



论文

基于精细风场的“神舟七号”载人飞船伞降回收轨迹预测研究

郭志梅^{①②*}, 缪启龙^①, 王曙东^{②③}, 李黄^②

① 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044;

② 中国气象局气象探测中心, 北京 100081;

③ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

* E-mail: gzmaoc@cma.gov.cn

收稿日期: 2010-05-18; 接受日期: 2010-12-17

中国气象局技术开发研究项目和国家自然科学基金(批准号: 40805021)资助

摘要 中国气象局于 2008 年 9 月 21~28 日在内蒙古四子王旗“神舟七号”载人飞船(简称神七)主着陆场附近进行了加强飞船回收气象保障的科学试验. 本文针对神七载人飞船的伞降回收着陆阶段受空中水平风影响很大的特点进行了分析研究, 提出了伞降轨迹的计算方法; 对精细的数值预报模式、高空探测和车载多普勒测风激光雷达获得的风廓线资料进行了对比分析; 利用 3 种风廓线资料分别对神七返回舱开伞前后的轨迹进行了预测; 并与神七实测开伞点和着陆点进行了比较分析. 试验证明, 精细资料为飞船的回收段的风修正提供了更详细的信息, 利用精细风资料预测飞船伞降轨迹, 有助于飞行控制指令编发, 从而提高飞船定点回收的精度和可靠性, 减小飞船的搜救范围, 缩短搜救时间.

关键词

精细风资料

“神舟七号”飞船

伞降轨迹

预测

载人航天回收着陆是航天活动的最后环节, 也是载人航天任务成败的最终标志. 载人飞船回收过程中, 伞降着陆阶段受风的影响很大^[1~4], 主要是高空水平风的影响, 如遇到大的横风, 飞船着陆点将产生很大偏差, 飞船的搜救散布区扩大, 搜救时间延长. 长期以来, 许多学者对伞降回收过程的动力和运动特性进行了分析研究, 但大多都是假设风场为零或者是对风场总体效应进行概率统计估测^[5~11]. 由于难以得到精细的风场资料, 飞船伞降回收精度大都超出预定指标, 这一问题长期困扰着科学家和工程技术人员. 随着气象科学技术的发展, 特别是数值预报

模式^[12~17]和新探测技术^[18~23]的不断进步, 使得精细风场资料的获得成为可能. 为此, 中国气象局于 2008 年 9 月 21~28 日在内蒙古自治区乌兰察布盟四子王旗——“神舟七号”(简称为神七)载人飞船主着陆场附近组织了加强飞船回收段气象保障的首次科学试验, 进行了神七伞降落区空中轨迹预测专项气象服务. 本文进行了伞降回收轨迹的算法研究, 分析比较了精细的数值预报模式、高空探测和多普勒激光测风雷达三种风场资料的精度, 利用三种精细风场资料分别对神七返回舱进行了开伞前和开伞后轨迹预测, 与神七实测开伞点和着落点进行了事后模拟分

析,得出了一些有意义的结论.

图 1 是基于 Google Earth 高精度影像图的神五、神六和神七载人飞船的实际落点图,可以看出其落点相对于主着陆场中心点散布很大,尽管预定的飞行轨道基本上是同一的,但由于大气风场的变化差异,造成落点的差异,这也进一步说明了精细测定和准确预报大气风场对飞船回收的重要意义.

从动力学和运动学角度看,“神舟”号载人飞船回收过程大致分制动飞行阶段、自由滑行阶段,再入大气层阶段和伞降着陆阶段^[24-26].伞降着陆阶段是飞船回收的最后阶段,可分为开伞减速阶段和匀速飘移阶段(图 2).

(1) 开伞减速阶段.当返回舱下降到距地面大约 10 km 高度时,返回舱上静压高度控制器通过测量大气压力判定高度,自动打开伞舱盖,首先带出引导伞,引导伞再拉出减速伞,减速伞设计为两级充气,减速伞工作 16 s 后与返回舱分离,同时拉出主伞,主伞工作时大约位于 8 km 高度,主伞也采取两级充气的方法,经过一定的延时收口后完全充气涨满,飞船作减速滑行.

(2) 匀速飘移阶段.主伞完全打开后,返回舱在空中飘移,5 km 时抛防热底座,返回舱以稳定的姿态匀速降落,其水平相对于空气的速度接近为 0,水平漂移完全取决于高空水平风场.

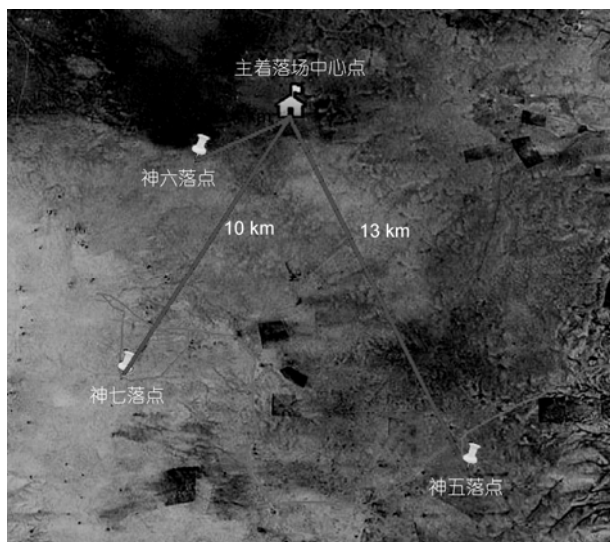


图 1 神五、神六和神七实际落点与主着陆场中心点的偏差图

1 伞降轨迹计算模型

1.1 系统模型

载人飞船伞降回收系统是由载人返回舱、降落伞减速装置及其附属机构(包括控制器、执行机构和着陆缓冲装置等)组成,降落伞减速装置一般有引导伞、稳定减速伞、主伞和伞包等组成,是回收着陆系统的主要部分.伞降系统的动力学模型非常复杂,有 12 个自由度,并且降落伞和伞绳是柔性体,因此我们在计算飞船伞降轨迹时,对返回舱伞降系统模型进行了合理简化.

(1) 物伞系统单质点模型.即:无论开伞前后,都把返回舱和降落伞作为一个整体,称之为飞船.不考虑其间相对运动,只考虑其整体状态和受力情况的变化.因为本文主要关注的是飞船整体的飞行轨迹和落点,而不是具体的开伞过程.

(2) 飞船回收伞降着陆阶段,属于无动力飞行,只受重力、空气阻力和大气风力的作用.

在垂直方向上,考虑重力和空气阻力(伞的浮力),不考虑大气垂直气流的影响;在水平方向上,考虑大气风力和空气阻力.

(3) 在飞船回收伞降区内,大地设为平面大地,不考虑地球曲率;重力加速度设为常数.

(4) 把飞船伞降过程分为开伞减速和匀速漂移两个阶段,用简化的微分方程来描述三自由度飞船的回收运动轨迹.

(5) 在开伞减速阶段,根据降落伞的开伞工作过程,分阶段计算飞船的三维空间的下降轨迹,再把各阶段的轨迹进行累加.

(6) 环境风场资料采用了高水平 and 垂直分辨率的数值模式格点风场、常规气象加密探空风场资料和车载激光雷达测风资料.

1.2 轨迹计算

无动力伞降物体可视为空中一个大漂浮物,它的降落轨迹是重力作用和大气运动影响共同结果.轨迹方法是一种分析空中漂浮物落区与源区的最直接和简单的方法,有助于研究在大气作用下源与落点的关系^[27].

