

# 高温高湿高盐环境雷达典型部件腐蚀分析

马洪波, 陈燕云, 时生淦, 李宁霞

(西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071)

**摘要:** **目的** 研究雷达典型部件长期工作在高温、高湿、高盐雾等环境下腐蚀情况的影响机理。**方法** 提出在该环境下对雷达典型部件多场耦合的仿真计算方法, 以计算流体力学 (CFD) 软件 FLUENT 为平台, 建立雷达典型部件的有限元模型, 对雷达典型部件进行仿真模拟分析。**结果** 得到了雷达典型部件的温度、湿度和盐度分布云图和综合环境腐蚀云图, 从腐蚀云图可以看出, 部件表面腐蚀程度在 0.6 mm 以上, 腐蚀程度比较严重, 仿真结果与实际检测结果较为吻合。从分布云图可知, 单一的温度或盐度因素对部件表面的腐蚀情况影响较小, 湿度对其影响较为显著。**结论** 验证了仿真计算方法的合理性和正确性, 为雷达典型部件的动力学仿真, 为其腐蚀现象的进一步研究及预防提供了理论指导。

**关键词:** 雷达; 高温高湿高盐; 流体动力学; 腐蚀分析

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.04.019

**中图分类号:** TJ07; TG172 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)04-0091-05

## Corrosion Analysis of Radar Typical Component in High Temperature High Humidity and High Salinity Environment

MA Hong-bo, CHEN Yan-yun, SHI Sheng-gan, LI Ning-xia  
(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the influence mechanism of corrosion typical radar component working for a long-term in environment of high temperature, high humidity and high salt fog. **Methods** A simulation calculation method of radar typical components in the environment was proposed. A finite element model of radar typical components was established with the computational fluid dynamics (CFD) software FLUENT as platform to conduct simulation analysis. **Results** The distributions of temperature, humidity and salinity as well as comprehensive environment corrosion of typical radar components were obtained. The corrosion degree of parts surface was above 0.6mm and serious, which was in agreement with the actual radar equipment test result. In addition, from distributions of the simulation, the single temperature or salinity had little influence on surface corrosion of parts, while the humidity had a significant impact on the corrosion. **Conclusion** It proves the rationality and correctness of the simulation calculation method, and provides a theoretical guidance for further study and prevention of radar equipment corrosion of typical radar parts.

**KEY WORDS:** radar; high temperature high humidity and high salinity; fluid dynamics; corrosion analysis

随着世界范围内军事变革的不断深入, 作战样式不断更新, 科学技术的迅猛发展, 装备发展日新月异。世界各国特别是一些主要军事大国特别强调军队的

质量建设, 要求在不影响军队实力的情况下, 缩减军队和装备的规模<sup>[1-3]</sup>。这些对装备的环境适应性提出了更高的要求<sup>[4]</sup>。沿海地区的气候具有高温、高湿、

收稿日期: 2017-01-10; 修订日期: 2017-02-21

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2014JM8349)

作者简介: 马洪波 (1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电子装备结构可靠性分析及优化设计。

高盐雾、台风等显著特征，而大型雷达体型庞大、结构复杂，这些气候特征可能给设备造成很大影响。海洋环境对电子设备的侵蚀是非常严重的。严酷的盐雾环境，加之温湿度的综合作用，常常引起武器装备上电子设备三防的失效<sup>[5-7]</sup>，使印刷电路板上的线路随之产生腐蚀和剥离，元器件金属管脚产生腐蚀或断裂，连接器的接触电阻增大，导致线路故障或产生各种由环境因子而引发的失效。

1992年，美国将“环境影响”作为一项重要的关键技术。在2005年作为年度技术目标，对国防电子装配进行了研究、建模和仿真<sup>[8-10]</sup>。目前，国内一些产品研制单位陆续开始开展基于环境应力的仿真分析和数学模拟方法的研究及工程实践，为产品的设计和研制工作提供了有力的支持<sup>[11-12]</sup>。文中以某雷达典型部件为例，运用ANSYS FLUENT仿真软件，对其在高温、高湿度和高盐雾的条件下进行仿真分析，为雷达天线的进一步设计及防腐蚀措施提供理论指导。

