



·电磁防护与应用·

微小型无人飞行器电磁屏蔽效能等效测试方法*

金祖升¹, 李建轩¹, 施佳林¹, 张 勇¹, 李国林²

(1. 海军研究院, 北京 10016; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 微小型无人飞行器的屏蔽效能对其抗外部强电磁干扰能力有显著影响。针对微小型飞行器物理空间小、屏蔽效能难以测量的困难, 提出一种基于扩比模型的等效获取方法, 将原模型按比例扩大 n 倍得到扩比模型, 利用常规屏蔽效能测试方法和测试仪器测量得到扩比模型的屏蔽效能, 再根据扩比模型和原模型屏蔽效能的关系得到原模型的屏蔽效能。以巡飞弹和四旋翼无人机两种典型微小型飞行器为例进行了仿真, 结果表明原模型在频率 f 处的屏蔽效能等于扩比模型在频率 $f_1 = fn$ 处的屏蔽效能, 验证了该方法的正确性。在此基础上, 总结提出了基于扩比模型的等效测试流程, 为微小型飞行器屏蔽效能的测试提供了一种可行的测试方法。

关键词: 屏蔽效能; 微小型无人飞行器; 扩比模型; 等效测试方法

中图分类号: TN98

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230261

Equivalent testing method for shielding effectiveness of miniature unmanned aerial vehicle

Jin Zusheng¹, Li Jianxuan¹, Shi Jialin¹, Zhang Yong¹, Li Guolin²

(1. Naval Research Institute, Beijing 100161, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410073, China)

Abstract: The shielding effectiveness of a miniature unmanned aerial vehicle (UAV) has a significant impact on its ability to resist strong external electromagnetic interference. An equivalent method based on a large-scale model is employed to overcome the difficulties of measurement performed inside an extremely small space. In this method, the original miniature UAV is enlarged in proportion with scaling factor n and then a large-scale model is obtained. The shielding effectiveness of the large-scale model can be measured by existing mature instruments and test method. Then, the shielding effectiveness of the original model is obtained according to the relationship between the two models. On this basis, two typical miniature UAVs, i.e., a loitering munition and a quad-rotor UAV, are modeled and simulated. It is validated that the shielding effectiveness of the original model at the frequency f is equal to that of the large-scale model at the frequency $f_1 = f/n$. Thus, the proposed equivalent method is correct and effective. Finally, a testing procedure is outlined for the equivalent method. It provides an available way to obtain shielding effectiveness of miniature UAVs.

Key words: shielding effectiveness, miniature unmanned aerial vehicle, large-scale model, equivalent testing method

近年来, 微小型飞行器作为一种新质作战力量逐渐在现代战场崭露头角。在 2020 年 9 月爆发的纳卡冲突中, 阿塞拜疆大规模使用小型自杀式攻击无人机重创亚美尼亚装备和人员, 为阿方最终赢得战争发挥了重要作用^[1-2]。自俄乌冲突开始以来, 无人机的运用达到了空前规模, 既有几吨重的中大型无人机, 也有几百克重的微型无人机, 以弹簧刀 300 型巡飞弹、小型四轴飞行器、改装的民用四旋翼飞行器为代表的微小型无人飞行器以其成本低廉、使用方便、效费比高, 被作战双方大规模运用^[3-4]。微小型飞行器物理空间小、电子化程度高, 可采取的电磁防护手段有限, 容易受到敌方大功率干扰机的攻击。要保护飞行器内敏感电子设备免受外部电磁干扰, 很大程度上取决于飞行器机体是否具备良好的电磁屏蔽效能。本文以微小型飞行器为研究对象, 针对此类屏蔽体屏蔽效能测量需

* 收稿日期: 2023-08-11; 修订日期: 2023-12-30
基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2020JJ4017)
联系方式: 金祖升, jin_hexi@126.com。

求,分析现有测试方法和测试标准的研究现状、存在的不足,提出一种基于扩比模型的屏蔽效能获取方法,通过仿真计算验证该方法的正确性,在此基础上,提出相应的测试流程,为微小型屏蔽体屏蔽效能的测试提供一种合理可行的等效测试手段。

