

# 火箭最大气动载荷异常变化分析与建模订正

程胡华<sup>1</sup>, 武 帅<sup>2</sup>, 支 强<sup>1</sup>, 万弘超<sup>3</sup>

1. 63729 部队, 太原 030027

2. 61741 部队, 北京 100094

3. 95133 部队, 武汉 430015



**摘 要** 通过分析某地区 2014 年 12 月~2019 年 12 月、时间间隔 3.5 h 内的最大气动载荷偏差,发现最大正偏差达到 1297.62 Pa·rad、最大负偏差达到 -924.43 Pa·rad。主要原因是由于 3.5 h 内高空风出现异常增大、异常减小导致的。通过对该两个例的发射前 3 h 高空风进行建模订正,最大气动载荷绝对差值分别由 1297.62 Pa·rad 和 924.43 Pa·rad 减小到 908.60 Pa·rad 和 286.56 Pa·rad,降幅分别为 389.02 Pa·rad 和 637.87 Pa·rad,表明该建模订正方法有一定的改进作用,有利于提高火箭安全飞行的保障能力。

**关键词** 运载火箭;火箭发射;气动载荷偏差;异常大建模订正偏差;模型订正中图分类号:V411.8 文献标识码:A

文章编号:1006-3242(2023)06-0057-06

## Analysis and Modeling Revision of Abnormal Changes in Maximum Aerodynamic Load of Rockets

Cheng Huhua<sup>1</sup>, Wu Shuai<sup>2</sup>, Zhi Qiang<sup>1</sup>, Wan Hongchao<sup>3</sup>

1. Unit 63729 of PLA, Taiyuan 030027, China

2. Unit 61741 of PLA, Beijing 100094, China

3. Unit 95133 of PLA, Wuhan 430015, China

**Abstract** According to analyzing the maximum aerodynamic load deviation within 3.5 h between December 2014 and December 2019, the maximum positive deviation reaches 1297.62 Pa·rad and the maximum negative deviation reaches -924.43 Pa·rad, it is proven that it is mainly caused by abnormal increase and decrease of upper wind within 3.5 h. By modeling the upper wind 3 h before launch in the two cases, the absolute difference decreases from 1297.62 Pa·rad and 924.43 Pa·rad to 908.60 Pa·rad and 286.56 Pa·rad, and respectively fallen range to 389.02 Pa·rad and 637.87 Pa·rad. It shows that the revised modeling method has a certain improvement effect, which benefits the guarantee capability of rocket safe flight.

**Key words** Launch vehicle; Rocket launching; Aerodynamic load deviation; Abnormally large modeling correction bias; Model revision

收稿日期:2023-06-12

作者简介:程胡华(1983-),男,博士,主要从事航天器发射环境的预报保障工作,E-mail:397849854@qq.com;支强(1983-),男,博士,主要从事飞行器试验鉴定技术研究;万弘超(1983-),男,博士,主要从事航空气象保障工作。

## 0 引言

运载火箭能否按计划发射,除需考虑火箭本身是否安全可靠外,还需考虑大气环境对运载火箭飞行的影响,特别是高空风引起的最大气动载荷(记为 $q\alpha_{\max}$ ,下同)是否较小,若 $q\alpha_{\max}$ 过大,则会导致箭体飞行失败。因此,为保障运载火箭飞行成功,一方面,针对运载火箭的飞行控制、发动机特性等方面进行研究<sup>[1-4]</sup>;另一方面,需考虑大气环境因素,例如,付继伟等<sup>[5]</sup>研究分析了运载火箭强天气环境适应性防护;王建明等<sup>[6]</sup>对某大型低温火箭高空风载荷值进行了分析;其它研究者同样针对大气环境的影响开展了大量研究<sup>[7-14]</sup>,为持续提高火箭飞行安全提供了有力支撑。

目前,在火箭发射前3 h,较少考虑 $q\alpha_{\max}$ 偶尔可能出现的急剧变化。但是,若高空急流位于发射场上空或附近时,高空急流的南北摆动、下沉或上升等运动特征,以及对其它天气系统的动力作用<sup>[15-16]</sup>,将会导致高空风在几小时内出现急剧变化<sup>[17]</sup>。程胡华等<sup>[17]</sup>研究3.5 h内高空风数据集发现3.5 h内高空风最大风速偏差范围为-24.00~26.00 m/s,最大风速绝对差超过10 m/s的样本数达到31.70%,此时将导致3.5 h内的 $q\alpha_{\max}$ 出现相应变化。

