



国防科技图书出版基金

# 变换光学 理论及其应用

Theory and Applications of  
Transformation Optics

蒋卫祥 崔铁军 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

# 变换光学理论及其应用

Theory and Applications of Transformation Optics

蒋卫祥 崔铁军 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

变换光学理论及其应用 / 蒋卫祥, 崔铁军编著.

—北京: 国防工业出版社, 2016. 11

ISBN 978 - 7 - 118 - 10988 - 7

I. ①变… II. ①蒋… ②崔… III. ①光学

IV. ①O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 288052 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$  字数 261 千字

2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金**  
**评审委员会**

国防科技图书出版基金  
第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

# 前 言

新型人工电磁媒质(Metamaterials)是将具有特定形状的亚波长基本单元周期性或非周期性地排列而构成的复杂结构,其电磁特征可通过等效媒质参数来描述,且等效介电常数和磁导率取决于基本单元结构。通过人为地设计基本单元,控制其对外加电磁场的响应,可实现范围更广甚至自然界不存在的媒质参数。

与新型人工电磁媒质相关的早期研究可以追溯到 20 世纪 60 年代或更早。最早以新型媒质概念出现的是 1964 年,苏联科学家 Victor Veselago 提出的介电常数和磁导率均为负的“左手媒质”,并系统地分析了这种媒质所具有的奇异性,如负折射、逆多普勒效应、反向切伦科夫辐射等。由于在该媒质中电场、磁场和波矢量满足左手螺旋关系(常规媒质中它们满足右手螺旋关系),因而得名“左手媒质”。20 世纪 90 年代,Veselago 的工作引起了英国理论物理学家 John B. Pendry 教授的兴趣。他首先提出利用周期排布的金属线在较低频率实现类似于金属在光波中所具有的等离子特性,从而人工地实现了负介电常数;接着又提出利用非磁性材料构造产生负磁导率的开口谐振环结构。2000 年,Pendry 教授在理论上证明了左手媒质(又称双负媒质)可以实现“完美成像”,突破成像的分辨率极限,并在早期工作的基础之上提出了可能实现左手媒质的微观结构。次年,美国科学家 David R. Smith 教授首次成功实现了左手媒质,并在实验中验证了负折射现象。这是新型人工电磁媒质发展的第一个里程碑。

2006 年 3 月,Pendry 教授基于麦克斯韦方程的形式不变性提出了变换光学理论,为人们自由地操控电磁波奠定了坚实的理论基础,既可实现全新的物理现象(如隐身、幻觉假象等),又能设计出性能突出的功能器件。之后,杜克大学 Smith 教授研究组利用新型人工电磁媒质在微波段研制出圆柱形的隐身衣原型,实验验证了基于新型人工电磁媒质的隐身衣,该成果被 *Science* 杂志评为 2006 年十大科技突破之一。变换光学的提出及其对电磁波自由调控的实现是新型人工电磁媒质发展的新里程碑,标志着新型人工电磁媒质突破了左手媒质和负折射的限制,向更深入、更广阔、更实用的领域迈进。

在变换光学理论提出之前,人们对各向异性媒质的认识和应用比较有限,对电磁媒质的研究主要集中于各向同性。变换光学提出之后,大大促进了人们对各向异性电磁媒质的探索。起初,人们对新型人工电磁媒质的研究除了左手媒

质的新奇特性之外,还努力开发新的结构单元,寻找这些新单元结构的电磁特性,以及从等效媒质理论的角度对这些新结构加以研究。但这些新结构到底有什么新功能,能不能构成一个整体,或作为一个系统发挥作用,一系列的问题等待学术界的探索和回答。在这样的背景下,作者开始了本书的研究工作:从理论和实验两个角度对新型人工电磁媒质和变换光学的潜在应用展开了一系列研究。全书围绕变换光学原理,探讨如何应用新型人工电磁媒质实现对电磁波的精确调控,主要包括:①椭圆形隐身衣、任意形状隐身衣的设计方法;②一种基于线变换的参数无奇异性隐身衣;③任意形状电磁波集中器;④基于嵌入式变换光学的电磁波转换器;⑤任意弯曲导波结构的设计理论和方法;⑥幻觉光学器件及其实现方案;⑦三种幻觉光学器件的微波段实验验证;⑧准保角变换技术及其在隐身地毯及变形龙伯透镜中的应用;⑨变换静电学及直流隐身衣、电流集中器、单层直流隐身衣;⑩变换光学在电磁成像中的应用;⑪变换光学在纳米光子学、表面等离子极化激元调控、时空隐身衣等方面的应用。本书最后初步探讨了变换光学未来的发展方向。

