

电磁波入射角对小型机载天线罩透波率的影响测试

李进杰¹, 李宝鹏¹, 顾小豪², 肖虎³

(1. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 中国人民解放军 91428 部队, 浙江 宁波 315400;
3. 中国人民解放军 93808 部队, 兰州 730109)

摘要: 机载天线罩良好的透波率是保证天线系统高效工作重要因素, 透波率除了受天线罩本身状况影响外, 还与电磁波的方向、频率、极化等因素有关; 为解决天线罩透波率测试系统构建复杂、实现困难、测试误差大等问题, 构建了一种天线罩透波率测试系统, 并对不同电磁波频率、入射角下天线罩透波率进行测试, 通过对平面螺旋天线罩的实测表明: 低频段不同的入射角对天线罩透波率造成的影响较小, 高频段大入射角时对透波率影响较大。

关键词: 机载天线罩; 透波率; 入射角; 测试

Testing of Effect of Incident Angle of Electromagnetic Wave on the Wave Penetration Rate of Small Airborne Radome

Li Jinjie¹, Li Baopeng¹, Gu Xiaohao², Xiao Hu³

(1. Qingdao Branch of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China;

2. Unit 91428 of PLA, Ningbo 315400, China; 3. Unit 93808 of PLA, Lanzhou 730109, China)

Abstract: Good transmittance of airborne radome is an important factor to ensure the efficient operation of antenna system. The transmittance is not only affected by the condition of radome itself, but also by the direction, frequency and polarization of electromagnetic wave. In order to solve the problems such as: complex construction, difficult realization and large test error of radome transmittance test system, etc., a radome transmittance test system is constructed, and the radome transmittance under different incident angles electromagnetic wave frequencies is tested. The measured results of planar helical radome show that different incident angles in low frequency band have less influence on the transmittance of radome, while large incident angles in high frequency band have greater influence on the transmittance.

Keywords: airborne radome; wave penetration rate; incident angle; test

0 引言

机载天线罩是与天线配套的重要部件, 它安装在机体上保护天线免受不利环境危害, 以此增加天线的使用寿命, 保证天线正常的工作效率。天线罩在保护天线的同时还要满足天线发射接收的全部电性能要求, 即对电磁波信号的传输具有最小的波瓣畸变和功率吸收, 天线罩的透波率是天线高效工作的重要保证。天线罩在使用过程中可能会因为老化、损伤等原因造成透波性的下降, 会导致天线辐射的主瓣衰减, 副瓣电平升高, 一定程度上会降低所附属机载设备的作用距离和工作精度^[1]。另外, 由于不同种类的天线罩有特殊的外型构造设计, 结构和壁厚的不同也会导致天线罩不同的位置上透波率的变化。因此, 在天线使用过程中必须要掌握天线罩的透波率情况, 寻求科学合理的天线罩的透波率测试方法, 研究电磁波入射角度、极化方式、天线罩损伤等因素对天线罩透波率的影响, 对天线罩

的透波率开展测试研究, 有利于指导天线罩的维护与使用, 还可以为天线罩电性能的改进提供有力支撑。

1 天线罩透波率

1.1 天线罩类型

根据罩壁结构形式, 天线罩可分为以下几种类型: A型夹层、B型夹层、C型夹层、单层结构、多层结构以及含金属物的人工介质等^[2]。机载天线罩常采用A型夹层。如图1所示, A型夹层由两层介电常数较低的芯层所组成, 具有能量损耗低的特点, 芯层厚度有特殊的要求, 可以使电磁波在两层蒙皮上的反射抵消。A型夹层罩大多使用有机材料制造, 可以获得较高的力学强度, 但是为了获取较高的隔热性能, 使罩内天线在高温下得到保护, 有些A型夹层罩使用了无机材料制备的夹层, 以满足天线罩透波性较高的要求。

