

行驶状态下的车载雷达动力学研究

任克亮¹, 李志刚²

(1. 中国船舶重工集团公司第七一三研究所, 郑州 450015; 2. 南京理工大学, 南京 210094)

摘要: 车载雷达在行军过程中, 风载荷会对雷达的零部件结构刚、强度产生影响, 尤其是其使用寿命。通过分析雷达拓扑结构, 将雷达天线反射面柔性化处理, 建立车载雷达天线刚柔耦合模型; 根据军用标准, 编制了3种路面谱, 依据风洞试验得到的风载荷系数, 施加稳态风载荷, 进行行驶动力学仿真, 获得雷达天线重要零部件的动态参数, 得出了不同种路面下雷达系统所能承受的极限风载荷, 为新型雷达零部件设计提供依据。

关键词: 雷达系统; 路面谱; 风载荷; 刚柔耦合

中图分类号: TN959.71 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)02-0062-05

Study on Dynamics of Running Vehicle Radar

REN Ke-liang¹, LI Zhi-gang²

(1. No.713 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450015, China;

2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Wind load has effect on some critical parts in structure rigid strength of vehicle radar system in running situation. A rigid-flexible coupling model of radar antenna was established, in which the antenna reflector surface was considered as flexible body, through analysis of topology structure. Three kinds of road spectrum were made according to military standards. The steady wind load obtained from wind tunnel test was applied to simulate the process of dynamic vehicle. The dynamic parameters of some important parts and the limited wind load which the radar system can endure in different types of road spectrum were acquired. The purpose was to provide reference for general design and part design of new type radar system.

Key words: radar system; road spectrum; wind load; rigid-flexible coupling

车载雷达在运输、颠簸、行军过程中,除了受路面随机激励之外^[1],风载荷也会对雷达零部件刚强度、疲劳寿命产生影响。为适应现代信息化战争,工程设计应用对雷达的质量与刚、强度提出了严格要

求,新型雷达的设计必须考虑风载荷作用下雷达系统所受的动态参数,应用虚拟样机技术对雷达关键零部件进行刚强度、疲劳寿命、质量等设计参数的研究^[2-4],以达到节省开发成本、缩短开发周期的目的。

收稿日期: 2012-10-29

作者简介: 任克亮(1985—),男,河南平顶山人,硕士,助理工程师,研究方向为基于虚拟样机技术的武器动力学研究。

1 基本假设

建立车载雷达行驶动力学模型,做出如下假设。

1) 车载雷达系统由车体、底座、方位轴、背架、反射面5大系统组成;车体相对地面做垂向运动,沿车行驶方向做横向和侧向摆动。

2) 外载荷只考虑车速、风载荷、随机路面激励;忽略装配误差与各系统构件变形,雷达天线反射面柔性化处理;风载荷采用稳态风加载^[5],忽略其余类型风载荷的影响。

3) 忽略车的操纵性,只考虑平顺性,设置模型行驶路线为直线;模型在仿真过程中偏离设定直线轨迹,出现滑移、偏移现象,视仿真结果为不稳定状态。

2 动力学模型

2.1 结构描述

建立车载雷达仿真模型拓扑关系,如图1所示, H 表示各部件之间力的相互作用关系。

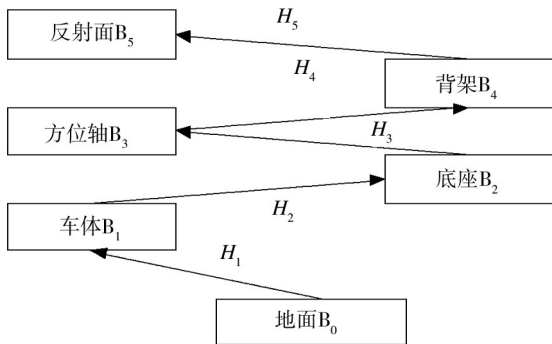


图1 结构拓扑
Fig. 1 Structural topology

图1中, H_1 为车体系统与地面之间的接触力, H_2 为车体系统与底座系统之间的Bushing力, H_3 为底座系统与方位轴系统之间的旋转铰, H_4 为方位轴系统与背架系统之间的固定铰, H_5 为背架系统与反射面系统之间Bushing力。