10多年来,新型人工电磁媒质已迅速发展成一门新兴学科,而变换光学是该学科的一个重要分支并吸引了众多相关领域学者的关注。2003年和2006年,人工电磁媒质的相关研究两度被 *Science* 杂志列为十大科技突破之一。新型人工电磁媒质之所以引起科学界和工程界的高度重视,是因为它实现了一些传统材料无法实现的功能,如负折射、隐身衣等。新型人工电磁媒质为人们探索新的物理现象、设计新功能器件提供了诸多可能,它已经发展成集材料科学、电磁学、物理学、纳米科学、化学、生物学等于一体的综合性学科。很多科研工作者陆续投入这个新兴领域的研究中,因为这个领域充满机遇,有很多难题需要人们去探索和解决。本书凝聚了作者多年的研究成果,在此奉献给大家,希望本书的出版对新型人工电磁媒质和变换光学的技术进步起到推动作用。

蒋卫祥 崔铁军

2016年8月于南京



# 目 录

<b>第 1 章 引论</b> .....	1
1.1 新型人工电磁媒质的概念 .....	1
1.2 新型人工电磁媒质的发展历史 .....	3
1.3 变换光学理论 .....	5
1.3.1 变换光学产生的背景 .....	5
1.3.2 变换光学基本原理 .....	6
1.3.3 变换光学器件 .....	8
参考文献 .....	12
<b>第 2 章 任意形状的隐身衣设计和研究</b> .....	15
2.1 椭圆柱形隐身衣的设计和分析 .....	15
2.1.1 椭圆柱形隐身衣 .....	15
2.1.2 全波数值仿真 .....	18
2.2 等厚度的多边形隐身衣的设计和分析 .....	20
2.2.1 任意多边形的等厚度隐身衣的设计 .....	20
2.2.2 全波数值仿真验证 .....	23
2.3 任意形状的隐身衣分析 .....	25
2.3.1 NURBS 曲线介绍 .....	25
2.3.2 理论设计 .....	26
2.3.3 数值模拟仿真 .....	28
参考文献 .....	32
<b>第 3 章 参数无奇异性的隐身衣设计和研究</b> .....	33
3.1 参数无奇异性的椭圆形隐身衣 .....	33
3.1.1 参数无奇异性隐身衣的概念 .....	33
3.1.2 参数无奇异性的近似圆柱形隐身衣 .....	36
3.2 线变换隐身衣的进一步讨论 .....	38
3.2.1 线变换隐身衣的本构参数 .....	39

3.2.2	数值仿真验证 .....	41
3.3	参数无奇异性的多边形隐身衣:函数修正法 .....	44
3.4	参数无奇异性隐身衣一般设计方法:构造三维光学变换 .....	46
3.5	基于互补媒质的隐身方案介绍 .....	48
	参考文献 .....	51
<b>第4章</b>	<b>任意形状的电磁波集中器的设计和研究 .....</b>	<b>53</b>
4.1	圆柱形电磁波集中器介绍 .....	53
4.2	任意形状的电磁波集中器设计 .....	55
	参考文献 .....	61
<b>第5章</b>	<b>基于变换光学理论的高定向性天线设计 .....</b>	<b>63</b>
5.1	变换光学实现柱面波转平面波 .....	63
5.2	基于分层近似变换光学的高定向性透镜天线设计 .....	67
	参考文献 .....	72
<b>第6章</b>	<b>任意弯曲导波器件研究 .....</b>	<b>73</b>
6.1	人工电磁媒质引导电磁波沿任意弯曲角度传播 .....	73
6.1.1	理论设计 .....	73
6.1.2	数值模拟 .....	75
6.2	人工电磁媒质引导电磁波沿任意路径传播 .....	77
6.2.1	理论设计 .....	78
6.2.2	数值模拟 .....	78
	参考文献 .....	80
<b>第7章</b>	<b>幻觉光学器件的研究和设计 .....</b>	<b>81</b>
7.1	单目标虚拟变多目标器件 .....	81
7.1.1	理论设计 .....	82
7.1.2	数值模拟验证 .....	83
7.2	虚拟位移器件 .....	86
7.2.1	理论设计 .....	87
7.2.2	数值模拟验证 .....	88
7.3	虚拟金属变介质变换 .....	90
7.3.1	理论设计 .....	91
7.3.2	数值模拟验证 .....	92