1 屏蔽效能测试标准分析

屏蔽效能是衡量屏蔽体屏蔽性能的核心指标,其测试方法与屏蔽体尺寸有关。

1.1 国内外主要屏蔽效能测试标准

对于大屏蔽体,即最小边长不小于 2 m 的屏蔽体,屏蔽效能的测试方法比较成熟,有相应的测试方法标准,主要包括 IEEE 299-2006、GB/T12190-2021 和 GJB5792-2006 等^[5-8]。对于任一边长在 0.1~2 m 范围的中小型屏蔽体,需要采用小型化的测试仪器或者专门的测试方法,国际通行测试方法标准为 2013 年颁布的 IEEE STD 299.1-2013^[9],该标准将中小型屏蔽体进一步分为 0.1~0.75 m 和 0.75~2 m 两个尺寸范围,分别采用不同的测试方法。我国于 2003 年颁布了小型屏蔽体屏蔽效能测量标准 GJB 5185-2003^[10],但该标准要求待测屏蔽体的边长不小于 1 m,适用范围有限。2020 年 11 月,我国颁布了 GB/T 39278-2020,该标准适用于 0.1~2 m 尺寸范围的小型屏蔽体,与 IEEE STD 299.1-2013 相对应,弥补了 GJB 5185-2003 的不足,目前处于标准宣贯和应用起步阶段^[11]。对于尺寸更小的微型屏蔽体,常规的屏蔽效能测量仪器难以布置和展开,目前尚未有成熟的测试方法或相关的标准。

1.2 微小型屏蔽体屏蔽效能测试方法的不足

根据 GB/T 39278-2020,对于 0.75~2 m 尺寸范围的小型屏蔽体,屏蔽效能测试方法与大屏蔽体基本相同,区别在于采用了小型化的测试仪器。对于 0.1~0.75 m 尺寸的小屏蔽体,又进一步分为电大尺寸和电小尺寸两种情形,电大尺寸情形采用嵌套混波室测量方法,该方法要求被测屏蔽体内的电磁波传播模式不少于 60 种,更苛刻的是其最低适用频率 f_{\min} 与屏蔽体容积 V 有关,容积越小,对应的最低适用频率越高,当 $V = 0.01 \text{ m}^3$ 时, $f_{\min} \approx 2.68 \text{ GHz}$,当 $V = 0.001 \text{ m}^3$ 时, $f_{\min} \approx 5.78 \text{ GHz}$,严重限制了该方法的应用范围;电小尺寸情形采用磁场测量法,该方法有最高适用频率 f_{\max} 的限制,当屏蔽体最大边长尺寸为 0.1 m 时, $f_{\max} = 300 \text{ MHz}$,当屏蔽体最大边长尺寸为 0.5 m 时, $f_{\max} = 60 \text{ MHz}$ 。此外,由于小型屏蔽体空间小,内部场分布容易受到测试仪器和人员操作的扰动,增加了屏蔽效能测试的难度。

对于尺寸更小的微型屏蔽体,例如微小型无人飞行器,上述方法不适用,目前尚未有相应的测试标准和方法。

综上所述,对于 0~0.75 m 尺寸范围的微小型屏蔽体,被测对象内部空间狭小给测试带来了很大的困难,现有测试方法受到较大限制。

2 屏蔽效能等效获取方法

针对微小型屏蔽体内部空间小、难以开展测量的困难,笔者在文献 [12] 中提出一种可替代的等效测试方法。该方法的基本思路是将微小型屏蔽体进行等比例扩大,得到一个尺寸适中的屏蔽体,再利用现有测试方法和仪器进行屏蔽效能测试。

在外部电磁波照射下,微小型屏蔽体(以下又称为原模型)内部的电场 \mathbf{E} 、磁场 \mathbf{H} 满足麦克斯韦方程组

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2)$$

式中: t 表示时间变量, ε 和 μ 分别表示原模型内部介质的介电常数、磁导率, σ 表示原模型材质的电导率。

已知扩比模型尺寸为原模型尺寸的 n 倍, n 称为扩比因子。类似地,扩比模型内部的电场 \mathbf{E}_1 、磁场 \mathbf{H}_1 也应当满足式(1)和式(2)的麦克斯韦方程组,只不过相应的参数改为时间变量 t_1 、介质介电常数 ε_1 和磁导率 μ_1 和电导率 σ_1 。

根据文献 [12],当各参量满足表 1 所示的关系时,则扩比模型和原模型内部的电磁场幅度相同。换言之,如果把原模型的几何尺寸等比例扩大至原来的 n 倍,并将扩比模型材质的电导率减小至原模型的 $1/n$,同时保持外部照射电磁波的幅度不变而频率降低至原来的 $1/n$,则扩比模型和原模型内部的电磁场幅度相同。

根据 GB/T12190-2021,屏蔽效能(SE)定义为在同一激励下的某点上,有屏蔽体与无屏蔽材料时所测量到的电场强度、磁场强度或功率之比,常以对数形式表示为

$$E_s = k \lg \frac{A_0}{A_1} \quad (3)$$

式中: A_0 为参考电平, 是无屏蔽材料时所测量到的物理量, A_1 为信号电平, 是有屏蔽材料时所测量到的物理量。当 A_0 、 A_1 为电场强度或磁场强度时, $k=20$, 当 A_1 、 A_0 为功率时, $k=10$ 。

