

一种无奇异参数椭圆柱形电磁隐身斗篷的设计 基础理论

刘冶, 李竹影, 赵林, 俞翔, 曹文康
(海军工程大学, 武汉 430033)

摘要: **目的** 研究无奇异参数的椭圆柱形超材料电磁隐身斗篷的设计方法。**方法** 应用变换光学原理建立空间变换坐标表达式, 推导出该斗篷的电磁参数张量, 再采用 Matlab 软件验证所推导张量的无奇异性, 最后采用有限元仿真软件验证该斗篷的电磁隐身性能。**结果** 椭圆柱形斗篷具备良好的电磁隐身性能, 并且其电磁参数张量的各个分量均无奇异性。**结论** 设计出的空间坐标变换方式能够从理论上实现无奇异参数的超材料电磁隐身斗篷, 这种方法也拓展了变换光学原理在超材料隐身装置设计方面的应用。

关键词: 超材料; 坐标变换; 隐身斗篷; 无奇异性

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.01.002

中图分类号: TJ99; O441.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)01-0006-04

A Design Fundamental Theory of Elliptic Cylindrical Invisible Cloak with Non-singular Electromagnetic Tensors

LIU Ye, LI Zhu-ying, ZHAO Lin, YU Xiang, CAO Wen-kang
(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the design methods of elliptic cylindrical invisible cloak with non-singular electromagnetic tensors. **Methods** Based on the transformation optics theory, the coordinate expressions of space transformation were built, in order to deduce the electromagnetic tensors of the cloak. Then the non-singularities of the tensors were validated by Matlab software. Finally, simulation software based on finite element method was used to verify the electromagnetic invisible property of the cloak. **Results** The elliptic cylindrical cloak had good electromagnetic invisible property, and the electromagnetic tensors of the cloak were all non-singular. **Conclusion** Metamaterial electromagnetic invisible cloak with non-singular tensors could be theoretically realized by the space coordinate transformation designed. This non-singular method exploited the application of transformation optics theory in designing the metamaterial invisible devices.

KEY WORDS: metamaterial; coordinate transformation; invisible cloak; non-singularity

收稿日期: 2014-10-06; 修订日期: 2014-11-20

Received: 2014-10-06; Revised: 2014-11-20

基金项目: 湖北省自然科学基金(2013CFB439)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Hubei Province of China(2013CFB439)

作者简介: 刘冶(1986—),男,湖北武汉人,博士,工程师,主要研究方向为超材料隐身装置的构型设计与性能优化。

Biography: LIU Ye(1986—), Male, from Wuhan, Hubei, Ph. D., Engineer, Research focus: configuration design and property optimization of metamaterial invisible device.

超材料电磁隐身斗篷是21世纪初提出的一类新型电磁隐身装置,与采用吸波材料^[1-2]、缩小散射截面、将波反射到其他方向、雷达干扰技术和伪装技术等传统隐身方式不同。隐身斗篷的实现是基于空间等效的原理,将超材料介质所在的变换空间与原自由空间通过变换光学理论进行等效^[3-4],使得电磁波在超材料介质中的传输不产生散射现象。因此对外界观测者而言,电磁波被认为一直在自由空间中传播而未曾遇到障碍物,从而实现了隐身斗篷及其内部散射体对电磁波的隐身。随着2006年世界上第一个圆柱形简化参数电磁隐身斗篷的问世^[5],科学界很快掀起对隐身斗篷研究的热潮^[6-11]。正是在2006年,美国《Science》杂志将该项研究列为年度十大科技进展之一。除了隐身斗篷外,人们将变换光学理论的应用也拓展到了其他功能性电磁隐身装置,如透明体^[12]、聚焦器^[13]、幻影装置^[14]、波长变换器^[15]、场旋转器^[16]等。

虽然理想参数的斗篷在理论上具有近乎完美的电磁隐身特性,但由于其理想参数存在奇异性(即在斗篷区域的内边界上电磁参数的值为无穷大),使得这类理想斗篷在物理实现上遇到很大的困难,要在工程上完全实现斗篷的理想参数基本不大可能。因此科学家们开始寻找克服斗篷参数奇异性的方法,如线变换方法^[17]、“地毯式”斗篷的提出^[18]、大尺度物体隐身装置的设计^[19]等。基于对前述设计原理与方法的研究,文中基于线变换法,对无奇异参数椭圆柱形斗篷的电磁参数设计进行了理论研究和数学推导,通过在直角坐标系下设计出合理的空间坐标变换式,最终完成对该无奇异参数斗篷的设计。