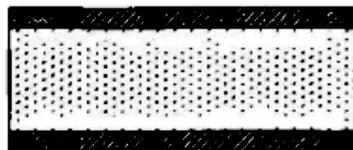


图1 A夹层天线罩结构

收稿日期: 2019-08-21; 修回日期: 2019-09-29。

作者简介: 李进杰(1975-), 男, 山东平度人, 海军航空大学青岛校区副教授, 主要从事航空电子对抗技术方向的研究。

通讯作者: 李宝鹏(1986-), 山东德州人, 海军航空大学青岛校区讲师, 主要从事电磁环境仿真方向的研究。

1.2 透波率

电磁波在透过天线罩时会因为介质的传播和反射造成一定的衰减,这种特性称为天线罩的透波性。天线罩透波性常采用透波率描述。

假设电磁波透过天线罩在电场远区产生的最大辐射功率 P_1 , 相同条件下电磁波透过没有天线罩的空间在电场远区产生的最大辐射功率为 P_0 , 则透波率 T^2 可用式 (1) 表示, 透波率也称为功率传输系数。

$$T^2 = \frac{P_1}{P_0} * 100\% \quad (1)$$

天线罩的好坏极大程度上由透波率决定, 透波率直接影响到天线工作的作用距离, 天线罩的透波率越高, 信号的衰减越少, 天线的工作距离就会越远。表 1 为不同类型天线罩对透波率的要求。

表 1 常见天线罩透波性率

种类	波段	最小值/%	平均值/%
充气罩	L,S	95	97
介质桁架罩	C	90	94
金属桁架罩	S	75	80
鼻锥机头罩	X	75	85
蛋卵机头罩	X	85	90
导弹天线罩	X	75	90

1.3 影响透波率因素

天线罩的罩壁是一个非常复杂的结构, 不同种类的天线罩的设计和制作工艺也有很大区别, 不同结构的天线罩会使电磁波在它内部传输和投射的特性千差万别。对于天线罩而言, 它的电学性能一般由其电学厚度所决定, 而电学厚度又跟天线罩的结构厚度、介电性能 (损耗角的正切值和介电常数)、能量损耗、工作频率、结构形式等多方面因素有关^[3-4]。

1.3.1 结构厚度

天线罩的结构厚度对其电学性能的影响是成指数级变化的, 不同型号的天线罩使用的材料厚度都有严格的规定。天线罩想要在毫米波段获得高的透波性能, 必须设计特殊的物理结构, 减小其结构厚度, 比如夹层结构、单层薄壁结构等。薄壁结构要求天线罩的结构厚度要小于电磁波波长的 $1/20$, 假设天线工作的频带为 $2 \sim 18$ GHz 时, 设计出来的天线罩的结构厚度应当小于 1 mm, 虽然这样可以满足对天线罩透波率的要求, 但是无法承受飞行器飞行时的高速运动引起的巨大压力, 其强度不足以保护内部的天线正常工作, 这种结构只能在对结构强度要求不高的场合中使用。

1.3.2 介电性能

当介质材料处于交变的电磁场之中时, 其本身会反复被极化, 这才引发了材料的介电性能, 而在其受到极化以后, 会产生一种电荷, 名叫受感电荷, 这种电荷的组合形成的电场方向与原电场方向是相反的, 也就是说外加电场

受到了削弱^[4]。电介质的介电性能与选用的透波材料的电阻率、损耗角正切和介电常数有关。在计算材料的透波性能时, 电阻率不能用来评价微观电性能的变化, 常使用损耗角正切 $\tan\delta$ 和介电常数 ϵ 来描述。电磁波在介质中传输时的反射系数与介电性能的关系如下:

$$\Gamma = \frac{(\epsilon - \sin^2\theta)^+ - \epsilon \cos\theta}{(\epsilon - \sin^2\theta)^+ + \epsilon \cos\theta} \quad (2)$$

可见, 材料的介电常数越大, 电磁波在天线罩内受到的反射越大, 此时透波率会受到影响, 并且大的介电常数要求的天线罩结构厚度就要更薄, 因此也影响了其力学性能。

1.3.3 能量损耗

现代新型材料一般都具有低介质损耗的特点, 工程上天线罩采取这类材料可以有效地提高它的工作性能, 使其具有较低的吸收率和反射率、较高的透波率。电磁波在有耗介质中的传播, 遵守相应的能量守恒规律:

$$|T|^2 + |R|^2 + L = 1 \quad (3)$$

对于一般的极化波而言, 其电磁波的能量损失 L 与波长有如下关系:

$$L = \left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) [(\epsilon * \tan\delta) / (\delta - \sin^2\theta)^+] \quad (4)$$

