

大气垂直结构对人影火箭弹弹道影响分析

何松蔚¹ 陈昌¹ 高建秋¹ 游积平¹ 刘盛嘉² 李铸杰¹

¹ 广东省人工影响天气中心, 广州, 510630

² 陕西中天火箭技术股份有限公司, 西安, 710000

摘要: 利用气象观测资料和弹道理论, 建立人影火箭弹飞行弹道模型, 分析大气垂直结构对人影火箭弹上升飞行阶段弹道特性的影响。结果表明水平风场的强度和方向对弹道偏转程度影响较大, 1000m 高度以下的低层风场对弹道影响明显, 大气密度对弹道的影响较小。模型对人影火箭弹射程、射高、偏转有正向修正作用, 可以较准确地预测人影火箭弹的飞行弹道。

关键词: 人影火箭弹、弹道特性、大气垂直结构

An analysis of the influence of weather modification rocket ballistic performance by atmospheric vertical structure

He Songwei¹ Chen Chang¹ Gao Jianqiu¹ You Jiping¹ Liu Shengjia² Li Zhujie¹

¹ Emergency Early Warning Release and Weather Modification Center of Guangdong, Guangzhou, 510630

² Shanxi Zhongtian Rocket Technology Co., Ltd, Xi'an, 710000

Abstract: Based on observation data and ballistic theory, a simple model was established to analyze the influence of atmospheric vertical structure on the weather modification rocket ballistic performance during the ascending phase. The results indicate that the intensity and direction of the horizontal wind field have significant impact on ballistic performance, especially in low level wind fields below 1000m height. The impact of air density was relatively small. The model could be beneficial for ballistic correction, include ballistic height, deflection, and distance. It would provide relatively accurate prediction trajectory of weather modification rocket.

Key word: the weather modification rocket; ballistic performance; atmospheric vertical structure

引言

人工影响天气(人影)技术是气象防灾减灾的重要手段,其基本原理是在适宜条件下向云中适当位置播撒催化剂,影响云微物理过程,进而影响降水效率(胡志晋, 1981; French et al, 2018; Wang et al, 2021)。黄美元(2011)提出冷云作业时把催化剂直接送到云中合适负温层的方案更优。常用冷云催化剂碘化银在-5°C温度以上成核率极低, -5~-20°C温度层活化率显著提高(刘诗军等, 2005; 陈羿辰和何晖, 2017, 楼小凤等, 2021),因此把握适当

*中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J037)和广东省气象局科学技术研究重点项目(GRMC2021Z01)共同资助

第一作者: 何松蔚, 主要从事大气物理学相关研究. Email: swhe_123@163.com

通讯作者: 陈昌, 主要从事预警和人工影响天气相关研究. Email: 2751245153@qq.com

29 作业位置是科学作业重要环节（李红斌等，2005）。

30 火箭弹是将催化剂送入云中的重要载体，广泛应用于增雨抗旱，防雹减灾及重大活动保
31 障等工作（李红斌等，2016；姚展予，2006；姚展予等，2024；潘雯菁等，2019）。在冷云
32 催化作业中，火箭弹携带碘化银在预定时间内播撒，其播撒高度、位置参考生产厂家出具的
33 弹道参数表，但实际应用中火箭弹弹道受多种因素影响，其中气象要素是重要影响因素之一，
34 有研究指出气象因素是影响射击准确度的主要误差源，占比约 70%，各气象要素中风的影响
35 显著（吴汉洲等，2015；陈健伟等，2018，2020）。近年来弹道研究领域已充分意识到气
36 象要素对弹道的影响，学者们通过建立低层风切变简化模型、风场统计模型等手段研究风场
37 对弹道的影响，研究指出低空风切变对火箭弹射程、侧偏、落速等均产生较大影响（刘俊邦
38 等，2013；吴汉洲等，2015；陈健伟等，2018，2020）。王田田等（2019）利用非标准气象
39 条件下质点弹道计算方式，分析了空间均匀定常风场对 37mm 人影高炮安全射界修正量，
40 但实际大气与均匀定常风场差异大（赵鸣和黄新兵，1999），且大气密度是影响飞行器飞行
41 参数的直接因素（朱燕君等，2002）。大气垂直特征在不同季节、下垫面等条件下不同，局
42 地风场受天气环流、中小尺度环流等因素影响（盛裴轩等，2013；龚玺等，2023）。

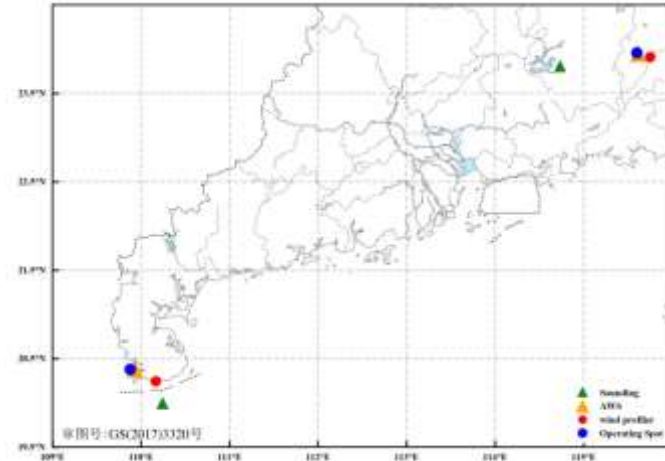
43 应用固定单一弹道参数难以估测复杂天气条件下催化剂的释放高度、位置，目前开展实
44 际气象要素对人影火箭弹弹道特征影响的研究很少（董晓波等，2020；刘卫国等，2023）。
45 因此利用实测风场和密度场，分析其对弹道特征的影响对于火箭弹道预测、火箭落点预测及
46 人影科学作业等方面具有重要意义（刘俊邦等，2013；黎祖贤等，2016；刘卫国等，2023）。

