

北京航空航天大学学报
Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics
ISSN 1001-5965,CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目：高空预报风订正前后的火箭最大气动载荷精度特征
作者：程胡华
DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0437
收稿日期：2026-06-28
网络首发日期：2026-11-16
引用格式：程胡华．高空预报风订正前后的火箭最大气动载荷精度特征[J/OL]．北京航空航天大学学报. https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0437



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

高空预报风订正前后的火箭最大气动载荷精度特征

程胡华✉

（太原卫星发射中心，太原 030031）

*通信作者 E-mail： 397849854@qq.com

摘要 针对高空预报风进行建模订正，并对已订正高空预报风的火箭最大气动载荷精度特征研究偏少。以探空气球高空风及其火箭最大气动载荷为基准，对未订正高空预报风、已订正高空预报风及其火箭最大气动载荷的精度特征进行了对比分析，结果表明，与未订正高空预报风相比，（1）支持向量机建模得到已订正高空预报风精度，在各预报天数偏高，平均相对误差由 64.45%减小到 27.68%，平均相关系数由 0.9149 增大到 0.9267。（2）已订正高空预报风的火箭最大气动载荷精度，在各预报天数均偏高，平均相对误差由 15.04%减小到 13.74%，平均相关系数由 0.8144 增大到 0.8163。（3）已订正高空预报风的最大气动载荷绝对差在[0,100) Pa·rad 内样本数占有率更高、在[400,+∞) Pa·rad 区间内更低。（4）实例应用在 10:37、14:37 的最大气动载荷偏差绝对值分别由 196.09 Pa·rad、134.28 Pa·rad 减小到 39.81 Pa·rad、47.34 Pa·rad。因此，利用已订正高空预报风的火箭最大气动载荷，可以进一步提高火箭飞行安全保障能力。

关键词 已订正高空预报风；火箭最大气动载荷；支持向量机建模；精度特征；飞行安全

中图分类号 V411.8 文献标识码：A DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0437

Characteristics of rocket maximum aerodynamic load accuracy between uncorrected and corrected upper forecast winds

Cheng Huhua✉

(Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030031, China)

*E-mail: 397849854@qq.com

Abstract There has been little research on modeling and correcting upper forecast winds, and on the accuracy characteristics of the maximum aerodynamic load of rockets using corrected upper forecast winds. Based on the upper winds of the sounding balloon and its' the maximum aerodynamic load, A comparative analysis was conducted on the accuracy characteristics of uncorrected upper forecast winds, corrected upper forecast winds, and their maximum aerodynamic loads on rockets. The results indicate that, compared with uncorrected upper forecast winds, (1) The support vector machine modeling achieved the corrected accuracy of upper forecast winds, which tends to be higher for all forecast days, the average relative error is reduced from 64.45% to 27.68%, and the average correlation coefficient increases from 0.9149 to 0.9267. (2) The maximum aerodynamic load accuracy of the corrected upper forecast winds is higher for all forecast days, with the average relative error reduced from 15.04% to 13.74%, and the average correlation coefficient increased from 0.8144 to 0.8163. (3) The absolute difference in maximum aerodynamic load of the corrected upper forecast wind has a higher sample proportion within the [0,100) Pa·rad range and a lower sample proportion within the [400, ∞) Pa·rad range. (4) In practical applications, the absolute values of the maximum aerodynamic load deviations at 10:37 and 14:37 are reduced from 196.09 Pa·rad and 134.28 Pa·rad to 39.81 Pa·rad and 47.34 Pa·rad, respectively. Therefore, by using the rocket's maximum aerodynamic load from the corrected upper forecast winds, the flight safety assurance capability of the rocket can be further improved.

Key words corrected upper forecast winds; maximum aerodynamic load of the rocket; support vector machine modeling; accuracy characteristics; flight safety

收稿日期：2026-06-28

网络首发时间： 2026-11-16 10:57:33 网络首发地址： https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20261116.0958.001

高空风是影响运载火箭能否按计划实施发射的重要因素之一，在火箭发射前几天，需提前利用数值天气预报模式的高空预报风，计算得到发射零日的火箭最大气动载荷（记为“$q\alpha_{\max}$”，下同）预报值，若该预报值超过了火箭能够承受的最大阈值，从飞行安全考虑，一般会推迟发射。因此，为提高火箭飞行安全的保障能力，研究者对火箭最大气动载荷特征开展了一系列研究[1-7]，并取得了有意义的成果。

已有研究表明[2,4,6]，数值天气预报模式提供的高空预报风，与探空气球探测得到的高空实况风之间存在误差，该误差特征导致得到的火箭最大气动载荷预报值也存在误差，且误差随预报天数延长而变大。目前，针对数值天气预报模式提供的降水预报、2 m 气温预报、地面风预报等产品，因与人们日常生活、生产等活动紧密相关，科研工作者提出了多种方法对降水预报[8-10]、2 m 气温预报[11-12]、地面风速预报[13-14]等开展了订正研究，进一步提高了它们的预报精度，如高星星等[9]利用改进后的卡尔曼动态频率匹配法，明显提高了欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF）预报模式各量级降水的威胁评分（Threat Score，TS），尤其是暴雨 TS 评分提高了 2.79%；刘旭等[14]基于注意力机制与加权趋势损失的风速订正方法，使订正后 10 m 风速的均方根误差降低 20%～50%，在风速超过 5 m s^{-1} 时表现最佳。目前，数据天气预报模式的高空预报风误差有时可能较大，此时对火箭 $q\alpha_{\max}$ 预报精度、火箭回收落点位置精度具有较明显影响；由于火箭发射前几天，需提前掌握发射零日窗口时段内的高空预报风特征，因此，航天发射各单位高度关注预报时效较长的高空预报风精度特征，并期望能进一步提高高空预报风精度。

近年来，虽然国内外对高空风和火箭 $q\alpha_{\max}$ 的改进开展了相关研究[15-21]，但结合本地探空气球高空实况风资料和机器学习算法，针对预报时效超过 6 h 以上的本地高空预报风进行建模订正，并分析高空预报风订正前后的火箭 $q\alpha_{\max}$ 精度特征，相关研究少。为进一步提高火箭发射前的高空预报风保障能力，本文利用高空实况风历史资料和支持向量机（Support Vector Machine，SVM）回归算法，针对高空预报风进行建模订正，减小数值天气预报模式高空预报风的预报误差，从而得到精度更高的已订正高空预报风数据，并以某型运载火箭为例，对未订正高空预报风、已订正高空预报风的火箭最大气动载荷精度特征进行对比分析，为后续提高火箭的高空预报风保障能力和降低决策风险提供支撑。

1 资料与方法简介

1.1 资料

使用的原始资料有以下 2 种：

（1）高空实况风资料，该资料来自探空气球探测得到，含有高度、高空风速、高空风向等气象要素，垂直方向的分辨率为 0.2 km，每日 1 次（08:00，北京时），若有航天发射活动，则会在火箭发射前 10 h 内进行多次放球探测，获取多组高时空分辨率的高空实况风资料；高空实况风资料集全部存储在单位内网数据库中，利用操作数据库的常用命令，可获取所需高空实况风资料。

