

倾斜侧壁正八边形天线罩风载特性研究

孙宝国¹ 李刚² 刘海¹ 高宏林²

1 中国舰船研究中心, 上海 201108

2 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要: 风载是综合集成桅杆复合材料天线罩所受的主要载荷之一, 研究天线罩的风载特性将对复合材料天线罩的结构设计具有重要指导意义。采用试验和数值模拟的方法对倾斜侧壁正八边形天线罩的风载特性进行研究, 分析天线罩表面平均压力系数和脉动压力系数的周向分布规律, 以及 Strouhal 数(St 数)随雷诺数(Re 数)和风向角的变化规律, 并将计算结果与试验结果进行比较分析。研究结果表明: 平均压力系数和脉动压力系数沿周向分布变化较大, 不同风向角下 St 数随 Re 的增加趋于稳定值, 平均压力系数和脉动压力系数计算值与试验值基本相近。

关键字: 集成桅杆; 天线罩; 压力分布; Strouhal 数

中图分类号: U661.73

文献标志码: A

文章编号: 1673-3185(2012)06-31-06

Experimental and Numerical Investigation of the Wind Load Characteristics of an Oblique Sidewall Regular Octagon Radome

SUN Bao-guo¹ LI Gang² LIU Hai¹ GAO Hong-lin²

1 Shanghai Division, China Ship Development and Design Center, Shanghai 201108, China

2 College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: The wind load is one of the main loads born by the composite radome on the integrated mast. Research on the wind load characteristics of the radome is of great significance to the structural design of the composite radome. In this paper, both wind tunnel experiments and numerical simulations are performed to analyze the wind load characteristics of an oblique side-wall regular octagon radome. Particularly, the distribution of the average pressure coefficient and fluctuating pressure coefficient in the circumference direction are investigated. In addition, the variation of the Strouhal number along with the Reynolds number and the wind angle are analyzed. The results are seen to be consistent with field data and show that the distribution of the pressure coefficients vary considerably and the Strouhal number tends to be stabilized with the increase of the Reynolds number under different wind angles.

Key words: integrated mast; radome; pressure distribution; Strouhal number

0 引言

桅杆位于水面舰艇的最高位置, 其隐身性能的好坏直接影响整个舰艇隐身性能的优劣^[1-2]。在现代舰艇设计中, 已开始逐渐采用综合集成桅杆, 并通过采用具有透波功能的复合材料天线罩,

以及开展结构外型设计来降低桅杆的雷达散射截面, 以提高水面舰艇的隐身性能^[3]。

综合集成桅杆复合材料天线罩为正八边形的薄壁框架无加强筋结构, 天线罩刚度相对较低, 在外载荷作用下可能会因局部刚度强度不足而发生破坏。风载是天线罩所受的主要载荷, 现行军用

收稿日期: 2012-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50939002, 50809018); 国家部委基金资助项目

作者简介: 孙宝国(1970-), 男, 高级工程师。研究方向: 舰船总体与结构设计。E-mail: SBG_SH_CN@Hotmail.com

李刚(1987-), 男, 博士研究生。研究方向: 船舶与海洋结构物结构性能及安全。E-mail: heuligang@126.com

通信作者: 李刚。

标准中对桅杆所受风载的计算方法仍是针对钢质筒形桅杆而制定,主要强调桅杆的总体刚度和强度^[4],而正八边形天线罩外型的特殊性则导致其在流场中的绕流特性与以往的筒形桅杆存在较大差异^[5-6]。可见,现行军用标准中的风载计算方法已不再适用于正八边形复合材料天线罩的结构设计,必须及时开展倾斜侧壁正八边形天线罩风载特性研究。

