

左手材料

Left-handed Materials

胡更开/HU Geng-kai, 周萧明/ZHOU Xiao-ming, 蔡小兵/CAI Xiao-bing, 阳 茜/Yang Xi

北京理工大学理学院力学系, 北京 100081

Department of Applied Mechanics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

[摘要] 左手材料同时具有负的介电常数和磁导率及负的折射率,与电磁波的相互作用和传统材料有本质的区别。针对左手材料的基本特性及其设计与制备的一些相关问题,作了简单的总结和介绍。

[关键词] 电磁波,负介电常数,负磁导率,负折射,左手材料

[文献标识码] A

[中图分类号] C93

[文章编号] 1000-7857(2005)08-0067-04

Abstract : Left-handed materials (LHM) have simultaneous negative dielectric and magnetic constants, therefore negative refractive index, propagation of electromagnetic wave inside of a LHM is fundamentally different from its counterpart in classical material. We present a brief review on this new material, focus is placed on its basic property, design and fabrication.

Key Words: electromagnetic wave, negative permittivity, negative permeability, negative index of refraction, left-handed material

CLC Number : C93

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)08-0067-04

1 引言

材料与电磁波的相互作用主要体现在材料的介电常数 ε 和磁导率 μ 这两个物质参数上。考虑波在低损耗介质中传播,此时电磁参数 ε 和 μ 可以看作实数,根据 ε, μ 的正负取值,材料可以分为如图 1 所示的 4 类。

在自然界中,大部分材料位于 I 象限。根据 Maxwell 方程^[1],当一束平面波在位于象限 I 的各向同性(下同)材料中传播时,波矢量 $k = \omega/c \sqrt{\varepsilon\mu}$ 为实数,因此波可以在这种材料中传播。波在位于第 II 和 IV 象限的介质中传播时,波矢量 $k = i\omega/c \sqrt{|\varepsilon\mu|}$ 为虚数,这时材料的耗散非常大,一般认为电磁波在该类介质中不能传播,因为这类材料对频率具有截止功能。

对于位于第 III 象限的材料,发现 $\varepsilon\mu$ 的乘积仍然为正,说明波可以在其中传播。与 I 象限材料相比,虽然波方程没有改变,但 Maxwell 旋度方程发生了改变,从而引起了电磁波传播性质上的根本变化,该象限所对应的材料就是本文要讨论的左手材料。

左手材料是前苏联理论物理学家 Veselago^[2] 于 1967 年最先提出来的。他把同时具有负介电常数 $\varepsilon < 0$ 和负磁导率 $\mu < 0$ 的材料定义为左手材料 (Left-handed Material, LHM)。因为波在其中传播时,电场 (E)、磁场 (H) 和波矢量 (k) 的方向将互成左手系,这时波矢量 k 与能流 Poynting 矢量 s 方向相反。而传统材料 E、H 和 k 将互成右手系(称右手材料 RHM),并且 k 和 s 的方向一致。由于电磁波在左手材料中传播时具

有如此独特的性质,导致了 Snell 定律、Doppler 效应以及 Vavilov-Cerenkov 辐射等诸多电磁性质的逆转^[2-6]。

当 ε 和 μ 同时为负值时,折射率 n 将被定义为负值^[2],表明电磁波在左右手介质的界面处将发生负折射现象,这被称为 Snell 定律的逆转,如图 2 所示。

Snell 定律的逆转可以使左手材料具有平板聚焦功能^[2,7],如图 3 所示。在图 3 中,点光源从右手材料(RHM)向一定厚度的左手材料平板(LHM)入射,在平板内发生第一次聚焦,在透射区发生第二次聚焦,形成点源的实像。Pendry^[8] 提出利用该左手材料平板可以制成“完美透镜”(Perfect Lens),不但能够弥补行进(Propagating)波而且能够弥补消散(Evanescent)波的损失,使透镜成像

