗篷的磁场分布 (a) 从 y 轴正方向入射到材料参数为 $(\epsilon = 2, \mu = 1)$ 的各向同性均匀椭圆形介质柱的磁场分布; (b) 从 y 轴正方向入射到对应散射转移斗篷时的磁场分布; (c) 从 45° 入射到材料参数为 $(\epsilon = 2, \mu = 1)$ 的各向同性均匀椭圆形介质柱的磁场分布; (d) 从 45° 入射到对应散射转移斗篷时的磁场分布

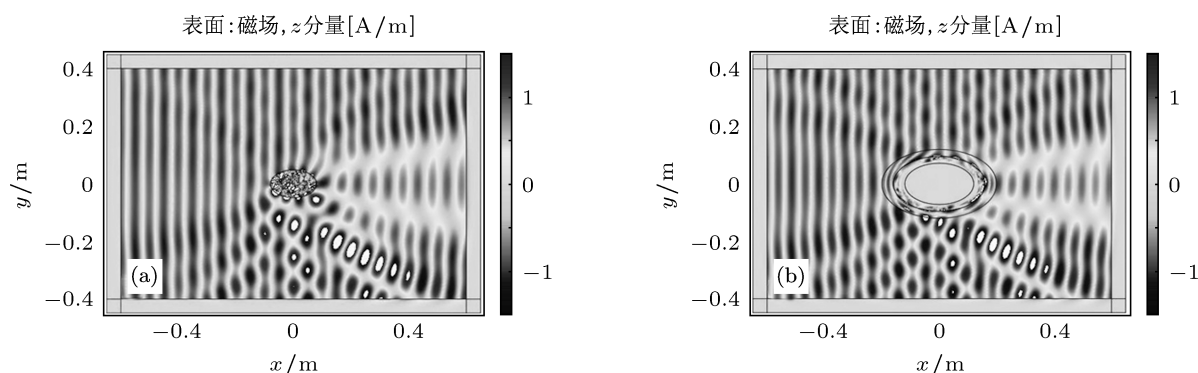


图4 各向异性介质与散射转移斗篷的磁场分布 (a) 材料参数为 $(1, 5, 0; 5, 4, 0; 0, 0, 2)$ 的均匀各向异性的椭圆形介质柱的磁场分布; (b) 入射到对应散射转移斗篷时的磁场分布

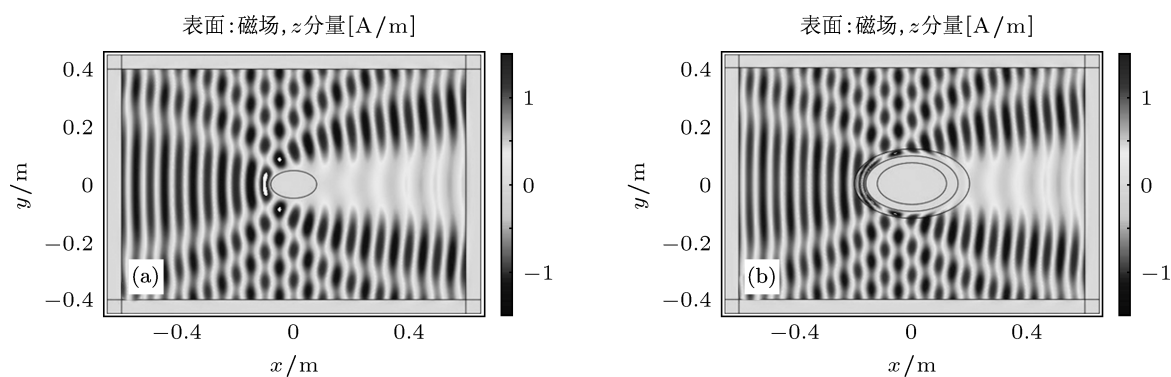


图5 导体与散射转移斗篷的磁场分布 (a) 椭圆形导体的磁场分布; (b) 导体散射转移斗篷的磁场分布

从图中可以看出散射转移斗篷的磁场分布与要模拟的椭圆形导体的磁场分布分布相同,从而验证了椭圆形散射转移斗篷能够模拟导体的散射特征.

以上的仿真结果验证了本文所设计的椭圆形散射转移斗篷及所推导的本构参数的正确性,值得注意的是位于椭圆形散射转移斗篷内部的物体可以是任意物体.