在研究柱状结构的绕流特性问题时,以往的研究大多是针对圆形或矩形截面形式的垂直侧壁柱状结构,研究方法已从实验方法发展到理论数值计算探讨,已发表的研究成果大多为柱体表面压力系数的分布,阻力系数、升力系数、Strouhal数(St 数)等与雷诺数(Re 数)的关系^[7-9]。具有倾斜侧壁的正八边形天线罩由于具有良好的隐身性能而逐渐在现代水面舰艇结构设计中得到广泛应用。本文将具有倾斜侧壁的正八边形天线罩为研究对象,应用试验和数值方法对其风载特性进行研究,以为综合集成桅杆复合材料天线罩结构设计载荷的确定提供参考依据。

1 研究方法

1.1 风洞试验方法

根据相似理论可知,若试验模型周围的空气流场与实际天线罩周围的空气流场相似,则可由试验结果通过相似转换得到实际天线罩的风压特性。天线罩的风压特性主要与流体的粘性有关,因此,试验的相似条件为雷诺数相等。理论分析与实验研究表明,当实验雷诺数达到一定数值后,模型的平均压力系数趋于稳定值^[10-11],称此雷诺数为临界雷诺数,可通过试验测得临界雷诺数以实现雷诺数的相似,即可通过试验得到天线罩的风载特性。

试验在目前亚洲最大的低速增压风洞进行。试验模型为天线罩缩比模型,呈倾斜侧壁的正八边形棱柱结构。根据天线罩缩比模型的迎风面积小于试验段横截面积10%的要求,选定本试验模型的缩尺比为1:6,此时,试验模型的最大迎风面积约为风洞试验段横截面积的8%。试验模型通过半模支杆连接到风洞的测力天平上,同时为消除风洞下壁附面层的影响,试验时,采用密封围板将模型抬高,密封围板安装在驾车盖板转盘上,试验模型整体安装在风洞的下壁面,数据导线通过模型内部引出与洞外的数据采集器连接。试验采用固定风速改变风向角的方式进行。试验时,通

过同步运转测力天平转盘和驾车盖板转盘使模型达到预定的风向角,试验采用压力传感器测得模型表面的压力,试验状态下的天线罩模型如图1所示。

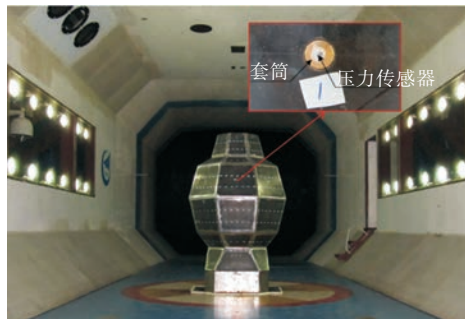


图1 风洞试验状态下的模型

Fig.1 The experiment model in wind tunnel

1.2 数值模拟方法

通过计算流体力学软件 ANSYS ICEM CFD 和 CFX 对模型的绕流特性进行数值模拟。数值计算时,采用 RNG k - ε 湍流模型模拟天线罩的风载分布。RNG k - ε 湍流模型通过在大尺度运动和修正后的粘度项上体现小尺度的影响,进而使小尺度的运动有系统地从控制方程中去除。RNG k - ε 湍流模型的控制方程组如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho U_k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{kRNG}} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_\varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_k - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon) \quad (2)$$

式中, k 为湍流动能; ε 为湍流耗散项; P_k 为湍流动能 k 的产生项, $P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U$

$(3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) - \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} g \cdot \nabla \rho$; μ_t 为湍流粘性系数,

$\mu_t = \rho C_{\mu RNG} \frac{k^2}{\varepsilon}$; $C_{\varepsilon 1 RNG} = 1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/4.38)}{1 + \beta_{RNG} \eta^3}$, 其中

$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho C_{\mu RNG} \varepsilon}}$ 。其余参数均为常量,分别为:

$C_{\mu RNG} = 0.085$, $C_{\varepsilon 2 RNG} = 1.68$, $\beta_{RNG} = 0.015$, $\sigma_{kRNG} = \sigma_{\varepsilon RNG} = 0.7179$ 。