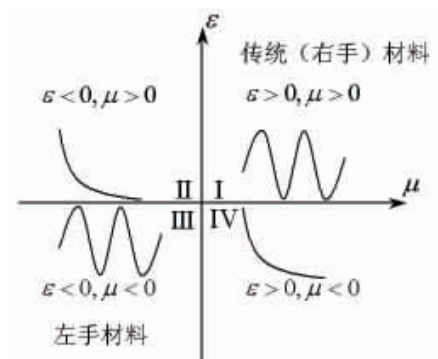


图 1 ε, μ 构造的材料空间

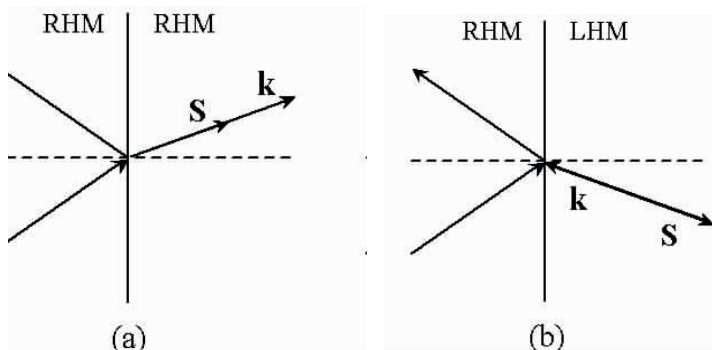


图 2 Snell 定律:(a)两种右手材料;(b)从右手材料向左手材料入射

收稿日期: 2005-06-17

基金项目: 国家杰出青年科学基金(10325210)、国防科技基础研究项目

作者简介: 胡更开,男,北京市中关村南大街 5 号北京理工大学理学院,教授,主要从事复合材料设计和复合材料细观力学研究;

E-mail: hugeng@public.bta.net.cn

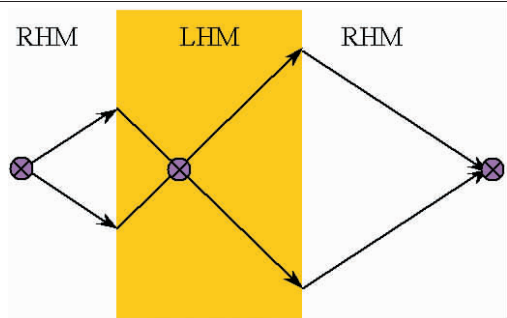


图3 Snell定律的逆转使左手材料具有平板聚焦功能

分辨率突破 λ/n (λ 是入射波长, n 是材料折射率) 的限制。

尽管 Veselago 早在 1967 年就提出了左手材料的概念, 并预测了许多奇特的性质, 但他的研究结果没有引起人们的重视, 因为当时自然界还没有发现左手材料。2001 年, Shelby 等人^[4] 第一次实现了左手材料, 随后该类材料引起了人们的极大关注, 人们期待该类材料能够在理论和技术方面带来突破。

2 左手材料的设计与制备

2.1 左手材料的首次实现

要想得到左手材料, 需要通过对材料微观结构进行设计, 使该材料在某一频段内同时具有负的介电常数和磁导率。为了在微波频段使材料具有负的介电常数, Pendry^[9] 在 1996 年提出了金属线周期排布的结构, 如图 4(a) 所示。不考虑损耗时在微波频段这种结构的等效介电常数, 可以用式(1)来简单地表示:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_{ep}^2}{\omega^2} \right) \quad (1)$$

其中 ε_0 是真空中介电常数, ω_{ep} 是等离子角频率, ω 是入射波角频率。

Pendry^[10] 又在 1999 年用电介质体设计出了一种具有磁响应的周期结构, 其微结构胞元由 2 个开口的薄铜片内外相套而成, 如图 4(b) 所示。它也被称为开口共振环 (Split Ring Resonator)。当一束平面电磁波沿环平面照射并使磁场沿环轴向极化时, 在结构共振频率附近, 该周期结构的等效磁导率可以为负。其内在的机理是使时变磁场在环内产生感应电流, 感应电流激发的磁场又削弱或增强入射磁场。这种结构的等效磁导率具有如下简单的形式 (不考虑损耗):

$$\mu_{eff} = \mu_0 \left(1 - \frac{F\omega_{mp}^2}{\omega^2 - \omega_0^2} \right) \quad (2)$$

其中 μ_0 是真空中磁导率, F , ω_0 和 ω_{mp} 均是材料与微结构有关的参数。

Shelby 等人^[4] 将图 4 中 Pendry 提出的 2 种结构组合在一起, 并通过结构尺寸上的设计保证介电常数和磁导率的负值都出现在



图5 首次设计出的左手材料样品

注: 图摘自 R A Shelby, et al, *Science*, 2001, 292(77)