2.2 仿真模型自由度

车与雷达行驶动力学模型共有9个自由度。车

体系统在地面接触力作用下,有垂直运动、侧向和横向摆动,形成3个自由度;车体在底座系统Bushing力作用下,形成6个自由度。底座系统与方位轴以旋转铰形式连接,仿真过程中旋转铰设置为失效;方位轴系统与背架系统以固定胶形式连接;背架系统与反射面系统以固定胶形式连接。

2.3 动力学方程

依据结构动力学理论,建立拉格朗日9自由度的振动微分方程,方程的一般式为:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{v}_\mu} \right) - \frac{\partial E}{\partial v_\mu} + \frac{\partial U}{\partial v_\mu} + \frac{\partial F}{\partial \dot{v}_\mu} = Q_\mu \quad (1)$$

式中: E 为系统的动能; t 为时间; U 为系统的势能; F 为系统的耗散能; v_μ 为广义坐标; \dot{v}_μ 为广义速度; Q_μ 为广义力; μ 为广义坐标的编号,取值为1~9的整数。

进一步得出系统的运动微分方程为:

$$[M] \{\ddot{v}_\mu\} + [C] \{\dot{v}_\mu\} + [K] \{v_\mu\} = \{Q_\mu\} \quad (2)$$

式中: $[M]$, $[C]$, $[K]$ 分别为 9×9 阶质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; v_μ , \dot{v}_μ , \ddot{v}_μ 分别为广义坐标的位移向量、速度向量和加速度向量。

2.4 路面谱模型

随机路面在仿真环境下用多个三角形节点单元来模拟,每个节点都有相对应的数学表达式,路面谱生成原理如图2所示。

$$a_1x + a_2y + a_3z = z$$

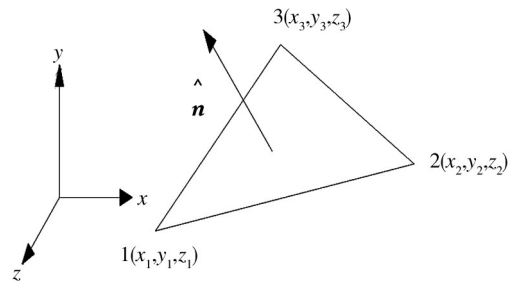


图2 路面谱生成原理

Fig. 2 Road spectrum generation principle

平面方程中的3个系数,可由图2中的3个顶点来确定,根据矩阵理论可得系数:

$$a_k = \frac{\det | A_k |}{\det | A |}, k=1, 2, 3 \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1 = [x_k & y_k & z_k]_{3 \times 3} \\ \mathbf{A}_2 = [z_k & y_k & I]_{3 \times 3} \\ \mathbf{A}_3 = [x_k & z_k & I]_{3 \times 3} \\ \mathbf{A}_4 = [x_k & y_k & I]_{3 \times 3} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $I=[1 \ 1 \ 1]^T$ 。平面的法向量 \hat{n} 表示为：

$$\hat{n} = \pm \frac{1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 1}} [a_1 \ a_2 \ -1]^T \quad (5)$$

结合GB 7031—86《车辆振动输入——路面不平度表示方法》，在软件Recurdyn中生成相应随机路面谱，编出A,B,C共3种随机路面。

2.5 风载荷模型

天线系统在直角坐标系(如图3所示)承受风载荷6个分量^[6]，即侧力 F_x 、阻力 F_y 、升力 F_z 、俯仰力矩 M_x 、滚转力矩 M_y 、方位力矩 M_z ，计算公式分别见式(6)、式(7)。

$$F_i = \frac{1}{2} C_i A \rho v^2, \quad i=x,y,z \quad (6)$$

$$M_i = \frac{1}{2} C'_i A L \rho v^2, \quad i=x,y,z \quad (7)$$

式中： C_i, C'_i 为风载系数； ρ 为空气密度， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-4}$ ； v 为风速， m/s ； A 为天线的特征面积， m^2 ； L 为天线特征长度， m 。