L 为天线罩特征长度,为了准确模拟天线罩的绕流特性,流场应满足入口至天线罩中心的距离不小于 $4L$,出口至天线罩中心的距离不小于 $16L$,流场宽度不得小于 $8.5L$,计算控制区域俯视图如图2所示。设置流场入口为速度入口,出口

为压力出口,即设置出口压力为零,流场取温度为25℃时的粘性空气流场。流场四周采用自由滑移的壁面边界条件,天线罩表面采用无滑移的壁面边界条件。

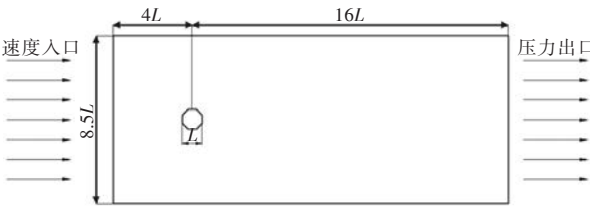


图2 计算控制区域
Fig.2 The sketch of solution domain

采用六面体结构网格对计算区域进行网格划分。为较精确地模拟天线罩的绕流特性,天线罩模型表面第一层网格满足如下公式^[12]:

$$50 \leq y^+ = 0.03Re \frac{Y}{L} \leq 200 \quad (3)$$

式中, Δy 为第1层网格控制点距壁面的高度。流场和模型网格划分如图3所示。

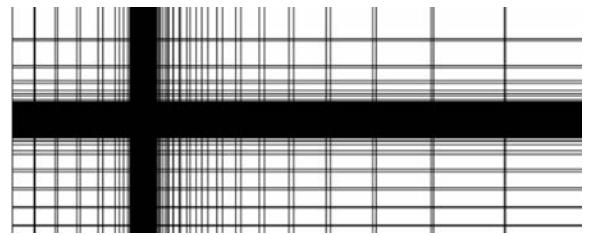


图3 网格划分模型
Fig.3 Meshing division model

1.3 工况和测点布置

设定风速范围为40~100 m/s,相应的雷诺数范围为 $3.5 \times 10^6 \sim 7 \times 10^6$ 。考虑到正八边形的对称性,设定风向角 β 为 $0^\circ, 12^\circ$ 及 22.5° ,共18种工况,工况具体情况如表1所示。

表1 工况表
Tab.1 Test conditions

风速 $/(m \cdot s^{-1})$	雷诺数 Re	风速 $/(m \cdot s^{-1})$	雷诺数 Re
50	3.5×10^6	80	5.6×10^6
60	4.2×10^6	90	6.3×10^6
70	4.9×10^6	100	7.0×10^6

风洞试验中,采用压力传感器测定模型表面的压力,压力传感器布置方式如图4所示。天线罩侧面的中点各布置一个压力传感器,流体边界层分离和旋涡发放起始于天线罩两侧面区域,各多布置一个压力传感器。此外,在天线罩的迎风面,沿天线罩高度方向布置3个压力传感器,用以测量压力沿天线罩高度方向的分布。

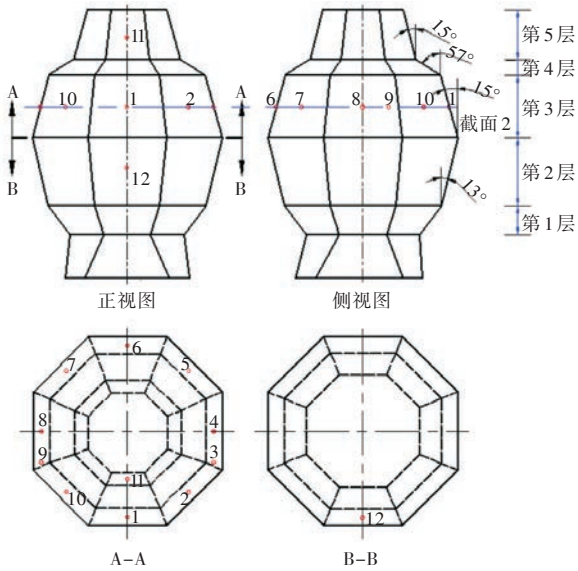


图4 压力传感器布置示意图
Fig.4 Arrangement of the pressure sensors

2 结果分析与讨论

2.1 平均压力系数

定义平均压力系数 C_{p_0} 以衡量天线罩表面所受的平均压力,其表达式为:

