

· 仿真技术 ·

中国分类号: TN955

文献标识码: A

文章编号: 1004-7859(2009)03-0077-04

天线风载的数值模拟分析

杜 强, 杜平安

(电子科技大学机电工程学院, 成都 610054)

摘要: 论述了利用计算流体动力学数值计算方法得到天线风压的原理, 采用基于 Reynolds 时均 N-S 方程和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的数值研究方法对具有风洞实验结果的矩形平面天线的风压分布进行了数值模拟, 分析了天线工作面风压的分布特性。在此基础上计算了不同风向角下天线阻力系数, 并与风洞实验结果进行比较, 进一步用数值计算方法研究了风速与风载间的关系。研究结果表明: 数值计算结果和风洞实验结果比较吻合, 风速或雷诺数变化对风载阻力系数无影响, 数值计算方法可以在天线风载计算及周围风场分析研究中发挥重要作用。

关键词: 天线; 数值模拟; 湍流模型; 阻力

Analysis for Numerical Simulation of Wind Loads on Antenna

DU Qiang, DU Ping-an

(School of Mechatronics Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In this paper, the principle of numerical computation of wind pressure on antenna is discussed and the numerical simulation of wind-induced pressure based on Reynolds-averaged N-S equations and RNG $k-\varepsilon$ turbulent model has been performed on a rectangular planar antenna on which the drag coefficients are obtained by method of experiment. Moreover, the characteristics of wind pressure distribution on antenna and the flow characteristics around antennas are analyzed. On the basis of it, the drag coefficients under different wind directions are calculated and compared with experimental data. Furthermore, the relation between wind velocities and wind loads has been studied by method of numerical simulation. The simulation results show that the computed results are in good agreement with the experimental data, and the change of wind velocity or Reynolds number have any effect on drag coefficients. So Computational Fluid Dynamics(CFD) technique can play an important role in the study of wind loads computation for antenna and analysis of fluid flow around antenna.

Key words: antenna; numerical simulation; turbulent model; drag force

0 引言

对天线结构进行强度与刚度计算时, 首先应确定天线载荷, 风载是天线主要侧向载荷。由于求解表示粘性流体运动的偏微分方程组非常困难, 所以通常通过风洞实验^[1]或采用风洞实验得到的结构阻力系数计算风载^[2]。随着计算流体动力学(CFD)理论的深入研究和方法的不断改进, 对天线风载进行数值计算已成为一种新的有效方法。

本文采用 CFD 数值模拟方法计算了 $0^\circ \sim 90^\circ$ 风向角下天线的风压, 分析了天线表面风压分布特性, 进而求得天线风载阻力系数。计算结果与文献[1]的风洞实验结果进行了比较, 并对可能产生误差的原因进行了分析。在此基础上, 利用数值方法对风速与风载间的关系做了进一步研究, 得到一些有用的结果。同时,

对各种天线风载研究方法的应用提出了建议。

1 数值计算方法

在近地面的风场中, 流体为低速、不可压缩的粘性牛顿流体, 忽略影响极小的体积力, 其基本控制方程(N-S 方程)为基于质量守恒原理的连续方程^[3-5]

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

向量算子 $\nabla = i\partial/(\partial x) + j\partial/(\partial y) + k\partial/(\partial z)$, 速度向量 $\mathbf{U} = u_1\mathbf{i} + u_2\mathbf{j} + u_3\mathbf{k}$, u_1, u_2, u_3 分别为速度向量 \mathbf{U} 在 x, y, z 方向的分量。以及基于动量守恒的运动方程

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i \mathbf{U}) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中: p 为流体微原体上的压力; τ_{ji} 分别为因分子粘性作用而产生的作用在微原体表面上的粘性应力 τ 的分量。

对于 N-S 方程, 可用直接数值模拟方法精确描述流场中所有尺度的湍流和流场特性的变化, 但在复杂三维空间特别是雷诺数较高时, 在目前的计算机上求

基金项目:“十一五”总装预研基金项目

通信作者: 杜强 Email: dlp697@163.com

收稿日期: 2008-11-28 修订日期: 2009-02-16

解是不可能的。因此工程上常采用对 N-S 方程平均的方法来计算流体湍流运动。

将 N-S 方程逐项平均可得基于雷诺应力的时均 N-S 方程

$$(\partial \bar{u}_i) / (\partial x_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + v \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}'_i \bar{u}'_j}{\partial x_j} \quad (4)$$