参考文献 .....	94
<b>第8章 幻觉光学器件的实验研究 .....</b>	<b>96</b>
8.1 等效媒质参数提取 .....	96
8.2 常用单元结构及其等效电磁参数 .....	97
8.3 二维场测试平台简介 .....	99
8.4 电磁目标的虚拟变小实验验证 .....	101
8.4.1 理论设计 .....	102
8.4.2 参数简化 .....	104
8.4.3 样品制备 .....	104
8.4.4 实验验证 .....	106
8.4.5 圆形物体的仿真和测试结果 .....	107
8.5 金属目标虚拟变成介质目标实验研究 .....	109
8.5.1 原理简介 .....	110
8.5.2 参数简化 .....	111
8.5.3 样品制备 .....	112
8.5.4 实验结果 .....	113
8.6 复杂幻觉光学器件 .....	114
8.6.1 概念和理论设计 .....	115
8.6.2 器件制备 .....	116
8.6.3 数值仿真和实验结果 .....	117
8.6.4 其他类似幻觉光学器件 .....	119
参考文献 .....	121
<b>第9章 准保角变换 .....</b>	<b>123</b>
9.1 准保角变换理论 .....	123
9.2 隐身地毯的实验验证 .....	125
9.3 变形龙伯透镜 .....	129
9.4 平面变形龙伯透镜 .....	133
参考文献 .....	136
<b>第10章 变换静电学 .....</b>	<b>138</b>
10.1 直流隐身衣 .....	138
10.2 超薄直流隐身衣 .....	143
10.3 局部隐身衣 .....	146

10.4	电流集中器	151
10.5	光调控直流变换器件	155
10.5.1	工作原理	156
10.5.2	实验验证	157
	参考文献	161
<b>第 11 章</b>	<b>宽带高分辨率成像透镜</b>	<b>163</b>
11.1	平板完美透镜	163
11.2	球形超透镜	164
11.3	扁球超透镜	166
11.4	宽带放大镜的设计与验证	167
	参考文献	173
<b>第 12 章</b>	<b>变换光学其他应用</b>	<b>175</b>
12.1	在纳米光子学中的应用	175
12.1.1	几何变换	175
12.1.2	吸收特性	177
12.1.3	场增强效应	178
12.1.4	纳米球与金属基板	180
12.2	在等离极化激元中的应用	181
12.2.1	立体波束偏移器	181
12.2.2	圆柱隐身衣	183
12.2.3	地面隐身衣	185
12.2.4	实现方法	187
12.3	时空隐身衣	188
12.3.1	时空隐身衣概念	188
12.3.2	简化设计	190
12.3.3	潜在应用	193
12.3.4	实现	194
12.3.5	时空隐身衣媒质参数计算	194
12.3.6	“窗帘”映射的细节设计	196
12.3.7	“窗帘”映射边缘光滑化处理	197
12.4	变换光学的未来探讨	198
	参考文献	199

# Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b>	1
1.1 Concept of metamaterials	1
1.2 History of metamaterials	3
1.3 Theory of transformation optics	5
1.3.1 Background of transformation optics	5
1.3.2 Principle of transformation optics	6
1.3.3 Transformation optical devices	8
References	12
<b>Chapter 2 Design and study of arbitrarily – shaped cloak</b>	15
2.1 Design and analysis of elliptical – cylindrical cloak	15
2.1.1 Elliptical – cylindrical cloak	15
2.1.2 Full – wave numerical results	18
2.2 Design and analysis of equal – thickness polygonal cloak	20
2.2.1 Design of arbitrarily equal – thickness polygonal cloak	20
2.2.2 Full – wave simulation verification	23
2.3 Analysis of arbitrarily – shaped cloak	25
2.3.1 Introduction to NURBS curves	25
2.3.2 Design of arbitrarily – shaped cloak	26
2.3.3 Numerical simulation of arbitrarily – shaped cloak	28
References	32
<b>Chapter 3 Design and study of non – singular cloak</b>	33
3.1 Non – singular elliptical cloak	33
3.1.1 Concept of non – singular elliptical cloak	33
3.1.2 Non – singular nearly – circular cloak	36
3.2 More discussion on line – transformed cloak	38
3.2.1 Constitutive parameters of line – transformed cloak	39
3.2.2 Numerical simulation verification	41

3.3	Non – singular polygonal cloak ; modified – function method .....	44
3.4	General method to non – singular cloak ; from 3D transformation .....	46
3.5	Cloak based on complementary medium .....	48
	References .....	51
<b>Chapter 4 Design and study of arbitrarily – shaped concentrator .....</b>		<b>53</b>
4.1	Circular concentrator .....	53
4.2	Arbitrarily – shaped concentrator .....	55
	References .....	61
<b>Chapter 5 Design of transformation – optics – based high – directivity antenna .....</b>		<b>63</b>
5.1	Transformation – optics – based cylindrical – to – plane wave conversion .....	63
5.2	High – directivity lens antenna based on layered transformation optics .....	67
	References .....	72
<b>Chapter 6 Study of arbitrary – bending waveguides .....</b>		<b>73</b>
6.1	Wave bending based on metamaterials .....	73
6.1.1	Theoretical design .....	73
6.1.2	Numerical simulation .....	75
6.2	Arbitrary propagation of waves based on metamaterials .....	77
6.2.1	Theoretical design .....	78
6.2.2	Numerical simulation .....	78
	References .....	80
<b>Chapter 7 Study and design of illusion devices .....</b>		<b>81</b>
7.1	One – to – multiple virtual device .....	81
7.1.1	Theoretical design .....	82
7.1.2	Numerical simulation .....	83
7.2	Virtual – moving device .....	86
7.2.1	Theoretical design .....	87
7.2.2	Numerical simulation .....	88
7.3	Metal – to – dielectric virtual conversion .....	90
7.3.1	Theoretical design .....	91

7.3.2	Numerical simulation .....	92
References	.....	94
<b>Chapter 8</b>	<b>Experimental investigations of illusion devices .....</b>	<b>96</b>
8.1	Retrieval of effective medium parameters .....	96
8.2	Popular unit cells and their effective parameters .....	97
8.3	2D field mapping platform .....	99
8.4	Experimental investigation of shrinking device .....	101
8.4.1	Theoretical design .....	102
8.4.2	Parameter simplification .....	104
8.4.3	Implementation .....	104
8.4.4	Experimental verification .....	106
8.4.5	Simulation and experiment results of circular object .....	107
8.5	Experimental investigation on metal – to – dielectric conversion .....	109
8.5.1	Principle .....	110
8.5.2	Parameter simplification .....	111
8.5.3	Implementation .....	112
8.5.4	Experimental results .....	113
8.6	Complex illusion devices .....	114
8.6.1	Concept and theoretical design .....	115
8.6.2	Implementation .....	116
8.6.3	Numerical simulation and experimental results .....	117
8.6.4	Other similar illusion devices .....	119
References	.....	121
<b>Chapter 9</b>	<b>Quasi – conformal mapping .....</b>	<b>123</b>
9.1	Theory of quasi – conformal mapping .....	123
9.2	Experimental verification of carpet cloak .....	125
9.3	Transformed Luneburg lens .....	129
9.4	Planar transformed Luneburg lens .....	133
References	.....	136
<b>Chapter 10</b>	<b>Transformation electrostatics .....</b>	<b>138</b>
10.1	DC cloak .....	138
10.2	Ultrathin DC cloak .....	143
10.3	Local invisible cloak .....	146

