

文章编号:1674-8190(2013)02-199-05

## 运载火箭地面风载荷响应特性分析

李哲, 安军, 万小鹏

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

**摘要:** 为了研究新一代运载火箭在垂直转运与垂直发射过程中所受地面风载荷的影响问题, 针对地面风载荷产生的复杂原因, 将其按产生原因和主要影响方向分为四种: 阻力方向平均风载荷、阻力方向脉动风载荷、升力方向脉动风载荷和升力方向脱落涡载荷。利用 MSC. Patran/Nastran 软件的随机分析模块分析运载火箭在四种地面风载荷作用下的响应特性, 得到运载火箭在参考风速为 4~20 m/s 下的位移响应。结果表明: 四种风载荷位移响应均随参考风速的增加而增大, 并且随着参考风速的增加, 脱落涡载荷对火箭位移响应的影响最为显著。

**关键词:** 运载火箭; 结构动力学; 地面风载荷; 随机振动

**中图分类号:** V475.1

**文献标识码:** A

## Response of Launch Vehicle under Ground Wind Load

Li Zhe, An Jun, Wan Xiaopeng

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to analyze the ground wind acting on the new generation of launch vehicle when the launch vehicle is in the vertical state. According to the causes of ground wind load and the effects of directions, the ground wind load acting on the launch vehicle is divided into four different ground wind loads: average wind load in resistance direction, fluctuating wind load in resistance direction, fluctuating wind load in lift direction and vortex shedding load in lift direction. In order to obtain the response of the launch vehicle under the effects of ground wind loads, the random analysis function of MSC. Patran/Nastran is used. The launch vehicle's displacement response is given when the ground wind speed is 4~20 m/s. The results indicated that the launch vehicle's displacement response increases with the increase of ground wind speed. The shedding vortex load becomes the dominant reason that result in the carrier rocket's displacement response with the increase of ground wind speed.

**Key words:** launch vehicle; structural dynamics; ground wind load; random vibration

## 0 引言

火箭竖立在发射台上进行转运和检查时, 常常数小时暴露于地面风中。此时, 作为随机变量的地面风成为作用于火箭结构上的主要干扰<sup>[1-2]</sup>。地面

风在火箭上产生很大的定常、非定常载荷, 可引起火箭结构的变形和振动, 并对发射前控制系统调整和仪器设备校正也有影响。因此, 研究捆绑式运载火箭地面风载荷及其产生的静、动态响应, 对于保证控制系统工作状态、降低最大结构载荷、减轻结构重量、增加有效载荷、放宽转运和发射条件限制、确保发射成功等具有重要意义。

运载火箭地面风载荷产生的机理比较复杂, 对运载火箭地面风载荷响应的分析多采用风洞试验

收稿日期: 2012-11-21; 修回日期: 2013-03-05

通信作者: 安军, anjun077@sina.com

和理论分析相结合的方法<sup>[3-7]</sup>。马斌捷<sup>[8]</sup>采用全尺寸试验得到 CZ-2F 火箭在地面风作用下的响应。黄汉杰等<sup>[4]</sup>在采用缩比模型的风洞试验数据计算火箭地面风载荷响应时,没有考虑由于采取缩比模型而导致的雷诺数降低对非定常气动升力系数的影响。钟音亮等<sup>[7]</sup>在采用随机振动方法分析火箭地面风载荷响应时,认为升力方向响应主要是火箭尾流中的脱落涡引起的,而没有考虑来流中升力方向湍流引起的载荷响应。

本文在深入分析现有的对运载火箭地面风载荷响应方法研究资料的基础上,采用 MSC. Patran/Nastran 软件的随机分析模块对运载火箭地面风载荷响应进行分析,得到新一代运载火箭在参考风速为 4~20 m/s 下的风载荷响应特性。为了更加接近真实情况,较全面地分析并考虑火箭的阻力方向平均风载荷、阻力方向脉动风载荷、升力方向脉动风载荷以及升力方向脱落涡载荷。

