基于 ANSYS Workbench 的车载天线 流固耦合分析

王毅¹, 赵艳涛¹, 杨仕超¹, 庞家志¹, 杨曦²

(1.中国航天科工防御技术研究试验中心,北京 100854; 2.中国人民解放军驻二院中心军事代表室,北京 100854)

摘要:目的 检验车载天线在九级风作用下结构是否会发生破坏。方法 以车载天线作为研究对象,应用 Catia 软件建立天线结构的三维模型,利用 ANSYS Workbench 对天线结构进行流固耦合分析,得到天线在空气流场作用下的气动载荷分布情况。通过耦合面节点差值算法将气动力加载到天线耦合面,对承受气动力的天线进行结构静力学分析,计算天线结构在空气流场作用下的应力分布情况和变形结果。结果 车载天线受到侧向风吹压力约为 533.8 N,摆幅为 186.02 mm;正向风吹压力约为 514 N,摆幅为 171.6 mm。结论 车载天线在 20 m/s(九级风)的风载荷作用下、结构不发生破坏、且摆幅不超过 200 mm。

关键词:天线结构;有限元;流固耦合分析;静力学分析

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2019.01.018 中图分类号: TK83 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)01-0092-06

Fluid-structure Coupling Analysis of Vehicle Antenna Based on ANSYS Workbench

WANG Yi¹, ZHAO Yan-tao¹, YANG Shi-chao¹, PANG Jia-zhi¹, YANG Xi²
(1. China Aerospace Science & Industry Corporation Defense Technology R&T Center, Beijing 100854, China; 2. Mieitary Agent's Room of the Center of the Second Research Institute of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: Objective To check whether the structure of the vehicle antenna would be damaged under the wind load of force 9 wind. **Methods** With the vehicle antenna as the object of study, the Catia software was used to build a three-dimensional model of the antenna, and the ANSYS Workbench was used to perform the fluid-structure coupling analysis. The distribution of aerodynamic load on the antenna under the interaction of the air flow field was obtained. The aerodynamic force was loaded to the coupling surface of the antenna by using the coupling surface node difference algorithm. A structural statics analysis was performed for the aerodynamic of antenna. Strain distribution and structural deformation of antenna under the influence of the air flow field were calculated. **Results** The lateral wind blowing pressure of the antenna was about 533.8 N, the swing was 186.02 mm; the forward wind blowing pressure was about 514N and the swing was 171.6 mm. **Conclusion** The structure of the vehicle antenna would not be damaged and the swing would not exceed 200 mm under the wind load of 20 m/s (force 9 wind).

KEY WORDS: antenna structure; finite element; fluid- structure coupling analysis; static analysis

天线作为通信车体结构的重要部件,它的运行工 作直接影响到通信车的工作。通常天线都采用薄壁中

空结构,在大风作用下,容易发生弯曲变形甚至发生 破坏,导致通信车辆接收不到信号,军用通信车天线

收稿日期: 2018-08-12; 修订日期: 2018-09-16

发生故障可能致使整个军队的指令系统瘫痪,从而直接导致战争的失败。由于天线在风载荷作用下容易发生变形破坏,因此每一辆通信车的天线都应该对其进行风载环境下的流固耦合分析工作。

随着 CAE 技术的发展, ANSYS Workbench 提供 了关于流固耦合分析的模块,可以对许多结构模型进 行直接分析,极大地提高了工作的效率。国内外许多 专家已经在流固耦合方面做了大量研究, 王世军、米 宏伟[1-2]等根据天线结构模型进行了静力学分析和动 力学分析。周海东[3]等利用 ANSYS Workbench 对风 力机的叶片进行了流固耦合分析,得到了风场信息、 叶片应力云图及叶片的模态分析, 为叶片的优化设 计及研发提供了直接工作依据。刘岩[4]等针对超大 口径天线结构展开了各迎风姿态下的风载荷分析, 为天线结构抗风设计提供全面的荷载值参考。陈晓 桐[5]等对某超高电视塔进行了脉动风荷载模拟及风 振分析,为结构减振提供一定的参考。杜强[6]等对 雷达天线结构的平均风载荷进行了数值模拟, 并提 出了采用工业风洞试验研究天线平均风载荷特性的 洞壁干扰修正方法。Mahmoud^[7]等对大型天线结构 的球形保护罩分别进行风洞试验和 CFD 数值模拟, 对两种不同研究途径下的数据进行了比较,发现两 者吻合较好。K. Klooster^[8]等对大型天线结构在复杂 环境下的工作状态进行了研究。Shabana^[9]等运用有 限元中的绝对坐标公式对风载荷进行了计算。 Linkwit 和 Schek 提出采用 FDM 方法求解天线在流 场中的结构变形问题。