1 线变换法

从拓扑学^[20]的角度来看,应用变换光学原理推导理想斗篷的电磁参数张量时会涉及到空间的压缩,即原空间的一点将被拉伸为变换空间的一条封闭曲线,这种非同胚变换会导致奇异值的产生。线变换法的基本思路是通过引入远离模型中心点的封闭曲线,使得在空间变换过程中,该封闭曲线被拉伸为斗篷内边界曲线,此时的空间变换变为同胚变换,使得斗篷电磁参数张量的奇异性消除。此处需要指出的是,线变换法中包含引入封闭曲线的近似处理,因此所设计的斗篷的隐身性能会受到一定影响。

2 无奇异参数椭圆柱形斗篷电磁参数张量的推导

2.1 斗篷对应空间变换的设计

在原空间区域中引入一条封闭的且与斗篷内外边界同形的椭圆曲线,基于线变换的思想,得到空间变换图,如图1所示。

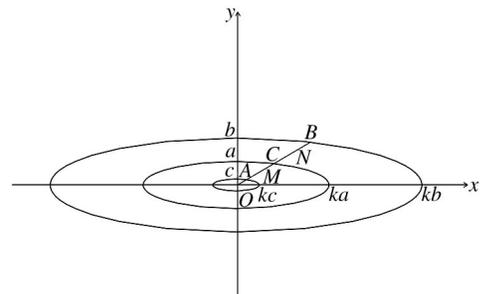


图1 无奇异参数的椭圆柱形斗篷横截面的空间变换

Fig.1 The space transformation of the cross section of a non-singular elliptical cylindrical invisible cloak

从图1中可以看出,无奇异参数的椭圆柱形斗篷的横截面是由二维椭圆环状空间压缩而来。其中,从内到外椭圆曲线的长半轴分别为 kc, ka, kb ,短半轴为 c, a, b ,长短轴比为 k 。此时,设原空间为 $(kc)^2 \leq x^2 + k^2y^2 \leq (kb)^2$ 所围成的椭圆环状区域,变换后的椭圆环状区域为 $(ka)^2 \leq x^2 + k^2y^2 \leq (kb)^2$ 。因此,原空间任意一点 M 与变换空间的 N 点对应,原空间曲线 $(x^2 + k^2y^2 = (kc)^2)$ 上 A 点与变换空间曲线 $(x'^2 + k^2y'^2 = (ka)^2)$ 上的 C 点对应,曲线 $x^2 + k^2y^2 = (kb)^2, x'^2 + k^2y'^2 = (kb)^2$ 在两空间重合。上述空间变换过程在柱坐标下的关系式为:

$$r' = \frac{b-a}{b-c}r + \frac{a-c}{b-c}b \left[\left(\frac{\cos \theta}{k} \right)^2 + (\sin \theta)^2 \right]^{-1/2},$$

$$\theta' = \theta, z' = z \quad (1)$$

根据变换光学理论^[2],可以推导得到柱坐标下,无奇异参数的椭圆柱形斗篷的电磁参数张量表达式为:

$$\varepsilon'_{rr} = \mu'_{rr} = \frac{A^2 + B^2}{D} \quad (2)$$

$$\varepsilon'_{r\theta} = \mu'_{r\theta} = \varepsilon'_{\theta r} = \mu'_{\theta r} = \frac{B \cdot C}{D} \quad (3)$$

$$\varepsilon'_{\theta\theta} = \mu'_{\theta\theta} = \frac{C^2}{D} \quad (4)$$

$$\varepsilon'_{zz} = \mu'_{zz} = \frac{1}{D} \quad (5)$$

式(2)—(5)中,有:

$$A = \frac{b-a}{b-c} \tag{6}$$

$$B = -\frac{1}{2} \frac{(a-c)(b-a)}{(b-c)^2} b \cdot \left(1 - \frac{1}{k^2}\right) \sin 2\theta' \cdot$$