### 1 温度、湿度和盐度数值仿真方法

采用计算流体力学(CFD)仿真软件ANSYS FLUENT进行数值模拟。该软件包含了广泛的物理模型，能模拟工业应用中的流动、传热和反应，其网格具有完全的灵活性，能相对容易地对复杂几何生成非结构网格来求解流动问题。

#### 1.1 温度分布建模及求解方法

温度分布采用Menter提出的两方程SST(Shear Stress Transport)模式<sup>[13]</sup>。SST模式是基于标准的k-ε模式和k-ε模式的混合模式，求解湍流剪切应力的输运方程。SST模式求解湍流动能和湍流频率的偏微分方程组为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \omega) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \nabla \omega \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla k \nabla \omega + \alpha_3 \frac{\omega}{k} p_k - \beta_3 \rho \omega^2 \tag{2}$$

式中：k为湍流动能， $k = \bar{u}^2 / 2$  (u为脉动速度)；P<sub>k</sub>是与黏性力有关的湍动能生成项：

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) \tag{3}$$

式(3)中的3μ<sub>t</sub>项是基于“冻结应力”假设得到的，它能保证湍动能k和湍动能耗散率ε经过激波时不会变得太大。

#### 1.2 湿度分布建模及求解方法

湿度场通过求解由空气和水蒸气组成的混合物组分输运方程获得。混合气体第i个组分的含量记为Y<sub>i</sub>，则其质量守恒方程为对流-扩散方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho v Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i + S_i \tag{4}$$

式中：R<sub>i</sub>是组分i由于化学反应的生成项；S<sub>i</sub>是组分i由于其他原因所产生的源项；J<sub>i</sub>是组分i的扩散通量，在湍流中可根据式(5)计算：

$$J_i = - \left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i - D_{i,i} \frac{\nabla T}{T} \tag{5}$$

式中：Sc<sub>i</sub>为湍流施密特数；μ<sub>t</sub>为湍流涡粘系数；D<sub>i</sub>为湍流扩散系数。

#### 1.3 高盐分布建模及求解方法

盐度分布的仿真采用求解标量输运方程得到：

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \phi - G \nabla \phi) = S_\phi \tag{6}$$

式中：Γ和S<sub>φ</sub>分别为标量输运系数和体积源项。

根据盐雾气溶胶释放率的经验或半经验公式<sup>[14-15]</sup>，可以得到稳态情况下盐雾气溶胶浓度分布规律：

$$\frac{C}{C_0} = \frac{-\ln(b) - \frac{\ln^2(b)a}{2} - \psi + \left( \frac{\psi^2}{2} + \frac{\pi^2}{12} \right) a - \sum_{n=1}^3 \frac{(-1)^n (b)^{a+n}}{(a+n)n!}}{-\ln(b_0) - \frac{\ln^2(b_0)a}{2} - \psi + \left( \frac{\psi^2}{2} + \frac{\pi^2}{12} \right) a - \sum_{n=1}^3 \frac{(-1)^n (b_0)^{a+n}}{(a+n)n!}} \tag{7}$$

式中：a = -γ / (m+1)；b = C<sub>1</sub>(γ) η<sup>m+1</sup> / (m+1)；b<sub>0</sub> = C<sub>1</sub>(γ) η<sub>0</sub><sup>m+1</sup> / (m+1)；

ψ为Euler-Mascheroni常数，ψ ≈ 0.577 215 664 901 5；C<sub>0</sub>为地表z<sub>0</sub>处的盐雾气溶胶浓度(z<sub>0</sub>是地表等效粗糙度)，其与盐雾气溶胶释放通量F的关系为：

$$C_0 = -\frac{F}{w_s} \left[ 1 - \frac{m+1 \left( \frac{C_1(\gamma)}{m+1} \right)^{-\frac{\gamma}{m+1}} \eta_0^{-\gamma} e^{-\frac{C_1(\gamma)}{m+1} \eta_0^{m+1}}}{\Gamma\left(-\frac{\gamma}{m+1}, \frac{C_1(\gamma)}{m+1} \eta_0^{m+1}\right)} \right] \tag{8}$$