式(4)是雷诺方程,与 N-S 方程相比,多出了一组新的未知变量——雷诺应力 $\bar{u}'_i \bar{u}'_j$,连同速度和压力,方程组共有 10 个未知量,而控制方程只有 4 个,方程组不封闭,应引入湍流模型进行求解。本文采用涡粘模型中的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行计算,RNG $k-\varepsilon$ 模型可以较好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动,通过大尺度运动和修正后的粘度项来体现小尺度的影响,从而使这些小尺度运动有系统地从控制方程中去除。在涡粘模型方法中,雷诺应力被表示成湍动粘度的函数。

根据 Boussinesq 提出的涡粘假定,雷诺应力与平均速度的关系为^[6]

$$-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j = \mu_t \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \left[\rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right] \delta_{ij} \quad (i = j, \delta_{ij} = 1; i \neq j, \delta_{ij} = 0) \quad (5)$$

式中: μ_t 为湍动粘度; k 为湍动能。

对于不可压缩流体, k 和湍动能耗散率 ε 对应的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

$$(\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \mu_t = \rho C_\mu \kappa^2 / \varepsilon, C_\mu = 0.0845,$$

$$\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39, C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68,$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}, \eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon},$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right], \eta_0 = 4.377, \beta = 0.012$$

考虑壁面条件对流场的影响,本文选用标准壁面函数来修正 RNG $k-\varepsilon$ 模型,以模拟壁面附近复杂的流动现象。在对计算区域进行网格划分时,采用非结构化四面体网格。为了提高网格质量,采用光顺技术对网格控制点的位置进行调整,实现对网格的优化。对控制微分方程进行离散时,采用有限体积法将微分方

程分解成一系列关于多个变量的非线性耦合代数方程组,采用一阶迎风格式离散对流项,采用具有二阶精度的中心差分格式离散扩散项;对于压力-速度耦联方程,则采用 (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations, SIMPLE) 算法实现联立方程的求解。

2 天线风数值计算

2.1 计算模型

为了便于比较,计算采用的天线尺寸及计算域尺寸完全与风洞实验相同。天线宽 1 m,高 0.8 m,置于 3.5 m × 2.5 m × 12 m 的计算域正中。用 Pro/E 建立几何模型,用 Gambit 划分网格,天线附近网格进行了加密,共得到约 23 万个网格,结果如图 1、图 2 所示。

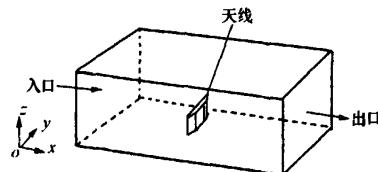


图 1 计算区域

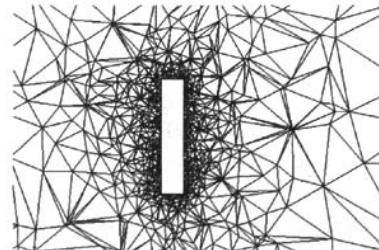


图 2 计算域纵剖面网格划分

2.2 边界条件

入口边界条件:来流剪切流,根据实验设定 x 方向风速 20 m/s, y 和 z 方向风速均为 0。

入口剖面湍流特性由实验给定的湍流强度 I 和湍流积分尺度 l 的方式来定义。

出口边界条件:湍流充分发展,流场任意物理量 φ 在出口法向梯度均为零,即 $(\partial\varphi)/(\partial n) = 0$ 。

壁面条件:计算域上、下、左、右侧和天线表面均为无滑移壁面条件。

2.3 计算结果

利用 FLUENT 对 0° ~ 90° 风向角(间隔 10°)下天线的风压进行计算。0° 风向角下天线迎风面风压分布及流场纵剖面天线附近流动情况如图 3、图 4 所示。