（2）未订正高空预报风资料，该资料来自数值天气预报模式，预报时效为 240 h（h 为“小时”的国际单位符号，下同），在预报时效 0～72 h 内、72～240 h 的时间分辨率分别为 3 h、6 h，每日 08:00 起报的数值天气预报模式高空预报风资料，其预报时效内含有 11 个时次的 08:00 预报产品，其中，第 1 个时次的 08:00 预报产品为预报时效 1 d（d 为“天”的国际单位符号，下同），依次类推至预报时效 11 d，垂直方向在 1000～10 hPa 高度范围内有 18 层，水平方向的分辨率为 0.25°×0.25°。数值天气预报模式资料为国家气象局卫星广播系统（China Meteorological Administration Broadcast，CMAcast）下发，气象室接收到该资料后进行解码读取，利用双线性插值方法，获取航天发射场区站点的未订正高空预报风资料。目前，航天发射场区站点的未订正高空预报风资料全部存储在单位内网数据库中，利用操作数据库的常用命令，可获取所需的未订正高空预报风资料。

两种资料的时间范围均为 2021.4—2023.12，在对未订正高空预报风进行 SVM 回归算法建模订正时，以高空实况风、未订正高空预报风的前 85%为训练样本、后 15%为测试样本。

1.2 计算方法

（1）高空实况风为高空风速、风向，而未订正高空预报风为高空纬向风速和经向风速，为后续建模方便，将高空实况风的高空风速、风向，分解为高空纬向风速和经向风速。

（2）未订正高空预报风为水平分辨率 0.25°×0.25° 的数据，高空实况风为固定站点数据，因此，需将未订正高空预报风的纬向风速、经向风速插值到高空实况风所在站点位置。

（3）在垂直方向上，未订正高空预报风是高度 1000～10 hPa 内有 18 层，高空实况风是高度 0～20 km 内垂直间隔为 0.2 km，因此，需将未订正高空预报风插值到高空实况风的高度层。

（4）未订正高空预报风的预报精度与预报时效、高度等密切相关[2,4]，因此，利用 SVM 回归算法对不同高度（共 101 层）、不同预报时效（共 11 天）的未订正高空预报风分别进行建模订正，共有 1111 组模型。在模型训练时，各高度层的高度值、未订正纬向预报风、未订正经向预报风、未订正高空预报风为输入，相应高度层的高空实况风作为输出，并保存训练好的模型参数；在模型测试时，利用训练好的模型参数，及各高度层的高度值、未订正纬向预报风、未订正经向预报风、未订正高空预报风，得到相应高度层的已订正高空预报风。目前，SVM 回归算法已广泛应用多种行业[22-23]，取得良好效果。

在业界，SVM 算法不是新方法、高空预报风订正也不是新问题，但利用 SVM 方法对高空预报风建立订正模型，在模型中引入高度值、预报时效作为特征量，并对预报时效为 1～11 d（超过 6 h）的高空预报风建立订正模型，是论文提出一种有效提高高空预报风精度的新研究方法，从已公开的研究成果来分析，尚未见到相似研究。

计算火箭气动载荷的 $q\alpha$ 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。通过获取整层大气高空风内的最大气动载荷（即 $q\alpha_{\max}$），若 $q\alpha_{\max}$ 值超过火箭设计阈值，一般会考虑推迟发射，关于 $q\alpha$ 的推导过程，请参见文献[24]。

利用偏差、绝对差、相关系数、相对误差、绝对差占有率对未订正高空预报风、已订正高空预报风及其 $q\alpha_{\max}$ 值的精度进行分析，相应的计算公式见文献[4]。偏差反映了预报总体是偏大或偏小特征，绝对差和相对误差越小，表明预报越接近实况值，即预报精度越高，相关系数越大，表明预报与实况之间的变化趋势一致性越好，因此，绝对差和相对误差越小、相关系数越大，表明预报精度越高。绝对差占有率为绝对差在某区间范围内样本数占总样本数的百分比，其值在小值区间内越高，表明预报接近实况的样本数越多，在大值区间内越低，即预报远离实况的样本数越少，因此，绝对差占有率在小值区间内越高、在大值区间内越低，同样可认为其精度越高。

为进一步对不同预报时效未订正、已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 精度进行对比分析，利用不同预报时效的已订正高空预报风 $q\alpha_{\max}$ 绝对差（记为“$A^{\text{已订正}}$”）减去未订正高空预报风 $q\alpha_{\max}$ 绝对差（记为“$A^{\text{未订正}}$”），得到差值样本总数，分析差值小于 0 时的样本数，占样本总数的占有率 O 特征，$A^{\text{未订正}}$、$A^{\text{已订正}}$、O 的计算表达式如下：

$$A^{\text{未订正}} = \left| q\alpha_{\max}^{\text{未订正}} - q\alpha_{\max}^{\text{实况}} \right| \tag{1}$$

$$A^{\text{已订正}} = \left| q\alpha_{\max}^{\text{已订正}} - q\alpha_{\max}^{\text{实况}} \right| \tag{2}$$

$$O = 100 \times \left[\sum_{i=1}^{n} \left(A_i^{\text{已订正}} - A_i^{\text{未订正}} \right) \right] \Big/ n \tag{3}$$

式中 $q\alpha_{\max}^{\text{未订正}}$、$q\alpha_{\max}^{\text{已订正}}$、$q\alpha_{\max}^{\text{实况}}$ 分别为未订正高空预报风、已订正高空预报风及高空实况风的 $q\alpha_{\max}$，n 为总样本数，$i = 0,1,...,n$，$A_i^{\text{已订正}}$ 为第 i 个样本的已订正高空预报风 $q\alpha_{\max}$ 绝对差，$A_i^{\text{未订正}}$ 为第 i 个样本的未订正高空预报风 $q\alpha_{\max}$ 绝对差，若 $A_i^{\text{已订正}} - A_i^{\text{未订正}}$ 小于 0，则定义其值为 1，否则为 0。O 反映了已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差，小于未订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差的样本数占有率，

若该值超过 50%，表明与未订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差相比，超过 50%样本数的已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差更小，可认为精度更高，反之认为精度更低。

