

矩形平面天线风荷载的实验研究

周瑞兴 高永卫 张理 肖春生 上官云信

(西北工业大学翼型、叶栅空气动力学国家重点实验室 西安 710072)

摘要 车辆和舰船上应用的移动雷达天线必须满足结构重量轻、风荷载小、同时对其不同方位易于操纵和控制等的力学特性，以便达到快捷、高效的应用目的。本文在西北工业大学 NF-3 风洞三元实验段中采用测力法对具有不同镂空度的车载矩形平面天线的风荷载进行了实验研究。文中简介了实验设备、模型构造和实验技术，给出了典型的实验结果，并进行了分析。实验结果表明，实体平面天线的最大阻力系数和方位力矩系数分别为 1.8775 和 0.1350，而镂空度为 50% 的栅状平面天线的最大阻力系数和方位力矩系数分别为 0.8500 和 0.0624，后者的阻力系数和方位力矩系数仅分别为前者的 45% 和 46%。

关键词 矩形平面天线、风荷载、阻力系数、栅状平面

1. 引言

车载天线不但要有很好的电磁性能，以满足良好的信号发射与接收的应用需要。同时，要有很好的力学性能，主要是良好的空气动力特性^{1,2)}，以获得结构重量轻，便于装卸和携带的天线。在种类繁多的天线中，其中具有镂空的矩形平面天线不仅结构简单，而且受到的风荷载也小，这就容许在保证天线结构强度和刚度的条件下，使它的结构重量大大地得以减轻。因此，它是一种适合车载用的良好轻便的天线。本文通过风洞实验对其空气动力特性进行了初步研究。

2. 模型实验

2.1 实验设备

本次实验研究是在西北工业大学翼型、叶栅空气动力学国防科技重点实验室 NF-3 风洞三元实验段完成的，它的尺寸为 $2.5\text{ m} \times 3.5\text{ m} \times 12\text{ m}$ ，空风洞最大风速为 90 m/s ，紊流度为 0.078%。

测力实验采用 $\phi=58$ 杆式六分量应变天平，测试精度为 0.00055。测力实验数据采集由 8400 电子扫描阀完成，扫描速度 5 万点/秒，测力精度为 0.1%。

矩形天线模型为木质模型，模型平面宽 b 为 1000 mm ，高 h 为 800 mm ，包括箱体在内的厚为 155 mm （图 1），平面面积 S 为 0.8 m^2 。因天线反射体的结构不同而分为 A、B、C、D 四种型式，其中 A 型为实体平板面天线，在天线反射体和箱体之间的两侧装有侧板。B、C、D 三种为具有不同镂空度的栅状平面，均无两侧板。B 型栅条宽 25 mm ，两栅条之间的缝宽 5 mm ，镂空度 $\eta=16\%$ 。C 型栅条宽 20 mm ，两栅条之间的缝宽 10 mm ， $\eta=33\%$ 。D 型栅条宽 15 mm ，两栅条之间的缝宽 15 mm ， $\eta=50\%$ 。

2.2 天线实验及数据处理

将天线支座安装在风洞天平上^{3,4)}，实验时由 8400 电子扫描阀系统采集天线六分量信号。实验

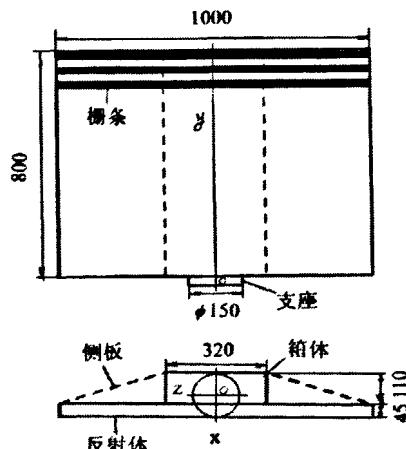


图 1 矩形平面天线外形简图

的俯仰角 $\alpha=0^\circ$ 、 8° 、 16° 。方位角 $\beta=0^\circ \sim 180^\circ$ 。实验风速 $V=10, 20, 30, 40, 50 m/s$ ，基于天线宽度的雷诺数 Re 分别为 $0.67 \times 10^6, 1.33 \times 10^6, 2.00 \times 10^6, 2.67 \times 10^6, 3.33 \times 10^6$ 。

天线体轴坐标系 oxy 的坐标原点 o 位于天线方位轴 oy 与支座底部平面的交点处， ox 轴沿天线主反射面的法线方向为正， oy 轴垂 ox 轴，竖直向上为正， oz 轴垂直于 oxy 平面，并与 ox, oy 轴构成右手系。天线的测力结果作了支架干扰和模型堵塞修正，并将结果化成无因次系数的形成，力 F 的系数为 $c_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V^2 S}$ ，力矩 M 的系数为 $m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V^2 S b}$ 。各风力矩系数为体轴系，力矩参考点为天线支座中心 o 点。而各风力系数为风轴系的结果。