47 本文利用增加定位功能的人影火箭弹（董晓波等，2020）和气象观测资料，分析不同大
48 气状态下火箭弹弹道的变化情况，将对开展精准、科学人影作业提供参考。

49 1 资料和方法

50 1.1 试验方案

51 为分析不同大气垂直结构对人影火箭弹的影响，验证模型的适用性，试验在不同季节、
52 不同下垫面条件下开展。其中，山地下垫面试验点选取梅州五华的人影作业点，沿海下垫面
53 试验点选取雷州半岛的湛江徐闻作业点，具体位置见图 1。试验在 3 月、11 月以不同方位角、
54 仰角发射嵌入 GPS 芯片的 WR-98 型人影火箭弹，具体作业情况见表 1。试验期间天气变化
55 小，相邻区域天气环流相似，海口、河源探空特征可代表该区域大气状态。



56

57

58

59

60

61

62

63

图 1. 外场试验点和观测点位置 (绿色三角形表示探空站, 黄色三角形表示自动气象站(Automatic weather stations, AWS), 红色圆点表示风廓线雷达站, 蓝色圆点表示人工影响天气作业平台)

Fig. 1 Location of test and observation stations (The green triangles represent the sounding stations, the yellow triangles represent the automatic weather stations (AWS), the red dots represent the wind profiler radar stations, and the blue dots represent the weather modification operating spots)

表 1. 外场试验详情 Table 1 Details of field test

序号	地点	日期	时间	T(°C)	WS(m/s)	WD(°)	仰角(°)	可射方位	高度(m)
1	湛江徐闻	20230301	23:10	17.5	1.1	3	62	西南	17m
2	梅州五华	20231130	16:24	21.9	0.7	301	61	南	148m

64

(表 1 中 T, WS, WD 分别表示自动气象站实测的 2m 温度, 10m 平均风速、风向)

65

1.2 资料和方法

66

67

68

69

70

71

72

WR-98 人影火箭弹参数见表 2(董晓波等, 2020), 火箭弹主动段最大速度超过 800m/s, 通常 0-33 s 降落伞未弹出, 发射至最高点时 ($t < 33$ s) 弹体受力状态无显著变化。试验用弹在普通 WR-98 人影火箭弹基础上增加 GPS 模块, 该模块质量约为 300g, 实时定位时间分辨率为 1s, 采样数据包括气压、高度、经纬度、电压等。由于嵌入的车载型 GPS 定位能力有限, 上升阶段仅认为最高点的数据有效。

表 2. WR-98 人影火箭弹参数详情

Table 2. Technical parameters of WR-98 weather modification rocket

参数	数值	参数	数值
弹径	82 mm	催化剂播撒时长	35 s
弹重	8.3 kg	催化剂质量	630 g
发动机工作时间	2.42 s	落地方式	伞降

73

74

75

76

垂直气象场选取作业前邻近时次, 靠近作业点的探空站点数据 (常规探空每日 2 次, 08 时和 20 时), 获取各个高度层气压(P)、高度(H)、温度(T)、风向(WD)、风速(WS)、水汽压(e)等信息, 根据公式 (1) 计算空气密度 (朱燕君等, 2002), 并拟合 0-6000m 的空气密度

77 和高度的线性关系。将探空风向划分为 16 个方位，并按 150m 高度进行分层处理，计算各
 78 层中最大风向频率和平均风速作为该层风向、风速。利用邻近时次、站点的自动气象站(AWS)
 79 的 WD 、 WS 作为最低层风场信息。第二种风场数据是风廓线测风资料，选取作业前邻近时
 80 间和站点的风廓线雷达资料，时间分辨率 30min，缺测时使用 1h 分辨率产品补齐。

$$\rho = \frac{P \times 10^2}{RT} (1 - 0.378 \frac{e}{P}) \quad (1)$$

81
 82 为验证风场资料的可靠性，将探测时间、空间距离最近的探空和风廓线数据进行相关性
 83 分析（站点分布见图 1），选取 2 个试验日前后各 7 日资料进行统计（各 15 日，1 日 2 次，
 84 0-3150m），结果显示探空和风廓线测风的 u 、 v 分量的相关系数均大于 0.8（图 2），这与
 85 吴蕾等（2014）关于 2000m 以下两类测风 u 、 v 分量相关分析结果较为相似。由于两类测风
 86 原理不同，且探测站点间存在空间距离（试验 1 站点间距约 100km，试验 2 站点间距小于
 87 30km），采样时间也存在一定差异。这些因素导致垂直风场特征存在差异，但两类数据一
 88 致性较好，可使用距离最近的风廓线资料弥补探空测风时间分辨率不足。

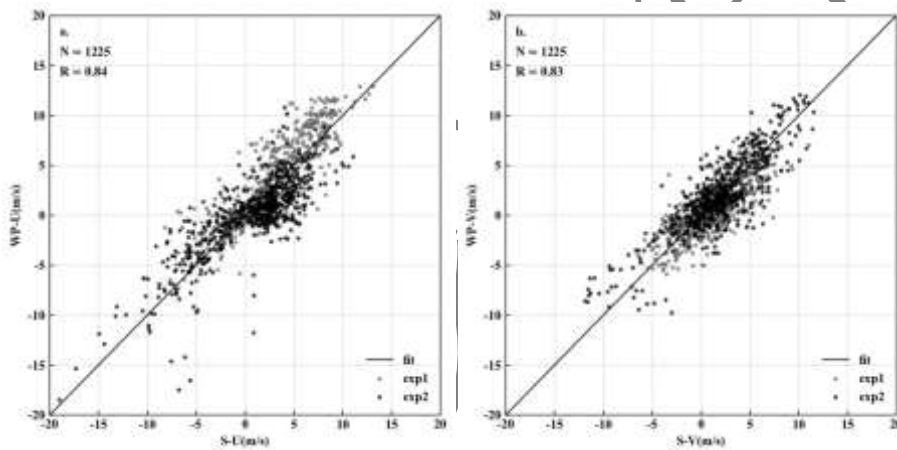


图 2. 探空和风廓线风场 u 、 v 分量 (a, b) 对比

(a 中 WP-U、S-U 分别表示风廓线和探空测风的 u 分量，b 中分别表示 v 分量，exp1、exp2 分别表示第一和第二组试验)

Fig.2 Comparison of u , v components observed by sounding and wind profiler radar (a,b)

WP-U and S-U respectively represent the u component observed by wind profiler radar and sounding in Fig a. Fig b represents the v component. Exp1 and exp2 respectively represent the 1st and 2nd test.