1.3 SVM 回归算法的基本公式和流程

给定训练样本集 $D=\{(x_i,y_i),i=1,2,...,n\}$，其中，$x_i$、$y_i$ 分别为第 i 个样本的输入特征向量（即高度值、未订正纬向预报风、未订正经向预报风、未订正高空预报风等）和对应的输出目标值（相应高度层的高空实况风）。SVM 回归算法旨在寻找如下形式的回归函数：

$$f(x)=w^T\varphi(x)+b \tag{4}$$

上式中，x 为输入特征向量，$\varphi(x)$ 为将输入空间映射到高维特征空间的非线性映射函数；w 为权重向量；b 为偏置项。SVM 回归算法引入 ε-不敏感损失参数，允许预测值 $f(x)$ 与真实值 y 之间的绝对偏差不超过阈值 ε 时，损失记为 0；仅当偏差超过 ε 时才计算损失，其公式如下：

$$L_\varepsilon\left(f(x_i),y_i\right)=\max\left(0,\left|y_i-f(x_i)\right|-\varepsilon\right) \tag{5}$$

在上式中，x_i、y_i 分别为第 i 个样本的输入特征向量和真实值。

为保证回归函数的平坦性，并对超出 ε 管道的样本进行惩罚（避免噪声或异常值导致模型过拟合），引入松弛变量 ξ_i 和 ξ_i^*（分别对应上界和下界的超出量），构造如下凸二次规划优化目标：

$$\min_{w,b,\xi,\xi^*}\ \frac{1}{2}\|w\|^2+C\sum_{i=1}^{n}\left(\xi_i+\xi_i^*\right) \tag{6}$$

其约束条件为：

$$\begin{cases} y_i-\left(w^T\varphi(x_i)+b\right)\le\varepsilon+\xi_i \\ \left(w^T\varphi(x_i)+b\right)-y_i\le\varepsilon+\xi_i^* \\ \xi_i\ge 0,\ \xi_i^*\ge 0,\ i=1,2,...,n \end{cases} \tag{7}$$

式中的 $\frac{1}{2}\|w\|^2$ 为正则化项，用于控制模型复杂度，保证回归函数尽可能平坦，提升泛化能力；$C>0$ 为惩罚系数，用于权衡模型复杂度与训练误差；ε 为不敏感损失参数，控制回归函数的误差容忍带宽，n 为训练样本总数。

通过引入拉格朗日乘子 a_i、a_i^*，将原始问题转化为对偶问题求解，可以引入核函数避免高维映射的显式计算，最终得到对偶形式的优化目标：

$$\begin{aligned}\max_{a_i,a_i^*}\ &\sum_{i=1}^{n}y_i\left(a_i^*-a_i\right)-\varepsilon\sum_{i=1}^{n}\left(a_i^*+a_i\right)- \\ &\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(a_i^*-a_i\right)\left(a_j^*-a_j\right)K\left(x_i,x_j\right)\end{aligned} \tag{8}$$

其约束条件为：

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{n}\left(a_i^*-a_i\right)=0 \\ 0\le a_i\le C,0\le a_i^*\le C,\quad i=1,2,...,n\end{cases} \tag{9}$$

上式中，a_i、a_i^* 为拉格朗日乘子，$K\left(x_i,x_j\right)=\varphi\left(x_i\right)^T\varphi\left(x_j\right)$ 为核函数，综合考虑高空风场变化的非线性特征及模型泛化能力，本文选用径向基核函数（Radial Basis Function，RBF），即：

$$K\left(x_i,x_j\right)=\exp\left(-\gamma\left\|x_i-x_j\right\|^2\right) \tag{10}$$

其中，$\gamma>0$ 为核函数参数，控制核函数的作用宽度。

求解得到最优拉格朗日乘子后，最终得到 SVM 回归算法的预测函数可写为：

$$f(x)=\sum_{i=1}^{n}\left(a_i^*-a_i\right)K(x_i,x)+b \tag{11}$$

其中，仅 $a_i^*-a_i\neq 0$ 对应的样本为支持向量，模型预测仅由这些支持向量决定，这也是 SVM 回归算法具有稀疏性的原因。

本文中的 SVM 回归算法流程如下：

步骤 1：数据集划分与归一化。按高度层和预报时效分组，将每组数据按比例划分为训练集和测试集，对输入特征进行[0,1]区间归一化处理以消除量纲影响。

步骤 2：超参数优化。采用 5 折交叉验证结合网格搜索方法，对 SVM 回归模型的惩罚系数 C、核函数参数 γ 和不敏感损失参数 ε 进行寻优，选取验证集均方根误差最小时的参数组合。

步骤 3：模型训练。在训练集上求解对偶优化问题，计算拉格朗日乘子并确定支持向量，求得偏置项 b，保存训练好的模型参数；

步骤 4：高空预报风订正。在测试集上，利用训练好的模型参数，及各高度层的高度值、未订正纬向预报风、未订正经向预报风、未订正高空预报风，输出相应高度层的已订正纬向风和已订正经向风，对订正结果进行反归一化，得到所需的已订正高空预报风。

2　高空预报风精度特征

在整个高度范围内，未订正、已订正高空预报风与高空实况风之间差异特征随预报时效变化见图 1，相应的数理统计结果见表 1。从图 1 可看出，未订正、已订正高空预报风速精度均随预报时效延长而降低；其中，未订正、已订正高空预报风的风速偏差随预报时效延长呈现增大变化趋势、且在各预报时效均为负值(图 1(a))，在预报时效 1～5 d，已订正高空预报风的风速偏差绝对值更小，但在预报时效 6～11 d，未订正高空预报风的风速偏差绝对值更小。在预报时效 1～11 d，随预报时效延长，未订正、已订正高空预报风的风速绝对差、风速相对误差均表现为准线性增大趋势(图 1(b)、1(c))，风速相关系数为准线性减小变化趋势(图 1(d))，与未订正高空预报风相比，已订正高空预报风的风速绝对差和风速相对误差均更小、风速相关系数均更大。从表 1 可看出，与未订正高空预报风相比，已订正高空预报风的风速绝对差、风速相对误差范围的上界值及下界值均偏小，相关系数范围的上界值及下界值均偏大；已订正高空预报风的平均风速绝对差、平均风速相对误差均更小，平均相关系数更大，即表 1 中的数理统计结果，进一步表明已订正高空预报风精度高于未订正高空预报风。

结合图 1、表 1 和上述分析结果，综合判断可知，未订正、已订正高空预报风速精度均随预报时效延长而降低，且已订正高空预报风的风速精度在各预报时效均高于未订正高空预报风。