$$\left[\left(\frac{\cos \theta'}{k}\right)^2 + (\sin \theta')^2 \right]^{-3/2} \cdot$$

$$\left\{ r' - \frac{a-c}{b-c} b \left[\left(\frac{\cos \theta'}{k}\right)^2 + (\sin \theta')^2 \right]^{-1/2} \right\}^{-1} \tag{7}$$

$$C = \frac{b-a}{b-c} \cdot r' \left\{ r' - \frac{a-c}{b-c} b \left[\left(\frac{\cos \theta'}{k}\right)^2 + (\sin \theta')^2 \right]^{-1/2} \right\}^{-1} \tag{8}$$

$$D = \left(\frac{b-a}{b-c}\right)^2 \cdot r' \left\{ r' - \frac{a-c}{b-c} b \left[\left(\frac{\cos \theta'}{k}\right)^2 + (\sin \theta')^2 \right]^{-1/2} \right\}^{-1} \tag{9}$$

2.2 椭圆柱形斗篷电磁参数的无奇异性验证

在推导出斗篷的电磁参数张量后,采用 Matlab 软件计算出该张量表达式在斗篷坐标区域的数值,已验证斗篷电磁参数张量的无奇异性。

在2.1节中的斗篷模型中,设内外椭圆以及引入的小椭圆的短半轴分别为 $a=0.02\text{ m}$, $b=0.04\text{ m}$, $c=0.001\text{ m}$,共形椭圆的长短轴比均为 $k=4$ 。应用 Matlab 软件对式(2)—(5)中的各个表达式进行数值计算,得到的各个电磁参数值如图2所示。

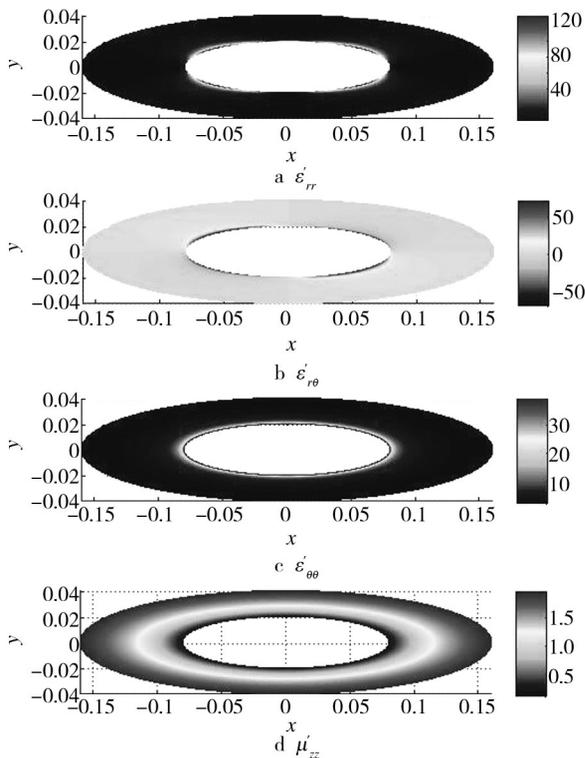


图2 椭圆柱形斗篷的各个电磁参数分量值

Fig.2 Each value of the electromagnetic components of elliptical cylindrical invisible cloak model in calculation

提取图2中所显示数值的极值,见表1。

表1 斗篷各个电磁参数的最大值和最小值

Table 1 Maximum and minimum value of each electromagnetic parameter of the cloak

| | Maximum | Minimum |
|----------------------------|----------|----------|
| ϵ'_{rr} | 130.1939 | 0.0256 |
| $\epsilon'_{r\theta}$ | 71.2500 | -71.2500 |
| $\epsilon'_{\theta\theta}$ | 39.0000 | 1.9500 |
| μ'_{zz} | 1.9500 | 0.0975 |