95 根据生产厂家提供火箭弹参数（表 2），建立人影火箭弹弹道模型，将上升阶段分为 3
 96 个部分。阶段 1 为火箭弹主动段，假设燃料均匀消耗，质量变化率 $dm/dt = -m_1$ ；阶段 2 火
 97 箭弹燃料耗尽无动力，但未播撒催化剂，质量变化率 $dm/dt = 0$ ；阶段 3 无动力，并开始均匀
 98 播撒催化剂，质量变化率 $dm/dt = -m_2$ 。基于火箭弹外弹道理论（钱杏芳等，2000；陈健伟
 99 等，2018，2020），详见公式（2）-（3），不考虑弹体绕质心的转动，考虑实际垂直风场、
 100 空气密度影响，建立模型。

101

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} F_x \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{mv} F_y \\ \frac{d\psi_v}{dt} = \frac{1}{mv \cos \psi_v} F_z \end{cases} \quad (2)$$

102

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \cos \psi_v \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} = v \sin \theta \\ \frac{dz}{dt} = -v \cos \theta \sin \psi_v \end{cases} \quad (3)$$

103

$$Y = \frac{1}{2} \rho v^2 SC \quad (4)$$

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

公式 (1) 中 P 表示气压, 单位 hPa , T 表示温度, 单位 K , R 取 $287.05 \text{ J}/(K \cdot kg)$, e 表示水汽压, 单位 hPa 。公式 (2) - (3) 中, F_x , F_y , F_z 分别表示火箭弹质心所受合力在弹道坐标系下的分量 (陈健伟等, 2018), v 表示质心速度, 单位 m/s , t 表示时间, 单位 s , θ 表示弹道倾角, ψ_v 表示弹道偏角, x , y , z 分别表示 ox 轴距离、垂直距离、 oz 轴距离。公式 (4) 中 Y 表示空气阻力, ρ 表示空气密度, 单位 kg/m^3 , C 表示空气阻力系数, S 表示特征面积, C 与 v 的大小密切相关。结合火箭弹质心运动方程, 风对飞行状态的影响主要表现在主动段, 空气密度的影响贯穿整个过程。

风场仅考虑水平风影响, 将风矢沿发射方向分解为垂直于发射平面的横风 W_z , 平行于发射平面的纵风 W_x , 横风和纵风分别产生附加侧滑角 $\Delta\beta$ 和附加攻角 $\Delta\alpha$ (钱杏芳等, 2000)。其中 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ 的计算见公式 (5), 将其代入公式 (2) - (3) 中连列求解。

114

$$\begin{cases} \tan \Delta\alpha = \frac{W_z \cdot \sin \theta}{v + W_z \sin \theta} \\ \tan \Delta\beta = \frac{W_x}{v} \end{cases} \quad (5)$$

115

116

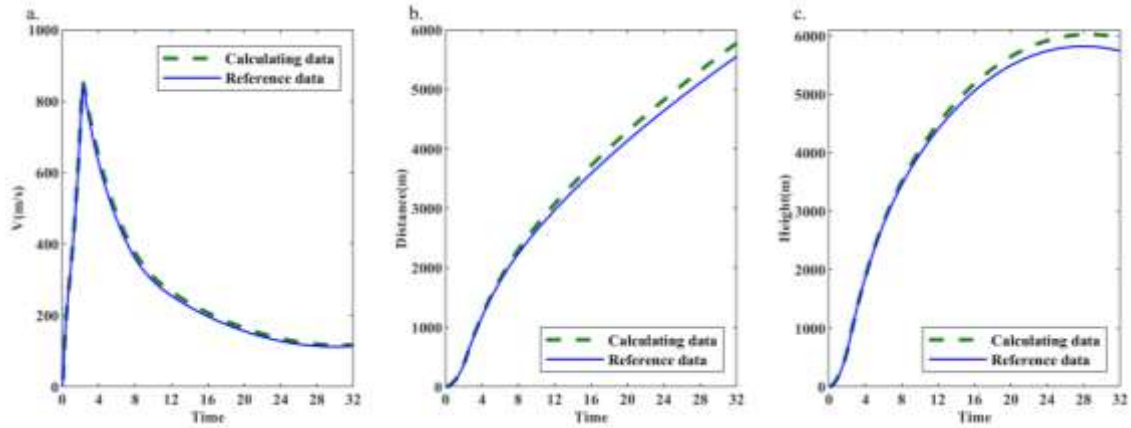
117

118

设置模型初始高度为 $0m$, 根据公式 (1) - (5) 计算出火箭弹道高度 (Y) 与 GPS 测高 (H) 不同 (贺园园等, 2010), 需要进行高度转换, 将未发射前 GPS 测高认为是初始高度 (H_1), 距地高度 $y_n = H_n - H_1$, 下文提到的高度均为距地高度。此外距离发射点的实际水平距离近似为 $L = X / \cos \psi_v$ 。

119 **1.3 方法验证**

120 为验证上述计算的可靠性，采用炮兵标准气象条件（吴汉洲等，2015），利用生产厂家
 121 提供参数进行计算，不考虑风场影响，以 60° 仰角发射，计算的上升阶段速度(v)、射程(L)、
 122 射高(H)随时间变化特征见图 3，对比生产厂家数据，速度、射程、射高均方根误差(REMS)
 123 分别约为 11.0m/s, 147.8m, 143.0m, 两者结果较为一致，相关性高。2 组数据第 5 秒射高
 124 偏差小于 30m, 射程偏差小于 50m, 最高点（28s 左右）偏差增大，对比典型时刻射程、射
 125 高，偏差随时间逐渐增大，偏差产生的原因可能是空气阻力处理或方程解析方式等不同。虽
 126 然本文计算弹道和参考弹道存在差异，但仍能较好体现弹道特征，综上本文计算方式可用于
 127 人影火箭弹弹道的影响分析。