由此可知, $\tan\delta$ 越大, 电磁波在介质中传输时的热损耗也就越大, 为了保证传输效率, 必须要求透波材料的介电常数和损耗角正切值要小。

2 透波率测试系统

常见的天线罩电性能测试方法有搜零法与电子定标法, 两者各有优缺点^[5-6]。搜零法的精度较高, 因为其本身能够将误差的电压放大处理, 但是设备较大, 搜零系统的响应时间长, 以此带来的是误差的滞后性。而电子定标法由于系统简化了不少, 所以不存在动态响应的问题, 可是它不是一个动态的调节过程, 会产生实验误差的积累, 这就要求系统的稳定性必须足够高才可以降低误差。类似的天线罩电性能测试方法还有很多, 如动态跟踪法、旋转天线法等等, 每一种方法都有其独特的优势, 可以根据需要在测试时选取适合的方法^[7]。

本文采用微波暗室下的天线远场测试系统测量天线罩电性能, 该系统可以在无反射波、无背景噪声的条件下对天线罩的透波率进行测试, 可测频带范围广、测量参数多、实验的精度高。

2.1 天线远场测试系统

如图 2 所示, 天线远场测试系统是在基于微波暗室的场地上构建完成的, 能够满足一定频率范围和尺寸结构的天线方向性测试需求, 通过合理的方案设计, 也可进行天线罩的常用电性能参数的精确测试。天线远场测试系统中主要包括:

- 1) 测试用转台系统;
- 2) 标准发射天线和接收天线;
- 3) 天线自动测量系统;
- 4) 矢量网络分析仪;
- 5) 主控计算机;
- 6) 待测机载天线罩;
- 7) 射频电缆。

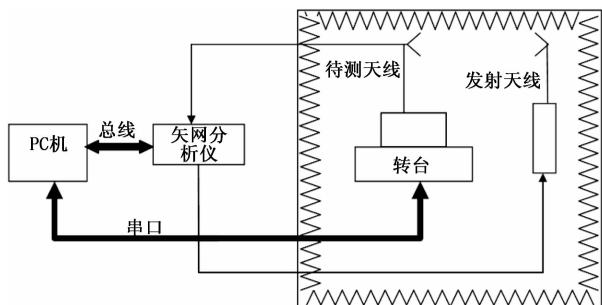


图 2 A 天线远场测试系统组成

天线远场测试系统采用 AV3672B 型矢量网络分析仪作为测试数据采集仪器, 与安装好的转台系统和被测天线罩搭配起来使用, 通过总线将数据传输到主控计算机中, 为了让主控计算机能够采集数据, 还在主控计算机中安装了相关的数据采集程序。采用微波暗室下的天线测量系统测试天线罩电性能具有以下优点:

1) 系统的频带较宽, 能够实现 0.1~40 GHz 频带内的透波率的测试。能够测量电长度在符合测试系统要求范围内机载天线的方向图、增益、3 dB 带宽等参数。

2) 采用了电磁屏蔽技术。该天线远场测试系统安装于微波暗室内, 利用了屏蔽壳体, 屏蔽门以及特殊的吸波材料, 不仅满足了暗室内的无反射效果, 还保证了电磁屏蔽效果符合预期的设计要求。

3) 实现了测试仪器的控制。通过将标准 SCPI 命令通过 GPIB 总线发送给矢量网络分析仪, 实现对测试参数的控制。通过 RS232 对转台的单片机发送控制指令, 完成对转台的转速和角度的控制。

4) 采用了基于时域校准算法的数据分析技术。天线远场测试系统的测试软件对测试数据进行分析时采用了时域校准算法, 有效抑制了系统噪声, 减小毛刺, 提高了测试精度和动态范围。

2.2 透波率测量方法

搭建如图 3 所示的天线罩测试架构, 发射天线使用系统配套的喇叭天线, 接收天线使用被测的平面螺旋天线, 被测天线罩为平面螺旋天线配套天线罩。

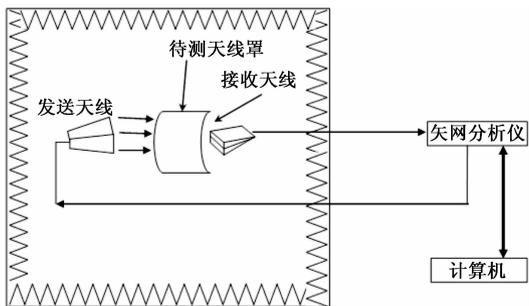


图 3 天线罩透波率测试原理图

将发射天线与矢网 1 端口相连, 接收天线与矢网 2 端口相连。测试时必须保证发射支架的中心与接收支架的中心 0° 对准, 两个支架之间必须要有合适的距离, 距离过大会引

