

文章编号: 2096-1618(2018)04-0423-07

# 基于固体火箭和 GPS 测风技术的中低空气象探测系统关键技术研发与应用

贺文彬<sup>1</sup>, 罗俊颀<sup>2</sup>, 王 鹏<sup>3</sup>, 田 显<sup>2</sup>, 苏立娟<sup>4</sup>

(1. 陕西省气象局, 陕西 西安 710014; 2. 陕西省人工影响天气办公室, 陕西 西安 710014; 3. 陕西中天火箭技术有限公司, 陕西 西安 710014; 4. 内蒙古自治区气象科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:**介绍了一种基于固体火箭和 GPS 测风技术的中低空气象探测系统, 讨论分析接收数据与理论数据误差、GPS 定位接收中断和数据质量控制等系统研发关键技术解决方案。业务试用分析表明, 系统可以实时获取 0~7 km 大气的温、湿、压、风速、风向等气象要素剖面观测数据, 与常规 L 波段雷达资料一致性较好。通过单点和多点组网观测分析, 该系统可以为人影作业条件分析和作业方案设计提供有价值的帮助。

**关键词:**人工影响天气; 探空火箭; TK-2 GPS; 关键技术

**中图分类号:** TP311.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcui.2018.04.012

## 0 引言

人工影响天气(简称人影)作业中, 实时掌握人影作业目标区域中低空大气的温度、湿度、压力、风速、风向等详细物理参数及其变化趋势, 精细化分析不同环境下作业条件和可播度识别, 对提高人影作业方案设计和作业效果分析科学水平具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>。现有气象观测手段主要有卫星云图、天气雷达、地面气象仪器观测和探空气球观测等<sup>[2]</sup>, 无法很好地满足人影作业目标垂直探测需求<sup>[3]</sup>。为提高人工增雨防雹作业时机判断以及作业效果评估科技支撑水平, 在中国气象局人影中心支持下, 由陕西省人工影响天气办公室提出需求, 联合中国某企业立题研制基于固体火箭和 GPS 测风技术的中低空气象探测系统(型号为: TK-2 GPS, 以下简称人影探空火箭系统), 主要用于采集 7 km 以下范围内大气温度、湿度、压强、风速和风向, 以及测量点三维坐标等数据<sup>①</sup>。

## 1 探空火箭技术背景

探空火箭是利用火箭开展近地空间大气探测的一种探测工具<sup>[4]</sup>。自从 20 世纪 40 年代, 美国发射第一枚探空火箭以来, 以美国、苏联、日本、德国等为代表的国家重视并发展探空火箭技术, 陆续研制并应用于 40~1000 km 不同高度的系列探空火箭, 为航天和空间

技术研究提供技术保障<sup>[5]</sup>。20 世纪 50 年代中国开始发展探空火箭事业, 最早研究和应用主要用于海拔高度 20~80 km 大气的气象要素垂直剖面探测的气象火箭<sup>[6]</sup>。2008 年, 中国科学院牵头国家重大科学工程“子午工程”用于监测中国境内东经 120°子午链和北纬 30°纬度线上空的空间环境, 该工程由地磁(电)分系统、无线电分系统、光学分系统和探空火箭综合监测分系统构成。该工程探空火箭系统包括 70 km 气象火箭和 200 km 探空火箭, 有效弥补了地基观测手段不能实现中高层大气参数剖面观测的不足, 为中国火箭探空事业发展带来了新的机遇。2010 年 6 月 3 日, 首枚气象火箭在海南探空火箭发射场成功发射<sup>[7]</sup>, 首次采用 GPS 技术获得了低纬度地区 20~60 km 高度的高精度临近空间大气温度、压力和风场的探测参数<sup>[8]</sup>。

## 2 人影探空火箭系统组成及工作原理

### 2.1 系统组成

人影探空火箭系统由 TK-2 GPS 气象探测火箭、发射控制系统和地面接收设备 3 部分组成<sup>[9]</sup>。TK-2 GPS 气象探测火箭由发动机、仪器舱、安全着陆系统和尾翼组成。其中, 发动机为火箭飞行提供动力; 仪器舱为探空仪提供结构保护, 并负责探空仪与箭体可靠分离; 安全着陆系统负责火箭残骸安全回收; 尾翼为火箭飞行提供稳定力矩, 如图 1 所示。发射控制系统由发射架和发控器组成, 发射架为火箭提供初始发射倾角和支撑的机械系统; 发控器为火箭探测飞行提供点火能量和系统检