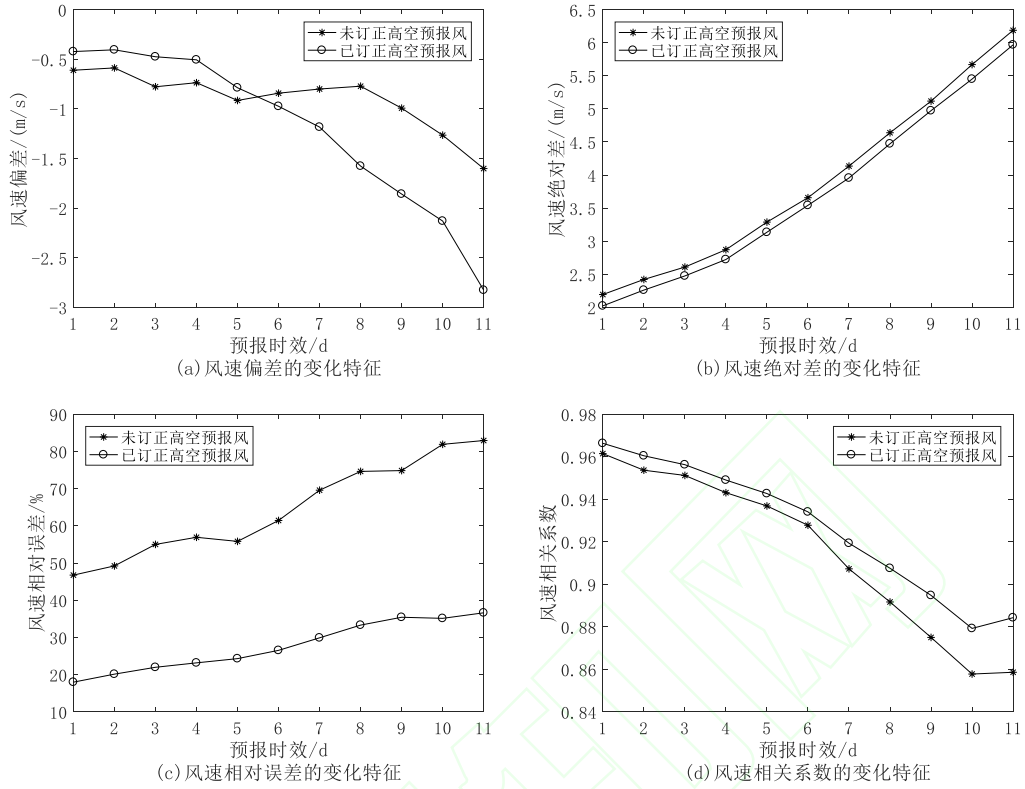

图 1 未订正、已订正高空预报风的风速精度对比

Fig.1 Comparison of wind speed accuracy between uncorrected and corrected upper forecast winds

表 1 在预报时效1～11 d，未订正、已订正高空预报风的数理统计特征

Table 1 Mathematical and statistical characteristics of uncorrected and corrected upper forecast winds for forecast periods of 1–11 days

	未订正高空预报风		已订正高空预报风	
	范围	平均值	范围	平均值
偏差/(m/s)	-1.60～-0.59	-0.90	-2.83～-0.40	-1.19
绝对差/(m/s)	2.19～6.19	3.89	2.02～5.97	3.73
相对误差/%	46.75～82.92	64.45	17.98～36.61	27.68
相关系数	0.8578～0.9615	0.9149	0.8792～0.9663	0.9267

3 $q\alpha_{\max}$预报精度特征

未订正、已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 偏差、绝对差、相对误差及相关系数，随预报时效延长变化特征如图 2 所示，相应的数理统计见表 2。从图 2 可明显看出，未订正、已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 精度均随预报时效延长而降低。其中，未订正、已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 偏差均为负值(图 2(a))，且随预报时效延长呈现增大趋势特征；与未订正高空预报风相比，已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 偏差绝对值在预报时效 1～6 d 均偏小、在其它预报时效均偏大。在预报时效 1～11 d，随预报时效延长，未订正、已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差、 $q\alpha_{\max}$ 相对误差均表现为准线性增大趋势(图 2(b)、2(c))，$q\alpha_{\max}$ 相关系数均表现为准线性减小趋势(图 2(d))，其中，与未订正高空预报风相比，已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差和 $q\alpha_{\max}$ 相对误差在预报时效 8～9 d 基本相同，在其它预报时效均偏小， $q\alpha_{\max}$ 相关系数在各预报时效的数值变化不大。从表 2 可看出，与未订正高空预报风相比，已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差范围、 $q\alpha_{\max}$ 相对误差范围的上界值及下界值均偏小， $q\alpha_{\max}$ 相关系数范围的上界值、下界值基本相同，且已订正高空预报风的平均 $q\alpha_{\max}$ 绝对差、平均 $q\alpha_{\max}$ 相对误差均偏小，平均 $q\alpha_{\max}$ 相关系数基本相同，表 2 的结果，进一步表明已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 精度高于未订正高空预报风。

结合图 2、表 2 及上述分析结果，综合判断可知，在预报时效 1～11 d，已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 精度高于（预报时效 1～7 d、10～11 d）或略高于（预报时效 8～9 d）对应的未订正高空预报风。

对照图 1 和图 2，可以发现在预报时效 8～9 d，已订正高空预报风的预报精度高于未订正高空预报风，而已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 预报精度略高于对应的未订正高空预报风，其略高于的原因可能是：（1）图 1 反映的是高度 0-20 km 范围内平均风速精度特征，并不表示已订正高空预报风精度在各高度层，均高于未订正高空预报风。（2）在 $q\alpha_{\max}$ 的计算程序中，采用时间间隔为 0.1 s 的时间积分得到后一时刻的 $q\alpha$ 值，且每个时刻的 $q\alpha$ 值都与前一时刻的火箭特征参数（如火箭质心、压心、推力等）、高空风等输入参数有关，这些输入参数随火箭飞行时间是动态变化的。因此，未订正、已订正高空预报风在不同高度层的误差存在差异时，导致计算得到每个时刻的 $q\alpha$ 值会存在差异，该差异会传递到后一时刻的 $q\alpha$ 值，最终对获取整层高度内的 $q\alpha_{\max}$ 值也会产生影响。因此，$q\alpha_{\max}$ 预报精度不仅仅依赖于整层高空风的预报精度，还与各高度层风速和风向的预报精度及其累积效果有关，需要综合考虑各高度风速和风向的预报精度加以判断。