综上可知, 当原模型与扩比模型各参量满足表 1 所示的关系时, 原模型在频率 f 的屏蔽效能与扩比模型在频率 $f_1 = f/n$ 的屏蔽效能相同, 而且对不同扩比因子均适用。

基于这一结论, 对于难以直接进行屏蔽效能测试的微小型屏蔽体, 可以通过对其扩比模型进行等效测试来实现。研究表明, 测试对象对电磁波的反射、绕射、透射、衍射的综合电磁效应取决于对象几何尺寸与波长的比例关系, 同样的比例关系表现出来的性能是相同的^[13]。这一效应在电磁兼容领域的典型应用是缩比模型测试方法, 主要是针对舰船、大型天线等难以开展实物测试的对象, 制作等比例缩小模型, 以便利用现有实验条件进行等效测试^[14-15]。扩比模型方法是缩比模型方法的逆过程, 也是电磁比例效应的一个应用。

3 仿真验证与分析

以弹簧刀 300 型巡飞弹和四旋翼无人机两种典型微小型飞行器为算例, 检验扩比模型方法的正确性。首先, 建立飞行器的原模型和相应的扩比模型, 再仿真外部电磁波照射下两个模型内部的电场强度, 然后根据式(3)计算得到各自的屏蔽效能并进行比较。如果两个模型的屏蔽效能结果一致, 说明利用扩比模型获取屏蔽效能的方法是正确有效的。

3.1 仿真模型

弹簧刀 300 型巡飞弹长度 495 mm, 弹体直径 76 mm, 简化三维模型如图 1(a)所示。屏蔽效能仿真模型如图 1(b)所示, 弹体上有一个尺寸为 30 mm×5 mm 的矩形窄缝, 模拟电磁波的后门耦合通道, 弹体材质设置为理想导体, 内部为空气。平面波从弹体外部沿缝隙法线方向照射, 在弹体内部设置场强监测点, 作为记录场强和计算屏蔽效能的参考位置。本文所有模型采用电磁仿真软件 CST 进行计算。

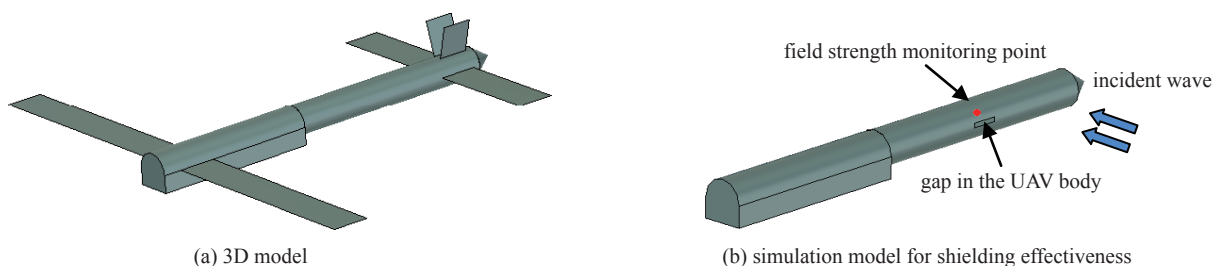


Fig. 1 Simulation model for shielding effectiveness of simplified Switchblade 300 loitering munition

图 1 简化弹簧刀 300 型巡飞弹的屏蔽效能仿真模型

四旋翼无人机的尺寸为 1763 mm×1934 mm×615 mm (机翼展开), 三维模型如图 2(a)所示。机身近似圆台形, 底部直径 390 mm, 高度 140 mm。屏蔽效能仿真模型如图 2(b)所示, 机身有一个 30 mm×5 mm 的矩形窄缝, 模拟电磁波的后门耦合通道, 机身材质设置为理想导体, 内部为空气, 平面波从机身外部沿缝隙法线方向照射, 场强监测