10.4	DC concentrator .....	151
10.5	Light – controlled DC transformation devices .....	155
10.5.1	Operating principle .....	156
10.5.2	Experimental verification .....	157
	References .....	161
<b>Chapter 11 Wideband high – resolution imaging lens .....</b>		<b>163</b>
11.1	Planar perfect lens .....	163
11.2	Spherical super – lens .....	164
11.3	Oblate spheroidal super – lens .....	166
11.4	Wideband magnifying lens .....	167
	References .....	173
<b>Chapter 12 Other applications of transformation optics .....</b>		<b>175</b>
12.1	Analysis of touching nano – particles .....	175
12.1.1	Geometry transformation .....	175
12.1.2	Absorption behavior .....	177
12.1.3	Field enhancement .....	178
12.1.4	A nano – particle on top of a metal surface .....	180
12.2	Transformation optics for plasmonics .....	181
12.2.1	3D beam shifter .....	181
12.2.2	Cylindrical cloak .....	183
12.2.3	Carpet cloak .....	185
12.2.4	Implementation .....	187
12.3	Space – time cloak .....	188
12.3.1	Concept of space – time cloak .....	188
12.3.2	Simplified designs .....	190
12.3.3	Demonstrations .....	193
12.3.4	Implementation .....	194
12.3.5	Material parameter calculation .....	194
12.3.6	The curtain map in detail .....	196
12.3.7	Mollifying the hard edges of the curtain map .....	197
12.4	Discussions on the future of transformation optics .....	198
	References .....	199



# 第 1 章 引 论

随着信息技术的高速发展,电磁媒质(或电磁材料)对当前的信息、国防、经济、医学等领域产生了越来越广泛而深入的影响。近年来,新型人工电磁媒质(Metamaterials)的研究得到了极大关注,成为当前物理学、电磁学、光学、材料科学及交叉学科的前沿和热门课题之一。新型人工电磁媒质将对未来科技、经济和社会发展产生重大影响,各国政府和资金组织都投入了大量人力和物力来组织相应的研究和开发。

## 1.1 新型人工电磁媒质的概念

新型人工电磁媒质(也称超材料、新型人工电磁材料、特异介质、异向介质等)这个词首先由美国得克萨斯州大学奥斯汀分校的 Rodger M. Walsler 教授提出<sup>[1]</sup>,并定义为“Macroscopic composites having a synthetic, three - dimensional, periodic cellular architecture designed to produce an optimized combination, not available in nature, of two or more responses to specific excitation”。根据维基百科,新型人工电磁媒质可以定义为“A material which gains its properties from its structure rather than directly from its composition”<sup>[2]</sup>。根据等效媒质理论,新型人工电磁媒质的单元结构大小必须小于或等于亚波长尺寸<sup>[3]</sup>。上述定义或范畴从不同方面对新型人工电磁媒质进行了描述,可以看出,它有如下几个特点:不同寻常的物理性质,而且其性质主要取决于单元结构;周期或非周期的人工单元结构排列;其单元结构具有亚波长尺寸。本书中,新型人工电磁媒质有时也简称为人工电磁媒质。左手媒质、负折射率媒质等都属于新型人工电磁媒质的范畴。新型人工电磁媒质包含的范围很广,凡是介电常数和磁导率与普通介质有明显区别的媒质都属于新型人工电磁媒质范畴。一些奇特的各向异性、双各向异性媒质及手征媒质也属于新型人工电磁媒质的定义范畴。

通常,媒质的电磁参数可通过介电常数( $\epsilon$ )和磁导率( $\mu$ )来描述<sup>[4,5]</sup>。自然界中最稀薄的媒质是自由空间或空气,其介电常数定义为 $\epsilon_0$ 、磁导率为 $\mu_0$ 。一般媒质的相对介电常数和相对磁导率分别定义为 $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ 及 $\mu_r = \mu/\mu_0$ ,由这两个量可定义另外一个非常重要的媒质参数:折射率 $n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$ 。自然界中大部分媒质的磁导率为 $\mu_0$ ,而介电常数通常大于 $\epsilon_0$ 。新型人工电磁媒质通过设计不同