从表1可以看到,经过线变换的处理后,椭圆柱形斗篷电磁参数各个分量的奇异性已消除,此时斗篷电磁参数表达式(2)—(5)的值均为有限值。

3 无奇异参数椭圆柱形斗篷的隐身性能验证

3.1 斗篷的仿真模型

采用2.2节中椭圆曲线的形状参数,建立椭圆柱形斗篷的仿真模型如图3所示。

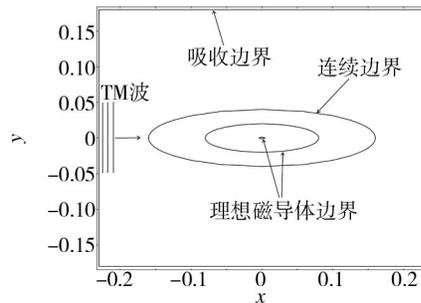


图3 无奇异参数的椭圆柱形斗篷的仿真模型

Fig.3 The sketch map of the non-singular elliptical cylindrical invisible cloak model in simulation

如图3所示,在仿真条件中,波源设为单位强度的平面横磁波(TM平面波),工作频率为8.5 GHz,求解域设为 $0.46\text{ m} \times 0.36\text{ m}$ 的矩形区域。该区域的边界设置为吸收边界,椭圆曲线 $x'^2 + k^2 y'^2 = (kb)^2$ 设置为连续边界,椭圆曲线 $x^2 + k^2 y^2 = (kc)^2$ 和 $x'^2 + k^2 y'^2 = (ka)^2$ 设置为理想磁导体边界。电磁波的入射条件是TM波从矩形区域的左边界进行垂直入射。斗篷以外的区域设置为自由空间区域,即 $\epsilon = \mu = 1$ 。基于上述仿真条件,采用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件进行数值分析,最终得到的仿真结果如图4所示。

从图4中可以看到,当TM波进入斗篷区域时,其等相位面开始平滑地沿着斗篷的内边界弯曲,而当TM波从斗篷区域透射至外部自由空间区域时,该

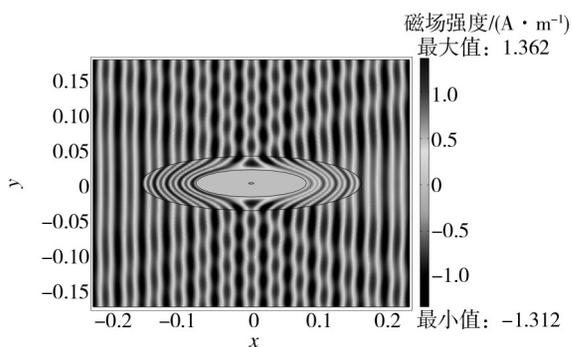


图4 无奇异参数的椭圆柱形斗篷的磁场分布

Fig.4 The magnetic field distribution of non-singular elliptical cylindrical invisible cloak

波的等相位面又基本恢复成为平面,从而保持了初始的波形。从自由空间区域的磁场分布情况来看,在求解域的中轴线及附近位置处出现了磁场的扰动,但从TM波在自由空间区域的整体传播情况来看,TM波的波形基本上没有发生明显的变化。从求解域磁场场强的数值来看,其最大值为1.362 A/m,最小值为-1.312 A/m,与入射前波源的单位强度1 A/m相差并不大,说明求解域中波的散射现象并不明显,进而反映了该斗篷对电磁波的隐身性能较好。从上述的仿真结果来看,基于线变换方法所设计的无奇异参数的椭圆柱形斗篷仍然具有良好的电磁隐身性能。

4 结论

基于线变换方法,通过设计合理的坐标表达式,消除了椭圆形隐身斗篷电磁参数张量的奇异性。数值仿真结果显示,电磁波在求解域传播的过程中,在自由空间区域存在一定的磁场扰动现象,但电磁波的波形在该区域基本保持不变,且电磁波在斗篷区域传播时其波形产生了明显的弯折,绕过了斗篷内部区域。因此可以认为,该斗篷虽然不能实现理想参数斗篷的完美隐身特性,但仍然具备良好的电磁隐身性能。

参考文献:

- [1] 高海波,鲜勤,王健伦,等. 雷达隐身常用电磁波吸收材料研究进展[J]. 表面技术,2013,42(6):88—91.
GAO Hai-bo, XIAN Qin, WANG Jian-lun, et al. Research Progress of Frequently-used Electromagnetic Wave Absorbing Material for Radar Stealth[J]. Surface Technology, 2013,42(6):88—91.
- [2] 刘祥莹,陈鑫,王焯军,等. 磁性吸波材料的研究进展[J].

