

# 天线的风荷载及变形特性实验研究

周瑞兴 上官云信 穆忠祥 高永卫 解亚军 郭琦 张理  
西北工业大学, 西安, 710072

**摘要** 本文简述了圆形实体抛物面天线的风荷载和变形特性研究所用的测试仪器, 方法及数据处理。着重给出圆形实体抛物面天线在风洞实验中所得风荷载及其在风荷载作用下天线反射体产生的结构变形特性。

## 引言

天线广泛地用于现代通讯事业中, 其工作场所千变万化, 在高山, 海岸, 飞机和舰船上都大有用武之处, 而且往往处于露天环境。在露天环境工作的天线必然会受到风荷载的作用。风荷载是天线各种载荷中主要的载荷之一<sup>[1,2]</sup>, 也是天线强度、刚度计算和驱动电机功率选择必须考虑的重要因素。

作用在天线上的风荷载将会使天线的反射体及其它部位产生不同程度的变形, 如果变形较大时就会影响天线的电气性能, 即即使天线电磁波的反射发生散乱, 指向误差增大, 方向图产生畸变, 这就会降低天线按预期目标正确执行任务的能力。由此可见, 对天线在风荷载作用下产生的变形的研究不但具有学术意义, 更具有工程实用价值。

## 1 模型实验

### 1.1 实验设备

本实验研究是在西工大 NF-3 风洞内完成的, 它的尺寸为  $2.5m \times 3.5m \times 12m$ , 空风洞最大风速为  $90m/s$ , 紊流度为  $0.08\%$ 。测力实验采用 XT9001 六分量内式应变天平, 直径  $\phi=46$ , 测试精度为  $0.05\%$ 。测力实验的数据采集由 8400 电子压力扫描阀完成, 扫描速度 5 万点/秒, 测力精度为  $0.05\%$ 。位移测量系统包括一只测量范围为  $20mm$ 、测量精度为  $0.001mm$  的 GCQ-20 光栅式微测传感器和一台 GS8320A 数显表, 数显表的分辨率为  $0.5\mu m$ 。实验模型为圆形实体抛物面天线, 直径  $D=1.05m$ , 外圆面积  $s=0.865m^2$ , 它是由夹芯的复合材料制成的。

### 1.2 天线测力实验

天线通过天平安装在风洞支架上, 实验时由 8400 电子扫描阀系统采集天平六分量信号。实验的俯仰角  $\alpha=-20^\circ \sim 90^\circ$ , 方位角  $\beta=0^\circ \sim 180^\circ$ 。实验风速  $v=30m/s$ , 基于天线直径的雷诺数  $Re=2.1 \times 10^6$ 。

图 1 示出了天线的体轴坐标系与体轴系中风荷载各分量的对应关系。各风力矩均是相对天线 A 点给出的体轴系的结果, 而各风力系数已经过坐标转换为风轴系的结果。对天线测力结果作了支架干扰和模型阻塞修正, 并将结果化为无因次系数的形式。

力  $F$  的系数为  $c_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho v^2 s}$ , 力矩  $M$  的系数为  $m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho v^2 s D}$ 。

### 1.3 天线变形的测量

物体只要受到载荷的作用就会在载荷方向上引起相应的变形, 天线一般受到的载荷有风载, 自重, 惯性, 冰雪和温度载荷等, 这些载荷都会使天线产生一定的变形, 风荷载引起天线的结构变形遵循虎克定律, 即

$$\sigma = E \varepsilon \quad (1)$$

式中  $\sigma$  为正应力,  $\varepsilon$  是在  $\sigma$  作用下的相对变形,  $E$  为材料弹性模量。对于横截面积为  $A$ , 长度为  $l$ , 沿  $l$  方向受到的载荷为  $P$ , 物体变形  $\Delta l$  的虎克定律为

$$\Delta l = \frac{Pl}{EA} \quad (2)$$

图 2 示出了天线变形测量的安装状态, 将天线固定于风洞内刚性很好的后支架上, 而位移传感器安装在刚性的坐标架上 (前支架), 根据需要, 位移传感器可以移到天线反射面的指定位置测量出天线局部的变形量。

根据国内外的统计资料, 天线在风速  $v = 25 \sim 45 \text{ m/s}$  时应能正常工作, 天线耐破坏风速为  $42 \sim 75 \text{ m/s}$ , 因此, 天线变形测量的风速分别为  $40 \text{ m/s}$  和  $55 \text{ m/s}$ , 以直径为特征长度的雷诺数  $R_e$  分别为  $2.8 \times 10^6$  和  $3.85 \times 10^6$ 。俯仰角  $\alpha$  和方位角  $\beta$  均为  $0^\circ$ 。