$$C_{p_0} = \frac{2(P - P_0)}{\rho V^2} \quad (4)$$

式中, P 为天线罩表面实际压力值,Pa; P_0 为流场静止时的初始压力值,Pa; ρ 为空气密度,kg/m³; V 为风速,m/s。

风向角 $\beta = 0^\circ$ 时,各测点平均压力系数随雷诺数的变化曲线如图5所示。从图中可知,测点平均压力系数随雷诺数的增加基本保持不变,其它各工况时测点平均压力系数随雷诺数的变化趋势基本相同,说明试验雷诺数已超过临界雷诺数。因此,试验可以保证天线罩模型的风压特性与实际风压特性相似。

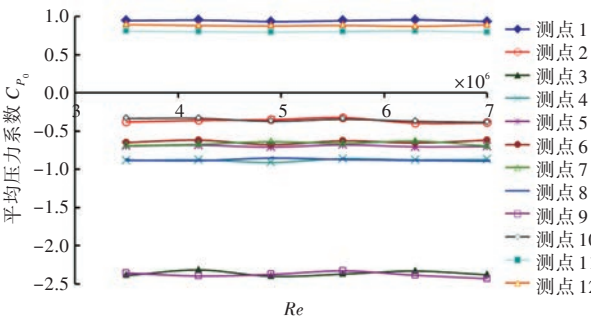


图5 测点平均压力系数曲线($\beta = 0^\circ$)
Fig.5 Curves of average pressure coefficients($\beta = 0^\circ$)

风向角分别为 $0^\circ, 12^\circ$ 和 22.5° 时,天线罩模型平均压力系数周向分布曲线如图6所示。由图可

知,试验测得的不同雷诺数下各截面的平均压力系数周向分布曲线基本重合。在风向角 $\beta = 0^\circ$ 时,各截面均在 $70^\circ \sim 290^\circ$ 范围内产生绕流分离区,且在分离点 70° 和 290° 附近的位置产生了明显的负压力峰值,最大负压值约为 -2.5 。随着风向角 β 由 0° 变化到 22.5° ,分离区的强度随之减弱,负压力峰值也随之减小。

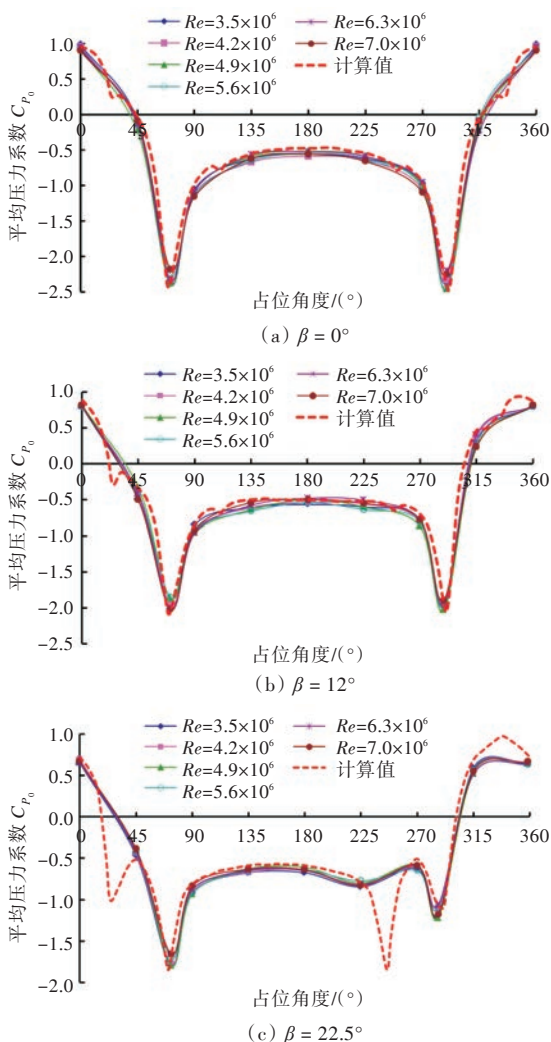


图6 平均压力系数周向分布曲线
Fig.6 Curves of average pressure coefficients distribution in circumference direction

