

郭启云¹ 杨加春² 杨荣康¹ 钱媛^{1,3} 曹晓钟¹

球载式下投国产北斗探空仪测风性能评估

摘要

基于球载式下投北斗探空仪测风观测试验,建立了针对下投式的测风试验评估方法.试验结果表明上升段北斗测风的准确度接近RS92探空仪的探测准确度要求,两者一致性较好;下降段RS92测风误差基本上与上升段的属于同一量级水平,下降初期测风数据在使用时需要做预处理或者有效控制;下降段BD探空仪测风误差与下降段RS92的基本相当,除了球炸初期外,基本上接近WMO的测量要求,此外初期的急速下降对导航定位测风提出了更高的技术要求.整体而言,球载式下投探空观测在时间上可以实现对原有的1次探空进行加密,在空间上可以增加1个区域的探测,并为对现有探空站网分布进行合理优化提供依据,具有良好的应用前景.

关键词

球载下投;北斗测风;探测准确度

中图分类号 P412.23

文献标志码 A

收稿日期 2017-09-12

资助项目 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506069);中国气象局探测中心自设预研项目(TCZS201702)

作者简介

郭启云,男,高级工程师,研究方向为探空关键技术研究及应用.feng_cloudy@163.com

- 1 中国气象局气象探测中心,北京,100081
- 2 中国华云气象科技集团公司,北京,100081
- 3 南京信息工程大学 电子与信息工程学院,南京,210044

0 引言

高空气象观测作为综合气象观测的重要组成部分,常描述高空大气的气候变化,不仅要满足天气分析和数值预报的需要^[1],还要满足气候变化监测的需要^[2],同时还可作为风廓线、GNSS/MET水汽观测等遥感设备的参考标准和真实性检验要求^[3-4].目前,世界上最常用的高空风探测手段还是气球携带探空仪升空和地基设备跟踪实现测风.对于常规探空测风技术,全球范围主要有3种类型:高空气象探测雷达-探空仪系统、导航测风-探空系统和无线电经纬仪测风-探空系统.20世纪80年代以来,随着导航技术发展,相继出现了奥米伽、罗兰-C、GPS等导航测风系统^[5].目前,全球定位系统(GPS)由于其技术相对成熟,被广泛用于测风定位系统中^[6].我国从2002年开始对探空系统进行了升级换代,基本形成了以L波段雷达-电子探空仪为主体的探测体系^[7].国内学者基于地面气象观测做了大量研究工作,这为我国探空技术发展提供了良好的试验基础^[8-10].GPS探空技术以其优越的定位准确度而成为未来高空气象探测系统的发展方向^[11].

随着北斗卫星导航系统的发展以及考虑探空经济成本和加密观测的进一步需求,我国探空业务将从二次雷达测风逐步过渡到卫星导航测风,而球载式下投探空观测为未来业务发展带来了新的发展思路.下投探空利用某种平台下投探空仪实现对温度、压力、湿度和风速风向等测量^[12],可以有效弥补常规探空在时间和空间上的不足^[13],它与QuikSCAT散射计资料^[14]结合可以弥补恶劣天气条件下和广阔洋面上气象资料匮乏的空白^[15].我国现有高空站网整体分布不均,有资料空白区,而每年的加密探空需求呈增加趋势,因此,本文利用2017年中国气象局气象探测中心(简称探测中心)在长沙组织的下投探空试验数据,对球载式下投国产北斗探空仪测风性能进行综合分析,为探空业务发展提供技术基础.

1 试验仪器介绍

2017年3月3—5日,探测中心在长沙探空站进行了芬兰维萨拉RS92探空仪(简称RS92探空仪)、国产BD探空仪(简称BD探空仪)带降落伞开展下投式(简称球载式下投探空)同球双施放测风比对试验.其中RS92探空仪是目前世界上测量性能较好的探空仪之一,以GPS对探空仪定位实现定位测风,常作为比对试验中的参考标准;BD

探空仪是由国内探空仪厂家研制生产的,测风技术采用 BD-GPS 联合导航体制,定位模块采用国内厂家自主研制,专为 GNSS 高空气象探空仪所定制的导航定位模块,该模块所采用的 HD8020 芯片具有高性能和低功耗的特点,性能良好的导航定位服务(水平定位误差 $\leq \pm 10$ m、垂直定位误差 $\leq \pm 15$ m)能最大程度地降低对空间和电源的要求,易于集成和使用;气象气球采用中国气象局业务用气球作为上升段的载体,降落伞采用国际主流专用于探空仪下投的国产型号作为下降段的载体。

2 试验情况及评估方法

2.1 试验情况

施放地点长沙探空站位于长江流域附近,属亚热带季风气候,年平均气温 17.2 °C, 年均降水量 1 361.6 mm.球载式下投探空测风有效施放 10 次,天气情况全为阴.每次气球爆炸后降落伞均能打开负载探空仪下落,其中有 1 次是 BD 传感器发生故障,1 次是 RS92 在高空 23 km 失效,地面无接收数据,记为仪器故障.施放具体情况如表 1 所示。

上升过程根据配重在地面充灌适当氢气,将气球平均升速控制在 6~7 m/s.整体而言,球炸平均高度为 29 km.下降时由于气球爆破降落伞刚打开,空气稀薄,重力起主要作用,下降速度在 30 m/s 左右,下降至对流层顶(16 km)附近时约为 7~10 m/s;下降至 8 km 左右时,斜距达到 220 km 左右,由于低仰角(约 1°)遮挡受限,接收机信号减弱直至消失.此外,上升段 RS92、BD 的试验样本随高度增加,总体

呈逐渐减小的趋势,下降段 RS92、BD 随着高度减少,总体呈现逐渐减小的趋势。

2.2 评估内容

评估分析主要侧重于风这个气象要素,以风的南北分量、东西分量来体现.具体包括以下 3 个方面:1)以上升段 RS92 为参考标准,评估同球上升的 BD 测量性能;2)以上升段的 RS92 为参考标准,评估同一 RS92 数据在下降段的准确性;3)以下降段的 RS92 为参考标准,评估同降落伞下降 BD 的可用性。

2.3 统计方法

以同球施放上升(同一探空仪在不同上下段或者同降落伞下降)参考标准的测量值为约定真值,求出被评估测风秒数据和参考标准的差,记为 d_i ,对 d_i 以秒为时间单位进行平均(直接)偏差和标准偏差的计算,并以观测业务规范^[16] 约定的高度分层显示.具体计算方法如下:

1) 平均偏差:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{pi} - X_{bi})}{n}, \quad (1)$$

\bar{X} 表示评估对象(上升段 BD、下降段 RS92、下降段 BD,以 X_{pi} 标识)与参考标准(上升段 RS92、下降段 RS92,以 X_{bi} 标识)的平均偏差, n 代表总探空数据量。

2) 标准偏差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{pi} - X_{bi} - \bar{X})^2}{n - 1}}. \quad (2)$$