3. 实验结果分析

本文仅就气动载荷较大，且对天线特性分析较重要的阻力、侧力、方位力矩和俯仰力矩四个分量予以讨论。由于天线为非流线型，在实验的雷诺数范围内，雷诺数 Re 对模型的气动特性无明显影响，因此下面仅对雷诺数为 1.33×10^6 的实验结果进行分析。

3.1 阻力特性

图 2 示出了俯仰角 α 为 0° 时矩形平面天线的阻力系数随方位角 β 的变化特性，由图 2

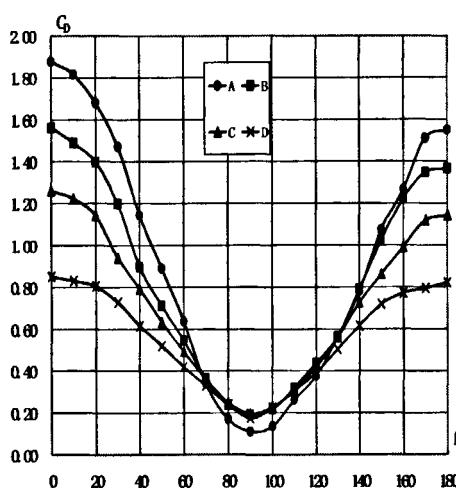


图 2 镂空度对矩形平面天线
阻力特性的影响

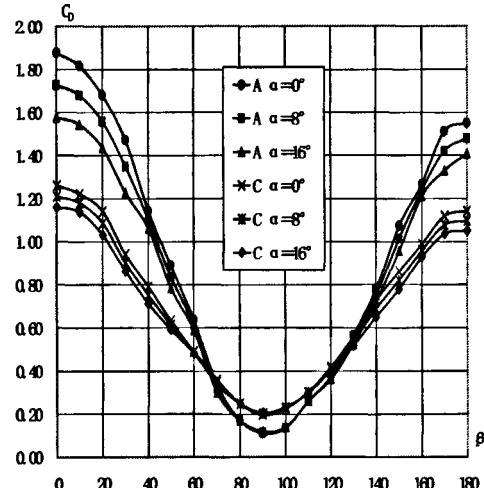


图 3 俯仰角对矩形平面天线
阻力特性的影响

可见，当 β 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内时，四种不同结构的平面矩形天线的阻力系数均随 β 的增大（迎风面减小）而减小，而在 $\beta=90^\circ \sim 180^\circ$ 时，它们的阻力系数均随 β 的增大（迎风面增大）而增大。从图 2 可以看到，矩形平面天线的平面镂空度不同，即迎风面不同，彼此间的阻力系数显著不同。在方位角 β 为 0° 时，镂空度 η 为 0 的实体平面天线的阻力系数最大 ($c_D=1.8775$)，镂空度为 16%、33%、50% 的栅状平面天线的阻力系数依次减小，分别为 1.5615、1.2599、0.8500，它们比实体平面天线的阻力系数分别减少了 17%、32%、55%。当 β 为 180° 时，各种结构平面天线的阻力系数随平面镂空度的变化规律与 β 为 0° 的相似。当 β 为 90° 时，镂空平面天线的阻力系数比实体平面天线的阻力系数略有所增。这是因为各栅条构成的平面过渡不如连续的实体平板面光滑。同时，在各栅条缝隙之间难免有部分的串流。在 $\beta=90^\circ$ 时，由上述两个耗散能量因素使栅状天线的阻力系数比实体天线增加了 0.0635，这一增量约为实体天线 ($\beta=0^\circ$ 时) 的 4%。

图3为不同俯仰角时的矩形平面天线的阻力特性,由图3可见,在 $\beta=0^\circ$ 和 180° 时,实体平面天线A和栅状平面天线C的阻力系数均随俯仰角增大而减小,其中栅状天线的阻力特性随俯仰角的变化比实体平面天线小。在 $\beta=90^\circ$,上述天线的阻力系数基本不随俯仰角而变。

3.2 侧力特性

从图4可以看出,在 $\beta=0^\circ$ 、 100° 和 180° 时,矩形平面天线的侧力系数为0,它们正峰值在 $\beta=40^\circ \sim 60^\circ$ 范围内,负峰值在 $\beta=140^\circ \sim 160^\circ$ 的范围内。其中A型天线的最大正侧力系数峰值为1.1367,D型天线的最大正侧力系数峰值为0.4778,后者的侧力系数峰值比前者减小了58%。