测的电器控制系统。地面接收设备由天线、地面接收机、终端计算机组成,主要功能是:天线在终端计算机控制下实现对探空仪的自动跟踪及信号接收;地面接收机负责将接收的探空仪信号解调成数字信息后,送给终端计算机;终端计算机(含接收软件)负责探空数据采集、处理、校验和纠错,以及系统故障监测。

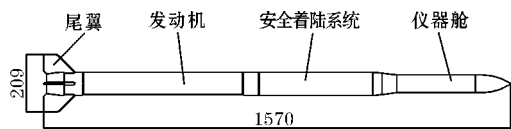


图1 TK-2 GPS人影探测火箭外形图

系统采用成熟的WR型人影火箭平台,性能稳定,发射成功率为100%,能够满足有效探测7 km的高度要求;采用探空仪参加了2010年7月广东阳江第八届国际GPS探空仪比对试验,取得综合第4名成绩,满足GCOS(全球气候观测系统)探空技术要求<sup>[10]</sup>。

## 2.2 工作原理

火箭发射升空到达预定高度后,仪器舱内的弹射装置将携带降落伞的GPS探空仪弹射到大气中,降落伞打开后带着探空仪以6 m/s左右的落速随风飘落到地面。探空仪在飘落过程中,实时获取所在位置的三维坐标以及气压、温度、湿度等基本大气物理参数,这些信息经过调制处理,经发射机变成载有相关信息的无线电波发送到地面接收设备<sup>[11]</sup>。

接收机接收到探空仪传回的无线电信号,通过解调得到探测点的气象参数信息,计算机中的数据接收处理软件对这些信息进行处理得到当地大气温度、湿度、压强、风速、风向及测点三维坐标参数。数据处理软件将这些数据写入文件进行保存,方便进一步分析处理使用。

## 3 人影探空火箭系统关键技术及解决方案

### 3.1 基于固体火箭技术和GPS测风技术的人影探空系统研究

人影探空火箭系统将成熟的固体人影火箭飞行平台和GPS探空仪有效结合,首次实现0~7 km指定区域大气参数的低成本探测,实际研制中,出现接收数据误差较大,跟踪中断等问题。

#### 3.1.1 接收数据与理论数据误差

因人影探空火箭设计原因,在火箭上升段不采集GPS数据。在火箭伞降阶段根据GPS提供的三维坐

标信息和探空仪传回的气象要素数据,计算出对应高度大气的气象要素。由于下投式探空仪工业级温度传感器的温度响应滞后,不能满足人影作业探测需求。

TK-2 GPS人影探空火箭采用时间常数小于1 s的状热敏电阻传感器;对探空仪壳体设计采用通透性更好笼式进气结构。改进后探空仪在温度响应方面有了明显提升。

#### 3.1.2 GPS定位理论坐标中断

人影探空火箭抽飞试验发现,原地面接收设备所配的单根全向天线存在“苹果效应”,探空仪飘过天线顶部(发射点上空)时正好在天线的盲点,导致探空仪过顶时段内数据不能有效接收,造成探空仪传回的位置与实际精确位置有中断。

TK-2 GPS探空火箭地面接收设备在原有水平全向天线基础上加装“十”字形阵列天线,加强天线上方的信号接收。实验结果表明,改进后的接收机能全程接收探空仪传回的数据信号,数据获取率达到100%。

