

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.04.012

基于 MOPSO 的石墨烯/磁性粒子混合填充多层吸波材料优化设计

赵雨辰, 郑家欢, 刘江凡, 宋忠国, 席晓莉

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 本文研究了基于多目标粒子群算法(MOPSO)的石墨烯/磁性粒子混合填充多层吸波材料的优化设计。首先,基于电磁场理论推导了多层吸波材料的反射系数,并定义了兼顾宽频带、宽角度和极化无关特性的吸波性能以及磁性粒子填充量这两个相互矛盾的子目标的表达式。进而,以石墨烯纳米片(GNS)/片状羰基铁颗粒(FCI)混合填充吸波材料为例,通过 MOPSO 优化得到了五层吸波材料模型的最优设计。结果显示,基于 MOPSO 的多目标优化可以在相互矛盾的子目标之间取得较好的平衡,经过优化的多层吸波材料厚度仅为 1.65 mm,总体磁性粒子填充量仅为 13.3 wt%,但却可以在大约 6~18 GHz 的频率范围内和 0°~45°的入射角范围内实现至少 5 dB 反射率衰减,且与入射波极化无关。

关键词: 多层吸波材料; 石墨烯; 磁性粒子; MOPSO; 多目标优化

中图分类号: TN973.2+3

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)04-0550-05

Multi-objective optimization of absorbing materials filled with graphene and magnetic particles based on MOPSO

ZHAO Yuchen, ZHENG Jiahuan, LIU Jiangfan, SONG Zhongguo, XI Xiaoli

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The multi-objective design of graphene / magnetic particle hybrid-filled multi-layer microwave absorbing materials is investigated by utilizing the multi-objective particle swarm optimization (MOPSO). Firstly, the reflection coefficient for multi-layer absorbing materials is derived from the electromagnetic field theory. Meanwhile, two sub-objectives expressions are defined to represent the wide-band, wide-angle and polarization-independent absorbing capacity and the filling amount of magnetic particles. Then, the optimal design is carried out for a five-layer graphene nanosheet (GNS) / flake carbonyl iron particles (FCI) hybrid-filled absorbing material model. The results show that the multi-objective optimization process based on MOPSO can achieve a good balance between two conflicting sub-targets. Specifically, the optimized multi-layer GNS / FCI absorbing material can achieve at least 5dB polarization-independent reflectivity attenuation in the 6~18 GHz frequency range and the 0°~45° incidence angle range with only 1.65 mm thickness and 13.3 wt% FCI filling amount.

Key words: multi-layer absorbing material; graphene; magnetic particles; MOPSO; multi-objective optimization

随着各种现代无线电子设备的普及,电磁干扰(EMI)这一无形的污染因素已经越来越被人们所重视^[1]。在诸多抑制 EMI 的技术中,吸波材料作为一

种能吸收有害电磁能量的手段,为各类设备的正常工作甚至是人们的健康提供了有效的保护^[2]。

近几年,为了获得更好的吸波性能,各国的研究

收稿日期: 2021-01-19; 网络出版日期: 2021-08-31

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20210831.1103.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61971346);西安理工大学科研基金资助项目(103-451319009,103-451420002)