考虑到 $q\alpha_{\max}$ 在短时间内偶尔出现急剧变化的特征,若以发射前3 h的 $q\alpha_{\max}$ 是否超过阈值判断火箭发射是否按计划进行,存在一定的安全风险。但截止目前,针对发射前3 h的 $q\alpha_{\max}$ 能否代表发射时刻 $q\alpha_{\max}$ 的相关研究,尚未见到相关研究报告。由于只有间隔3.5 h的 $q\alpha_{\max}$ 资料集,在此选取2014年12月~2019年12月间隔为3.5 h的 $q\alpha_{\max}$ 作为研究对象,分析其差异特征,并选取 $q\alpha_{\max}$ 正偏差最大值和负偏差最大值为研究对象,分析原因并提出订正方法,最后对订正效果进行检验。

## 1 资料简介及处理方法

### 1.1 资料简介

间隔3.5 h的 $q\alpha_{\max}$ 数据集(共302组)是基于2014年12月~2019年12月间隔3.5 h高空风计算得到;利用NCEP/GFS(NCEP:National Centers for Environmental Prediction; GFS:Global Forecast Sys-

tem)预报场资料作为WRF(WRF:Weather Research and Forecast Model)模式的初始场和侧边界条件,在WRF模式中设置适合本地区的微物理过程、积云参数化、近地面层和陆面过程等参数化方案,通过时间积分得到未来12 h内的高空风资料,结合火箭发射前3 h高空风资料,建模得到高空风订正值,从而得到 $q\alpha_{\max}$ 订正值。

### 1.2 处理方法

利用偏差反映3.5 h内高空风、大气密度和最大气动载荷差异特征,通过偏差、绝对差、相对误差和相关系数对建模效果进行检验,其计算公式如下:

$$D = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)]}{n} \quad (1)$$

$$A = \frac{[\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|]}{n} \quad (2)$$

$$R = 100 \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{|x_i - y_i|}{y_i} \right) \quad (3)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: $D$ 为偏差, $A$ 为绝对差, $R$ 为相对误差, $C$ 为相关系数, $n$ 为样本数, $i=1,2,\dots,n$ , $x$ 为评估量(或比较量), $y$ 为基准量。

反映运载火箭气动载荷的 $qa$ 值表达式为:

$$qa = q \sqrt{(\alpha')^2 + (\beta')^2} \quad (5)$$

式中: $q$ 为动压头、 $\alpha$ 为总攻角、 $\alpha'$ 和 $\beta'$ 分别为攻角和侧滑角, $qa$ 值反映了大气环境对运载火箭飞行作用下产生的气动载荷,每次火箭飞行过程中产生的最大 $qa$ 值是否超过火箭设计阈值,常用于判断火箭能否安全飞行。关于 $qa$ 的推导过程,参见文献<sup>[8]</sup>。

## 2 3.5 h内偏差特征

火箭发射前3 h、发射后0.5 h的 $q\alpha_{\max}$ ,分别记为 $qa_{\max}^{b3h}$ 、 $qa_{\max}^{a0.5h}$ ;  $qa_{\max}^{a0.5h}$ 与 $qa_{\max}^{b3h}$ 之间的 $q\alpha_{\max}$ 偏差变化特征见图1,图中黑横线对应的值为0.00 Pa·rad,  $q\alpha_{\max}$ 偏差存在正值、负值交替变化的特征。其中,135个样本的 $q\alpha_{\max}$ 偏差为正值(占总数的44.70%),167个样本的 $q\alpha_{\max}$ 偏差为负值(占总数的55.30%), $q\alpha_{\max}$ 偏差值范围为-924.43~1297.62 Pa·rad,平均值为-13.76 Pa·rad,  $q\alpha_{\max}$ 偏差值超

过  $500 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$  和  $200 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$  的样本数分别有 10 个和 39 个,分别占总数的 3.31% 和 12.91%,  $q\alpha_{\max}$  偏差值超过  $-500 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$  和  $-200 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$  的样本数分别有 9 个和 58 个,分别占总数的 2.98% 和 19.21%,表明  $q\alpha_{\max}$  偏差值位于  $-500 \sim 500 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$  和  $-200 \sim 200 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$  范围内的样本数分别为 283 个和 205 个,分别占总样本数的 93.71% 和 67.88%。