## 3.2 单簧弹射分离机构

TK-2 GPS气象探测火箭系统采用了先进的GPS测风技术,GPS模块天线必须朝向天顶,探空仪在上升和回落过程中有个掉头动作,增加了仪器舱设计难度。

TK-2 GPS探测火箭仪器舱采用了火工加弹簧的探空仪弹射分离机构,该结构解决了探空仪掉头问题,满足高空定位观测需求。

## 3.3 数据质量控制

数据质量控制主要分为硬件控制和程序处理两部分。

#### 3.3.1 硬件控制设计

在数据传输中增加数据校验功能,采用循环冗余校验(CRC)<sup>[11]</sup>,因人影探空观测传输量不太大,项目采用16位CRC校验。使用CRC过程如下:首先火箭探空仪根据采集数据按以上算法生成CRC校验码,然后连同校验码一起传送,接收机将接收到的数据(包括CRC码)也按照上述算法生成CRC校验码,若最终校验码为0,则传输数据正确,否则则存在错误,这样就检查出了通信过程中的绝大部分错误。在实施过程中,还结合使用前向纠错技术(FEC),即除了能发现数据中的错误,还可以对数据中的少量错误进行纠正,从而提高了数据的利用率。

#### 3.3.2 程序处理

针对数据丢失<sup>[12]</sup>,按以下流程处理:

(1)按气压进行插值:若探测数据中气压未缺测,需按气压进行插值,先将气压进行对数化,然后再按对数化后的气压进行线性插值。

(2)按时间进行插值:若间隔时间很短,且气压值也缺失,可根据数据进行时间线性插值。

(3)样条插值:若数据间隔相对较长,可取欲插值前后部分数据进行样条插值,该方法计算量相对较大,但插值后气象要素的廓线更为光滑。

(4)插值限制:当数据缺失较多时,进行插值的实际意义不大,需对插值时间最大间隔做出限制。由于气压与高度相关性大,在对流层温度随高度递减率也大致相等,所以其最大插值时间间隔可设置较长,考虑到下投探空时间较短,最大插值时间一般不超过10多秒,而湿度一般变化很快,所以最大插值时间小于10秒为宜。由于一般缺测间隔较短(秒级),使用线性插值可以达到较好效果。

针对数据错误<sup>[12]</sup>,按以下流程检查:

(1)常规数据检查:可根据固定站探测数据进行统计得到该地区每季度高空气象要素在各高度上的统计值(或根据标准大气数据),进行数据检查时将各高度上的气象要素探测值与之进行比较,若偏离较大者,则该数据可疑,如果只有少量可疑数据,则直接剔除,再按样条进行插值修复。方法主要用于气压、温度检验,由于低空风和湿度变化随机性大,所以一般不用该方法进行检验。

(2)数值处理检查:主要是对探测数据序列运用最小二乘法进行拟合,求出残差序列,若残差大于设定的门限值,则认为该残差对应的探测值可疑,若只是发现少量的可疑探测值,则直接用拟合值替换。若有大片连续的可疑值,则保留可疑值,不作处理,防止软件误处理。采用该方法可以剔除一些孤立的小范围的错误数据,对于大范围的可疑数据,软件保留不再处理。

根据目前通信技术和传感器技术,采用以上处理措施,可从软硬件方面有效保障探空探测的数据质量。

## 4 业务试用分析

为推广应用探测火箭系统,2014年2-12月,中国气象局人工影响天气中心牵头组织,陕西、山西、内蒙古、甘肃、青海、宁夏、四川等7个省、自治区人影办开展业务试用,上海物资管理处负责产品质量检验和安全监督。2015年初,业务试用通过中国气象局减灾司组织的专家评审。

### 4.1 方案设计

业务试用安排人影作业和对比观测试验两项内容。其中作业探测要求在人影作业前发射一枚探测火箭进行增雨作业前各物理量的监测,作业结束后3 h之

内,再发射一次火箭探空进行作业后探测。为验证探测数据的一致性,进行对比试验时要求和探空站施放探测气球同时进行。作业点选择要求:紧邻探空站,距离在50 km以内;考虑安全射击条件下,选择在雷达有效探测范围内,能够实现雷达实时指挥作业,业务试用布点如图2所示。



图2 TK-2 GPS人影探测火箭试用布局示意图

### 4.2 试验结果分析

#### 4.2.1 探空火箭系统稳定性分析

根据试用方案,试验共收集到11个作业点试验数据,累计外场组织试验114次,根据观测数据及各省、自治区提供试用报告分析,剔除不规范操作及超出火箭试用条件的异常探测样本,实际正常发射火箭102枚。具体见表1。