1.2.1 开伞减速阶段

开伞指令发出到主伞完全打开间隔,返回舱大

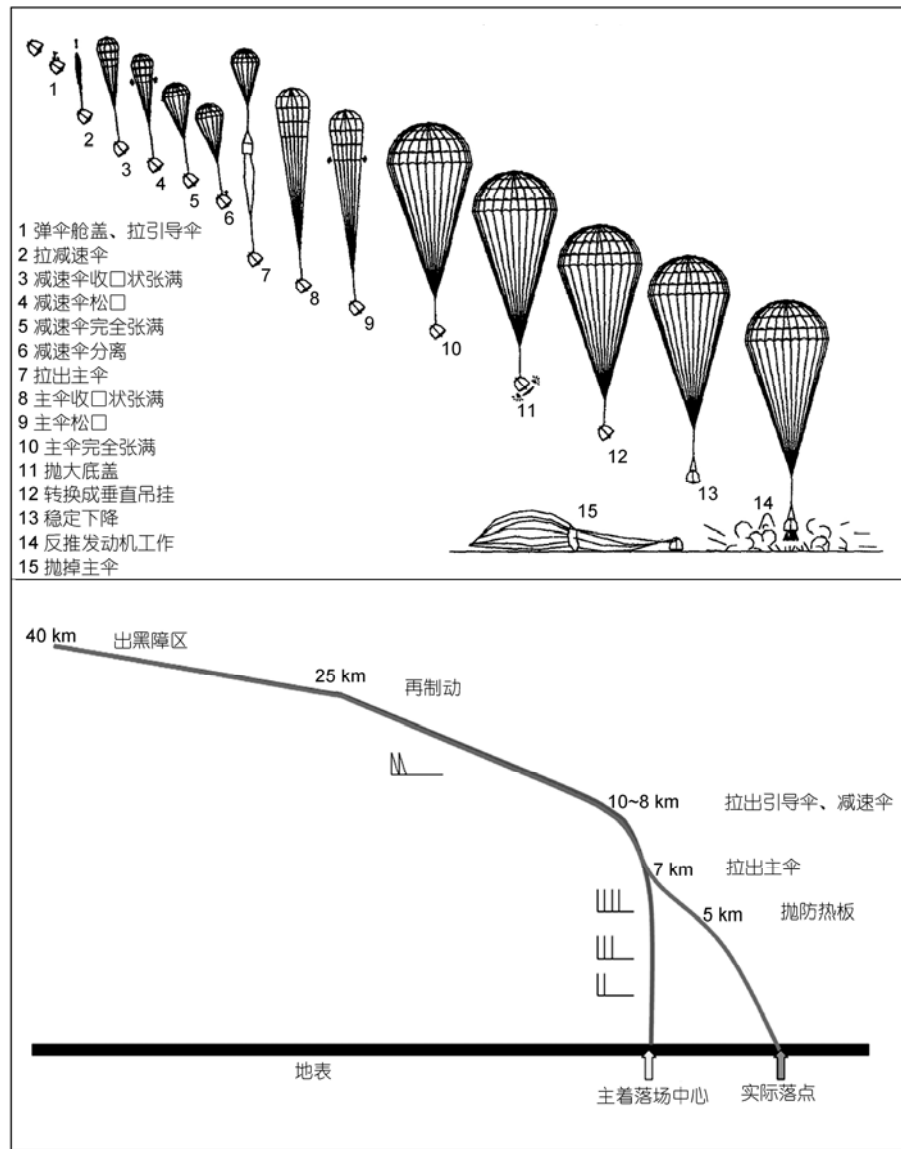


图2 “神舟七号”载人飞船制动及伞降过程示意图

约从 10 km 下降到 7 km 高度为开伞减速阶段, 通常按时序将降落伞的工作过程划分为三个阶段, 即拉直过程、充气过程和稳定下降过程. 拉直和充气过程是一个降落伞结构与气流相耦合的动力学过程, 十分复杂, 由于时间很短^[28], 在本文中看作为突变, 在打开引导伞、打开减速伞和打开主伞的过程中飞船的运动速度都存在着瞬时突变. 而在其分段间, 飞船在重力、空气的阻力和风力的作用下, 持续减速, 整个过程可简化视为分段减速运动, 计算时可视为是有初速度的匀变速直线运动. 则 t 时间后, 飞船的飞行

的距离为

$$L = \int_0^t \bar{V}(t) dt, \quad (1)$$

其中, L 为飞行距离, $\bar{V}$ 为速度矢量, $\bar{V} = \bar{V}_k + \bar{V}_f$, $\bar{V}_k$ 为飞船空速矢量, $\bar{V}_f$ 为风速矢量.

此阶段, 飞船的动力学方程为

$$m \frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{D} + \bar{G} + \bar{F}, \quad (2)$$

其中, $\bar{D}$ 为空气的阻力, $D = (1/2) \cdot \chi \cdot \rho \cdot V_k^2 \cdot S$, χ

为大气阻力系数, ρ 为空气密度, S 为返回舱和伞的截面积, $\bar{V}_k$ 为飞船空速矢量; $\bar{G}$ 为重力, $G=mg$, m 为返回舱质量, g 为重力加速度; $\bar{F}$ 为风力.

从方程(1)和(2)可以看出飞船的运动轨迹由两部分组成, 一是飞船在重力和空气阻力作用下的相对于大气的运动, 另一部分是在环境风场作用下随着大气的运动. 本文中环境风场的速度和方向可由气象探测和数值预报模式给出, 下面主要来求解飞船的相对于大气的运动速度.

基于前面的假设, 不考虑环境风场的运动时, 在地面固定坐标系中(x 方向取东为正, y 方向取北为正, z 方向取上为正), 则飞船相对运动动力学方程分解到 x , y 和 z 方向的分量形式为

$$\begin{cases} m \frac{\partial u_k}{\partial t} = \frac{1}{2} \cdot \chi \cdot \rho \cdot u_k^2 \cdot S_x, \\ m \frac{\partial v_k}{\partial t} = \frac{1}{2} \cdot \chi \cdot \rho \cdot v_k^2 \cdot S_y, \\ m \frac{\partial w_k}{\partial t} = \frac{1}{2} \cdot \chi \cdot \rho \cdot w_k^2 \cdot S_z - mg. \end{cases} \quad (3)$$

设 $A_1=(\chi\rho S_x)/2m$, $A_2=(\chi\rho S_y)/(2m)$, $A_3=(\chi\rho S_z)/(2m)$, 则(3)式可写成:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_k}{\partial t} = A_1 dt, \\ \frac{\partial v_k}{\partial t} = A_2 dt, \\ \frac{\partial w_k}{\partial t} = A_3 w_k^2 - g. \end{cases} \quad (4)$$

解微分方程组(4)式, 设初始时刻, 时间为 $t_0=0$, 高度为 H_0 , 飞船的速度为 V_{k0} , 某一开伞阶段飞船的平均攻角为 α , 航向角为 β , 则 t 时刻后飞船的空速为

$$\begin{cases} u_{kt} = V_{k0} \cos \alpha \cos \beta - \frac{1}{2A_1 t}, \\ v_{kt} = V_{k0} \cos \alpha \sin \beta - \frac{1}{2A_2 t}, \\ w_{kt} = V_{k0} \sin \alpha - \frac{1}{2A_3 t} - gt. \end{cases} \quad (5)$$

设 t 时刻, 环境风场中水平风速为 V_f , 风向为 γ (北风为 0°), 完成一个降落伞工作过程(速度发生突变)期间, 飞船相对于地面的运动速度(绝对速度)分解到 x , y 和 z 方向的分量形式为

$$\begin{cases} u_t = V_{k0} \cos \alpha \cos \beta - \frac{1}{2A_1 t} + V_f \sin \gamma, \\ v_t = V_{k0} \cos \alpha \sin \beta - \frac{1}{2A_2 t} + V_f \cos \gamma, \\ w_t = V_{k0} \sin \alpha - \frac{1}{2A_3 t} - gt. \end{cases} \quad (6)$$

时间 t 可由在不同高度对应的速度及降落伞不同工序所用的时间综合判断求出^[28,29]. 于是, t 时间后, 飞船在 x , y , z 方向的离散化的轨迹方程为

$$\begin{cases} x_t = \sum_{i=0}^t \frac{u_i + u_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i), \\ y_t = \sum_{i=0}^t \frac{v_i + v_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i), \\ z_t = \sum_{i=0}^t \frac{w_i + w_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i). \end{cases} \quad (7)$$

按伞降回收过程中, 引导伞、减速伞和主伞的工作程序, 分阶段计算, 然后进行累加, 就可以得到飞船伞降回收过程的开伞减速阶段的运动轨迹.

1.2.2 匀速飘移阶段

主伞完全打开后到反推火箭发动机点火, 飞船从 7 km 降到离地 1 m 处为匀速飘移阶段. 主伞伞衣完全充满后, 气动阻力将使物伞系统逐渐达到稳定的平衡状态, 此阶段, 返回舱攻角 α 接近 90° , 水平方向上, 飞船相对空气运动速度接近为零, 其水平方向的运动完全由空气运动即风来决定; 垂直方向上, 空气阻力(浮力)与重力平衡, 在不考虑大气的垂直运动和空气密度随高度的变化时, 其垂直方向作匀速下降运动. 在 5 km 处抛防热底座, 转换吊挂时伞绳张力变化剧烈, 约 4 s 后稳定, 因重力有所减小, 垂直速度略微减小.

此阶段飞船的动力学方程为

$$mg = \frac{1}{2} \cdot \chi \cdot \rho \cdot w^2 \cdot S, \quad (8)$$

其中, m 为飞船质量, χ 为大气阻力系数, ρ 为空气密度, w 为垂直下落速度, S 为主伞和飞船面积. 由(8)式可以求得垂直下降的速度.

此阶段飞船的运动学方程为

$$\begin{cases} u = V_f \sin \gamma, \\ v = V_f \cos \gamma, \\ w = \sqrt{2mg / \chi \rho S} = w_0. \end{cases} \quad (9)$$

t 时间后, 飞船在 x, y, z 方向的离散化的轨迹方程为

$$\begin{cases} x_t = \sum_{i=0}^t \frac{u_i + u_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i), \\ y_t = \sum_{i=0}^t \frac{v_i + v_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i), \\ z_t = \sum_{i=0}^t w_0 (t_{i+1} - t_i). \end{cases} \quad (10)$$

2 精细风场资料的处理、比对和分析

2.1 资料的处理

2.1.1 高空探空风资料

本文使用了 2008 年 9 月 26~28 日 8, 14 和 20 时 (北京时) 乌中、二连浩特、呼和浩特三个探空站, 垂直分辨率为 10 m 的精细高空探空风资料, 对神七回收主着陆场上空的风场特征进行了分析; 使用插值方法, 得到了位于四子王旗和主着陆场上空的风廓线资料, 与其他资料进行了比对, 并用 2008 年 9 月 28 日 8 和 14 时资料进行了神七伞降回收轨迹预测。

2.1.2 精细数值预报风资料

本文以神七回收着陆场为中心, 使用北京区域气象中心 WRF-RUC 3 小时快速更新循环同化预报系统^[30,31], 进行了 2008 年 9 月 27~28 日的数值预报模拟试验. 该模式配置方案为: 以主着陆场中心点 (111.43°E, 42.35°N) 为中心, 四重嵌套, 水平分辨率分别为 27, 9, 3 和 0.5 km, 最精细区域 (第 4 区) 覆盖了以主着陆场中心点为中心, 东西方向 120 km、南北方向 60 km 的范围 (见图 3), 垂直方向分为 45 层, 垂直分辨率为: 1~400 m 高度之间为 50 m, 400~3000 m 为 200 m, 3000~15000 m 为 500 m, 模式外层三个区域进行 24 h 预报, 第 4 区进行 6 h 预报. 该四重嵌套方案在 IBM 高性能计算机上采用 256 个 CPU 运行耗时约 2700 s, 可以满足服务需求。

