

预报风强度对火箭最大气动载荷精度影响及建模分析

程胡华¹, 武帅², 张入财³, 肖云清^{4,5*}, 赵亮⁶

- (1. 中国人民解放军63729部队, 山西太原 030027; 2. 中国人民解放军61741部队, 北京 100094;
3. 中国人民解放军78127部队, 四川成都 610031; 4. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与
风险管理重点实验室, 宁夏银川 750002; 5. 银川市气象局, 宁夏银川 750011;
6. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘要:针对不同预报风强度的精度以及其对应的最大气动载荷预报值精度的研究文献极少。以某地区实况风为基准, 分别对不同预报风强度的精度以及其对应的最大气动载荷预报值精度特征进行了分析, 并利用多元线性回归方法建立了订正模型, 结果表明在预报日数第1~11天, 预报风强度越大, 预报风精度及其对应的最大气动载荷预报值精度越高; 利用多元线性回归方法可提高最大气动载荷预报值精度, 且预报风强度越小, 最大气动载荷预报精度提高越明显。这些发现在火箭发射前的飞行保障及安全决策方面具有参考价值。

关键词:运载火箭; 预报风强度; 最大气动载荷预报; 精度特征

中图分类号: V411.8 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1001-2486(2024)01-063-11



听语音
与作者互动
聊科研

Influence of forecasting wind intensity on rocket maximum aerodynamic load accuracy and modeling analysis

CHENG Huhua¹, WU Shuai², ZHANG Rucan³, XIAO Yunqing^{4,5*}, ZHAO Liang⁶

(1. The PLA Unit 63729, Taiyuan 030027, China; 2. The PLA Unit 61741, Beijing 100094, China;

3. The PLA Unit 78127, Chengdu 610031, China; 4. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, China;
5. Yinchuan Meteorological Bureau, Yinchuan 750011, China; 6. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmosphere Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to solve the problems of very few research literatures on the accuracy of different forecast wind intensity and the corresponding accuracy of the maximum aerodynamic load forecast value, the accuracy characteristics of different forecast wind intensity and the corresponding maximum aerodynamic load forecast value were respectively analyzed on the basis of the actual wind in a certain area, and the multiple linear regression method was used to establish a revised model. The results show that within 1~11 days of forecasting days, the greater the forecast wind intensity, the higher the forecast wind accuracy and the corresponding maximum aerodynamic load forecast value accuracy. Using the multiple linear regression method can improve the accuracy of the maximum aerodynamic load forecast, and the smaller the forecast wind intensity, the more obvious the improvement of the forecast accuracy of the maximum aerodynamic load. These findings have reference value in the flight assurance and safety decision-making of rocket launch.

Keywords: launch vehicle; forecast wind intensity; maximum aerodynamic load forecast; accuracy characteristics

运载火箭能否飞行成功,除了其本身无任何问题外,高空风产生的气动载荷也是必须考虑的重要因素,若最大气动载荷(记“ $q\alpha_{\max}$ ”,下同)超过阈值,则可能导致箭体弯曲折断,造成飞行失败。为提高运载火箭飞行成功率,一方面,对运载

火箭本身的结构及其系统安全等开展了一系列研究^[1-4],另一方面,对大气环境产生的气动载荷特征进行了相关研究^[5-13],均取得大量有意义的成果,为持续提高我国运载火箭飞行成功率提供了有力支撑。

收稿日期:2021-09-10

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA20060501, XDA17010105)

第一作者:程胡华(1983—),男,江西上饶人,工程师,博士, E-mail:397849854@qq.com

*通信作者:肖云清(1965—),女,河北沧州人,高级工程师,本科, E-mail:xiaoyunqing00@163.com

运载火箭发射前,需提前提供靶场发射零日的高空预报风(简称“预报风”,下同),若预报风产生的 $q\alpha_{\max}$ 预报值超过阈值,则考虑推迟发射。利用数值天气预报模式提供靶场的预报风,是目前最准确、最可靠的方法。在数值天气预报模式中,由于初始场观测资料和背景信息的不确定性,以及资料同化过程中产生的偏差共同造成初值误差^[14],再加上模式的物理过程、动力框架和参数化方案不可能精准描述真实大气,从而造成模式误差^[15-16],在初值误差和模式误差的共同作用下,数值天气预报模式的预报能力随预报日数延长而降低^[17-21],例如,程胡华等^[21]在研究预报风偏差对火箭 $q\alpha_{\max}$ 精度影响时,发现预报风精度随预报日数延长而快速降低。

程胡华等^[21]针对相同垂直分辨率情况下,对预报风偏差产生的火箭 $q\alpha_{\max}$ 精度特征进行了分析。为进一步分析预报风对火箭 $q\alpha_{\max}$ 精度的影响,本文以真实情况下的预报风、实况风作为研究对象,即综合考虑预报风偏差和不同垂直分辨率产生的影响,同时,将数值天气预报模式的高空最大预报风速(简称“最大风速”,下同)划分成 3 种预报风强度(①最大风速 ≤ 30 m/s;② 30 m/s < 最大风速 ≤ 60 m/s;③最大风速 > 60 m/s),对该 3 种不同预报风强度及其 $q\alpha_{\max}$ 预报值的精度进行分析,并建立了订正模型,最后对模型的订正效果进行了检验。

1 资料和处理方法

1.1 资料

所用资料为 2017 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日实况风资料(探空气球风场)及目前国内外最先进数值天气预报模式的预报风产品,其中,实况风为每日 08:00,高度 0 ~ 10 000 m、10 000 ~ 20 000 m 内的垂直分辨率分别为 200 m、500 m;预报风为每日 08:00 起报(北京时间),其预报时长为 11 天,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直方向为 14 层(分别为 1 000 hPa、950 hPa、925 hPa、850 hPa、800 hPa、700 hPa、600 hPa、500 hPa、400 hPa、300 hPa、250 hPa、200 hPa、150 hPa、100 hPa)。

1.2 处理方法

1) 预报风的水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,采用双线性插值方法,将预报风的规则网格点数据插值到实况风所在位置。

2) 在垂直方向上,预报风为气压层,实况风为高度层,且实况风的垂直分辨率、垂直层数均明显高于预报风,利用三次样条插值方法将预报风插值到实况风高度层。

以实况风及其计算得到的 $q\alpha_{\max}$ 实况值为基准,利用偏差、绝对差、相关系数、相对误差对预报风及其 $q\alpha_{\max}$ 预报值的精度进行分析,计算公式如下:

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

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

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

$$R = 100 \times \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{y_i} \quad (4)$$

其中, D 为偏差、 A 为绝对差、 C 为相关系数、 R 为相对误差, n 为样本数, x 为预报风或 $q\alpha_{\max}$ 预报值, y 为实况风或 $q\alpha_{\max}$ 实况值, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 。