表 1 施放情况

Table 1 The record of balloon release

编号	施放时间	天气情况	参考标准 RS92 探空仪/g	被试 BD 探空仪/g	上升球炸 终止高度/m	平均升速/ (m/s)	下降接收 极限高度/m	平均降速/ (m/s)
1	3 日 07 时	阴	275	210	37 001	6.1	10 216	16.4
2	3 日 12 时	阴	275	206	35 928	7.1	10 713	13.1
3	3 日 19 时	阴	273	208	35 605	6.7	8 438	11.8
4	4 日 07 时	阴	274	207	38 028	7.5	9 550	18.4
5	4 日 16 时	阴	276	209	/	/	/	/
6	3 日 10 时	阴	275	210	31 129	6.7	10 809	13.3
7	3 日 15 时	阴	270	204	28 041	6.3	6 959	8.7
8	4 日 10 时	阴	275	208	28 013	6.2	9 779	13.6
9	4 日 12 时	阴	270	206	30 105	6.6	6 697	11.4
10	4 日 14 时	阴	273	204	30 293	6.4	15 430	18.8

注:1)3 日 19 时 BD 在高空传感器发生故障,地面接收无数据;2)4 日 16 时 RS92 在 23 km 发生失效,地面接收无数据;3)下降高度至 7 km 左右无信号,距离 220 km 左右,低仰角受遮挡影响;4)下降速度刚开始 30 m/s,至对流层顶 16 km 左右时 7~10 m/s。

此外,上升段、下升段的风计算均来自 BD-GPS 导航定位,计算方法遵照 WMO《气象仪器和观测方法》^[17].但由于球和降落伞的分离模式采用的是球自然爆炸后分离,因此,在球炸后会由于上升骤停导致剧烈抖动以及降落伞未有效打开使得降速很大.根据观测业务规范要求将升速和降速控制在 6~7 m/s 时的数据纳入计算,其他数据视为无效数据.

3 试验结果分析

3.1 上升 RS92 评估同球上升 BD

3.1.1 风东西分量

BD 与 RS92 探空仪的风东西分量一致性好,风的变化细微结构均能得到较好的体现,其在 10~14 km 的大风区(65~70 m/s)也有较好的跟随性(图 1a).从单个样本来看,BD 与 RS92 探空仪的风东西

分量偏差有一定的差异,但变化较小,整体上在 ± 1.0 m/s 以内(图 1b).

1)标准偏差(图 2a):整体而言,BD 与 RS92 的上升段整体合成误差在 1.0 m/s 左右.30 km 到球炸,BD 上升风东西分量与 RS92 上升段的标准偏差在 0.8 m/s 左右;30~20 km,两者的标准偏差在 1.0 m/s 以内;对流层附近,两者的标准偏差较小,在 0.7 m/s 以内;对流层以下,标准偏差减少,在 0.5 m/s 左右.

2)平均(直接)偏差(图 2b):整体而言,BD 与 RS92 的上升段风东西分量平均偏差合成在 ± 0.3 m/s 以内;整体上表现为有正有负,低层为正偏差,中层为负偏差,高层以正偏差为主;在顶层 30 km 以上正偏差较大,说明 BD 的定位风东西分量是大于 RS92 的.

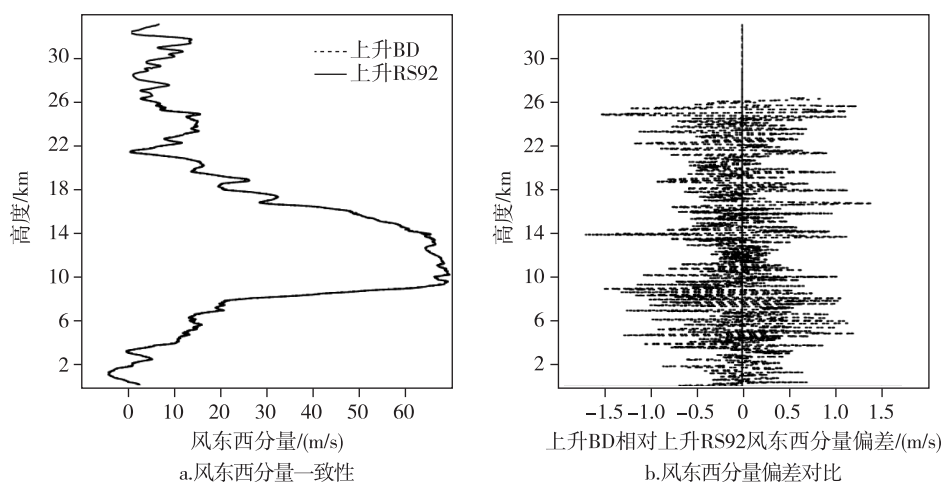


图 1 2017 年 3 月 4 日 07 时 BD、RS92 探空仪同球上升段风东西分量对比

Fig. 1 The contrast of E-W wind of BD and RS92 sonde hanging on the same ball at ascent stage at 0700 BST on March 4, 2017

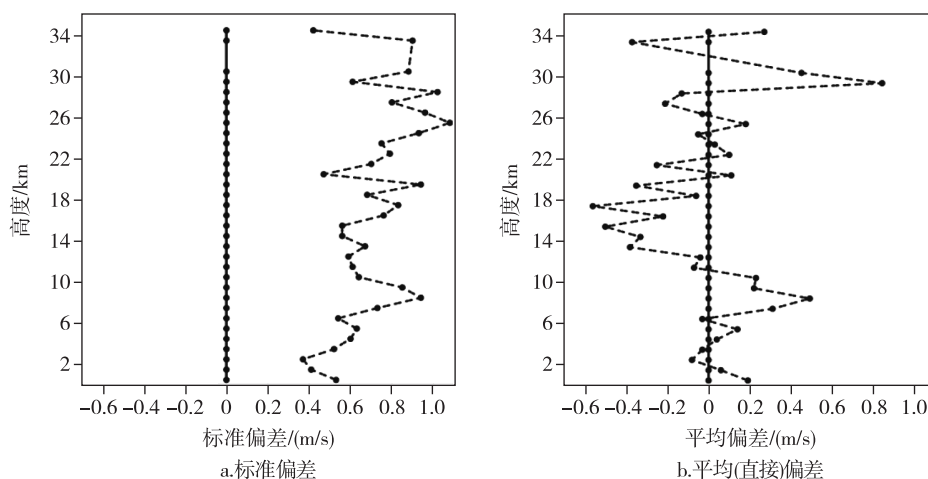


图 2 BD、RS92 探空仪同球上升段风东西分量误差统计分析

Fig. 2 The analysis of the errors of the contrast of E-W wind of BD and RS92 sonde hanging on the same ball at ascent stage

3.1.2 风南北分量

与风东西分量一样, BD 与 RS92 探空仪的风南北分量一致性也非常好, 风的变化细微结构均能得到较好的体现, 同时两者风的大小均明显小于东西方向的(图 3a), 这与我国处于西风带影响区域有直接关系. 从单个样本来看, BD 与 RS92 探空仪的风南北分量偏差差异较小, 整体上在 ± 1.0 m/s 以内(图 3b).