业务试用中,TK-2 GPS人影探测系统发射火箭102枚,发射过程系统运行平稳,目测火箭弹飞行轨迹正常,发射成功率达到87.3%,探空仪出仓成功率为100%,探测数据接收成功率为86%。数据质量控制和数据转换软件能够与现有气象数据综合处理分析系统(以下简称MICAPS系统)实现对接,可处理生成数据文件和图片文件,输出MICAPS系统各特性层高空填图、温度对数压力图、风玫瑰图及涡度场、散度场等物理量场产品。

进一步分析,探测数据接收成功率较低原因主要有两点:试点地区海拔高度普遍超过1000 m,火箭开舱时间设置与高海拔地区弹道匹配性较差,实际开舱点的速度远远大于低海拔地区;发射仰角偏低导致开舱点速度增大,探空仪出舱时开伞动压随之增大,导致少量探空仪与降落伞连接失效,探空仪落速异常。经事后试验,通过调整高海拔地区火箭探空仪开舱时间,可以匹配不同海拔高度弹道,提高探测数据接收成功率。

#### 4.2.2 数据对比分析

为验证人影探空火箭探测数据的准确性和可靠



性,选取与 TK-2GPS 火箭探测数据相同的时间段的 L 波段探空资料,进行数据比对。为尽可能取得相同的天气背景,便于实验数据的分析,取气象探空观测时间发射探空火箭弹。

图 3 为 2014 年 10 月 15 日,在呼和浩特市气象局

探空站和土默特左旗把什炮点分别采用 L 波段雷达和 TK-2GPS 探空火箭进行资料对比观测,探空火箭发射地位于气象探空站西部30 km处左右。L 波段雷达观测时间 07 时 15 分,探空火箭弹发射时间为 07 时 1 分。

表 1 各省、自治区试用情况汇总表

省份及自治区	作业点	海拔高度/m	发射火箭	探空仪出舱成功	完整接收数据	数据不全	备注
陕西	延安	1290	4	4	2	2	均以发射角度 78°~80°
	长安	480	13	13	12		均以发射角度 80°~85°
甘肃	民勤	1345	11	11	8	1	火箭发射架仰角均为 85°
宁夏	银川	1200	11	11	8	1	
	永宁	1100	20	20	17		
青海	湟中	2800	8	8	8		剔除海拔超出使用范围的异常数据
内蒙古	呼和浩特	1050	3	3	3		剔除 65°仰角发射导致的异常数据
	包头	2050	4	4	4		火箭发射架仰角均为 75°
	临河	1050	4	4	4		剔除 70°仰角发射导致的异常数据
四川	宜宾	710	10	10	8	1	火箭发射架仰角均为 75°
	达州	740	14	14	10		火箭发射架仰角均为 75°
合计			102	102	84	5	