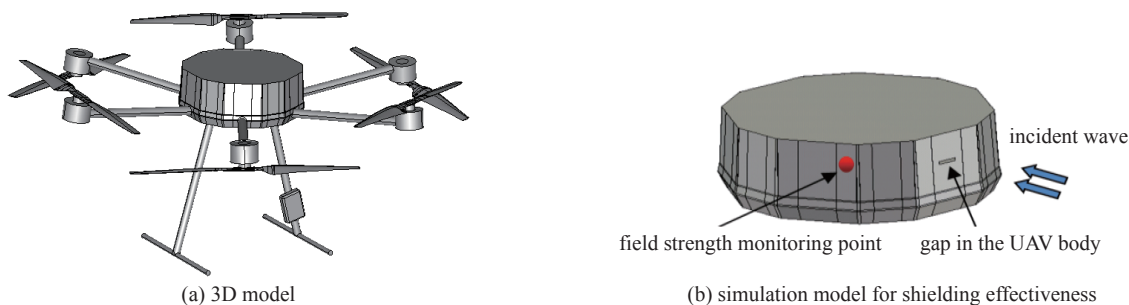


Fig. 2 Simulation model for shielding effectiveness of the quad-rotor UAV

图 2 四旋翼无人机屏蔽效能仿真模型

表 1 原模型与扩比模型各参量之间的对应关系
Table 1 Relations of the parameters between the original model and its large-scale model

| parameter | original model | large-scale model |
|---------------------|----------------|-------------------------|
| length | l | $l_1 = nl$ |
| frequency | f | $f_1 = f/n$ |
| dielectric constant | ϵ | $\epsilon_1 = \epsilon$ |
| permeability | μ | $\mu_1 = \mu$ |
| conductivity | σ | $\sigma_1 = \sigma/n$ |

点位于机身中部。

3.2 结果与分析

算例 1 采用图 1 所示的巡飞弹模型。平面波脉冲从外部照射, 频率范围为 0~10 GHz, 电场幅度 $A_0=1$ V/m, 极化方式为垂直极化。仿真得到场强监测点位置的电场强度 A_1 , 根据式 (3) 计算得到原模型的屏蔽效能 SE, 结果如图 3(a) 所示。接下来, 根据巡飞弹尺寸, 选取扩比因子 $n=5$ 建立扩比模型, 参数关系按照表 1 设置, 经仿真计算得到屏蔽效能 SE 如图 3(b) 所示。结果显示, 原模型在 0~10 GHz 频段的屏蔽效能, 和扩比模型在 0~2 GHz 频段的屏蔽效能对应一致, 最大误差小于 0.1 dB, 这与第 2 节的结论一致。算例 1 表明, 通过扩比模型来获取原模型屏蔽效能的方法是正确可行的。需要指出的是, 图 3 部分频段 SE 值小于 0, 这是由于屏蔽腔体存在谐振效应, 谐振频率及邻近频率的电磁波能量得到增强, 因而在这些频率出现屏蔽效能小于 0 的现象。

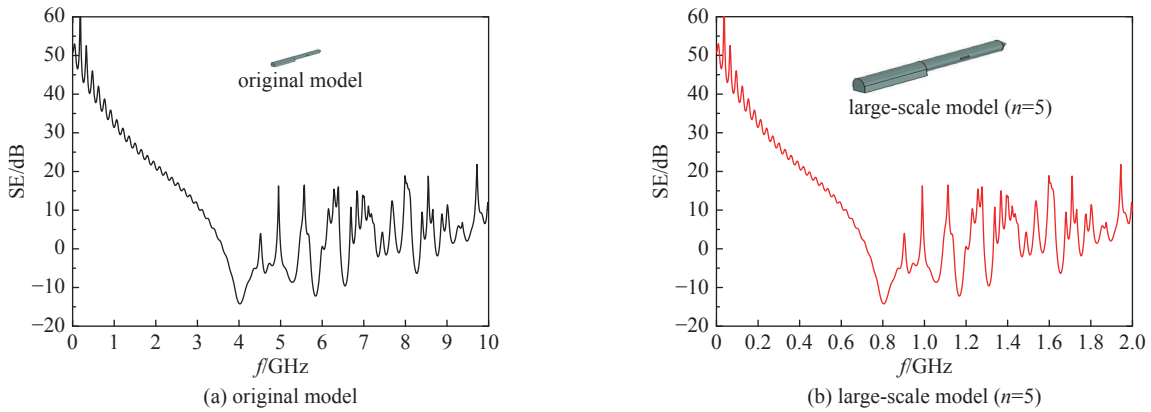


Fig. 3 Computed shielding effectiveness of the original model and large-scale model of the loitering munition

