

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.01.019

太赫兹隐身涂层反射率参考样品的仿真设计

张雨¹, 杨绪逢², 刘方彪¹, 钟文旭¹, 赵华¹, 孙文慧¹, 王丹勇¹, 荀其宁¹, 姜维维¹, 张军英¹

(1. 中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031; 2. 北京国电富通科技发展有限公司, 北京 100070)

摘要: 为解决太赫兹隐身材料测试评价的准确性问题, 采用计算机仿真技术设计提出了一种仿真模拟方案设计太赫兹隐身材料测试标准物质的方法。通过仿真模拟计算直径2 mm、高度3 mm的金属圆柱下表面雷达散射截面(RCS), 其模拟结果与理论解基本重合证明了模拟技术方案的准确性及可行性。以聚氨酯树脂为基体, 铁氧体、炭黑为填料模拟设计不同介电参数的涂层涂覆在金属圆柱体表面, 形成三种具有不同太赫兹波损耗能力的吸波体, 通过仿真计算方法计算其RCS。最终成功模拟设计出三种在0.1~3 THz的频率范围内标称值为-5, -12, -20 dB的标准物结构。等效反射率均满足±2 dB的标准物设计要求, 达到了最初的设计目的。该模拟设计研究结果为太赫兹隐身材料测试标准物的实际实验合成提供了一定的思路。

关键词: 太赫兹; 反射率; 仿真设计

中图分类号: TQ328.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)01-0104-05

Simulation Design of Reference Sample of Terahertz Waveband Stealth Materials

Zhang Yu¹, Yang Xufeng², Liu Fangbiao¹, Zhong Wenxu¹, Zhao Hua¹, Sun Wenhui¹, Wang Danyong¹, Xun Qining¹, Jiang Weiwei¹, Zhang Junying¹

(1. Institute 53, China North Industries Group Corporation, Jinan 250031, China;

2. Beijing Guodian Futong Science And Technology Development Co., Ltd, Beijing 100070, China)

Abstract : In order to solve the accuracy problem of testing and evaluation of terahertz stealthy materials, a method of designing terahertz stealthy materials testing reference materials by using computer simulation technology was proposed. The radar cross section (RCS) of the lower surface of a metal cylinder with a diameter of 2 mm and a height of 3 mm was calculated through simulation. The simulation results basically coincide with the theoretical solution, which proves the accuracy and feasibility of the simulation technical scheme. With polyurethane resin as the matrix, ferrite and carbon black as the filler, coatings with different dielectric parameters were simulated and designed to be coated on the surface of the metal cylinder to form three types of absorbers with different terahertz wave loss capabilities. Their RCS was calculated by simulation calculation method. Finally, three standard structures with nominal values of -5, -12, -20 dB in the frequency range of 0.1-3 THz were successfully simulated and designed. The equivalent reflectivities meet the design requirements of ±2dB standard, achieving the original design purpose. The simulation design research results provide a certain idea for the actual experimental synthesis of terahertz stealthy material test standards.

Keywords : THz ; reflectivity ; simulation design

太赫兹(THz)波是频率范围为0.1~10 THz的电磁波, 其对应的波长范围为3 mm~30 μm。从频谱位置来看, 其介于微波和红外波之间。与其他频率范围内的电磁波一样, 太赫兹波也可用于成像, 并且与其他特定频率范围电磁波相比, 其图像分辨率较高, 对人体健康危害小, 在非金属及非极性材料中具有较高的透射率, 且空间分辨率较高, 可以

作为无损检测(NDT)技术的有力候选者^[1-4]。近二十年来太赫兹无损检测技术在许多领域得到了广泛应用, 特别是为陶瓷和塑料等非导电材料提供了非接触、精度高、穿透力强的检测方法^[5]。

自太赫兹技术引起了世界范围内的广泛关注以来, 由于其突出的内在优势, 在各个领域取得了一系列的突破, 太赫兹相关电路和电子元器件已广

通信作者: 张军英, 研究员, 主要研究方向为计量测试技术

收稿日期: 2022-10-03

引用格式: 张雨, 杨绪逢, 刘方彪, 等. 太赫兹隐身涂层反射率参考样品的仿真设计[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(1): 104-108, 114.