1) 标准偏差(图 4a): 整体而言, BD 与 RS92 的上升段整体合成误差在 1.0 m/s 左右. 30 km 到球炸, BD 上升风南北分量与 RS92 上升段的标准偏差在 1.2 m/s 左右; 30~20 km, 两者的标准偏差在 1.0 m/s 以内; 在对流层附近, 两者的标准偏差也较小在 1.0 m/s 以内; 对流层以下, 标准偏差减少, 在 0.5 m/s

左右.

2) 平均(直接)偏差(图 4b): 整体而言, BD 与 RS92 的上升段风南北分量平均偏差合成在 ± 0.3 m/s 以内; 整体上表现为有正有负, 没有明显规律, 呈现左右摆动趋势; 在顶层 30 km 以上偏差最大, 说明 BD 在顶层附近的测风误差较大, 这与此时气球在南北方向风速较小情况下频繁摆动有直接关系.

3.1.3 小结

从风东西分量、风南北分量两个方面以上升 RS92 为参考标准评估同球上升 BD, 结果表明上升段 BD 的风东西分量、风南北分量的误差(标准偏差 ≤ 1.0 m/s, 平均偏差: ± 1.0 m/s) 接近 RS92 的探测准确度要求(± 1.0 m/s, 95% 的置信区间). 由于是以 RS92 为标准, 因此误差是两者间的综合结果, 未去

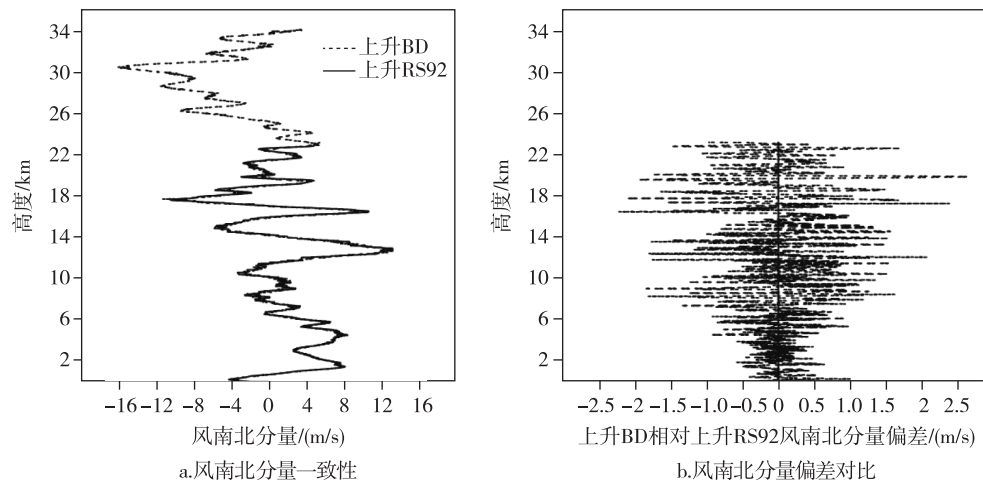


图 3 2017 年 3 月 5 日 10 时 BD、RS92 探空仪同球上升段风南北分量对比

Fig. 3 The contrast of N-S wind of BD and RS92 sonde hanging on the same ball at ascent stage at 1000 BST on March 5, 2017

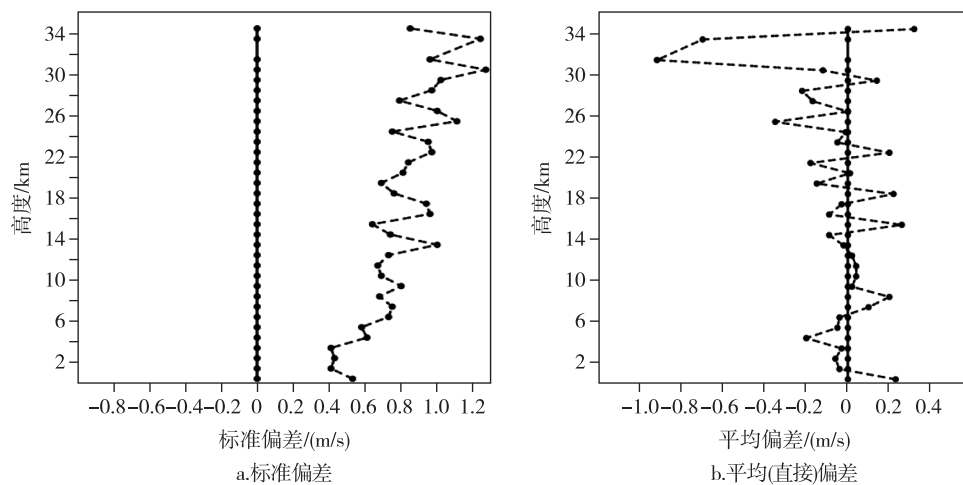


图 4 BD、RS92 探空仪同球上升段风南北分量误差统计分析

Fig. 4 The analysis of the errors of the contrast of N-S wind of BD and RS92 sonde hanging on the same ball at ascent stage

除 RS92 自身误差,但有一定的参考性.此外,在上升段球炸处附近两者平均偏差和标准偏差较大,根据实际数据反查,这种现象与气球频繁摆动以及球炸后晃动有直接关系.

3.2 上升 RS92 评估下降同一 RS92

上升段探测是以气球为载体,下降段探测是以降落伞为载体的,同一探空仪由于发生漂移,探测环境相对发生了改变.假设大气气流流动均匀,以上升的 RS92 为参考标准,评估同一 RS92 探空仪在下降段的测风准确性.

3.2.1 风东西分量

RS92 下降段风东西分量与 RS92 上升段风东西分量整体上一致性较好,在大风区域(65~70 m/s)附近也有较好跟随性,但下降段的风东西分量的细

微结构没有上升段明显(图 5a).从单个样本来看,RS92 下降段与 RS92 上升段的风东西分量偏差有较大的差异,整体上在 ± 3.0 m/s 左右(图 5b).

1) 标准偏差(图 6a):RS92 下降段与 RS92 上升段的风东西分量相比,整体上合成误差在 2.5 m/s 左右.球炸到 30 km,RS92 下降段与 RS92 上升段的风东西分量标准偏差在 3.0~6.0 m/s;30~20 km,两者的标准偏差在 1.5~3 m/s;在对流层附近,两者的标准偏差不大,在 4.0 m/s 左右;对流层以下,标准偏差先减少再增大,在 10 km 附近,标准偏差较大,达 7.0 m/s.从探测原始数据来看,由于此时探测距离远、仰角低,接收机接收的信号存在较多误码,数据采取了线性插值处理,未能反映出实际的风速变化.

