

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 Q, Fu J, et al, 2020. Development and preliminary test on ballistic tracking system of artificial precipitation enhancement and anti-hail rocket[J]. Meteor Mon, 46(6): 850-856(in Chinese).

# 人工增雨防雹火箭弹道跟踪系统的研制及初步试验\*

董晓波<sup>1,2</sup> 王晓青<sup>2</sup> 付娇<sup>2</sup> 胡海涛<sup>3</sup> 张权<sup>3</sup> 杨洋<sup>2</sup> 吕峰<sup>2</sup>

1 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050020

2 河北省人工影响天气办公室, 石家庄 050020

3 中国航天科技集团公司第四研究院中天火箭公司, 西安 710025

**提 要:** 由于受到高空风场的影响, 人工增雨防雹火箭真实的弹道轨迹和射程与理论弹道值具有不一致性。为增强实施增雨防雹作业的科学性、精准性及其作业效果评估准确性, 研制了一套人工增雨防雹火箭播撒作业跟踪系统。该系统分为火箭定位系统和数据传输系统两部分, 利用卫星定位模块加上数据传输电台模式将火箭飞行轨迹实时传输至地面。并开展了一次人工增雨防雹火箭弹道跟踪实弹发射试验, 发射两发人工增雨防雹测试火箭, 除初始阶段 4~5 s 卫星定位失锁而没有数据外, 其余时间所有数据均接收完整。结合高空风场数据对人工增雨防雹测试火箭进行风偏修正后的实际弹道更接近于理论弹道, 风偏修正意义明显, 有利于增雨防雹火箭精准作业。

**关键词:** 增雨防雹火箭, 卫星定位, 数据传输, 弹道轨迹

中图分类号: P482

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.06.011

## Development and Preliminary Test on Ballistic Tracking System of Artificial Precipitation Enhancement and Anti-Hail Rocket

DONG Xiaobo<sup>1,2</sup> WANG Xiaoqing<sup>2</sup> FU Jiao<sup>2</sup> HU Haitao<sup>3</sup>  
ZHANG Quan<sup>3</sup> YANG Yang<sup>2</sup> LYU Feng<sup>2</sup>

1 Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050020

2 Hebei Weather Modification Office, Shijiazhuang 050020

3 Shaanxi Zhongtian Rocket Technology Co., Ltd. of the Fourth Academy of CASC, Xi'an 710025

**Abstract:** Due to the influence of upper-air wind, the actual ballistic trajectory and range of the artificial precipitation of anti-hail rocket are not inconsistent with the theoretical ballistic values. A tracking system of artificial precipitation enhancement and anti-hail rocket for seeding operation was developed in order to scientifically and precisely enhance the operation and accurately evaluate the effect of the seeding. The system consists of rocket positioning and data transmission. It uses satellite positioning module and the data transmission station mode to transmit the rocket flight trajectory to the ground in real time. Two artificial precipitation enhancement and anti-hail rockets were launched to carry out an artificial precipitation enhancement and anti-hail rocket ballistic tracking experiment. The results showed that all data were received completely except for the initial stage of 4—5 seconds without data when the satellite positioning was out of lock. The actual trajectory of the rocket after wind deviation correction is closer to the theoretical one, and the effect is significant, which is conducive to the precise operation of the rocket for precipitation

\* 国家重点研发计划(2018YFC1507900)和河北省财政厅项目(HBRYWCSY\_2017\_00)共同资助

2019 年 4 月 13 日收稿; 2019 年 9 月 20 日收修定稿

第一作者: 董晓波, 主要从事大气气溶胶与云降水相互作用及其气候效应的研究. Email: xb.dong@qq.com

enhancement and hail suppression.

