

T/ZJATA

浙 江 测 试 团 体 标 准

T/ZJATA 0030—2025

柔性平面天线弯曲特性测试方法

Test methods for flexible planar antenna characteristics under bending conditions

2025 - 09 - 12 发布

2025 - 10 - 12 实施

浙江省分析测试协会 发 布

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由浙江省分析测试协会提出并归口。

本文件起草单位：中国计量大学、浙江清华柔性电子技术研究院、中国计量科学研究院、上海市质量监督检验技术研究院有限公司、工业和信息化部电子第五研究所、杭州泰格捷通检测技术有限公司、浙江省医疗器械检验研究院、浣江实验室、浙江大学。

本文件主要起草人：包腾、何志峰、周浩淼、朱明敏、朱海斌、刘阳、倪华、杨晓锋、吴丹平、张弘、王聪、王宗荣、曲绍兴、何海波。

柔性平面天线弯曲特性测试方法

1 范围

本文件描述了柔性平面天线弯曲特性测试的术语和定义、样品要求、试验条件、仪器设备、试验步骤和试验报告。

本文件适用于工作频段 1 GHz 至 40 GHz 的可弯曲柔性平面天线产品的试验，其它频段应用场景下的柔性天线产品可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 14733.10—2024 电信术语 天线

SJ 2534.9—1985 天线测试方法：极化测量

3 术语和定义

GB/T 14733.10—2008 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

柔性基底 flexible substrate

一种具备弯曲、拉伸特性的基底材料，常用作柔性电子器件的支撑基材。

3.2

柔性平面天线 flexible planar antenna

一种基于柔性基底制成的具有可弯曲、适应不同表面形状的特点的平面天线。主要用于可穿戴设备、物联网和柔性电子产品中。

3.3

天线极化（在给定方向上的） polarization of an antenna (in a given direction)

在远场区及给定方向天线所辐射的波的极化。

注：如未规定方向，则假定为最大辐射强度的方向。

[来源：GB/T 14733.10—2024]

3.4

微波暗室 microwave anechoic chamber

一种经过专门设计的封闭室。内面安装吸波材料。

注：充分吸收某一频率范围的微波反射，使其下降到可接受程度，近似无反射的准自由空间的天线测试环境。

[来源：GB/T 14733.10—2024]

3.5

辐射方向图 radiation pattern

表征天线辐射量在空间的分布。

[来源：GB/T 14733.10—2024]

3.6

辐射强度（来自给定方向天线的） radiation intensity (from an antenna in a given direction)

在给定方向和远场区内天线每单位立体角的辐射功率。

[来源：GB/T 14733.10—2024]

3.7

方向性（给定方向上天线的） directivity (of an antenna, in a given direction)

天线在给定方向的辐射强度与在空间所有方向平均辐射强度之比。

注1：通常以分贝表示。

注2：如方向未给定，则指给定天线最大辐射强度的方向。

注3：方向性系数与天线损耗无关，如天线无损耗，它就等于相同方向的绝对增益。

[来源：GB/T 14733.10—2024]

3.8

增益（给定方向上天线的） gain (of an antenna, in a given direction)

天线在给定方向的辐射强度与在属于功率相同的情况下假定天线向空间所有方向均匀辐射时的辐射强度之比。

注1：通常以分贝表示。

注2：如方向未给定，则指给定天线最大辐射强度的方向。

注3：如天线无损耗，则给定方向上天线的增益在数值上和它的方向性系数相同。

[来源：GB/T 14733.10—2024]

3.9

辐射效率（天线的） radiation efficiency (of an antenna)

天线辐射的总功率与馈入它的净功率之比。

[来源：GB/T 14733.10—2024]

3.10

天线[输入]阻抗 antenna (input) impedance

天线在馈电点端子上呈现的复阻抗。

[来源：GB/T 14733.10—2008]

4 样品要求

4.1 样品外形

待测天线样品的平面尺寸应小于 $100\text{mm}\times 200\text{mm}$ ，基板厚度小于 1mm 。

4.2 基底材料

平面天线基底材料应具备一定的可弯曲能力，且满足预期应用场景下的弯曲条件要求。基底材料宜选用聚酰亚胺（PI）、聚对苯二甲酸乙二酯（PET）或聚二甲基硅氧烷（PDMS）等。