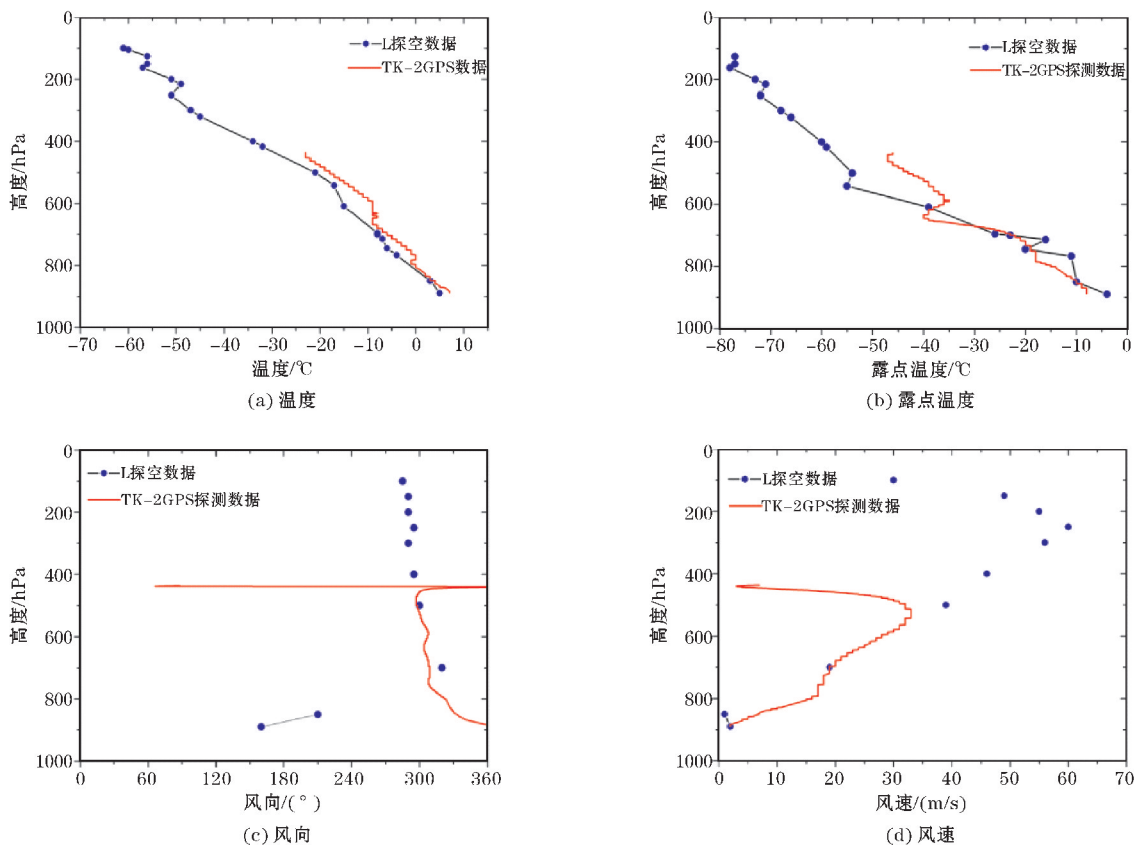


图 3 2014 年 10 月 15 日土默特左旗把什探空火箭和呼和浩特 L 波段雷达垂直廓线对比图

从图 3 看出,2 种探测手段的探空曲线有较好的一致性,火箭探空的温度比 L 波段探空的温度要高一

些,在 600~700 hPa 高度上,火箭探空的曲线有拐点,火箭探空仪能够反映出大气的逆温过程(图 3a)。两

种探测手段反演的露点温度差别较大,探空火箭的露点温度比L波段探测到的露点温度要高一些,反演的露点温度局地变化也大一些(图3b)。在500 hPa以下高度上,两者风向相差基本一致。火箭探空在400 hPa以下高度上有风向切变,主要由于探测仪在高空刚打开引起的;靠近地面时风向相差较多,主要由于火箭探空仪降落点的不确定性引起(图3c)。火箭探空和L波段所测得的风速变化趋势基本一致,均能很好地反映出风速由地面的几个秒米增长至几十秒米的过程。