**Key words:** precipitation enhancement and anti-hail rocket, satellite positioning, data transmission, ballistic trajectory

## 引言

人工影响天气主要是运用飞机、高炮、火箭等运载工具或利用有利地形抬升气流将 AgI、干冰等催化剂送入云中适当位置进行播撒,以达到人工增雨(雪)、人工防雹、人工消雾、人工消减雨、人工防霜等目的(段婧等,2017;毛节泰和郑国光,2006;吴万友等,2012)。火箭进行人工增雨防雹作业始于20世纪50年代,南斯拉夫和苏联分别于1953—1958年和1958—1959年使用了最初型号的防雹火箭弹进行防雹试验(Battan,1977),到80年代,这些国家的防雹火箭作业系统已发展成为主要作业工具。我国在人工增雨和防雹作业中所使用的增雨防雹火箭作业系统,大多始于20世纪80年代(郭学良,2010)。

和其他作业工具比较,利用火箭发射输送 AgI 催化剂,具有播撒集中、冰核浓度高的特点,基本上能够控制目标区范围,特别适合于飞机难以进入的对流云人工增雨和防雹作业(中国气象局科技发展司,2003;李红斌等,2005;祝晓芸和姚展予,2017),因而在全国范围内得到迅速推广和应用。虽然针对火箭人工增雨提出了不同季节、不同天气形势下不同的增雨作业方案(白先达,2013),但人工影响天气作业只有做到“三个适当”,即适当的催化时间、适当的催化剂量、适当的催化部位,才能取得成功(郑国光和郭学良,2012;李金枝等,2008),这就对火箭发射弹道的准确度和稳定性以及准时爆炸或燃烧等功能提出了较高的要求(邵洋等,2014)。目前,多数增雨防雹火箭厂家提供的火箭弹道射程数据均为无风条件下的理论弹道射程数据(孙百安和姜水平,2010),未见有增雨防雹火箭真实弹道轨迹和射程数据。由于无控火箭具有“迎风偏”的特点,在降雨、冰雹恶劣天气条件下受到高空风向、风速的影响,火箭真实的弹道轨迹和射程能否与理论计算的弹道轨迹保持一致具有很大的不确定性(苏春芹和莫蕤,2001;孙建东等,2014),这就使得按照理论弹道轨迹发射的增雨防雹火箭不一定能达到理想的作业部位,为实施增雨防雹科学化、精准化作业以及增雨防雹作业效果评估带来了很大的难度。同时,多数型

号的增雨防雹火箭在发射到达顶点后采用降落伞的方式,将火箭残骸带至地面(赵丽斌,2019)。由于火箭开伞后的飞行轨迹具有“随风飘”的特点,而理论弹道轨迹只能估算出火箭不能正常开伞时的落点,所以火箭正常飞行时的具体落点无法预先估算出来,这就为人工增雨防雹作业的安全性带来很大的隐患。

因此,获取增雨防雹火箭的定位信息并将其飞行轨迹实时传输至地面作业人员,成为火箭增雨防雹作业中的一项关键技术研究。增雨防雹火箭具有飞行速度快(最快可达  $800 \sim 1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),播撒时间短(15~40 s)的特点(陈光学,1997),在不增加高成本的基础上,需要实现火箭飞行轨迹的快速定位和数据的实时传输。目前常规采取的数据传输方式主要有卫星通信、4G 网络通信和电台通信三种方式。卫星通信中北斗卫星导航系统的短报文通信功能,一般是每分钟1个数据包,每个数据包可携带约120字节用户数据(王春芳等,2014),传输间隔时间太长,不宜应用在增雨防雹火箭上。4G 网络通信方式可采取增雨防雹火箭预存储弹道轨迹数据,待火箭落地后利用地面基站4G信号将存储的弹道轨迹数据传回,而根据人影作业安全射界的要求,火箭残骸需降落在无人区域,该区域4G信号的强弱未知,同时该传输方式无法实时将位置信息传输至地面作业人员,有明显的滞后性。本文介绍的人工增雨防雹火箭弹道跟踪系统则采取数据传输电台的模式进行传输,可实现以秒数据的形式将增雨防雹火箭弹道轨迹数据实时传输至地面作业人员,可以精确地获取作业火箭空中位置和飞行方向等弹道参数,有利于作业人员及时调整作业方案,进而可增强增雨防雹作业的科学性和精准性。

## 1 系统组成及技术原理

“人工增雨防雹火箭弹道跟踪系统”由火箭定位系统和数据传输系统两部分组成,定位系统采用高精度、高接收灵敏度的卫星定位模块,实现对火箭高速飞行过程中的快速定位以及对空中位置和飞行方向等弹道参数的精确测量;数据传输系统采用抗干