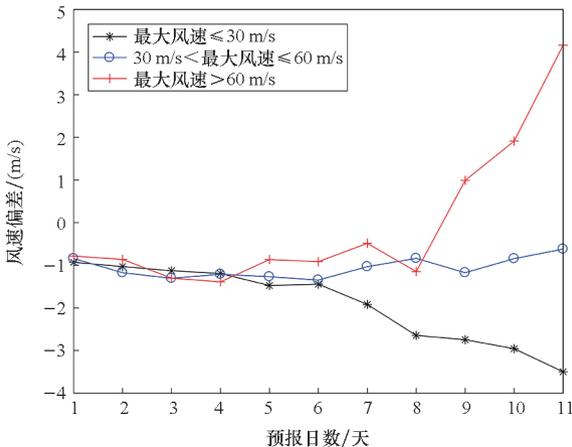
反映高空风对运载火箭飞行影响参数的 $q\alpha$ 值表达式为: $q\alpha = q \sqrt{(\alpha')^2 + (\beta')^2}$, 式中的 q 为动压头、 α 为总攻角、 α' 和 β' 分别为攻角和侧滑角。 $q\alpha$ 值反映了高空风对运载火箭飞行作用下产生的气动载荷,若 $q\alpha$ 值过大,则气流攻角会造成很大的气动干扰力和干扰力矩,轻则影响火箭发射的精度,重则导致火箭飞行失败。因此,一般运载火箭都选择在 $q\alpha_{\max}$ 值小的情况下进行发射。关于 $q\alpha$ 的推导过程,请参见文献[4],在此不再赘述。

2 不同预报风强度的精度特征对比

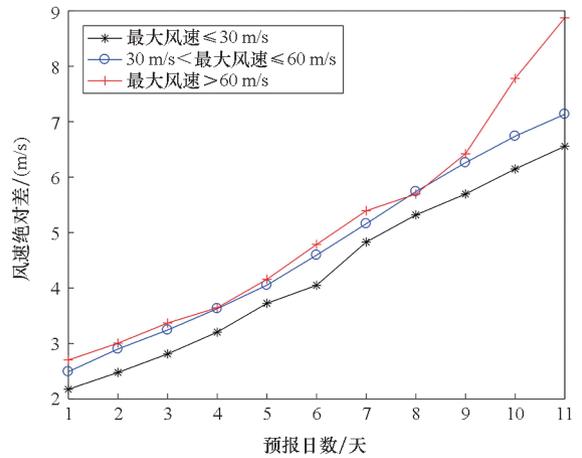
在不同最大风速情况下,风速偏差、绝对差、相对误差及相关系数随预报日数的变化特征如图 1 所示。从图 1 可看出,预报风速的精度不仅与预报日数有关,也与最大风速密切相关:其中,风速偏差在预报日数第 1 ~ 6 天内差别较小,但在预报日数第 7 ~ 11 天内的差异较大(图 1(a)),“最大风速 ≤ 30 m/s”的风速偏差均为负值且其绝对值随预报日数延长呈现增大趋势;“ 30 m/s < 最大风速 ≤ 60 m/s”的风速偏差均为负值且随预报日数延长变化较小;而“最大风速 > 60 m/s”的

风速偏差在预报第 9 ~ 11 天转为正值且呈现快速增大特征。在预报日数第 1 ~ 11 天,“最大风速 ≤ 30 m/s”“ 30 m/s $<$ 最大风速 ≤ 60 m/s”“最大风速 > 60 m/s”的平均风速偏差值分别为 -1.91 m/s、 -1.06 m/s、 -0.06 m/s。不同最大风速时的风速绝对差随预报日数延长均呈现线性增大特征且相互之间存在较明显差异(图 1(b)),总体表现为在相同预报日数,风速绝对差由小到大依次分别为“最大风速 ≤ 30 m/s”“ 30 m/s $<$ 最大风速 ≤ 60 m/s”“最大风速 > 60 m/s”,在预报日数第 1 ~ 11 天内平均值分别为 4.27 m/s、 4.72 m/s、 5.08 m/s。类似绝对差,不同最大风速时的风速相对误差同样随预报日数延长呈现线性增大特征(图 1(c)),但与绝对差不同,在相同预报日数,总体表现出风速相对误差由小到大依次分别为“最大风速 > 60 m/s”“ 30 m/s $<$ 最大风速 ≤ 60 m/s”“最大风速 ≤ 30 m/s”,对应的平均值分别为 24.68% 、 30.09% 、 42.61% 。不同最大风速时的风速相关系数随预报日数延长呈现快速减小趋势(图 1(d)),“最大风速 ≤ 30 m/s”“ 30 m/s $<$ 最大风速 ≤ 60 m/s”“最大风速 > 60 m/s”时的平均风速相关系数值分别为 0.59 、 0.68 、 0.69 。

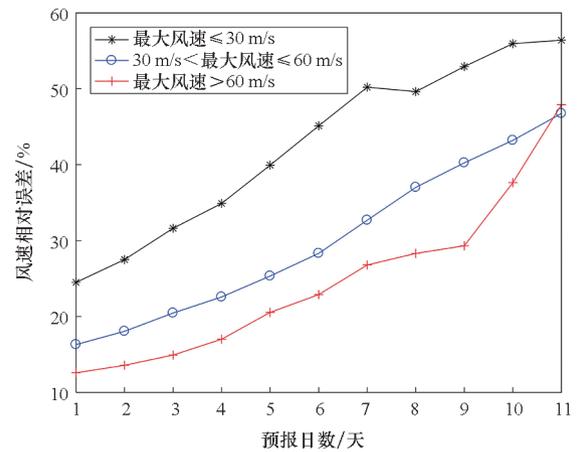
从图 1 及上述分析可知,随最大风速的增大,风速偏差均为负值且偏差绝对值减小(除“最大风速 > 60 m/s”时,第 9 ~ 11 天为正值外)、绝对差增大、相对误差明显减小、相关系数增大,综合判断,风速预报精度随最大风速的增大而提高。这是因为最大风速越大,则风速在水平方向、垂直方向的切变越大,通过插值方法得到的预报风偏差振幅较大,绝对差越大,但平均偏差有可能会更小;不同最大风速之间的绝对差差异较小,导致相对误差随最大风速增大而明显减小;最大风速越