128
 129 图 3. 模型计算（不考虑实际大气要素影响）与生产厂家弹道对比验证结果
 130 (a. 速度, m/s; b. 射程, m; c. 射高, m)

131 Fig. 3 The comparison results of model calculating(Without considering the impact of atmospheric elements)
 132 and reference data from manufacturer
 133 (a. V, unit: m/s; b. Distance, unit: m; c. Height, unit: m)

134
 135 表 3.0 海拔高度仰角 60° , 65° 参考弹道和模型计算特征值
 136 Table 3. Reference and calculation value of ballistic which the altitude was 0, the elevations were 60°, 65°

仰角	参考弹道参数		模型计算（不考虑实际大气要素影响）	
	最高点射程(m)	最高点射高(m)	最高点射程(m)	最高点射高(m)
60°	5109	5819	5385	6023
65°	4524	6348	4786	6590

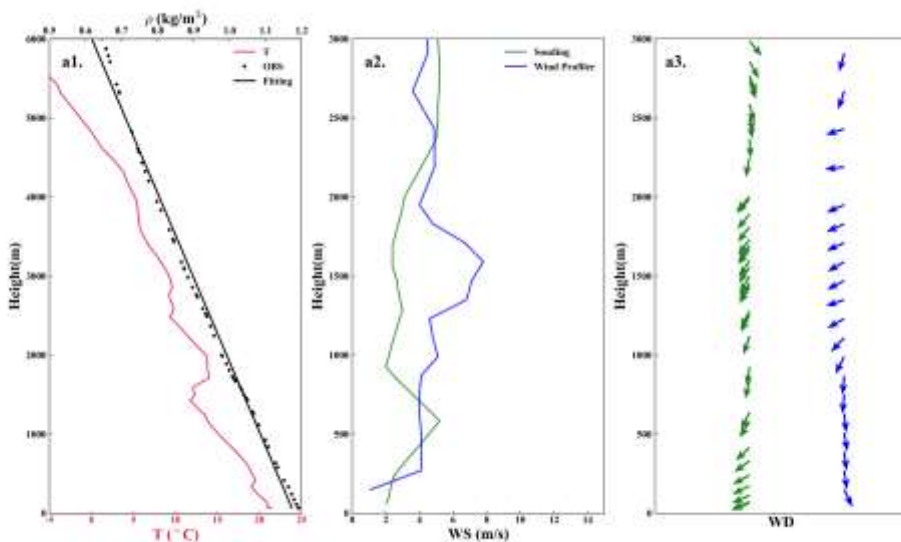
137

138 **2 结果分析**

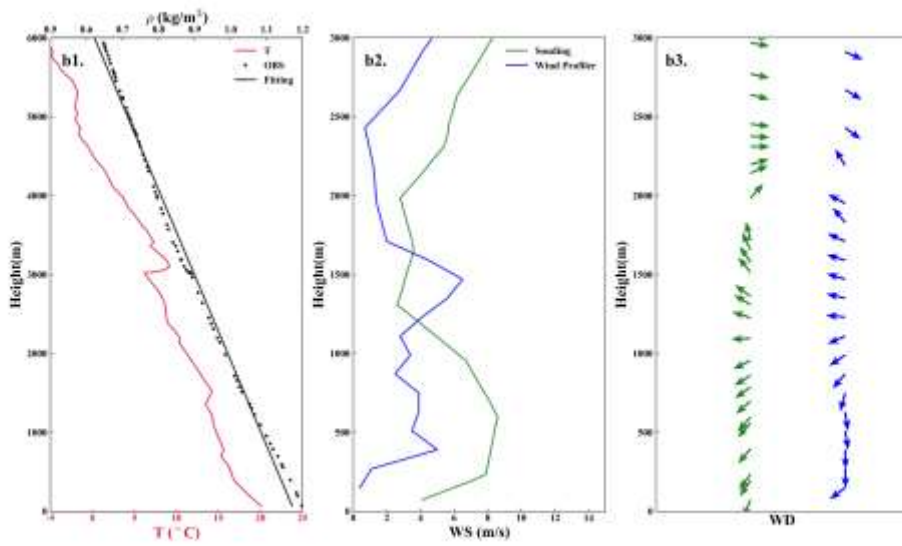
139 **2.1 气象要素垂直分布特征**

140 基于上述方法，选取试验前探空、自动站、风廓线雷达资料，考虑垂直风场和密度对火
 141 箭弹飞行状态影响。两次试验分别于 2023 年 3 月 1 日夜间和 11 月 30 日白天开展，从天气

142 环流形势分析，3月1日广东500hPa受偏西气流影响，地面受弱均压场控制，天气晴朗；
 143 11月30日冷空气南下，广东主要受偏北气流影响，天气影响系统较为稳定。图4是试验前
 144 气象要素垂直廓线，其中空气密度与高度的拟合关系能较好的表现实际大气密度与高度的关
 145 系，相关系数约为0.9。图4a1-a3是海南海口20时探空（绿色）和湛江徐闻23时风廓线（蓝
 146 色）垂直廓线，海口探空显示1500m高度层出现明显逆温，低层空气密度大，2000m高度
 147 以下低层风场以弱东北风为主，但0-600m风速切变大，最大风速为5.2m/s。湛江徐闻风廓
 148 线雷达监测显示23时低层以西北到北风为主，1200m高度转东北到偏东风。图4b1-b3是广
 149 东河源08时探空（绿色）和梅州五华16时风廓线（蓝色）垂直廓线。河源探空显示风速廓
 150 线呈现典型边界层低空急流特征，近地层风速约4m/s，600m风速迅速增大到8.6m/s，1300m
 151 风速迅速衰减至2.6m/s，低层风向以东北风为主，1000m以上风向随高度顺时针转为东南风，
 152 2000m以上以偏西风为主。梅州五华16时风廓线雷达资料显示，近地层为东北风，1000m
 153 以下以偏北风为主，1200-1700m以偏东风为主。两类风场信息存在较大差异，一是因为探
 154 空和风廓线测风具有一定的时间和空间差异，实际风场日变化明显，且受天气形势和局地环
 155 流共同影响；二是两类测风原理不同（吴蕾等，2014；王栋成等，2019；王丽吉等，2020）。
 156 利用不同风场资料进行弹道预测的适用条件需进一步讨论。