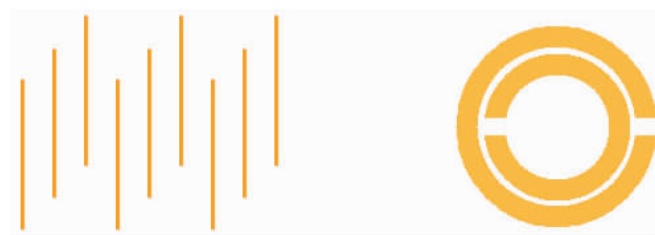


图4 (a)金属线周期排布结构; (b)开口共振环结构

同一频段, 从而设计出了第一块左手材料样品, 如图 5 所示。实验结果表明, 该材料确实表现出负折射性质, 之后左手材料的性质得到了反复的验证和证实^[11]。

2.2 其它类型左手材料

2.2.1 印刷电路型左手材料

Shelby 等人首次提出的模型是一种典型的结构型左手材料, 这种左手材料的负介电常数和负磁导率分别由 2 种结构来实现。Simovski 等人^[12] 对经典的 SRR 结构进行了改进, 提出了类似于 Ω (Omega) 形状的结构单元 (图 6a)。Chen 等人^[13] 设计出结构更简单但与 Ω 形状十分相似的 S 型结构单元 (图 6b)。之后, Chen 等人^[14] 将 S 型结构单元组合在一起, 设计出一种全新的类似于砖块的结构材料。实验表明, 这种结构不仅可以表现出左手材料性质, 而且相对带宽 (带宽/中心频率) 至少是其它结构型左手材料的 2 倍以上。

2.2.2 铁氧体左手材料

外加偏转磁场的铁氧体材料, 在某特定方向上的磁导率可以表现为负值^[15]。将极化的铁氧体材料作为基体, 内添加周期布置的金属导线以实现负的介电常数, 也可以实现左手材料。但为了降低金属线与极化铁氧体材料之间的耦合效应, 需要避免将金属线与铁氧体材料直接接触^[16,17]。经过解析和数值计算, 表明图 7 所示 3 种铁氧体材料和金属线构成的复合材料均可以实现左手材料。图 8 给出了图 7 (a, b, c) 3 个模型中心线处电场随相位的变化关系, 结果表明波数为负值。

此外 Wu^[18] 提出了金属薄膜与铁氧体串联的结构模型, 在组合方式上十分类似于图 7(b) 所示的结构, 其中金属薄膜用于产生负介电常数, 铁氧体材料产生负磁导率。经理论证明, 这种结构也具有左手性质。此外, Wu 等人^[19] 还从理论上研究了导电铁氧体薄膜制备左手材料的可能性。Wu 等人提出这两种模型的结构尺寸都达到纳米量级。

Chui 等人^[20] 提出了导电铁氧体纳米颗粒均匀分布于绝缘基体中的模型, 并通过复合材料动态有效介质理论预测出这种模型将具有左手性质。在实验验证过程中, Chui 等人证实这种复合材料在外加静磁场作用下能够体现出负磁导率, 并且发现颗粒尺寸达到纳米量级时, 复合材料的损耗很小。

另外, Pendry^[21] 设计出可以实现负折射性质的手性 (Chiral) 结

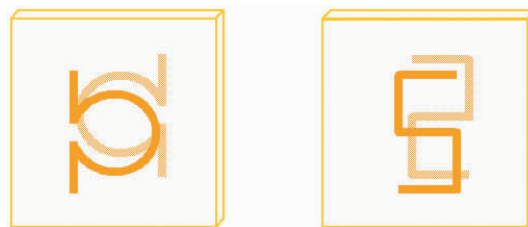


图6 印刷电路型左手材料

(a) 型结构单元; (b) S 型结构单元

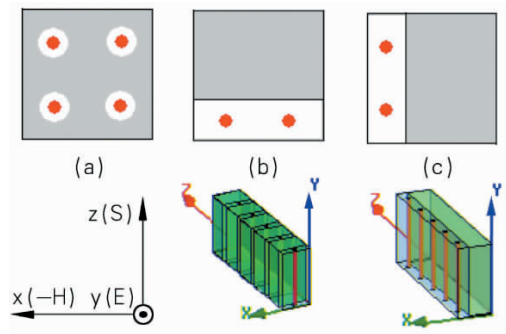


图7 3种铁氧体左手材料

构。这种结构由薄铁片呈螺旋状卷制而成。螺旋产生的电感和螺旋间形成的电容使结构可以产生共振,在共振频率附近将表现出负折射率性质。

3 零折射率材料

左手材料的出现突破了人们对折射率只限于正空间的传统理解,事实表明折射率可以取数轴上的任何值。最近,一些研究工作者^[22]注意到折射率也可以为零,并且发现零折射率材料具有许多奇异的电磁性质。