扰能力强、接收灵敏度高、体积小、功耗低的数据传输电台模式,实现对弹体数据的实时传输。

### 1.1 火箭定位系统

火箭定位系统采用了卫星信号快速捕获技术和卫星信号跟踪技术。卫星信号快速捕获技术,综合考虑了北斗、GPS 两种系统信号的融合处理逻辑结构设计,提出了多频点共用信号捕获方法(图 1),该方法有别于国内外现有导航芯片采用的不同频点信号独立处理方法(图 2),具有消耗资源小、能够降低芯片系统功耗的优点。

多频点共用信号捕获方法中的捕获通道独立工作,不依赖于跟踪环的相关积分结果,并且和跟踪环在不同的时钟下工作,工作运行能力单独可控,可实时高效完成信号捕获,并把捕获的 DOPPLER、码相位等参数提供给载波跟踪环;同时,该捕获通道只需要通过简单的配置参数和指令,就能迅速实现对不同频点信号的捕获运算。

现有多频信号捕获方法中的捕获通道依赖跟踪环的相关积分结果,其工作时钟和跟踪环同步,无法单独提高信号捕获效率,在捕获效能和灵活性上不如多频点共用信号捕获方法。针对多频点的信号捕获,此类方法必须都要拷贝设计一套原理相同的捕获逻辑,如果每个频点的捕获通道均采用了 FFT 算法,那么其消耗的捕获逻辑资源将远超过多频点共用信号捕获方法,因此采用国内外现有多频信号捕获方法时,为了实现较低功耗运行,通常只针对某一个信号频点实现信号快速捕获。

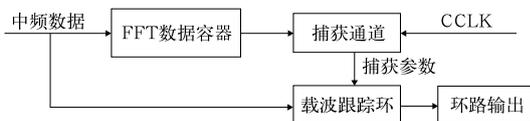


图 1 多频点共用信号捕获方法

Fig. 1 Acquisition method of multi-frequency point-sharing signal

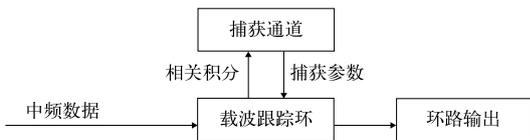


图 2 国内外现有多频信号捕获方法

Fig. 2 Existing acquisition method of multi-frequency point at home and abroad

为实现对卫星信号的快速捕获,北斗多模卫星信号共享资源捕获算法是针对外部融合输入的数字中频信号,建立一个 FFT 专用数据容器,然后针对每个不同频点扩频信号进行快速并行捕获分析。对输入的卫星数字中频信号载波剥离以后先进行 FFT 运算,然后再进行 IFFT 运算,一次性得到所有码相位的相关峰值,当本地码和输入信号的码对准,本地载波和输入信号的载波准时,将会积累出能量,从而得到码不确定度和频率不确定度,完成信号捕获,并送入环路跟踪。该方法对目前通用的单系统卫星信号捕获理论进行了大幅度的改进,采用多频点共用通道信号捕获设计模式,每个频点的信号都能够得到快速捕获处理,对于多模式导航,提高了捕获效能,通过资源共享,既为信号并行捕获逻辑节约了资源,又能够满足所有卫星频点输入信号的快速捕获,通过该方法把原来的卫星信号捕获时间从 20~30 s 缩短到了 5 s 以内,极大地提升了接收机冷启动定位时间性能。

卫星信号跟踪技术,采用市场上普通导航接收机所不具备的动态自适应高灵敏度卫星信号跟踪技术,实时根据卫星导航接收机信号功率的变化计算值对跟踪环路类型、环路参数和积分累加时间进行动态调节,能够将跟踪灵敏度提高 6~10 dB。同时,采用载波环对码环的动态辅助跟踪的技术方法,提高接收机通道信号跟踪精度和环路稳定性等性能。