## 1 运载火箭的有限元建模

新一代大型运载火箭是通过纵向加级和横向并联形成的多级运载火箭。为适应大运载能力的要求,其质量和尺寸变得越来越大,运载火箭全长 60 m,芯级直径 5 m,助推器直径 3.35 m<sup>[8]</sup>。本文用来计算地面风载荷响应的运载火箭有限元模型为梁-杆-壳三维模型。除整流罩、仪器舱、二级液氧箱和二级液氢箱为壳单元模型外,火箭均为梁、杆模型。采用广义梁模型来模拟卫星的质量、转动惯量和基频,卫星广义梁模型作为分支通过卫星支架与火箭对接。为了准确模拟贮箱纵向变形时推进剂只跟随箱底运动、横向变形时推进剂跟随箭体一起平动、扭转变形时推进剂不动的特点<sup>[9-10]</sup>,采用耦合质量方法模拟液体推进剂。对于卫星支架、级间段以及各级发动机与箭体承力结构的连接,采用多点约束(MPC)的 Rigid(Fixed)单元来模拟。为了能较好地模拟运载火箭助推器与芯级之间的传力路径,前、后捆绑机构同时使用 RBE2 单元和梁单元,并通过释放连杆和芯级、助推器连接节点的两个转动自由度来模拟球铰机构。由此建立的全箭有限元模型如图 1 所示。

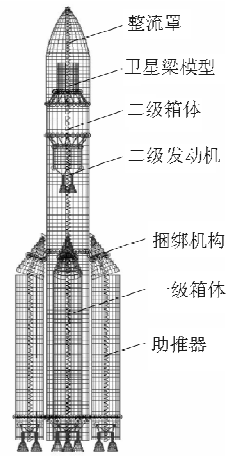


图 1 运载火箭三维有限元模型

Fig. 1 3D finite element model of launch vehicle

## 2 地面风载荷

根据自然风的湍流特性,可将其分成准定常的平均风和非定常的脉动风。因此作用在运载火箭上阻力方向的风载荷为由平均风引起的静力风载荷和由脉动风引起的脉动风载荷,而升力方向的风载荷主要是由来流湍流和尾流旋涡的脱落引起的。

### 2.1 平均风载荷

由实测记录可知,风速可以看作两部分的组合,一部分是持续时间 10 min 以上的长周期风,称为平均风;另一部分是短周期风,或称为脉动风。运载火箭地面风载荷模型如图 2 所示。

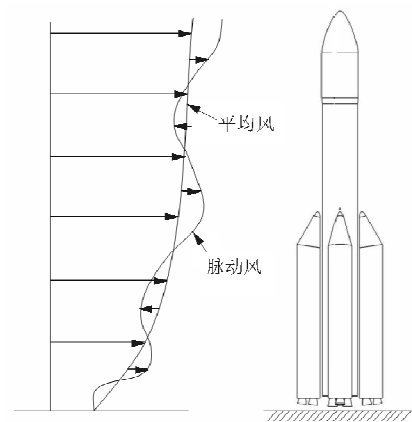


图 2 运载火箭地面风载荷模型

Fig. 2 Ground wind load model of launch vehicle

作用在火箭上的平均风载荷可以表示为

$$\bar{w}[z] = C_D \mu_z(z) w_0 \quad (1)$$

式中:  $C_D$  为阻力系数;  $w_0$  为 10 m 高度处的风压值;  $\mu_z(z)$  为风压高度变化系数,  $\mu_z(z) = \left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha}$ 。

## 2.2 脉动风载荷

脉动风是由大气湍流引起的,是具有零均值的随机变量,能使结构产生随机振动。脉动风实际上是三维的风湍流,包括阻力方向、升力方向和垂向湍流。垂向湍流数值很小,对结构影响可以忽略,因此只考虑阻力方向和升力方向脉动风对火箭结构的影响。

脉动风是具有零均值的随机变量,一般采用脉动风速功率谱来表示。

本文中阻力方向脉动风速谱采用 Davenport 谱,其表达式为

$$S_{V_D}(z, n) = \frac{4kx^2 \bar{v}_{10}^2}{n(1+x^2)^{4/3}} \quad (2)$$

式中:  $x=1.200n/\bar{v}_{10}$ ;  $k$  为地面粗糙度系数;  $n=\omega/2\pi$ ,  $\omega$  为角频率;  $\bar{v}_{10}$  为离地 10 m 高度处统计五十年一遇的 10 min 平均最大风速。

阻力方向脉动风压功率谱密度为

$$S_w(z, n) = \frac{4\bar{w}^2}{\bar{v}^2(z)} S_{V_D}(z, n) \quad (3)$$

式中:  $\bar{w}$  为平均风压;  $\bar{v}(z)$  为  $z$  高度的平均风速;  $S_{V_D}(z, n)$  为阻力方向脉动风速谱。