本文从模式第 4 区 6 h, 3 h 预报场和 0 h 初始场

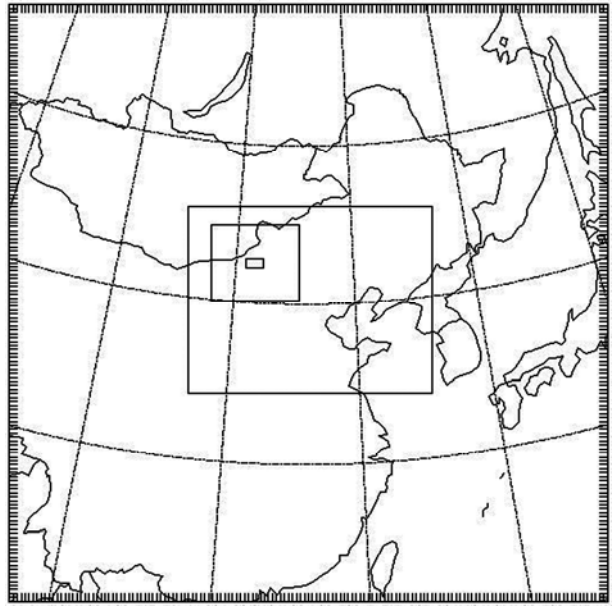


图 3 四重嵌套方案模式区域配置图

(实况场) 风场资料中, 分别提取出 2008 年 9 月 28 日 17 时主着陆场中心点上空的风廓线数据, 用于神七伞降轨迹预测; 从模式第 3 区 6 h, 3 h 预报场和 0 h 初始场风资料中, 提取四子王旗 (距着陆场中心点约 100 km) 上空 2008 年 9 月 28 日 8, 11, 14 和 17 时风廓线资料, 用于与探空和激光雷达资料的比对。

2.1.3 精细多普勒激光雷达风资料

本文采用中国海洋大学研制的车载多普勒激光测风雷达^[32,33] (其性能指标见表 1), 2008 年 9 月 28 日 8~18 时在四子王旗进行了低空风场资料实时探测试验, 时间分辨率为 10 min, 垂直分辨率有 10 和 100 m 两种. 把 8, 11, 14 和 17 时等各时次的前后 1 h 内观测的数据进行平均后作为对应整点数据与数值预报和探空资料进行了比对分析, 2008 年 9 月 28 日 17 时的探测数据用于神七伞降轨迹预测。

2.2 资料的比对分析

图 4 是 2008 年 9 月 28 日 8, 11, 14 和 17 时四个

表 1 多普勒激光测风雷达系统主要性能指标

波长 (nm)	重复频率 (kHz)	单脉冲能量 (mJ)	望远镜直径 (mm)	采样距离分辨率 (m)	方位角/俯仰角转速 (° s ⁻¹)	方位角/俯仰角 指向精度 (°)	扫描模式	
532	2.8	2.2	305	10	1~10	0.1	PPI	RHI

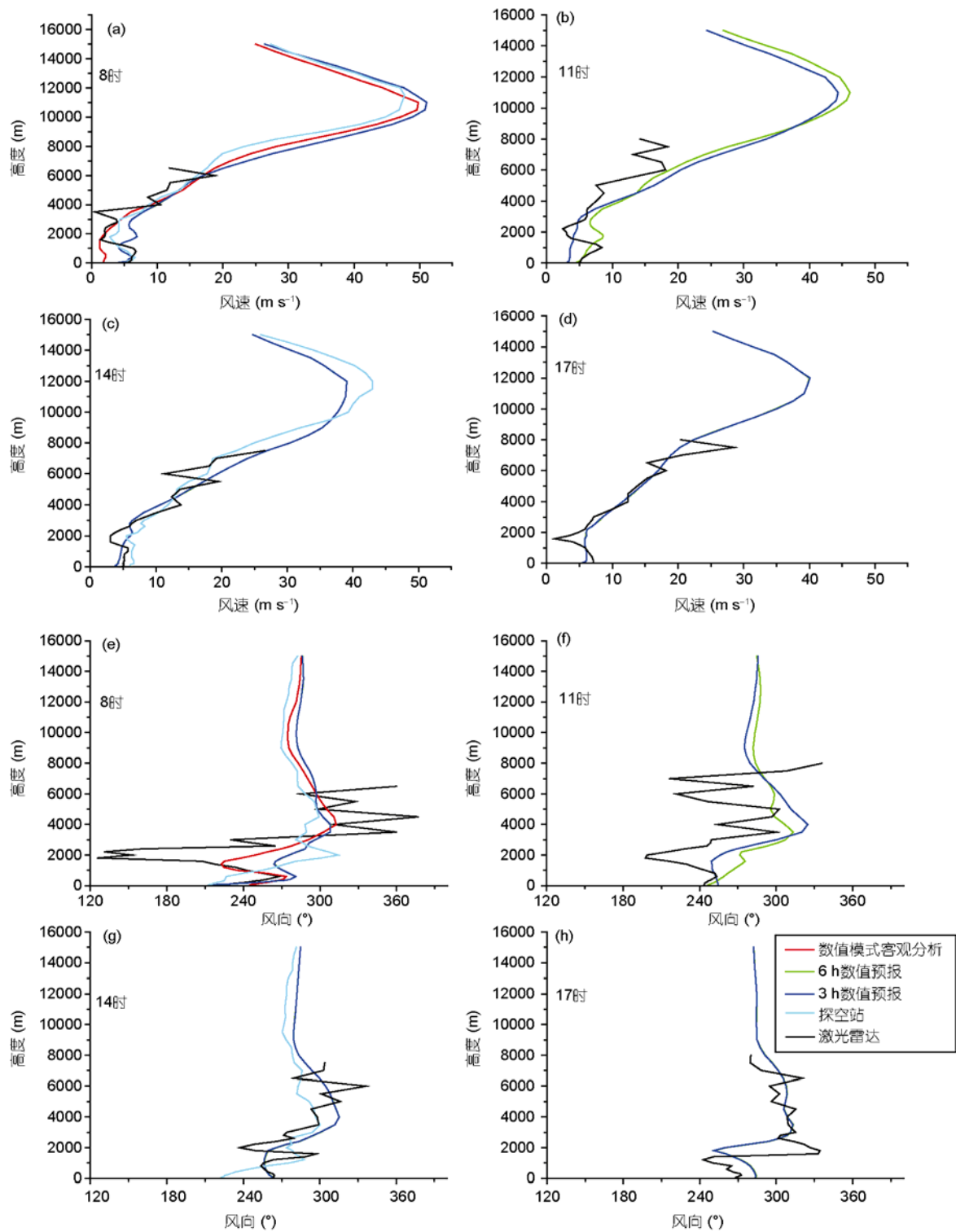


图 4 2008 年 9 月 28 日数值预报、探空和激光雷达探测风廓线对比图

(a)~(d) 风速廓线对比图(四子王旗); (e)~(h) 风向廓线对比图(四子王旗)

时次, 四子王旗上空激光雷达探测、常规高空探测与数值预报模式三种资料风向风速的廓线比对图, 从图中可以看出: 数值预报客观分析场(实况场), 6 h, 3 h 预报和探空的风向风速的垂直廓线平滑, 且变化趋势比较一致, 而激光雷达资料则表现为围绕前两者的左右摆动, 这是因为数值预报模式和探空资料反映的是一个地区周围大气的平均状态, 而激光雷达探测时只对该点上空进行垂直探测, 能够反映出更小尺度低空风的局地扰动和垂直变化. 当高度超过 7 km 后, 激光雷达的风向和风速的变化明显偏离探空和数值模拟资料, 可能是受云的影响, 超出设备的有效探测范围, 误差加大.

数值预报的主要目的就是产生物理上真实和热动力上连续的模拟数据集, 这些数据集可以被当作“真实”大气^[34], 所以我们以数值预报的 0 h 初始场风场资料作为标准, 对 2008 年 9 月 28 日 8, 11, 14 和 17 时共 4 个时次, 探空、激光雷达、6 h 和 3 h 数值预报的风向风速进行了偏差统计分析(见图 5, 表 2), 从

中可以看出, 6 h 和 3 h 数值预报风向、风速的垂直偏差比较小, 4 个时次平均标准差分别为 6.35°和 3.75°, 以及 0.8 和 0.34 m s⁻¹; 探空和激光雷达的偏差相对较大, 4 个时次风向、风速平均标准差分别为 22.3°和 20.63°, 以及 2.66 和 2.56 m s⁻¹, 造成探空资料误差较大的原因是因为四子王旗气象站没有常规探空, 所以我们使用了乌中、二连浩特和呼和浩特三个探空站资料进行了插值, 使得探空资料的误差增大了; 造成激光雷达探测误差较大的原因, 主要是因为当天四子王旗上空有云而且比较低的原因, 这表明激光雷达具有可以探测到小尺度局部风扰动的特点, 激光雷达探测到的低层风扰动或许是大气的真实状态.

值得一提的是, WRF 数值预报模式的 6 h 和 3 h 预报场与客观分析场的风向风速垂直廓线变化趋势非常一致, 尤其是 17 时三条曲线几乎重合在一起, 这说明北京区域气象中心 WRF-RUC 3 小时快速更新循环同化预报系统性能稳定, 具有良好的预报效果, 这为神七伞降回收阶段轨迹预测至少提前 6 h 进行奠定了基础.

