

蛋卵形天线罩损伤性能测试方法研究

夏 栋, 李淑华, 李宝鹏

(海军航空大学 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 为了得到蛋卵形天线罩物理损伤对机载火控雷达性能的影响, 研究了天线罩透波特性的测量方法, 并对破损区域的透波性能和破损天线罩透波一致性进行了测量; 选取了透波率和插入相位移作为衡量天线罩透波性能的指标, 针对透波率和插入相位难以测量的问题, 提出了通过矢量网络分析仪测量 S 参数的 s_{21} 分量间接测量天线透波率和插入相位移的方法; 首先对不同损伤程度区域的透波特性进行了测量, 结果表明破损区域边缘透波性能下降明显; 然后对蛋卵形天线罩横向和轴向上的透波一致性进行了测量, 结果表明损伤会影响透波一致性, 轴向上插入相位移尤其明显; 根据测试结果, 物理损伤会影响蛋卵形机载雷达天线罩的透波性能, 天线罩出现破损时需及时更换。

关键词: 天线罩; 透波特性; 方向一致性; 矢量网络分析仪; S 参数

Study on Method of Egg-shaped Radome Damage Performance Test

Xia Dong, Li Shuhua, Li Baopeng

(Qingdao Campus of Naval Aeronautical University, Qingdao 266041, China)

Abstract: In order to obtain the influence of the physical damage of the egg-shaped radome on the performance of the airborne fire control radar, the measurement method of electromagnetic wave transmittance characteristics of the radome was studied, and electromagnetic wave transmittance characteristics of damaged area as well as transmittance consistency of radome were measured. Electromagnetic wave transmittance and insert phase shift were selected to measuring the radome's wave transmission performance. With regard to problem that electromagnetic wave transmittance and insert phase shift were difficult to measure, the way that measuring s_{21} component of S parameter by vector network analyzer and indirectly got electromagnetic wave transmittance and insert phase shift was put forward. Firstly, electromagnetic wave transmittance characteristics of different level damaged areas were measured, which indicated that damaged edge areas' electromagnetic wave transmittance characteristics decrease dramatically. Horizontal consistency and vertical consistency of egg-shaped radome's electromagnetic wave transmittance characteristics were also measured, which indicated that damage would affect the consistency of electromagnetic wave transmittance characteristics, especially insert phase shift of vertical consistency. According to measurement result, damages would affect electromagnetic wave transmittance characteristics of airborne radar's egg-shaped radome, and it need to be replaced in time.

Keywords: radome; electromagnetic wave transmittance characteristics; horizontal consistency and vertical consistency; vector network analyzer; S parameter

0 引言

为了保持良好的气动外形和电磁波透波特性^[1], 战斗机火控雷达一般在飞机头部采用蛋卵形天线罩^[2]。战斗机在起飞、降落过程中天线罩可能受到沙粒、陨石的击打, 在飞行过程中也可能受到雨滴、冰雹甚至鸟类的撞击。这些都会对雷达罩造成物理损伤, 从而影响天线罩的电磁透波特性, 进而影响火控雷达天线空间辐射特性, 影响雷达的探测距离和目标测量精度^[3-4]。

为了掌握物理损伤对雷达天线罩电磁特性的影响, 需要对损伤后天线罩的透波特性进行测量, 测量内容包括天线罩不同方向透波一致性测试、损伤部位透波特性测试等内容。由于机载火控雷达一般工作在 X 波段, 典型工作频率范围为 9~10 GHz, 测试频率范围应该覆盖机载火控雷