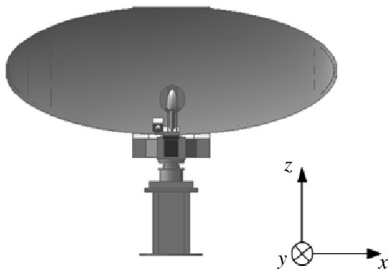


图3 雷达天线坐标

Fig. 3 Antenna reflector coordinates

仿真模型中雷达天线的特征面积为 2.98 m^2 ，天线的特征长度为 3.3 m ，空气在标准大气压、温度 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的密度为 $0.125 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-4}$ 。当风向角为 0° 时，天线面所受的风力工况最为恶劣，风洞试验的6个分量风载系数见表1。

对风载荷的加载，本次仿真分别采用20, 30, 40, 50 m/s 时风载荷所形成的力及力矩值。

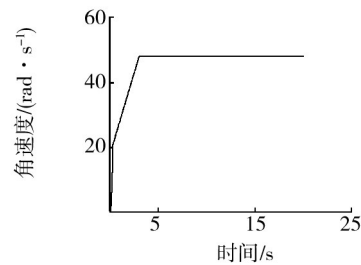
表1 风载系数

Table 1 Wind load coefficient

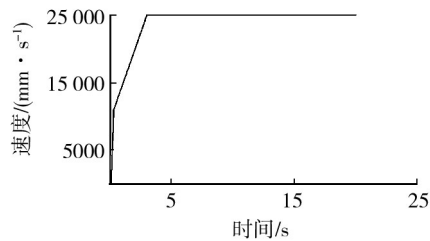
| 风载系数 | C_x | C_y | C_z | C'_x | C'_y | C'_z |
|------|---------|--------|---------|-----------|----------|----------|
| 数值 | -0.0809 | 0.9873 | -0.1832 | -0.030 87 | 0.149 65 | 0.480 95 |

3 仿真过程及结果分析

仿真模型用角速度对车轮转速加以控制，使其在随机路面按设定轨迹作匀速直线运动。在软件Recurdyn中采用数值拟合方法，对速度曲线加载，生成的曲线函数如图4所示。将风载荷简化为一个力和一个扭矩，加载至受力物体的质心处，忽略脉动风的影响。对加载力的函数曲线描述为(TIME-0.2:0, 0,X)，其中X为力和力矩的具体数值。



a 角速度驱动



b 速度驱动

图4 速度驱动曲线

Fig. 4 Drived velocity curve

模型中采用F-FLEX有限元法将雷达天线反射面处理为柔体，如图5所示。雷达天线反射面与连接件26处相连接，设置26个刚性点及刚性区域，将其耦合。设置仿真路长为 300 m ；设置车辆以最高速度 90 km/h 行驶在A级、B级、C级3种路面上；取风速为 $20 \sim 50 \text{ m/s}$ 共4种工况；定义柔体反射面中变形较大的节点5129为输出点；加速度值取为均值，受力、