表面技术,2013,42(4):104—109.

- LIU Xiang-xuan, CHEN Xin, WANG Xuan-jun, et al. Recent Progress in Magnetic Absorbing Materials[J]. Surface Technology, 2013,42(4):104—109.
- [3] WARD A J, PENDRY J B. Refraction and Geometry in Maxwell's Equations[J]. Journal of Modern Optics, 1996,43(4):773—793.
- [4] PENDRY J B, SCHURIG D, SMITH D R. Controlling Electromagnetic Fields[J]. Science, 2006,312(5781):1780—1782.
- [5] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies[J]. Science, 2006,314(5801):977—980.
- [6] 王战,董建峰. 超介质电磁隐身斗篷的研究进展[J]. 材料导报,2012,26(9):10—15.
WANG Zhan, DONG Jian-feng. Research Progress of Metamaterial Electromagnetic Invisible Cloak[J]. Materials Review, 2012,26(9):10—15.
- [7] 刘冶,李竹影,张旺洲,等. 组合型电磁隐身斗篷的超材料设计与仿真[J]. 功能材料,2013,15(44):2235—2238.
LIU Ye, LI Zhu-ying, ZHANG Wang-zhou, et al. Design and Emulation of Combined-shaped Electromagnetic Stealthy Cloak Made of Metamaterials[J]. Journal of Functional Materials, 2013,44(15):2235—2238.
- [8] 罗孝阳,刘道亚,姚丽芳,等. 新型椭圆形互补隐身斗篷的设计[J]. 物理学报,2014,63(8):084101.
LUO Xiao-yang, LIU Dao-ya, YAO Li-fang, et al. Design of a Novel Elliptical Complementary Invisible Cloak[J]. Acta Phys Sin, 2014,63(8):084101.
- [9] YU G X, JIANG W X, CUI T J. Invisible Slab Cloaks Via Embedded Optical Transformation[J]. Appl Phys Lett, 2009,94(4):041904.
- [10] ZHANG P, JIN Y, HE S. Cloaking an Object on a Dielectric Half-space[J]. Opt Express, 2008,16(5):3161—3166.
- [11] LUO Y, ZHANG J, CHEN H, et al. Full-wave Analysis of Prolate Spheroidal and Hyper-boloidal Cloaks[J]. J Phys D: Appl Phys, 2008,41(23):235101.
- [12] YU G X, CUI T J, JIANG W X, et al. Design of Transparent Structure Using Matamaterial[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2009,30(6):633—641.
- [13] JIANG W X, CUI T J, CHENG Q, et al. Design of Arbitrarily Shaped Concentrators Based on Conformally Optical Transformation of Nonuniform Rational B-spline Surfaces [J]. Appl Phys Lett, 2008,92(26):264101.
- [14] LAI Y, CHEN H, ZHANG Z Q, et al. Complementary Media Invisibility Cloak that Cloaks Objects at a Distance Outside the Cloaking Shell[J]. Phys Rev Lett, 2009,102(9):093901.
- [15] 刘冶,李竹影,张旺洲,等. 超材料电磁隐身波长变换器的设计与仿真[J]. 功能材料,2014,45(11):11027—11031.
LIU Ye, LI Zhu-ying, ZHANG Wang-zhou, et al. Design

(下转第78页)

下组织开展机载成附件的综合环境适应性(日历寿命/首翻期)评估与验证试验。

8) 机载成附件研制单位应制定具体成品、附件的摸底试验、设计研制性试验、环境鉴定试验和多因素综合环境适应性验证试验大纲(含产品技术状态及数量、试验项目分组、各试验项目顺序安排、试验方法、试验设施要求,设备、仪器、仪表及其精度要求、试验数据记录要求、成品有效性判别准则、试验报告要求等),并上报总师单位,经总师单位认可后,制定试验实施程序,并依据试验程序开展试验,完成试验报告编制与评审。