### 1.2 数据传输系统

数据传输系统由发射和接收两部分组成,其示意如图 3。

#### 1.2.1 发射部分

发射部分由弹体、数据采集传输系统两部分组成,其中数据采集传输系统是在原有弹体结构的基础上,由弹体厂家提供结构并安装数据采集传输模块。

#### 1.2.2 接收部分

接收部分由数据接收及软件解析显示组成。其中数据接收包括数据接收终端、天线、馈线;软件解析包括电脑终端和人工增雨防雹火箭实时定位显示系统软件,定位显示系统能够实时将人工增雨防雹火箭飞行轨迹显示至地图上,包括日期、时间、经纬度、高度、速度、方位角、卫星搜星数、距离等参数(图 4)。

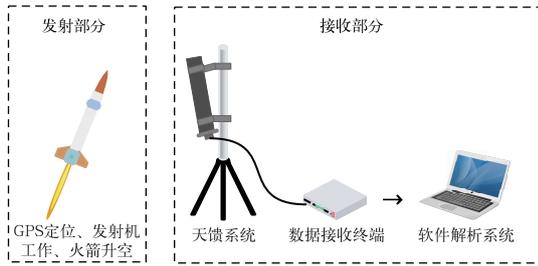


图 3 数据传输系统示意图

Fig. 3 The diagram of data transmission system

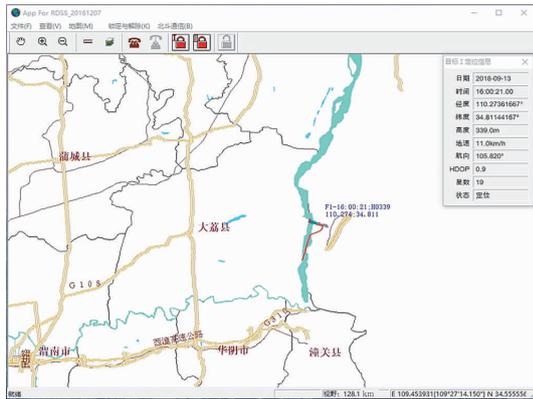


图 4 人工增雨防雹火箭实时定位显示系统

Fig. 4 Real-time positioning and display system of artificial precipitation enhancement and anti-hail rocket

## 2 测试试验设备及试验方案

2018年9月13日,在兵器051基地试验场开展了人工增雨防雹火箭实时定位跟踪试验。

### 2.1 试验设备

参试设备包括带有定位系统的人工增雨防雹测试火箭2枚、数据接收处理设备1套、TK-2探空火箭1枚、TK-2数据接收处理设备1套、发射架、发控器等。

人工增雨防雹测试火箭在陕西中天火箭技术股份有限公司完成总装,该火箭由安全着陆系统、定位舱、播撒系统、发动机四部分组成(图5)。其中安全

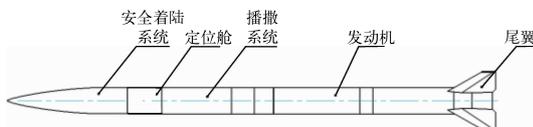


图 5 带有 GPS 定位系统人工增雨防雹测试火箭

Fig. 5 Artificial precipitation enhancement and anti-hail test rocket with GPS positioning system

着陆系统、播撒系统、发动机均采用批产的 WR-98 增雨防雹火箭产品,定位舱由人工增雨防雹火箭弹道跟踪系统研发方提供。

人工增雨防雹测试火箭与业务使用的 WR-98 增雨防雹火箭气动外形一致,仅长度增加 90 mm (6%),总质量增加 300 g(3%)。气动阻力平均相差不超过 2.2%,二者技术参数相差很小。所以,人工增雨防雹火箭实测弹道可以表征 WR-98 增雨防雹火箭的飞行弹道。WR-98 增雨防雹火箭与弹道测试火箭技术参数对照表见表 1。

表 1 WR-98 增雨防雹火箭(陈光学,2008;卢培玉,2010)与弹道测试火箭技术参数对照

Table 1 Comparison of technical parameters between WR-98 anti-hail rocket and ballistic test rocket

项目	WR-98 火箭	人工增雨防雹测试火箭
火箭直径/mm	82	82
火箭长度/mm	1453	1543
火箭质量/kg	8.3	8.6
催化剂质量/kg	630	630
催化剂起始工作时间/s	7	7
催化剂工作时间/s	40	40
开伞时间/s	33	33
残骸落速/(m·s <sup>-1</sup> )	≤8	≤8.6(计算值)