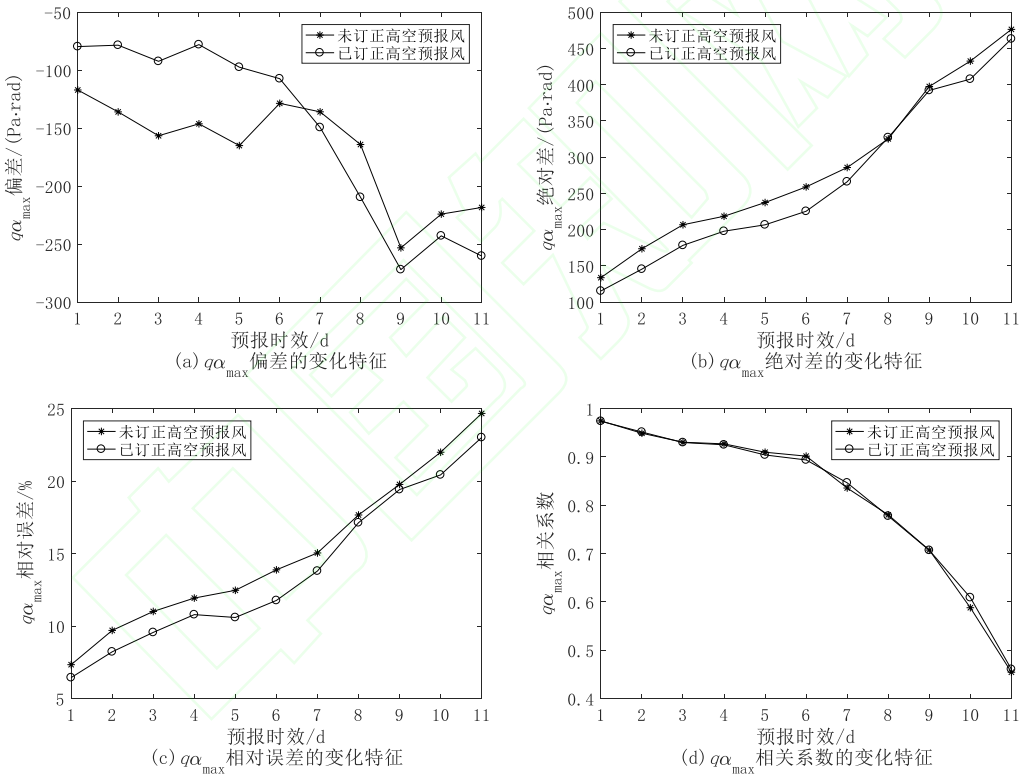

图 2 未订正、已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 精度对比

Fig.2 Comparison of $q\alpha_{\max}$ accuracy between uncorrected and corrected upper forecast winds

表 2 在预报时效1～11 d，未订正、已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 数理统计特征

Table 2 Statistical characteristics of $q\alpha_{\max}$ for uncorrected and corrected upper-air forecast wind in the forecast period of 1 to 11 days

	未订正高空预报风		已订正高空预报风	
	范围	平均值	范围	平均值
偏差/(Pa·rad)	-253.23～-117.04	-167.73	-271.97～-77.90	-151.53
绝对差/(Pa·rad)	133.65～476.37	286.02	115.30～463.23	265.92
相对误差/%	7.34～24.67	15.04	6.45～23.01	13.74
相关系数	0.4545～0.9746	0.8144	0.4606～0.9740	0.8163

在预报时效 1～11 d，与未订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差相比，已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对

差值更小的样本数占有率随预报时效变化特征如图 3 所示，图 3 中的样本数占有率小于 50%、等于 50%、大于 50%，表示已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差值小于对应未订正高空预报风的样本数，分别为不到总样本数的一半、为总样本数的一半、超过总样本数的一半。该数值同样可以用于判断已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 精度是否高于未订正高空预报风，若超过 50%，则可认为已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 精度更高，反之亦然。

从图 3 可以看出，在预报时效 1～11 d，已订正高空预报风 $q\alpha_{\max}$ 绝对差值更小的样本数占有率均超过 50%，表明已订正高空预报风 $q\alpha_{\max}$ 绝对差值小于对应未订正高空预报风的样本数，超过了总样本数的一半，且占有率值越大，则已订正高空预报风 $q\alpha_{\max}$ 绝对差值小于对应未订正高空预报风的样本数越多，即精度越高。在图 3 中，占有率随预报时效延长表现为先增大、后减小的变化趋势特征，其数值范围为 52.25%～69.37%，均超过了 50%，平均值为 59.46%，因此，图 3 结果表明已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 精度高于相应的未订正高空预报风，且在预报时效 2～5 d 的预报精度提升较明显（均超过 60%）。

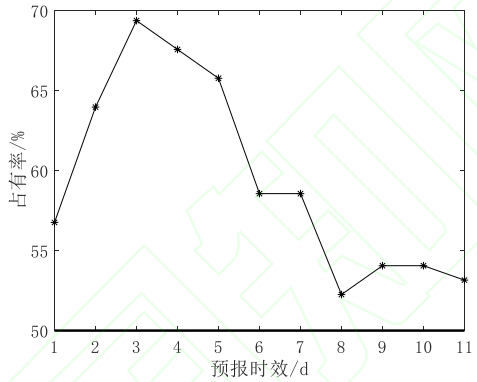

图 3 已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差值更小时，其样本数占有率随预报时效变化特征

Fig.3 When the absolute difference of the $q\alpha_{\max}$ from corrected upper forecast wind is smaller, the sample number proportion changes with the forecast days

在火箭发射前 4 d，需掌握火箭发射零日窗口时段的 $q\alpha_{\max}$ 预报值是否满足发射条件，因此，预报时效 1～4 d 的 $q\alpha_{\max}$ 预报值精度，对火箭是否可以按计划实施发射具有重大影响。在预报时效 1～4 d，未订正、已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差在不同区间范围内占有率分布特征如图 4 所示，其中，$q\alpha_{\max}$ 绝对差在小值区间范围内的占有率越大、在大值区间范围内的占有率越小，表明其精度越高。从图 4 可看出，随 $q\alpha_{\max}$ 绝对差变大，未订正、已订正高空预报风的占有率均表现为减小变化趋势，与未订正高空预报风相比，已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差在[0,100) Pa·rad 范围内占有率更大、在[400,+∞) Pa·rad 区间内占有率更低，即已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差在[0,100) Pa·rad 范围内样本数更多、在[400,+∞) Pa·rad 区间内样本数更少，进一步提高了 $q\alpha_{\max}$ 预报精度。考虑到火箭设计安全存在一定的冗余、及与火箭设计方的交流，对于火箭飞行安全，一般认为 $q\alpha_{\max}$ 绝对差超过给定阈值，在[0,100) Pa·rad 范围内的影响不大、在[100,200) Pa·rad 范围内处于可控范围、在[400,+∞) Pa·rad 区间内考虑取消发射，表 3 给出了在预报时效 1～4 d，未订正、已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差在[0,100) Pa·rad、[0,200) Pa·rad、[400,+∞) Pa·rad 内占有率分布特征，从该表可看出，与未订正高空预报风相比，在各预报时效，已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差在[0,100) Pa·rad、[0,200) Pa·rad 占有率均有明显提高，在[400,+∞) Pa·rad 内占有率均有明显降低，例如，对于预报时效 4 d，$q\alpha_{\max}$ 绝对差在[0,100) Pa·rad、[0,200) Pa·rad、[400,+∞) Pa·rad 占有率分别由 24.32%提高到 28.83%、51.35%提高到 64.87%、20.72%降低到 13.52%。

因此，通过图 4、表 3 及上述分析可知，在预报时效 1～4 d，与未订正高空预报风相比，已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 精度更高。

