用织女一号火箭在海南站探测的高空风和风切变*

马 瑞 平

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

本文介绍了织女一号(ZN-1)火箭测风原理，数据处理方法和两次测风结果. 结果指出，在我国低纬地区中层大气中存在非常明显的风切变和相当强的重力波扰动，测风数据与 COSPAR 国际参考大气 CIRA 1986 及国际标准化组织航空用参考大气 ISO5878-1982 /ADD. 1-1983 存在明显差别.

关键词 火箭探测— 风切变 — 参考大气

1 引 言

中国科学院空间科学与应用研究中心、航天工业总公司 708 所和国防科学技术大学联合，于 1988 年 12 月在海南探空站用织女一号(ZN-1)火箭进行了一批次中层大气探测试验，首次获得我国低纬地区 5 — 57km 大气风场、温度、气压和密度的垂直分布资料。

这次有两发火箭获得测风数据，一发是 12 月 19 日 9 时发射的，获得了 5 — 57km 高度的风数据，另一发是 12 月 25 日 9 时发射的，获得了 5 — 53km 的风数据. 为了分析火箭测风的精度，在火箭探测的同时，用无线电气球探空仪进行了同步探测，分别得到地面到 20km 和地面到 34km 的风数据。

本文分析了测风结果，讨论了高空风的变化，风切变和重力波现象，分析了测风数据与国际参考大气 CIRA 1986[1] 和 ISO 5878-1982 /ADD. 1-1983[2] 之间的差别.

2 火箭测风原理和数据处理方法

ZN-1 火箭探空系统，是用小型固体火箭把探空仪器带到 60km 以上高空，在火箭弹道顶点附近抛出降落伞探空仪系统，雷达跟踪探空仪进行回落段测量，利用降落伞的飘迹来计算高空风场. 经过简化的水平风计算公式为

$$u=\dot{x}-[\ddot{z}(\ddot{x}-gx/R)]/[\ddot{z}-g(1-2H/R)],$$

* 国家自然科学基金资助课题
1995-09-18 收到原稿，1996-03-29 日收到修定稿

$$v=\dot{y}-[\ddot{z}(\ddot{y}-gy/R)]/[\ddot{z}-g(1-2H/R)].$$

上式采用以雷达为原点的直角坐标系，x 指向东，y 指向北，z 指向上，g 是地面重力加速度，R 是地球半径，H 为海拔高度，u 为纬向风，西风为正，v 为经向风，南风为正，H_0 是发射站的海拔高度，则 $H=\sqrt{x^2+y^2+(R+H_0+z)^2}+R$.

利用雷达跟踪探空仪的坐标数据，经过检错纠错和平滑处理，得到降落伞的位置、速度和加速度，用上面的公式计算水平风随高度的变化.

ZN－1 火箭探测系统，使用改进的 702 雷达跟踪，增加了微机数据预处理设备，使坐标采样率提高到每秒 20 组，把每 10 组平均得到每秒两组的球坐标数据. 经过这样处理，降低了雷达噪声误差. 另外，在试验中使用了新研制的盘－缝－带伞，使探测系统落速小，风随性好. 因此明显地提高了测风精度和垂直分辨率，有效地探测到风的垂直切变和重力波现象.

数据处理采用勒让德多项式中点平滑方法[3]，对位置的勒让德多项式进行微分得到速度，对速度的勒让德多项式进行微分得到加速度. 利用勒让德多项式的正交性，可加快计算速度，适合用微机进行实时处理.

3　结 果 分 析

这次探测获得两发测风数据，风速、风向和风分量的垂直分布分别画在图 1 和图 2 上. 图中还画出了气球无线电探空仪的同步探测结果以及风分量与 CIRA 1986 和 ISO 参考大气的比较. 可以看到火箭和气球测风结果在衔接高度区是非常一致的. 火箭测风采用每秒 20 组采样，垂直分辨率高，风的精细结构十分清楚，气球测风是用光学测风经纬仪跟踪的，定位精度也很好，只是采样间隔较长，垂直分辨率较低. 两次探测时间间隔 6 天，风速和风向都有明显的变化.

从图 1(a) 看到 19 日火箭纬向风与 ISO 参考大气模式 0 —20° N 1 月份纬向风比较一致，与 CIRA 1986 参考大气 20° N 12 月份平均纬向风有较大的差别，19 日火箭探测的纬向风 20km 以上是东风，CIRA 1986 大气 20km 以上是西风. 火箭探测的经向风与 ISO 大气也有一些差别. 25 日测风结果与参考大气比较也有类似结果，如图 1(b) 所示. 存在差别的原因是中层大气有明显的年度、QBO、季节和逐日变化，还有各种尺度的波动. 和探测比较接近的 ISO 参考大气是 0 — 20° N 1 月份平均大气，CIRA 1986 也只有 20° N 12 月份纬向平均风分量. 由于低纬地区火箭探测数据稀少，CIRA 1986 低纬纬向风是由卫星遥感的温度数据，用地转风关系计算的，本身误差就比较大，这些参考大气都没有考虑低纬地区风的准两年振荡和半年振荡现象.