达的典型工作频率范围。

1 透波性能测试方法

天线罩的透波特性可以通过透波率和插入相位移来描述^[5-6]。

透波率也称为功率传输系数^[7], 定义为: 电磁波通过天线罩后在远场固定距离上的功率值 P_s 与天线罩不存在时同样位置处功率值 P_0 的比值, 如式 (1) 所示。

$$T_t = \frac{P_s}{P_0} \quad (1)$$

插入相位移的定义为: 电磁波通过天线罩后到达远场固定距离上的相位变化量 φ_s 与天线罩不存在时电磁波到达同样位置处相位变化量 φ_0 之间的差值, 如 (2) 所示。

$$IPD = \varphi_s - \varphi_0 \quad (2)$$

直接对天线罩透波率和插入相位移进行测量系统复杂^[8], 测量步骤繁琐^[9]。为了提高天线罩透波特性测试效率, 可以把发射天线和接收天线当作一个双端口网络, 通过测量两端口网络的 S 参数中 s_{21} 分量间接获得透波率和插

收稿日期: 2019-08-21; 修回日期: 2019-08-30。

作者简介: 夏 栋(1983-), 男, 山东临朐人, 博士, 讲师, 主要从事机载雷达信号处理等领域方向的研究。

入相位移的值。

对于一个双端口微波网络来说, 设 a_1 和 a_2 为两个端口的入射信号, b_1 为 1 端口反射信号, b_2 为 2 端口反射信号。那么 b_1 和 b_2 可通过下面式子进行计算。

$$b_1 = s_{11} \cdot a_1 + s_{12} \cdot a_2 \quad (3)$$

$$b_2 = s_{22} \cdot a_2 + s_{21} \cdot a_1 \quad (4)$$

其中 S 参数 4 个分量的定义如下所示。

$$s_{11} = \frac{\text{反射信号}}{\text{入射信号}} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (5)$$

$$s_{21} = \frac{\text{传输信号}}{\text{入射信号}} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (6)$$

$$s_{22} = \frac{\text{反射信号}}{\text{入射信号}} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (7)$$

$$s_{12} = \frac{\text{传输信号}}{\text{入射信号}} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (8)$$

下面先来推导透波率与插入相位移与 s_{21} 的关系表达式。在 2 端口无输入即 $a_2=0$ 的情况下 s_{21} 分量的值为:

$$s_{21} = \frac{\text{传输信号}}{\text{入射信号}} \quad (9)$$

根据透波率、插入相位移和 S 参数 s_{21} 分量的定义, 透波率、插入相位移的值可通过测量 s_{21} (或 s_{12}) 得到。设天线罩不存在时 S 参数 s_{21} 分量的值为 $(s_{21})_0$, 存在天线罩时 s_{21} 分量的值为 $(s_{21})_s$ 。那么透波率、插入相位移的值可以分别由下面两式得到:

$$T_t = \frac{|(s_{21})_s|^2}{|(s_{21})_0|^2} \quad (10)$$

$$IPD = \psi \left[\frac{(s_{21})_s}{(s_{21})_0} \right] \quad (11)$$

其中: $\psi[\cdot]$ 为取相位运算。

根据式 (10) 和 (11) 天线罩的透波率和插入相位移可以通过两次测量 S 参数的 s_{21} 分量得到。而微波网络 S 参数 4 个分量的测量可通过矢量网络分析仪完成, 矢量网络分析仪可以对 s_{21} 分量的幅度和相位进行计算并单独显示。并且由于矢量网络分析仪具有记忆功能, 它可以将当前测量值记录在内存中, 并与后续测量值进行加、减、乘、除等操作。因此在两次测量 S 参 s_{21} 分量的过程中, 将无天线罩的 s_{21} 分量 $(s_{21})_0$ 的值记录在内存中, 在测量存在天线罩 s_{21} 分量 $(s_{21})_s$ 时, 通过与内存值的加、减、乘、除等操作可以得到天线罩的透波率和插入相位移。通过比较天线罩存在条件下和无天线罩条件下 s_{21} 分量幅度比值可以获得天线罩引起的透波率, 根据 s_{21} 分量相位差值获得插入相位移。

2 测试电路及测试设备

测量电路连接关系如图 1 所示, 测试电路由发射和接收两个喇叭口天线、矢量网络分析仪和连接射频电缆组成。2 个喇叭口天线通过射频电缆分别与矢量网络分析仪的端口 1 和端口 2 相连。喇叭口 1 连接网络分析仪端口 1 为发射天线, 喇叭口 2 连接网络分析仪端口 2 为接收天线。