升力方向脉动风速谱的表达式为

$$S_{V_L}(z, n) = \frac{15f\mu_*^2}{(1+9.5f)^{5/3}} \quad (4)$$

式中:  $f = \frac{nz}{\bar{v}(z)}$ ;  $\mu_*^2 = k\bar{v}_{10}^2$ 。

同样,可由式(3)得到升力方向脉动风压功率谱密度。

## 2.3 脱落涡载荷

大型火箭缩比模型风洞试验结果表明,尾流中的脱落涡状态与雷诺数有关。在亚临界雷诺数范围内( $Re < 3 \times 10^5$ ),尾流中有周期性可辨别的脱落涡。在超临界雷诺数时( $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$ ),涡流产生的升力是非周期性且不规则的,尾流中出现随机的漩脱落涡。当雷诺数处于跨临界范围时( $Re > 3.5 \times 10^6$ ),湍流涡街又重新建立,尾流中呈现出有规律的脱落涡<sup>[11-12]</sup>。

由于新一代运载火箭直径较大,在参考风速为 4~20 m/s 时,雷诺数处于超临界范围,升力方向

旋脱落涡引起的脉动风压谱密度函数<sup>[13]</sup>为

$$S_L(z, n) = \left[ \frac{1}{2} \rho D(z) v^2(z) \right]^2 S_{C_L}(z, n) \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为大气密度;  $D(z)$  为火箭  $z$  高度处的阻力系数;  $v(z)$  为  $z$  高度处的参考风速;  $S_{C_L}(z, n)$  为脉动风速谱密度函数。

## 3 结构响应分析方法

运载火箭在地面风作用下的响应一般划分为阻力方向响应和升力方向响应,前者主要是由阻力方向平均风产生的静态响应和脉动风产生的随机振动响应,后者则主要是由升力方向脉动风和气流绕火箭流动的尾流中脱落涡所产生的。

作用在运载火箭上的平均风载荷可认为是静载荷,因此可以采用静力学方法来分析平均风响应。作用在运载火箭上的阻力方向脉动风载荷、升力方向脉动风载荷和升力方向脱落涡载荷均可采用频域内随机振动响应方法来分析。下文主要介绍基于 MSC. Patran/Nastran 的运载火箭随机振动响应分析方法。

运载火箭底部固支,将其分成不同的截面,如图 3 所示。每一个截面施加一个单位水平载荷,每一个单位水平载荷建立一个载荷工况,提交 MSC. Patran/Nastran 软件进行频率响应分析。

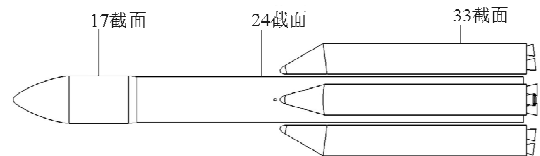


图 3 火箭模型简图

Fig. 3 Sketch of the rocket model

通过 MSC. Patran 的场功能将风压自功率谱和风压互功率谱输入程序,并通过添加 RANDPS 卡片定义不同截面的风压自功率谱和风压互功率谱。

运用 Random Analysis 模块进行分析,即可得到运载火箭不同部位的响应功率谱密度和响应均方根,从而得到运载火箭不同部位在不同风载荷作用下以一定概率出现的响应。

## 4 算例分析

针对新一代大型运载火箭,采用上述有限元模

型和分析方法,运用 MSC. Patran/Nastran 软件的频率响应分析和随机振动分析模块计算得到处于垂直状态的运载火箭在不同参考风速下的位移响应。由于运载火箭在垂直转运时转运平台速度较小且为匀速<sup>[3]</sup>,本文计算时认为地面风载荷是引起火箭结构响应的主要因素,忽略转运平台对火箭结构响应造成的影响。发射场地貌采用建筑学领域的 B 类地貌,即山区发射场地貌。

新一代运载火箭捆绑有四个助推器,考虑到捆绑助推器与芯级之间的相互干扰,采用气动分析软件得到运载火箭不同截面的升阻力系数。考虑到不同风向下助推器和芯级的相对位置会影响到运载火箭的位移响应,本文在气动分析时考虑最严重工况下的风向,即选取的风向使运载火箭的迎风面积最大。