Zhang Yu, Yang Xufeng, Liu Fangbiao, et al. Simulation design of reference sample of terahertz waveband stealth materials[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(1): 104-108, 114.

泛应用于目前的技术中^[6-9]。太赫兹波的快速应用不可避免地产生了电磁干扰,对精密电子仪器的正常工作产生不良影响。因此,为了有效降低太赫兹信号的干扰,改善太赫兹信号的传输环境,保证仪器正常工作,迫切需求太赫兹波屏蔽/隐身材料。此外,太赫兹雷达技术具有较强的微波频段反隐身能力,可使针对传统微波的隐身装备对太赫兹雷达失去作用;其次,太赫兹波相对于微波具有分辨力高和天线孔径小的特点,可以得到更为清晰的成像效果,增强目标识别能力。为了使雷达探测难以发现,太赫兹隐身技术通过外形设计、吸收材料等手段达到不被雷达探测与定位的目的。太赫兹隐身理论有了比较多样的发展,对于武器装备的太赫兹隐身功能的实现来说,进行隐身结构设计和隐身材料仍是重要的设计方向。从上世纪90年代开始,西方国家在开展太赫兹雷达研究的同时,也开始了太赫兹隐身材料的研究^[10]。由于太赫兹探测技术与隐身材料研发领域的不断发展,对于太赫兹隐身材料测试评价的准确性问题也逐步提上日程。

出于太赫兹隐身材料测试系统评价的考虑,笔者采用矩量法及物理光学法相结合的方法,通过仿真模拟计算了太赫兹隐身材料反射率参考样品,使用计算机仿真设计技术,对太赫兹波段隐身材料反射率参考样品进行设计,计算分析涂覆有不同厚度、介电参数涂层的参考样品雷达散射截面(RCS),获得吸波性能标称值(频率范围0.1~3 THz)为-5, -12, -20 dB的参考样品结构。

1 电磁场数值计算方法

纵观历史发展,求解电磁分布边值包括图解、模拟、解析和数值计算等方法。

矩量法是一种基于离散积分方程求解的常用数值算法,其核心是在定义域内将积分方程离散化,化为矩阵方程,利用矩阵求解方法对矩阵方程求解计算^[11]。当给定外加激励时,采用矩量法即可计算出电流分布系数、散射体电流分布及给定方向的散射场。矩量法求解步骤简单,应用方便,但需要应用一定的数学技巧。并且其计算量较大,当未知量增加时,受计算机运算能力限制,其计算效率低,不适用于电尺寸大的反射体^[12]。此外,当频率较高时,通过矩阵方法已不能准确描述散射体各细节部分。因此,矩量法无法描述高频散射问题中重要的物理本质。

物理光学法在计算散射场电场强度及磁场强度时,采用几何光学近似,省略了矩阵方程的求解,减轻了计算负荷^[13-14]。并且通过计算得出的散射场电场强度及磁场强度可以进一步计算出散射体的RCS。物理光学法可以用于闭合曲面、可展曲面、平板等散射体的法向镜面回波与非法向镜面回波的近似计算。但物理光学法根据高频场的局部性原理,其在求解表面感应电流时完全忽略了各部分感应电流之间的相互作用,仅仅根据磁场近似确定表面感应电流。因此,物理光学法这种高频算法仅适用于电尺寸大的反射体,此时散射体积累的相互作用较小,可以作为独立散射中心的集合处理。

以几何衍射理论、均匀衍射理论和电磁学基本理论为基础,可以将矩量法及物理光学法结合起来,形成两者的混合算法^[15]。这种混合算法可以有效改善单独应用矩量法或物理光学法存在的缺点。两者相结合的算法将散射体分为包含精细复杂结构的矩量区及包含大尺寸平滑结构的物理光学区,从而可以结合两种不同算法的优点以确保计算的精度及效率。通过RCS大小表达其吸波性能强弱。