表 2 2008 年 9 月 28 日风廓线差值统计表(四子王旗)

偏差统计	风向					风速				
	8 时	11 时	14 时	17 时	平均	8 时	11 时	14 时	17 时	平均
6 h 数值预报										
最小偏差	-30.81	-19.51	-0.03	0.00		-0.60	-2.35	-0.01	-0.04	
最大偏差	42.05	26.40	0.37	0.83		5.29	4.49	0.02	0.02	
平均偏差	6.74	3.71	0.12	0.28		2.64	1.51	0.00	-0.01	
标准差	15.01	9.98	0.15	0.17	6.35	1.36	1.78	0.02	0.04	0.80
3 h 数值预报										
最小偏差	-30.92	0.00	0.00	0.00		-0.61	0.00	0.00	0.00	
最大偏差	41.85	0.00	0.00	0.00		5.29	0.00	0.00	0.00	
平均偏差	6.66	0.00	0.00	0.00		2.63	0.00	0.00	0.00	
标准差	14.99	0.00	0.00	0.00	3.75	1.36	0.00	0.00	0.00	0.34
探空										
最小偏差	-46.98		-40.85			-5.20		-5.47		
最大偏差	64.96		31.28			4.52		4.72		
平均偏差	-4.11		-9.33			0.88		0.87		
标准差	28.15		16.45		22.30	2.72		2.61		2.66
激光雷达										
最小偏差	-61.10	-81.20	-28.60	-28.90		-6.90	-8.90	-8.10	-4.60	
最大偏差	42.05	26.40	39.10	20.20		5.29	4.80	3.20	1.60	
平均偏差	-2.82	-18.97	-3.21	-8.52		1.13	-0.12	-0.27	-0.33	
标准差	30.26	23.33	17.14	11.79	20.63	3.23	3.26	2.25	1.43	2.56

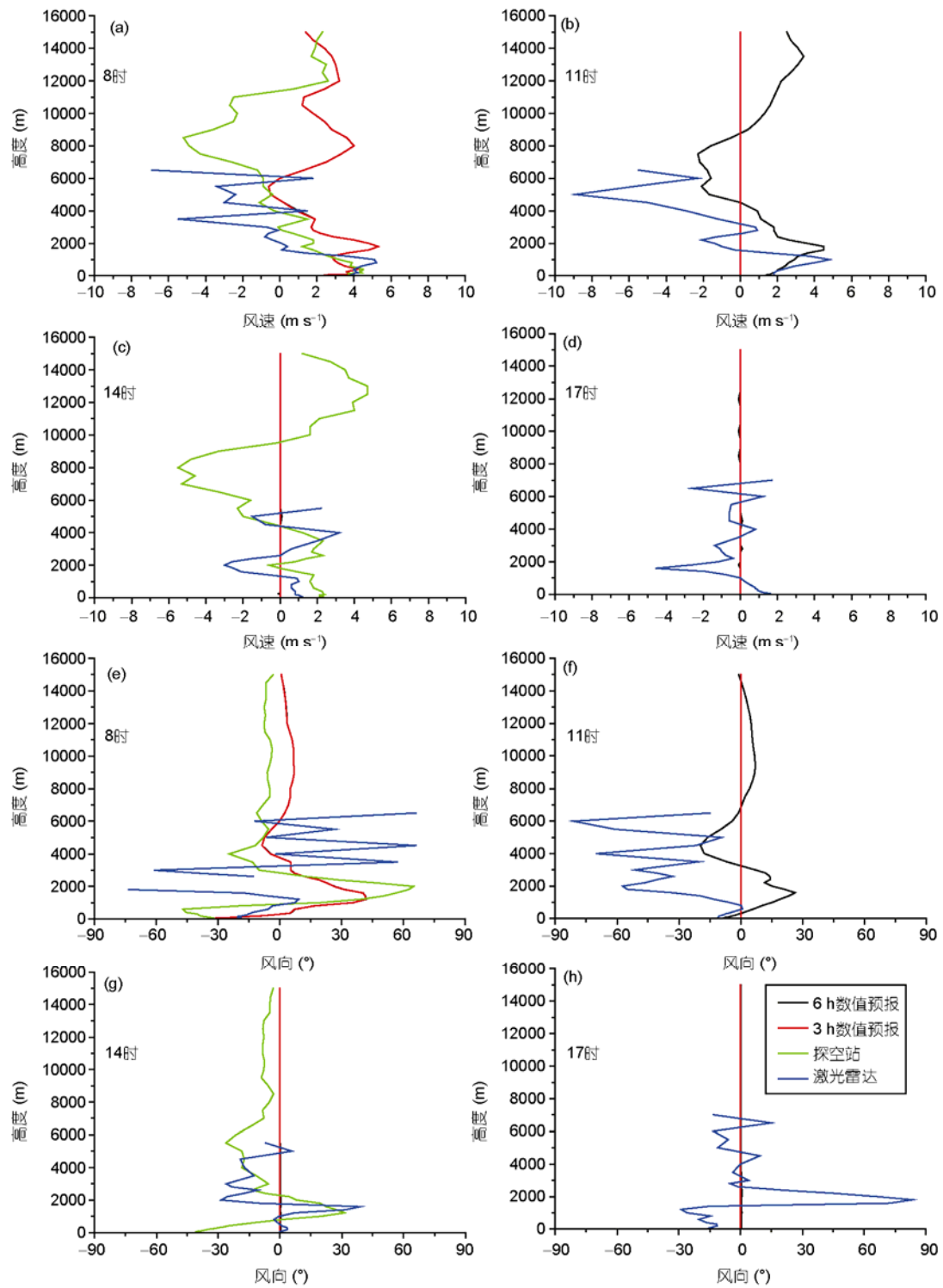


图5 2008年9月28日数值模拟、激光雷达与加密探空风向风速偏差变化图
(a)~(d) 风速廓线对比图(四子王旗); (e)~(h) 风向廓线对比图(四子王旗)

3 神七伞降回收当天主着陆场上空风场特征分析

中国载人航天飞船主着陆场位于中国与蒙古国接壤的地区,呈东西走向,位于起伏平缓的内蒙高原,其地理位置处在 $41^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$,其地形属坡度平缓的沙质草原^[35].主着陆场地势南高北低逐渐向西北倾斜,海拔在 1000~1200 m,地势平坦、开阔,没有大江、大河,只有季节性小河,河岸、河床高程差较小(图 6).

乌中、二连浩特、呼和浩特三个探空站分别位于主着陆场中心点的西部、北部和南部.图 7 为 9 月 28 日神七主着陆场上空风场的特点,高层(400~150 hPa)风速较大,但风向变化小,表现为一致的西北偏西风;低层(850~500 hPa)风速较小但风向比较零乱,可见低层风受地形的影响,局地变化明显.图 8 是 9 月 28 日 8 和 14 时乌中、二连浩特及呼和浩特 3 站的垂直廓线图,从图中可以看出,从地面到高空 35 km,风速随着高度的增加先增大后减小,在 10~15 km 高度出现一个大于 30 m s^{-1} 的急流带,风速最大值出现在 12.5 km 处,为 55 m s^{-1} ,因此,为了避开高空急流带,保证飞船伞降回收成功,开伞点应选择在低于 10 km 高度.

4 神七伞降回收轨迹预测分析研究

本文使用从 WRF 数值模式中提取的四子王旗 2008 年 9 月 28 日 11 时的 6 h 预报、14 时的 3 h 预报、

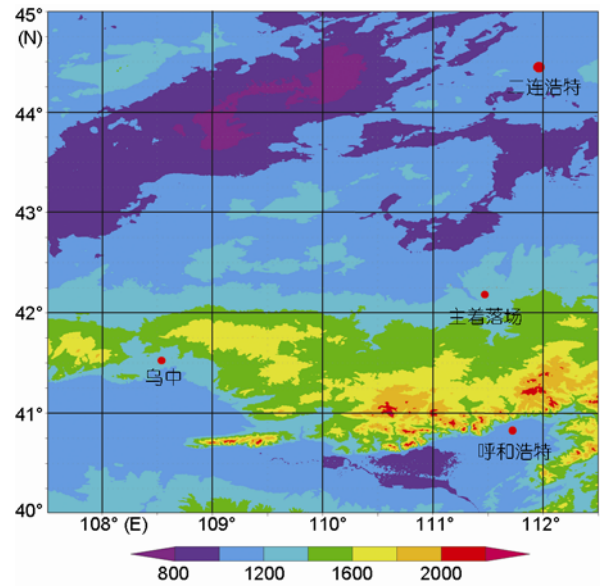


图 6 神七主着陆场及周边地区地形高度图

17 时的 0 h 初始场风廓线资料、激光雷达 17 时实时探测风廓线资料、8 时和 14 时高空探空风廓线资料(高空探测只有 8 时和 14 时),分别对 2008 年 9 月 28 日 17 时 37 分落地的“神舟七号”载人飞船进行了伞降回收轨迹的前向和后向轨迹预测.