图 3 巡飞弹原模型和扩比模型屏蔽效能计算结果

算例 2 采用图 2 所示的四旋翼无人机模型。平面波脉冲从外部照射, 频率范围为 0~10 GHz, 电场幅度 $A_0=1$ V/m, 极化方式为垂直极化。仿真得到场强监测点位置的电场强度 A_1 , 根据式 (3) 计算得到原模型的屏蔽效能 SE, 结果如图 4(a) 所示。根据四旋翼无人机机身尺寸, 选取扩比因子 $n=5$ 建立扩比模型, 参数关系按照表 1 设置, 计算得到屏蔽效能 SE 如图 4(b) 所示。结果显示, 原模型在 0~10 GHz 频段的屏蔽效能, 和扩比模型在 0~2 GHz 频段的屏蔽效能对应一致, 最大误差小于 0.1 dB。算例 2 同样表明, 通过扩比模型来获取原模型屏蔽效能的方法是正确可行的。

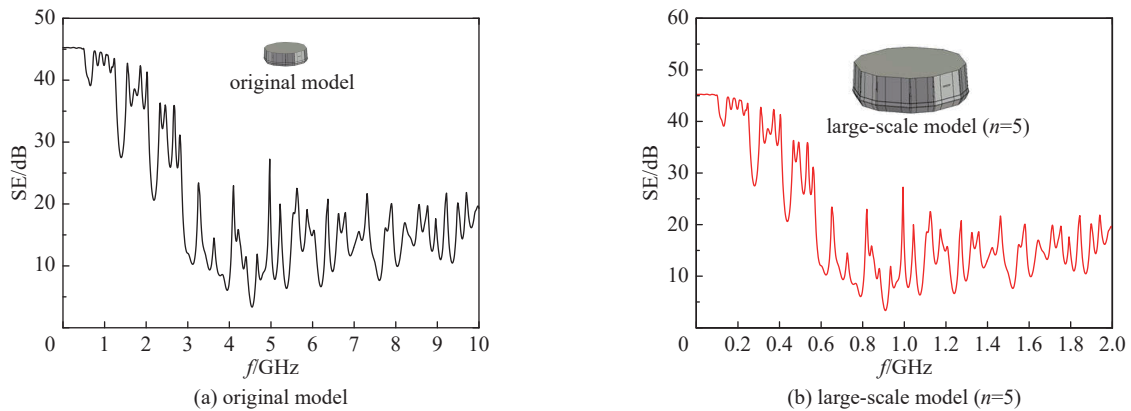


Fig. 4 Computed shielding effectiveness of the original model and large-scale model of the quad-rotor UAV

图 4 四旋翼无人机原模型和扩比模型屏蔽效能计算结果

在以上两个算例中, 算例 1 的巡飞弹模型和算例 2 的四旋翼无人机模型, 材质均设置为理想导体 PEC。接下来分析弹身/机身材质为非良导体材质的情形。

算例 3 采用图 1 所示的巡飞弹模型。弹身为介质材料, 相对介电常数为 4.3, 介质厚度 1 mm, 电导率 $\sigma=100$ S/m, 平面波脉冲从外部照射, 频率范围为 0~6 GHz (频率步进 0.1 GHz), 电场幅度 $A_0=1$ V/m, 极化方式为垂直极化。仿真得到场强监测点位置的电场强度 A_1 , 根据式 (3) 计算得到原模型的屏蔽效能 SE。选取扩比因子 $n=2$ 建立扩比模

型, 设置不同的电导率参数 ($\sigma_1=0.25\sigma$ 、 0.5σ 、 σ) 得到三个不同的扩比模型 (其他参数按表 1 设置), 其中, $\sigma_1=0.5\sigma$ 模型满足表 1 比例关系要求, 称为标准电导率, 其他两个取值分别为标准电导率的 0.5 倍、2 倍, 用以分析电导率偏离对屏蔽效能结果的影响。经仿真计算得到三个扩比模型的屏蔽效能 SE, 如图 5 所示。为了便于比较, 将原模型屏蔽效能 SE 的频率坐标值减小至原来 0.5 倍, 一并显示在图 5 中。结果显示, 对于介质材质, 当原模型和比例模型电导率满足表 1 关系时, 得到算例 1 和算例 2 相同的结论, 即两者的屏蔽效能对应一致。当两者的电导率参数不满足表 1 关系时, 屏蔽效能结果出现偏离。图 5 结果显示, 如果扩比模型的电导率大于标准电导率, 则屏蔽效能一般大于标准电导率对应的屏蔽效能, 反之亦然, 屏蔽效能之间的最大偏离超过 10 dB。由此可见, 对于屏蔽材料为非金属材料情形, 比例模型材质的电导率对屏蔽效能影响显著, 如果材质电导率偏离按表 1 计算得到的标准电导率, 将引起屏蔽效能结果的偏离。