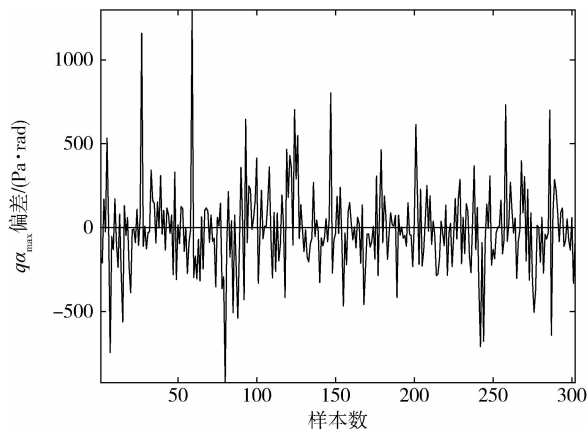


图 1 在 3.5 h 内,  $q\alpha_{\max}^{3.5h}$  与  $q\alpha_{\max}^{0.5h}$  之间的偏差变化特征

通过上述分析可知,67.88% 的样本在 3.5 h 内的  $q\alpha_{\max}$  偏差位于  $-200 \sim 200 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$ ,位于可接受范围内;但偶尔出现异常偏大现象。其中,3.5 h 内  $q\alpha_{\max}$  正偏差最大值达到  $1297.62 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$ 、负偏差最大值达到  $-924.43 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$ 。下面分别对  $q\alpha_{\max}$  正偏差最大值为  $1297.62 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$ 、负偏差最大值为  $-924.43 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$  的个例进行研究,分析引起偏差异常偏大的原因,并提出建模方法进行订正。

### 3 原因分析

在计算  $q\alpha_{\max}$  的程序中,大气密度、高空风均为所需的大气环境参数;在 3.5 h 内,火箭本身的状态参数均基本维持不变,但由于天气系统变化,引起大气密度、高空风出现变化,有时变化明显,导致  $q\alpha_{\max}$  在 3.5 h 内出现相应变化。下面分别对 3.5 h 内  $q\alpha_{\max}$  偏差值为  $1297.62 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$  和  $-924.43 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$ (分别记为“个例 1”和“个例 2”)的高空风偏差、大气密度偏差进行分析。记火箭发射前 3 h 和发射后 0.5 h 的高空风速分别为  $V_{b3h}$  和  $V_{a0.5h}$ 。

在 3.5 h 内,个例 1 和 2 的高空风速偏差和大气密度偏差特征见图 2 和表 1。图中黑竖线对应的值为 0.00,在图 2(a)中,高度 6.20 ~ 10.00 km 内的