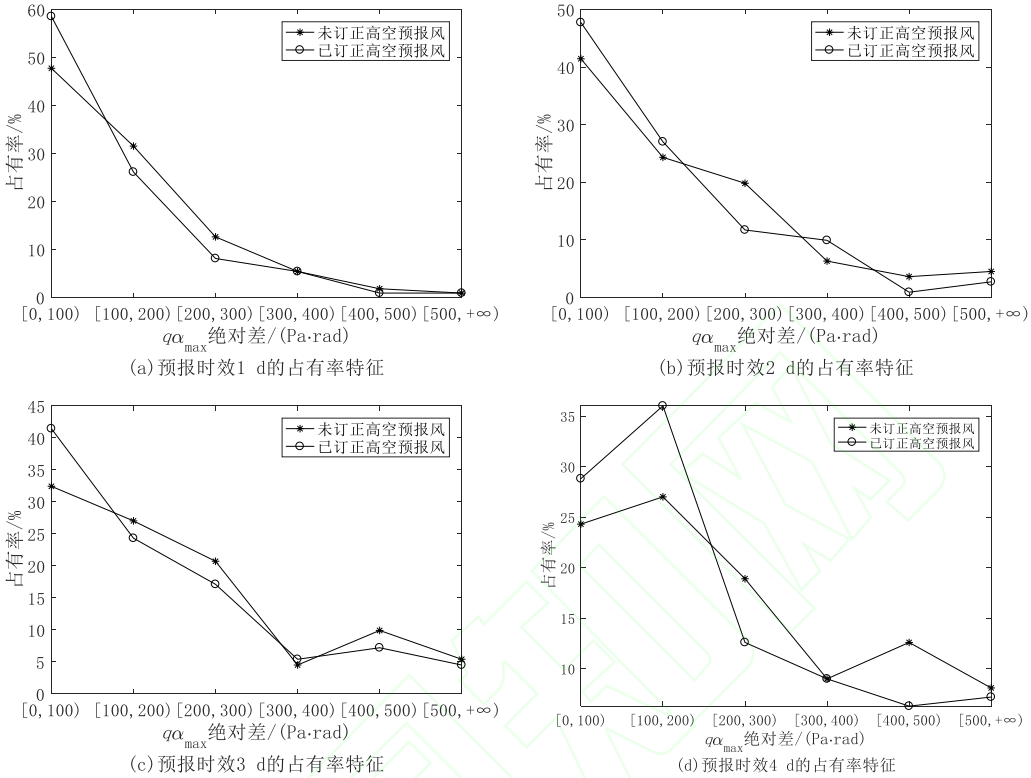

图 4 未订正、已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差在不同区间范围内占有率的分布特征

Fig.4 The occurrence rate of the $q\alpha_{\max}$ absolute difference in different interval ranges between uncorrected and corrected upper forecast winds

表 3 在预报时效1～4 d，未订正、已订正高空预报风的 $q\alpha_{\max}$ 绝对差在[0,100) Pa·rad、[0,200) Pa·rad和[400,+∞) Pa·rad区间内占有率（单位：%）

Table 3 For forecasts of 1 to 4 days, the proportion of $q\alpha_{\max}$ absolute differences of uncorrected and corrected upper forecast winds within the ranges [0,100) Pa·rad, [0,200) Pa·rad, and [400, ∞) Pa·rad (unit:%)

	[0,100) Pa·rad		[0,200) Pa·rad		[400,+∞) Pa·rad	
	未订正	已订正	未订正	已订正	未订正	已订正
预报时效 1 d	47.75	58.56	79.28	84.69	2.70	1.80
预报时效 2 d	41.44	47.75	65.76	74.78	8.10	3.60
预报时效 3 d	32.43	41.44	59.46	65.76	15.32	11.71
预报时效 4 d	24.32	28.83	51.35	64.87	20.72	13.52

4　实例应用

某型运载火箭发射零日的 10:37、14:37（分别为发射前 4 小时 30 分钟和发射前 30 分钟。）均进行高空风探测，获取该 2 个时刻的高空实况风资料。数值天气预报模式在火箭发射零日前 1 天的 08:00 起报，得到发射零日 08:00、11:00、14:00、17:00 的未订正高空预报风，利用插值方法得到 10:37、14:37 的未订正高空预报风，并利用 SVM 方法得到相应时间的已订正高空预报风。

在 10:37、14:37，高空实况风、未订正及已订正高空预报风随高度变化特征如图 5 所示，从该图可看出，它们随高度增加的变化趋势基本一致，均表现为准线性增大至对流层顶、随后准线性减小的变化趋势，从整体上看，与未订正高空预报风相比，已订正高空预报风在大多数高度层均更接近高空

实况风；从表 4 的统计结果可看出，在 10:37、14:37，已订正高空预报风的风速绝对差、相对误差均更小，相关系数均更大，例如，在 10:37 和 14:37，风速绝对差分别由 2.61 m/s 减小到 2.33 m/s、2.56 m/s 减小到 2.09 m/s。表 5 给出了它们之间在不同高度范围内的风速范围及其平均值的对比结果，与未订正高空预报风相比，在 10:37（图 5（a））， 高度 9.8～15.8 km 内的已订正高空预报风的风速范围及其平均值均更接近高空实况风，平均风速偏差由-4.25 m/s（即：47.52-51.77）减小到-1.48 m/s（即：50.29-51.77）（表 5），在 14:37（图 5（b）），高度 11.0～16.2 km 内的已订正高空预报风在大多数高度层均更接近高空实况风，平均风速偏差由-4.69 m/s 减小到-1.82 m/s（表 5），在其它高度范围内，10:37、14:37 的未订正与已订正高空预报风速在大多数高度层基本相同、且比较接近高空实况风。

通过上述分析可知，在此次火箭发射的高空预报风保障过程中，利用 SVM 方法得到的已订正高空预报风精度更高。

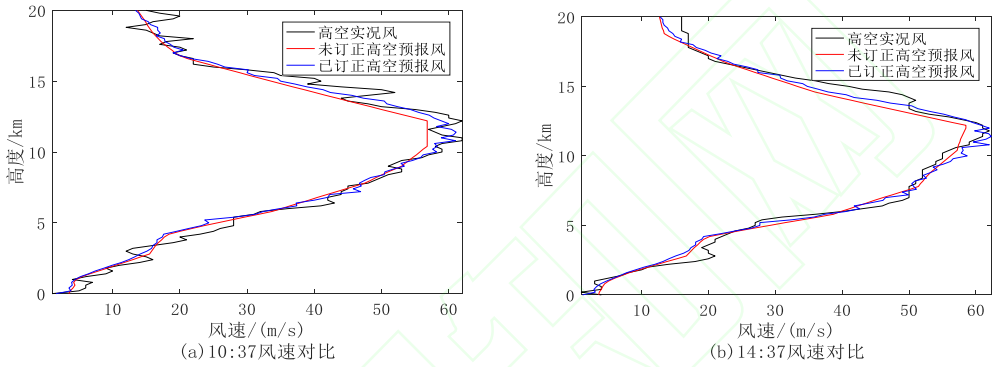

图 5 在 10:37、14:37，高空实况风、未订正高空预报风、已订正高空预报风随高度变化特征

Fig.5 At 10:37 and 14:37, the characteristics of upper observed winds, uncorrected upper forecast winds, and corrected upper forecast winds with height variations