在测试电路中矢量网络分析仪是最重要的测试仪器,

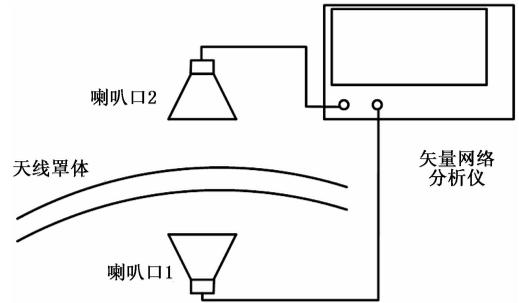


图 1 测量系统电路连接图

系统选用的型号为中电 41 所的矢量网 AV3672B (10 MHz~26.5 GHz)。AV3672B 为 Windows 7 中文操作系统, 兼备英文菜单选项, 具有频响、单端口、响应隔离、全双端口、TRL、电校准等多种校准方式。具有 32 个显示窗口, 每个窗口同时显示 8 条轨迹。提供多达 64 个独立测量通道, 快速执行复杂测试方案。具有对数幅度、线性幅度、驻波比、相位、群时延、Smith 圆图、极坐标等多种显示格式。具有时域分析、频率偏移测量、一体化脉冲测量、增益压缩二维扫描测量、混频器/变频器测量、有源互调失真测量、毫米波扩频等功能。重要的性能指标如表 1 所示。

表 1 矢量网 AV3672B 性能指标

| 指标项 | 数值 |
|------------|--|
| 频率范围 | (0.01~26.5)GHz |
| 频率准确度 | $\pm 1 \times 10^{-7}$ |
| 频率分辨率 | 1Hz |
| 端口 1 谐波抑制 | -51dBc(0.01~3.2GHz) -60dBc(3.2~26.5GHz) |
| 端口 1 非谐波抑制 | -30 ~ -40dBc |
| 系统动态范围 | 90~120dB |
| 脉冲宽度设置范围 | 33ns~60s |
| 接收机带宽 | 1Hz~5MHz |
| 功率扫描范围 | 23~38dB |
| 端口最大输出功率 | +5dBm(10~50MHz) +7dBm(0.05~3.2GHz) +10dBm(3.2~10GHz) +6dBm(10~20GHz) +0dBm(20~26.5GHz) |

需要注意的时, 为了减小矢量网络分析仪的测量误差, 使用矢量网络分析仪测量之前需要对其进行校准, 矢量网 AV3672B 的校正方式如表 2 所示, 在本系统中需要选择全二端口校准方式, 具体方法按照设备的提示步骤进行。

为了实现天线罩不同部位透波特性进行测量, 设计了天线罩传动装置, 其结构和实物图如图 2 所示。通过传动装置天线罩可以实现前后平移、左右平移、上下升降和绕轴向的滚动。其中, 前后平移和左右平移通过地面固定导轨实现, 上下升降通过升降系统实现, 绕轴向滚动通过橡皮轮实现。通过天线罩传动装置移动、升降和旋转天线罩可以对空气条件下和天线罩不同部位 s_{21} 参数进行测量。

表 2 算法运行时间比较

| 矢量校准 | 适应测量类型 | 去除误差项 |
|---------------|------------------------|------------------------|
| 响应校准 | 传输/反射测量精度要求不高 | 反射跟踪、传输跟踪 |
| 响应与隔离校准 | 高插损器件的传输测量或对大反射器件的反射测量 | 传输测量时频响+隔离、反射测量时频响+方向性 |
| S11/S22 单端口校准 | 单端口器件、匹配比较好的双端口器件 | 方向性、源匹配和频响 |
| 全二端口校准 | 单端口、双端口器件高精度反射或传输测量 | 方向性、源匹配、负载匹配、隔离和频响 |