2 计算条件

2.1 结构条件

为了计算需要,对参考样品形态进行等效处理,基底为金属圆柱结构,底面尺寸固定为直径2 mm圆面,圆柱高度3 mm。通过反射率模拟设计软件,以聚氨酯树脂为基体,铁氧体、炭黑为填料,模拟设计出不同介电参数的介电涂层作为金属圆柱体的上表面涂层。通过基底上表面不同厚度、不同介电参数涂层的RCS优化设计计算,获得吸波性能标称值(0.1~3 THz)为-5, -12, -20 dB的参考样品结构。介电涂层复介电常数 ϵ_{eff} 及复磁导率 μ_{eff} 可以由下式表示:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$

式中: ϵ' 和 ϵ'' 分别为复介电常数实部及虚部; μ' 和 μ'' 分别为复磁导率实部及虚部。

2.2 模型输入条件

- (1) 入射频率范围:0.1~3 THz。
- (2) 射线跟踪几何光学法(RL-GO)。
- (3) 激励设置为平面波激励。

2.3 RCS计算

雷达散射截面即RCS是评定散射体对入射电

磁波散射能力大小的物理量,通常被当作散射体样品的虚拟面积,可以定量表征样品对雷达波散射能力的强弱,即RCS可以用来描述样品的隐身能力大小,RCS越小,其隐身能力越强,越不容易被雷达波捕捉到。

当激励设置为平面波激励时,入射能量密度可以用下式计算:

$$W_i = \frac{1}{2} E_i \times H_i^* = \frac{|E_i|^2}{2\eta_0} \hat{e}_i \times \hat{h}_i^* \quad (3)$$

式中: W_i 为电磁波入射能量密度, E_i 为入射电场强度, H_i 为磁场强度,*代表着复共轭, η_0 为自由空间波阻抗,其值为 $120 \pi \Omega$, $\hat{e}_i = E_i/|E_i|$, $\hat{h}_i = H_i/|H_i|$ 。参考样品截取的总功率 P 可表示为:

$$P = \sigma |W_i| = \frac{\sigma}{2\eta_0} |E_i|^2 \quad (4)$$

式中: σ 代表着目标等效面积。若 R 表示目标距离,且将功率看成均匀各向同性散射,则参考样品散射功率密度 W_s 及散射场电场强度 E_s 可分别表示为:

$$|W_s| = \frac{P}{4\pi R^2} = \frac{\sigma |E_i|^2}{8\pi\eta_0 R^2} \quad (5)$$

$$|W_s| = \frac{1}{2\eta_0} |E_s|^2 \quad (6)$$

由式(5)及式(6)计算可得:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (7)$$

式中,由于激励设置为平面波激励,所以 R 趋近于无穷远,根据储能转换原理,计算远场 RCS 的公式可表达为:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H_s|^2}{|H_i|^2} \quad (8)$$

RCS 通常以面积来表示,其单位为 m^2 ,用 σ 代表,在实际应用中,RCS 单位为 $dB \cdot m^2$,亦可表示为 $dBsm$,RCS 变化范围一般都非常大。因此,为了便于描述及分析,通常由下式取其对数表示:

$$RCS = 10 \lg \left(\frac{RCS}{1.0} \right) \quad (9)$$

3 计算分析

3.1 参考样品下表面 RCS 仿真模拟计算

对参考样品下表面直径为 2 mm 的金属圆面进行仿真 RCS 模拟计算。为提高计算效率,建立直径为 2 mm 的圆平面模型进行计算分析,参考样品下

表面平面模型及分网模型如图 1 所示。每 29 GHz 仿真一个点,共 101 个点。参考样品下表面 RCS 模拟计算与理论值对比图如图 2 所示,由图中 RCS 对比可以看出,本仿真模拟方案的结果与理论解曲线基本重合,吻合较好,验证了本模拟技术方案的准确性。理论解采用常用平板几何体在几何光学区的 RCS 公式 $\sigma = 4\pi A^2/\lambda^2$ 求取,其中 A 为平板面积。