WR-98 增雨防雹火箭理论弹道轨迹参数见图 6,理论弹道轨迹计算原理为:将火箭运动简化为质点运动,通过对火箭受力分析,建立三自由度动力学微分方程,采用四阶龙格库塔法对方程进行求解得到火箭的飞行弹道。火箭动力采用发动机实测推力数据,气动力采用 CFD 计算数据,再用平均实测弹道数据进行修正得到理论弹道。

### 2.2 试验方案

整个试验分 3 步完成:

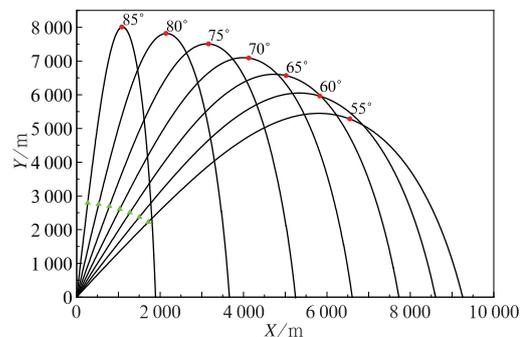


图 6 WR-98 增雨防雹火箭弹道理论射表

Fig. 6 Theoretical trajectory curves of WR-98 rocket projectile

(1)首先发射一枚 TK-2 探空火箭,观测试验现场 0~7 km 高度范围的温度、风场等气象参数。

(2)根据试验场地要求,按靶道方向以 60°俯仰角(人工增雨防雹作业常用射角)发射第一枚人工增雨防雹测试火箭,并测试该火箭飞行轨迹传输及接收功能。

(3)对比第一枚人工增雨防雹测试火箭弹道轨迹与理论弹道轨迹,并依据风场数据进行风偏修正。依据风偏修正结果调整发射架的俯仰角、方位角,并发射第二枚人工增雨防雹测试火箭,以验证风偏修正结果,以期通过风偏修正使得人工增雨防雹测试火箭实际运行轨迹与理论弹道轨迹一致。

### 3 试验结果及数据分析

#### 3.1 试验场地面及高空气象数据分析

试验当天近地面微风、小雨,地面风速为  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。采用 TK-2 探空火箭对高空风场进行测试,测试结果:高空为西南风,风场由低到高速逐渐增大(表 2)。由于探空仪出现一些故障,仅获取到 4000~7000 m 高度的气象数据,4000 m 以下数据未获取。

表 2 探空火箭获取的高空风速、风向  
Table 2 Upper-air wind speed and direction obtained by sounding rocket

序号	高度/m	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	风向/ $^{\circ}$
1	6500~7000	22 左右	238(西南风 32°)
2	6000~6500	20 左右	243(西南风 27°)
3	5000~6000	20 左右	250(西南风 20°)
4	4000~5000	12 左右	225(西南风 45°)

#### 3.2 试验结果

两发人工增雨防雹测试火箭均按 60°俯仰角发射,试验实测三维弹道曲线见图 7,图中所采用的坐标系为当地北天东坐标系,黑色曲线为无风条件下火箭的理论弹道曲线,红色曲线为第一发人工增雨防雹测试火箭飞行弹道曲线,蓝色曲线为第二发人工增雨防雹测试火箭弹道曲线。从飞行轨迹可看出,两发人工增雨防雹测试火箭飞行轨迹具有明显的转折点为开伞点,开伞前为火箭弹道飞行轨迹,开伞后为火箭残骸在降落伞作用下随风飘的飞行轨迹。