4.1 开伞前飞船伞降轨迹预测分析研究

在开伞指令发出前,对神七伞降回收轨迹进行前向预测,即:假设飞船将要落在主着陆场中心点,

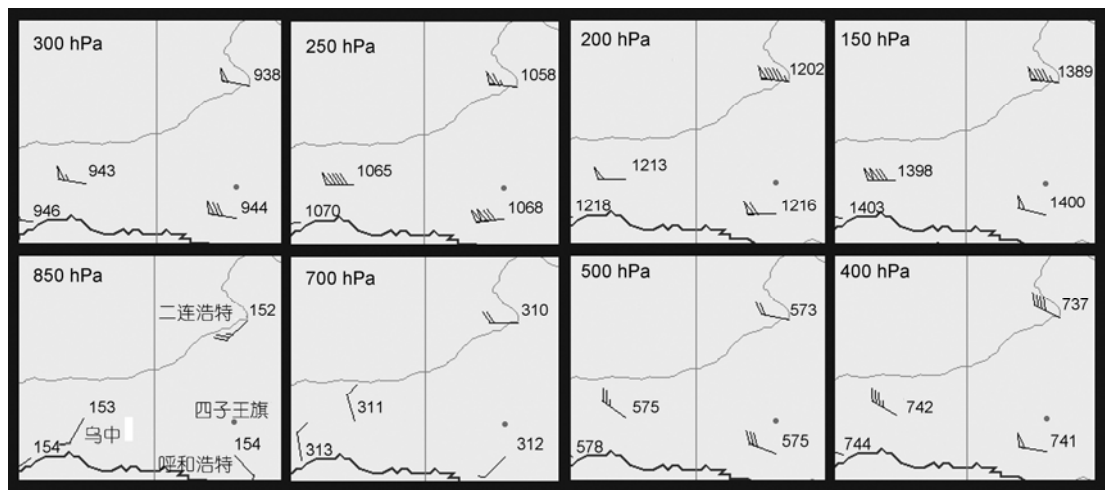


图 7 2008 年 9 月 28 日神七主着陆场上空高空风场图

各个等压面图中: 上为二连浩特、左为乌中、下为呼和浩特,右下角圆点为位于四子王旗

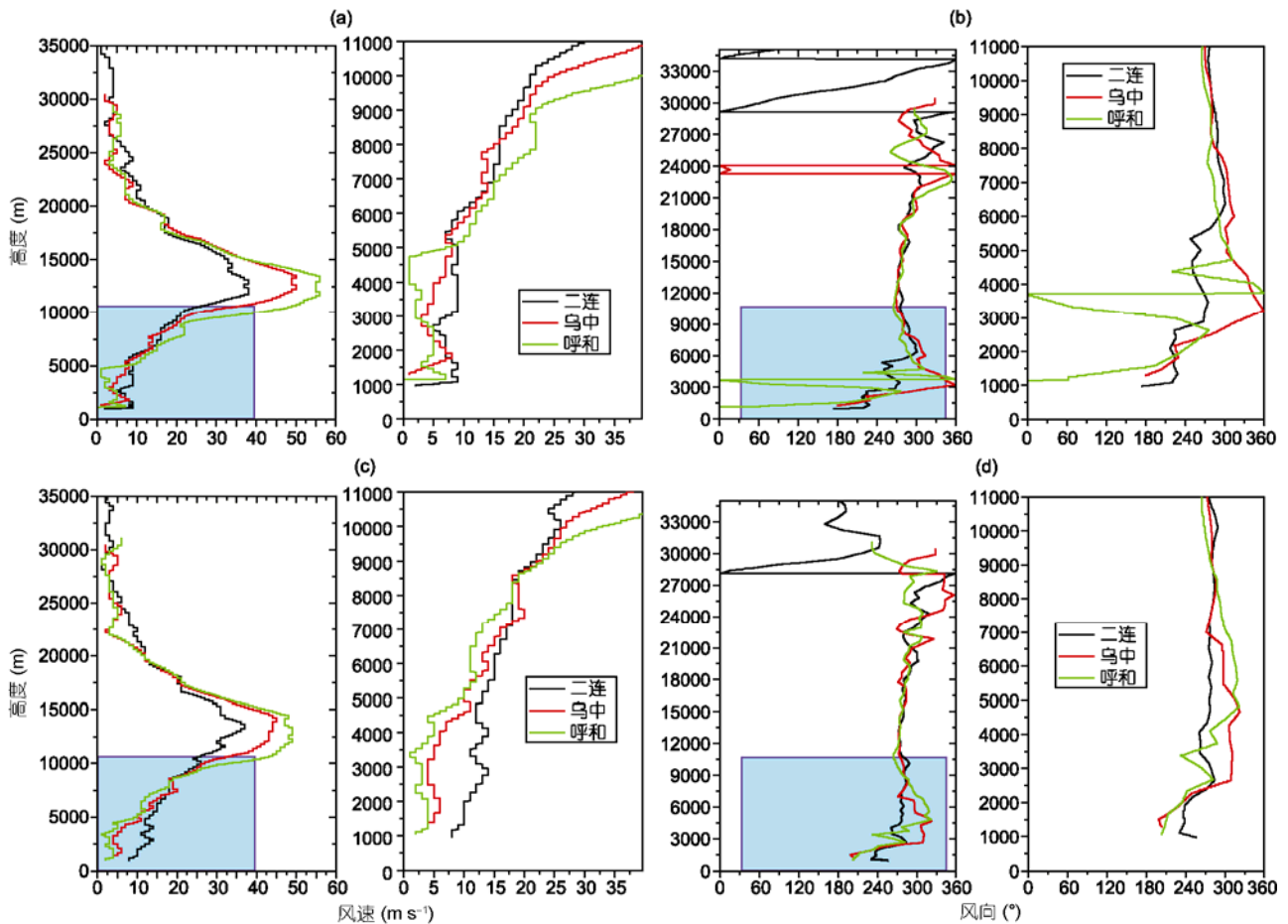


图 8 2008 年 9 月 28 日 8 和 14 时主着陆场上空风廓线图

(a) 8 时探空风速廓线图; (b) 8 时探空风向廓线图; (c) 14 时探空风速廓线图; (d) 14 时探空风向廓线图. 每组图中, 右侧图是左侧方框中 11 km 以下曲线的局部放大

追溯其在空中的轨迹, 这样可以预知开伞后任何高度飞船的位置, 从而为测控人员发出开伞指令提供参考依据.

图 9 是开伞前神七伞降回收空中三维轨迹及其在水平、垂直平面上的投影预测图, 图中坐标原点(0, 0, 0)为理论主着陆场中心点. 从图 9 可以看出, 不同资料推算出的神七飞船伞降的轨迹变化趋势基本一致, 以 WRF 数值模式客观分析(实况风场)为例, 可以得出, 要使飞船落在理论主着陆场中心点, 其应在空中 10 km 高度处, 偏西约 5005 m, 偏北约 2630 m 处开伞. 从空间轨迹和投影曲线还可以看出, 飞船 10~7 km 开伞减速阶段, 垂直方向上快速下降, 水平方向上向东方向移动, 这是因为飞船的初速度较大, 攻角较大, 水平方向分量主要偏东. 到 7 km 高度主伞打开时, 飞船大约在距离主着陆场偏西 3994 m 和

偏北 2363 m 处, 之后飞船垂直方向位移变小, 水平位移明显加大, 方向偏东南, 这是主要受水平西北风的影响, 到大约 2000 m 左右飞船转向偏东方向移动, 最后在主着陆场中心点落地.

4.2 开伞后飞船伞降轨迹预测研究

在开伞指令发布之后, 对神七伞降回收轨迹进行后向轨迹预测, 即: 以实际开伞点为起点跟踪飞船(质点)下降时在空中的轨迹, 预测飞船的最后着陆点, 为地面指挥中心搜救飞船提供地理位置参考. 本文假设主着陆场附近上空 10 km 处为飞船开伞点.

图 10 是开伞后神七伞降回收空中三维轨迹及其在水平、垂直平面上的投影预测图, 图中原点(0, 0, 0)为主着陆场上空 10 km 高度处(开伞点). 从图 10 可以看出, 不同资料推算出的神七飞船伞降的轨迹变化