式中：η<sub>0</sub> = z<sub>0</sub> / δ<sub>c</sub>，m = 1/7，γ = Sc<sub>w</sub> / κu\*，w<sub>s</sub> = ρ<sub>p</sub> d<sub>p</sub><sup>2</sup> g / 18μ，C<sub>1</sub>(γ) = (1.25C<sub>w</sub> Sc - γ) / κ，1.25C<sub>w</sub> ≈ 0.85。

$$G(a, x) \approx -\ln(x) - \frac{\ln^2(x)a}{2} - \psi + \left( \frac{\psi^2}{2} + \frac{\pi^2}{12} \right) a - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{a+n}}{(a+n)n!} \tag{9}$$

式中：w<sub>s</sub>为盐雾气溶胶颗粒的沉降速度；δ<sub>c</sub>是盐

雾气溶胶边界层厚度； $Sc$  为湍流扩散 Schmit 数； $\gamma$  是 Rouse 数。

将式 (7) 其作为盐雾气溶胶浓度分布的入口边界条件，采用 Euler 拟流体模型计算盐雾气溶胶浓度分布。

## 2 雷达典型部件高温高湿高盐环境仿真分析

### 2.1 雷达典型部件模型

雷达典型部件支撑座是用来支撑天线，并使其在规定空域内运动的装置。它通过天线控制系统使天线按照预定的运动规律，或者跟随目标运动，并且通过轴位检测装置，精确地测出目标的方位。支撑座的好坏对天线结构的稳定性非常重要，因此分析支撑座的受腐蚀情况是相当必要的。支撑座在实际工作环境中的位置及其腐蚀情况如图 1 所示。



图 1 支撑座照片

在 CFD 仿真中，空间划分采用四面体非结构网格、壁面附近采用三棱柱形式的边界层网格，网格单元总量约为 200 余万。支撑座表面的网格分布如图 2 所示。

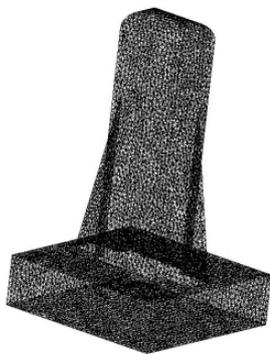


图 2 支撑座表面网格

### 2.2 仿真计算条件

在高温高湿高盐条件下，需要确定的参数包括日气温变化、湿度变化和风速变化。对日气温变化采用

正弦形式的公式，其中，白天气温公式为：

$$T_i = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \sin\left(\frac{\pi m}{Y+2a}\right) \quad (10)$$

夜晚气温公式为：

$$T_i = T_{\min} + (T_s - T_{\min}) \exp(-bn/Z) \quad (11)$$

式中： $T_i$  为第  $i$  个小时的气温； $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  分别为一天的最低和最高气温； $T_s$  是日落时的气温； $Y$  为白天时长； $Z$  为夜晚时长； $m$  为最低气温到日落的时长； $n$  为日落到最低气温的时长； $a$  为最高气温的延迟系数； $b$  为夜晚温度系数； $c$  为从日落到最低气温的延迟系数，其取值分别为 1.86, 2.20 和 -0.17。

在一天之中相对湿度的变化规律正好与气温相反，即最高气温时间对应最低相对湿度时间、最低气温时间对应于最高相对湿度时间。

风速在一天内的变化公式为：

$$U_i = U_m + \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2} \cos[2\pi(t_i - t_p)/24] \quad (12)$$

式中： $U_i$  为第  $i$  个小时  $t_i$  的风速； $U_{\min}$  和  $U_{\max}$  分别为一天的最低和最高风速； $U_m$  是平均风速； $t_p$  是最高风速出现的时间。