类似地, 算例 4 采用图 2 所示的四旋翼无人机模型。机身介质材料, 相对介电常数为 6.9, 介质厚度 1 mm, 电导率 $\sigma=50$ S/m, 平面波脉冲从外部照射, 频率范围为 0~6 GHz (频率步进 0.1 GHz), 电场幅度 $A_0=1$ V/m, 极化方式为垂直极化。选取扩比因子 $n=2$ 建立扩比模型, 设置不同的电导率参数 ($\sigma_1=0.25\sigma$ 、 0.5σ 、 σ), 得到三个不同的扩比模型 (其他参数按表 1 设置)。经仿真计算得到原模型屏蔽效能、三个扩比模型的屏蔽效能, 如图 6 所示, 同样地, 屏蔽效能的频率坐标值减小至原来 0.5 倍。根据图 6 结果, 可以得到和算例 3 一致的结论。

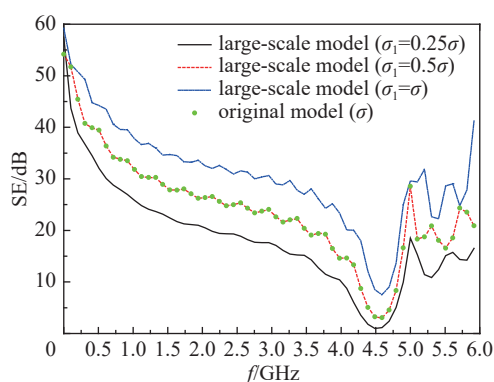


Fig. 5 Shielding effectiveness of the large-scale model of the loitering munition with different σ_1

图 5 巡飞弹扩比模型 (介质材质) 不同电导率参数下的屏蔽效能结果

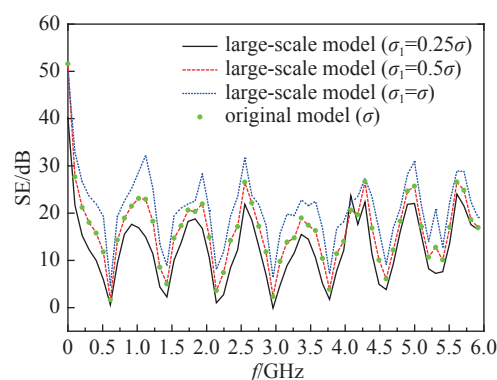


Fig. 6 Shielding effectiveness of the large-scale model of the quad-rotor UAV with different σ_1

图 6 四旋翼无人机扩比模型 (介质材质) 不同电导率参数下的屏蔽效能结果

4 等效测试流程

第 2 节的理论分析和第 3 节的仿真验证表明: 通过测试微小型无人器的扩比模型来获取原模型的屏蔽效能是可行的。这就为微小型无人器屏蔽效能的测试提供了一种新的途径, 即等效测试方法。等效测试方法主要包括以下步骤。

(1) 合理确定扩比因子 n 。综合考虑待测微小屏蔽体尺寸、测试频率、测试仪器尺寸和能力、测试成本等因素, 合理确定扩比因子 n , 使扩比模型内部空间满足接收天线 (或场强探头) 的布置要求, 可开展屏蔽效能测试。通常, 扩比模型的尺寸在 0.75~2 m 尺寸范围为宜, 如有必要可以进一步放大到 2 m 以上。

(2) 加工制作 n 倍等比例扩比模型, 如图 7 所示, 扩比模型与原模型各参量之间满足表 1 的对应关系。根据文献 [12], 当屏蔽体材质为良导体时, 为了简化材料制备, 扩比模型电导率可以近似采用和原模型相同的电导率, 这种近似对屏蔽效能影响较小。当屏蔽体材质为非导体材质时, 这种近似会引起屏蔽效能影响较为明显的偏离, 图 5 和图 6 的结果验证了这一结论。复合介质材料电导率的准确测量和精确控制是加工介质材质扩比模型的关键, 相关工作有待进一步开展研究。

(3) 搭建基于扩比模型的等效测试系统。测试系统包括发射装置、接收装置和待测装置三部分, 如图 8 所示。其中, 发射装置包括信号源和功率放大器, 用于产生所需频率的电磁场信号; 接收装置包括接收传感器和测量接收机, 用于测量接收信号; 待测装置为扩比模型。

(4) 基于扩比模型开展屏蔽效能测试, 得到扩比模型的屏蔽效能。测试过程主要包括参考电平 A_0 测试和信号电平 A_1 测试两个步骤。首先, 按图 9(a) 布置, 将发射装置和接收装置都置于扩比模型外并保持规定的距离, 记录