4.3 弯曲条件参数

柔性平面天线的弯曲程度由弯曲半径或弯曲弧度来定义，其测试加载截面如图1所示。

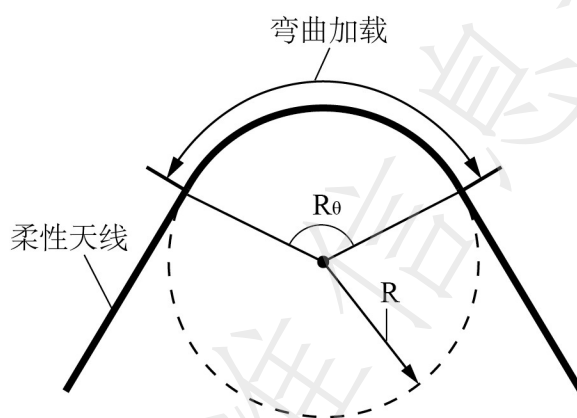


图1 弯曲测试截面示意图

5 试验条件

5.1 气候条件

实验室的气候条件应满足以下要求：

- 环境温度： $15^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ ；
- 相对湿度： $25\%\text{RH}\sim 75\%\text{RH}$ ；
- 大气压力： $86\text{kPa}\sim 106\text{kPa}$ 。

5.2 电磁环境条件

实验室的电磁条件不应影响试验结果。对于天线性能测试，应选用微波暗室作为测量场地。微波暗室工作频率应覆盖待测天线工作待测频率范围，微波暗室测试场地性能应定期测试或核查，以保证测量结果的准确性。

5.3 坐标系

为了准确得到天线辐射方向数据，宜使用球面坐标系定义待测天线所位于的测试系统位置。天线参考位置处于坐标原点，绕 z 轴而成的 xoy 平面构成 φ 平面，与之正交的过 z 轴的平面为 θ 平面，如图2所示。微波暗室中测试轴系统（组合轴、分布轴）的典型参考布置分别如图3、图4所示。