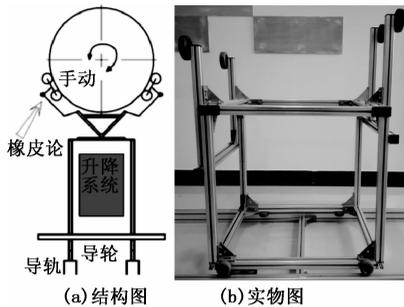


图 2 天线罩传动装置

在按照校准操作提示对矢量网络分析仪进行校准后,对天线罩某一固定部位透波率和相位移测量的具体方法如下所述:

1) 根据需要测量天线罩部位的位置特点,通过操作天线罩传动装置调整天线罩的高度和位置、固定好天线罩的摆放位置,再根据天线罩的位置和姿态固定好喇叭口的位置;

2) 按照图 1 测量电路连接关系将两个喇叭口天线和矢量网络分析仪的两个端口连接正确,设置好矢量网络分析仪的测试频段范围;

3) 首先测量没有天线罩时的 s_{21} 分量,通过天线传动装置在天线轴向上的前后移动使天线罩不遮挡两个喇叭口天线,即两喇叭口天线只透过空气直接相对;

4) 由于 s_{21} 分量幅度和相位不能显示在同一坐标系中,透波率和相位移分开单独测量,以测量透波率为例,测量对象选择 s_{21} 参数,显示内容选择幅度,等画面曲线显示稳定后将结果保存到内存中;

5) 通过天线罩传动装置前后移动和绕轴向转动将天线罩测试部位恰好处于两喇叭口天线中心连线上,再次测量 s_{21} 参数,测量对象选择 s_{21} 参数,显示内容选择幅度,并将显示结果设置为“实时数值/内存”(注意:如果测量插入相位移,显示结果应该设置为“实时数值-内存”),显示结果如图 3 所示。

此时,得到的结果就是设置频率范围内选定天线罩部位引起的透波率(或相位移)偏差。由图 3 可以看出,由于天线罩的存在透波率随频率振荡变化,趋势为随频率增加而降低。

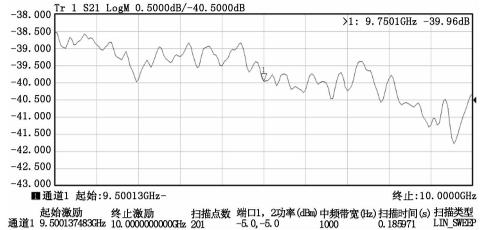


图 3 9~10 GHz 范围内某型天线罩透波率测试值

3 透波性能测试

3.1 天线罩损伤部位测试

雷达天线罩罩体收到外力撞击引起形变甚至破损时,受损部位及周边临近区域的电磁波透波特性可能受到影响。为了获取损伤对天线罩透波特性的影响,分别选取了天线罩完好区域、轻度受损和严重受损区域,如图 4 所示。

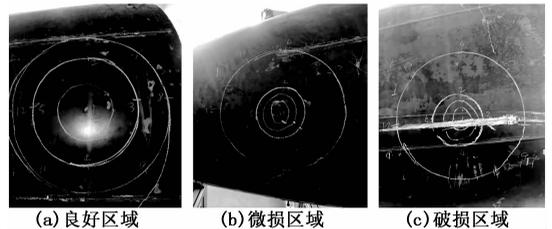


图 4 不同损坏区域选择位置

对 3 个区域不同点位的透波率和插入相位移分别进行了测量,3 个不同损坏程度区域的测量结果如图 5 所示。由测试结果可以看出损伤区域中心对透波率影响不大,微损和破损区域中心的透波率与良好区域的透波率相比没有明显变化,而损伤与良好区域的结合部分透波率有明显下降,最大点下降了 8 dB。另外,无论是在良好区域还是损伤区域,汇流条区域透波率明显下降(图 5 中“良好”曲线的 8 点和“破损”曲线的 9 点)。由图 5 (b) 可以看出,破损引起的插入相位移随破损程度下降明显,并且汇流条会减小插入相位移。