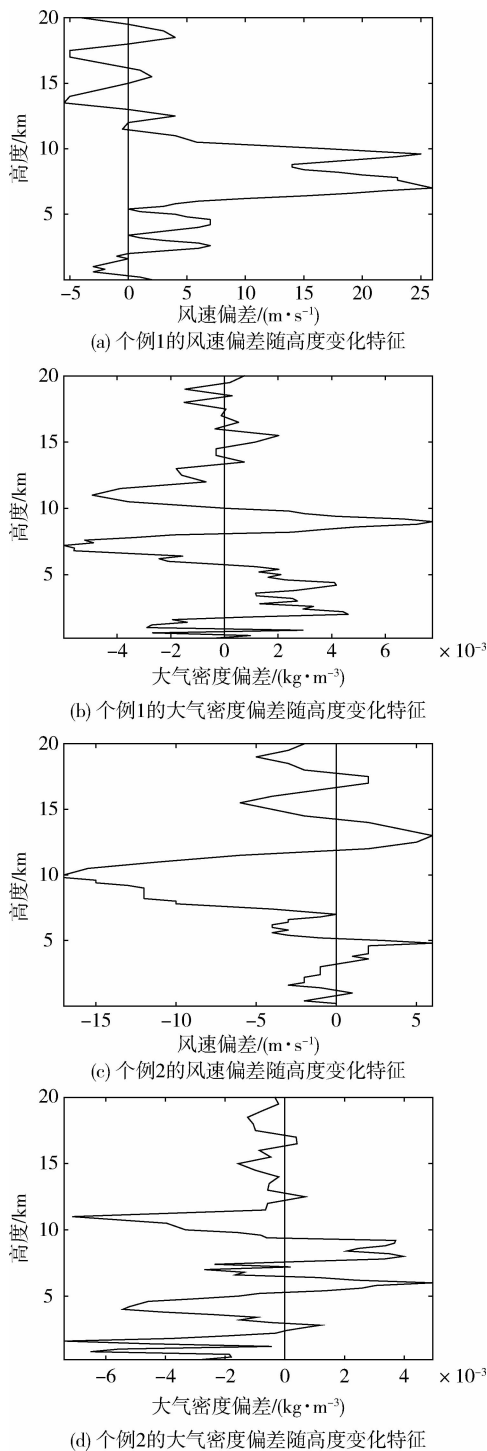


图 2 在 3.5 h 内,个例 1 和 2 的高空风速偏差和大气密度偏差随高度变化特征

高空风速明显增大(均超过  $10 \text{ m/s}$ ),其风速偏差值(以  $V_{b3h}$  为基准)范围为  $10.00 \sim 26.00 \text{ m/s}$ ,平均值达到  $19.55 \text{ m/s}$ ;在图 2(c)中,高度  $7.80 \sim 11.00 \text{ km}$  范围内的高空风速明显减小(均超过  $-10 \text{ m/s}$ ),其风速偏差值范围为  $-17.00 \sim -10.00 \text{ m/s}$ ,平均值为  $-13.11 \text{ m/s}$ 。从图 2(b)、2(d)和表 1 可看出,个

例 1 和 2 的大气密度偏差值非常小,与原始值相比可忽略不计。根据文献[12-13]分析结论可知,个例 1 和 2 在 3.5 h 内  $q\alpha_{\max}$  出现的明显差异,大气密度变化差异的贡献很小,主要由 3.5 h 内高空风差异变化导致。

从上述分析及图 2 可知,相对  $V_{b3h}$ , 个例 1 的  $V_{a0.5h}$  最大值和平均值均明显增大,且快速增大的高度层较低,导致  $q\alpha_{\max}$  值在 3.5 h 内增加了 1297.62 Pa·rad; 而个例 2 的  $V_{a0.5h}$  最大值和平均值均明显减小,且出现的高度较低,导致  $q\alpha_{\max}$  值在 3.5 h 内减小了 924.43 Pa·rad。

表 1 个例 1 和 2 在 3.5 h 内高空风速偏差和大气密度偏差特征

	个例 1		个例 2	
	范围	平均值	范围	平均值
高空风速偏差 /(m/s)	-5.50 ~ 26.00	6.44	-17.00 ~ 6.00	-3.27
大气密度偏差 /(kg/m <sup>3</sup> )	-0.006 ~ 0.0078	0.00038	-0.0074 ~ 0.0050	-0.0009

## 4 建模及分析

通过分析个例 1 和 2 在 3.5 h 内高空风偏差和大气密度偏差,发现导致 3.5 h 内  $q\alpha_{\max}$  偏差明显的原因是高空风差异。利用 WRF 模式可提前判断高空风变化差异特征,该模式是目前世界上最先进的中尺度数值天气模式之一,已被广泛应用于强对流、高空急流和地面风等天气预报业务及机理研究<sup>[15-16,18]</sup>。本文利用 WRF 模式获取未来 3.5 h 内的高空风变化差异。经过前期验证,在 WRF 模式中设计适合本地区的参数化方案(见表 2),并设置模式输出产品的时间分辨率为 15 min、水平分辨率为 9 km,高度 1000~50 hPa 分成 48 层。利用 WRF 模式得到未来 3.5 h 内高空风差异,以符号  $\Delta V_{f3.5h}$  表示,利用  $V_{b3h}$  和  $\Delta V_{f3.5h}$ ,得到高空订正风  $V_{f0.5h}$ <sup>[17]</sup>,计算表达式为:

$$V_{f0.5h} = V_{b3h} + \Delta V_{f3.5h}$$

$V_{f0.5h}$  为建模得到的高空订正风,该值的精度取决于  $\Delta V_{f3.5h}$ ,若 WRF 模式的参数化方案设计合理、且同化更多各类实况资料,则有利于得到更精准的  $\Delta V_{f3.5h}$ ,这是本文建模的重点和难点,需经过长期