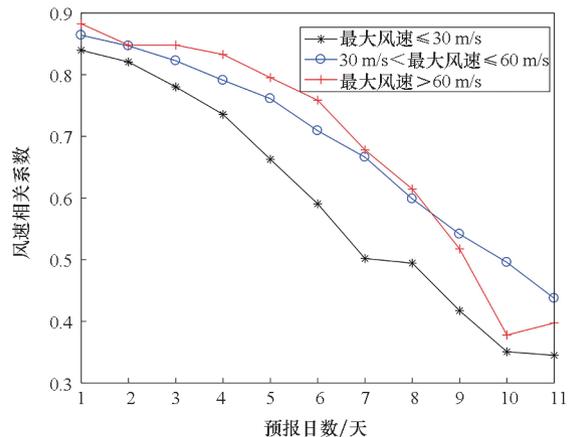
(a) 风速偏差
(a) Wind speed deviation



(b) 风速绝对差
(b) Wind speed absolute difference



(c) 风速相对误差
(c) Wind speed relative error



(d) 风速相关系数
(d) Wind speed correlation coefficient

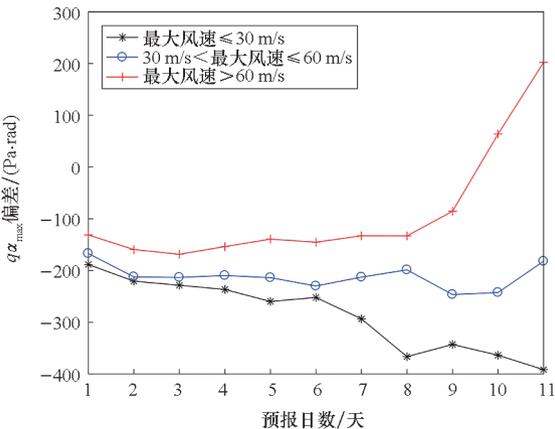
图 1 在不同最大风速情况下风速预报精度随预报日数变化特征
Fig. 1 Variation characteristics of wind speed forecast accuracy with forecast days at different maximum wind speeds

大,风速随高度变化的稳定性、一致性更好,因此,相关系数值会越大。

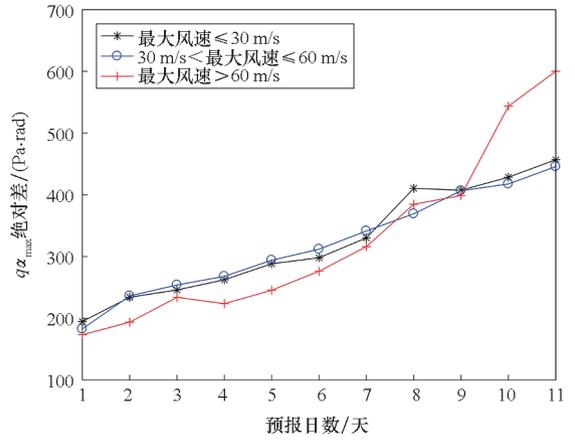
3 不同预报风强度的 $q\alpha_{\max}$ 精度特征对比

图 2 反映了不同最大风速时的 $q\alpha_{\max}$ 预报精度特征,类似预报风精度, $q\alpha_{\max}$ 预报精度同样不仅与预报日数密切相关,与最大风速也有关系:从图 2(a)可看出,随预报日数延长,“最大风速 ≤ 30 m/s”的 $q\alpha_{\max}$ 偏差均为负值且其绝对值呈现增大趋势,“ 30 m/s $<$ 最大风速 ≤ 60 m/s”的 $q\alpha_{\max}$ 偏差均为负值且变化较小,而“最大风速 > 60 m/s”的 $q\alpha_{\max}$ 偏差在预报日数第 1~9 天为负值且变化较小,但在第 10~11 天转为正值且快速增大。不同最大风速时的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差、相对误差随预报日数延长均呈现线性增大趋势且存在差异(图 2(b)、(c)),而 $q\alpha_{\max}$ 相关系数随预报日数延长均呈现减小变化趋势且存在较明显差异(图 2(d))。其中,“最大风速 ≤ 30 m/s”“ 30 m/s $<$ 最大风速 ≤ 60 m/s”“最大风速 > 60 m/s”的平均 $q\alpha_{\max}$ 偏差值分别为 -285.82 Pa · rad、 -211.69 Pa · rad、 -89.41 Pa · rad,平均 $q\alpha_{\max}$ 绝对差分别为 323.36 Pa · rad、 320.67 Pa · rad、 326.32 Pa · rad,平均 $q\alpha_{\max}$ 相对误差分别为 23.55% 、 15.31% 、 11.48% ,平均 $q\alpha_{\max}$ 相关系数值分别为 0.63 、 0.67 、 0.64 。

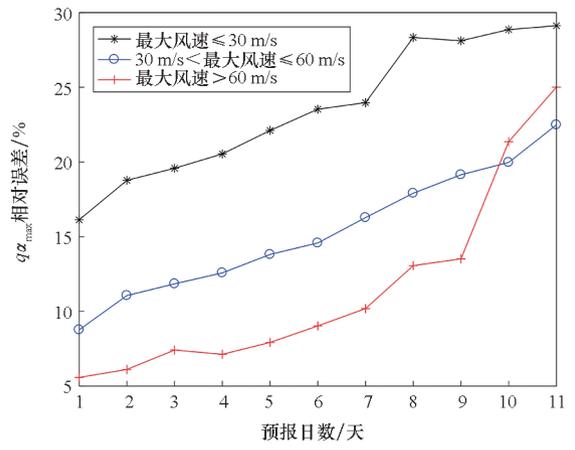
通过图 2 及上述分析可知,随最大风速的增大, $q\alpha_{\max}$ 预报值偏差均为负值(除“最大风速 > 60 m/s”时,第 10~11 天为正值外)且偏差绝对值减小、绝对差和相关系数变化较小,相对误差明显减小,综合判断, $q\alpha_{\max}$ 预报值精度随最大风速的增大而提高。大气密度、风速是计算 $q\alpha_{\max}$ 的重要大气参数,且大气密度随高度增加呈指数减小变化。当预报日数较短时,风速预报稳定性较好、精度较高,最大风速越大,则风速随高度变化越明显,且最大风速所在高度较高, $q\alpha_{\max}$ 的预报值、实



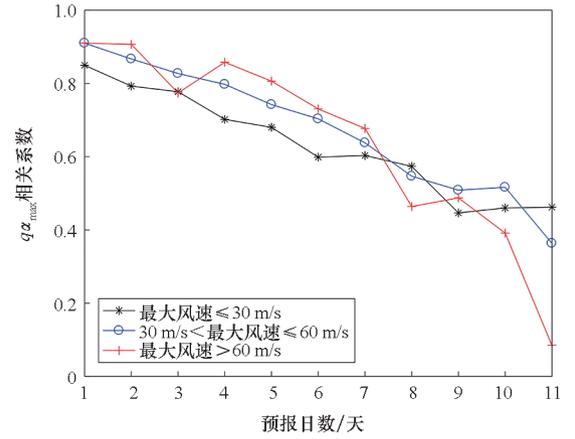
(a) $q\alpha_{\max}$ 偏差
(a) $q\alpha_{\max}$ deviation



(b) $q\alpha_{\max}$ 绝对差
(b) $q\alpha_{\max}$ absolute difference



(c) $q\alpha_{\max}$ 相对误差
(c) $q\alpha_{\max}$ relative error



(d) $q\alpha_{\max}$ 相关系数
(d) $q\alpha_{\max}$ correlation coefficient

图 2 在不同最大风速情况下, $q\alpha_{\max}$ 预报精度随预报日数变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of $q\alpha_{\max}$ forecast accuracy with forecast days at different maximum wind speeds