由图 3 可知:天线迎风面受到的主要风压,风压最大值发生在天线中部,而在天线边缘风压最低甚至

为负压。

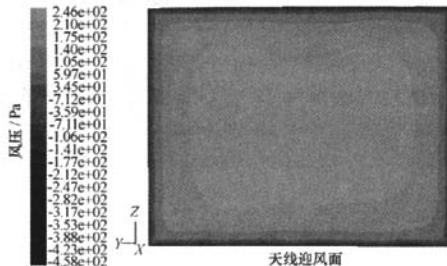


图 3 天线迎风面风压分布

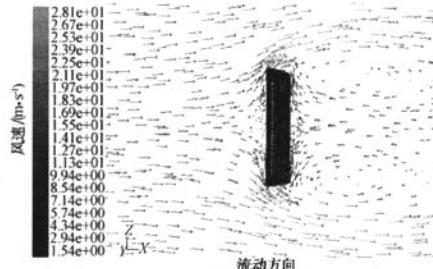


图 4 流场纵剖面速度分布

由图 4 可知: 由于天线的阻碍, 风速在接近天线时急剧减小, 流动气体向天线边缘挤压导致流速增加, 流体在天线前缘分离, 并在天线后部形成范围较广的尾迹区, 其中流动方向相反的 2 个漩涡消耗了大量动能, 在天线后部形成负压区。对作用在天线上不同方向的风压积分即可得到天线所受到的风载。本文为与风洞实验比较, 仅对与风向平行的风载阻力进行计算。

3 计算结果分析

3.1 计算结果的表示

为与实验结果比较, 本文利用数值计算得到的风载值求出无量纲的阻力系数。阻力系数定义为^[7]

$$C_D = (2F_D)/(\rho v^2 A) \quad (8)$$

式中: F_D 为天线所受到的风载阻力; ρ 为空气密度; v 为距天线充分远处天线高度处的风速; A 为天线的特征面积。

式(8)也是工程设计中利用风洞实验获得的结构阻力系数计算风载的公式。

3.2 计算结果对比

数值计算与风洞实验得到的天线在不同风向角下阻力系数变化曲线如图 5 所示。

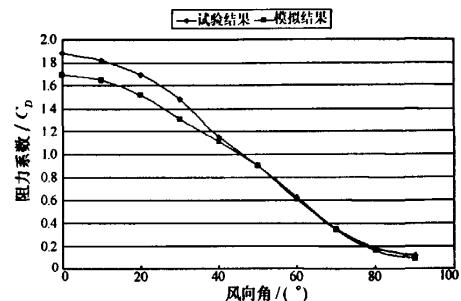


图 5 0°~90°风向角下研究结果比较

由图 5 可知: 数值模拟和风洞实验得到的阻力系数总体变化趋势接近, 在 40°~90° 风向角下 2 组数据非常吻合, 而在其他风向角下则有一定偏差, 随风向角的减小偏差增加。

究其原因: 首先, 风向角越小来流分离和漩涡脱落越严重, 而 RNG k - ϵ 湍流模型模拟流动分离较严重的流场精度还不够高; 其次, 风向角越小实验风洞的壁面对实验结果的干扰越严重, 实验的测量精度也会受到的影响。因此, 在风洞实验的阻塞率较小, 洞壁干扰小的情况下, 可以认为数值模拟结果和风洞实验结果基本一致。

3.3 利用数值计算方法对天线风载的进一步研究

在数值计算结果与实验结果比较的基础上, 本文利用数值模拟方法对不同风速下的天线结构风载进行了研究。

采用上述计算方法及边界条件设置, 对天线在 0° 风向角、不同风速下风载进行计算, 计算结果见表 1。

表 1 不同风速下的天线风载阻力

风速/(m·s ⁻¹)	雷诺数	阻力值/N	阻力系数
1	0.069 × 10 ⁶	0.840	1.680
6	0.414 × 10 ⁶	29.951	1.697
10	0.960 × 10 ⁶	83.030	1.694
20	1.380 × 10 ⁶	331.369	1.690
40	2.760 × 10 ⁶	1 323.023	1.687
60	4.140 × 10 ⁶	2 974.060	1.686
80	5.520 × 10 ⁶	5 284.026	1.685
100	6.900 × 10 ⁶	8 252.720	1.684
120	8.280 × 10 ⁶	11 880.090	1.683
140	9.660 × 10 ⁶	16 165.690	1.683

由表 1 可知, 当风速改变即雷诺数变化时, 天线结构的阻力系数基本不变, 可以认为阻力系数是常数, 其值仅与天线形状有关。由风洞实验或数值模拟得到某一形状天线的阻力系数后, 即可由式(8)方便地计算出具有相同结构形状天线的阻力。