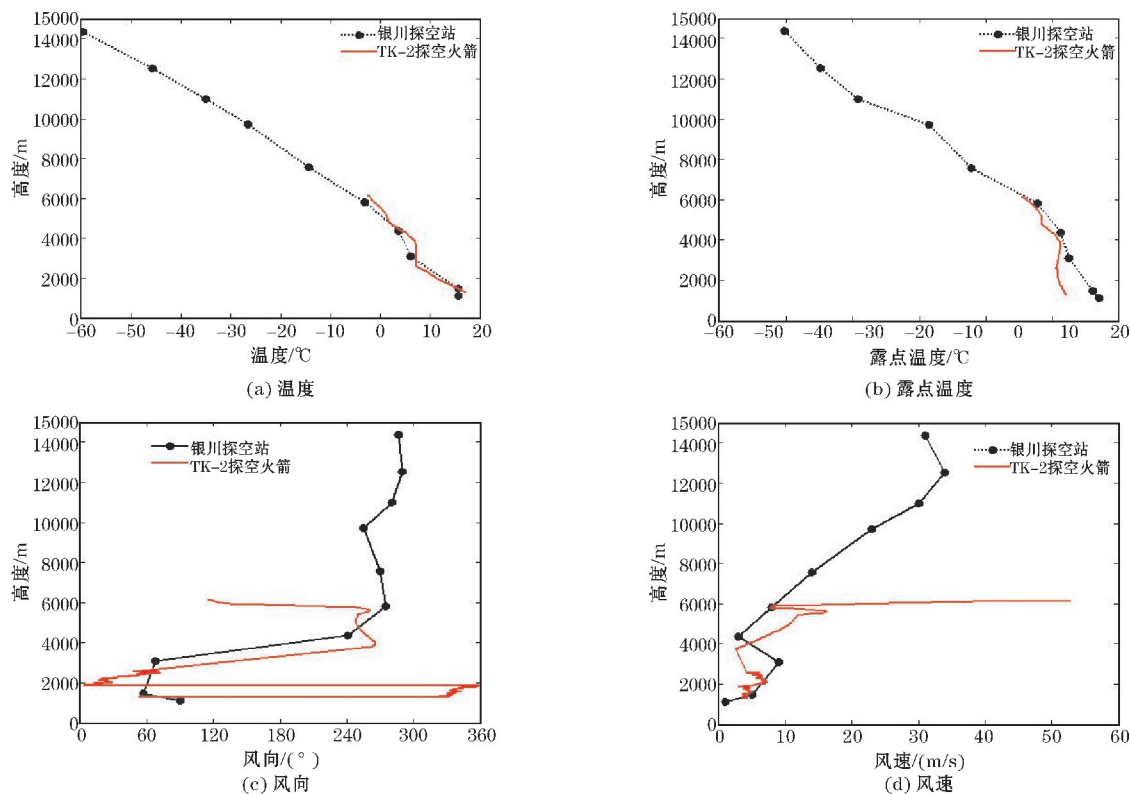


图4 2014年8月6日华西村探空火箭和银川市L波段雷达垂直廓线对比图

从图4看出,总体看来两种探测手段的探空曲线有较好的一致性,但局部也有差异,2000~4000 m高度上,火箭探空的曲线有拐点,火箭探空仪能够反映出大气的逆温过程(图4a)。露点温度在大气中低层差别较大,探空火箭获得的露点温度比探空站的低一些,随着高度升高,两者差异变小(图4b)。在500 hPa以下高度,两者风向低层差别较大(图4c)。火箭探空和气象探空所测得的风速变化趋势基本一致,均能很好地反映出风速由地面的几个秒米增长至几十秒米的过程。其中火箭探测仪在6000 m的高度上风速较大,可能是由于探空火箭观测开始时的初速度较大所致(图4d)。

#### 4.3 一次典型业务应用分析

2011年10月22日,西安市城区有一次重大社会

其中火箭探测仪在400 hPa的高度上风速较小,主要由于高空探测仪开伞引起的,两种探测手段的局地风速大小有差异,主要是发射和气象探空的位置差异引起的(图3d)。

图4为2014年8月6日,在银川探空站和银川华西村分别采用L波段雷达和TK-2GPS探空火箭进行资料对比观测,探空火箭发射地位于气象探空站西北部10 km处左右。L波段雷达观测时间为2014年8月6日07时,探空火箭弹发射时间为8月6日03时22分。

活动需要保障。10月21日20时500 hPa天气图分析,青藏高原中部有高原槽活动,槽后有弱的冷平流,说明该槽在东移过程中将加强。22日08时(图5a),该槽已经移至兰州-成都一线,并将继续加强东移影响西安地区。700 hPa高原东部有一较强的副合中心缓慢向东移动,22日08时(图5b)移至成都,之后快速向东移动。综合分析,预计该天气系统22日下午到傍晚影响西安地区。为此,要求开展重大活动保障探空火箭加密观测。

根据观测方案,西安市户县蒋村镇2个作业点开展人影火箭探空作业,2011年10月22日05:00、14:00、18:00、23:00开展人影火箭加密探空11次。根据人影指挥中心汇总的05时到18时加密探空数据分析(图6),零度层高度为3940 m、4450 m、

4180 m, 平均零度层高度为 4190 m (户县海拔高度 435 m)。相比探空站 L 波段雷达 (图 5c) 和雷达回波顶高 (图 5d) 资料, 加密探空资料进一步分析得出, 本系