为了更精确地得到天线罩的周向平均压力分布趋势,在计算时间间隔 7.5° 选取监测点进行分析。将图6中的计算结果与试验结果进行比较分析可知,数值计算和试验测得的平均压力系数与周向分布趋势基本相同。但由于试验中布置的测点较少,因而未能得到个别位置较精确的压力特性,尤其是当风向角 $\beta = 22.5^\circ$ 时,试验只测得了一对负压峰值,而计算却得到了两对负压峰值,且计算峰值与测得的峰值基本相近,说明采用数值模拟方法可以较准确地计算天线罩的平均压力分布。因此,在进行天线罩结构设计时亦可采用数

值模拟方法来计算天线罩周围的平均压力分布。

图7所示为 $V = 100 \text{ m/s}$ 时模型整体压力分布云图。由图中可看出,压力沿天线罩周向分布变化较大。在倾角不大于 15° 的侧壁上,压力沿天线罩的轴向分布变化不大,可以认为是均匀分布,但在倾角为 57° 的侧壁上,压力沿轴向变化较大,这主要是由于侧壁倾角较大时风速将在天线罩轴向产生较大的速度分量。沿天线罩轴自下而上布置的测点12,1,11所在侧壁的倾角分别为 $13^\circ, 15^\circ$ 和 15° ,其平均压力系数曲线如图8所示。由图中可知,测点1和测点12的平均压力系数曲线基本相同,但测点11的平均压力系数曲线较测点1和测点12有一定的差异,这主要是由于与测点11所在侧壁相邻的第4层侧壁倾斜角度较大(57°),从而导致在天线罩轴向产生了较大的速度分量。因此,对于具有倾斜侧壁的正八边形天线罩,应根据倾角较小的侧壁截面的压力来确定设计风载。

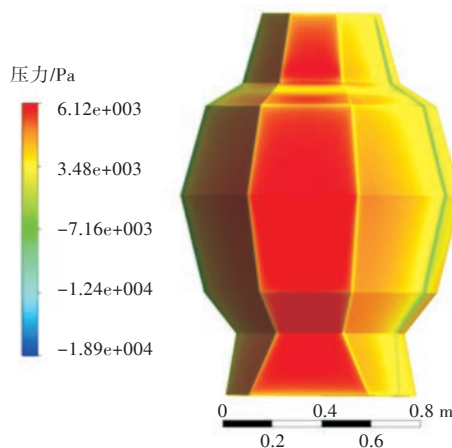


图7 模型整体压力分布云图
Fig.7 Pressure distribution contour of the whole model

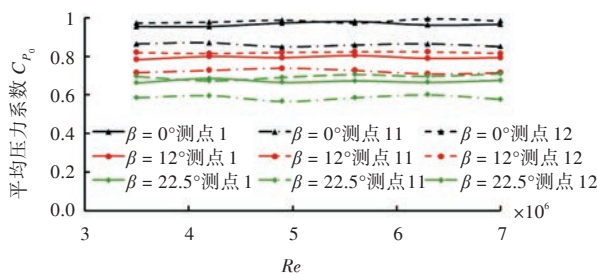


图8 轴向测点平均压力系数曲线
Fig.8 The average pressure coefficient curve of measure points in the axial direction

2.2 脉动压力系数

定义脉动压力系数 C_p' 以衡量天线罩表面所受的脉动压力,其表达式为:

$$C_p' = \frac{P_{rms}'}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (5)$$