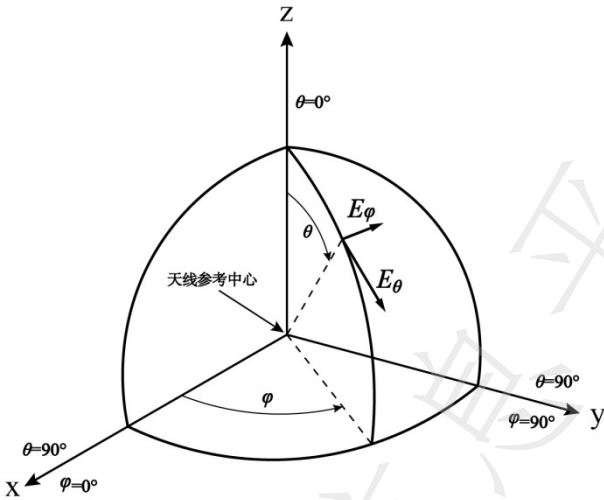


图2 球面坐标系示意图

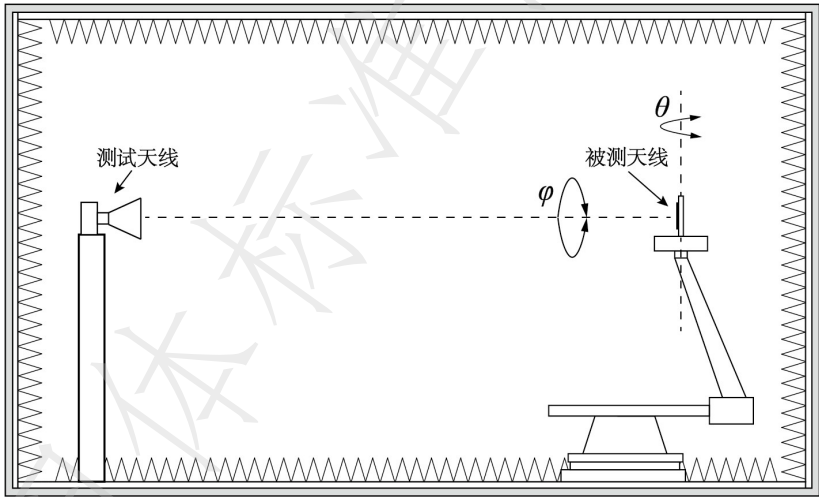


图3 微波暗室组合轴测试系统示意图

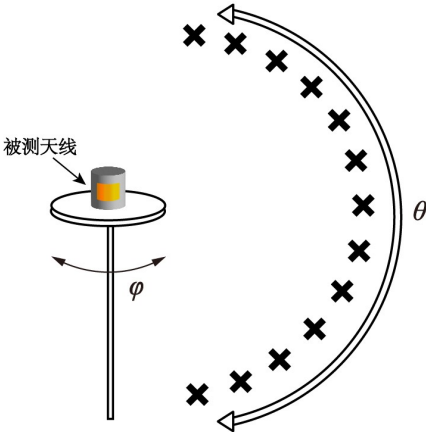


图4 微波暗室分布轴测试系统示意图

5.4 定位系统要求

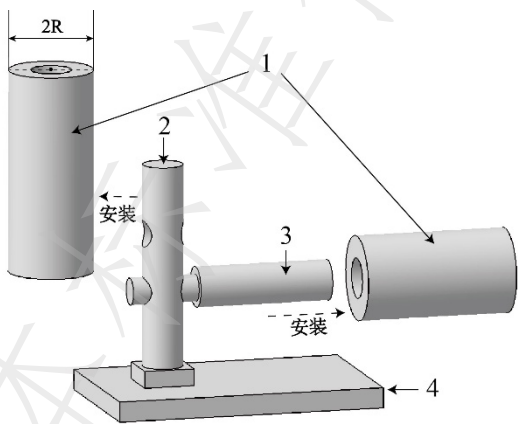
待测天线的支撑夹具应能稳定保持天线的平面状态或弯曲状态，并且使用射频透明材料。

6 仪器设备

6.1 弯曲加载装置

弯曲加载装置应符合以下要求：

- a) 装置应采用低相对介电常数（ <1.05 ）的材料，例如EPS泡沫，聚苯乙烯泡沫等；
- b) 固定材料宜选用大网格状的纱布。当采用其它材料时，实验室应能提供该材料的电气特性参数性能；
- c) 弯曲试验装置中的样品安装面应为各角度曲率一致的光滑圆柱面，其实体结构呈中空圆柱状，可与支撑架的横梁、纵梁相连，实现圆柱面的水平、竖直布置，如图5所示；
- d) 试验中，通过调换不同外径尺寸的圆柱体完成样品弯曲半径的调整；
- e) 试验装置的标称弯曲半径应经过核查确认，误差应小于5%。



标引序号说明：

- 1——品安装面；
- 2——纵梁；
- 3——横梁；
- 4——支撑架。

图5 弯曲试验装置示意图

6.2 微波暗室

微波暗室应符合以下要求：

- a) 微波暗室的工作频率应覆盖待测天线工作频段；
- b) 微波暗室静区尺寸应大于待测天线尺寸；
- c) 电磁环境噪声水平应足够低，不对测试结果产生明显影响；
- d) 应配有定位系统，保证待测样品安装于坐标原点。

6.3 测量仪表

信号发生器、频谱分析仪、网络分析仪等测量仪表应具有良好的稳定性、可靠性、动态范围和测量精度，以保证测量数据的正确性。测量用仪表应有计量合格证，并在校验周期内。

7 试验步骤

7.1 通用要求

试验应分别在平面状态和弯曲状态下进行，以评价天线在不同条件下的性能变化。试验可以在多个弯曲半径或者弯曲角度下进行，应优先选取符合典型工况的条件。

7.2 辐射方向图

天线辐射方向图测试在球面坐标系统中进行，分别对测量坐标系 θ 角和 φ 角的离散点进行测量采样。采样步长应保证所要求绘制的三维方向图精度，该步长通常不大于 15° 。