综上所述,国内外学者关于流固耦合进行了许多研究,但是关于车载天线结构的研究还是处于空白区域。基于此,文中以某型通信车天线结构作为研究对象,对建立的三维天线结构进行了流固耦合分析、静力学分析等,得到天线的应力分布情况和变形结果,验证了天线能够满足工作需求且不会发生破坏,为天线结构设计提供了参考。

1 天线结构模型

某型通信车的天线主要由天线杆和天线负载两部分构成,如图 1 所示。天线杆总长度 L 为 30 m,杆体共有六节,圆形截面。天线杆材料为钢,质量为 $2.6\,t$ 。天线负载主材为铝合金,质量为 $0.3\,t$ 。天线杆各节长度、壁厚、截面尺寸见表 1。

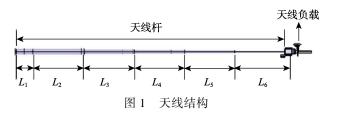


表 1 天线杆尺寸参数

天线杆	第一节	第二节	第三节	第四	第五节	第六
部位	(L_1)	(L_2)	(L_3)	节(L ₄)	(L_5)	节(L_6)
长度/mm	2800	4230	4870	5920	6050	6130
截面半 径/mm	762	704	562	413	308	212
壁厚/mm	5	6	5	5.3	5	10

2 天线流场模型

2.1 仿真计算原理

目前,以流体流动为基础的 CFD(Computational Fluid Dynamics)研究,涉及几乎所有工业领域,包括航空航天、船舶、冶金、建筑、石化、暖通等,取得了巨大的成就,已成为不可或缺的必要设计开发环节。依据仿真试验要求,仿真试验的模拟风速 20 m/s 远低于 1 Ma,因此文中研究的是低速、不可压空气流体的定常绕流问题。文中将结合 CFD 数值模拟技术,采用标准 k-epsilon 湍流模型用于目标模拟通信车流场的计算分析,利用连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程联合进行求解运算,最大程度地还原通信车实际的载荷环境。

2.2 流场模型的建立

地面大气边界层的速度变化是呈现指数分布形式,如图 2 所示。地面气流速度为 0,距离地面高度 10 m 时,气流速度达到气候条件定义风速。

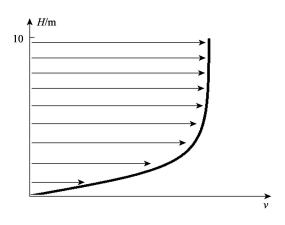


图 2 地面大气边界层速度分布

该方案中,仅考虑极限状态下通信车在孤立山顶上展开天线的情况,所受风的流速近似为均匀流速,整个进口各点空气流速均为同一速度。出口边界定义为压力边界出口,其相对压力与标准大气一致,相对压力为 0 Pa。地面壁面边界条件、车壁面边界条件,在无穿透情况下,还应考虑气流的黏性和与壁面的摩擦作用,所以设定为无滑移、无穿透壁面边界条件。计算

域非地面壁面边界条件近似于无限远、无干扰的边界 条件,所以设定为对称表面,流场各边界条件见表 2。

表 2 流场边界条件

边界 条件	入口	出口	车体	地面 壁面	非地面 壁面
边界 类型	Velocity inlet	pressure outlet	wall	wall	symmetry
参数	20 m/s (工作状态)	0 Pa	无滑移 无穿透	无滑移 无穿透	对称面