157



158
 159 图 4. 2023 年 3 月 1 日 20 时海口探空和 23 时湛江风廓线雷达 (a1, a2, a3)、2023 年 11 月 30 日 08 时河源
 160 探空和 16 时梅州风廓线雷达获取的气象要素廓线(b1, b2, b3)
 161 Fig.4 Vertical atmospheric profiles at Haikou by sounding at 08:00 and at Zhanjiang by wind profiler radar at
 162 23:00 on March 1,2023(a1, a2, a3) , at Heyuan by sounding at 08:00 and Meizhou by wind profiler radar at 16:00
 163 on November 30,2023(b1, b2, b3)

164 **2.2 个例分析**

165 考虑垂直风场和空气密度影响，将 2 个个例利用 2 种风场资料进行弹道模型预测计算，
 166 并和 GPS 返回的实测人影火箭弹弹道特征参数进行对比，以 GPS 实测数据(去掉 H_0)为标准
 167 值，计算两者之间偏差，绝对偏差为 $\Delta X = |X - X_0|$ ，结果见表 4 和表 5。图 5 a, b 是 2 个个
 168 例的模型计算、参考弹道、试验数据的空间分布特征，对比可知，考虑发射前大气垂直特征
 169 的模型能更好预测出弹道侧偏情况和最高点位置。

170 表 4. 人影火箭实测弹道特征参数和模型计算结果

171 Table 4 The result of test and model calculating

	GPS 试验实测			弹道模型计算 (探空)			弹道模型计算 (风廓线)		
	$L_{max}(m)$	$Y_{max}(m)$	$\psi(^{\circ})$	$L_{max}(m)$	$Y_{max}(m)$	$\psi(^{\circ})$	$L_{max}(m)$	$Y_{max}(m)$	$\psi(^{\circ})$
exp1	5924.0	6424.0	5.58	5080.0	6476.6	5.48	5133.3	6436.8	6.57
exp2	5323.0	6115.0	2.67	5206.8	6340.2	2.45	5294.8	6250.3	3.65

172 (L_{max} 表示弹道最高点射程, Y_{max} 表达弹道最高点射高, ψ 表示弹道偏角)

173 表 5. 参考弹道、弹道模型偏差情况

174 Table 5 The ballistic deviation situation of reference and model

	参考弹道误差				弹道模型误差 (探空)				弹道模型误差 (风廓线)			
	ΔL	ΔY	$\Delta\psi$	ΔD	ΔL	ΔY	$\Delta\psi$	ΔD	ΔL	ΔY	$\Delta\psi$	ΔD
	(m)	(m)	($^{\circ}$)	(m)	(m)	(m)	($^{\circ}$)	(m)	(m)	(m)	($^{\circ}$)	(m)
exp1	815	605	5.58	975.2	844.0	52.6	0.10	844.1	790.7	12.8	0.99	796.4
exp2	214	296	2.67	323.8	116.2	225.2	0.22	117.9	28.2	135.3	0.98	95.1

均值	514.5	450.5	4.12	649.5	480.1	138.9	0.16	481.0	409.1	74.1	0.99	445.7
----	-------	-------	------	-------	-------	-------	------	-------	-------	------	------	-------

175 (ΔL 表示弹道射程与试验值的偏差, ΔY 表示弹道射高与试验值的偏差, ΔD 表示弹道最高点投影与试验值的偏差)

