

大气边界层中天线风载特性的数值分析

杜 强, 杜平安

(电子科技大学机械电子工程学院 成都 610054)

【摘要】基于Reynolds时均N-S方程和RSM湍流模型,以大气边界层中具体地貌的风速剖面为入口边界条件,对某一车载雷达天线的风载进行数值模拟,得到天线的阻力系数;并与目前天线设计采用的均一风速为边界条件的计算结果进行比较,研究了工作高度、风速、地貌等因素对大气边界层中天线风载特性的影响。计算结果表明,大气边界层中天线的阻力系数随工作高度及风速的增加而增大;而地面粗糙度对天线阻力系数的影响则由天线相对于标准参考高度的位置决定。

关键词 天线; 边界层; 数值分析; RSM湍流模型; 风载

中图分类号 TN957.2; O368

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.02.003

Numerical Analysis for Characteristics of Wind Loads on Antennas in Atmospheric Boundary Layer

DU Qiang and DU Ping-an

(School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Based on the Reynolds-averaged N-S equations and Reynolds stress equation model (RSM), the numerical simulation is performed on a vehicle-mounted radar antenna. In the simulation, the inlet boundary type is defined as velocity inlet with wind velocity section in specified exposure category. The drag coefficients of the antenna are obtained and compared with the results of computational models in which the boundary velocity is uniform velocity. The effects of working height and wind velocity on the antenna characteristics of antenna in atmospheric boundary layer are studied. The results show that the drag coefficients of antennas will be increased along with the working height and wind velocity, and the effect of the ground roughness to the drag coefficients is decided by the position relative to the normal height.

Key words antennas; boundary layer; numerical analysis; RSM turbulent model; wind loads

雷达天线是高精度的复杂电子设备,易受外界环境变化的影响。风载是天线侧向的主要载荷,在进行天线设计时,必须考虑风载对天线可靠工作的影响^[1]。由于工作环境的不确定(特别是运动天线),通常在风洞中采用均一入口风速进行风洞实验(设计工况),从而得到风力系数,进行天线强度和刚度设计^[2]。由于受地面影响以及风工程中标准高度的规定,大气边界层中(工作工况)的实际流动特性与设计工况不同。风洞实验流场为低湍流度的平滑流场,大气边界层流场为风速剖面及湍流度随高度变化的湍流场,所表现出的结构风载特性也有所差异。

本文以工作于大气边界层中B类地貌的某一车载天线为例,采用实际风速剖面为入口边界条件对天线风载进行数值计算,得到天线风力系数随工作

高度、风速变化的规律,进一步研究了地貌条件变化对天线风力系数的影响。

1 天线风载的数值计算原理

在近地面的风场计算中,流体为低速、不可压缩和粘性牛顿流体,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]:

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

基于动量守恒的运动方程为:

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

式中 p 为流体微团上的压力; τ_{ji} 为因分子粘性作用而产生的作用在微团表面上粘性应力 τ 的分量。

将N-S方程逐项平均,可得基于雷诺应力的时均N-S方程为:

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

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

上述时均N-S方程多出了一组新的未知变量——雷诺应力 $\overline{u'_i u'_j}$ 。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，因此应引入湍流模型进行求解。

本文使用RSM湍流模型，直接采用微分形式的运输方程计算雷诺应力 $\overline{u'_i u'_j}$ ，从而实现对雷诺方程的封闭。

对于不可压缩流体，依据承担粘性耗散的小尺度涡团是各向同性的假定，雷诺应力运输方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} + \mu \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) - \\ &\rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial u_k} + \overline{u'_i u'_k} k \frac{\partial u_i}{\partial u_k} \right) + \phi_{ij} - \frac{2}{3} \rho \varepsilon \delta_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