第一作者: 赵雨辰,男,博士,副教授,研究方向为电磁场与微波技术。E-mail: zhaoyuchen@xaut.edu.cn

通信作者: 席晓莉,女,博士,教授,研究方向为电磁场与微波技术。E-mail: xixiaoli@xaut.edu.cn

人员都在致力于新型纳米结构性复合吸波材料的研发,通过更精巧的微观设计,来促进电磁波与其内部复杂微观结构的相互作用。其中,填充以石墨烯为代表的各类碳质结构型纳米填料的高分子聚合物复合材料,由于其轻质、高损耗、耐腐蚀性强等优点,已经被证明是一种极具竞争力的新型吸波材料^[3]。尽管如此,单独使用碳质填料仍然存在一个显著的缺点,即会导致整个体系缺乏足够的磁损耗,这也反过来限制了碳质填料自身潜力的充分发挥。针对这一问题,人们采用了碳质纳米填料与磁性纳米颗粒相结合的混合填充方式。例如, Qing 等^[4]将石墨烯纳米片(GNS)与片状羰基铁颗粒(FCI)均匀分散到环氧树脂基体之中,制备出的混合填充吸波材料仅需要 0.9 mm 的厚度即可实现 5.4~18 GHz 频段内对垂直入射电磁波超过 6 dB 的衰减。不过值得注意的是,这一效果的达成需要较高的磁性粒子填充量,具体来说已经达到了 70wt%。为此,需要进一步结合材料的宏观结构设计来降低对于填充量的需求。Ren 等^[5]就报道了一种具有三层等厚度结构的混合填充材料,通过对填料空间分布的进行合理规划,在相同总厚度(2mm)和相同填充量(5wt% GNSs 和 15wt% Fe₃O₄)的条件下,实现了比单层材料更好的吸波和电磁屏蔽性能。此外,利用多种磁性吸收剂结合多层设计也能够进一步提高带宽厚度比,例如许志远等^[6]利用此梯度叠层的方法对球形羰基铁粉、片状羰基铁粉和片状 FeSiAl 合金三种吸收剂进行精确的阻抗渐变设计,获得了超过现有文献报道的吸波带宽。

尽管多层吸波材料因其较高的设计自由度已经表现出了更强的吸引力,不过设计自由度的增加也会带来额外的问题,比如优化过程中搜索空间的维度扩张等,因而通常借助于高性能的优化算法来较为高效地获得满足要求的设计结果。目前,粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)、人工蜂群(ABC)算法等都已经多层吸波材料的设计领域得到了成功的应用,只不过设计的重点往往都局限在高吸收率这一单个目标之上^[7]。Toktas 等^[8]指出,更理想多层吸波材料设计应该是一个多个相互矛盾指标间的 Pareto 最优问题,除了反射系数,厚度、层数等等重要指标都应该同时被考虑进来,但这就对优化算法在更高维空间中的探索与挖掘能力提出了更高的要求。为此 TOKTAS 等^[8]在 2020 年提出了一种改进的 ABC 算法,并以填充多壁碳纳米管(MWCNT)等各类碳质填料的环氧树脂基材料为材料库,针对多层吸波材料的宽角度反射系数、厚度和层数这

三个目标进行了优化,取得了良好设计效果。上述多目标优化思路在非磁性吸波材料设计中的成功实践无疑将为碳质纳米填料与磁性纳米颗粒混合填充吸波材料的优化设计提供借鉴与参考。

为此,本文基于多目标粒子群算法(MOPSO)^[9],以 GNS/FCI 混合填充的高分子聚合物复合材料为例,研究了其多目标优化问题。首先推导了混合填充复合材料的电磁响应模型,并定义了兼顾宽频带、宽角度和极化无关特性的吸波性能以及磁性粒子填充量这两个相互矛盾的子目标的表达式。进而,采用 MOPSO 搜寻解空间中的 Pareto 最优解集合,并选取其中距离目标值空间原点最近的一个作为全局最优解。最后,对所得结果的分析 and 比较显示,混合填充多层吸波材料能够以更少的磁性粒子填充量,获得比同厚度大填充量单层材料更为优异的吸波性能。

1 建模与优化

1.1 多层吸波材料电磁响应建模

多层吸波材料见图 1,其由 N 层材料组成,每一层的厚度记为 d_n ,介电常数和磁导率分别记为 ϵ_n 和 μ_n , $n \in [1, N]$, θ 为自由空间中的入射角。

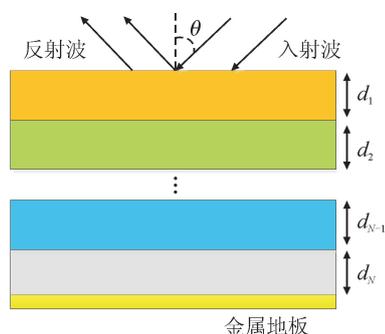


图 1 多层吸波结构示意图

Fig. 1 Multi-layer absorbing material

下面以横电波(TE)入射为例推导多层吸波材料的反射系数表达式。对于角频率为 ω 的入射波,若以分贝(dB)为单位,则反射系数为:

$$R_{TE} = 20 \log_{10} |\Gamma| \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{A + B\Gamma_1 \exp(-j2k_1 d_1 \cos\theta_1)}{B + A\Gamma_1 \exp(-j2k_1 d_1 \cos\theta_1)} \quad (2)$$