表 1 拟合得到风速与风载关系曲线如图 6 所示。

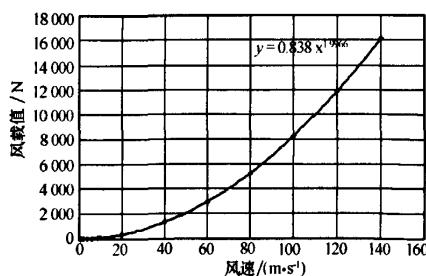


图 6 风速与风载的关系曲线

由图 6 可知,风载与风速为二次幂函数关系。在风洞实验或数值模拟得到某一风速下天线的风载后,即可方便地计算出该天线在其他风速下的风载。

3.4 天线风载研究方法比较

目前,对天线风载研究主要采用风洞实验和在风洞实验基础上的公式计算方法,本文应用 CFD 数值模拟技术对天线风载进行了计算,得到与风洞实验相近的结果,现将这 3 种研究方法的特点总结如下:

(1) 风洞实验采用相似性原理,实验数据较准确。但投资费用高、实验周期长,同时相似性也会导致实验误差;

(2) 计算公式采用因次分析法,在某种结构形状天线的阻力系数已由风洞实验或数值模拟得到时计算快捷、方便;

(3) 数值计算方法以流体力学基本方程 N-S 方程为基础,利用计算程序或模拟软件进行全尺度模拟,可方便地修改计算条件、参数,清楚地显示流动细节,研究成本较风洞实验大为降低。但须借助湍流模型,计算精度还需提高。

由上述的研究特点可知,根据天线风载研究的不同需要应采用不同的研究方法。风洞实验应用于重要天线设计工作;公式计算方法应用于阻力系数已知的同系列天线的设计计算;而 CFD 计算方法则用于重要、复杂结构天线设计的前期计算,为风洞实验提供参考,也可对一般天线的风载进行计算。

4 结束语

本文采用 CFD 数值计算方法对矩形平面天线的风载进行了数值模拟,通过计算结果与风洞实验结果的对比分析,可以得到以下结论:

(1) 数值计算方法具有相当的可信度,可用于天线风载的计算及分析。在天线结构设计中采用 CFD 方法可以清楚地显示天线所受风压及周围流场的流动情况,方便地进行天线结构设计调整。在天线安装条件复杂情况下,数值计算风载比风洞实验更具优势;

(2) 数值模拟方法在计算来流分离严重的天线风载与风洞实验结果有一定偏差,表明采用的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型还需改善;

(3) CFD 数值模拟、风洞实验和公式计算方法在天线风载研究中各有其特点。在实际工作中结合使用这 3 种研究方法,可以降低研究成本、提高计算工作效率。

参 考 文 献

- [1] 惠增宏,高永卫,肖春生. 矩形平面天线风荷载的实验研究[J]. 现代雷达,2006,28(3):63-65.
HUI Zeng-hong, GAO Yong-wei, XIAO Chun-sheng. Experimental investigation of wind loads on rectangle Planar antennas[J]. Modern Radar, 2006, 28(3):63-65.
- [2] 肖万选. 舰载雷达天线荷载的确定[J]. 现代雷达, 1998, 20(5):69-77.
XIAO Wan-xuan. Determination on load of the antenna of ship-borne radar[J]. Modern Radar, 1998, 20(5):69-77.
- [3] 约翰 D. 安德森. 计算流体力学基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007:30-45.
JOHN D. Anderson. Computational fluid dynamics (the basics with applications) [M]. Beijing: China Mac-Hine Press, 2007:30-45.
- [4] Murakami S. Past, present, and future of CWE: The view from 1999[C] // Larsen, Laroze GL, Livesey F M. Wind Engineering into the 21st Century. Rotterdam: Balkema Press, 1999:91-104.
- [5] Alan G. Davenport. Past, present, and future of wind engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90:1371-1380.
- [6] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005:119-124.
WANG Fu-jun. Analysis for computational fluid dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005:119-124.
- [7] 叶尚辉. 天线结构设计[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1986:91-92.
YE Shanghui. Design for antenna structure [M]. Xi'an: Northwest Telecommunication Engineering College Press, 1986:91-92.

杜强 男,1969 年生,博士研究生,工程师。研究方向为计算流体力学及应用。

杜平安 男,1962 年生,教授,博士生导师,博士。研究方向为数字化设计、仿真与制造等。

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>