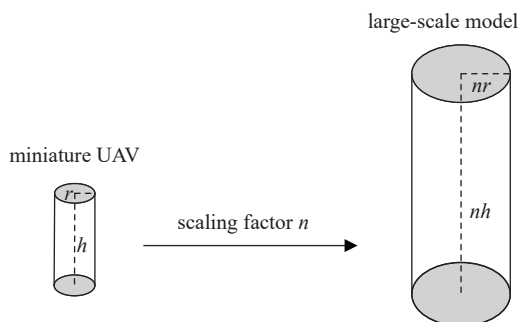


Fig. 7 Miniature UAV and its large-scale model
图 7 微小型无人飞行器 n 倍等比扩大示意图

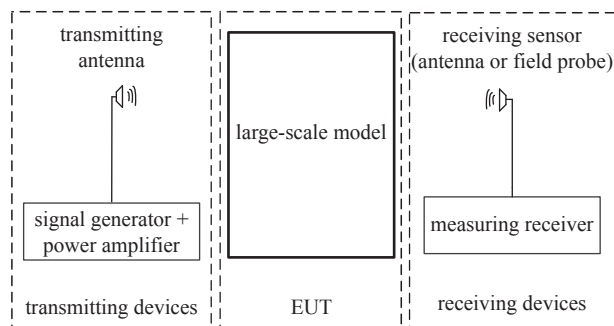


Fig. 8 System composition of equivalent testing method for shielding effectiveness

图 8 基于扩比模型的屏蔽效能等效测试系统组成图

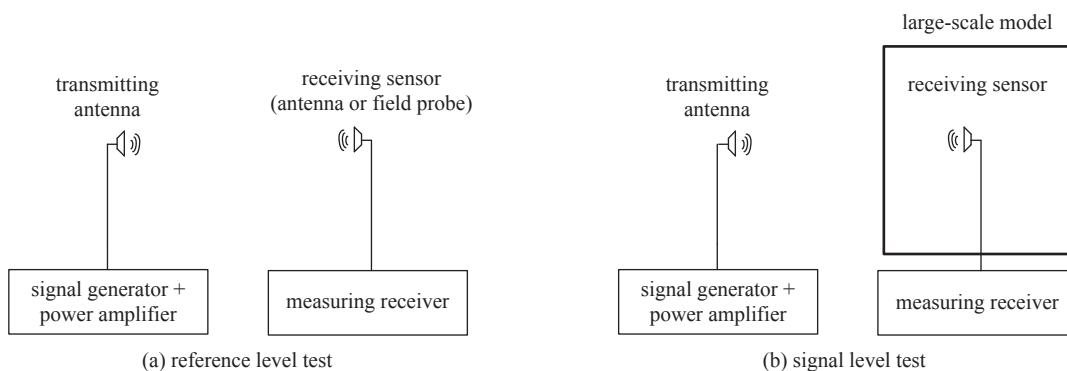


Fig. 9 Equivalent testing method for shielding effectiveness based on a large-scale model

图 9 基于扩比模型的屏蔽效能等效测试方法

接收传感器接收的参考电平 A_0 。然后,按图 9(b) 布置,将接收传感器布置于扩比模型内,记录接收传感器接收的信号电平 A_1 。 A_0 和 A_1 的详细测试方法可参考 GB/T12190-2021、GB/T 39278-2020 等现行屏蔽效能测试标准。将 A_0 、 A_1 代入式(3)计算得到扩比模型的屏蔽效能。

(5) 得到原模型的屏蔽效能。根据第 2 节的结论,当原模型与扩比模型满足表 1 的参量关系时,原模型在频率 f 处的屏蔽效能与扩比模型在频率 $f_1 = f/n$ 处的屏蔽效能相等,由此得到原模型的屏蔽效能。

基于扩比模型开展屏蔽效能测试有以下三个方面的优势:

(1) 有严格的电磁场理论支撑,对原模型进行等比例扩大并不会引入额外的误差,保证了屏蔽效能测量结果的准确性。

(2) 可有效克服微小型飞行器物理空间小、测量装置难以布置实施的困难,提供了一种可行的测试手段。

(3) 可充分利用现有较为成熟的屏蔽效能测试设备和测试方法,测试方无需为微小型屏蔽体开发专门的仪器设备,对测试人员进行专门的培训,降低了测试成本。

5 结 论

针对微小型飞行器屏蔽效能测试难题,提出了基于扩比模型的等效获取方法,通过算例对该方法进行了验证,在此基础上总结了屏蔽效能等效测试流程。研究表明,当原模型和扩比模型的参数满足表 1 的约束关系时,原模型在频率 f 处的屏蔽效能等于扩比模型在频率 $f_1 = f/n$ 处的屏蔽效能。因此,可以通过对扩比模型进行等效测试获得原模型的屏蔽效能。