统降雨暖云厚度较高, 高层为西南暖湿气流, 风速为 14 ~ 16 m/s, 中层 850 hPa 有切变, 低层有弱的西北气流, 抬升作用明显。

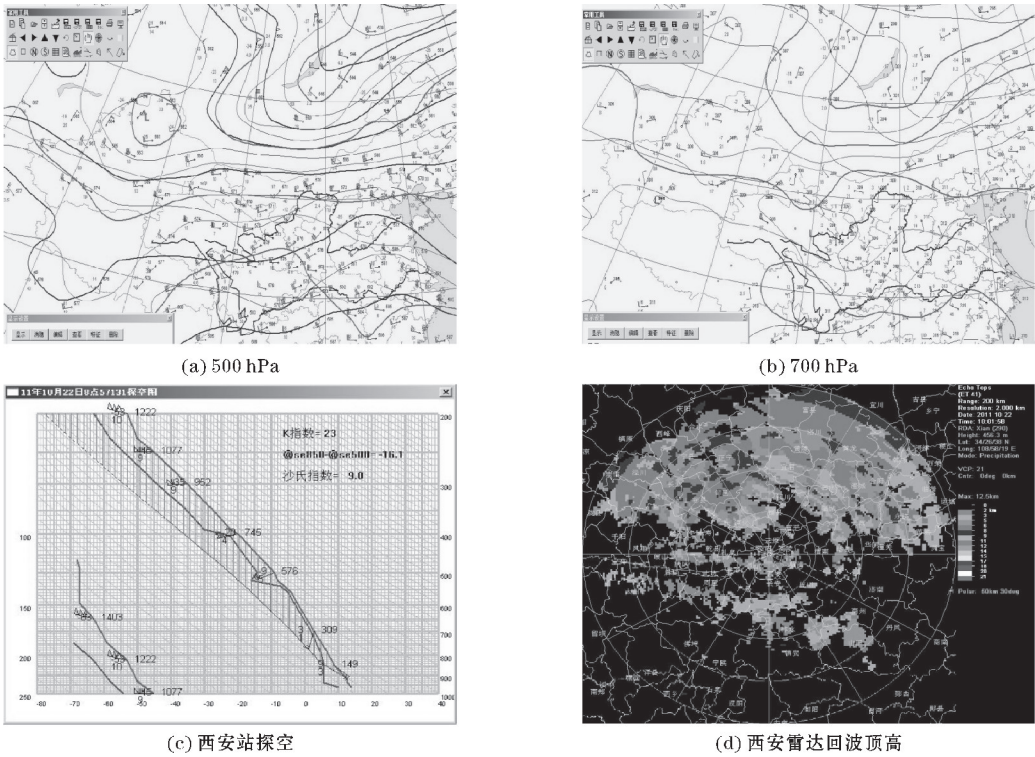


图 5 2011 年 10 月 22 日西安地区天气形势分析

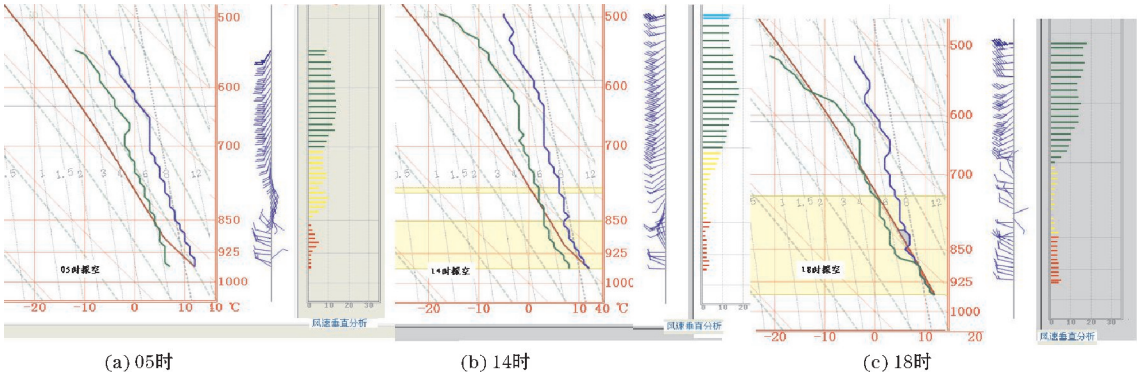


图 6 2011 年 10 月 22 日户县蒋村镇火箭探空层结曲线图

综合分析, 22 日至 23 日, 受典型混合云系降水天气系统影响, 西安地区将出现小到中雨降雨天气, 系统较深厚, 降水范围较大, 人工消 (减) 雨工作难度较大。建议考虑较厚的暖云降水, 对人影作业防线设置、催化高度、催化剂类型、剂量等作出适当调整。