式中: j 为虚数单位;其他符号为:

$$A = \mu_1^{1/2} \cos\theta - \epsilon_1^{1/2} \cos\theta_1 \quad (3)$$

$$B = \mu_1^{1/2} \cos\theta + \epsilon_1^{1/2} \cos\theta_1 \quad (4)$$

$$k_1 = \omega \sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \quad (5)$$

另外, Γ_1 是电磁场在第 1 和 2 层材料分界面处的反射系数, θ_1 为第 1 层材料中的入射角,两者均可由

文献[8]中的递推公式得到,这里不一一列出。横磁波(TM)入射的情况可类似推导得到。

下面给出本文优化目标的表达式。对于兼顾宽频带、宽角度和极化无关特性的吸波性能,考虑首先将所关注的角频率区间 $[\omega_L, \omega_U]$ 和入射角区间 $[\theta_L, \theta_U]$ 分别离散为 N_ω 和 N_θ 个点,从而构成一个 $N_\omega \times N_\theta$ 个元素的二维矩阵 $[M_{rs}]$,且每个元素的初始值均设为 0。当多层吸波材料对于某一个元素所对应角频率和入射角的 TE 和 TM 波的反射系数都大于一个期望值 R_0 时,该元素的值设为 1。于是,反射系数目标函数可以表示为:

$$ob_1 = \sum_{r=1}^{N_\omega} \sum_{s=1}^{N_\theta} M_{rs} / (N_\omega \times N_\theta) \quad (6)$$

对于磁性粒子填充量目标函数,若第 n 层的磁性粒子质量分数记为 ωt_n ,则当每一层的基体材料相同或密度相近时,多层材料的磁性粒子填充量表达式为

$$ob_2 = \sum_{n=1}^N (\omega t_n \cdot \frac{d_n}{d_t}) \quad (7)$$

式中: d_t 为多层材料的总厚度。

1.2 MOPSO

在得到了多层吸波材料的两个目标函数的表达式之后,本文将通过 MOPSO 对其进行多目标优化,以获得综合条件下最小的 ob_1 和 ob_2 。

和传统的 PSO 算法一样, MOPSO 通过使用一群粒子来遍历多维搜索空间,从而寻找出待优化问题的最优解。群体中的每一个粒子都是一个潜在的问题解决方案,并且在迭代过程中会持续受到群体以及自身经验的影响。在传统 PSO 算法中,若将第 t 次迭代后群体中第 p 个粒子在搜索空间中的位置和速度分别记为 $x_p(t)$ 和 $v_p(t)$,则在下一次迭代中,粒子速度的更新公式为

$$v_p(t+1) = \omega \times v_p(t) + c_1 \times rand \times [pBest_p(t) - x_p(t)] + c_2 \times rand \times [gBest(t) - x_p(t)] \quad (8)$$

式中: ω 是惯性因子; c_1 和 c_2 是学习因子,代表粒子从群体及自身经验中学习的程度; $pBest_p$ 和 $gBest$ 则代表个体和群体目前为止的所得到最优结果; $rand$ 是(0, 1)之间均匀分布的随机数。粒子速度更新后,其位置即可依据下式得到更新:

$$x_p(t+1) = x_p(t) + v_p(t+1) \quad (9)$$

当所有粒子的位置都得到更新后,再通过比较产生新的 $pBest_p$ 和 $gBest$,从而进入下一次迭代过程,直至满足要求或达到最大迭代次数。

MOPSO 和 PSO 算法最大的不同可以归纳为两

点,分别是非劣解的判断与保存以及 $gBest$ 的选择。

对于有 m 个目标的优化问题中的一个解向量 \vec{u} ,其各个目标值记为 (u_1, \dots, u_m) ,若解空间中不存在一个其他的解向量 \vec{v} ,其各个目标值记为 (v_1, \dots, v_m) ,满足下列条件:

$$\forall i \in \{1, \dots, m\}, v_i \leq u_i \wedge \exists i \in \{1, \dots, m\}, v_i < u_i \quad (10)$$

则称 \vec{u} 为一个非劣解,所有非劣解的集合称为 Pareto 最优解集合,即目标值空间中的 Pareto 前沿。而在 MOPSO 的每次迭代中,都需要对 Pareto 最优解集合进行更新。