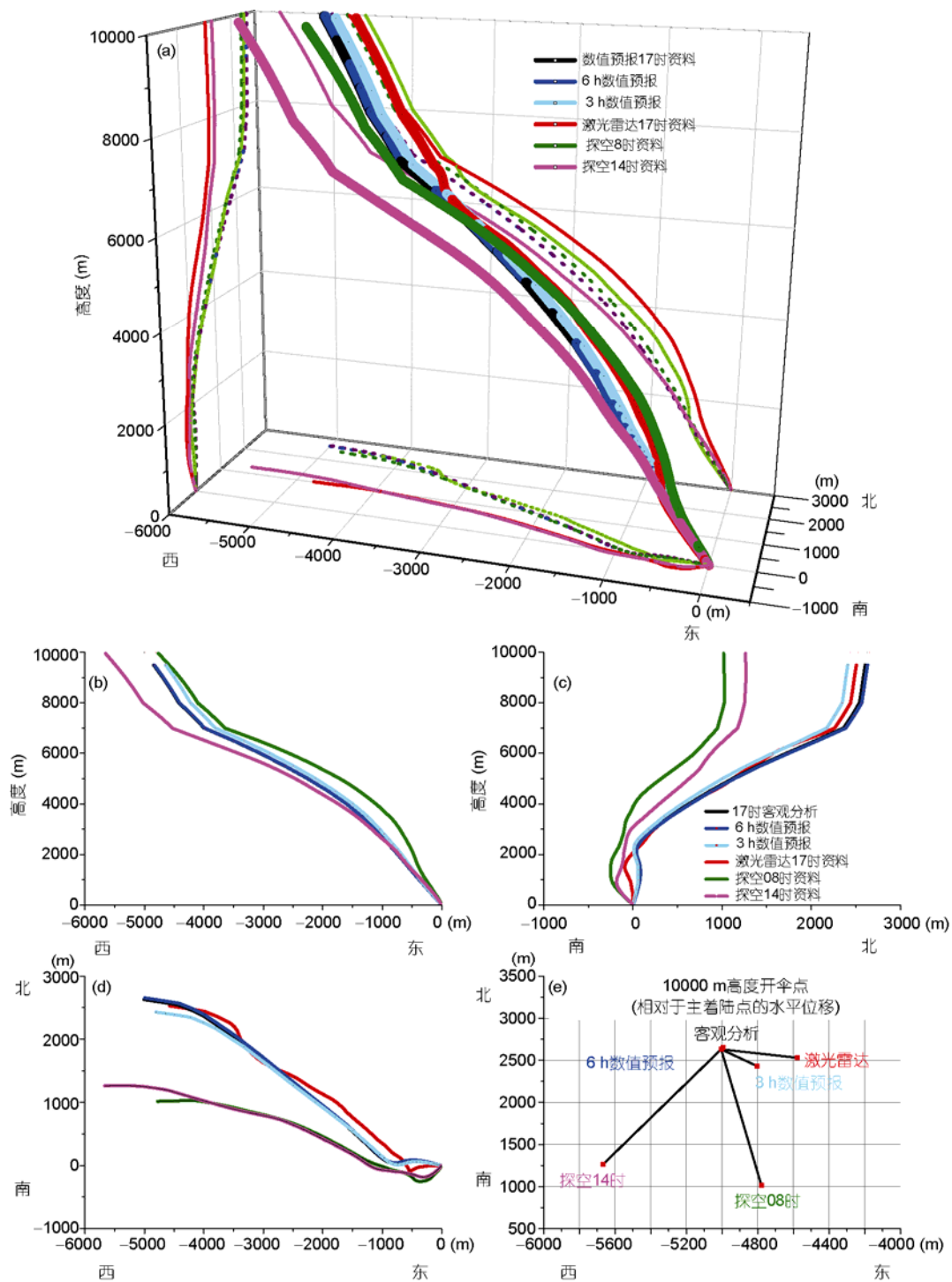


图9 2008年9月28日开伞前神七伞降回收三维轨迹及其水平、垂直投影预测图

趋势基本一致. 以 WRF 数值模式客观分析(实况风场)资料为例, 可以得出, 飞船在主着陆场上空 10 km 处发出开伞指令后, 10~7 km 为开伞减速阶段, 主要以

垂直下降为主, 水平向偏东方向移动, 这段运动主要是由飞船本身的速度为主导, 到 7 km 高度主伞打开时, 飞船大约在距离开伞点偏东 1011 m 和偏南 267

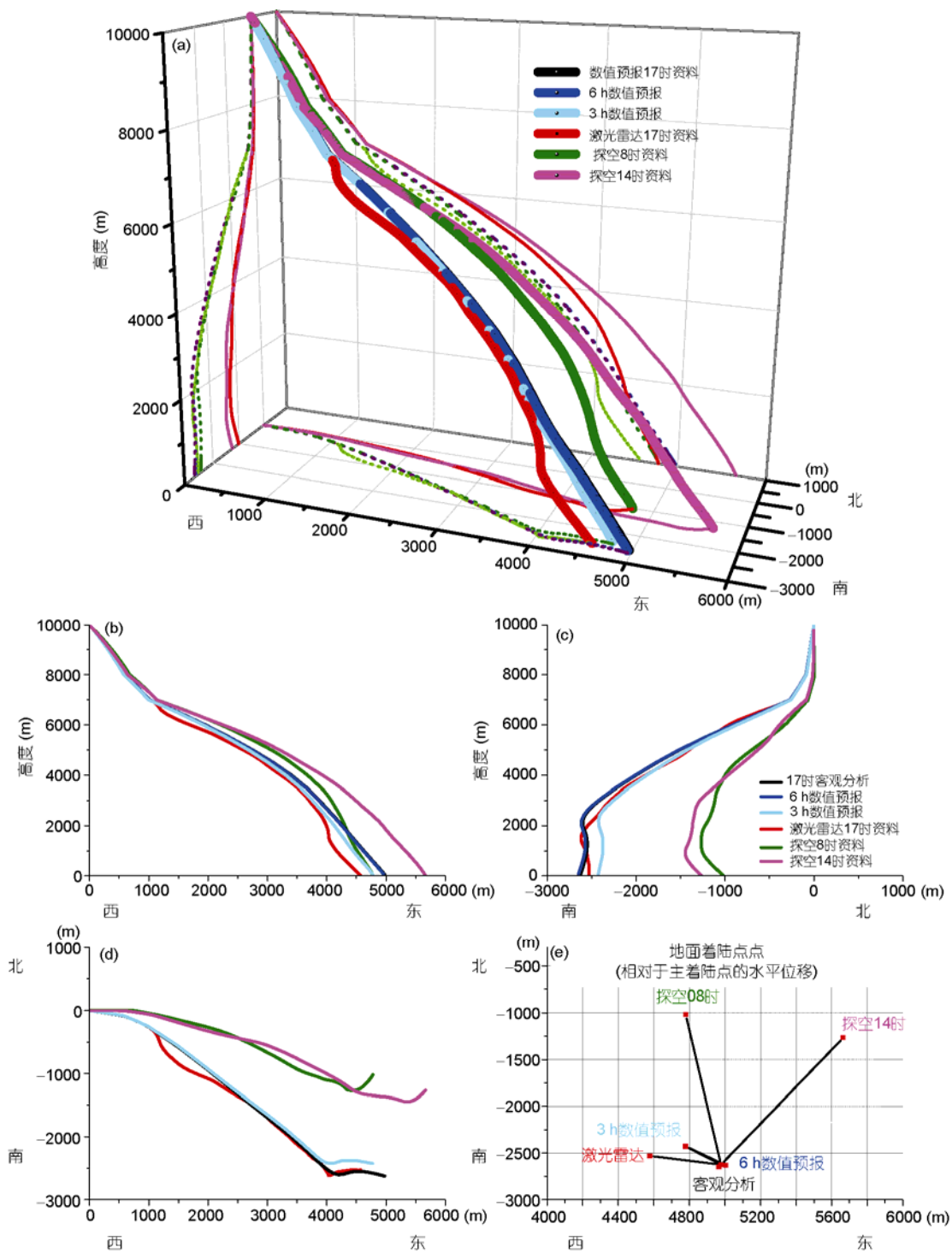


图 10 2008 年 9 月 28 日开伞后神七伞降回收三维轨迹及其水平、垂直投影预测图

m 处, 随后飞船水平向东南偏东方向飘移, 主要受高空水平西北风场的影响, 到大约 2000 m 左右飞船转

向偏东方向移动, 最后在离开伞点偏东 5005 m, 偏南 2630 m 处着落.

4.3 飞船伞降轨迹预测误差分析

使用多种风场资料对 2008 年 9 月 28 日 17 时 37 分着陆的“神舟七号”载人飞船的空中轨迹进行了预测, 其轨迹变化趋势基本一致, 以数值预报 17 时客观分析场资料为基准, 统计出不同资料预测的开伞点的位置或着陆点位置误差(见表 3). 从表 3 可以看出, 3 h 数值预报、6 h 数值预报、激光雷达、8 时探空和 14 时探空资料的偏差分别为 283.55, 27.02, 439.48, 1629.23 和 1519.34 m, 可见 6 h 数值预报效果最好, 3 h 数值预报和激光雷达次之, 探空资料偏差最大. 造成 6 h 数值预报结果好于 3 h 的原因可能是由于后者仍处在模式的 spin up 阶段. 而探空资料偏差较大的原因是因为所采用的资料是经过三个探空站插值得到的, 其观测时间和空间误差较大. 如果在试验时可采用车载探空设备, 在离着陆场较近的地点探测得到 17 时风廓线资料, 相信结果会有明显改善.

5 神七伞降实际轨迹模拟及散布区分析

本文使用从 WRF 数值模式中提取的主着陆场上空 2008 年 9 月 28 日 11 时 6 h 预报、14 时 3 h 预报、17 时 0 h 客观分析风廓线资料、激光雷达 17 时探测风廓线资料、8 时和 14 时探空风廓线资料(14 时为加密高空探测), 以实测 10 km 高度开伞点(111.3°E, 42.3°N)为原点, 对 2008 年 9 月 28 日 17 时 37 分落地的“神舟七号”载人飞船进行了伞降回收轨迹模拟, 并与实测着落点(111.36°E, 42.277°N)比较, 对落点的散布情况进行了分析.

以主着陆场上空 WRF 数值预报客观分析场(实况)17 时风廓线(图 11)为例, 对 2008 年 9 月 28 日 17 时 37 分着陆的“神舟七号”载人飞船伞降过程进行了空中三维轨迹模拟(图 12), 表 4 和 5 列出三维轨迹坐标. 从图 11 中可以看出, 神七伞降回收时, 空中风主要以西北风为主, 且西风大于北风. 结合图 12 分析, 可以看出: ① 神七回收舱在开伞减速阶段, 飞船从

表 3 应用不同风资料预测神七开伞点和着陆点误差分析(单位: m)

风场资料	10000 m 开伞点 (相对着陆点)		地面着陆点 (相对开伞点)		水平距离偏差 (与 WRF 数值预报相比)
	东西向	南北向	东西向	南北向	
数值预报 17 时实况	-5005.1	2630.6	5005.1	-2630.6	0
3 h 数值预报	-4803.6	2431.1	4803.6	-2431.1	283.55
6 h 数值预报	-4993.7	2655.1	4993.7	-2655.1	27.02
激光雷达 17 时资料	-4577.5	2529.1	4577.5	-2529.1	439.48
探空 8 时资料	-4780.0	1017.0	4780.0	-1017.0	1629.23
探空 14 时资料	-5667.8	1263.4	5667.8	-1263.4	1519.34