应变、变形及力矩取最大值;频率取加速度功率谱最大时的频率^[7];仿真时间为5 s,步长为5000步。仿真模型如图6所示,仿真结果如图7—12所示。

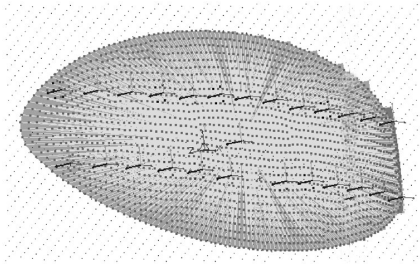


图5 柔性化处理模型

Fig. 5 The flexible treatment model

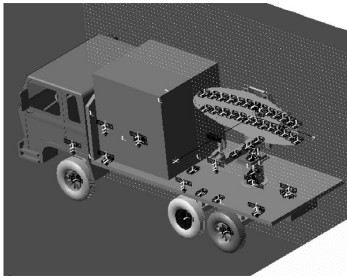
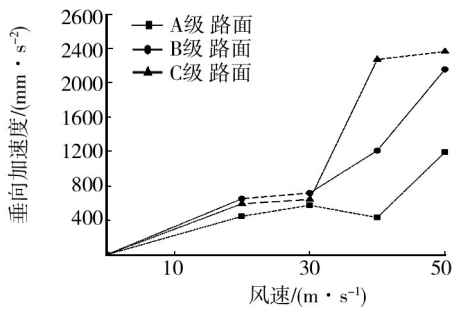
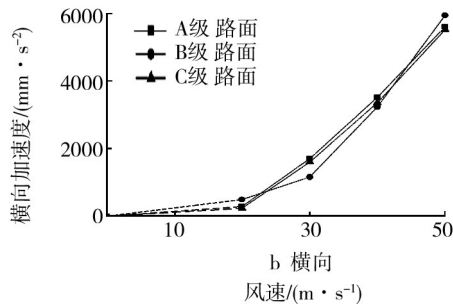


图6 仿真模型

Fig. 6 Simulation model



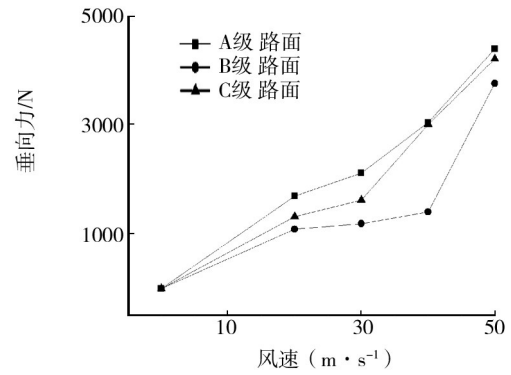
a 垂直向



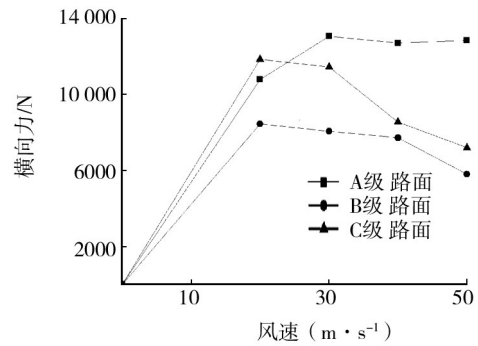
b 横向

图7 反射面加速度

Fig. 7 Acceleration of reflector



a 垂直向



b 横向

图8 反射面各向力

Fig. 8 Forces of reflector

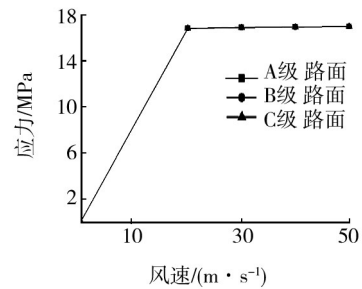


图9 反射面所受应力

Fig. 9 Stress of reflector

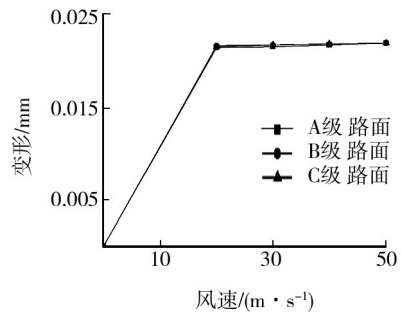


图10 反射面变形情况

Fig. 10 Strain of reflector

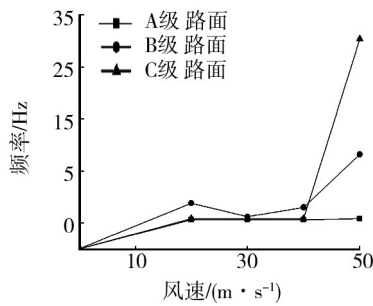


图11 垂向加速度功率谱密度最大时对应频率

Fig. 11 The frequency at the maximum vertical acceleration power spectral density