与常规屏蔽效能测试方法相比,等效测试方法克服了微小型飞行器内部空间小、屏蔽效能难以直接测量的难题,而且可充分利用现有成熟的屏蔽体屏蔽效能测试设备、测试方法,大大降低了对测试场地、仪器、人员的投入成本。在实际工程应用中,等效测试方法的关键在于扩比模型材质的制备,对于良导体材质屏蔽体,扩比模型可以选用和原模型相同的材质^[12],对于非良导体材质屏蔽体,难点是扩比模型材质参数的准确测量和控制,这是一个有待进一步研究解决的问题。随着应用需求的增长和材料测试、制备工艺的不断进步,扩比模型的加工制作难度降低,本文方法将展现独特的优势。

参考文献:

- [1] 陈黎. 从纳卡冲突看无人机/反无人机作战的未来发展[J]. 国防科技工业, 2021(1): 54-57. (Chen Li. Future development of UAV/Anti UAV operations from the perspective of Nagorno-Karabakh conflict[J]. Defense Science & Technology Industry, 2021(1): 54-57)
- [2] 陈浩天, 聂玉宝, 郭海龙. 纳卡冲突中无人机攻防及其启示[J]. 航天电子对抗, 2020, 36(6): 61-64. (Chen Haotian, Nie Yubao, Guo Hailong. Revelations of attack and defense of UAV in Nagorno-Karabakh conflict[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2020, 36(6): 61-64)
- [3] 杨佳会, 朱超磊, 许佳. 俄乌冲突中的无人机运用[J]. 战术导弹技术, 2022(3): 116-123. (Yang Jiahui, Zhu Chaolei, Xu Jia. Analysis of UAV deployment in Russia-Ukraine conflict[J]. Tactical Missile Technology, 2022(3): 116-123)
- [4] Khurshudyan I, Ilyushina M, Khudov K. Russia and Ukraine are fighting the first full-scale drone war[EB/OL]. (2022-12-02). <https://www.washingtonpost.com/world/2022/12/02/drones-russia-ukraine-air-war/>.
- [5] 李立嘉, 沙长涛. 小屏蔽体屏蔽效能的测量方法[J]. 安全与电磁兼容, 2017(2): 86-88. (Li Lijia, Sha Changtao. Test methods for shielding effectiveness of small-sized shielding enclosure[J]. Safety & EMC, 2017(2): 86-88)
- [6] 黄刘宏, 杨吉祥, 陈晋兴, 等. 电磁屏蔽室屏蔽等级和测量方法研究[J]. 电子科技, 2014, 27(10): 171-174. (Huang Lihong, Yang Jixiang, Chen Jinyang, et al. Study on shielding effectiveness and measurement methods for electromagnetic shielded enclosure[J]. Electronic Science and Technology, 2014, 27(10): 171-174)
- [7] IEEE 299-2006, Standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures[S].
- [8] GB/T 12190-2021, 电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法[S]. (GB/T 12190-2021, Method for measuring the shielding effectiveness of electromagnetic shielding enclosures[S])
- [9] GJB 5792-2006, 军用涉密信息系统电磁屏蔽体等级划分和测量方法[S]. (GJB 5792-2006, Classification and measurement methods for shielded enclosures of military security information systems[S])
- [10] IEEE 299.1-2013, Standard method for measuring the shielding effectiveness of enclosures and boxes having all dimensions between 0.1 m and 2 m[S].
- [11] GB/T 39278-2020, 0.1m~2m 屏蔽壳体屏蔽效能的测量方法[S]. (GB/T 39278-2020, Method for measuring the shielding effectiveness of shielding enclosures having all dimensions between 0.1 m and 2 m[S])
- [12] Jin Zusheng, Li Jianxuan, Shi Jialin, et al. An equivalent method for measuring shielding effectiveness of a microminiature electromagnetic shield using its large-scale model[C]//2022 IEEE 9th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. 2022: 361-365.
- [13] 丁雪. 电磁兼容缩尺比测试方法介绍[J]. 电子质量, 2007(3): 4-5. (Ding Xue. Introduction of reduced-scale model for EMC test[J]. Electronics Quality, 2007(3): 4-5)
- [14] Law P E Jr. Shipboard electromagnetics[M]. Boston: Artech House, 1987.
- [15] 汤仕平, 陈黎平, 万海军, 等. 电磁兼容性船模预测在电波暗室内的实现[J]. 中国造船, 2006, 47(2): 42-49. (Tang Shiping, Chen Liping, Wan Haijun, et al. Realization of electromagnetic compatibility ship model prediction in anechoic chamber[J]. Shipbuilding of China, 2006, 47(2): 42-49)