4 结 论

本文利用变换光学理论设计了一种椭圆形散射转移斗篷,得到了二维椭圆形散射转移斗篷的本

构参数的张量表达式,并利用基于有限元算法的软件对所推导的结果进行全波仿真验证.首先,用所设计的椭圆形散射转移斗篷对均匀各向同性椭圆形介质柱进行了仿真验证,得到的仿真结果表明散射转移斗篷能够很好的模拟出幻觉物体的信息,然后又对各向异性介质椭圆形介质柱进行了模拟,仿真结果验证了所得本构参数张量的正确性,最后又用斗篷模拟了椭圆形金属导体的散射模式,验证了散射转移斗篷不仅可以模拟介质的散射模式,也可以模拟金属导体,甚至是吸收体的散射模式.本文所设计的椭圆形散射转移斗篷为幻觉光学斗篷以及利用异向介质实现电磁隐身提供了一种新的理论途径.

-
- [1] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
 - [2] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
 - [3] Rahm M, Cummer S A, Schurig D, Pendry J B, Smith D R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 063903
 - [4] Yang J J, Huang M, Yang C F, Xiao Z, Peng J H 2009 *Opt. Express* **17** 19656
 - [5] Chen H Y, Chan C T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 241105
 - [6] Yan M, Yan W, Qiu M 2008 *Phys. Rev. B* **78** 125113
 - [7] Yang T, Chen H Y, Luo X D, Ma H R 2008 *Opt. Express* **16** 18545
 - [8] Ng J, Chen H Y, Chan C T 2009 *Opt. Lett.* **34** 644
 - [9] Greenleaf A, Kurylev Y, Lassas M, Uhlmann G 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 183901
 - [10] Nicolet A, Zolla F, Guenneau S 2008 *IEEE Trans. M* **44** 1150
 - [11] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Liu J, Gu W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 027801 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 刘嘉, 顾巍 2011 物理学报 **60** 027801]
 - [12] Huang L J, Zhou D M, Wang J, Li Z F, Chen X S, Lu W 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 922
 - [13] Huang L J, Zhou D M, Wang J, Li Z F, Chen X S, Lu W 2011 *Opt. Comm.* **284** 5523
 - [14] Lai Y, Chen H Y, Zhang Z Q, Chan C T 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 093901
 - [15] Han T C, Tang X H, Xiao F 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 235403
 - [16] Yang C F, Yang J J, Huang M, Xiao Z, Peng J H 2011 *Opt. Express* **19** 1147
 - [17] Li T H, Huang M, Yang J J, Yao Y P, Yu J 2011 *Opt. Mat. Express* **1** 911
 - [18] Han T C, Qiu C W, Tang X H 2010 *Opt. Lett.* **35** 2642
 - [19] Luo Y, Zhu S Z, He L X, Wang Y 2011 *J. Opt.* **13** 015105
 - [20] Lai Y, Ng J, Chen H Y, Han D Z, Xiao J J, Zhang Z Q, Chan C T 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 253902
 - [21] Li W, Guan J G, Wang W, Sun Z G, Fu Z Y 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 245102
 - [22] Luo Y, He L X, Wang Y, Chan H L W, Zhu S Z 2011 *Phys. Rev. A* **83** 043809
 - [23] Wu Q, Zhang K, Meng F Y, Li L W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1619 (in Chinese) [吴群, 张狂, 孟繁义, 李乐伟 2009 物理学报 **58** 1619]
 - [24] Wu Q, Zhang K, Meng F Y, Li L W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6071 (in Chinese) [吴群, 张狂, 孟繁义, 李乐伟 2010 物理学报 **59** 6071]

Design and study of the two-dimensional elliptical scattering-shifting cloak^{*}

Wang Zhan Luo Xiao-Yang Liu Jin-Jing Dong Jian-Feng[†]

(*Institute of Optical Fiber Communication and Network Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China*)

(Received 15 May 2012; revised manuscript received 25 June 2012)

Abstract

Based on transformation optics theory, an elliptical scattering-shifting cloak is designed and the constitutive parameter tensor expressions are derived. Then full-wave simulations to mimic the elliptical dielectric and conductor cylinder are obtained by using finite-element software. The results of full-wave simulations validate the constitutive parameter tensors we derived and verify that the scattering-shifting cloak can imitate any object including dielectric and conductor: these results provide a new theoretical approach to design cloaks.

Keywords: transformation optics, elliptical scattering-shifting cloak, constitutive parameter tensor, full-wave simulation

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.62.024101

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61078060), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. Y1091139), the Innovative Research Team Program of Ningbo, China (Grant No. 2009B21007), and the K.C. Wong Magna Fund in Ningbo University, China.

[†] Corresponding author. E-mail: dongjianfeng@nbu.edu.cn