火箭芯级顶端在四种地面风载荷下的位移响应如图 4 所示,图中分别给出了火箭芯级顶端阻力方向平均风载荷作用下的静位移响应,阻力方向脉动风载荷、升力方向脉动风载荷和脱落涡载荷作用下的动态位移响应。计算时重点考虑运载火箭的前两阶主要模态。

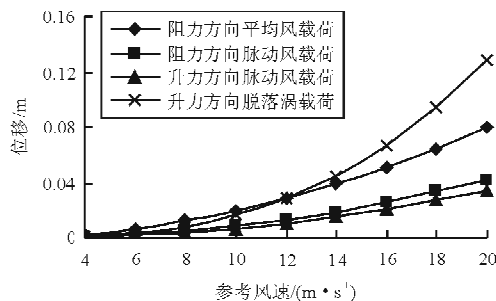


图 4 火箭芯级顶端四种地面风载荷位移响应

Fig. 4 Four kinds of ground wind load displacement response on the top of the rocket

从图 4 可以看出,运载火箭四种风载荷位移响应均随参考风速的增加而增大;当地面参考风速大于 12 m/s 时,火箭脱落涡载荷位移响应增加较快,在高风速区其影响显著。由于没有新一代运载火箭风载荷响应的相关试验数据,本文与 CZ-2F 缩比模型的风洞试验数据进行对比<sup>[4]</sup>。对比结果表明:分析所得新一代运载火箭阻力方向风载荷位移响应和升力方向脉动风载荷位移响应与试验数据的变化规律一致,而升力方向脱落涡载荷响应存在差异。风洞试验数据表明 CZ-2F 升力方向脱落涡

载荷响应在低风速区出现一个明显的峰值,分析所得新一代运载火箭升力方向脱落涡载荷位移响应在低风速区域并未出现“锁定区”。这是因为新一代运载火箭直径较大,在参考风速处于低风速区域时,雷诺数处于超临界范围,不会发生升力方向共振。

在分别得到四种地面风载荷下火箭的静位移和动态位移响应后,本文根据文献[1]中提供了一种偏安全方法将四种位移响应进行合成,如图 5 所示。

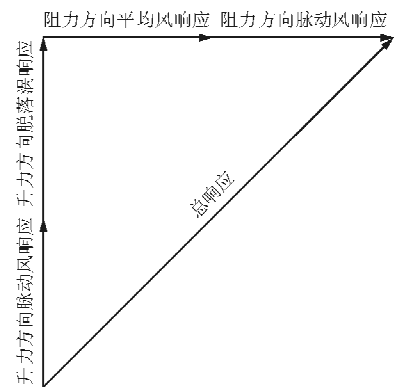


图 5 地面风载荷响应的合成

Fig. 5 Synthesis of ground wind load response

根据上述方法,计算出火箭芯级顶端、卫星、卫星转接框三个不同部位在地面参考风速为 4~20 m/s 时的总位移响应,如图 6 所示。

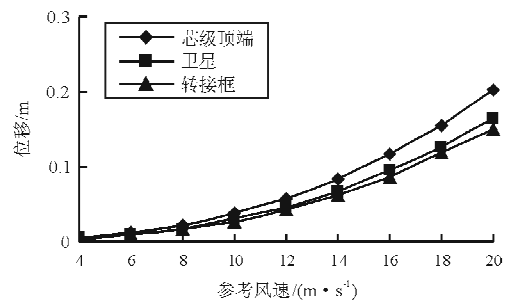


图 6 火箭地面风载荷位移响应

Fig. 6 Ground wind load displacement response of the rocket

从图 6 可以看出,火箭三个不同部位的位移随参考风速的增加而增大。将本文计算所得新一代运载火箭位移响应与 CZ-2F 的风洞试验数据进行对比,发现二者变化规律基本一致。当地面参考风速大于 15 m/s 时,运载火箭会产生较大的位移响应;当地面参考风速达到 20 m/s 时,运载火箭芯级顶端的位移达到 203 mm。地面参考风速较高时,

虽然不会对箭体的主要结构造成破坏,但是会对运载火箭的仪器设备产生一定影响,因此在转运过程中需要注意其对仪器设备的影响。

## 5 结 论

(1) 根据运载火箭地面风载荷产生的复杂原因,运载火箭地面风载荷可以分成平均风载荷、脉动风载荷与脱落涡载荷来进行分析。

(2) 本文计算结果与 CZ-2F 风洞试验结果的对比表明,基于 MSC. Patran/Nastran 随机振动的工程分析方法是可行的,可以有效分析新一代运载火箭在地面风载荷作用下的位移响应特性。