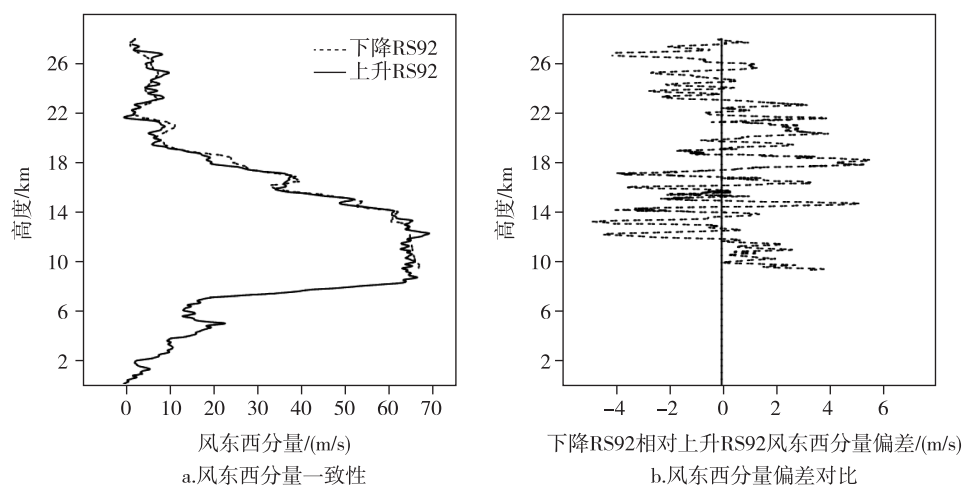


图 5 2017 年 3 月 4 日 15 时上升 RS92 与下降 RS92 风东西分量对比

Fig. 5 The contrast of E-W wind of BD sonde at ascent stage and RS92 sonde at descent stage at 1500 BST on March 4, 2017

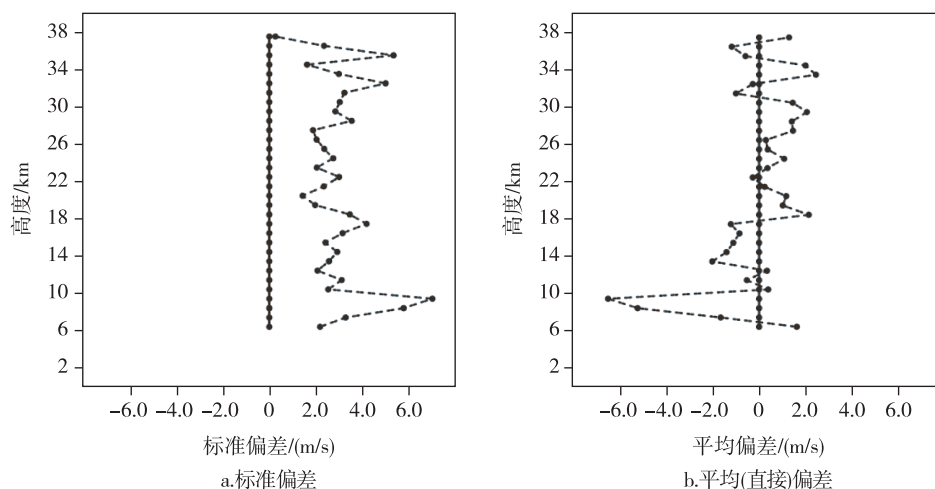


图 6 上升 RS92 与下降 RS92 风东西分量误差统计分析

Fig. 6 The analysis of the errors of the contrast of E-W wind of RS92 sonde at ascent stage and RS92 sonde at descent stage

2) 平均(直接)偏差(图 6b):RS92 下降段与 RS92 上升段的风东西分量相比,除 10 km 以外,整体上合成误差在 ± 2.0 m/s 以内.对流层以上,表现为正偏差为主;对流层以下(10 km 除外),表现为负偏差为主.在 10 km 附近,存在负偏差的最大值,可达 -6.0 m/s,与标准偏差有对应关系,说明此时因探测距离较远信号受低仰角遮挡无法正常接收.

3.2.2 风南北分量

与风东西分量相比,RS92 下降段风南北分量与 RS92 上升段风南北分量整体上一致性略差,20 km 以上,跟随性相对较好,20 km 以下,跟随性不好(图 7a).从单个样本来看,RS92 下降段与 RS92 上升段的风南北分量偏差有较大的差异,整体在 $-1.0 \sim 6.0$ m/s(图 7b).

1) 标准偏差(图 8a):RS92 下降段与 RS92 上升段的风南北分量相比,整体上合成误差在 3.0 m/s 左右.球炸到 30 km,RS92 下降段与 RS92 上升段的风南北分量标准偏差波动范围较大,在 $1.0 \sim 5.0$ m/s,说明与此时球炸以后抖动有直接关系.30~20 km,两者的标准偏差在 $2.0 \sim 5.0$ m/s;在对流层附近,两者的标准偏差较大,在 7.0 m/s 左右;对流层以下,标准偏差逐步减少.

2) 平均(直接)偏差(图 8b):RS92 下降段与 RS92 上升段的风南北分量相比,除 10 km 和球炸高层附近以外,整体上合成误差在 ± 2.0 m/s 以内.球炸高层附近,平均偏差较大,在 -10.0 m/s 以上.整体上,偏差没有明显规律,呈现正负交替分布出现;对流层以下(10 km 除外),表现为负偏差为主.在 10 km

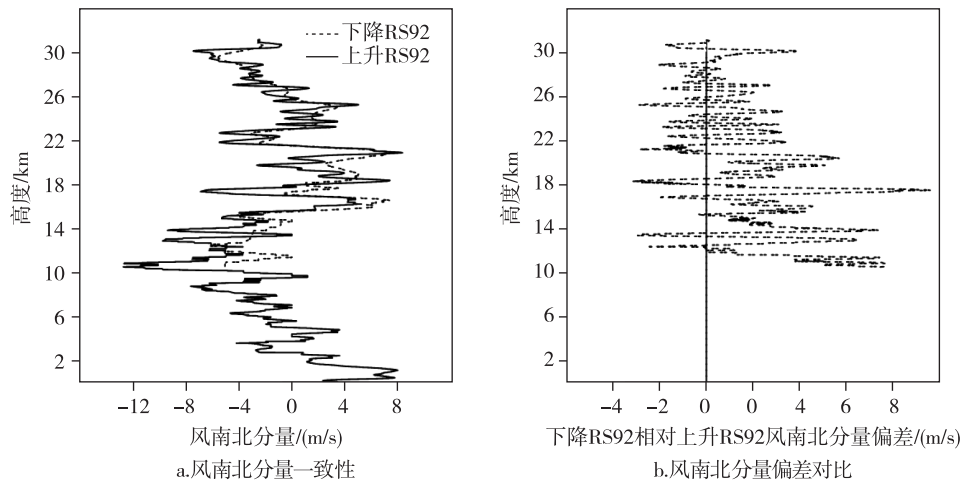


图7 2017年3月4日10时上升RS92与下降RS92风南北分量对比

Fig.7 The contrast of N-S wind of RS92 sonde at ascent stage and RS92 sonde at descent stage at 1000 BST on March 4,2017