文献[6-7]提出线性压力应变模型，不考虑壁面反射对应力的影响，压力应变项 ϕ_{ij} 可分解为：

$$\phi_{ij} = \phi_{ij,1} + \phi_{ij,2} \quad (6)$$

式中 $\phi_{ij,1}$ 、 $\phi_{ij,2}$ 分别按下列各式计算：

$$\phi_{ij,1} = -C_1 \rho \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) \quad C_1 = 1.8 \quad (7)$$

$$\phi_{ij,2} = -C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right) \quad C_2 = 0.6, \quad P = \frac{1}{2} P_{kk} \quad (8)$$

式中 ρ 为空气密度； $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ 为湍动粘度； $\sigma_k = 0.82$ 。当 $i=j$ 时， $\delta_{ij}=1$ ；当 $i \neq j$ 时， $\delta_{ij}=0$ 。 k 和 ε 分别为湍流动能及湍流动能耗散率，分别由下列运输微分方程控制：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} P_{ij} - \rho \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$\frac{C_{1\varepsilon} P_{ij}}{2} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 0.82, \sigma_\varepsilon = 1.0 \quad (10)$$

由时均连续方程、Reynolds方程、Reynolds应力运输方程、 k 方程和 ε 方程构成了三维湍流流动计算的基本控制方程组。本文采用有限体积法，将控

制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进行求解。

2 天线风载的数值计算实例

2.1 计算模型

计算对象为某一车载相控阵测量雷达天线，该类结构在无干扰情况下的阻力系数为1.3^[8-9]。天线面板呈正八边形，各边长为1.2 m，厚为0.8 m，置于30 m×20 m×50 m的计算域中。天线工作面面向入口，中心距入口20 m。为考察不同工况下风速剖面对风载的影响，数值计算在相同大小的计算域中进行。利用Pro/E建立天线外流场的三维模型，计算模型如图1所示。

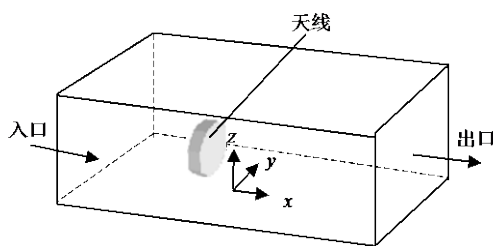


图1 计算模型

利用GAMBIT对计算模型进行非结构化四面体网格离散。为提高天线风载计算精度，对天线附近区域采用局部加密技术。经过网格划分，整个计算模型共得到约79万个计算网格。

2.2 边界条件

2.2.1 工作工况下的边界条件

入口边界条件如下：来流为湍流，模拟B类地貌（地面粗糙度指数 $\alpha=0.16$ ）， x 方向风速剖面满足指数律为 $V(z) = V_b (z/z_b)^\alpha$ ， V_b 为标准参考高度处（我国规范取 $z_b=10$ m）的平均风速， z 自计算域底部算起； y 和 z 方向设定风速均为零。

入口边界的湍流特性由确定 k 和 ε 值的方式定义如下：

$$k = \frac{3}{2} [V(z)I]^2 \quad \varepsilon = \frac{1}{l} C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

式中 l 为湍流积分尺度； I 为湍流强度。

我国现行载荷规范没有给出 l 和 I 的明确定义。本文对B类地貌的模拟参考日本载荷规范中的第II类地貌取值^[9]如下：

$$l = 1200 \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (12)$$

$$I = 1.5 \alpha \left(\frac{z}{10} \right)^{-1.7\alpha} \quad (13)$$

入口边界的风剖面 $V(z)$ 、 k 和 ε 均采用UDF编程与Fluent软件实现接口。

出口边界条件如下: 湍流充分发展, 除压力外的所有物理量 φ 在出口法向梯度均为零, 即 $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$ 。计算模型顶部和两侧自由滑移的壁面条件, 天线表面和地面无滑移壁面条件。

2.2.2 设计工况下的边界条件

入口边界条件为: 来流为平滑流, x 方向风速剖面为均一风速, y 和 z 方向设定风速均为零。

入口边界的 k 和 ε 值也由式(11)确定。其中, l 为垂直于流动方向天线截面的最大尺寸; $l = 0.16R_e^{-1/8}$; 雷诺数 $R_e = Vl/\nu$, ν 为空气运动粘度。