(3) 运载火箭四种风载荷位移响应随参考风速的增加而增大,升力方向的位移响应和阻力方向的位移响应有不同的变化规律。当地面参考风速大于 12 m/s 时,升力方向脱落涡载荷对火箭位移响应的影响显著。

### 参考文献

- [1] 龙乐豪. 总体设计:上册[M]. 北京:中国宇航出版社,1989;557-563.  
Long Lehao. Systems design: volume I [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1989; 557-563. (in Chinese)
- [2] Geissler E D. 风对发射飞行器的影响[M]. 北京:国防工业出版社,1965;76-89.  
Geissler E D. Wind effects on launch vehicle[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1965; 76-89. (in Chinese)
- [3] 马斌捷. CZ-2F 火箭地面风载荷及垂直运输试验分析[C]. 第十一届全国实验力学学术会议,大连:中国力学学会,2005;1198-1204.  
Ma Binjie. The tests analysis of ground wind loads and vertical transports for LM-2F launch vehicle[C]. 11th National Conference of Experimental Mechanics, Dalian; The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2005; 1198-1204. (in Chinese)
- [4] 黄汉杰,贺德馨. 运载火箭地面风荷载及响应研究[J]. 流体力学实验与测量,2001,15(1):36-42.  
Huang Hanjie, He Dexin. Study of the surface wind load and response of carrier rocket[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2001, 15(1): 36-42. (in Chinese)
- [5] 程镇煌. 大型火箭风载试验[J]. 上海航天,1996(4):3-9.  
Cheng Zhenhuang. Wind load test for large rocket[J]. Aerospace Shanghai, 1996(4): 3-9. (in Chinese)
- [6] Donald A Buell, George B McCullough, William J Steinmetz. A wind tunnel-investigation of ground-wind loads on axisymmetric launch vehicles[R]. NASA TND-1893, United States; National Aeronautics and Space Administration, 1963.
- [7] 钟音亮,杨茂,陈凤明. 垂直发射飞行器地面风荷载响应[J]. 科学技术与工程,2010,10(24):6109-6112.  
Zhong Yinliang, Yang Mao, Chen Fengming. The response of vertical launch vehicle to ground wind[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(24): 6109-6112. (in Chinese)
- [8] 李东,程堂明. 中国新一代运载火箭发展展望[J]. 中国航天,2008(2):7-10.  
Li Dong, Cheng Tangming. The present situation and prospect of China's space-entering capacity[J]. Aerospace China, 2008(2); 7-10. (in Chinese)
- [9] 潘忠文,王旭,邢誉峰,等. 基于梁模型的火箭纵横扭一体化建模技术[J]. 宇航学报,2010,31(5):1310-1316.  
Pan Zhongwen, Wang Xu, Xing Yufeng, et al. A beam model based longitudinal-lateral-torsional integrated modeling technique for launch vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(5): 1310-1316. (in Chinese)
- [10] 潘忠文,邢誉峰,朱礼文,等. 运载火箭动力学建模中液体推进剂模拟技术[J]. 中国科学:技术科学,2010,40(8):920-928.  
Pan Zhongwen, Xing Yufeng, Zhu Liwen, et al. Liquid propellant analogy technique in dynamic modeling of launch vehicle[J]. Scientia Sinica Technologica, 2010, 40(8): 920-928. (in Chinese)
- [11] 成楚之. 火箭与导弹的静动力载荷设计[M]. 北京:中国宇航出版社,1994;346-356.  
Cheng Chuzhi. Static and dynamic load design of rocket and missile[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1994; 346-356. (in Chinese)
- [12] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2006;272-290.  
He Dexin. Wind engineering and industrial aerodynamics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006; 272-290. (in Chinese)
- [13] Vickery B J, Basu R I. Across-wind vibrations of structures of circular cross-section[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 12(1): 49-73.

### 作者简介:

李 哲(1975—),男,博士研究生。主要研究方向:运载火箭结构与可靠性。

安 军(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:运载火箭结构与可靠性。

万小鹏(1962—),男,教授,博导。主要研究方向:飞行器结构设计。

(编辑:马文静)