而对于 $gBest$,则需要根据已探索得到的信息,将整个目标值空间进行网格化,再依据每个网格中 Pareto 最优解的密度,采用赌轮盘策略进行选择,保证密度越低的网格被选择概率越大,进而在该网格中以等概率选择任意一个非劣解作为 $gBest$ 。

此外,为了保证 MOPSO 具有较好的搜索与挖掘能力,还可以采用如下的时变惯性因子:

$$\omega(t) = \omega_{\max} - t \times (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / t_{\max} \quad (11)$$

式中: t_{\max} 是最大迭代次数, ω_{\max} 和 ω_{\min} 是惯性因子的最大值和最小值。在最初迭代时,较大的 ω 能够保证每个粒子能够较少地被现有经验束缚,从而能够探索更广的未知空间,而随着迭代的进行,较小的 ω 又能保证对于可能的最优区域的深入挖掘。

迭代完成后,在 Pareto 最优解集合中选取距离目标值空间原点最近的一个解作为全局最优解,即

$$Best = \min \{ \sqrt{ob_1^2 + ob_2^2} \} \quad (12)$$

2 算例与结果

2.1 优化算例

本文选用文献[3]和[4]中的 GNS 单独填充以及 GNS/FCI 混合填充高分子聚合物复合材料组成材料库,见表 1,其基体材料皆为环氧树脂。

表 1 材料库

Tab. 1 Material database

编号	GNS 填充量/(wt%)	FCI 填充量/(wt%)	数据来源
1	1	60	
2	2	60	1~5 号
3	3	60	材料来源
4	2	50	于文献
5	2	70	[4], 6~9
6	1	0	号材料来
7	2	0	源于文献
8	3	0	[3]
9	4	0	

待优化多层吸波材料的层数 N 设为 5, 每层的厚度不大于 0.4 mm, 以保证总的厚度不超过 2 mm, 优化的频率区间为 2~18 GHz, 入射角区间为 $0^\circ \sim 45^\circ$, 期望的反射系数 R_0 设为 -5 dB。MOPSO 粒子数设为 40, 迭代次数为 100, Pareto 最优解集合的大小设为 20, 迭代中如果非劣解数量超过 20, 则依据密度信息, 从非劣解最密集的网格中随机删除。同时, 通过多次运行优化程序, 并取所有结果中的最优一个, 以降低 MOPSO 自身随机性对单次优化结果可能产生的影响。优化得到的多层吸波材料结构及其反射系数见图 2。