在天线各点变形量的测定时, 风速稳定 5 分钟后连续采集 15 组天线总的变形量  $x_i$ , 停风 3 分钟后, 采集塑性变形量  $A$ , 由此可得天线局部的弹性变形量  $\Delta l$

$$\Delta l = \frac{\sum_{i=1}^{15} x_i}{15} - A \quad (3)$$

## 2 实验结果和初步讨论

### 2.1 天线风荷载特性

图 3 ~ 7 示出了天线的测力实验结果。图 3 表明, 在方位角  $\beta = 0^\circ \sim 100^\circ$  范围内, 天线的阻力系数随方位角的增加而减小, 在  $100^\circ < \beta < 180^\circ$  范围内, 天线阻力系数随方位角的增大而增大。这是因为天线受到的风力主要是由摩擦阻力和压差阻力组成, 对于非流线型的天线, 在较大的风速下, 压差阻力一般都比摩擦阻力大得多。当  $\beta = 0^\circ$  和  $180^\circ$  时, 天线以最大的迎风面积阻止来流通过, 此时有较多的流体微团的速度因受阻而被迫减小, 甚至变为 0, 流体的动压几乎全部转化为静压, 使天线前面形成高压。当气流绕过横置于流场中的天线外缘向下游运动时, 因流体微团发生较大的方向变化而引起严重的分离, 分离的微团在天线后形成一个大范围的尾迹区, 充满高速旋转的旋涡, 将机械能转化为热能耗散掉, 因此该区形成一个很低的负压区。此时, 天线前后表面产生的压差最大, 而阻力也最大。从图 3 中不同俯仰角时天线阻力系数的变化特性可知, 在一定的方位角时, 当  $\alpha = 0^\circ$ , 天线的阻力系数  $c_D$  最大, 随着  $\alpha$  的增大, 天线阻力系数减小。天线阻力系数随俯仰角的变化规律和随方位角的变化规律相同。

圆形实体抛物面天线在  $\alpha = 0$  和  $\beta = 0$  时, 风洞实验所得阻力系数一般约为  $1.230 \sim$

1.470, 本文研究的天线阻力系数为 1.160。

图 4 ~ 7 分别示出了圆形实体抛物面天线的升力系数  $c_L$ , 侧力系数  $c_z$ , 俯仰力矩系数  $m_z$  和方位力矩系数  $m_y$  随方位角  $\beta$  的变化。本天线的横滚力矩系数  $m_x$  在各种姿态角下的量级都相当小。

从图 4 ~ 7 中可以清楚地看到一种特殊的现象, 在某些俯仰角中, 当方位角  $\beta$  为  $60^\circ$  和  $120^\circ$  的两种状态时, 天线的升力系数  $c_L$ , 侧力系数  $c_z$ , 俯仰力矩系数  $m_z$  和方位力矩系数  $m_y$  有突跃现象, 实验现场和流态观察均已发现, 在  $\beta$  达到  $60^\circ$  和  $120^\circ$  附近时, 天线出现抖动, 气流很不稳定, 这是天线上出现了很强的局部旋涡, 致使天线表面的压力分布产生突跃变化, 从而引起天线某些风力系数和风力矩系数的实验曲线出现突跃现象。天线设计师和使用者应当重视这一现象。

## 2.2 天线变形特性

图 8 示出了圆形实体抛物面天线在风荷载作用下产生的局部结构弹性变形  $\Delta l$  沿  $y$  (或  $Z$ ) 向的分布特性, 实验结果表明, 圆形实体抛物面天线在一定的风荷载下沿  $y$  向和  $Z$  向产生的变形规律相同, 变形曲线呈一抛物线, 其变形量级彼此接近, 天线反射体的中心点变形量最大, 随着离开中心的距离增大, 天线的变形量逐渐减小, 这是由于天线反射面正对来流, 反射面中央区域对气流的阻滞最厉害, 故在此区域产生正的风压  $P_f$  最高, 由公式 (2) 可知, 圆形实体抛物面天线中心点的变形也就最严重。远离天线中心处, 因来流的排挤和扩散效应, 气流受到天线的阻滞作用逐渐减弱, 风压逐渐减小, 其变形量也随之减小。

图 9 为圆形实体抛物面天线反射体经受风荷载时在相同半径  $r$  上各点的变形量  $\Delta l$  随天线滚转角  $\theta$  的变化特性, 实验结果表明, 在不同半径  $r$  处天线的变形量  $\Delta l$  随滚转角的变化规律彼此相似, 即在每一相同半径的环带上  $\theta = 90^\circ$  时的变形量较小,  $\theta = 180^\circ$  时的变形量稍大。在同一环带各  $\theta$  角处的变形量不同主要是复合材料制成的天线反射体各向异性所致。实际上, 该天线同一环带上各点的变形量彼此之间的差异甚小, 不会给天线使用上带来任何麻烦。

由于在风洞实验中天线的变形主要来源于天线的风荷载, 其变形量也随风速 (即风荷载) 的增加而增大, 图 8 中的实验结果表明, 在天线负反射体  $y = -290, -150, 0\text{mm}$ , 当  $v = 40\text{m/s}$  时各点的变形量  $\Delta l$  分别为  $0.459, 1.167, 1.379\text{mm}$ , 而在  $v = 55\text{m/s}$  时, 对应风速下各测点变形量  $\Delta l$  分别为  $0.867, 2.206, 2.607\text{mm}$ , 后者各点随风速的变形量与前者各点随风速的变形量之间的数量关系, 正象天线的风荷载一样, 也是与风速的平方成正比。