起电磁波衰减过多, 距离过小则导致前后两次接收电磁波的方向图差别较小不具备可比性。为了满足天线远场测试系统的要求, 两个支架间的距离由公式 (5) 得出:

$$R \geq (D_1 + D_2)^2 / \lambda \quad (5)$$

其中: f_m 为测试的最低频点, c 为光传播的速度, λ 为发射的电磁波波长, D_1 为发射天线的直径, D_2 为接收天线的直径, R 为两个支架之间的距离。

远场测试系统中, 信号增益等于接收天线接收信号的功率与发射天线发射信号功率的比值, 矢网分析仪通过总线可以接收到信号的增益, 可以通过 S_{21} 参数获得, 计算方法如 (式) 6 所示。式中, P_r 是接收天线的信号功率, P_s 是发射天线发射的功率大小:

$$S_{21} = 10 \log \frac{P_r}{P_s} S_{21} \quad (6)$$

分别测量接收天线在装配和卸载被测天线罩两种情况下矢网分析仪的 S_{21} 参数, 记为 $S_{21(有)}$, $S_{21(无)}$ 根据式 (1) (6)、(8), 推导出透波率计算公式如式 (7) 所示:

$$|T|^2 = 10^{(S_{21(有)} - S_{21(无)})} * 100\% \quad (7)$$

通过该系统, 可以实现不同极化方式、不同入射方向、不同频率变化下的透波率测试, 测试流程如图 4 所示。

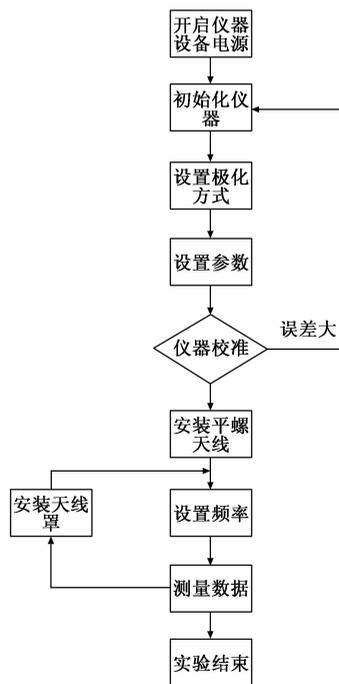


图 4 天线罩透波率测试流程图

3 入射角度对小型天线罩透波率影响测试

选用某型机载测向天线及配套天线罩为测试样品, 该天线为平面螺旋天线, 其天线罩的材料是玻璃钢材质, 属于 A-夹层结构天线罩, 其外形为蛋卵形, 如图 5 所示。该天线罩外形尺寸较小, 表面曲率较大, 部位结构较为复杂, 可能会对电磁波在介质中的传输产生影响, 从而导致天线的方向图产生畸变, 影响透波率。

由于平螺旋天线的工作频率是 2~18 GHz, 随着工作频

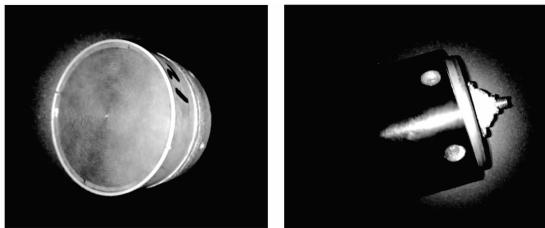


图 5 平螺旋天线及加罩后实物图

率的增大, 天线方向图在后向上会发生严重畸变, 有的时候数据会产生跳点, 并且接近天线的频率上限时, 数据的可靠性会极大下降。因此, 测试频率范围设置为 2~16 GHz。

接下来利用该系统测试该型天线罩进行测试, 研究电磁波入射角度和频率, 对天线罩透波率的影响。

3.1 典型频率下入射角度对透波率影响测试

根据双臂螺旋线的理论分析, 在 2~18 GHz 内的宽带范围内, 后向辐射一部分经背腔反射后, 辐射将直接影响前向辐射, 会导致天线方向图发生畸变。在工作频率较低的时候, 后向辐射绝大部分可以被利用起来, 在工作频率增大的时候, 方向图的严重畸变会影响后向天线罩透波率的测量效果。因此, 选取 2 GHz, 6 GHz, 12 GHz 三个具有代表性的频点, 对入射波入射角在前向 $-60^\circ \sim +60^\circ$ 变化时的透波率进行测试, 透波率随角度的变化情况如图 6 所示。表 2 列出了在 2 GHz, 6 GHz, 12 GHz 频点典型入射角时透波率大小。