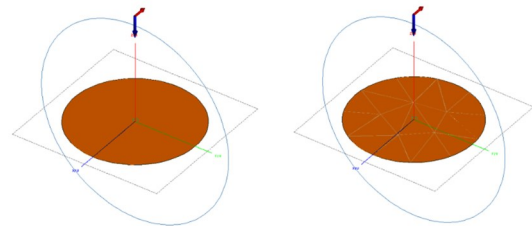


图1 参考样品下表面平面模型及分网模型

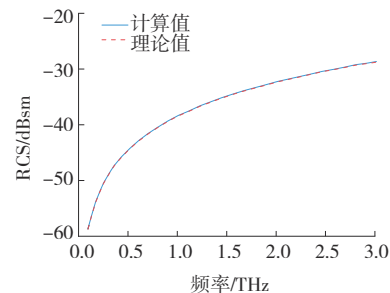


图2 参考样品下表面 RCS 模拟计算与理论值对比图

3.2 参考样品整体结构 RCS 仿真模拟计算

为获取反射率标称值(0.1 ~ 3 THz)为-5, -12, -20 dB 的参考样品结构,对吸波层不同涂层厚度、介电参数的参考样品模型进行 RCS 仿真计算分析,最终优化确定了能满足指标要求的标物结构方案。采用射线跟踪几何光学法,每 29 GHz 仿真一个点,共 101 个点。三种不同涂层结构样品的命名及对应反射率标称值见表 1。

表1 圆柱体上表面涂层结构命名及对应反射率标称值

名称	反射率标称值/dB
涂层结构 1	-5
涂层结构 2	-12
涂层结构 3	-20

(1) 圆柱上表面涂层结构 1 RCS 仿真模拟计算。

圆柱上表面涂层结构 1 的参数见表 2,样品结构建立的几何模型及网络模型如图 3 所示。

圆柱上表面涂层结构 1 的 RCS 随入射频率变化模拟计算结果如图 4 所示,从图 4 中可以看出,在 0.1 ~ 3 THz 的频率范围内,样品的 RCS 随着频率的增大先急速提高后缓慢增加,其 RCS 在 -52.2 ~ -23.9

dBsm之间变化。圆柱上表面涂层结构1等效反射率-频率变化曲线如图5所示。由等效反射率-频率变化曲线可以看到,当入射波频率在0.1~3 THz区间时,其等效反射率满足 (-5 ± 2) dB的设计要求。

表2 参考样品结构1的上表面涂层参数

介电常数 ϵ_{eff}	实部	25.59
	虚部	3.89
磁导率 μ_{eff}	实部	1.82
	虚部	1.08
厚度	0.2 mm	

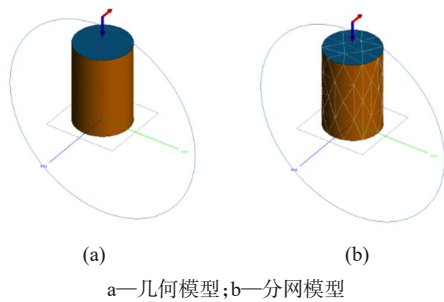


图3 参考样品上表面涂层结构1几何模型及分网模型

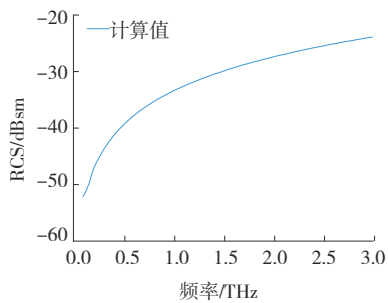


图4 圆柱上表面涂层结构1的RCS-频率变化曲线

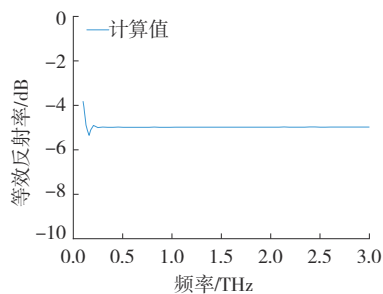


图5 圆柱上表面涂层结构1等效反射率-频率变化曲线

(2) 圆柱上表面涂层结构2 RCS仿真模拟计算。

圆柱上表面涂层结构2的参数见表3,样品建立的几何模型及网络模型如图6所示。

其RCS随入射频率变化模拟计算结果如图7所示,样品的RCS随入射频率变化规律与涂层结构1类似,其RCS在 $-59.6 \sim -31.2$ dBsm之间变化。通过计算得出的等效反射率-频率变化曲线如图8所示,由等效反射率-频率变化曲线可以看到,在0.1~