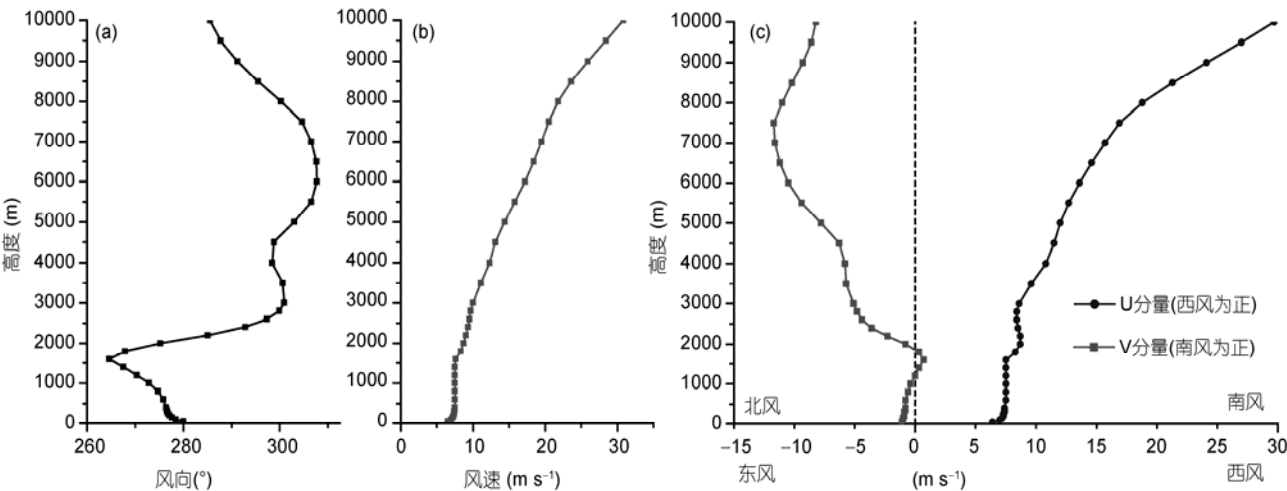


图 11 2008 年 9 月 28 日 17 时神七主着陆场上空风场垂直变化曲线图

(a) 风向变化曲线; (b) 风速变化曲线; (c) U, V 变化曲线

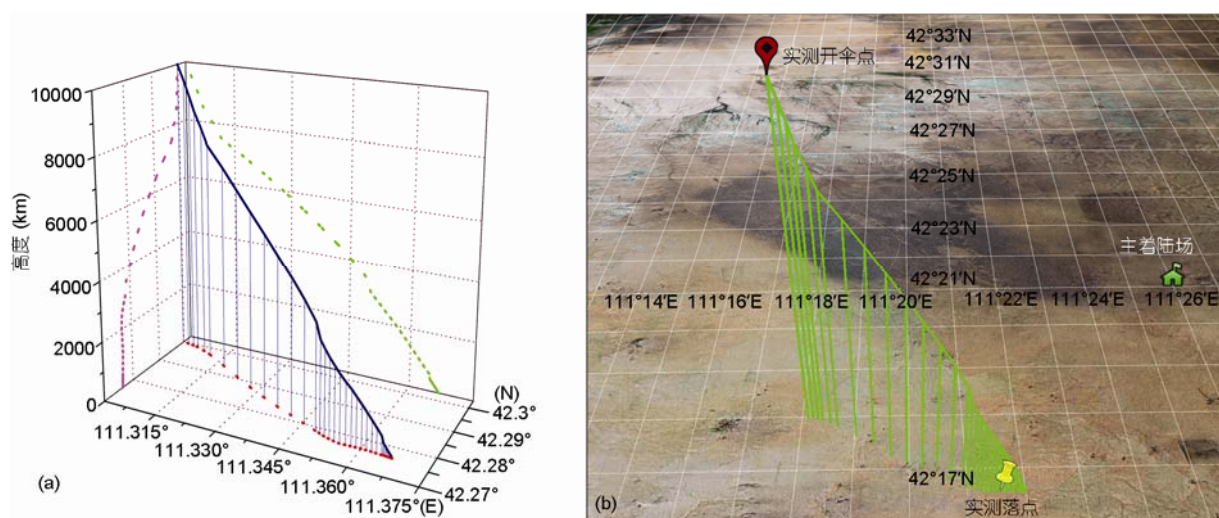


图 12 2008 年 9 月 28 日 17 时“神舟七号”载人飞船伞降回收空中轨迹模拟图

(a) 三维轨迹模拟; (b) 把轨迹显示在 Google Earth 上

10 km 下降到 7 km 高度, 速度由 200 m s^{-1} 降至 30 m s^{-1} , 用时 48 s, 此阶段尽管高空风很大, 水平面上, 东西分量 u 速度为 $30 \sim 15 \text{ m s}^{-1}$, 南北分量 v 速度为 $8 \sim 10 \text{ m s}^{-1}$, 但飞船水平速度更大, 返回舱主要向东作减速运动, 在东西向位移为 1010.7 m, 南北向位移为 267.3 m; ② 在 7 km 高度左右, 主伞全部打开以后, 飞船水平空速由大约 30 m s^{-1} 突降为 0, 垂直方向重力与浮力平衡, 飞船匀速下降. 此时, 水平方向返回舱主要受空气中水平风的作用飘移; 从 7~2 km, 水平风速 u , v 分量大小基本相当, 平均约为 12 m s^{-1} , 飞船主要向东南方向飘移, 在 2 km 左右, 风速 u 分量基本上稳定在大约 7.5 m s^{-1} , v 分量则减至 0.5 m s^{-1} 左右, 飞船主要向东飘移, 直到落地为止, 此阶段返回舱东西飘移了 5005.1 m, 南北飘移了 2630.7 m. 返回舱从 10 km 发布开伞指令到落地, 计算所得的水平面投影点相距为 5835 m.

图 13 和表 6 为不同资料模拟神七伞降着陆点散布图, 从中可以看出, 与神七实际着陆点(111.36°E , 42.277°N)相比, 使用 6 种精细风场资料模拟的神七伞降着陆点的偏差在 96~1551 m 之间, 其中, 数值预报 17 时 0 h 初始场和 11 时 6 h 预报模拟结果最好, 误差仅为 100 m 左右, 数值模拟 14 时 3 h 预报和激光雷达资料的误差次之在 400 m 之内, 8 时探空和 14 时探空资料的偏差也在 2 km 范围之内(其中激光雷达资料用的是四子王旗, 相距主着陆场中心距离有 100

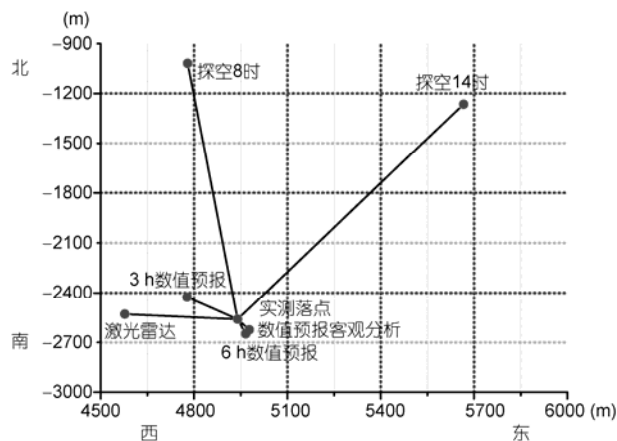


图 13 不同资料模拟“神舟七号”载人飞船伞降着陆点散布图

相对于实测开伞点的水平位移

多千米尚未订正), 这说明使用精细的风场资料模拟的神七伞降空中轨迹, 合理可信. 精细的风场资料为神七伞降轨迹预测提供了有力的气象保障服务.

6 结论

(1) 载人飞船的伞降回收着陆阶段受空中水平风的影响很大.

(2) 飞船伞降轨迹简化动力学与运动学方程, 分阶段计算方法, 合理可行.

表 4 2008 年 9 月 28 日神七返回舱伞降空中轨迹模拟坐标 ^{a)}(单位: m)

高度	东西位移	南北位移	高度	东西位移	南北位移	高度	东西位移	南北位移
10000	0	0	4000	3404.5	-2000.8	1000	4625.5	-2553.3
9500	162.5	-23.9	3500	3660.8	-2219.6	800	4699.9	-2563.3
9000	314.7	-45.6	3000	3874.9	-2413.3	600	4774.9	-2577.1
8500	455.5	-66.2	2800	3954.2	-2479.6	400	4849.9	-2593.3
8000	584.7	-88.1	2600	4033	-2535.8	350	4868.6	-2597.7
7500	809.6	-173.1	2400	4111.7	-2577.7	300	4887.4	-2602.1
7000	1010.7	-267.3	2200	4189.2	-2599.6	250	4906	-2606.4
6500	1503.4	-583.9	2000	4264.2	-2597.7	200	4924.4	-2610.8
6000	1952.2	-908.3	1800	4336.7	-2578.3	150	4942.7	-2615.2
5500	2366.7	-1223.3	1600	4408	-2559.6	100	4960.5	-2619.6
5000	2751.4	-1511.8	1400	4479.9	-2550.8	50	4977.5	-2623.8
4500	3096.7	-1768	1200	4552.4	-2548.9	0	5005.1	-2630.6

a) 以实测开伞点为原点

表 5 2008 年 9 月 28 日神七返回舱伞降空中轨迹模拟

高度(m)	经度(E)	纬度(N)	高度(m)	经度(E)	纬度(N)	高度(m)	经度(E)	纬度(N)
10000	111.3018°	42.29979°	4000	111.3453°	42.28021°	1000	111.3623°	42.27669°
9500	111.3035°	42.29955°	3500	111.3488°	42.2787°	800	111.3635°	42.27661°
9000	111.3051°	42.2993°	3000	111.3501°	42.27814°	600	111.3646°	42.27652°
8500	111.3065°	42.29902°	2800	111.3514°	42.27762°	400	111.3649°	42.2765°
8000	111.3091°	42.298°	2600	111.3527°	42.27717°	350	111.3652°	42.27647°
7500	111.3114°	42.29696°	2400	111.354°	42.27684°	300	111.3654°	42.27645°
7000	111.3173°	42.29376°	2200	111.3553°	42.27667°	250	111.3657°	42.27642°
6500	111.3228°	42.29071°	2000	111.3566°	42.27664°	200	111.366°	42.2764°
6000	111.3279°	42.28792°	1800	111.3578°	42.2767°	150	111.3663°	42.27637°
5500	111.3328°	42.28551°	1600	111.3589°	42.27675°	100	111.3665°	42.27634°
5000	111.3372°	42.28353°	1400	111.3601°	42.27677°	50	111.3668°	42.27631°
4500	111.3415°	42.28183°	1200	111.3612°	42.27674°	0	111.367°	42.27628°