176 exp1 试验方位角为西南向, 根据海口 20 时探空可知, 低层垂直风场以东北风为主, 顺

177 风产生正附加攻角 ($\Delta\alpha > 0$), 射高增大, 射程减小, 模型预测 ΔY 仅为 52m, 射程偏差较

178 大, ΔL 约为 850m。考虑 w_z 影响, w_z 方向指向发射平面左侧, 附加侧滑角大于 0, 弹道右

179 偏, 对比实际最高点位置, 预测侧偏角偏差仅 0.1° , 与实际值近乎一致。根据徐闻 23 时风

180 廓线资料, 低层为西北到北风, 低层风场产生的 w_z 使得弹道右偏, 与试验数据相比, 侧偏

181 角偏大约 0.99° 。3 种弹道均对实际射程存在低估, 考虑大气垂直特征的弹道模型能对弹道

182 最高点位置有正向修正作用, 但应用不同探测资料的修正效果不同, 探空风场对侧偏程度修

183 正效果好, 对射高预测偏大; 风廓线风场对射高修正效果明显, 对侧偏存在一定程度高估。

184 根据投影点偏差, 应用风廓线风场的弹道预测模型能更好把握弹道最高点的位置。

185 exp2 试验方位角为南向, 根据河源 08 时探空可知, 低层以偏北风为主, 顺风产生正向

186 附加攻角 ($\Delta\alpha > 0$), 射高增大, 射程减小, 模型预测 ΔY , ΔL 分别为 225m, 116m, 预测

187 效果较好。地面风场为西北风, w_z 指向左侧, 产生正侧滑角 ($\Delta\beta > 0$), 弹道右偏; 探空

188 显示大气低层风场产生的 w_z 指向右侧, 产生负侧滑角 ($\Delta\beta < 0$), 弹道左偏, 低层风场将

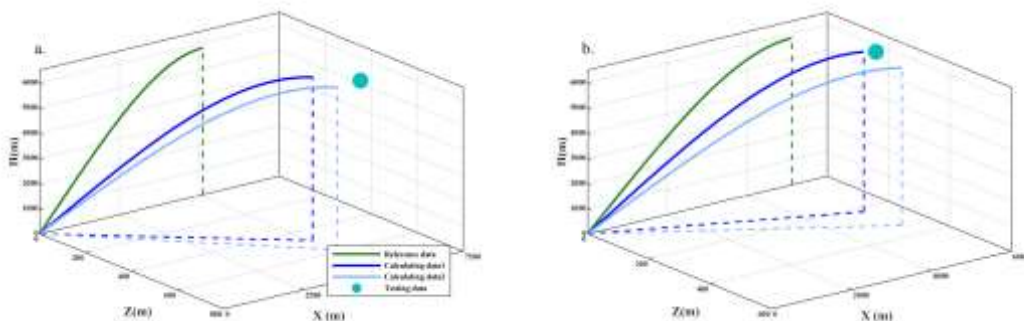
189 侧偏逐渐收拢, 预测偏角 2.45° , 偏差约 0.2° , 与实际值非常接近。对比 60° 仰角参考弹

190 道 (见表 3), 利用探空观测资料进行弹道预测的最高点射程、射高及位置偏差均小于参考

191 弹道。根据梅州五华 16 时风廓线和自动站资料, 地面为西北风, 低层风场为东北到北风,

192 低层风场对侧偏的收拢效果较小, 侧偏程度偏大, 模型对最高点射程和射高的预测较为准确,

193 偏差小, 预测参数与实测弹道最高点位置投影偏差小于 100m, 正向修正效果明显。



194

195 图 5. 湛江(a)、梅州(b)仰角 62° 和 61° 人影火箭弹上升阶段弹道曲线

196 (绿线表示生产厂家参考弹道, 深蓝线表示模型预测弹道(探空), 浅蓝线表示模型预测弹道(风廓线), 蓝点表示试验最高

197 点, X 轴沿发射方向)

198 Fig. 5 Ascending phase trajectory of field test at Zhanjiang and Meizhou which elevations were 62° and 61°

199 (green lines show reference trajectory from manufacturer, dark blue lines show model calculating trajectory which based on sounding

200 data, light blue lines show model calculating trajectory which based on wind profile data, blue points shows highest of trajectory, X-axis

201

202

203 结合生产厂家提供的地面风速对 WR-98 型火箭弹的参考修正偏角信息，当纵风或横风
204 大于 3m/s 进行修正。而本文试验地面风速小于 3m/s（表 1），未达到风偏修正条件，另外
205 湛江徐闻试验的地面风速仅为 1.1m/s，但实际发射中弹道存在明显侧偏，侧偏量大于 5°，
206 该侧偏量大于仰角 62° 横风 3m/s 对应的参考修正角度的 1.4 倍。由梅州五华试验可得，地
207 面风场与大气低层风向不同，不同高度风场对弹道有互相修正效果，能更好把握侧偏程度。
208 而且在实际大气中，风场具有明显的不均一特征，上下层切变明显（刘建等，2015），仅使
209 用单层风场信息修正弹道侧偏效果有限。对比参考弹道特征值，利用探空和风廓线雷达资料
210 进行预测的 2 种弹道参数（包括 L, H, ΔD ）比参考值更接近实际情况。若考虑最高点投影
211 位置偏差，利用风廓线资料进行预测的效果最优。综上可推测垂直风场对火箭弹飞行状态影
212 响明显，且在地面弱风，大气垂直风切变明显条件下，参考气象要素模型对火箭弹飞行状态
213 修正效果更优。

214 同一时刻风廓线和探空测风在近地层以上相关性很好，均可较好反映低层风场信息。火
215 箭弹上升飞行状态受垂直风场影响明显，选用接近实际发射时的风场信息能更好地预测出弹
216 道变化情况。在进行弹道预测时，当天气稳定，如受均压场控制时，选用最接近发射时大气
217 状态的探空和风廓线资料均能较好预测弹道特征；但当有天气系统过境影响时，选取邻近站
218 点、接近计划时刻的风廓线资料预测效果更好。

219 陈健伟等（2018）指出当仅低层风切变层厚度增大时，火箭弹飞行姿态变化趋缓。根据
220 模型计算结果，考虑环境风场对主动段影响的弹道特征与实际较为一致。结合人影火箭弹飞
221 行受力状态和主动段高度可推测，1000m 高度以下的低层风场对弹道特征影响显著。此外，
222 利用炮兵标准气象条件中空气密度关系和试验 1 风廓线风场进行模拟，对比表 4 中模型计算
223 结果，偏角无明显变化，射高、射程变化幅度小于 70m，弹道特征较为相似，密度对飞行状
224 态的影响较小。空气密度主要影响火箭弹所受空气阻力，进而影响人影火箭弹运动速度和射
225 程、射高。

226

227 3 结论和讨论

228 本文基于实测气象数据和弹道原理对火箭弹在真实大气中运动特征进行分析，建立了人
229 影火箭弹飞行简单模型，对比外场试验结果，主要结论如下：

230 (1) 模型能较好的反映气象因素对人影火箭弹飞行特性的影响。其中低层风场的风速、

231 风向对弹道影响最为显著。另外,考虑邻近作业点、时次相近的气象要素对火箭弹飞行的影
232 响,可以对弹道特征有较好修正作用,尤其是在地面弱风且垂直风切变明显的大气条件下。
233 综合考虑密度、邻近时刻风场的方案对弹道修正效果最优。

234 (2) 模型在不同下垫面、不同季节均有较好的适用性,可以预测该型人影火箭弹在实际
235 大气状况中的弹道轨迹信息,为实际作业中科学选取作业仰角、方位角提供参考。