的调试验证。针对上述的个例 1 和个例 2,下面以  $V_{a0.5h}$  和  $q\alpha_{\max}^{a0.5h}$  为基准,对建模得到高空订正风  $V_{f0.5h}$  及其最大气动载荷  $q\alpha_{\max}^{f0.5h}$  精度特征进行分析。

表 2 WRF 模式中的参数化方案设计

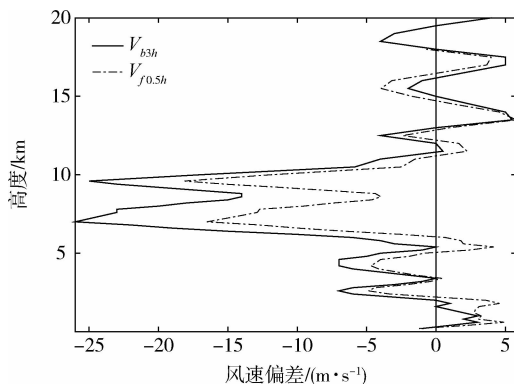
参数化方案	方案设计
微物理过程方案	WDM 5-class scheme
长波辐射方案	rrtm scheme
短波辐射方案	Goddard short wave
近地面层方案	Monin-Obukhov (Janjic) scheme
陆面过程方案	Unified Noah land-surface model
边界层方案	Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme
积云参数化方案	Betts-Miller-Janjic scheme

对于个例 1 和 2,  $V_{b3h}$ ,  $V_{f0.5h}$  与  $V_{a0.5h}$  之间的风速偏差随高度变化特征如图 3 所示,风速偏差范围见表 3。个例 1 的  $V_{b3h}$  和  $V_{f0.5h}$  风速偏差(以  $V_{a0.5h}$  为基准)随高度变化特征见图 3(a),在高度 6.20~10.00 km 范围内,偏差值范围由 -26~-10.00 m/s 减小到 -18.13~-2.44 m/s,平均偏差值由 -19.55 m/s 减小到 -10.62 m/s。个例 2 的  $V_{b3h}$  和  $V_{f0.5h}$  风速偏差随高度变化特征见图 3(b),在高度 7.80~11.00 km 范围内,偏差值范围由 10.00~17.00 m/s 减小到 -0.36~9.21 m/s,平均偏差值由 13.11 m/s 减小到 3.44 m/s。

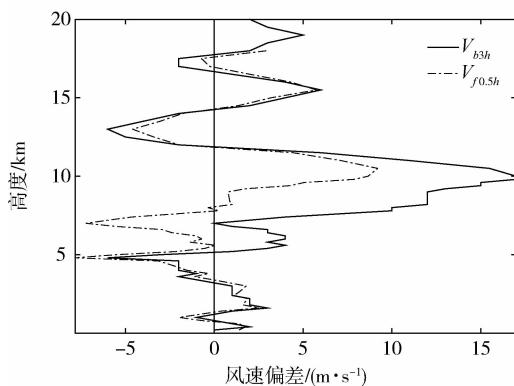
在整个高度范围内,个例 1 和 2 的  $V_{b3h}$ ,  $V_{f0.5h}$  与  $V_{a0.5h}$  之间平均偏差值、平均绝对差、平均相对误差和相关系数见表 3,从表 3 及上述分析可知,相比  $V_{b3h}$ ,利用模型订正后得到的  $V_{f0.5h}$  更接近  $V_{a0.5h}$ 。若以火箭发射后 0.5 h 的  $q\alpha_{\max}$  为基准,经计算,个例 1 的  $q\alpha_{\max}$  偏差值由 -1297.62 Pa·rad 减小到 -908.60 Pa·rad; 个例 2 的  $q\alpha_{\max}$  偏差值由 924.43 Pa·rad 减小到 286.56 Pa·rad。

表 3 对于个例 1 和 2,  $V_{b3h}$ ,  $V_{f0.5h}$  与  $V_{a0.5h}$  之间的数理统计结果

	个例 1		个例 2	
	$V_{b3h}$	$V_{f0.5h}$	$V_{b3h}$	$V_{f0.5h}$
偏差范围/(m/s)	-26.00 ~ 5.50	-18.13 ~ 5.79	-6.00 ~ 17.00	-7.83 ~ 9.21
平均偏差/(m/s)	-6.44	-3.07	3.27	0.18
平均绝对差/(m/s)	7.72	5.08	4.54	2.61
平均相对误差/%	24.77	21.17	17.53	11.59
相关系数	0.91	0.95	0.971	0.976