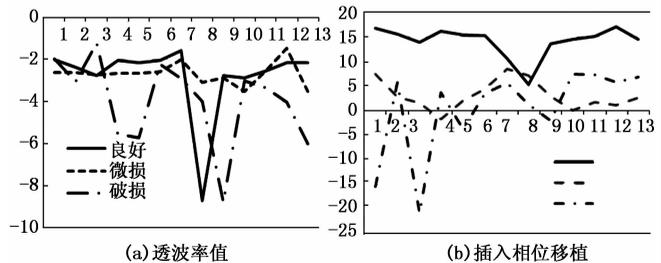


图 5 不同受损程度区域天线罩透波特性

3.2 方向一致性测试

为了测试天线罩物理损伤对天线辐射方向图的影响,需要对天线罩透波特性的方向一致性进行测量^[10]。方向一致性测试包括横向和轴向两个方向上损耗一致性测试,如图 6 所示。

分别在横向一圈 360°范围上等间隔选择 36 个点(每间隔 10°一个测试点),而轴向上等间隔选择 20 个点做为测试

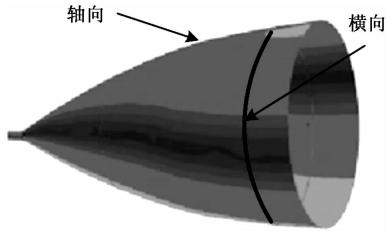


图6 天线罩轴向和横向测量位置

点, 对透波率和插入相位移进行测量, 结果如图7所示。

由图7(a)和图7(b)可以看出, 物理损伤对天线罩横向一致性存在一定的影响, 透波率和插入相位移都随着横向角度变化而变化, 透波的变化范围为-2.52~-1.03 dB, 而插入相位移的变化范围为6.68°~18.7°。

由图7(c)和图7(d)可以看出, 在轴向上天线罩透波一致性也受到了破损的影响, 透波率和插入相位移都随测试点位置变化, 其中透波率的变化范围为-5.23~-0.88 dB, 而插入相位移的变化范围为96°~138°。

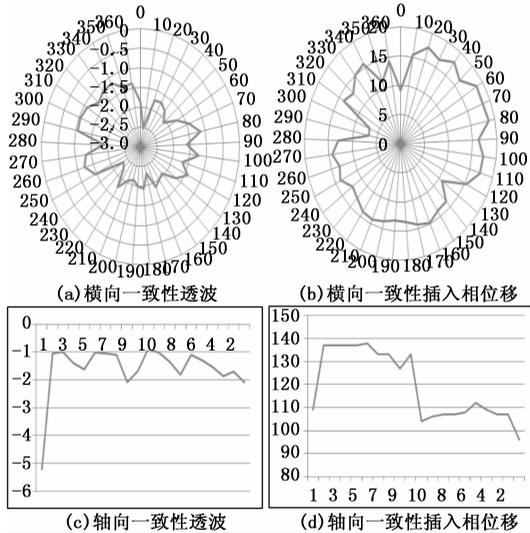


图7 透波一致性测量

4 结束语

物理损伤会影响天线罩的透波特性, 通过对天线罩不同位置透波率和插入相位移的测量可以得到物理损伤对天线罩透波特性的影响。为了降低天线罩透波率和插入相位移测量的难度, 引入了通过测量S参数s21分量间接测量透波率和插入相位移的方法。测量结果表明, 天线罩透波率随电磁波频率的增加振荡下行, 破损区域中心透波率和插入相位移变化较小, 而破损区边缘的透波率和插入相位移变化较为明显。而且物理损伤也影响了天线罩透波方向一致性, 无论是横向上还是轴向上天线罩透波率和插入相位移都有明显的变化, 插入相位移的随方向变化尤为明显。

参考文献:

[1] 李西敏, 童创明, 付树洪, 等. 雷达天线罩电磁散射特性研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(10): 95-97.