3 流场运动方程

由于天线处于一个风载荷的流场环境中,当流体流动时,流体的运动遵循三个守恒定律:即质量守恒(连续性方程)、动量守恒、能量守恒。基于这三大守恒定律,可根据流体动力学理论建立相应的偏微分方程组,以便进行定量的描述,然后应用一定的数值方法求解。在直角坐标系下的方程形式如下。

连续性方程:

$$\operatorname{div} \vec{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程(Navier-Stokes 方程式):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + v \nabla^2 u \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + v \nabla^2 v \tag{3}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v \nabla^2 w \tag{4}$$

式中: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, 称为拉普拉斯算子。

能量守恒方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho c w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + S$$
 (5)

式中: u、v、w分别为速度在三个方向(x、y、z)上的分量; P 为流体内压力; f 为单位流体所受体积力; ρ 、 μ 、 λ 、c 分别为流体密度、动力黏度、导热系数和比热。

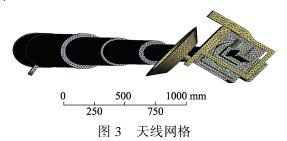
联立以上连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程 5 个方程组,同时结合标准的 k-epsilon 湍流模型,经过边界调节设定,即可利用有限元方法对方程组求解,得出分布在天线表面各个部位的压力数值。

4 天线的流固耦合分析

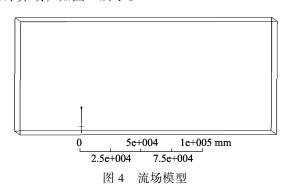
4.1 流场分析

采用 ANSYS 自动网格划分技术为天线各部件划

分八节点四面体网格单元 (Solid92 单元), 网格尺寸为 20 mm, 单元总数 513 255 个, 节点总数 896 698 个, 天线网格划分如图 3 所示。天线杆材料为钢, 其密度 ρ 为 7850 kg/m³,弹性模量 E 为 200 000 MPa, 泊松比 μ 为 0.3。天线负载主材为硬质铝合金,其密度 ρ 为 2770 kg/m³,弹性模量 E 为 71 000 MPa, 泊松比 μ 为 0.33。



计算域非地面壁面边界条件近似无限远、无干扰 边界条件。为保证计算域边界对流场无干扰、无回流, 计算域几何外形是一个长方体,其长、宽、高分别是 天线在计算域中放置对应方向的 20、10、10 倍以上。 通过布尔运算形成了一个长方体内挖除天线外形的 几何计算域,如图 4 所示。



由于天线外形复杂,为了保证天线边界的计算精度,采取以天线表面边界为基础的网格面的网格扩展技术,计算域网格总量共 1 745 393 个节点,9 742 239个单元,网格划分如图 5 所示。流体为空气,其密度为 1.225 kg/m³,运动黏度为 1.46×10^{-0.5} m²/s。计算域人口速度设置为 20 m/s,计算域为高雷诺数流场,采用标准 k-epsilon 湍流模型,出口压力设定为 0 Pa。

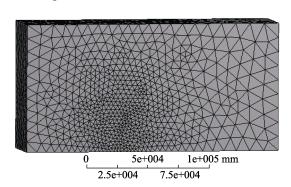


图 5 流场网格划分

地面壁面类型为不可穿透、无滑移的 Wall 边界, 非地面壁面类型设置为 symmetry 对称面。

考核天线在九级风(20 m/s)环境下的结构变形,不引入时间因素,仅对天线在风吹作用下的稳态过程进行分析,因此采用单向流固耦合的计算方法。单向流固耦合的实现方式为:1)对流场域进行求解,获得流场耦合面的气动力分布;2)通过耦合面节点差值算法将气动力加载到天线耦合面;3)对承受气动力的天线进行结构分析,计算结构变形。计算流程如图 6 所示。其中,耦合面节点差值算法主要是将流场域计算得到的施加在天线外表面流场网格节点之间进行耦合差值计算,从而将风流场作用得到的气动载荷传递到天线结构表面,最后,对天线结构进行有限元仿真分析得到天线结构各个部位的变形量。