### 2.3 仿真结果与分析

支撑座表面的湿度如图 3 所示，可以看到，支撑座正对入口的表面湿度明显较大。因为空气中丰富的水蒸气遇到支撑座表面后呈集聚态势，在支撑座表面富集，从而导致其正对入口的表面湿度较大。由图 3 中湿度分布情况可以看出，其与支撑座的腐蚀情况较为一致，可见湿度可能是引起支撑座表面腐蚀的主要原因之一。

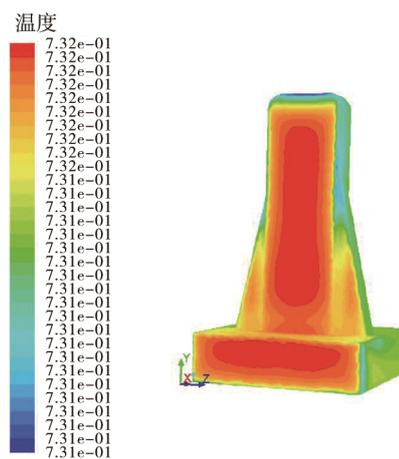


图 3 湿度云图

图 4 给出支撑座表面的盐度分布云图，图 5 给出支撑座表面的温度分布云图。由于盐度的大小与空气中水蒸气溶解电解质的多少和集聚状态有关系。电解质随水蒸气的集聚附着在支撑座表面，随水蒸气的凝聚而滑落，气溶胶电解质随时间逐渐沉降富集。因此

从图4中可以看出,电解质的积累状态在支撑座沿高度方向上随高度增加逐渐降低。支撑座表面的盐度分布云图较好地展示了气溶胶电解质的沉降状况。从图5中可以看出,支撑座表面的温度没有明显的区域性差异,这可能与支撑座表面积相对较小以及在支撑座金属材料的属性有关。将图4和图5与图1分别进行对比可知,单独电解质物质的存在或单独温度因素可能不是引起支撑座腐蚀的主要原因,说明电解质物质的存在以及温度因素可能加速或促进腐蚀的发生。

支撑座表面的腐蚀云图如图6所示。可以看出,

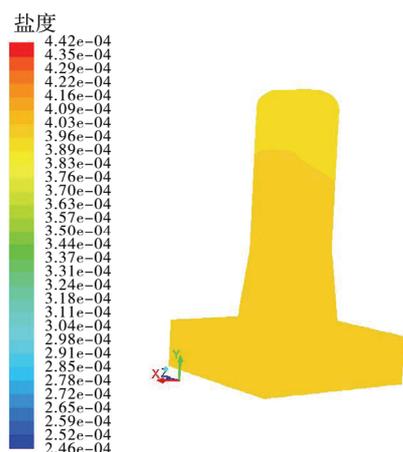


图4 盐度云图

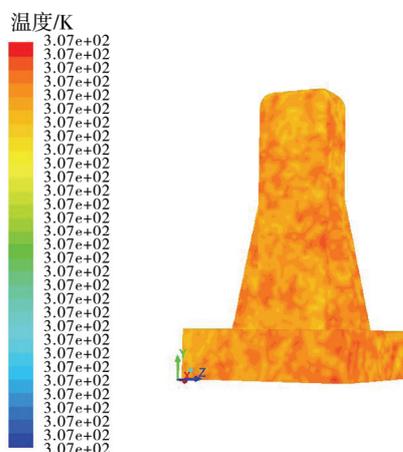


图5 温度云图

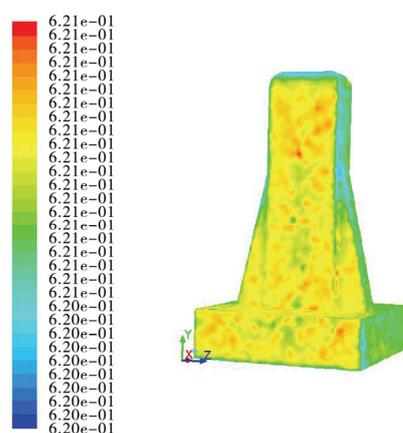


图6 腐蚀云图

支撑座表面的腐蚀程度与图1显示的实际腐蚀情况具有较好的一致性,说明较高的温度、湿度和盐度综合作用下极易导致金属材料表面的腐蚀,同时这也为金属材料的防腐蚀提出相应的要求。