式中, P_{rms}' 为脉动压力的均方根值, $P_{rms}' = \sqrt{\sum P'(t)^2/n}$ 。

风向角分别为 0° , 12° 和 22.5° 时的脉动压力系数周向分布曲线如图9所示。由图可知,不同雷诺数下脉动压力系数周向分布趋势基本相同。在绕流开始分离的位置,脉动压力系数相对其它位置较大,曲线出现峰值。随着风向角 β 从 0° 向 22.5° 变化,脉动的幅值出现一定程度的减弱趋势,峰值由 0° 风向角时的 0.13 降至 22.5° 风向角时的 0.1 左右。通过计算得到的脉动压力系数周向分布趋势与试验测得的分布趋势基本相同,说明采用数值模拟方法也可以较准确地计算天线罩所受的脉动压力。

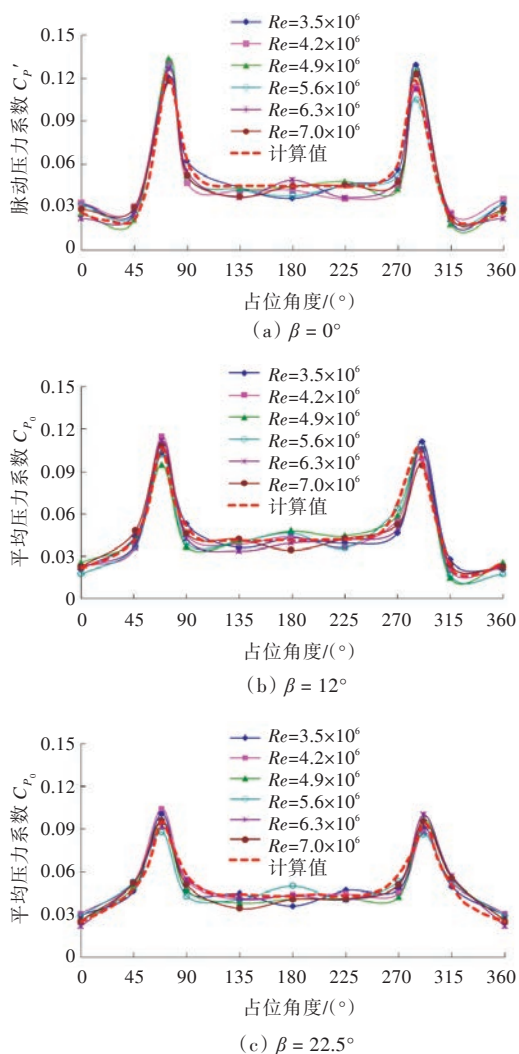


图9 脉动压力系数周向分布曲线
Fig.9 Curves of fluctuating pressure coefficients distribution in circumference direction

2.3 St 数

采用 St 数反映漩涡形成和脱落周期性,其定义如下:

$$St = \frac{fL}{V} \quad (6)$$

式中, f 为漩涡脱落频率。

将试验测得的数据作快速傅里叶变换可得到漩涡脱落的主频率,代入式(6)可得 St 数随 Re 数变化曲线,如图10所示。由图可知,在不同风向角下, St 数随 Re 数的变化基本在 0.21 左右小幅波动,可以认为 St 数趋于稳定值 0.21。因此,试验可以保证 St 数相似,在进行天线罩结构设计时,可以根据相似准则确定实际天线罩所受风载的脉动频率。

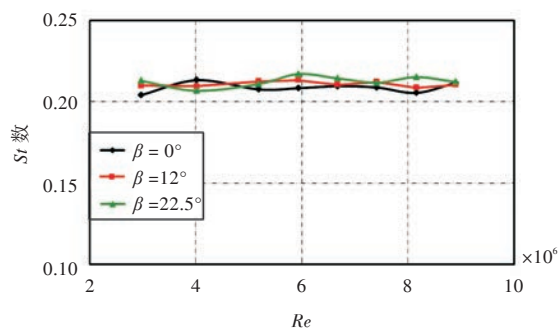


图10 St 数随雷诺数变化曲线
Fig.10 Variation of Strouhal number with respect to Reynolds number