表 4 在10:37、14:37，未订正、已订正高空预报风与高空实况风之间的数理统计

Table 4 Mathematical statistics between uncorrected, corrected upper forecast winds and upper observed winds at 10:37 and 14:37

时间	绝对差/(m/s)		相对误差/%		相关系数	
	未订正	已订正	未订正	已订正	未订正	已订正
10:37	2.61	2.33	12.27	10.39	0.9882	0.9887
14:37	2.56	2.09	11.92	11.07	0.9855	0.9899

表 5 未订正、已订正及实况高空风在不同高度范围内的风速范围及其平均值（单位：m/s）

Table 5 The range and average of wind speeds of uncorrected upper forecast wind, and corrected upper forecast wind, and actual upper wind at different height ranges (unit: m/s)

	10:37				14:37			
	9.8～15.8/km		其它高度/km		11.0～16.2/km		其它高度/km	
	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
未订正	27.30～56.80	47.52	3.50～54.60	24.27	25.80～58.50	44.49	3.60～57.39	28.29
已订正	30.00～61.10	50.29	1.60～55.80	24.29	27.40～62.30	47.36	1.20～62.00	28.34
实况	30.00～62.00	51.77	1.00～56.00	25.28	27.00～62.00	49.18	1.00～59.00	28.71

高空风产生的 $q\alpha_{max}$ 是否超过火箭设计阈值，是影响运载火箭是否按计划实施发射的决定条件之一。运载火箭发射零日 10:37、14:37 高空实况风、未订正及已订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 值及其对应参数对比见表 6，从该表可看出，与未订正高空预报风相比，已订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 预报值及对应飞行时间、飞行高度、高空风速，均更接近相应的高空实况风结果。例如，在运载火箭发射零日 10:37、14:37 高空实况风的 $q\alpha_{max}$ 实况值分别为 2603.13 Pa·rad、2713.30 Pa·rad，利用数值天气预报模式得到发射零日 10:37、14:37 未订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 预报值分别为 2407.04 Pa·rad、2579.02 Pa·rad，分别比实况值少了 196.09 Pa·rad、134.28 Pa·rad，已订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 预报值分别为 2563.32 Pa·rad、2665.96 Pa·rad，分别比实况值少了 39.81 Pa·rad、47.34 Pa·rad，通过对比可以看出，

相比未订正高空预报风，已订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 预报值更接近实况值，偏差绝对值分别由 196.09 Pa·rad、134.28 Pa·rad 减小到 39.81 Pa·rad、47.34 Pa·rad。表 5 给出了 10:37、14:37，高空实况风、未订正及已订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 及其对应飞行时间、飞行高度和高空风速对比结果，从该表可看出，与未订正高空预报风相比，已订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 及其对应飞行时间、飞行高度和对应高空风速，均更接近相应的高空实况风结果。

此实例为一次航天发射的真实保障个例，在已完成多次航天发射的高空预报风及其对应 $q\alpha_{max}$ 预报值保障实例中，均体现了类似的结论，即使用本模型建模得到的已订正高空预报风 $q\alpha_{max}$ 进行航天发射保障，可以进一步提高保障能力、降低决策风险。

表 6 在10:37、14:37，高空实况风、未订正及已订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 及其对应参数对比

Table 6 Comparison of $q\alpha_{max}$ and their corresponding parameters for upper observed winds, uncorrected and corrected upper forecast winds at 10:37 and 14:37.

时间	$q\alpha_{max}$ /(Pa.rad)			$q\alpha_{max}$ 对应飞行时间/s		
	实况	未订正	已订正	实况	未订正	已订正
10:37	2603.13	2407.04	2563.32	65.90	63.80	65.80
14:37	2713.30	2579.02	2665.96	53.10	56.10	53.90
时间	$q\alpha_{max}$ 对应飞行高度/m			$q\alpha_{max}$ 对应高空风速/(m/s)		
	实况	未订正	已订正	实况	未订正	已订正
10:37	10814.65	10111.10	10793.51	62.00	55.98	60.90
14:37	7000.87	7785.44	7212.62	50.00	51.31	49.84

5 结　论

高空预报风精度对火箭飞行安全及回收落点精度，均具有重要影响。本文利用 SVM 回归算法，分别对不同高度、不同预报时效的未订正高空预报风进行建模订正，得到已订正高空预报风。最后，对未订正、已订正高空预报风及对应 $q\alpha_{max}$ 的预报精度进行了对比研究，并以实例应用进行对比分析，得到主要结论如下：

1）已订正高空预报风的预报精度，在各预报时效均高于未订正高空预报风。在各预报时效，相比未订正高空预报风，已订正高空预报风的绝对差、相对误差均偏小，相关系数值均偏大，在整个高度范围内，平均绝对差由 3.89 m/s 减小到 3.73 m/s、相对误差由 64.45%减小到 27.68%、相关系数由 0.9149 增大到 0.9267。

2）已订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 预报精度，在各预报时效均高于或略高于对应的未订正高空预报风。平均绝对差值由 286.02 Pa·rad 减小到 265.92 Pa·rad、相对误差由 15.04%减小到 13.74%、相关系数值由 0.8144 增大 0.8163。

3）与未订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 绝对差相比，已订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 绝对差值更小的样本数占有率均超过了 50%。在预报时效 1～4 d，已订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 绝对差值在小值区间(如[0,100) Pa·rad、[0,200) Pa·rad)的样本数占有率更高、在大值区间(如[400,+∞) Pa·rad)的样本数占有率更低，进一步表明，已订正高空预报风的 $q\alpha_{max}$ 预报值精度更高。

4）实例应用的结果表明，在 10:37、14:37，与未订正高空预报风相比，已订正高空预报风及其 $q\alpha_{max}$，均更接近高空实况风，$q\alpha_{max}$ 偏差绝对值分别由 196.09 Pa·rad、134.28 Pa·rad 减小到 39.81 Pa·rad、47.34 Pa·rad。

通过上述研究可以发现，利用 SVM 回归算法，可有效提高高空预报风及其对应 $q\alpha_{max}$ 预报值的精度，是一种提高火箭飞行保障能力、减低火箭安全飞行风险的有效手段。通过对比可看出，虽然已订正高空预报风及其对应 $q\alpha_{max}$ 精度的提升效果，与预期存在一定差距，但同时表明，利用机器学习算法是进一步提高高空预报风及其 $q\alpha_{max}$ 预报值精度的有效方向，后续可通过挖掘更优秀的机器学习算法或利用 AI 大模型进一步改进。

该模型得到的已订正高空预报风成果，已成为本单位航天发射高空预报风保障的主力产品，从近几年业务保障应用的实际效果来看，该成果在航天发射工程决策层面取得良好效果，自使用该研究成果以来，未再出现因高空预报风保障不力（预报值明显偏大或明显偏小），导致影响航天发射计划的正常推进，即为进一步提高实际发射决策能力、降低火箭安全飞行风险提供了有力支撑。

参考文献（References）

[1] 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).