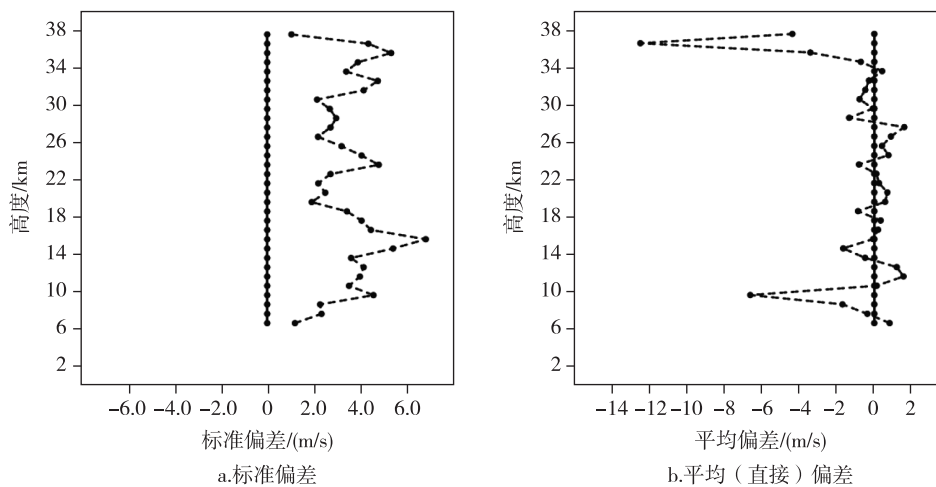


图8 上升RS92与下降RS92风南北分量误差统计分析

Fig.8 The analysis of the errors of the contrast of N-S wind of RS92 sonde at ascent stage and RS92 sonde at descent stage stage

附近,存在负偏差的最大值,可达 -6.0 m/s ,与标准偏差有对应关系,原因与此时因探测距离较远信号受低仰角遮挡有直接关系.

3.2.3 降速对测风的影响

在气球爆破刚结束时,由于RS92探空仪所处环境的空气密度小,降落伞没有完全打开,存在类似“自由落体”的现象,前期降落约为 45 m/s 左右,对定位有一定影响,从而影响下降段测风数据质量,造成测风的细微结构较难捕获,因此使用该段数据时,要做预处理或者有效控制;随着降落伞的逐步打开以及空气密度变大,净浮力起到一定的效果,降速逐步减小;直到 18 km 时,下降速度减小到 10 m/s 左右,降落伞在垂直方面起到支撑作用,可以实现对风的有效测量,再往后面至 10 km 时,由于电池供电以及远距离对接收机低仰角遮挡影响,地面很难再接收到数据(图9).

3.2.4 小结

从风东西分量、风南北分量两个方面以气球作为载体的上升RS92为参考标准评估以降落伞为载体的下降同一RS92,结果表明上升段的RS92风东西分量、风南北分量与下降段的误差基本上与上升段的处于同一量级(标准偏差 $\leq 3.0\text{ m/s}$,平均偏差: $\pm 2.0\text{ m/s}$),说明有良好的应用前景.同时,下降初期由于空气密度小,降落伞没有完全打开,存在类似“自由落体”的现象,影响下降段测风数据质量,使用时需要进行预处理或者有效控制;直到 18 km 时,数据可用性基本上与业务要求接近.降至 10 km 左右时,因探测距离较远,信号受低仰角遮挡影响造成无法有效跟踪,数据缺测较多,这对异地布设接收机

提出了要求.

3.3 下降RS92评估同降落伞下降BD

在下降段,RS92、BD探空仪以降落伞为同一载体进行同步观测,探测环境相对上升、下降对比分析是保持一致的.BD探空仪下投10次中有2次在下投阶段发生定位信号丢失,不参与统计分析.

3.3.1 风东西分量

BD下降段的风东西分量与RS92下降段的整体一致性略差,在顶层球炸附近由于降速非常快,其数据基本上不可用. 18 km 时,其与RS92下降段的一致性较好,在大风区域($65\sim 70\text{ m/s}$)附近也有较好跟随性,但BD下降段的风东西分量的细微结构没有RS92下降段明显(图10a).从单个样本来,BD下降段与RS92下降段的风东西分量偏差有较大的差异变化,整体在 $\pm 5.0\text{ m/s}$ 左右(图10b).

1)标准偏差(图11a):BD下降段的风东西分量与RS92下降段的风东西分量相比,整体上合成误差在 1.5 m/s 以内.球炸到 30 km ,BD下降段的风东西分量基本上不可以用,不参与统计分析. $30\sim 20\text{ km}$,两者的标准偏差呈现“之”变化,在 $0.5\sim 2.5\text{ m/s}$. 20 km 到对流层顶附近,两者的标准偏差逐渐增大,由 0.5 m/s 逐渐增大到 2.5 m/s .在对流层附近 14 km 左右,两者的标准偏差最大,在 3 m/s 以内; 14 km 以下,又呈现反“之”变化,在 $1.3\sim 3.5\text{ m/s}$,到 10 km 以下,两者受低仰角遮挡影响均没有信号.

2)平均(直接)偏差(图11b):BD下降段的风东西分量与RS92下降段的整体上合成误差在 $\pm 1.5\text{ m/s}$ 以内.对流层顶附近存在负偏差最大值 -2.8 m/s .对流层以上(30 km 除外),表现为负偏差