236 目前研究受限于试验开展情况,未能有效验证模型在有利增雨条件下的适用性,后续将
237 进一步开展相关试验。此外,受外场试验空域和数据质量不稳定等因素限制,模型验证仅基
238 于两次试验的首枚 GPS 火箭弹数据,代表性不足。未来将完善试验方案设计,减少干扰因
239 素,增加试验样本数量,进一步验证模型的可靠性和代表性。

240

241 致谢:感谢湛江徐闻县气象局、梅州五华市气象局对本研究开展外场试验的大力支持。

242

243 参考文献

- 244 陈健伟,王良明,李子杰,2018.两种典型低空风切变对火箭弹弹道特性的影响[J].北京航空航天大学学报,44(5):1008-1017.
245 Chen J W, Wang L M, Li Z J, 2018. Influence of two typical kinds of low-level wind shear on ballistic performance of rockets[J]. J
246 Beijing Univ Aeronaut Astronaut, 44(5): 1008-1017 (in Chinese).
- 247 陈健伟,王良明,李子杰,2020.过山气流低空风切变对野战火箭弹弹道特性影响分析[J].空军工程大学学报(自然科学版),22(1):
248 64-70. Chen J W, Wang L M, Li Z J, 2020. An analysis of influence of airflow over mountain wind shear on ballistic performance of
249 rockets[J]. J Air Force Eng Univ (Nat Sci Ed), 21(1): 64-70 (in Chinese). (查阅网上资料,未找到本条文献刊名缩写,请确认)
- 250 陈羿辰,何晖,2017.基于偏振雷达的积层混合云降水增雨潜力识别方法研究[J].大气科学,41(3):578-592. Chen Y C, He H, 2017.
251 A study to determine enhancement potential for convective-stratiform mixed precipitation based on polarimetric radar[J]. Chin J
252 Atmos Sci, 41(3): 578-592 (in Chinese).
- 253 董晓波,王晓青,付娇,等,2020.人工增雨防雹火箭弹道跟踪系统的研制及初步试验[J].气象,46(6):850-856. Dong X B, Wang X
254 Q, Fu J, et al, 2020. Development and preliminary test on ballistic tracking system of artificial precipitation enhancement and
255 anti-hail rocket[J]. Meteor Mon, 46(6): 850-856 (in Chinese).
- 256 龚玺,陈起英,倪长健,等,2023.基于高垂直分辨率探空数据对五种典型下垫面湍流分布特征分析[J].气象,49(8):901-914.
257 Gong X, Chen Q Y, Ni C J, et al, 2023. Turbulence distribution characteristics of five typical underlying surfaces based on high
258 vertical resolution radiosonde data[J]. Meteor Mon, 49(8): 901-914 (in Chinese).
- 259 贺园园,孟鲁闽,王梅,2010.GPS高程拟合在工程测量中的应用研究[J].测绘与空间地理信息,33(2):127-129. He Y Y, Meng L M,
260 Wang M, 2010. The application research of GPS elevation interpolation in engineering survey[J]. Geomat Spat Inform Technol,
261 33(2): 127-129 (in Chinese).
- 262 胡志晋,1981.人工降水的原理和现状[J].气象,7(2):44-45. Hu Z J, 1981. The principle and current situation of precipitation
263 enhancement[J]. Meteor Mon, 7(2): 44-45 (in Chinese). (查阅网上资料,未找到本条文献英文翻译,请确认)
- 264 黄美元,2011.我国人工降水亟待解决的问题和发展思路[J].气候与环境研究,16(5):543-550. Huang M Y, 2011. Urgent problems
265 and thinking of development for precipitation enhancement in China[J]. Climatic Environ Res, 16(5): 543-550 (in Chinese).
- 266 李红斌,周德平,濮文耀,2005.火箭增雨作业部位和催化剂量的确定[J].气象,31(10):42-46. Li H B, Zhou D P, Pu W Y, 2005. The
267 determination of catalyzing points and project quantity in rocket rain enhancement[J]. Meteor Mon, 31(10): 42-46 (in Chinese).
- 268 李红斌,傅瑜,王秀萍,等,2016.一次层状云火箭增雨作业效果分析[J].气象,42(11):1402-1409. Li H B, Fu Y, Wang X P, et al,

269 2016. Effect verification and analysis for artificial precipitation enhancement of stratiform cloud by rocket in Dalian[J]. Meteor Mon,
270 42(11): 1402-1409 (in Chinese).

271 黎祖贤, 刘红武, 廖俊, 等, 2016. 基于外弹道计算的人影高炮作业安全评估方法[J]. 气象科技, 44(1): 152-156. Li Z X, Liu H W,
272 Liao J, et al, 2016. A safety assessment method of weather modification operation based on external trajectory calculation[J]. Meteor
273 Sci Technol, 44(1): 152-156 (in Chinese).

274 刘建, 吴兑, 范绍佳, 2015. 珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征[J]. 环境科学, 36(11): 3989-3998. Liu J, Wu D, Fan S J,
275 2015. Distribution of regional pollution and the characteristics of vertical wind field in the Pearl River Delta[J]. Environ Sci, 36(11):
276 3989-3998 (in Chinese).

277 刘俊邦, 张猛, 朱建峰, 2013. 非标准气象条件下火炮外弹道仿真[J]. 指挥控制与仿真, 35(2): 80-84. Liu J B, Zhang M, Zhu J F,
278 2013. Gun exterior ballistics simulation analysis under nonstandard meteorological conditions[J]. Command Control Simul, 35(2):
279 80-84 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献刊名缩写, 请确认)

280 刘诗军, 胡志晋, 游来光, 2005. 碘化银核化过程的数值模拟研究[J]. 气象学报, 63(1): 30-40. Liu S J, Hu Z J, You L G, 2005. The
281 numerical simulation of AgI nucleation in cloud[J]. Acta Meteor Sin, 63(1): 30-40 (in Chinese).