除入口边界条件外的各边界条件与工作工况下的边界条件设置相同。

2.3 风载的数值计算

根据上述的计算方法、网格划分及边界条件设置, 利用FLUENT对天线风载进行计算。

选用标准壁面函数修正RSM模型, 以模拟壁面附近的复杂流动; 采用一阶迎风格式离散对流项; 采用二阶精度的中心差分格式离散扩散项。对压力-速度耦合方程则用SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)算法实现各联立方程的解耦; 通过对天线各表面压力进行积分得到各次数值计算的天线风载值。

3 天线风载数值计算结果分析

3.1 风载阻力系数计算公式

由于计算中天线垂直于流动方向, 天线风载主要为阻力, 因此本文仅对天线风力系数中的阻力系数进行分析, 即 $C_d = \frac{2F_d}{\rho V^2 A}$ [10]。其中, C_d 为表征风

载阻力大小的阻力系数; ρ 为空气密度; V 为参考高度处的平均风速, 本文取为标准参考高度; A 为天线工作面面积。

3.2 工作高度的影响

以标准高度处风速18 m/s为入口边界条件, 为了排除壁面干扰, 分别计算距地面0.6、2、4、6、8、10、12、14、16 m的高度下两种工况天线的风载。天线阻力系数随高度变化的曲线如图2所示。

由图2可知: (1) 天线实际阻力系数随高度增加而增加。在大气边界层中, 由于地面的粘滞作用形成符合指数律的风速剖面, 从而天线所受到的风载随高度而增加。(2) 模拟设计条件得到的天线设计阻

力系数曲线随高度变化呈略微向下弯曲, 在天线位于计算区域中部得到的计算结果最接近无干扰值。由于模拟中天线靠近上、下壁面引起壁面干扰, 说明天线放置于数值风洞中部进行计算得到的结果精度更高。考虑壁面干扰的影响, 可以认为天线的设计阻力系数不随高度变化而为一定值, 证明本文的计算方法是可靠的。(3) 由于标准高度为10 m, 位于此高度的天线阻力系数应相等。加上计算天线的自身高度, 数值计算结果显示计算是可靠的。

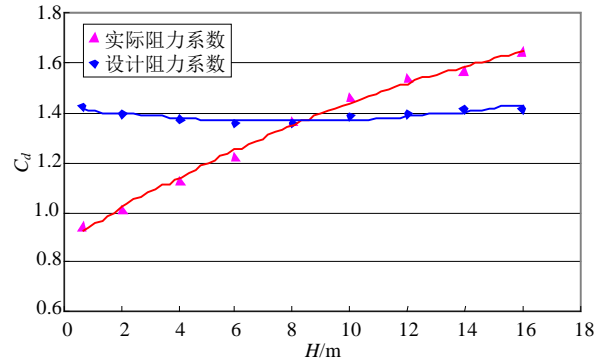


图2 阻力系数与高度关系

3.3 风速的影响

以标准高度处的不同风速(1、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 m/s)为入口边界条件, 分别计算距地面0.6 m高度的天线在设计工况及工作工况下所受风载, 得到阻力系数随风速变化的关系曲线如图3所示。

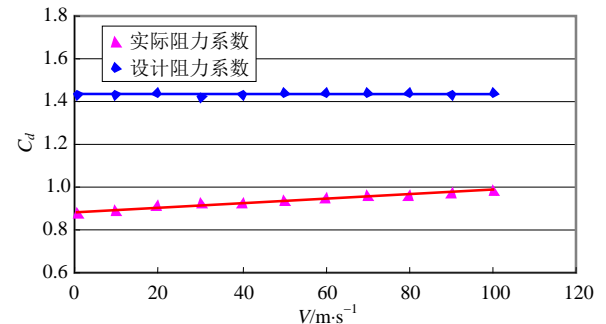


图3 阻力系数与风速关系

由图3可以看出, 天线阻力系数与风速具有很好的线性关系: (1) 天线实际阻力系数随风速呈线性缓慢增加, 说明在工作工况中流场的雷诺数与阻力系数有关, 大气边界层风场流动不存在自模拟区。(2) 天线设计阻力系数为常数, 其值不随风速变化。雷诺数对阻力系数没有影响, 设计工况中的天线风场流动在自模拟区内。