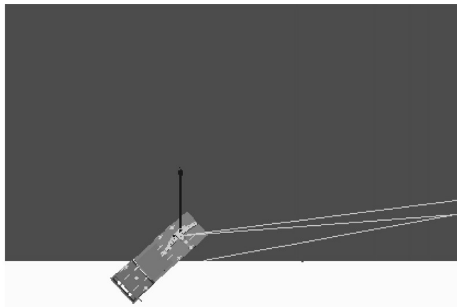


图12 C级路面出现不稳定

Fig. 12 Unstable situation in C road spectrum

仿真数据显示,在A级、B级、C级路面,输出节点上垂向加速度与横向加速度都随着风载荷的增加而增大,且横向加速度大于垂向加速度;在风载荷为40 m/s时,各个路面的垂向加速度值出现跃迁,其中C级路面表现最大;节点输出的横向力大于垂向力,且都在风速为30 m/s时出现最大值,垂向力均在40 m/s时刻出现跃迁;输出节点上最大应力不超过17 MPa,最大变形不超过 2.20×10^2 mm,铝合金的屈服极限为400 MPa,应变小于其屈服极限,且不超过弹性变形极限;输出节点上加速度功率谱密度最大时所对应的频率为50 Hz;风载荷为50 m/s时,输出节点上所受横向力为12 857.52 N,车在A级路面上倾翻;风载荷为40 m/s时,输出节点在B、C级路面所受横向力分别为7724.97, 8557.21 N,车在行驶时出现不稳定状态。

4 结论

1) 同种路面不同风载荷作用下,雷达反射面所

受的动态参数不同,参数数值随着风载荷的增大而增加;在同种风载荷作用下的不同路面上,雷达反射面受到的动态参数无明显规律可循,呈现随机状态。

2) 雷达反射面在3种路面中所受的最大应力不超过17 MPa,最大变形未超过 2.20×10^2 mm,未超过铝合金的弹性变形极限。在雷达系统设计中,可适当改变雷达天线结构形式,改变质量分布,从而减轻质量。

3) 行驶过程中风载荷对雷达天线反射面产生破坏,设计时可在雷达天线背架上改进结构,在定质量前提下,加上挡风板,减少风载荷对雷达天线的作用;分析仿真结果得出,在A级路面上,车载雷达所能承受的极限风速为50 m/s,在B、C级路面上为40 m/s。

4) 雷达天线反射面加速度功率谱密度最大时所对应的频率为50 Hz。为避免谐振效应,设计雷达选材时,应选择阻尼合适的材料,如玻璃钢、碳纤维、钛合金、复合材料等,在满足雷达系统刚、强度的条件下,尽量减轻质量。

参考文献:

- [1] 董忠红,吕彭民. 高等路面上的车辆动载荷[J]. 长安大学学报, 2010, 30(1): 95—98.
- [2] 张润逵,戚仁欣,张树雄. 雷达结构与工艺[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [3] 赵书萍,刘丽新. 地面雷达设计定型环境鉴定试验分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 75—77.
- [4] ADAMS M, MULLANE J S, PATRIKALAKIS N M. Predicting Millimeter Wave Radar Spectra for Autonomous Navigation[J]. Sensors Journal, 2010, 5(10): 960—971.
- [5] 高延龙. 雷达天线风载荷特性的数值仿真方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [6] 肖万选. 舰载雷达天线载荷的确定[J]. 现代雷达, 1998(5): 69—77.
- [7] 杜喆华. 基于数值模拟方法的船用离心泵减振研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 118—123.