况值均越大,两者所在高度更接近(一般位于最大风速附近),导致 $q\alpha_{\max}$ 偏差值较小、相关系数较

大;最大风速越小,则风速随高度变化较小, $q\alpha_{\max}$ 预报值、实况值均较小,两者所在高度差异可能较大,此时需考虑不同高度层大气密度的较大差异对 $q\alpha_{\max}$ 影响,其导致 $q\alpha_{\max}$ 偏差更大、相关系数值偏小;由于 $q\alpha_{\max}$ 绝对差差异较小,结合最大风速越大则 $q\alpha_{\max}$ 值越大的特征,导致 $q\alpha_{\max}$ 相对误差随最大风速增大而明显减小。

4 建模

4.1 建模方法

以 70% 的样本作为建模样本,30% 的样本作为模型效果检验样本;记 Q_i 为第 i 天预报风的 $q\alpha_{\max}$ 预报值, D_i, H_i, T_i, W_i 分别为第 i 天 $q\alpha_{\max}$ 预报

值对应的风向($^\circ$)、飞行高度(m)、飞行时间(s)和风速(m/s), U_i, V_i 分别为飞行高度 H_i 范围内的平均纬向风(m/s)、平均经向风(m/s), M_i 为利用多元线性回归方法建立模型得到预报第 i 天的 $q\alpha_{\max}$ 预报订正值,其中 $i = 1, 2, 3, \dots, 11$ 。在预报日数第 1~11 天, $Q_i, D_i, H_i, T_i, W_i, U_i, V_i$ 与 $q\alpha_{\max}$ 实况值之间的相关系数统计结果见表 1,从该表可看出, Q_i, W_i, U_i 的相关性较高,而其他参数的相关性偏低。

4.2 最大风速 ≤ 30 m/s

“最大风速 ≤ 30 m/s”时,基于多元线性回归方法分别针对预报第 1~11 天建立了预报订正模型,相应的计算表达式如式(5)所示。

表 1 在预报日数第 1~11 天, $Q_i, D_i, H_i, T_i, W_i, U_i, V_i$ 与 $q\alpha_{\max}$ 实况值之间的相关系数统计结果

Tab. 1 Statistical results of the correlation coefficient between $Q_i, D_i, H_i, T_i, W_i, U_i, V_i$ and $q\alpha_{\max}$ true value within 1~11 forecasting days

预报日数	相关系数						
	Q_i	D_i	H_i	T_i	W_i	U_i	V_i
第 1 天	0.94	0.04	0.07	0.12	0.91	0.78	-0.05
第 2 天	0.92	0.09	0.09	0.15	0.90	0.77	-0.04
第 3 天	0.92	0.07	0.07	0.18	0.90	0.78	-0.06
第 4 天	0.91	0.02	0.02	0.12	0.89	0.78	-0.01
第 5 天	0.89	0.07	0.07	0.13	0.88	0.78	-0.01
第 6 天	0.88	0.08	0.08	0.10	0.87	0.78	-0.02
第 7 天	0.84	0.10	0.10	0.13	0.84	0.72	-0.02
第 8 天	0.78	0.14	0.14	0.14	0.79	0.69	-0.01
第 9 天	0.77	0.09	0.09	0.15	0.77	0.69	-0.04
第 10 天	0.72	0.14	0.14	0.06	0.73	0.65	-0.08
第 11 天	0.63	0.09	0.09	0.10	0.65	0.60	-0.10

$$\begin{cases}
 138.15 + 0.68Q_1 - 0.12D_1 - 0.03H_1 + 5.68T_1 + 14.88W_1 + 0.38U_1 + 2.10V_1 = M_1 \\
 260.19 + 0.94Q_2 + 0.15D_2 + 0.01H_2 - 2.45T_2 + 1.29W_2 + 5.96U_2 + 0.21V_2 = M_2 \\
 18.18 + 0.67Q_3 + 0.43D_3 - 0.02H_3 + 4.48T_3 + 16.92W_3 - 1.07U_3 + 2.96V_3 = M_3 \\
 -151.98 + 0.56Q_4 + 0.33D_4 - 0.06H_4 + 17.09T_4 + 13.55W_4 + 2.64U_4 + 2.76V_4 = M_4 \\
 744.88 + 0.87Q_5 + 0.37D_5 + 0.05H_5 - 16.32T_5 + 0.75W_5 + 9.40U_5 - 0.14V_5 = M_5 \\
 198.94 + 0.56Q_6 + 0.13D_6 - 0.01H_6 + 5.82T_6 + 5.28W_6 + 13.48U_6 - 3.26V_6 = M_6 \\
 491.33 + 0.58Q_7 - 0.27D_7 + 0.04H_7 - 9.75T_7 + 15.97W_7 + 15.30U_7 - 9.70V_7 = M_7 \\
 372.51 + 0.60Q_8 + 0.47D_8 + 0.02H_8 - 5.15T_8 + 12.01W_8 + 13.76U_8 - 10.08V_8 = M_8 \\
 706.84 + 0.41Q_9 + 0.39D_9 + 0.04H_9 - 11.11T_9 + 11.47W_9 + 14.05U_9 - 10.77V_9 = M_9 \\
 1\ 927.21 + 0.41Q_{10} + 0.24D_{10} + 0.20H_{10} - 56.59T_{10} + 16.90W_{10} + 21.76U_{10} - 1.08V_{10} = M_{10} \\
 650.96 + 0.19Q_{11} + 0.47D_{11} + 0.05H_{11} - 14.99T_{11} + 34.05W_{11} + 5.65U_{11} - 9.76V_{11} = M_{11}
 \end{cases} \quad (5)$$

对于检验样本,当“最大风速 ≤ 30 m/s”时,未订正、已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值与 $q\alpha_{\max}$ 实况值之间的统计关系如图 3 所示。从该图可明显看出,在预报日数第 1~11 天,与未订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值相比,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值的偏差绝对值、绝对差、相对误差均较小,相关系数均较大,表明利用模型得到已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度高于未订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值。对于 $q\alpha_{\max}$ 偏差(图 3(a)),随预报日数延长,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值偏差变化较小且均为正值,而未订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值偏差均为负值且其绝对值呈现线性增大特征;在相同预报日数,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值偏差绝对值均明显偏小;在预报日数第 1~11 天,未订正、已订正的平均 $q\alpha_{\max}$ 预报值偏差分别为 -266.93 Pa·rad、 32.70 Pa·rad。未订正、已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值绝对差均随预报日数延长呈现线性增大趋势特征(图 3(b));在各相同预报日数,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值绝对差均明显偏小;在预报日数第 1~11 天,未订正、已订正的平均 $q\alpha_{\max}$ 预报值绝对差分别为 305.36 Pa·rad、 213.60 Pa·rad。类似绝对差,未订正、已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值相对误差均随预报日数延长呈现线性增大趋势(图 3(c));在各相同预报日数,同样表现为已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值相对误差均明显偏小;在预报日数 1~11 天,未订正、已订正的平均 $q\alpha_{\max}$ 预报值相对误差分别为 21.70% 、 17.60% 。未订正、已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值相关系数均随预报日数延长表现为线性减小趋势(图 3(d));在各相同预报日数,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值相关系数均偏大;在预报日数第 1~11 天,未订正、已订正的平均 $q\alpha_{\max}$ 预报值相关系数分别为 0.59 、 0.62 。