3.4 地貌的影响

以标准高度处风速18 m/s为入口边界条件, 分别计算距地面2、16 m高度的天线在A、B、C、D四类

地貌下(相应地面粗糙度指数 α 为0.12、0.16、0.22、0.30)的风载,拟合得到天线阻力系数随地面粗糙度指数的变化规律如图4所示。

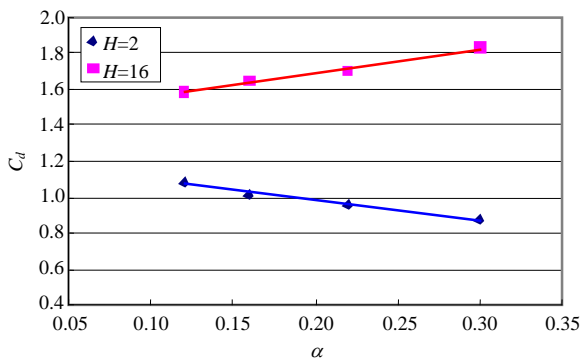


图4 阻力系数与地面粗糙度关系

基于实测资料,通常认为大气边界层中的风速剖面满足指数律,任一高度的风速可由标准高度风速计算得到。标准参考高度以上的风速随地面粗糙度增加,其相应高度的风速增加。

由图4可见,(1)天线位置高度在标准高度以上时,阻力系数随地面粗糙度指数增加而增大。(2)天线位置高度在标准高度以下时,其阻力系数随地面粗糙度指数增加而减小。

4 结论

本文以运动天线为例,研究了大气边界层中的天线阻力系数随高度、风速及地貌条件变化的规律。研究表明,大气边界层内和风洞实验中的天线风载特性有所不同。单纯依靠风洞进行实验得到的风力系数计算天线风载而确定天线的结构尺寸,不能保证天线在实际工作中运行可靠,也不能使天线结构轻便合理,必须进一步对实验数据进行处理。根据天线的具体工作环境及高度进行大气边界层风洞实验或数值风洞计算,得到天线实际风载,并据此设计天线结构,才能保证天线结构合理、工作安全,对于运动天线的稳定工作尤为重要。本文也为根据现有结构阻力系数进行具体工作环境下的天线设计提供了依据。

参 考 文 献

- [1] 谭朝阳. 电子设备抵抗外界影响及破坏的技术[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(6): 628-631.
TAN Zhao-yang. Resistance technology of environment impact for an electronic equipment[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2003, 32(6): 628-631.
- [2] 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.
- [3] JOHN D, ANDERSON J R. Computational fluid dynamics (The basics with applications)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [4] MURAKAMI S. Past, present, and future of CWE: The view from 1999[C]//Wind Engineering into the 21st Century. Rotterdam: Balkema Press, 1999.
- [5] DAVENPORT A G. Past, present, and future of wind engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90: 1371-1380.
- [6] FIVELAND W A, JAMALUDDIN A S. Three-dimensional spectral radiative heat transfer solutions by the discrete ordinates method[J]. Heat Transfer Phenomena in Radiation, Combustion and Fires, 1989: 43-48.
- [7] KAYS W M. Turbulent Prandtl number-where are we?[J]. J Heat Transfer, 1994, 116: 284-295.
- [8] 李 勤. 某类车载相控阵测量雷达结构总体设计要点[J]. 电子机械工程, 2005, 21(4): 41-43.
LI Qin. System design of the structure of a vehicle-mounted phased array instrumentation radar[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2005, 21(4): 41-43.
- [9] 张相庭. 工程抗风设计计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
ZHANG Xiang-ting. The handbook of design and calculation for engineering wind resistance[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998.
- [10] 叶尚辉. 天线结构设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1986.
YE Shang-hui. The structural design of antenna[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1986.

编辑 黄 莘