282 刘卫国, 史月琴, 党娟, 等, 2023. 基于火箭和高炮真实催化轨迹的一次对流云消减雨的数值模拟[J]. 大气科学, 47(2): 430-452.
283 Liu W G, Shi Y Q, Dang J, et al, 2023. Numerical simulation of a convective cloud rainfall reduction based on the realistic seeding
284 trajectories of rocket and artillery[J]. Chin J Atmos Sci, 47(2): 430-452 (in Chinese).

285 楼小凤, 傅瑜, 苏正军, 2021. 人工影响天气碘化银催化剂研究进展[J]. 应用气象学报, 32(2): 146-159. Lou X F, Fu Y, Su Z J, 2021.
286 Advances of silver Iodide seeding agents for weather modification[J]. J Appl Meteor Sci, 32(2): 146-159 (in Chinese).

287 潘雯菁, 吴奕霄, 周嘉健, 等, 2019. 南京青奥会开幕式期间人工减雨作业对雨滴谱的影响分析[J]. 气象科学, 39(2): 237-246. Pan
288 W J, Wu Y X, Zhou J J, et al, 2019. Impact analysis for artificial rain reduction operation on raindrop spectrum of the opening
289 ceremony of the Youth Olympic Games in Nanjing[J]. J Meteor Sci, 39(2): 237-246 (in Chinese).

290 钱杏芳, 林瑞雄, 赵亚男, 2000. 导弹飞行力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社: 36-160. Qian X F, Lin R X, Zhao Y N, 2000. Flight
291 Mechanics of Guided Missile[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press: 36-160 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本
292 条文献英文翻译, 请确认)

293 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等, 2013. 大气物理学: 第2版[M]. 北京: 北京大学出版社: 285-286. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al,
294 2013. Atmospheric Physics[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University Press: 285-286 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献
295 英文翻译, 请确认)

296 王栋成, 邱黎, 董旭光, 等, 2019. 济南边界层风廓线雷达与 L 波段雷达成风探空测风对比[J]. 气象, 45(8): 1169-1180. Wang D C,
297 Qiu C, Dong X G, et al, 2019. Comparing strong wind data observed by boundary layer wind profiling radar and L-Band radar in
298 Jinan[J]. Meteor Mon, 45(8): 1169-1180 (in Chinese).

299 王丽吉, 陈晔峰, 吴书成, 等, 2020. 对风廓线雷达和 L 波段雷达成风探空观测的水平风场的一致性评估[J]. 浙江大学学报(理学版),
300 47(5): 593-600. Wang L J, Chen Y F, Wu S C, et al, 2020. Consistency assessment of the horizontal wind field based on the data
301 from the wind profiler radar and the L-Band upper-air meteorological sounding[J]. J Zhejiang Univ (Sci Ed), 47(5): 593-600 (in
302 Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献刊名缩写, 请确认)

303 王田田, 尹宪志, 黄山, 等, 2019. 基于空间均匀定常风场的人影作业高炮安全射界修正[J]. 干旱气象, 37(6): 1005-1011. Wang T T,
304 Yin X Z, Huang S, et al, 2019. Revisal about safe firing area of weather modification operation based on uniform wind field[J]. J
305 Arid Meteor, 37(6): 1005-1011 (in Chinese).

306 吴汉洲, 宋卫东, 张磊, 等, 2015. 低空风场建模与对弹丸弹道特性影响的研究[J]. 军械工程学院学报, 27(4): 38-42. Wu H Z,
307 Song W D, Zhang L, et al, 2015. Low-level wind model building and its influence on trajectory characteristic of projectiles[J]. J
308 Ordnance Eng Coll, 27(4): 38-42 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献刊名缩写, 请确认)

309 吴蕾, 陈洪滨, 康雪, 2014. 风廓线雷达与 L 波段雷达成风探空测风对比分析[J]. 气象科技, 42(2): 225-230. Wu L, Chen H B, Kang X,
310 2014. Comparison between wind profiler and L band upper-air meteorological sounding system[J]. Meteor Sci Technol, 42(2):
311 225-230 (in Chinese).

312 姚展予, 2006. 中国气象科学研究院人工影响天气研究进展回顾[J]. 应用气象学报, 17(6): 786-795. Yao Z Y, 2006. Review of

313 weather modification research in Chinese academy of meteorological sciences[J]. *J Appl Meteor Sci*, 17(6): 786-795 (in Chinese).
314 姚展予, 姚祖刚, 胡向峰, 等, 2024. 太行山地区一次人工防雹效果物理检验[J]. *大气科学*, 48(5): 1866-1878. Yao Z Y, Yao Z G, Hu
315 X F, et al, 2024. Physical evaluation of hail suppression effects in the Taihang Mountain area[J]. *Chin J Atmos Sci*, 48(5): 1866-1878
316 (in Chinese).
317 赵鸣, 黄新兵, 1999. 关于边界层阻力定律在非定常均匀条件下的推广[J]. *气象学报*, 57(1): 45-55. Zhao M, Huang X B, 1999. On
318 the extension of the resistance law for PBL to non-stationary and inhomogeneous conditions[J]. *Acta Meteor Sin*, 57(1): 45-55 (in
319 Chinese).
320 朱燕君, 姚莉, 李小泉, 2002. 固定几何高度上大气密度的计算方法[J]. *气象*, 28(2): 9-12. Zhu Y J, Yao L, Li X Q, 2002. Methods of
321 calculating atmospheric density at fixed altitude[J]. *Meteor Mon*, 28(2): 9-12 (in Chinese).
322 French J R, Friedrich K, Tessendorf S A, et al, 2018. Precipitation formation from orographic cloud seeding[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*,
323 115(6): 1168-1173.
324 Wang J, Yue Z G, Rosenfeld D, et al, 2021. The evolution of an AgI cloud-seeding track in central China as seen by a combination of
325 radar, satellite, and disdrometer observations[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 126(11): e2020JD033914.
326