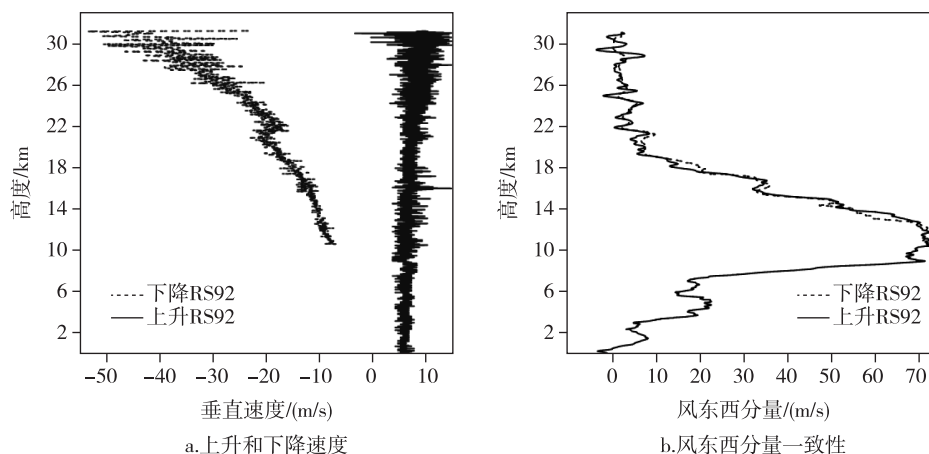


图9 降速对测风影响分析

Fig.9 The analysis of the velocity of rising and falling on wind measurement

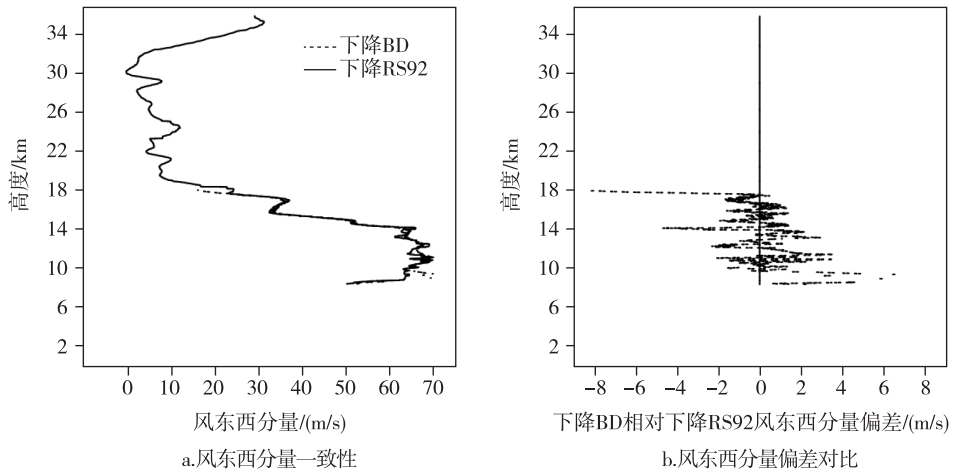


图 10 2017 年 3 月 4 日 12 时 BD、RS92 探空仪同降落伞下降段的风东西分量对比

Fig. 10 The contrast of E-W wind of BD and RS92 sonde hanging on the same parachute at descent stage at 1200 BST on March 4, 2017

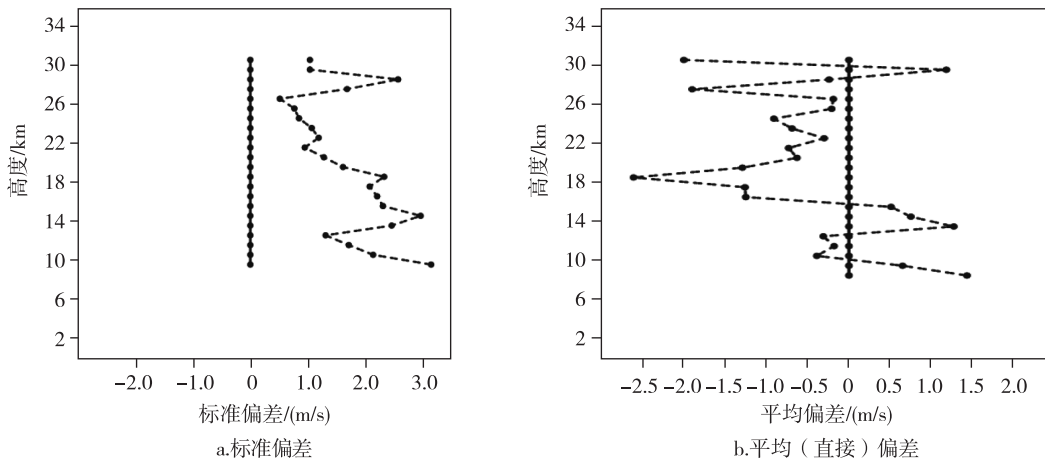


图 11 BD、RS92 探空仪同降落伞下降段的风东西分量误差统计分析

Fig. 11 The analysis of the errors of the contrast of E-W wind of BD and RS92 sonde hanging on the same parachute at descent stage

为主;对流层以下,表现为正偏差为主.在 8 km 左右时,存在正偏差的最大值,可达 1.5 m/s,与标准偏差有对应关系.

3.3.2 风南北分量

BD 下降段的风南北分量与 RS92 下降段的整体一致性略差,与风的東西分量一致,其在顶层球炸附近由于降速非常快,数据可用性受影响.18 km 时,其与 RS92 下降段的一致性较好,BD 下降段的风东西分量的细微结构没有 RS92 下降段明显(图 12a).从单个样本来看,BD 下降段与 RS92 下降段的风东西分量偏差有较大的差异,整体在 ± 3.0 m/s 左右(图 12b).

1) 标准偏差(图 13a):BD 下降段的风南北分量

与 RS92 下降段的风南北分量相比,整体上合成误差在 2.5 m/s 以内.球炸到 30 km,BD 下降段的风南北分量基本上不可以用,不参与统计分析.30~20 km,两者的标准偏在 2~3 m/s.20 km 到对流层顶附近,两者的标准偏差在 2~4.5 m/s.对流层附近呈现“之”形变化,两者的标准偏差最大值超过 6 m/s.14~10 km,两者的标准偏差又减小,在 4 m/s 以内;10 km 以下,又呈现“之”形变化,在 1~4.5 m/s.

2) 平均(直接)偏差(图 13b):BD 下降段的风南北分量与 RS92 下降段的整体上合成误差在 ± 1.5 m/s 左右.顶层存在负偏差最大值,可到 9 m/s,与高速下降有直接关系.10 km 附近存在正偏差最大值,可到 7 m/s,与低仰角有直接关系.对流层以上(30

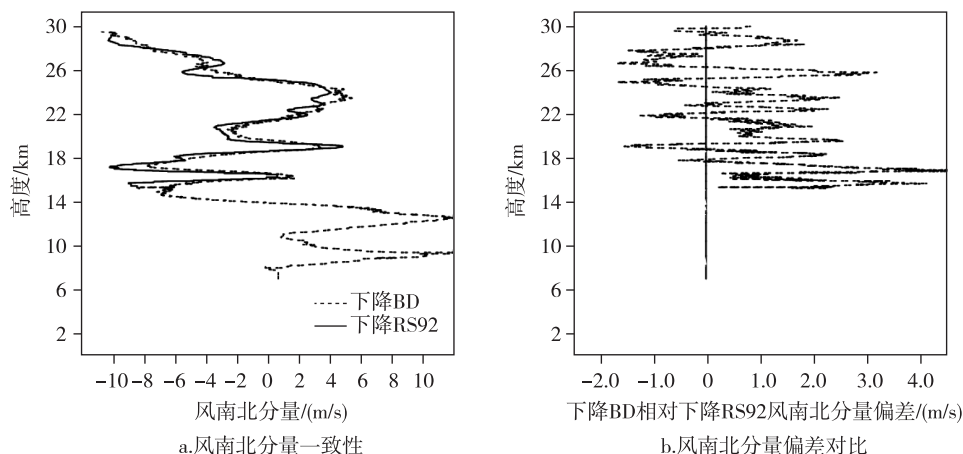


图 12 2017 年 3 月 5 日 15 时 BD、RS92 探空仪同降落伞下降段的风南北分量对比

Fig. 12 The contrast of N-S wind of BD and RS92 sonde hanging on the same parachute at descent stage at 1500 BST on March 5, 2017