对于各向同性介质,材料的折射率 n 和阻抗 z 与介电常数 ε 和磁导率 μ 满足 $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$, $z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ 。如果令 $n=0$,针对 ε 和 μ 的取值可以将零折射率材料分成3类,即介电常数和磁导率不同时为零的2种情况和同时为零的1种情况。虽然这3类材料都可以表现出零折射率的性质,但它们之间有着截然不同的电磁性质。

介电常数为零而磁导率不为零,则材料阻抗为无穷大;磁导率为零而介电常数不为零时,材料阻抗为零。由于阻抗为无穷大或零都意味着材料的透射系数为零,表明这2类零折射率材料均不允许波的传播,因而可以用作波截止器件^[23]。

第三类零折射率材料是介电常数和磁导率同时为零的情况,这时,材料阻抗取决于其频率色散特性。根据理论分析可以发现,其阻抗可以取零到无穷大之间的任何值,材料将允许部分或全部电磁波透射。当波在材料中传播时,其传播的相速度为无穷大,或波数为零。波数描述了介质内场的分布情况,波数为零意味着该介质的内场具有空间不变性。此外,根据 Snell 定律,折射率为零还将意味着只有正入射的平面波才能够透射,而任何斜入射的平面波分量都将被全反射。

借助于材料复合的思想,可以构造出具有良好阻抗性能的一维第三类零折射率材料。考虑2种无限大平板材料交替层叠形成图9(a)所示的复合材料,平板的参数分别为 $\varepsilon_2, \mu_2, d_2$ 和 $\varepsilon_3, \mu_3, d_3$ (d 为板厚),入射介质和透射介质均设为空气($\varepsilon_1=1, \mu_1=1$)。图9(b)计算了正入射角时平板材料参数为 $\varepsilon_2=1, \mu_2=1, d_2=\lambda/20$ 和

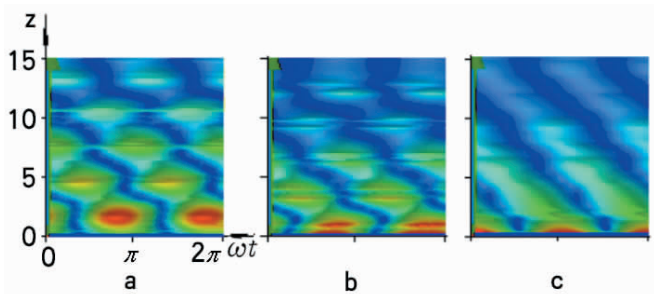


图8 3种铁氧体左手材料模型中心线上电场随相位的变化情况

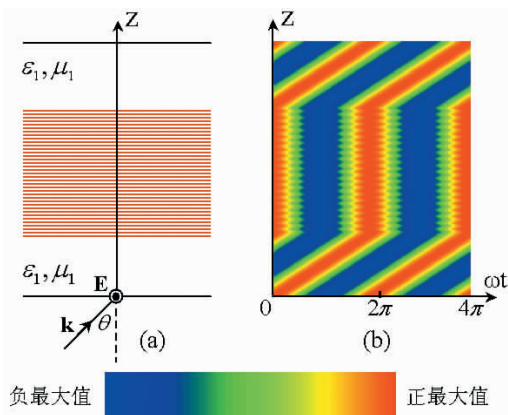


图9 (a) 左右手层板复合材料
(b) 平面波正入射($\theta=0$)时
z轴上电场随相位的变化

$\varepsilon_3=-1, \mu_3=-1, d_3=\lambda/20$ (λ 为入射波长)时 z 轴上电场随时间相位变化的分布图。在参数设置上,由于保证了 $n^z=0$ (n^z 是垂直板方向折射率的体积平均),计算结果显示,复合材料在 z 方向具有零折射率材料的性质,即场具有空间不变性的特点。

4 讨论

4.1 左手材料能量的定义

根据经典的电动力学理论^[1],非色散介质(材料参数与频率无关)的时间平均能量密度定义为:

$$\overline{W} = \frac{1}{4} (\varepsilon |E|^2 + \mu |H|^2) \quad (3)$$

要使能量为正,则左手材料必然是色散的。再根据 Kramers 和 Kronig 关系^[1],对于色散介质有 $\varepsilon'' \neq 0$ 和 $\mu'' \neq 0$ ($[\cdot]'$ 表示某量的虚部),说明左手材料又必然是耗散的。