表 6 不同风资料模拟神七伞降着陆点与实际落点的偏差(单位: m)

风场资料	地面着陆点(相对开伞点)		偏差
	东西向	南北向	
实际落点	4940	2560	/
数值预报 17 时实况	5005.1	-2630.6	96.03
3 h 数值预报	4803.6	-2431.1	187.67
6 h 数值预报	4993.7	-2655.1	109.21
激光雷达 17 时资料	4577.5	-2529.1	363.81
探空 8 时资料	4780	-1017	1551.27
探空 14 时资料	5667.8	-1263.4	1486.9

(3) 数值天气预报快速同化模式的发展应用, 为飞船伞降回收阶段轨迹预测提前 6 h 进行提供了保障.

(4) WRF-RUC 数值模式 6 h 预报、3 h 预报、高空探测、激光雷达探测风资料与客观分析场(实况)相比, 标准差分别为风向 6.35°和 3.75°, 以及 22.3°和 20.63°, 风速 0.8 和 0.34 m s⁻¹, 以及 2.66 和 2.56 m s⁻¹.

(5) 神七主着陆场上空, 在 10~15 km 高度处有一大于 30 m s⁻¹ 的急流带, 风速最大出现在 12 km 处, 达到 55 m s⁻¹, 为了避开高空急流带, 保证飞船伞降回收成功, 开伞点应选择在低于 10 km 高度.

(6) 使用不同资料预测的神七飞船伞降的轨迹变化趋势基本一致, 以数值预报客观分析风场资料为标准值, 统计分析不同资料计算得到的开伞点或

着陆点误差, 6 h 数值预报效果最好, 3 h 数值预报和激光雷达次之, 8 时探空资料偏差最大.

(7) 以实际开伞点为原点, 对 2008 年 9 月 28 日 17 时 37 分落地的“神舟七号”载人飞船进行了伞降回收轨迹模拟, 并与实测着落点比较, 6 种精细风场资料模拟的神七伞降着陆点的散布区在 96~1551 m 之间.

(8) 精细风资料可为飞船的回收飞行段风的修正提供更精细的信息, 利用精细风资料预测飞船返回舱伞降轨迹, 有助于飞行控制指令编发, 从而提高飞船定点回收的精度和可靠性, 减小飞船的搜救范围, 缩短搜救时间.

(9) 在该试验中没有考虑大气垂直方向气流对飞船的影响; 另外考虑到小范围内风场在水平方向

上变化不大, 只使用了单点风场垂直方向(z)一维廓线资料, 没有细致考虑飞船下降过程中三维空间的风场资料. 这是今后进行飞船的伞降回收过程研究时需要进一步改进的.

(10) 激光雷达可对回收场地上空进行垂直探测, 而且探测时间分辨率和垂直分辨率高, 能反映出更小尺度的低空风的局地扰动, 这正是飞船伞降低空风获得最有利的探测工具.

(11) 如果在试验中进行车载探空放球, 就会得到更精细高空探测风廓线资料, 车载高空探测与车载激光雷达结合, 将对飞船伞降提供非常有利的风廓线探测实时数据, 从而有利于提高飞船伞降的回收精度.

致谢 北京市气象局范水勇博士在 WRF-RUC 数值预报模式方面提供帮助, 审稿人对本文提出建设性修改意见, 在此一并致谢.

参考文献

- 熊普, 秦子增, 程文科. 回收过程中高空风场的特点及描述. 航天返回与遥感, 2003, 24: 9-14
- Lucas J F. An application of a proposed airdrop planning system. Master Thesis. Boston: The Massachusetts Institute of Technology, 2004
- 梁琦. 载人飞船返回舱落点精度和散布概率分析. 硕士学位论文. 北京: 北京航空航天大学, 2004
- 廖前芳, 程文科, 宋旭民, 等. 风场对舱-伞系统着陆姿态影响的仿真研究. 航天返回与遥感, 2005, 26: 6-10
- 王绪奇. 回收着陆过程返回舱摆动与减旋研究. 硕士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2006
- 宋旭民, 程文科, 彭勇, 等. 飞船回收过程动力学建模与仿真. 弹道学报, 2005, 17: 55-59
- 彭勇. 载人飞船回收系统若干动力学问题的研究与应用. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2004
- 许志, 唐硕. 运载火箭空中发射伞降运动分析. 飞行力学, 2006, 24: 48-51
- 方振平, 陈万春, 张曙光. 航空飞行器飞行动力学. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005
- 李光超, 马晓平. 无人机伞降回收运动分析. 飞行力学, 2007, 25: 25-28
- 席庆彪, 张波, 田小雄, 等. 基于风场估侧的无人机. 西北工业大学学报, 2004, 22: 452-456
- 陈德辉, 薛纪善. 数值天气预报业务模式现状与展望. 气象学报, 2004, 62: 623-633
- 薛纪善. 我国西北高原地区数值预报的几个科学问题. 干旱气象, 2005, 23: 68-71
- 矫梅燕. 关于提高天气预报准确率的问题. 气象, 2007, 33: 3-8
- 杨森, 陈力强, 周晓珊. 构建 PC-Cluster 系统实现精细数值模式业务运行. 气象与环境学报, 2006, 22: 41-44
- 苑海燕, 杜继稳, 侯建忠, 等. “神舟六号”飞船着陆时段主着陆场区风场的数值模拟. 气象科学, 2008, 28: 56-61
- 谷湘潜, 李燕, 陈勇, 等. 省地气象台精细化天气预报系统. 气象科技, 2007, 35: 166-170
- 周小林, 孙东松, 钟志庆, 等. 多普勒测风激光雷达研究进展. 大气与环境光学学报, 2007, 2: 161-168
- 孙东松, 李颖颖. 高低空一体化测风激光雷达. 红外与激光工程, 2008, 37: 237-242
- 沈法华, 孙东松, 陈敏, 等. 影响 Fizeau 干涉仪测风激光雷达测量精度因素分析. 大气与环境光学学报, 2006, 1: 53-58
- 蒋立辉, 庄子波, 李勇. 基于单激光雷达的低空风场反演与精度分析. 红外与激光工程, 2006, 35(增刊): 252-256
- 庄子波, 蒋立辉, 田俊峰, 等. 基于单多普勒激光雷达低空三维风场反演方法. 中国民航大学学报, 2008, 26: 25-29
- Claude S, Anne G, Albert H, et al. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. Instrumental setup, validation, and first climatological results. Appl Optics, 1999, 38: 2410-2421
- 李惠康. 载人飞船回收着陆分系统简介. 载人航天, 2004, 2: 27-30
- 沈祖炜, 黄伟. 引导伞减速伞开伞过程建模. 航天返回与遥感, 2005, 26: 27-35
- 童旭东, 李惠康, 葛玉君, 等. 神舟号载人飞船回收着陆分系统设计与性能评估. 航天返回与遥感, 2004, 25: 1-6

- 27 ISOBE A, KAKO S I, Chang P H, et al. Two-way Particle-tracking Model for specifying sources of drifting objects: Application to the East China Sea Shelf. *J Atmos Ocean Technol*, 2009, 26: 1672–1682
- 28 彭勇, 宋旭民, 张青斌. 降落伞充气时间的计算方法. *航天返回与遥感*, 2004, 25: 17–20
- 29 Taylor A P, Murphy E. The DCLDYN parachute inflation and trajectory analysis tool—An overview. Technical Paper, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005
- 30 Zhang C L, Chen M, Kuo Y H, et al. Numerical assessing experiments on the individual component impact of the meteorological observation network on the “July 2000” torrential rain in Beijing. *Acta Meteorol Sin*, 2006, 20: 389–401
- 31 范水勇, 张朝林, 仲跻芹. MM5 三维变分系统在北京地区冷暖季背景场误差的对比分析. *高原气象*, 2006, 25: 855–861
- 32 Wu S H, Liu Z S, Sun D P. Noise reduction in LOS wind velocity of Doppler lidar using discrete wavelet analysis. *Chin Optics Lett*, 2003, 1: 722–725
- 33 Liu Z S, Wu D, Zhang K L, et al. A mobile incoherent Mie-Rayleigh Doppler wind lidar with a single frequency and tunable operation of an injection Nd: YAG laser. *Sci China Ser E-Eng Mater Sci*, 2003, 46: 309–317
- 34 Jason A, Derek J, Erik R, et al. Mesoscale numerical weather prediction model used in support of infrared hyperspectral measurement simulation and product algorithm development. *J Atmos Oceanic Technol*, 2007, 24: 585–601
- 35 安振华. 载人航天着陆场选择与分析. *中国空间科学技术*, 2006, 4: 67–71