实验结果表明, 在  $v = 40\text{m/s}$  和  $55\text{m/s}$  时, 天线整个反射体的结构变形均属弹性变形, 尚未出现塑性变形现象。这一结论也为未加载前测得天线的初始方向图与经过吹风之后测得的方向图的性能的对比结果所证实。

## 3 结论

综上所述可得如下的初步结论:

(1) 风洞实验所得圆形实体抛物面天线的风力系数和风力矩系数可作为同类天

线或结构形式相近的天线的强度校核和电机功率校验的实验依据。

(2) 本天线反射体的变形量随风速的增加而增大, 反射体中心点的变形量最大, 而相同半径上各点的变形随滚转角变化甚小, 在实验的风速范围内整个反射体均无残余变形, 因此, 本实验所得天线的变形数据同样可供同类天线或结构形式相近天线的刚度计算和电气性能检验之用。

### 参 考 文 献

- 1、Brown, L.S. Mcchee K.E. wind Load on Antenna Systems, The microwave Journal No.9, 1964.
- 2、Richards, c.J. Mechanical Engineering in Radar and Communication, 19691.

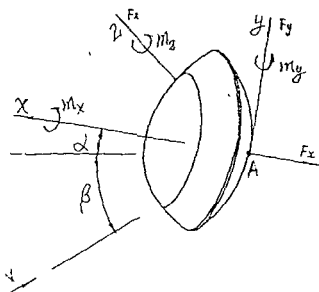


图1 天线坐标系与风荷载的对应关系

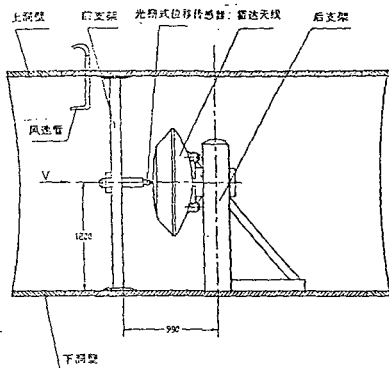


图2 天线变形测量实验安装示意图

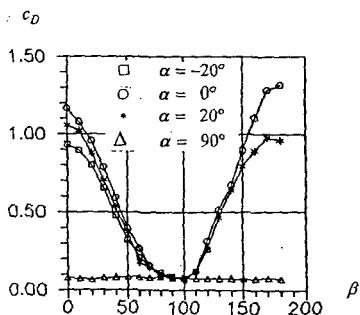


图3 天线阻力系数  $c_D$  随方位角  $\beta$  的变化

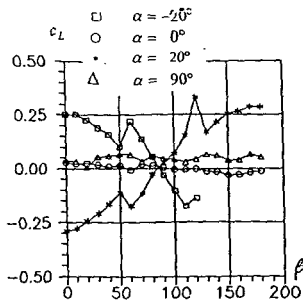


图4 天线升力系数  $c_L$  随方位角  $\beta$  的变化

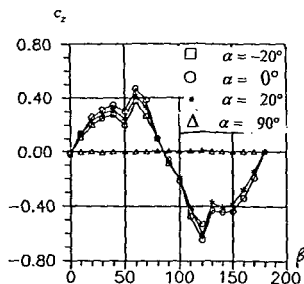


图5 天线侧力系数  $c_z$  随方位角  $\beta$  的变化

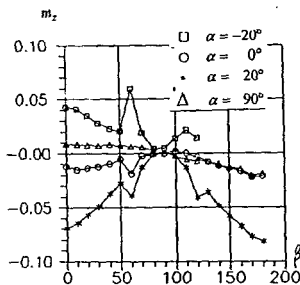


图6 天线俯仰力矩系数  $m_z$  随方位角  $\beta$  的变化

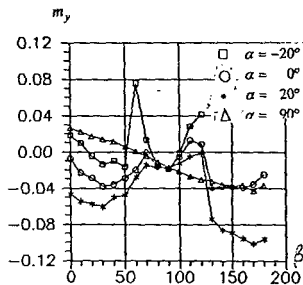


图7 天线方位力矩系数  $m_y$  随方位角  $\beta$  的变化

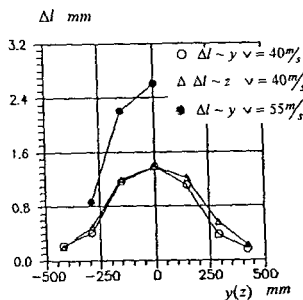


图8 天线变形量  $\Delta l$  沿纵向 ( $y$ ) 及横向 ( $z$ ) 的分布特性

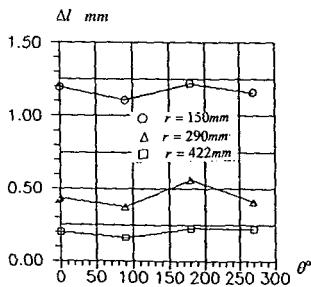


图9 天线变形量  $\Delta l$  沿滚转角  $\theta$  的分布特性  
 $v = 40 \text{ m/s}$

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>