对低耗散 ($\varepsilon'' \ll \varepsilon', \mu'' \ll \mu'$) 的色散介质,时间平均能量密度可以定义为^[1]:

$$\overline{W} = \frac{1}{4} \left[\frac{\partial(\omega\varepsilon)}{\partial\omega} |E|^2 + \frac{\partial(\omega\mu)}{\partial\omega} |H|^2 \right] \quad (4)$$

对 Shelby 和 Smith 等人提出的左手材料,介电常数和磁导率均符合 Lorentz 模型。在 Lorentz 模型的共振频率附近, $\varepsilon(\omega)$ 和 $\mu(\omega)$ 的虚部将会非常大,因此式(4)不足以给出 Lorentz 模型的能量表达式。

针对这种情况, Ruppin^[24] 在时谐场下给出了 Lorentz 模型能量密度的表达式; Cui 等人^[25] 从 Maxwell 方程和 Poynting 理论出发,基于能量守恒原理和时域分析方法给出了色散介质能量密度的广义定义方法,证明了 Lorentz 模型在任何频率下的功率密度均为正值。

4.2 左手材料设计相关问题

从前面的介绍可以看出,左手材料都是通过对微观结构精心设计得到的。因此针对非均质材料与电磁波的相互作用,建立一套理论(包括数值)的分析框架,将会指导左手材料的研制。另外目前左手材料主要是印刷电路型,如何将左手功能材料与结构材料相结合,将承载和功能结合在一起,也是当前需要解决的一个问题。

5 结论

本文介绍了一种新型的电磁波功能材料——左手材料,总结了其独特的性质和左手材料本身设计与制备的一些相关问题。左

手材料的出现在理论上已经带来了许多新概念,相信在技术层面上也会带来新的突破。

参考文献 (References)

- [1] Landau L D, Lifshitz E M, Pitaevskii L P. Electrodynamics of Continuous Media[M]. Pergamon Press, 1960
- [2] Veselago V G. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of [permittivity] and [permeability][J]. *Soviet Physics USPEKI*, 1968,(10): 509 ~514
- [3] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. A Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity [J]. *Phys. Rev. Lett*, 2000,(84): 4 184~4 187
- [4] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction[J]. *Science*, 2001,(292): 77~79
- [5] Seddon N, Bearpark T. Observation of the Inverse Doppler Effect [J]. *Science*, 2003,(302): 1 537~1 540
- [6] Lu J, Grzegorzczak T M, Zhang Y, et al. Cerenkov Radiation in Materials with Negative Permittivity and Permeability [J]. *Optics Express*, 2003,(11): 723~734
- [7] Loschialpo P F, Smith D L, Forester D W, et al. Electromagnetic Waves Focused by a Negative-Index Planar Lens [J]. *Phys. Rev. E*, 2003,(67), 025 602:1~4
- [8] Pendry J B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens [J]. *Phys. Rev. Lett*, 2000,(85): 3 966~3 969
- [9] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures [J]. *Phys. Rev. Lett*, 1996,(76), 4 773~4 776
- [10] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena[J]. *IEEE Trans. Micr. Theory and Techniques*, 1999,(47): 2 075~2 084
- [11] Houck A A, Brock J B, Chuang I L. Experimental observations of a left-handed material that obeys Snell's law [J]. *Phys. Rev. Lett*, 2003,(90): 137 401:1~4
- [12] Simovski C R, He S. Frequency Range and Explicit Expressions for Negative Permittivity and Permeability for an Isotropic Medium