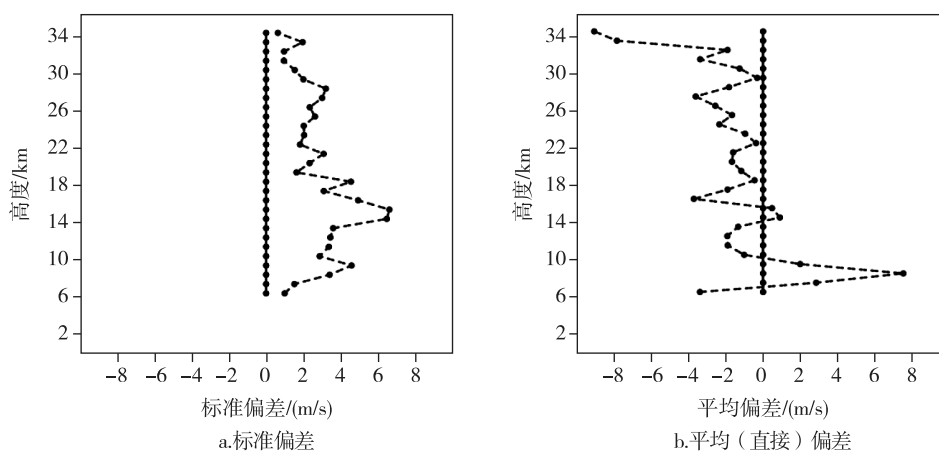


图 13 BD、RS92 探空仪同降落伞下降段风南北分量误差统计分析

Fig. 13 The analysis of the errors of the contrast of N-S wind of BD and RS92 sonde hanging on the same parachute at descent stage

km 除外), 表现为负偏差为主; 对流层以下, 表现为“之”形变化, 变化为 $-2 \sim 6$ m/s.

3.3.3 降速对测风的影响

在气球刚爆破时, 由于 BD 探空仪与 RS92 探空仪所处环境的空气密度小, 降落伞没有完全打开, 存在类似“自由落体”的现象, 前期降落在 45 m/s 左右, 对定位有一定影响, 从而影响下降段测风数据质量, 同时下降度 BD 测风的细微结构没有 RS92 明显, 因此与 RS92 下降一样, 在使用 BD 该段数据时, 要做预处理或者有效控制; 随着降落伞的逐步打开以及空气密度变大, 净浮力起到一定的效果, 降速逐步减小; 直到 18 km 时, 下降速度减小到 10 m/s 左右, 降落伞在垂直方面起到支撑作用, 可以实现对风的有效测量, 至 8 km 时, 由于远距离对接收机低仰

角遮挡影响, 地面很难再接收到数据(图 14).

3.3.4 小结

从风东西分量、风南北分量两个方面以下降 RS92 为参考标准评估同降落伞下降 BD, 结果表明下降段 BD 风东西分量、风南北分量的误差(标准偏差 ≤ 2.5 m/s, 平均偏差: ± 1.5 m/s) 与下降段的 RS92 测量相当, 接近 WMO 的测量要求(± 1.0 m/s). 下降段 BD 测风前期数据没有 RS92 细微, 且在使用时, 要做预处理或者有效控制; 后期数据可用性与业务要求接近. 同时, 急速下降对导航定位测风提出了更高的技术要求, 对下降段的速度控制方法也有待进一步改善.

4 结论与讨论

在长沙开展的球载式下投探空观测试验针对测

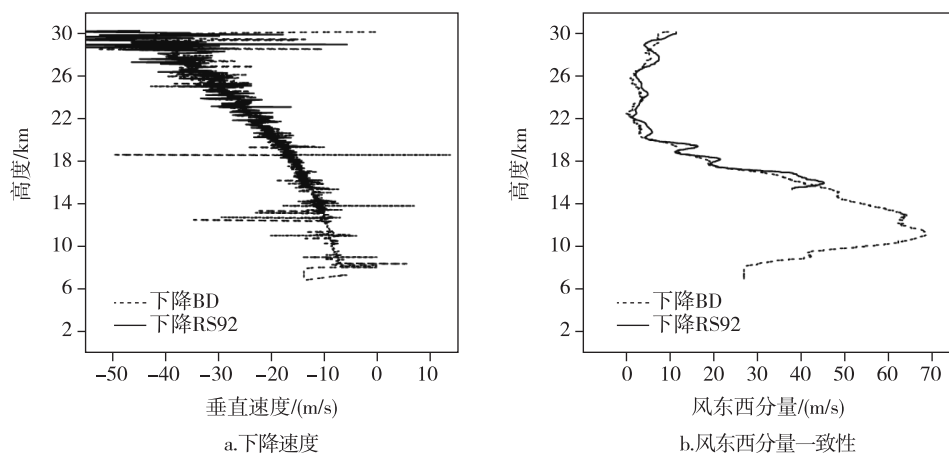


图 14 降速对测风影响分析

Fig. 14 The analysis of impact on wind measurement by the rate of descent

风以风东西分量、风南北分量为两个评估要素,从上升 RS92 评估同球上升 BD、上升 RS92 评估下降同一 RS92 和下降 RS92 评估同降落伞下降 BD 等 3 个方面进行结果分析,具体结论如下:

1) 以上升 RS92 评估同球上升的 BD,表明上升段 BD 的风东西分量、风南北分量的准确度接近 RS92 的探测准确度要求,具有较好的业务使用价值.此外,在上升段球炸处附近两者平均偏差和标准偏差较大,根据实际数据反查,这种现象与气球频繁摆动以及球炸后晃动有直接关系.

2) 以上升 RS92 评估下降的同一 RS92,表明下降段 RS92 的风东西分量、风南北分量与上升段的误差处于同一量级,有较好的应用前景.下降初期由于空气密度小,降落伞没有完全打开,存在类似“自由落体”的现象,影响下降段测风数据质量,使用时需要做预处理或者有效控制;直到 18 km 时,数据可用性与业务要求接近.降至 10 km 左右时,因探测距离较远,信号受低仰角遮挡影响无法有效跟踪,数据缺失较多,这对异地布设接收机提出了要求.

3) 以下降 RS92 评估同降落伞下降 BD,表明下降段 BD 的风东西分量、风南北分量的误差与下降段的 RS92 的基本相当,比较接近 WMO 的测量要求,下降段 BD 测风前期数据没有 RS92 细微,在使用时,要做预处理或者有效控制;后期数据的可用性与业务要求接近.同时,急速下降对导航定位测风提出了更高的技术要求,对下降段的速度控制方法也有待进一步改善.