3 结 论

本文针对具有倾斜侧壁的正八边形综合集成桅杆天线罩,分别采用试验和数值模拟方法研究了风向角为 0° , 12° , 22.5° , 雷诺数在 $3.5 \times 10^6 \sim 7 \times 10^6$ 范围内的天线罩的风载特性,分析了平均压力系数、脉动压力系数及 St 数的变化规律,并将计算与试验结果进行了对比分析,得到结论如下:

- 1) 平均压力系数、脉动压力系数和 St 数随雷诺数的增加基本保持不变。
- 2) 随着风向角从 0° 向 22.5° 变化,绕流分离区的强度相应减弱,平均压力系数和脉动压力系数峰值均减小,可根据 0° 风向角时的压力分布确定天线罩的设计风载。
- 3) 对于具有倾斜侧壁的正八边形天线罩,其设计风载应根据倾角较小的侧壁截面的压力分布确定。
- 4) 风向角的改变对 St 数几乎无影响,在试验雷诺数范围内, St 数基本稳定在 0.21 左右,进行天线罩结构设计时可以根据相似准则确定实际天线罩所受风载的脉动频率。

- 5) 计算结果与试验结果基本相近,在工程结构设计中,采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型可以较准确地模拟天线罩表面的风压特性。

参考文献:

- [1] 潘镜芙. 水面舰艇的发展和展望[J]. 船舶工程, 2005, 27(增刊1): 35-41.
PAN J F. The development and prospect of surface warships[J]. Ship Engineering, 2005, 27(s1): 35-41.
- [2] 张有益, 张殿友. 舰艇雷达波隐身技术研究综述[J]. 舰船电子对抗, 2007, 30(2): 5-11.
ZHANG Y Y, ZHANG D Y. Summary of stealth technology about radar wave in naval ship[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2007, 30(2): 5-11.
- [3] 徐杰. 舰船隐身技术[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(6): 6-8.
XU J. Hiding technology of vessel[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(6): 6-8.
- [4] 海军规范所. GJB 4000-2000 舰船通用规范[S]. 北京: 总装备部军标出版社, 2000.
- [5] 姚熊亮, 李绪禄, 王领. 基于LES的三维桅杆绕流的数值实验研究[J]. 海军工程大学学报, 2007, 19(5): 44-49.
YAO X L, LI X L, WANG L. Numerical experiment research on flow around three-dimensional mast based on LES[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2007, 19(5): 44-49.
- [6] YEN S C, YANG C W. Flow patterns and vortex shedding behavior behind a square cylinder[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(8): 868-878.
- [7] CATALANO P, WANG M, IACCARINO G, et al. Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds numbers[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4): 463-469.
- [8] IUNGO G V, PII L M, BURESTI G. Experimental investigation on the aerodynamic loads and wake flow features of a low aspect-ratio circular cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 28: 279-291.
- [9] SHIELS D, LEONARD A, ROSHKO A. Flow-induced vibration of a circular cylinder at limiting structural parameters[J]. Journal of Fluids and Structures, 2001, 15(1): 3-21.
- [10] 姚熊亮, 张阿漫, 王领, 等. 高雷诺数时筒形桅杆在均匀流场中的风载实验研究[J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(1): 32-37.
YAO X L, ZHANG A M, WANG L, et al. Experiment research of wind acting on close mast in even flow with high Reynolds number[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2008, 20(1): 32-37.
- [11] KUMAR B, MITTAL S. Prediction of the critical Reynolds number for flow past a circular cylinder[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(44/47): 6046-6058.
- [12] ZHANG M L, SHEN Y M. Three-dimensional simulation of meandering river based on 3-D RNG $k-\varepsilon$ turbulence model[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(4): 448-455.

[责任编辑: 喻 菁]

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),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>