- Formed by a Lattice of Perfectly Conducting Ω particles [J]. *Lett. A*, 2003,(311): 254 ~263
- [13] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, et al. *Phys. Rev. E*, 2004,(70), 057 605:1~4
- [14] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, et al. *Appl. Phys. Lett*, 2005, (86), 151 909:1~3
- [15] 奚文斌, 孙忠良. 毫米波铁氧体器件理论与技术. 北京: 国防工业出版社, 1996
- [16] Dewar G. Negative Phase Velocity Composites Employing Magnetic Hosts[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003,(5218):140~144
- [17] Cai X B, Zhou X M, Hu G K. 2005(submitted)
- [18] Wu R X. Effective Negative Refraction Index in Periodic Metal-Ferrite-Metal Film Composite [J]. *J. Appl. Phys*, 2005,(97), 076 105:1~3
- [19] Wu R X, Zhang X K, Lin Z F, et al. Possible Existence of Left-Handed Materials in Metallic Magnetic Thin Films [J]. *J. Magn. Magn Mater*, 2004, (271): 180~183
- [20] S T Chui, Hu L B. Theoretical Investigation on the Possibility of Preparing Left-Handed Materials in Metallic Magnetic Granular Composites[J]. *Phys Rev. B*, 2002,(65), 144 407: 1~6
- [21] Pendry J B. A Chiral Route to Negative Refraction [J]. *Science*, 2004,(306): 1 353~1 355
- [22] Ziolkowski R W. Propagation in and Scattering from a Matched Metamaterial Having a Zero Index of Refraction [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, (70) 046 608:1~12
- [23] Garcia N, Ponizovskaya E V, Xiao J Q. Zero Permittivity Materials: Band Gaps at the Visible[J]. *Appl. Phys. Lett*, 2002, (80): 1 120~1 122
- [24] Rupp R. Electromagnetic Energy Density in a Dispersive and Absorptive Material[J]. *Physics Letters A*, 2002,(299): 309~312
- [25] Cui T J, Kong J A. Time-Domain Electromagnetic Energy in a Frequency-Dispersive Left-Handed Medium [J]. *Phys. Rev. B*, 2004, (70), 205 106:1~7

(责任编辑 王宏章)

·读者·作者·编者·

《科技导报》征稿启事

值此中国科协 2005 年学术年会在新疆召开之际,科技导报社谨表示热烈祝贺,并诚向出席会议的代表和全国广大科技工作者约稿。

《科技导报》是中国科学技术协会学术会刊,1980 年由杨振宁博士倡议在美国创办、全世界发行,钱宁教授、孟昭英院士、朱光亚院士先后任主编,现任主编为中国科协书记处书记冯长根教授。

《科技导报》为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),以发表国内外科学和技术各学科专业原创性论文为主,同时刊登阶段性科研成果报告,报道国内外重大科技新闻,其主要读者对象为广大科技工作者、高等院校师生、国家机关和高新技术企业高层管理人员,把努力办成中国的 *SCIENCE* 和 *NATURE* 作为奋斗目标。

《科技导报》以“刊登原创学术论文,报道前沿科技成果;涵盖科技各个领域,关注重大科技问题;重视理论研究创新,鼓励学术观点争鸣;促进中外科技交流,探索强国兴邦道路”为办刊宗旨,以“处理来稿周期短,报道成果时效强,探究问题起点高,研讨思路视野宽,提出对策着眼远,争鸣学术气氛浓”为办刊特色,在全国众多的科技类学

术期刊中独树一帜,成为一本有影响、有特色、有品位的高层次、高水平、高质量学术期刊。

1 稿件形式及篇幅

1.1 研究论文:报道学术价值显著、实验数据完整、具有原创性和创造性的研究成果,全文一般不超过 8 000 字。

1.2 综述文章:对当前有关学科领域的研究热点和前沿问题进行总结、概括和评价,全文一般不超过 6 000 字。

1.3 卷首寄语:仅接受院士就某一科技问题、现象、事件等发表的个人见解、意见、希望等寄语性文章,全文要求控制在 1 500 字左右。

1.4 图书评论:仅接受新近出版的自然科学类学术专著、高校教材以及高级科普类图书评论,全文要求控制在 1 500 至 2 000 字之间,并附所评图书封面扫描电子文档。

2 投稿手续

2.1 由作者单位负责论文稿件的保密审查工作。作者中若有国外学者时,请同时附国外学者的同意投稿函。

2.2 稿件(打印稿)一式 2 份寄送本刊的同时,必

须将稿件电子文档(Word 格式,附件形式)发至本刊投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。

2.3 请在稿件上署名作者详细工作单位、通讯地址及邮政编码、联系电话、传真、E-mail。

2.4 稿件的格式、体例等要求,请参考本刊本期刊载的论文。

2.5 稿件收到日期以本刊收到稿件的电子文档日期为准。

2.6 我社将刊出论文的中、英文摘要等提供给其它文摘检索类刊物登载时,不再另付作者稿酬;如作者不同意提供,请在投稿时附函作此说明。

2.7 稿件若为基金资助项目,请注明基金名称、编号或基金文件复印件。

2.8 来稿不得一稿多投,在学术会议上宣读过的论文,可再以研究论文形式在我刊发表。

2.9 来稿一经录用,我刊编辑部 3 个月之内必会通知作者,否则作者可自行处理。不录用的稿件本刊不予退还,请作者自留底稿。

(本刊编辑部)