在长沙开展的球载式下投探空观测试验表明基于上升段以球为载体、下降段以伞为载体的往返式

探空观测模式具有诸多优势:首先在时间上可以实现对原有的 1 次探空进行加密;其次通过载体漂移控制下降点可以实现原站施放、多站接收的观测模式,有利于对现有探空站网分布进行合理优化;最后往返式测风应用会对导航定位提出更高的技术要求.整体而言,该技术应用符合气象综合观测从人工定性观测向自动化遥感遥测、定量观测转变的迫切需求,具有良好的应用前景.

参考文献

References

- [1] 李伟,赵培涛,郭启云,等.国产 GPS 探空仪国际比对试验结果[J].应用气象学报,2011,22(4):453-462
LI Wei, ZHAO Peitao, GUO Qiyun, et al. The international radiosonde intercomparison results for China-made GPS radiosonde[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(4): 453-462
- [2] 郭启云,李伟.L 波段雷达探空系统气压测量值与气压反算气压值的误差分析[J].气象水文海洋仪器, 2013, 3(1): 9-13
GUO Qiyun, LI Wei. Error analysis between pressure measurement and pressure anti-calculation in L-band radar sounding system [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2013, 3(1): 9-13
- [3] 蔡兆男,王永,LIU Xiong,等.利用探空资料验证 GOME 卫星臭氧数据[J].应用气象学报,2009, 20(3): 337-345
CAI Zhaonan, WANG Yong, LIU Xiong, et al. Validation of GOME ozone profiles and tropospheric column ozone with ozone sonde over China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(3): 337-345
- [4] 赵静,曹晓钟,代桃高,等.毫米波云雷达与探空测云数据对比分析[J].气象,2017, 43(1): 101-107
ZHAO Jing, CAO Xiaozhong, DAI Taogao, et al. Comparative analysis of cloud observed by millimeter wave cloud

- radar and sounding[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(1):101-107
- [5] 张恩红,曹云昌,朱彬.北斗探空系统研发及其测风性能初步分析[J].应用气象学报,2013,24(4):464-471
ZHANG Enhong, CAO Yunchang, ZHU Bin. Developing of Beidou radiosonde system and analysis on its wind measuring performance [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(4):464-471
- [6] 于洪林,郭爱煌,罗巍.一种基于 GPS 定位数据的测距方法[J].电子测量技术,2011,34(7):95-98
YU Honglin, GUO Aihuang, LUO Wei. Method of ranging based on GPS positioning data [J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(7):95-98
- [7] 郭启云,李伟,刘凤琴.L 波段雷达探空系统定位高度应用于位势高度的研究分析[J].仪器仪表学报,2011,32(6):289-292
GUO Qiyun, LI Wei, LIU Fengqin. Analysis of the positioning height of L-band radar sounding system used in geopotential height[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6):289-292
- [8] 严蓉,陈伟民,章鹏,等.温度对相位法微波测距测相精度的影响研究[J].电子测量与仪器学报,2014,28(2):192-197
YAN Rong, CHEN Weimin, ZHANG Peng, et al. Influence of temperature on phase difference measurement accuracy in phase shift microwave ranging [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(2):192-197
- [9] 彭基伟,吕文华,行鸿彦,等.基于改进 GA-BP 神经网络传感器的温度补偿[J].仪器仪表学报,2013,34(1):153-160
PENG Jiwei, LÜ Wenhua, XING Hongyan, et al. Temperature compensation for humidity sensor based on improved GA-BP neural network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1):153-160
- [10] 行鸿彦,武向娟,吕文华,等.自动气象站数据采集器温度通道的环境温度补偿[J].仪器仪表学报,2012,33(8):1868-1874
XING Hongyan, WU Xiangjuan, LÜ Wenhua, et al. Environmental temperature compensation for the temperature channel of data-acquisition unit in automatic weather station [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(8):1868-1874
- [11] 姚雯,马颖,黄炳勋,等.利用 GPS 定位资料分析 L 波段雷达测风性能[J].应用气象学报,2009,20(2):195-202
YAO Wen, MA Ying, HUANG Bingxun, et al. Wind measuring accuracy of L-band radar-digital radiosonde system through the intercomparison with GPS data [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(2):195-202
- [12] 陈洪滨,朱彦良.大气下投探空技术的发展与应用[J].地球科学进展,2008,23(4):337-341
CHEN Hongbin, ZHU Yanliang. A review on the development and application of the atmospheric dropsonde technique [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(4):337-341
- [13] 曲晓波,Julian Heming.下投式探空资料对数值预报初始场影响的个例分析[J].气象与环境学报,2006,22(2):34-37
QU Xiaobo, Julian Heming. A case study of the impact of Dropsonde data on the NWP initial fields [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2006, 22(2):34-37
- [14] 张帆,刘宇迪.散射计风场反演的台风海平面气压场分析[J].自然科学进展,2008,18(11):1288-1296
ZHANG Fan, LIU Yudi. Analysis of typhoon sea level pressure field inverted by the scattered wind field [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(11):1288-1296
- [15] 舒守娟,王元,宋金杰.西北太平洋台风“海棠”结构的 GPS 下投式探空仪观测分析[J].气象学报,2011,69(6):933-944
SHU Shoujuan, WANG Yuan, SONG Jinjie. Observational analysis of the structure of Typhoon Haitang (0505) over the western North Pacific by using the GPS Dropsonde data [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2011, 69(6):933-944
- [16] 李伟,许正旭,陈永清,等.常规高空气象观测业务规范[M].北京:中国气象出版社,2010,12
LI Wei, XU Zhengxu, CHEN Yongqing, et al. The service specification to observation of normal high altitude meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010, 12
- [17] WMO guide to meteorological instruments and methods of observation(WMO-No.8) [R]. World Meteorological Organization, 2014

Evaluation of wind performance of domestic Beidou dropsonde of ball-loading

GUO Qiyun¹ YANG Jiachun² YANG Rongkang¹ QIAN Yuan^{1,3} CAO Xiaozhong¹

1 Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Huayun Meteorology Technology Group Company of China, Beijing 100081

3 School of Electronic & information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on observation tests of the domestic BD sounding of ball loading, a method for the evaluation of wind measurement was established. The test results showed that the accuracy of BD wind was nearly the same as that

of RS92 at ascent stage, and the consistency was in good agreement. The errors of the RS92 wind at descent stage and ascent stage were of the same magnitude. The initial part of the descent stage wind data needed to be pretreated or controlled when it was used. The error of the decline period of BD wind was generally the same as that of the RS92 at descent stage, except for the initial explosion of the ball. Essentially, it was close to the measurement requirements of WMO. Meanwhile, the rapid decline brought higher technical requirements to positioning. In addition, BD dropsonde of ball-loading could encrypt an original sounding in terms of time and optimize the existing sounding station network in terms of space, which would have better application potential.

Key words dropsonde of ball-loading; Beidou wind; sounding accuracy