表 2 天线罩不同入射角下透波率的变化

频率 \ 角度	-60°	-30°	0°	30°	60°
2G	97.6	96.7	95.1	92.3	90.8
6G	91.0	86.1	88.9	93.9	84.9
12G	95.9	74.9	98.9	95.1	92.5

可以看出, 频率较低的情况下, 天线罩的透波率保持在 $[90\%, 98\%]$ 之间, 表现出了良好的透波性能, 平螺旋天线接收信号的性能几乎不受天线罩的影响, 这说明在低频段该天线罩可以较好的满足透波率要求。随着频率的升高, 入射角度对天线罩的透波率影响逐渐明显, 尤其是在频率为 12 GHz 时, 透波率在 0° 时达到最大值。随着入射角的变大, 透波率在 $0^\circ \sim \pm 30^\circ$ 内出现下降趋势。这说明, 电磁波在介质中传输的辐射特性出现不同程度的波动, 当频率升高时, 天线罩的外形和结构参数会对透波率造成一定影响。

3.2 典型角度下频率对透波率影响测试

为了进一步研究不同角度下频率变化对透波率的影响, 选取 $\pm 0^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 入射角度下测试不同频率下透波率的变化情况, 如图 7 所示。

从图 (a) 中我们可以看出, 当入射角度为 0° , 即接收天线正对发射天线时, 天线罩的透波率随频率的升高略有下

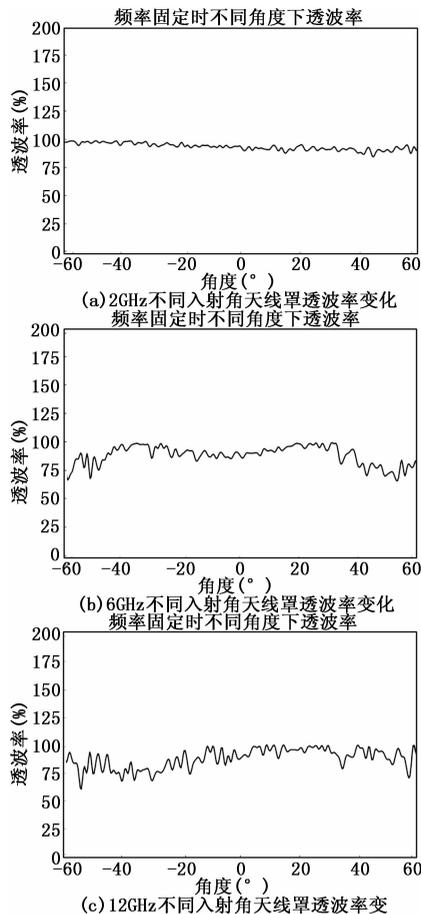


图 6 频率固定时天线罩透波率随不同入射角的变化曲线

降, 但变化趋势不明显, 相比之下, 对比图 (b), (c), (d), 随着入射角的变大, 频率的升高对天线罩的透波率影响非常大, 在较高频段, 大入射角情况下, 天线罩的透波率有时甚至低于 20%, 已经严重影响到了平螺旋天线的正常工作, 这说明了在设计天线罩的电性能的过程中, 必须对频段较高时的天线罩的透波率是否达到指标要求列为考虑的重要因素, 特别是此时天线罩的外形和结构特征会对不同角度入射的电磁波产生不同程度的辐射, 对天线罩的透波率影响较大。

综合 3.1 与 3.2 的测试结果分析, 得出的综合结论如下:

1) 入射角较小时, 频率的升高对天线罩的透波率影响不大, 在发射天线与接收天线正对的情况下, 透波率在所有频点上基本保持 90% 以上, 满足天线罩的透波率要求。在大入射角的情况下, 天线罩的透波率会随着频率的升高急剧下降, 尤其是 90° 以上时, 透波率有时不到 50%, 导致平螺旋天线在没有正对目标时接收电磁波的效率降低, 极大限制了天线的作用距离和测向精度, 这是由于在天线罩表面曲率大的时候, 电尺寸参数会随频段升高而逐渐变大。

2) 入射角度一定时, 相同频率下天线罩的不同表面的透波性能的区别也很大, 这是由于天线罩在长期使用和维护

(下转第 13 页)