测试程序如下：

- a) 测量轴系统校准；
- b) 将天线安装于弯曲模块，安装部分应符合 6.1 的要求；
- c) 根据测试条件安装样品，平面天线的相位中心应位于暗室坐标原点，若没有定义明确的相位中心，则以平面天线的辐射结构几何中心作为坐标原点，如图 6 所示；
- d) 沿测量坐标轴的经线或者纬线进行一周的测量，采用网络分析仪获得每个测量点的幅度和相位；
- e) 沿其它测量线重复测量，直至覆盖整个球体坐标；
- f) 计算并绘制 2D/3D 辐射方向图。

当以平面天线的几何中心以基板作为外轮廓时，天线安装在弯曲模块上之后，暗室坐标原点应与待测天线几何中心重合。

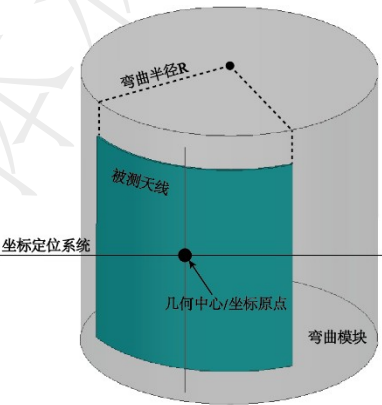


图6 天线坐标定位示意图

7.3 增益

以比较法对待测天线的增益进行测量，通过与已知增益天线进行比较得到增益结果。

测试程序如下：

- a) 按照 7.2 的步骤 a)~e)测量待测天线的幅度和相位值；
- b) 将待测天线替换为标准增益天线，按照 7.2 的步骤 a)~e)测量标准增益天线的幅度和相位值；
- c) 在后处理软件中对原始数据进行处理，得到待测天线各方向增益，计算方法见公式（1）：

$$G = G_s + (P_x - P_s) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- G ——待测天线增益，单位为分贝(dB)；
- G_s ——标准增益天线增益标定值，单位为分贝(dB)；
- P_x ——待测天线远场方向图的最大功率电平，单位为分贝毫瓦(dBm)；
- P_s ——标准增益远场方向图的最大功率电平，单位为分贝毫瓦(dBm)。

7.4 极化

柔性平面天线的安装和定位应参照 7.2 的测试步骤 b)~c)进行，极化测量参照 SJ 2534.9 进行。

7.5 辐射效率

辐射效率为同一方向上功率增益与方向性的比值，根据峰值功率增益和峰值方向性确定辐射效率。测试程序如下：

- a) 按照 7.2 的步骤 a)~e)测量待测天线的幅度和相位值；
- b) 获得待测天线某方向的峰值增益及峰值方向性；
- c) 通过下式对辐射效率进行计算。

$$\eta = \frac{G}{D} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- η ——待测天线某方向上辐射效率；
- G ——待测天线某方向峰值增益，单位为分贝(dB)；
- D ——待测天线某方向峰值定向性，单位为分贝(dB)。

7.6 天线[输入]阻抗

天线输入阻抗测试通过网络分析仪进行，测试前应对端口进行校准，校准程序应在每个需要测量的频段上进行。若在多端口天线的一个端口上测量，天线的其他端口应使用匹配的负载进行端接。这些终端应用于吸收正在耦合到天线其它部分的能量，并防止不匹配端口能量的反射和辐射影响测量端口的阻抗值。

测试程序如下：

- a) 测试系统预热，应保证预热时间不少于30 min；
- b) 连接测试线缆，通过校准件，校正测量端口；
- c) 根据测试条件，将天线安装于弯曲模块；
- d) 通过网络分析仪测量被测端口阻抗参数。

8 试验报告

试验报告应包括能重现试验的全部信息。特别是下列内容：

- 第 7 章规定的试验项目内容；
- 待测天线的标识，例如商标、型号、序列号；
- 检测设备/系统名称、型号、校准状态、软硬件版本信息；
- 辅助检测设备名称、型号、校准状态、软硬件版本信息；
- 任何进行试验所需的专门环境条件，例如微波暗室；
- 进行试验所需的任何特定条件；

- 试验结果参数，弯曲与平面状态下的变化值；
- 被测环境条件；
- 试验配置和待测天线布置的示意图或照片。