[2] 史维光, 王 建, 张云祥, 等. AI-SI法分析X波段机载雷达天线罩[J]. 现代雷达, 2014, 26(2): 67-70.

[3] 党 涛, 田 殷, 王光明, 等. 新型人工电磁材料天线罩技术研究[J]. 电子科技大学学报, 2018, 47(5): 686-691.

[4] 宗 睿, 林德福, 兰 玲, 等. 考虑天线罩误差的雷达导引头隔离度影响与UKF在线补偿[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(12): 1269-1278.

[5] 李宝鹏, 谢洪森, 刘 水, 等. 一种便携式机载雷达罩外场电性能测试系统[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(11): 20-24.

[6] 吴 磊, 房卫军, 张建凌. 雷达罩对机载脉冲多普勒雷达的性能影响分析[J]. 火控雷达技术, 2015, 44(1): 88-93.

[7] 李 欢, 刘 钧, 肖加余, 等. 雷达天线罩技术及其电性能研究综述[J]. 材料导报, 2012, 26(15): 48-52.

[8] 曾照勇, 赵 峰, 夏红娟, 等. 天线罩性能测量与修磨一体化设备研究[J]. 制导与引信, 2017, 38(3): 39-43.

[9] 贾 蕾, 李高生, 曹群生, 等. 某型机载宽频带天线罩电气性能的测试研究[J]. 微波学报, 2012, 28(4): 48-51.

[10] 王云香, 许 群, 刘尚吉, 等. 试验天线对雷达罩传输效率的影响及分析[J]. 现代雷达, 2015, 37(12): 65-69.

(上接第47页)

参考文献:

[1] 张 勇. 矿用防爆锂电池无轨胶轮车安全性能技术分析[J]. 煤炭科学技术, 2017(7): 128-131.

[2] 李占锋, 张凤龙. WC5J防爆柴油机无轨胶轮车液压制动系统改进[J]. 机床与液压, 2018(16): 150-151.

[3] 刘 阳, 鲍久圣, 阴 妍, 等. 无轨胶轮车驱动技术现状及混合动力方案研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(6): 26-28, 32.

[4] 任志勇. 矿用纯电动防爆胶轮车双电机驱动系统研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(7): 136-138, 141.

[5] 李亭洁. 矿用锂电池无轨胶轮运人车设计[J]. 煤炭工程, 2018, 50(2): 157-159.

[6] 王 晓, 贾二虎, 兰春亮. 矿用防爆柴油机增压中冷技术应用试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(7): 107-110, 126.

[7] 王俊年, 陈茂林, 周少武, 等. 矿用电动轮车交流传动系统的建模与仿真[J]. 计算技术与自动化, 2016, 35(3): 9-15.

[8] 赵美荣, 王治伟, 任肖利. 矿用无轨胶轮车速度失控保护装置[J]. 煤矿安全, 2017, 48(11): 119-121, 125.

[9] 柳玉龙. 防爆电控柴油机在防爆无轨胶轮车的应用[J]. 煤炭工程, 2018, 50(4): 174-176.

[10] 宋俊典, 戴炳荣, 蔣丽雯, 等人. 基于区块链的数据治理协同方法[J]. 计算机应用, 2018, 38(9): 2500-2506.

[11] 谭 飞, 鲍久圣, 葛世荣, 等. 矿用防爆柴油机关键技术研究现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2018(9): 181-187.

[12] 张立文. 矿用防爆柴油机阻火器最大安全间隙研究[J]. 煤炭科学技术, 2016(S2): 157-159, 197.

[13] 刘志海, 杨凯迪, 张荣华, 等. 无轨胶轮车全液压制动系统故障诊断研究[J]. 工矿自动化, 2016, 42(10): 30-34.

[14] 刘宏杰, 张 慧, 张喜麟, 等. 煤矿无轨胶轮车智能调度管理技术研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 86-91.

[15] 周开平. 矿用WC3J(D)型整体式防爆胶轮车制动系统设计研究[J]. 煤炭工程, 2016(2): 137-138.