由上述分析可知,当“最大风速 ≤ 30 m/s”

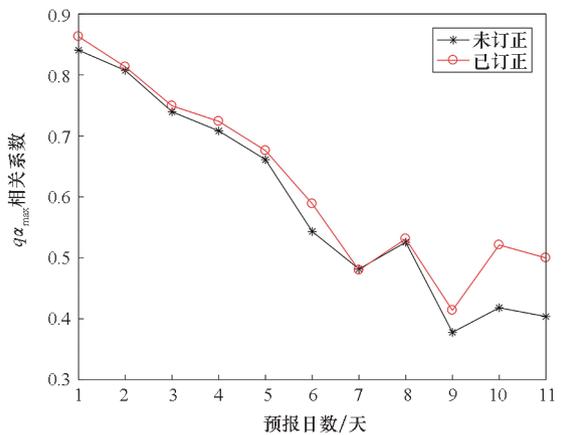
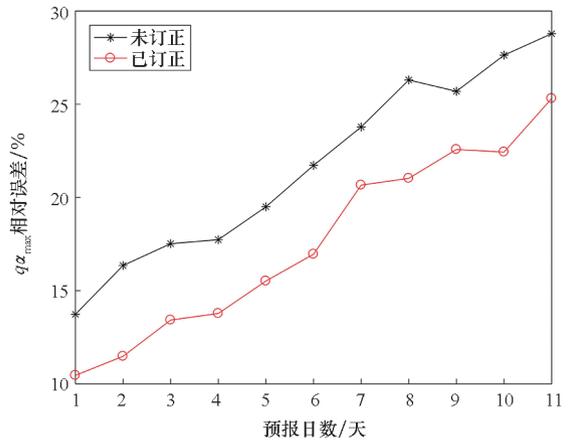
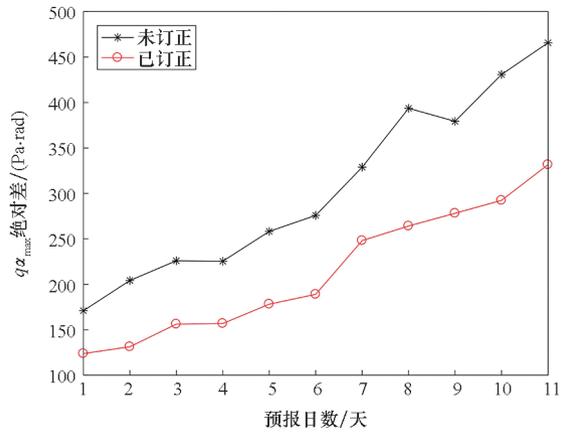
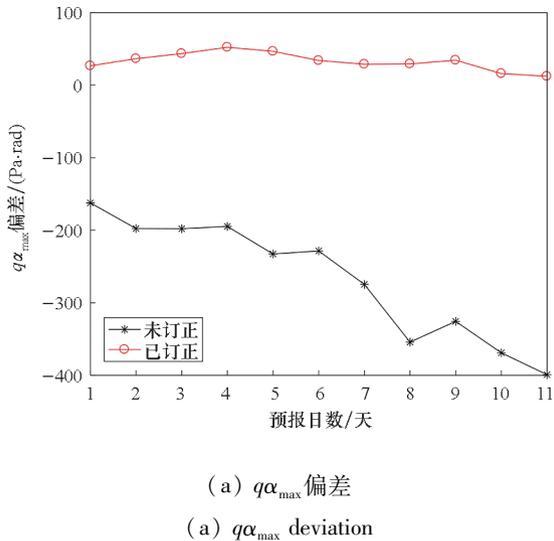


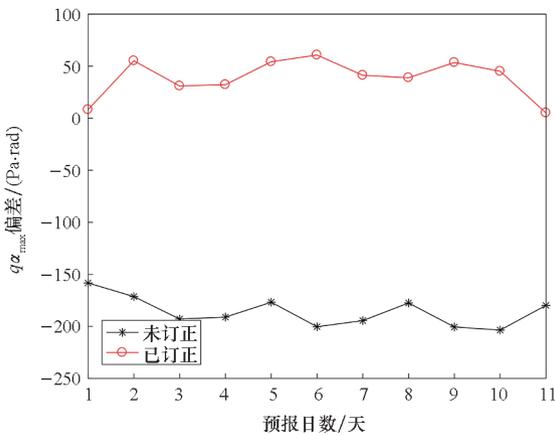
图 3 最大风速 ≤ 30 m/s 时,未订正、已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度随预报日数变化特征

Fig.3 When the maximum wind speed is not more than 30 m/s, the accuracy of the uncorrected and corrected $q\alpha_{\max}$ forecast value varies with the number of forecast days

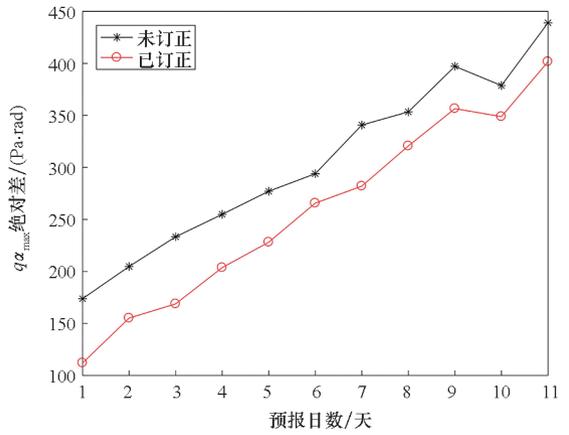
时,与未订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值相比,利用多元线性回归方法建立模型得到已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度更高。