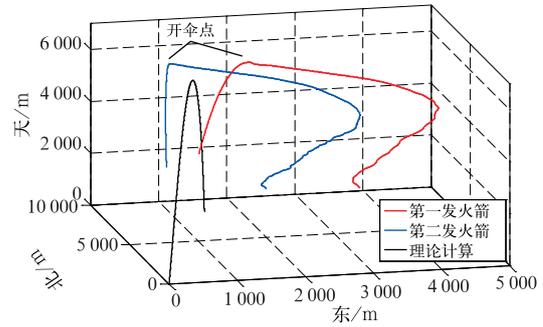


图 7 实测三维弹道曲线

Fig. 7 The trajectory curve of measured three-dimensional rocket projectile

由于高空风场为西南风,无控火箭具有“迎风偏”的特点,因此第一发人工增雨防雹测试火箭发射后飞行轨迹呈向东偏斜。为达到第二发人工增雨防雹测试火箭飞行轨迹与理论弹道轨迹相一致的目的,在第二发人工增雨防雹测试火箭发射前按探空获取的高空风场进行了风偏修正。但由于风场数据不全,只有 4000~7000 m 高度的气象数据,因此,低空风场采用了  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的地面风场参数,再依据 4000 m 以上的风场参数进行线性插值,得到高空风场数据。最后采用弹道计算软件进行风偏修正计算,修正角度为发射架向北旋转  $6^{\circ}$ 。如图 7 所示,第二发人工增雨防雹测试火箭发射后的实际飞行弹道轨迹与理论弹道轨迹相比偏北,说明修正角度偏大。

通过对弹道轨迹对应时间高度的二维曲线见图 8,由图可以看到,第一发火箭发射后卫星定位失锁约 4 s,此后所有数据均接受完整;第二发火箭发射后卫星定位失锁约 5 s,此后数据也接收完整。

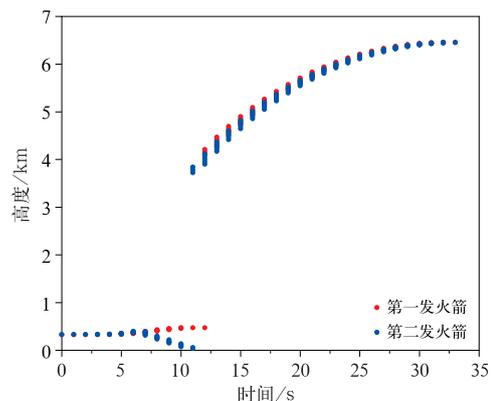


图 8 弹道轨迹时间-高度曲线

Fig. 8 The time-height curve of rocket projectile

沿垂直平面投影的高度射程 Y-X 曲线见图 9, 两发人工增雨防雹测试火箭最大弹道高度分别为 6456 和 6453 m(相对地面高度分别为 6126、6123 m)。其理论弹道最大高度应为 6380 m(相对地面高度为 6050 m), 两发人工增雨防雹测试火箭实际最大弹道高度相差 3 m, 与理论弹道最大高度相差约 70 m。

沿水平面投影的侧偏曲线见图 10(图中所有高度均为相对地面高度, 即减去海拔 330 m 后的高度)。在高空风场存在的情况下, 无控火箭具有迎风偏的特点, 试验当日, 在高空风场影响下, 第一发人工增雨防雹测试火箭弹道顶点与理论弹道顶点侧偏约 850 m, 第二发人工增雨防雹测试火箭弹道顶点与理论弹道顶点侧偏约 630 m, 证明风偏修正的效果比较明显。

依据卫星定位系统可以测量人工增雨防雹测试火箭残骸的落速, 其中第一发人工增雨防雹测试火箭最后 5 s 的平均落速为  $8.29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 第二发测试火箭最后 5 s 的平均落速为  $5.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。落速值符合 WR-98 型增雨防雹火箭理论计算落速值不大于  $8.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的落速要求。