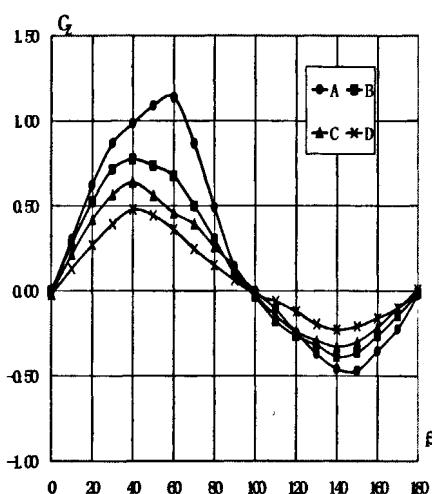


图4 镂空度对矩形平面天线
侧力特性的影响

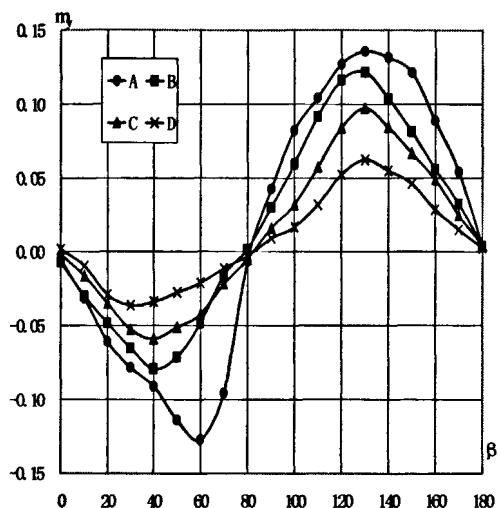


图5 镂空度对矩形平面天线
方位力矩特性的影响

3.3 方位力矩特性

图5为不同外形结构平面天线的方位力矩系数 m_y 随方位角 β 的变化特性,图5表明,在方位角 $\beta=0^\circ$ 、 80° 和 180° 附近,不同镂空度的平面天线的方位力矩系数 m_y 均为0。各天线的方位力矩系数在 $\beta=30^\circ \sim 60^\circ$ 范围内分别达到负峰值,而在 $\beta=130^\circ$ 时,各天线的方位力矩系数同时达到正峰值。方位力矩系数的绝对值随天线平面镂空度的增大而明显减小。实体平面天线方位力矩系数的正、负峰值分别为0.1350和-0.1273。D型栅状平面天线方位力矩系数的正、负峰值分别为0.0624和-0.0363。D型栅状平面天线方位力矩系数的正、负峰值比实体平面天线方位力矩系数的正、负峰值分别减小了54%和71%。由于天线驱动电机的功率主要取决于天线方位力矩的大小,这就表明栅状平面矩形天线可使驱动电机的功率减小,这就容许天线系统的结构重量减小。

3.4 俯仰力矩特性

图6为不同外形结构平面天线俯仰力矩系数的实验曲线,由图6可见,在 $\beta=100^\circ$ 附近各天线的俯仰力矩系数值均为0,在 $\beta=0^\circ$ 时,它们的俯仰力矩系数同时达到最大值,而在 $\beta=180^\circ$ 时,它们的俯仰力矩系数同

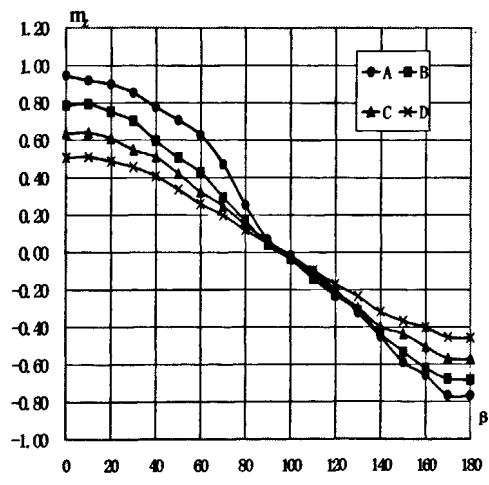


图6 镂空度对矩形平面天线俯仰力矩特性的影响

时达到最小值。**A** 型实体平面天线俯仰力矩系数的最大值为 0.9447, **D** 型栅状平面天线俯仰力矩系数的最大值为 0.5067。栅状平面天线的最大俯仰力矩系数比实体平面天线的减小了 46%。

4. 结 论

综上分析, 可得如下结论:

- 1) 通过改变矩形天线的平面外形结构能有效地改善天线的风荷载特性, 镂空度为 50%的栅状平面天线的最大阻力系数比镂空度为 0 的实体平板面天线减小了 55%, 侧力系数减小了 58%, 方位力矩系数减小了 54%, 俯仰力矩系数减小了 46%。天线方位力矩的减小, 驱动电机功率也相应的随之减小, 因此, 栅状平面天线不仅有效地减小了天线系统的重量, 而且还有助于节省能耗。
- 2) 本文研究结果可作此类天线强度、刚度校核和驱动电机功率选择的实验依据。

参 考 文 献

- [1] Brown L.S. Mchee K.E. Wind Load on Antenna Systems, The microwave Journal No. 9, 1964
- [2] Richards C.J. Mechanical Engineering in Radar and Communication, 1969
- [3] 周瑞兴, 上官云信, 高永卫. 圆锥和抛物面天线的风荷载及变形特性分析. 第十届全国结构风工程学术会议论文集, 2001.11.5
- [4] 周瑞兴, 上官云信, 高永卫. 圆锥和抛物面天线的风荷载及变形特性分析. 现代雷达, 2002 年第 24 卷第 2 期

附录:

第一作者: 周瑞兴 男, 高级工程师, 1943 年 12 出生

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、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),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>