4.3 30 m/s < 最大风速 ≤ 60 m/s

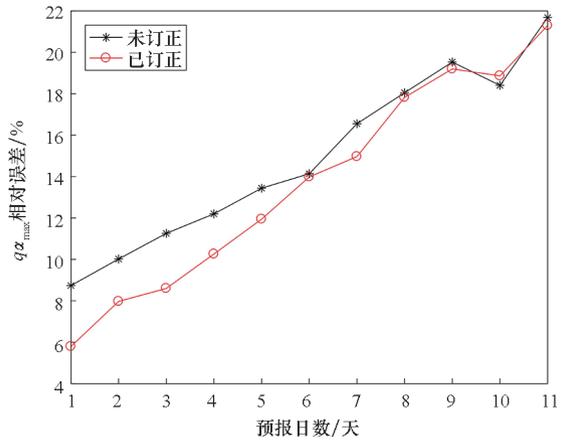
类似“最大风速 ≤ 30 m/s”,当“30 m/s < 最大风速 ≤ 60 m/s”时,基于多元线性回归方法分别针对预报第 1 ~ 11 天建立了预报订正模型(计算表达式略)。对于检验样本,未订正、已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值与 $q\alpha_{\max}$ 实况值之间的统计关系如图 4 所示。在预报日数第 1 ~ 11 天,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度高于未订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值。对于 $q\alpha_{\max}$ 预报值偏差(图 4(a)),未订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值偏差均为负值,而已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值偏差均为正值;在各相同预报日数,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值的偏差绝对值均明显偏小,未订正、已订正的平均 $q\alpha_{\max}$ 预报值偏差分别为 -186.05 Pa · rad、38.66 Pa · rad。未订正、已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值绝对差随预报日数延长均呈现线性增大趋势(图 4(b));在各相同预报日数,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值绝对差均明显偏小,未订正、已订正的平均 $q\alpha_{\max}$ 预报值绝对差分别为 304.27 Pa · rad、258.48 Pa · rad。对于 $q\alpha_{\max}$ 预报值相对误差(图 4(c)),随预报日数延长,未订正、已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值相对误差均呈现线性增大趋势且相互之间差异呈现减小趋势,未订正、已订正的平均 $q\alpha_{\max}$ 预报值相对误差分别为 14.91%、13.70%。除预报日数第 6、7 天外,未订正、已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值相关系数基本相同(图 4(d)),且随预报日数延长,未订正、已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值相关系数数值均呈现减小趋势,未订正、已订正的平均 $q\alpha_{\max}$ 预报值相关系数分别为 0.707、0.705。



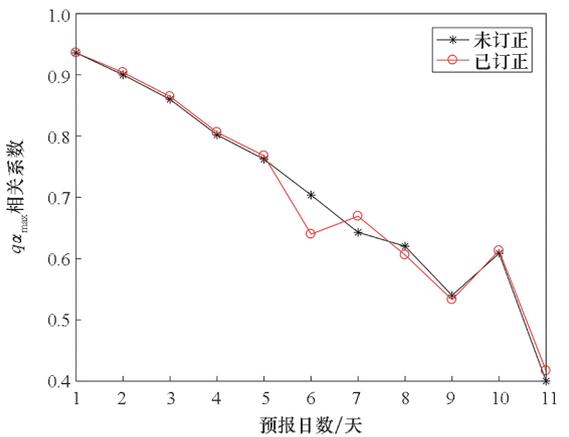
(a) $q\alpha_{\max}$ 偏差
(a) $q\alpha_{\max}$ deviation



(b) $q\alpha_{\max}$ 绝对差
(b) $q\alpha_{\max}$ absolute difference



(c) $q\alpha_{\max}$ 相对误差
(c) $q\alpha_{\max}$ relative error



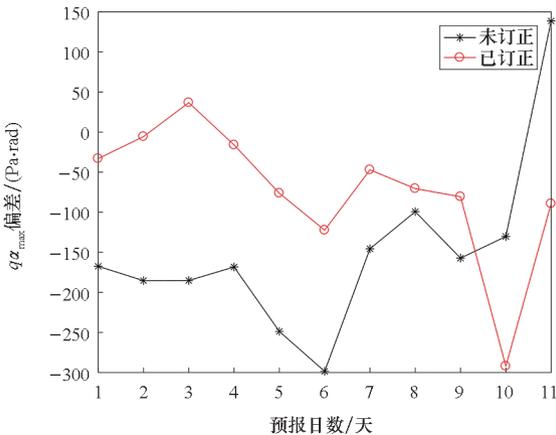
(d) $q\alpha_{\max}$ 相关系数
(d) $q\alpha_{\max}$ correlation coefficient

图 4 30 m/s < 最大风速 ≤ 60 m/s 时,未订正、已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度随预报日数变化特征
Fig.4 When 30 m/s < maximum wind speed ≤ 60 m/s, the accuracy of the uncorrected and corrected $q\alpha_{\max}$ forecast value varies with the number of forecast days

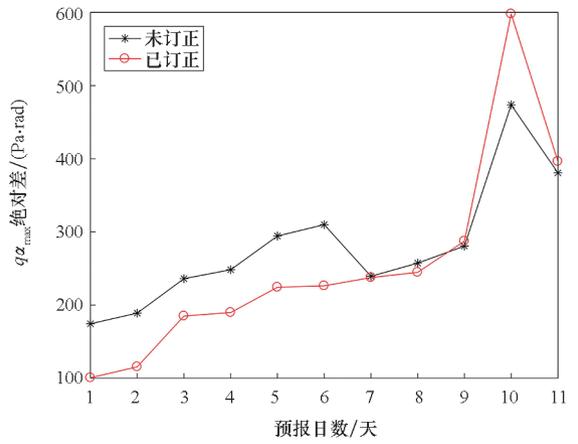
4.4 最大风速 > 60 m/s

类似“最大风速 ≤ 30 m/s”，当“最大风速 > 60 m/s”时，基于多元线性回归方法分别针对预报第 1~11 天建立了预报订正模型（计算表达式略）。对于检验样本，未订正、已订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值与 $q\alpha_{max}$ 实况值之间的统计关系如图 5 所示，与“最大风速 ≤ 30 m/s”“30 m/s < 最大风速 ≤ 60 m/s”时存在较大差异。未订正、已订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值偏差均以负值为主（图 5(a)），已订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值的偏差绝对值在预报日数第 1~9、11 天偏小；在预报日数第 1~11 天，未订正、已订正的平均 $q\alpha_{max}$ 预报值偏差分别为 -149.74 Pa·rad、-72.36 Pa·rad。未订正、已订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值绝对差随预报日数延长呈现增大趋势（图 5(b)），已订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值绝对差在预报日数第 1~8 天偏小，在第 9~11 天偏大，未订正、已订正的平均 $q\alpha_{max}$ 预报值绝对差分别为 280.33 Pa·rad、255.04 Pa·rad。类似绝对差，未订正、已订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值相对误差同样随预报日数延长呈现增大趋势（图 5(c)），已订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值相对误差在预报日数第 1~8 天和第 11 天偏小，在第 9~10 天偏大，未订正、已订正的平均 $q\alpha_{max}$ 预报值相对误差分别为 9.65%、8.76%。对于 $q\alpha_{max}$ 预报值相关系数（图 5(d)），未订正、已订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值相关系数随预报日数延长呈现减小趋势；相对未订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值相关系数，已订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值相关系数数值偏小；未订正、已订正的平均 $q\alpha_{max}$ 预报值相关系数分别为 0.55、0.49。