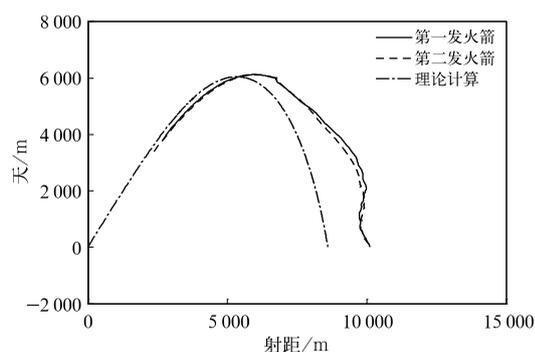


图 9 高度-射程曲线

Fig. 9 The height-range curve

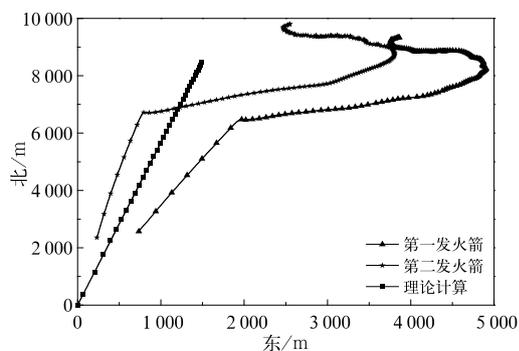


图 10 侧偏曲线

Fig. 10 The lateral deviation curve of rocket projectile

## 4 结 论

(1)人工增雨防雹火箭弹道跟踪系统可实现对火箭的快速定位及空中位置、飞行方位角等弹道参数的精确测量;除火箭飞行初期高过载、高速段卫星定位失锁外,整个飞行过程中其余时间内的弹道轨迹数据均能实时传输至地面,能够满足人工增雨防雹火箭实时定位传输需求,对于人工增雨防雹作业的指导、分析、效果评估具有极大的意义,有利于提高整个人工增雨防雹作业的科学水平。

(2)两发人工增雨防雹测试火箭均采用  $60^\circ$  射角发射,两发测试火箭实际飞行的最大弹道高度相差 3 m,与理论最大弹道高度相差约 70 m,测试火箭飞机高度具有一致性,满足人工增雨防雹作业需求;结合高空风场数据对人工增雨防雹测试火箭弹道进行了风偏修正,修正结果更接近于理论弹道,说明风偏修正意义明显,有利于增雨防雹火箭精准作业。

(3)由于人工增雨防雹火箭开伞后的运行轨迹具有“随风飘”的特点,火箭的具体落点无法预先估算出来,而采用人工增雨防雹火箭弹道跟踪系统后可以得到作业火箭准确的落点经纬度,对于人影作业的安全射界、安全性评估具有极大的帮助。

## 参考文献

- 白先达,2013. 桂林干旱风险评估及人工增雨抗旱研究[J]. 气象,39(10):1369-1373. Bai X D, 2013. Study on drought risk assessment and artificial precipitation for drought-relief in Guilin[J]. Meteor Mon,39(10):1369-1373(in Chinese).
- 陈光学,1997. 增雨防雹火箭作业系统设计与试验[J]. 固体火箭技术,20(3):1-2. Chen G X, 1997. Design and test of anti-hail rocket operation system[J]. J Solid Rocket Technol,20(3):1-2(in Chinese).
- 陈光学,2008. 增雨防雹火箭研发回顾[C]//第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议暨中国人工影响天气事业 50 周年纪念大会论文集. 长春:中国气象学会:12-16. Chen G X, 2008. Review of research and development of rainfall enhancement and hail suppression rocket[C]//Proceedings of National Conference on Cloud Precipitation and Weather Modification and the 50th Anniversary of China's Weather Modification. Changchun: Chinese Meteorological Society:12-16(in Chinese).
- 段婧,楼小凤,卢广献,等,2017. 国际人工影响天气技术新进展[J]. 气象,43(12):1562-1571. Duan J, Lou X F, Lu G X, et al, 2017. International recent progress in weather modification technologies[J]. Meteor Mon,43(12):1562-1571(in Chinese).