5 结论与展望

采用火工加弹簧探空仪弹射分离机构的固体火箭和 GPS 测风技术的中低空气象探测系统, 发射成功率达到 87.3%, 探空仪出仓成功率为 100%, 探测数据接

收成功率 86%, 软件系统实用性和稳定性满足业务使用需求。

与 L 波段探测雷达数据对比, TK-2 GPS 探测火箭系统可以实时获取 0 ~ 7 km 大气的温、湿、压、风速、风向数据, 可以直接显示 0 度层, -10 度层的高度分布情况, 能够反映大气中逆温层的存在, 通过大气垂直温度和湿度精细化观测, 可以分析出云分布情况。

探空火箭作为现有常规探空手段有效补充, 具有机动性强、数据获取快捷、空域审批方便等优势, 通过多点布设方法获取区域流场数据, 可以为人影作业条件分析和方案设计评估提供帮助。



## 参考文献:

- [1] 郑国光,陈跃,王鹏飞,等.人工影响天气研究中的关键问题[M].北京:气象出版社,2005.
- [2] 邵洋,刘伟,孟旭,等.人工影响天气作业装备研发和应用进展[J].干旱气象,2014,32(4):649-658.
- [3] 段婧,楼小凤,卢广献,等.国际人工影响天气技术新进展[J].气象,2017,43(12):1562-1571.
- [4] 李大耀,李林藩.20世纪的中国火箭探空[J].中国航天,2001(4):55-59.
- [5] 姜秀杰,刘波,于世强,等.探空火箭的发展现状及趋势[J].科技导报,2009,27(23):101-110.
- [6] 宗晶.我国“子午工程”首枚气象火箭发射成功[J].卫星与网络,2010(6):75-75.
- [7] 姜国英,徐寄遥,史东波,等.子午工程首枚气象火箭大气探测结果分析[J].科学通报,2011,56(19):1568-1574.
- [8] 史东波,韦峰,张宇,等.GPS在气象火箭遥测跟踪上的应用[J].空间科学学报,2011,31(5):666-669.
- [9] 张元,刘东升,王维佳,等.TK-2GPS人影火箭探空数据与L波段探空数据对比分析[J].高原山地气象研究,2016,36(1):91-95.
- [10] 李柏,李伟.阳江第八届国际探空系统比对试验综述[J].气象科技进展,2011,1(3):6-14.
- [11] 蒲朝飞,张超.一种改进的循环冗余校验纠错技术[J].微电子学与计算机,2014,31(4):83-86.
- [12] 高山.高空气象探测数据分析与质量控制系统设计与实现[D].成都:电子科技大学,2014.

## Research and Application of Key Technology of Medium and Low Altitude Meteorological Detection System based on Solid Rocket and GPS Wind Measurement Technology

HE Wen-bin<sup>1</sup>, LUO Jun-jie<sup>2</sup>, WANG Peng<sup>3</sup>, TIAN Xian<sup>2</sup>, SU Li-juan<sup>4</sup>

(1. Meteorological Service of Shaanxi, Xi'an 710014, China; 2. Weather Modification Office of Shaanxi, Xi'an 710014, China; 3. Shaanxi Zhongtian Rocket Technology Co. LTD., Xi'an 710014, China; 4. The Inner Mongolia Autonomous Region Institute of Meteorological Sciences, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** In this paper, a medium and low altitude meteorological detection system based on solid rocket and GPS wind measurement technology is introduced, and the key technology solutions are discussed and analyzed, such as receiving data and theoretical data error, GPS location receiving interruption, data quality control and so on. The service trial analysis shows that the system can obtain the data of temperature, humidity, pressure, wind speed, wind direction and other meteorological elements in 0-7 km atmosphere in real time, which is in good agreement with the conventional L band radar data. Through single point and multi-point network observation and analysis, the system can provide valuable help for the analysis of shadow work conditions and the design of operation plan.

**Keywords:** weather modification; sounding rockets; TK-2 GPS; key technologies