3 THz的频率区间时,圆柱上表面涂层结构2的等效反射率满足 (-12 ± 2) dB的设计要求。

表3 参考样品结构2的上表面涂层参数

介电常数(ϵ_{eff})	实部	6
	虚部	1.5
磁导率(μ_{eff})	实部	2.03
	虚部	1
厚度	0.5 mm	

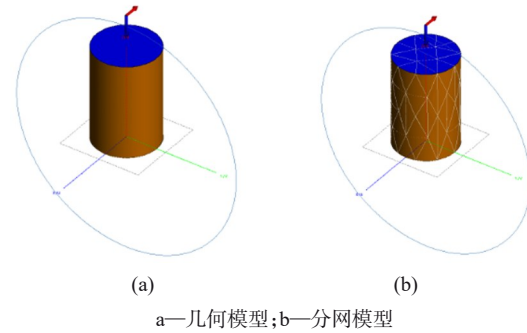


图6 参考样品上表面涂层结构2几何模型及分网模型

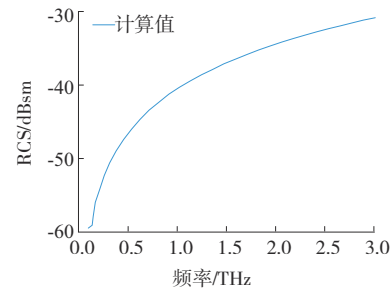


图7 圆柱上表面涂层结构2的RCS-频率变化曲线

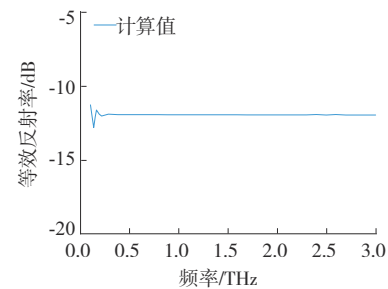


图8 圆柱上表面涂层结构2等效反射率-频率变化曲线

(3) 圆柱上表面涂层结构3 RCS仿真模拟计算。

圆柱上表面涂层结构3的参数见表4,样品结构的几何模型及网络模型如图9所示。

RCS随入射频率变化模拟计算结果如图10所示,样品的RCS随入射频率变化规律与其余两种样品类似,其RCS在 $-67.3 \sim -39.3$ dBsm之间变化。等效反射率-频率变化曲线如图11所示,从图11可看出,在0.1~3 THz的频率范围内,圆柱上表面涂层结构3的等效反射率满足 (-20 ± 2) dB的设计要求。