[2] 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 H H, Li J, Xiao Y Q, 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(in Chinese).

[3] 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).

[4] 程胡华， 张军军， 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 H H, Zhang J J, Wang Y B, et al. Analysis of the precision of the maximum aerodynamic load forecast for rockets and modeling revisions[J]. Aerospace Control, 2023, 41(4): 77-83(in Chinese).

[5] 程胡华， 武帅， 支强， 等． 火箭最大气动载荷异常变化分析与建模订正[J]． 航天控制，2023，41（6）：57-62．
Cheng H H, Wu S, Zhi Q, et al. Analysis and modeling revision of abnormal changes in maximum aerodynamic load of rockets[J]. Aerospace Control , 2023, 41(6): 57-62(in Chinese).

[6] 程胡华，武帅，张入财，等． 预报风强度对火箭最大气动载荷精度影响及建模分析[J]． 国防科技大学学报，2024，46（1）： 63-73．
Cheng H H, Wu S, Zhang R C, et al. Influence of forecasting wind intensity on rocket maximum aerodynamic load accuracy and modeling analysis[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(1):63-73(in Chinese).

[7] 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[J]． 北京航空航天大学学报 2025， 51（4）：1304-1312．
Cheng H H, Wu S, Jiang Z H, et al. Maximum aerodynamic load prediction method during launching of vehicle launch[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(4): 1304-1312(in Chinese).

[8] 招佐森， 高丽， 蔡宏珂， 等． 基于分段层次聚类的中国强降水集合平均预报逐步订正方法研究[J]． 气象学报， 2023， 81（4）： 580-591．
Zhao Z S, Gao L, Cai H K, et al. A stepwise correction method based on segmented hierarchical clustering for ensemble mean forecasts of severe rainfall in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2023, 81(4): 580-591(in Chinese).

[9] 高星星， 潘留杰， 楼盼星， 等． 一种改进的频率匹配法在网格降水预报订正中的应用[J]． 气象，2023， 49（11）： 1371-1383．
Gao X X, Pan L J, Lou P X, et al. Application of an improved frequency matching method in grid precipitation forecast correction [J]. Meteorological Monthly, 2023, 49(11): 1371-1383(in Chinese).

[10] 曾小团， 邹晨曦， 范娇， 等． 基于 GRU 深度学习的短时临近降水预报订正方法[J]． 应用气象学报， 2024， 35（5）： 513-525．
Zeng X T, Zou C X, Fan J, et al. Short-term precipitation correction based on GRU deep learning[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2024, 35(5): 513-525(in Chinese).

[11] 邱贵强， 时少英， 王洪霞， 等． 2 m 气温集成订正方法及在冬奥延庆赛区的应用[J]． 应用气象学报， 2023， 34（4）： 400-412．
Qiu G Q, Shi S Y, Wang H X, et al. An integrated correction method for 2 m temperature and its application to Yan Qing competition zone of Olympic winter games[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2023, 34(4): 400-412(in Chinese).

[12] 吴胜刚， 赵声蓉， 王玉， 等． 基于动态近似垂直变率的 ECMWF 模式 2m 气温订正方法研究[J]． 气象， 2025， 51（10）：1237-1248．
Wu S G, Zhao S R, Wang Y, et al. Study on ECMWF 2m temperature bias correction based on dynamically approximated vertical change rate [J]. Meteorological Monthly, 2025, 51(10): 1237-1248(in Chinese).

[13] 梁利， 赵华生， 吴玉霜． 基于 Tabnet 的日极大风风速订正预报模型[J]． 气象科技， 2024， 52（5）： 714-722．
Liang L, Zhao H S, Wu Y S. Research on daily extreme wind speed correction forecast based on tabnet[J]. Meteorological Science and Technology, 2024, 52(5): 714-722(in Chinese).

[14] 刘旭， 杨昊， 梁潇云， 等． 基于注意力机制与加权趋势损失的风速订正方法[J]． 应用气象学报， 2025， 36（3）： 316-327．
Liu X, Yang H, Liang X Y, et al. Attention mechanism and weighted trend loss for wind speed correction[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2025, 36(3): 316-327(in Chinese).

[15] Rennie M P, Isaksen L, Weiler F, et al. The impact of aeolus wind retrievals on ECMWF global weather forecasts[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2021, 147(740): 3555-3586.

[16] 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 H H,Cheng W,Shen H B,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(in Chinese).

[17] 胡瑞光，钟文安，宋征宇，等． 运载火箭风场高精度拟合方法[J]． 宇航学报，2023，44（2）： 303-312．
Hu R G,Zhong W A,Song Z Y,et al. High-precision fitting approach for wind field of launch vehicles[J]. Journal of Astronautics,2023,44(2): 303-312(in Chinese).

[18] 王乐，常汉江，蔡毅鹏． 高空风场条件风速概率分布与正态分布差异分析[J]． 国防科技大学学报，2023，45（2）： 172-178．
Wang L,Chang H J,Cai Y P. Analysis of the difference between probability distribution of conditional aloft wind speed and normal distribution[J]. Journal of National University of Defense Technology,2023,45(2): 172-178(in Chinese).
[19] Song M M, Yang D Z, Lerch S, et al. Non-crossing quantile regression neural network as a calibration tool for ensemble weather forecasts[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2024, 41(7), 1417-1437. doi: 10.1007/s00376-023-3184-5.
[20] Johnson D L, Vaughan W W. Natural terrestrial environment from selected field data measurements: results and applications for launch vehicle development[J]. Journal of Aerospace Technology and Management, 2017, 9(1): 5-17. DOI: 10.5028/jatm.v9i1.636.
[21] Cheng G H, Hu Y D, Jing W X, et al. Trajectory correction of the rocket for aerodynamic load shedding based on deep neural network and the chaotic evolution strategy with covariance matrix adaptation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(1): 844-856. DOI: 10.1109/TAES.2023.3331676.
[22] 钱燕珍， 孙军波， 余晖， 等． 用支持向量机方法做登陆热带气旋站点大风预报[J]． 气象， 2012， 38（3）： 300-306（in Chinese）．
Qian Y Z, Sun J B, Yu H, et al. Application of SVM method to the station strong wind forecast in landfalling tropical cyclones[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(3): 300-306(in Chinese).
[23] 王在文， 郑祚芳， 陈敏， 等． 支持向量机非线性回归方法的气象要素预报[J]． 应用气象学报， 2012， 23（5）： 562-570．
Wang Z W, Zheng Z F, Chen M, et al. Prediction of meteorological elements based on nonlinear support vector machine regression method[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(5): 562-570(in Chinese).
[24] 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）： 7-14．
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): 7-14(in Chinese).