3.5 编制《机载成附件安装/连接中的CPC设计规范/要求》

电子设备、动力系统、操纵/液压/环控系统 etc 机载成附件装配中常用的安装、连接方法,包括粘接法、机械连接法、焊接(钎焊、熔焊)法等。采用粘接法选择胶粘剂时,需考虑其电、热、力学性能以及耐腐蚀性,并侧重考虑胶粘剂与被粘接材料相容性、合适的表面预处理方法、胶粘剂种类等。机械连接包括夹紧连接、无焊接包封连接、机械紧固件(螺钉、螺栓、铆钉)连接等,应特别注意预防紧固件连接处的缝隙腐蚀和电偶腐蚀。焊接过程中,应重点控制来自焊剂和焊剂清洗剂的腐蚀及过热后的耐蚀性问题。同时,对于电子设备,并额外考虑电气串接(接地)、电磁屏蔽、电搭接中的腐蚀防护与控制措施。

4 结语

受限于主、客观因素的影响,舰载机载成附件的环境适应性设计与管理体系尚不够完善,有些想法在目前的条件下可能无法实施,尚需在遵行以下技术原则的前提下,在后续工作中予以完善。

1) 基于机载成品、附件的环境评定分析(除局部温度、湿度、盐雾等一般环境要素外,还有霉菌及

(上接第9页)

and Simulation of Metamaterial Electromagnetic Invisible Wavelength-transformer[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(11): 11027—11031.

[16] CHEN H, Hou B, Chen S, et al. Design and Experimental Realization of a Broadband Transformation Media Field Rotator At Microwave Frequencies[J]. Phys Rev Lett, 2009, 102(18): 183903.

[17] 王战,董建峰,刘锦景,等. 基于线变换的椭圆柱外隐身斗篷的设计研究[J]. 物理学报, 2012, 61(20): 204101. WANG Zhan, DONG Jian-feng, LIU Jin-jing, et al. Design

塑料、橡胶、油漆等个别产品挥发、降解以及航母尾排而产生的腐蚀性物质),建立机载成附件的环境技术要求。

2) 针对各项附件的局部环境和功能等特点,基于整机结构环境严酷度分区/分类,提出腐蚀防护与控制的具体设计要求,规范/指导使用寿命期内的CPC任务/活动。

3) 基于整机环境严酷度分区/分类及各项机载成附件的装机位置,参考国内外相关试验/评定标准、规范,确定机载成附件的环境试验与评价技术指标,适时加大相关环境权重;

4) 机载成品、附件的CPC任务/要求应与相应规范/标准及整机的CPC协调匹配,并可通过试验验证和工程应用经验进行补充、完善,具有可剪裁性。

参考文献:

[1] 张蕾,陈群志,刘慧丛,等. 飞机外部 IMR21 纳米复合涂层在典型加速腐蚀环境中的腐蚀失效行为[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 36—41. ZHANG Lei, CHEN Qun-zhi, LIU Hui-cong, et al. Corrosion Failure Behavior of IMR21 Nano Composite Coating on Airplane in Typical Accelerated Corrosion Environment [J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 36—41.

[2] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S]. GJB 4239—2001, General Requirements for Military Equipment Environmental Engineering[S].

[3] RTCA/DO-160F, 机载设备环境试验条件和试验程序[S]. RTCA/DO-160F, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment[S].

[4] HB 6167—1989, 民用飞机机载设备环境条件和试验方法[S]. HB 6167—1989, Environmental Conditions and Test Methods for Airline Equipment[S].

[4] GJB 150—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S]. GJB 150—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Equipment[S].

[5] GJB 4—1983, 舰船电子设备环境试验[S]. GJB 4—1983, Environmental Tests for Ship Electronic Equipment[S].

and Study of Elliptical Cylinder External Cloak Based on Line-transformation[J]. Acta Phys Sin, 2012, 61 (20) : 204101.

[18] LI J, PENDRY J B. Hiding under the Carpet: a New Strategy for Cloaking[J]. Phys Rev Lett, 2008, 101(20): 203901.

[19] CHEN H S, ZHENG B, SHEN L, et al. Ray-optics Cloaking Devices for Large Object in Incoherent Natural Light[J]. Nature Communications, 2013(4): 2652.

[20] WANG X H, QU S B, WU X, et al. Area-transformation Method for Designing Invisible Cloaks[J]. J Appl Phys, 2010, 108(7): 073108.