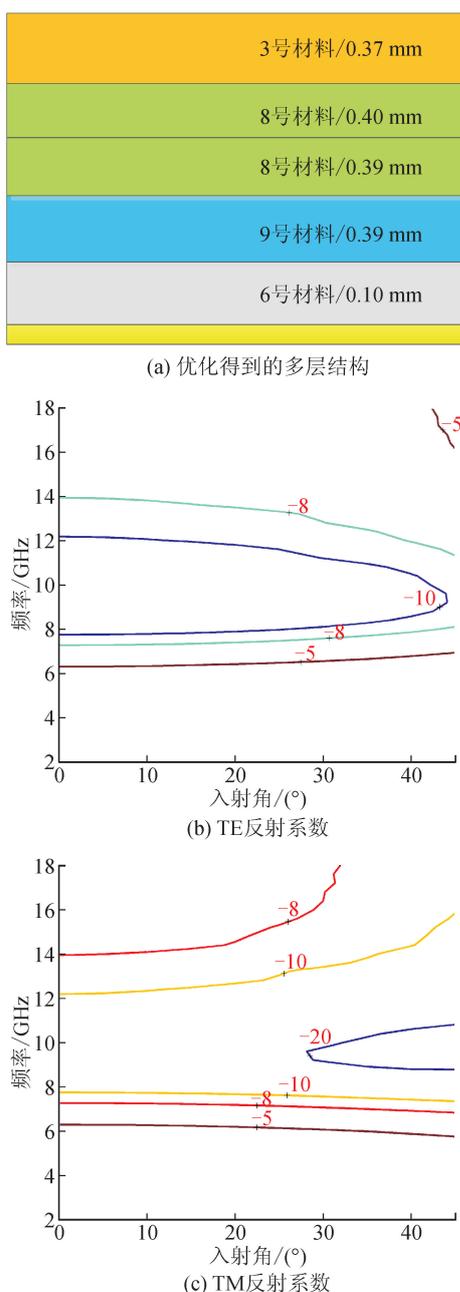


图 2 多层吸波材料优化结果

Fig. 2 Optimization results of multi-layer absorbing material

从图 2 中可以看出, 优化得到的多层吸波材料由四层材料组成, 总厚度仅为 1.65 mm, 由上至下分别为 0.37 mm 的第 3 种材料, 0.79 mm 的第 8 种材料, 0.39 mm 的第 9 种材料以及 0.10 mm 的第 6 种材料, 同时该多层材料在约 6~18 GHz 频率范围内, 基本可以保证 $0^\circ \sim 45^\circ$ 角入射的 TE 波和 TM 波反射率均不超过 -5 dB, 实现了良好的兼顾宽频带、宽角度和极化无关特性的吸波特性。而且, 从 FCI 填充量的角度看, 根据优化后每一层材料的磁性颗粒填充量和厚度, 通过使用上一节中的式(7), 可得优化后的多层材料总体上仅需要 13.3 wt% 的填充量, 大大低于文献[4]给出的 GNS/FCI 混合填充材料中 50 wt% 及以上的 FCI 填充量。

2.2 结果分析

为了进一步对优化过程和结果进行说明, 这里首先给出了 MOPSO 最后一次迭代后, 得到的所有粒子、所有非劣解以及全局最优解在目标值空间中的分布情况, 见图 3。

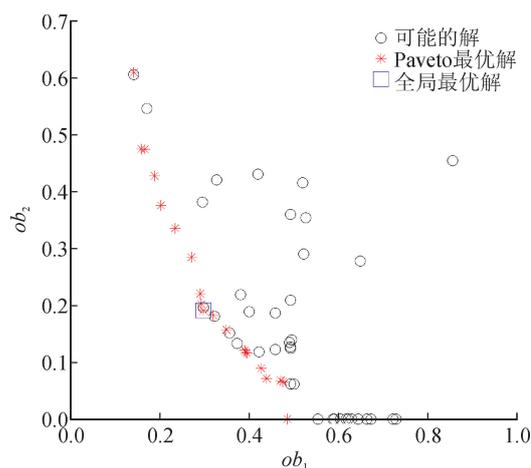


图 3 所有粒子在目标值空间中的分布

Fig. 3 Distribution of all particles in objective-value space

图 3 中, 每一圆圈代表一个可能的解, 而每一个星号代表 Pareto 最优解集合中的一个非劣解, 所有非劣解组合起来即勾勒出了 Pareto 前沿。分析该前沿的变化趋势可以发现, 本文所设置的 ob_1 和 ob_2 是两个相互矛盾的目标, 提高其中一个, 会造成另一个的恶化。全局最优解由方块表示, 为 Pareto 最优解集中距离目标值空间原点最近的一个解, 代表了一种 ob_1 和 ob_2 相互妥协后的最优结果。

图 4 给出了相同厚度条件下, 由材料库中 9 种材料各自构成的单层吸波材料与经过优化的多层吸波材料在目标值空间中的相对位置。如图 4 所示, 对于文献[3]和[4]中的任意一种材料来说, 相同厚度条件下, 其多目标综合性能明显不及经过优化后

的多层材料。一方面,如果仅仅使用 GNS 这一种填料,磁损耗的缺失导致材料的吸波能力明显下降,在所关心的频率和角度范围内不能同时满足 TE 和 TM 反射系数小于 -5 dB 的区域占比基本超过 60%。另一方面,尽管理论上讲,通过增加材料的磁损耗能够提高其吸波性能,但这并不意味着只要填充了大量的磁性粒子就一定能对入射的电磁波实现更好的衰减,例如图 4 中显示,只有填充了 60 wt% FCI 的单层混合填充材料(图 4 中的单层材料 1~3)具有略优于多层材料的吸波能力,而 FCI 填充量达到 70 wt% 的材料(图中的单层材料 5)反而性能更差。因此,对于以 GNS 等为代表的碳质纳米填料与磁性纳米颗粒混合填充的吸波材料设计而言,需要综合考虑吸波性能、填充量等多个指标,才能在充分发挥每种填料各自优势的同时,更好地平衡各种相互矛盾的设计指标。