以上仿真结果可以看出,雷达天线支撑座在综合环境下的腐蚀情况与实际情况比较吻合,因此对雷达典型装备在综合环境的条件下进行仿真分析,具有良好的理论指导意义。

### 3 结论

1)文中的温度分布采用求解 SST 模式方程得到,湿度分布采用求解由空气和水蒸气组成的混合物组分输运方程得到,盐度分布采用求解标量输运方程得到,为雷达典型部件的腐蚀分析仿真提供理论依据。

2)雷达关键部件在模拟高温、高湿和高盐综合环境下的仿真结果与实际环境中雷达关键部件所受腐蚀情况的对比表明,综合仿真能够给出与实际情况定性相符的结果,对雷达部件的防腐蚀措施具有有效的指导意义。

3)通过 CFD 仿真研究了高温、高湿和高盐等环境因素对雷达部件的影响,获得了雷达装备最易受影响的薄弱部位,以及腐蚀发生所需要具备的环境条件,从而为装备的进一步改进防护设计提供了有力支持,最大限度提高装备的抗腐蚀特性,对武器装备可靠性工程的发展具有重要的现实意义。

#### 参考文献:

- [1] FUENTE D D L, CASTANO J G, MORCILLO M. Long-term Atmospheric Corrosion of Zinc[J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1420—1436.
- [2] LAPUERTA S, BÉRERD N, MONCOFFRE N, et al. The Influence of Relative Humidity on Iron Corrosion under Proton Irradiation[J]. Journal of Nuclear Materials, 2008, 375(1): 80—85.
- [3] NYRKOVA L I, OSADCHUK S O, RYBAKOV A O, et al. Investigation of the Atmospheric Corrosion of Carbon Steel under the Conditions of Formation of Adsorption and Phase Moisture Films[J]. Materials Science, 2013, 48 (5): 687—693.
- [4] 曹立荣, 佟文清. 电子装备南海环境适应性改进设计研究[J]. 环境技术, 2013(6): 21—24.
- [5] 杨万均. 某军用雷达环境适应性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [6] 杨万均, 肖敏. 湿热环境中焊接波导的环境适应性分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2004(6): 42—45.
- [7] 杨万均, 肖敏, 何德洪. 军用电子部件失效分析[J]. 表面技术, 2003, 32(6): 56—58.
- [8] DECONINCK D, DAMME S V, DECONINCK J. A Temperature Dependent Multi-ion Model for Time Accu-

- rate Numerical Simulation of the Electrochemical Machining Process. Part I: Theoretical Basis[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 60: 321—328.
- [9] DECONINCK D, DAMME S V, DECONINCK J. A Temperature Dependent Multi-ion Model for Time Accurate Numerical Simulation of the Electrochemical Machining Process. Part II: Numerical Simulation[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 69: 120—127.
- [10] THÉBAULT F, VUILLEMIN B, OLTRA R, et al. Modeling Bimetallic Corrosion under Thin Electrolyte Films [J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(1): 201—207.
- [11] 刘元海, 张幸. 舰载机载设备腐蚀环境适应性要求的剪裁[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(5): 61—67.
- [12] 何俊, 陶小创, 石高荣. 导弹地面装备自然环境适应性评价方法探讨[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(1): 91—97.
- [13] FLORIAN R M. Review of the Shear-stress Transport Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective[J]. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2009, 23(4): 305—316.
- [14] GILLETTE D A, PASSI R. Modeling Dust Emission Caused by Wind Erosion[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1988, 93(D11): 14233—14242.
- [15] MARTICORENA B, BERGAMETTI G. Modeling the Atmospheric Dust Cycle: 1. Design of a Soil-derived Dust Emission Scheme[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100(D8): 16415—16430.