表4 参考样品结构2的上表面涂层参数

介电常数 ϵ_{eff}	实部	2.98
	虚部	1.5
磁导率 μ_{eff}	实部	2.02
	虚部	0.95
厚度	0.7 mm	

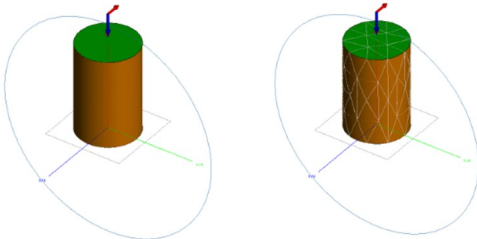


图9 参考样品上表面涂层结构3几何模型及分网模型

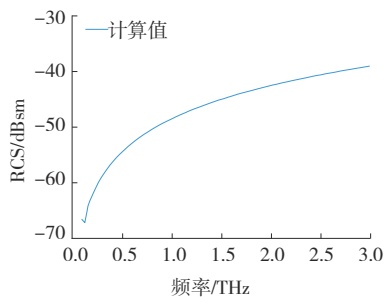


图10 圆柱上表面涂层结构3的RCS-频率变化曲线

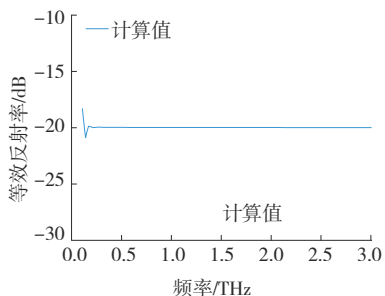


图11 圆柱上表面涂层结构3等效反射率-频率变化曲线

4 结论

通过仿真计算为隐身材料反射率参考样品的设计提供了一种可能性,具备一定电磁参数(复介电常数、磁导率)和厚度的吸收涂层可以满足特定反射率要求的设计指标。使用计算机仿真设计技术,对太赫兹波段 RCS 校准用标准物进行设计,通过计算分析涂覆有不同厚度、介电参数涂层的直径 2 mm、高度 3 mm 金属圆柱 RCS,最终获得了吸波性能标称值(0.1 ~ 3 THz)为-5, -12, -20 dB 的标准物结构。对于直径 2 mm、高度 3 mm 金属圆柱,上表面涂覆介电参数 $\epsilon_{\text{eff}}=25.59-3.89j$, $\mu_{\text{eff}}=1.82-1.08j$ 、厚度 0.2 mm 的涂层结构 1、上表面涂覆介电参数介

电参数 $\epsilon_{\text{eff}}=6-1.5j$, $\mu_{\text{eff}}=2.03-1j$ 、厚度 0.5 mm 的涂层结构 2 和上表面涂覆介电参数 $\epsilon_{\text{eff}}=2.98-1.5j$, $\mu_{\text{eff}}=2.02-0.95j$ 、厚度 0.7 mm 的涂层结构 3 在入射波频率在 0.1 ~ 3 THz 区间时,等效反射率分别满足了 (-5 ± 2) dB, (-12 ± 2) dB 和 (-20 ± 2) dB 的设计要求。

参考文献

- [1] Zhang Xiaoxuan, Guo Qijia, Chang Tianying, et al. Broadband stepped-frequency modulated continuous terahertz wave tomography for non-destructive inspection of polymer materials[J]. Polymer Testing, 2019, 76:455-463.
- [2] Gao Jingkun, Qin Yuliang, Deng Bin, et al. A novel method for 3-D millimeter-wave holographic reconstruction based on frequency interferometry techniques[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(3):1 579-1 596.
- [3] You Chengwu, Lu Chengchangfeng, Wang Tianyi, et al. Method for defect contour extraction in terahertz non-destructive testing conducted with a raster-scan THz imaging system[J]. Applied Optics, 2018, 57(17):4 884-4 889.
- [4] Gao Jingkun, Cui Zhenmao, Cheng Binbin, et al. Fast three-dimensional image reconstruction of a standoff screening system in the terahertz regime[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8(1):38-51.
- [5] Zhang Xiaoxuan, Chang Tianying, Wang Zhongmin, et al. Three-dimensional terahertz continuous wave imaging radar for nondestructive testing[J]. IEEE Access, 2020, 8:144 259- 144 276.
- [6] Jiang Yanwen, Wang Hongqiang, Qin Yuliang, et al. A three-dimensional surface imaging method using THz dual-frequency interferometry[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(11):1 651-1 655.
- [7] Dhillon S S, Vitiello M S, Linfield E H, et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(4). DOI: 10.1088/1361-6463/ 50/4/043001.
- [8] Masanori Hangyo. Development and future prospects of terahertz technology[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(12). DOI 10.7567/JJAP.54.120101.
- [9] Federici John F, Ma Jianjun, Moeller Lothar. Review of weather impact on outdoor terahertz wireless communication links[J]. Nano Communication Networks, 2016, 10:13-26.
- [10] 王宏强, 邓彬, 秦玉亮. 太赫兹雷达技术[J]. 雷达学报, 2018, 7(1): 1-21.
Wang Hongqiang, Deng Bin, Qin Yuliang. Review of terahertz radar technology[J]. Journal of Radars, 2018, 7(1):1-21.
- [11] 马骥, 王浩放, 马蓓丽, 等. 基于子阵策略和区域分解矩量法的电磁散射分析方法[J]. 现代应用物理, 2021, 12(4):100-106.

(下转第 114 页)