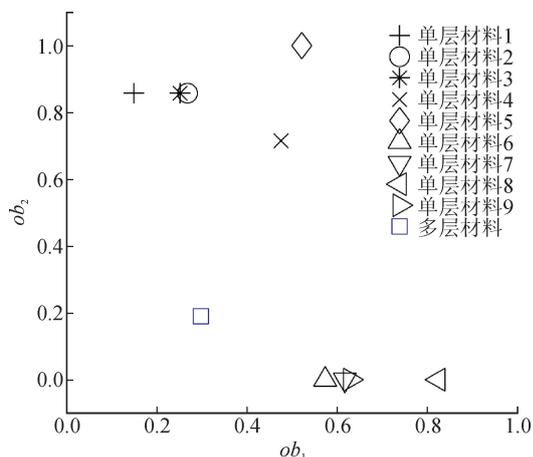


图 4 单层材料与多层材料性能的比较
Fig. 4 Multi-layer honeycomb radar absorbing structure

3 结 论

本文基于 MOPSO,研究了以石墨烯为代表的碳质纳米结构型填料与磁性粒子混合填充多层吸波材料的吸波性能与磁性粒子填充量这两个子目标的联合设计问题。其中,吸波性能子目标兼顾了宽频带、宽角度和极化无关三个特性。进而,将文献中报道的 GNS 单独填充以及 GNS/FCI 混合填充吸波材料组成材料库,通过 MOPSO 迭代得到了五层吸波材料模型的 Pareto 最优解集合,并通过对比该集合中每个非劣解与目标值空间中原点的距离,确定了最终的设计。所得到的厚度为 1.65 mm 的多层 GNS/FCI 混合填充吸波材料仅需 13.3wt% 的 FCI 填充量即可在 6~18 GHz 的频率范围内以及 $0^\circ \sim 45^\circ$ 的入射角范围内,对 TE 波和 TM 波均具有良好

的吸收能力。同时,对目标值空间中各类解分布情况的分析进一步表明,基于 MOPSO 的多目标设计方法能够很好地平衡相互矛盾的子目标从而使多层吸波材料的综合性能达到最优。

参考文献:

- [1] ZHOU Peiheng, HUANG Liru, XIE Jianliang, et al. Prediction of microwave absorption behavior of grading honeycomb composites based on effective permittivity formulas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(8): 3496-3501.
- [2] HOSSEINIPOUR M, SOORKI M N, AHMADIAN M. On effective electromagnetic shielding of modern pulse width modulating adjustable speed drives [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(4): 875-884.
- [3] MIN Dandan, ZHOU Wancheng, QING Yuchang, et al. Single-layer and double-layer microwave absorbers based on graphene nanosheets/epoxy resin composite [J]. 2017, Nano, 12(7): 1750089.
- [4] QING Yuchang, MIN Dandan, ZHOU Yingying, et al. Graphene nanosheet- and flake carbonyl iron particle-filled epoxy-silicone composites as thin-thickness and wide-bandwidth microwave absorber [J]. Carbon, 2015, 86: 98-107.
- [5] REN Fang, GUO Zhengzheng, GUO Han, et al. Layer-structured design and fabrication of cyanate ester nanocomposites for excellent electromagnetic shielding with absorption-dominated characteristic [J]. Polymers, 2018, 10(9): 933.
- [6] 许志远, 李维, 马国庆, 等. 不同电磁特性吸收剂的多层宽带吸波材料设计 [J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(2): 199-204.
- [7] XU Zhiyuan, LI Wei, MA Guoqing, et al. Design of broadband absorbers by multiple layers containing absorbents with different magnetic properties [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2021, 39(2): 199-204.
- [8] TOKTAS A, USTUN D, TEKBAS M. Multi-objective design of multi-layer radar absorber using surrogate-based optimization [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67 (8): 3318-3329.
- [9] TOKTAS A, USTUN D. A triple-objective optimization scheme using butterfly-integrated ABC algorithm for design of multilayer RAM [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68 (7): 5602-5612.
- [9] COELLO C A C, PULIDO G T, LECHUGA M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.

(责任编辑 王绪迪)