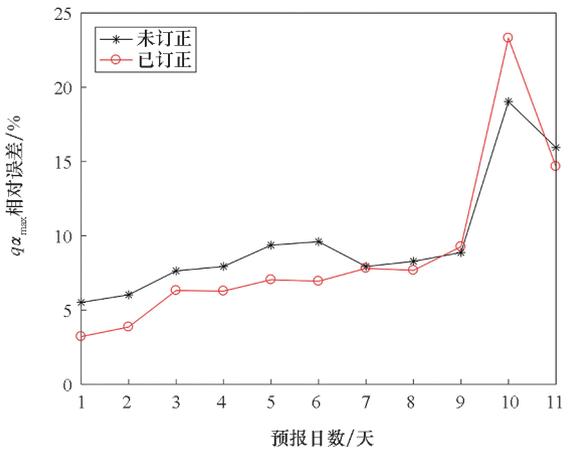
由上述分析可知，当“最大风速 > 60 m/s”时，与未订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值相比，利用多元线性回归方法建立模型得到已订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值，在预报日数第 1~6 天的精度更高。通过对图 3~5 进



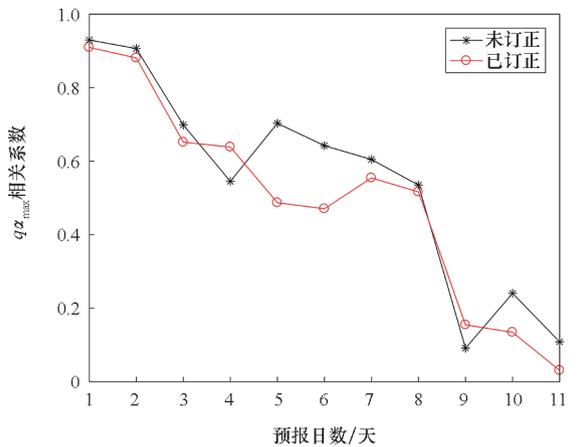
(a) $q\alpha_{max}$ 偏差
(a) $q\alpha_{max}$ deviation



(b) $q\alpha_{max}$ 绝对差
(b) $q\alpha_{max}$ absolute difference



(c) $q\alpha_{max}$ 相对误差
(c) $q\alpha_{max}$ relative error



(d) $q\alpha_{max}$ 相关系数
(d) $q\alpha_{max}$ correlation coefficient

图 5 最大风速 > 60 m/s 时，未订正、已订正的 $q\alpha_{max}$ 预报值精度随预报日数变化特征
Fig. 5 When the maximum wind speed is greater than 60 m/s, the accuracy of the uncorrected and corrected $q\alpha_{max}$ forecast value varies with the number of forecast days

行对比可知,随最大风速的增大,基于该模型得到已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度的提高水平会降低。

在预报日数第 1~11 天,不同最大风速情况下,与未订正的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差相比,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差偏小的样本数百分比分布特征存在差异(见表 2)。其中,“最大风速 ≤ 30 m/s”对应的样本数百分比最小值超过 60%,值范围为 62.50%~70.37%,随预报日数延长的变化较小,表明在该预报风强度下,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值明显更接近实况。“30 m/s < 最大风速 ≤ 60 m/s”对应的样本数百分比在预报日数第 1~4 天均超过 60%,但在预报日数第 5~11 天均小于 60%,值范围为 52.86%~70.71%,结合图 4,可知在此预报风强度下,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值更接近实况;与预报日数第 5~11 天相比,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度在预报日数第 1~4 天的提高程度更大。“最大风速 > 60 m/s”对应的样本数百分比在预报日数第 1~6 天均超过 60%,从预报第 7 天开始明显降低,在预报日数第 7~11 天均小于 50%,值范围为 33.33%~77.78%,随预报日数延长呈现明显的降低趋势特征,结合图 5,表明已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度在预报日数第 1~6 天存在明显提高,但在预报日数第 7~11 天不如未订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度。

表 2 已订正的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差偏小的
样本数百分比特征

Tab. 2 Percentage characteristic of the smaller corrected
 $q\alpha_{\max}$ absolute difference

预报日数	$q\alpha_{\max}$ 绝对差偏小的样本数百分比		
	最大风速 ≤ 30 m/s	30 m/s < 最大风速 ≤ 60 m/s	最大风速 > 60 m/s
第 1 天	67.65	70.71	77.78
第 2 天	70.37	61.44	68.18
第 3 天	64.22	65.81	65.22
第 4 天	63.06	62.23	65.22
第 5 天	65.79	58.62	71.43
第 6 天	67.26	56.84	75.00
第 7 天	65.18	59.07	44.44
第 8 天	67.48	57.78	44.44
第 9 天	62.50	54.59	47.06
第 10 天	66.38	54.51	33.33
第 11 天	64.96	52.86	42.86

5 结论

目前,针对预报风强度对运载火箭 $q\alpha_{\max}$ 精度分析的相关研究偏少。本文以 2017 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日某地区实况风为基准,对“最大风速 ≤ 30 m/s”“30 m/s < 最大风速 ≤ 60 m/s”“最大风速 > 60 m/s”的预报风及其 $q\alpha_{\max}$ 预报值的精度特征进行分析,并利用多元线性回归方法建立了订正模型,对未订正、已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度特征进行了对比,得到主要结论如下:

1) 不同预报风强度的精度随预报日数延长均呈现明显降低特征,且预报风精度与预报风强度有关;在预报日数 11 天内,随着预报风强度增大,偏差均为负值且偏差绝对值减小、绝对差变化较小、相对误差减小、相关系数增大,综合判断,风速预报精度随最大风速的增大而提高。

2) 不同预报风强度对应的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度随预报日数延长均呈现明显降低特征,且 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度同样与预报风强度有关;在预报日数 11 天内,随着预报风强度增大, $q\alpha_{\max}$ 预报值偏差均为负值且偏差绝对值减小、绝对差和相关系数变化较小、相对误差明显减小,综合判断, $q\alpha_{\max}$ 预报值精度随最大风速的增大而提高。

3) 利用多元线性回归方法建立订正模型,可以较好地提高 $q\alpha_{\max}$ 预报值的精度;已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报精度的提升能力同样与预报风强度有关,在预报日数 11 天内,随着预报风强度增大,表现为已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度的提升能力会降低。

4) 与未订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度相比,在预报日数 1~11 天,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度提升能力与预报风强度有关。其中,已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度提升能力,在“最大风速 ≤ 30 m/s”时较大且随预报日数延长的变化较小;在“30 m/s < 最大风速 ≤ 60 m/s”时较大但随预报日数延长表现为降低趋势;在“最大风速 > 60 m/s”的预报日数第 1~6 天较大,但在预报日数第 7~11 天低于未订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度。

通过本文研究发现,预报风及其 $q\alpha_{\max}$ 预报值的精度,不仅与预报日数有关,还与预报风强度有关, $q\alpha_{\max}$ 预报值精度随预报风强度增大而提高。结合程胡华等^[21]研究成果可知,综合考虑预报风偏差和预报风低垂直分辨率产生的影响时, $q\alpha_{\max}$ 预报值精度出现进一步较明显降低,即预报风低垂直分辨率同样对 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度具有重大影响,是需重点考虑的因素之一。最后,提出了提高