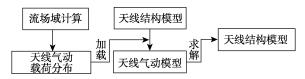


图 6 单向流固耦合计算流程

4.1.1 侧吹情况

风对天线侧吹的情况下,按照实际使用状态施加相应的约束。图 7 是流场剖面的速度矢量图,图 8 是流场剖面速度云图。可以看到,远离天线表面的流场速度与设定值(20 m/s)相同,未受到天线边界面的影响,故流场边界设定合理。天线背风一侧附近的流场速度明显减小,这与实际风场环境是一致的。顶部负载边缘处采用流线设计,因此该处的流速较大,最高流速为 26 m/s。

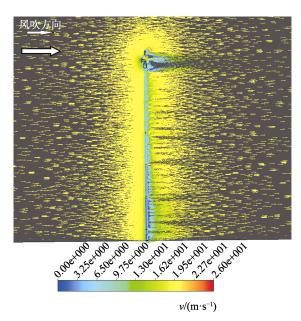


图 7 侧吹流场剖面速度矢量图

4.1.2 正吹情况

风对天线正吹的情况下,按照实际使用状态施加相应的约束。图 9 是流场剖面的速度矢量图,图 10 是流场剖面速度云图。可以看到,远离天线表面的流场速度与设定值(20 m/s)相同,未受到天线边界面的影响,故流场边界设定合理。天线背风一侧附近的流场速度明显减小,这与实际风场环境是一致的。顶部负载边缘处采用流线设计,因此该处的流速较大,最高流速为 26.5 m/s。

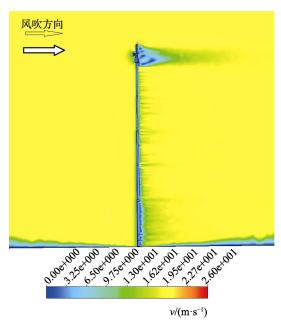


图 8 侧吹流场剖面速度云图

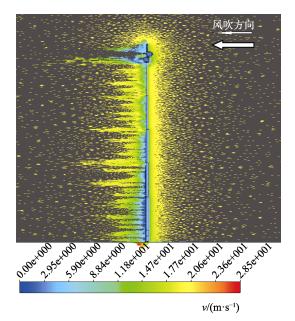


图 9 正吹流场剖面速度矢量图

4.2 天线结构静力学分析

将上述天线的材料尺寸、属性以及风场分析的结

果传递到 Static Structure 中进行静力结构分析, 先将流场部分抑制掉, 对天线结构进行网格划分、施加约束和流场传递来的风载荷,通过分析得到天线的结构变形。当天线处于侧向风吹情况下, 对其进行静力分析, 可以得到图 11、图 12。图 11 是侧吹天线气动载荷分布图, 天线体迎风一侧的气动力分布较为均匀, 最大气动力为 280 MPa, 天线受到的侧向风吹压力约为 533.8 N。图 12 为在单侧 20 m/s 稳定侧向风吹情况下单侧位移,最大变形为 93.01 mm, 摆幅为 186.02 mm。当天线处于正向风吹情况下, 对其进

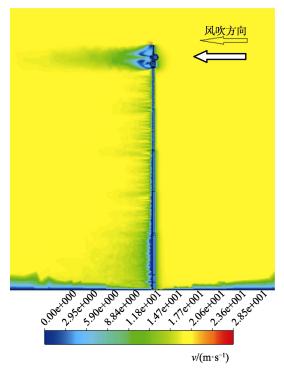


图 10 正吹流场剖面速度云图

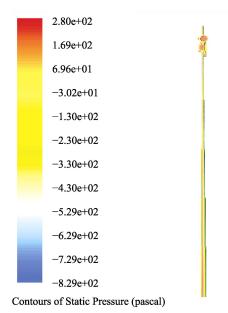


图 11 侧吹天线气动载荷分布

行静力分析,可以得到图 13、图 14。图 13 是正吹天线气动载荷分布图,最大气动力为 280 MPa,天线受到的正向风吹压力约为 514 N。图 14 为在单侧 20 m/s 稳定正向风吹情况下单侧位移,最大变形为 85.8 mm,摆幅为 171.6 mm。天线需要满足的抗风条件:风速20 m/s 天线正常工作,天线摆幅不超过 200 mm。通过以上对比发现,正吹和侧吹两种情况下天线的最大变形量都小于 200 mm,故该通信车天线能够满足使用要求。