- 郭学良, 2010. 大气物理与人工影响天气[M]. 北京: 气象出版社.
- Guo X L, 2010. Atmospheric Physics and Weather Modification [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 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 determination of catalyzing points and project quantity in rocket rain enhancement [J]. Meteor Mon, 31(10): 42-46 (in Chinese).
- 李金枝, 吴书君, 王凤娇, 等, 2008. 火箭防雹作业技术方法的探讨 [J]. 气象, 34(3): 112-117. Li J Z, Wu S J, Wang F J, et al, 2008. Discussion on the technical method of hail suppression with rocket [J]. Meteor Mon, 34(3): 112-117 (in Chinese).
- 卢培玉, 2010. WR-98 火箭系统在人工增雨防雹中的性能分析 [C] // 第 27 届中国气象学会年会论文集. 北京: 中国气象学会: 1-5. Lu P Y, 2010. Analysis of the performance of the WR-98 rocket system in rainfall enhancement and hail suppression [C] // Meeting of the Chinese Meteorological Society on Atmospheric Physics and Atmospheric Environment. Beijing: Chinese Meteorological Society: 1-5 (in Chinese).
- 毛节泰, 郑国光, 2006. 对人工影响天气若干问题的探讨 [J]. 应用气象学报, 17(5): 643-646. Mao J T, Zheng G G, 2006. Discussions on some weather modification issues [J]. J Appl Meteor Sci, 17(5): 643-646 (in Chinese).
- 邵洋, 刘伟, 孟旭, 等, 2014. 人工影响天气作业装备研发和应用进展 [J]. 干旱气象, 32(4): 649-658. Shao Y, Liu W, Meng X, et al, 2014. Development and application advances of cloud seeding instruments [J]. J Arid Meteor, 32(4): 649-658 (in Chinese).
- 苏春芹, 莫蕤, 2001. WR 型增雨防雹火箭作业技术要点及效果 [J]. 广西气象, 22(3): 49-50, 53. Su C Q, Mo R, 2001. Technical key points and effect of hail mitigation operation by WR rainfall and haildestroying rocket [J]. J Guangxi Meteor, 22(3): 49-50, 53 (in Chinese).
- 孙百安, 姜水平, 2010. 风对 BL-1A 型增雨防雹火箭弹道的影响及修正 [J]. 气象科技, 38(5): 625-628. Sun B A, Jiang S P, 2010. Effect of winds on trajectory of BL-1A hail-suppressing/rain-enhancing rockets and its correction [J]. Meteor Sci Technol, 38(5): 625-628 (in Chinese).
- 孙建东, 孙青, 赵刚, 等, 2014. 增雨防雹火箭飞行特征分析 [J]. 山东气象, 34(4): 37-40. Sun J D, Sun Q, Zhao G, et al, 2014. Analysis of flight characteristics of rainfall enhancement and hail suppression rocket [J]. J Shandong Meteor, 34(4): 37-40 (in Chinese).
- 王春芳, 陈永涛, 李春来, 等, 2014. 基于北斗卫星的预警信息发布技术研究及实现 [J]. 应用气象学报, 25(3): 375-384. Wang C F, Chen Y T, Li C L, et al, 2014. Technology and implementation of warning information distribution based on Beidou satellite [J]. J Appl Meteor Sci, 25(3): 375-384 (in Chinese).
- 吴万友, 黄芬根, 宾振, 等, 2012. 移动式人工增雨作业技术支撑系统的设计与实现 [J]. 气象, 38(10): 1288-1294. Wu W Y, Huang F G, Bin Z, et al, 2012. Design and implementation of mobile operation system for precipitation enhancement [J]. Meteor Mon, 38(10): 1288-1294 (in Chinese).
- 赵丽斌, 2019. WR 系列增雨防雹火箭在人工影响天气地面作业中的应用 [J]. 吉林农业, (5): 98-99. Zhao L B, 2019. Application of WR series rainfall enhancement and hail suppression rocket in ground operation of weather modification [J]. Agric Jilin, (5): 98-99 (in Chinese).
- 郑国光, 郭学良, 2012. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势 [J]. 中国工程科学, 14(9): 20-27. Zheng G G, Guo X L, 2012. Status and development of sciences and technology for weather modification [J]. Eng Sci, 14(9): 20-27 (in Chinese).
- 中国气象局科技发展司, 2003. 人工影响天气岗位培训教材 [M]. 北京: 气象出版社. Division of Science and Technology Development, China Meteorological Administration, 2003. On-the-Job Training Textbooks for Weather Modification [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 祝晓芸, 姚展予, 2017. 江西省对流云火箭增雨作业个例分析 [J]. 气象, 43(2): 221-231. Zhu X Y, Yao Z Y, 2017. Analysis of convective cloud seeding cases by rockets in Jiangxi Province [J]. Meteor Mon, 43(2): 221-231 (in Chinese).
- Battan L J, 1977. Weather modification in the Soviet Union — 1976 [J]. Bull Amer Meteor Soc, 58(1): 4-19.