(a) 个例1的风速偏差随高度变化特征



(b) 个例2的风速偏差随高度变化特征

图3 个例1和2的  $V_{b3h}$  偏差和  $V_{f0.5h}$  偏差随高度变化特征

## 5 结论

通过对2014年12月~2019年12月间隔3.5 h的  $q\alpha_{\max}$  差异特征进行统计分析,提出了建模订正方法,得到主要结论如下:

1) 大多数样本在3.5 h内的  $q\alpha_{\max}$  偏差较小,偏差值位于  $-200 \sim 200 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$  范围内占总数的67.88%;但偶尔会出现异常偏大的现象,其中,  $q\alpha_{\max}$  正偏差最大值为  $1297.62 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$ 、负偏差最大值为  $-924.43 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$ 。

2) 3.5 h内  $q\alpha_{\max}$  偏差异常偏大的原因,主要是高空风异常变化及所在高度位置变化共同导致的。 $q\alpha_{\max}$  正偏差值为  $1297.62 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$  的个例1,3.5 h内高空风速的最大值和平均值均存在明显增大,且快速增大的高度层较低; $q\alpha_{\max}$  负偏差值为  $-924.43 \text{ Pa} \cdot \text{rad}$  的个例2,3.5 h内高空风速的最大值和平均值均明显减小,且出现的高度层较低。

3) 针对个例1和个例2,利用建模方法得到的  $q\alpha_{\max}$  订正值,相比发射前3.0 h的  $q\alpha_{\max}$  值,更接近

发射后0.5 h的  $q\alpha_{\max}$ ,表明该建模订正方法有一定的改进作用。

上述分析表明,为提高火箭飞行安全,需提前了解  $q\alpha_{\max}$  在3.5 h内可能存在的变化方向(明显增大、明显减小或变化不明显),通过文献[17]可知,本文建模方法对高空风具有较好的订正效果。因此,若以建模订正的  $q\alpha_{\max}$  值作为判断依据,有利于提高运载火箭的安全飞行保障能力。由于没有发射时刻的  $q\alpha_{\max}$ ,仅针对3.5 h内的  $q\alpha_{\max}$  差异及建模订正效果进行了研究,但相关成果对3.0 h内的  $q\alpha_{\max}$  差异及建模订正同样具有参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] 程修妍,荣吉利,阿尼苏,等. 火箭发动机超声速过膨胀射流气动噪声特性研究[J]. 宇航学报,2020,41(9):1204-1211. (Cheng Xiuyan, Rong Jili, A Nisu, et al. Aerodynamic noise characteristics of supersonic over expanded jet in rocket engine[J]. Journal of Astronautics,2020,41(9):1204-1211.)
- [2] 李东,杨云飞,胡鹏翔,等. 运载火箭多体动力学建模与仿真技术研究[J]. 宇航学报,2021,42(2):141-149. (Li Dong, Yang Yunfei, Hu Pengxiang, et al. Research on multibody dynamic modeling and simulation technology for launch vehicles[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(2):141-149.)
- [3] 王智,王鹏,何磊. 一种级间无动力飞行时间在线自适应确定方法[J]. 航天控制,2022,40(4):33-37. (Wang Zhi, Wang Peng, He Lei. An on-line adaptive determination method of unpowered flight time[J]. Aerospace Control, 2022, 40(4):33-37.)
- [4] 胡海峰. 液体火箭发动机智能故障诊断的研究现状[J]. 航天控制,2023,41(1):3-14. (Hu Haifeng. Research status of fault diagnosis for liquid rocket engine [J]. Aerospace Control, 2023, 41(1):3-14.)
- [5] 付继伟,陈曦,叶志鹏,等. 运载火箭强天气环境适应性防护研究综述[J]. 导弹与航天运载技术,2022(5):88-92. (Fu Jiwei, Chen Xi, Ye Zhipeng, et al. Review on adaptive protection of launch vehicle against severe weather[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(5):88-92.)
- [6] 王建明,林娜,张博戎. 某大型低温火箭高空风载荷分析[J]. 导弹与航天运载技术,2021(5):137-141. (Wang Jianming, Lin Na, Zhang Borong. Analysis on flight wind-load for large cryogenic rocket[J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(5):137-141.)
- [7] 赵人谦,陈振官,付维贤. 风切变与运载火箭设计[J]. 宇航学报,1998,19(2):105-108. (Zhao Ren-