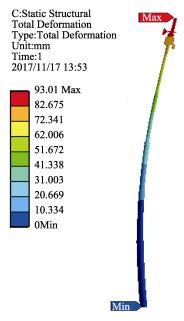
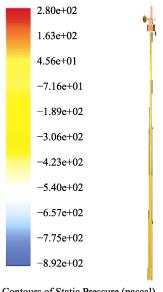


图 12 侧吹天线单侧风吹位移



Contours of Static Pressure (pascal)

图 13 正吹天线气动载荷分布

5 结论

利用 ANSYS Workbench 软件对通信车天线结构

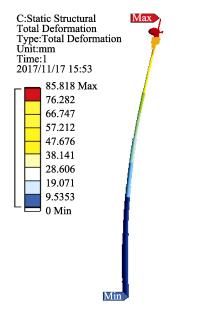


图 14 正吹天线单侧风吹位移

进行单向流固耦合分析,根据分析结果可以得出以下结论。

- 1)通过三维数字化建模方法建立符合实际情况的结构模型,运用 Catia 建模软件为后续计算分析奠定了基础。
- 2) 空气流场对天线结构的作用较大,侧吹情况下最高流速为 26 m/s,正吹情况下最高流速为 26.5 m/s,说明此天线结构顶端对变形结构影响很小,后续此类型天线结构的分析应以天线杆体为主。
- 3)天线迎风一侧的气动力分布较为均匀,天线由根部到顶端变形逐渐增大。侧向风吹压力约为533.8 N,摆幅为 186.02 mm;正向风吹压力约为514 N,摆幅为 171.6 mm。因此,在风速 20 m/s(九级风)下天线能够正常工作。

参考文献:

- [1] 王世军, 黄玉美, 赵金娟, 等. 机床导轨结合部的有限元模型[J]. 中国机械工程, 2004, 15(18): 1634-1636.
- [2] 米宏伟, 刘国玺, 郑元鹏, 等. 65M 射电望远镜天线结构力学分析来源[J]. 无线电工程, 2012(8): 62-64.
- [3] 周海栋, 张艳伟, 王博超, 等. 基于 ANSYS Workbench 的风力机流固耦合分析[J]. 河北工业科技, 2013, 30(5): 314-318.
- [4] 刘岩, 钱宏亮, 范峰. 超大口径天线结构的风振响应 [J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(3): 459-601.
- [5] 陈晓桐,卜国雄.某高耸电视塔的脉动风荷载模拟及风振分析[J]. 科学技术工程,2009,9(1):48-52.
- [6] 杜强, 杜平安. 大气边界层中天线风载荷特性的数值分析[J]. 电子科技大学学报, 2010(2): 170-171.
- [7] MAHMOUD M, YOUSSEF M, ALI T. Unsteady Computational and Experimental Fluid Dynamics Investigations of Aerodynamic Loads of Large Optical Telescopes[J]. Computational Fluid Dynamics, 2010(1): 200-226.
- [8] KLOOSTER K, SCIALINO L, CHERNIAVSKI A, et al. Large Deployable Antenna for Various Space Applications[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Antenna Theory and Techniques. Kyiv, Ukraine, 2005.
- [9] SHABANA A A. Definition of the Elastic Forces in the Finite-element Absolute Nodal Coordinate Formulation and the Floating Frame of Reference Formulation[J]. Multibody Syst Dyn, 2001, 5(1): 21-54.
- [10] LINKWITZ K, SCHEK H J. Einige Bemerkungen zur Berechnung von vorgespannten Seilnetzkonstruktionen[J]. Ing-Arch, 1971, 40(3): 145-158.
- [11] SCHEK H J. The Force Density Method for form Finding and Computation of General Networks[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(1): 115-134.