$q\alpha_{\max}$ 预报值精度的订正方法,虽然利用多元线性回归方法建立模型,得到已订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值更接近实况,但这是统计结果,并不能确保每次订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值均比未订正的 $q\alpha_{\max}$ 预报值更接近实况;只有提高预报风垂直分辨率(避免漏掉大风区)及各层预报风精度,才是彻底提高 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度的最好手段。但由于天气的复杂性,数值天气预报模式预报风水平的提高一直比较缓慢,因此,在利用目前最先进的数值天气预报模式预报风前提下,分别对不同预报风强度的 $q\alpha_{\max}$ 预报值进行建模订正,是目前提高 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度的一种有效方法。

参考文献 (References)

- [1] 姜人伟, 曾耀祥, 潘忠文, 等. 运载火箭随机振动环境试验条件的变带宽设计方法[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(6): 1-5.
JIANG R W, ZENG Y X, PAN Z W, et al. Variable-bandwidth design method of the random vibration environmental test condition for launch vehicle[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2022, 44(6): 1-5. (in Chinese)
- [2] 姚铁智, 孙明波, 黄玉辉, 等. 火箭出口面积对 RBCC 发动机引射模态影响规律分析[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(2): 155-163.
YAO Y Z, SUN M B, HUANG Y H, et al. Analysis of the influence of rocket exit area in RBCC engine under the ejector mode [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(2): 155-163. (in Chinese)
- [3] 程玉强, 邓凌志. Wasserstein 距离在液体火箭发动机故障检测中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(4): 20-27.
CHENG Y Q, DENG L Z. Application of Wasserstein distance in fault detection for liquid-propellant rocket engines[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(4): 20-27. (in Chinese)
- [4] 王志祥, 欧阳兴, 王斌, 等. 基于序列径向基函数的运载火箭蒙皮桁条结构轻质优化[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(1): 57-65.
WANG Z X, OUYANG X, WANG B, et al. Lightweight optimization of skinned purlin structure in launch vehicle based on sequential radial basis function [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(1): 57-65. (in Chinese)
- [5] 王建国, 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): 139-143.
WANG J M, LIN N, ZHANG B R. Analysis on flight wind-load for large cryogenic rocket [J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(5): 139-143. (in Chinese)
- [6] 赵人濂, 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 R L, CHEN Z G, FU W X. Wind shear and rocket design[J]. Journal of Astronautics, 1998, 19(2): 105-108. (in Chinese)
- [7] 董欣心, 刘莉, 葛佳昊, 等. 捆绑火箭气动载荷分布不确定性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(3): 464-472.
DONG X X, LIU L, GE J H, et al. Uncertainty analysis of aerodynamic load distribution on strap-on launch vehicle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(3): 464-472. (in Chinese)
- [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, 21(6): 7-9, 14.
LI X M, XU B C, CHEN C Y. An engineering method on the control of decreasing load for a launch vehicle[J]. Aerospace Shanghai, 2004, 21(6): 7-9, 14. (in Chinese)
- [9] 蒋国庆, 李道奎. 基于 Davenport 风速谱的火箭及其发射平台风致响应分析[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(5): 104-109.
JIANG G Q, LI D K. Wind-induced responses of a rocket and its launching platform based on Davenport wind speed spectrum [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(5): 104-109. (in Chinese)
- [10] 宋征宇. 运载火箭飞行减载控制技术[J]. 航天控制, 2013, 31(5): 3-7, 18.
SONG Z Y. Load control technology in launch vehicle[J]. Aerospace Control, 2013, 31(5): 3-7, 18. (in Chinese)
- [11] 程胡华, 武帅, 姜祝辉, 等. 运载火箭发射过程中的最大气动载荷预测方法研究[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2023: 1-13 [2023-09-01]. <https://bhxb.buaa.edu.cn/bhzk/cn/article/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2023-0237>. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023-0237.
- [12] CHENG H H, WU S, JIANG Z H, et al. Research on maximum aerodynamic load prediction method during launch vehicle launch [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023: 1-13 [2023-09-01]. <https://bhxb.buaa.edu.cn/bhzk/cn/article/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2023-0237>. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023-0237. (in Chinese)
- [13] 杨伟奇, 许志, 唐硕, 等. 基于自抗扰的运载火箭主动减载控制技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(1): 130-138.
YANG W Q, XU Z, TANG S, et al. Active disturbance rejection control method on load relief system for launch vehicles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(1): 130-138. (in Chinese)
- [14] 程胡华, 王益柏, 蔡其发, 等. 大气密度对运载火箭飞行中的 $q\alpha_{\max}$ 精度影响及建模分析[J]. 宇航学报, 2021, 42(3): 378-389.
CHENG H H, WANG Y B, CAI Q F, 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. (in Chinese)
- [15] HOUTEKAMER P L, LEFAIVRE L, DEROME J, et al. A system simulation approach to ensemble prediction [J]. Monthly Weather Review, 1996, 124(6): 1225-1242.
- [16] LORENZ E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model[J]. Tellus, 1965, 17(3): 321-333.
- [17] LORENZ E N. Atmospheric predictability experiments with a large numerical model [J]. Tellus, 1982, 34(6): 505-513.
- [18] 许雯, 余贞寿, 邱金晶, 等. 超强台风“利奇马”登陆前后多模式降水预报评估对比分析[J]. 气象科学, 2020, 40(3): 303-314.
- [19] XU L, YU Z S, QIU J J, et al. Comparative analysis of

- multi-model precipitation forecast and evaluation before and after the landfall of typhoon “Lekima” [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2020, 40 (3): 303 - 314. (in Chinese)
- [18] 王丹, 戴昌明, 姜盼星, 等. 陕西 ECMWF、GRAPES_Meso 和 SCMOG 气温预报的对比检验及订正[J]. *干旱气象*, 2021, 39(4): 697 - 708.
- WANG D, DAI C M, LOU P X, et al. Comparison study on test and correction of temperature forecasts of ECMWF, GRAPES_Meso and SCMOG in Shanxi [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2021, 39(4): 697 - 708. (in Chinese)
- [19] 荀学义, 孟雪峰, 王学强, 等. T639 和 EC 模式对内蒙古主要天气系统的预报性能检验[J]. *气象科技*, 2014, 42(5): 832 - 838.
- XUN X Y, MENG X F, WANG X Q, et al. Verification and assessment of forecasting performance of general circulation systems in Inner Mongolia by T639 and EC model products [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2014, 42(5): 832 - 838. (in Chinese)
- [20] 尹姗, 任宏昌. 2017 年 9—11 月 T639、ECMWF 及日本模式中后期预报性能检验[J]. *气象*, 2018, 44(2): 326 - 333.
- YIN S, REN H C. Performance verification of medium-range forecasting by T639, ECMWF and Japan models from September to November 2017 [J]. *Meteorological Monthly*, 2018, 44(2): 326 - 333. (in Chinese)
- [21] 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[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(10): 2034 - 2042.
- CHENG H H, LI J, XIAO Y Q, et al. Influence of wind deviation on rocket maximum aerodynamic load accuracy [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(10): 2034 - 2042. (in Chinese)

(编辑: 熊立桃, 杨琴)