- lian, Chen Zhengguan, Fu Weixian. Wind shear and rocket design [J]. *Journal of Astronautics*, 1998, 19 (2): 105-108. )
- [ 8 ] 李效明,许北辰,陈存芸. 一种运载火箭减载控制工程方法[J]. *上海航天*,2004(6):7-14. (Li Xiaoming, Xu Beichen, Chen Cunyun. An engineering method on the control of decreasing load for a launch vehicle[J]. *Aerospace Shanghai*, 2004(6):7-14. )
- [ 9 ] 宋征宇. 运载火箭飞行减载控制技术[J]. *航天控制*, 2013, 31(5):3-8. (Song Zhengyu. Load control technology in launch vehicle [J]. *Aerospace Control*, 2013, 31(5): 3-8. )
- [10] 张卫东,贺从园,周静,等. 基于信号辨识的运载火箭实时减载控制技术[J]. *航天控制*, 2018, 36(3): 3-14. (Zhang Weidong, He Congyuan, Zhou Jing, et al. The in-flight load relief of launch vehicles based on the signal identification [J]. *Aerospace Control*, 2018, 36(3): 3-14. )
- [11] 修观,匡东政,李鑫,等. 运载火箭的一种自适应姿态开环减载控制技术[J]. *航天控制*, 2021, 39(1): 3-7. (Xiu Guan, Kuang Dongzheng, Li Xin, et al. An adaptive attitude open loop load relief control technology for launch vehicle [J]. *Aerospace Control*, 2021, 39 (1): 3-7. )
- [12] 程胡华,王益柏,蔡其发,等. 大气密度对运载火箭飞行的  $q\alpha_{\max}$  精度影响及建模分析[J]. *宇航学报*, 2021, 42(3): 378-389. (Cheng Huhua, Wang Yibai, Cai Qifa, et al. Influence of atmospheric density on  $q\alpha_{\max}$  accuracy of launch vehicle flight and modeling analysis [J]. *Journal of Astronautics*, 2021, 42 (3): 378-389. )
- [13] 程胡华,李娟,肖云清,等. 风偏差对火箭最大气动载荷精度的影响与分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(10): 2034-2042. (Cheng Huhua, Li Juan, Xiao Yunqing, et al. Influence and analysis of wind deviation on rocket maximum aerodynamic load accuracy [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(10): 2034-2042. )
- [14] 程胡华,张建军,王益柏,等. 火箭最大气动载荷预报精度及建模订正分析[J]. *航天控制*,2023,41(4): 77-83. (Cheng Huhua, Zhang Junjun, Wang Yibai, et al. Analysis of the accuracy of the maximum aerodynamic load forecast for rockets and modeling revisions [J]. *Aerospace Control*, 2023,41(4):77-83. )
- [15] 罗雄,李国平. 高空急流对青藏高原切变线影响的数值试验与动力诊断[J]. *气象学报*,2018,76(3):361-378. (Luo Xiong, Li Guoping. Numerical experiments and dynamic diagnosis of the upper-level jet stream impact on the Tibetan Plateau shear line [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018,76(3):361-378. )
- [16] 孙颖姝,周玉淑,王咏青. 一次双高空急流背景下南疆强降水事件的动力过程[J]. *大气科学*, 2019, 43(5): 1041-1054. (Sun Yingshu, Zhou Yushu, Wang Yongqing. Analysis of dynamic process and moisture source on a heavy precipitation event in southern xinjiang associated with the double upper-level jet [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,2019,43(5): 1041-1054. )
- [17] 程胡华,成巍,沈洪标,等. 火箭发射前后 3.5 h 内高空风差异特征及预报[J]. *应用气象学报*,2022,33(4):400-413. (Cheng Huhua, Cheng Wei, Shen Hongbiao, et al. Upper wind difference characteristics and forecast within 3.5 hours before and after rocket launch [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2022, 33(4):400-413. )
- [18] 刘郁珏,苗世光,刘磊,等. 修正 WRF 次网格地形方案及其对风速模拟的影响[J]. *应用气象学报*, 2019, 30(1): 70-81. (Liu Yujue, Miao Shiguang, Liu Lei, et al. Effects of a modified sub-grid-scale terrain parameterization scheme on the simulation of low-layer wind over complex terrain [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2019, 30(1): 70-81. )