高空风切变对航天飞行器的安全有很大影响，正在引起专家们的注意. 从这两次测风结果看出，我国低纬地区存在明显的垂直风切变现象. 引起风切变的原因是大气中存在急流和各种尺度的波动，尤其是重力波扰动，它的垂直波长短，产生的风切变更大. 从图 1 可以看到，14km 附近的急流是对流层顶急流，它们引起风速切变和风向变化，而重力波在整个高度范围都造成了明显的风切变. 参照文献[4]，用公式

$$\mathrm{d}U/\mathrm{d}z=\sqrt{(\mathrm{d}u/\mathrm{d}z)^2+(\mathrm{d}v/\mathrm{d}z)^2}$$

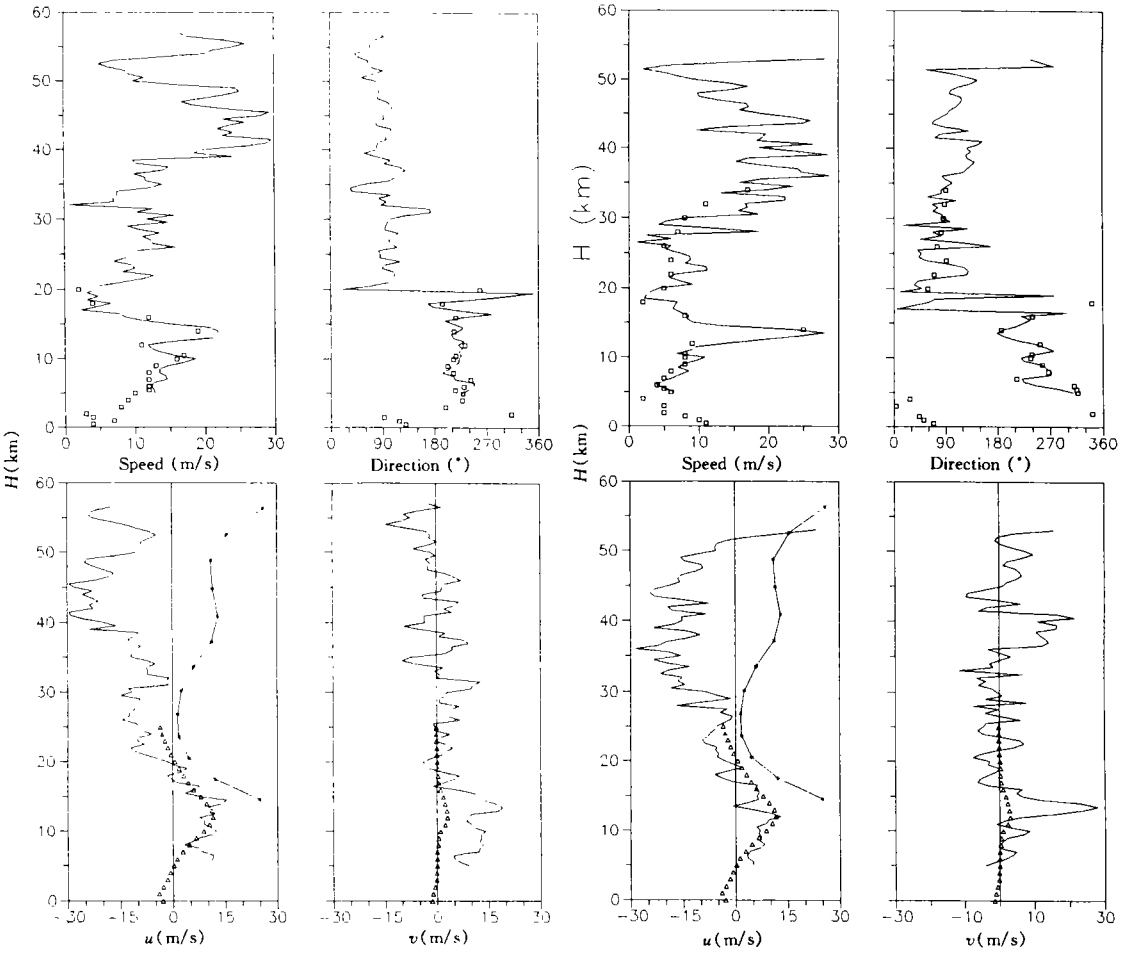

图 1 火箭探测的风分布

Fig. 1 Wind profiles observed by rocket

计算了风的垂直切变强度，du/dz 和 dv/dz 采用中心差分计算，间隔 0.5km，结果见图 2. 25 日风切变强度比 19 日风切变强度大，因为 25 日的对流层顶急流强度更大，而且 25 日比 19 日的重力波强度更大，垂直波长更短，因此造成更大的风切变。

用风分量的二阶垂直导数的均方根再平均，可以估计所测高度范围重力波的平均强度，文献[5]给出了低纬地区 12 月份重力波的气候学平均强度为 $5 — 6\times10^{-3}s^{-1}km^{-1}$，计算得到 19 日重力波的平均强度为 $11\times10^{-3}s^{-1}km^{-1}$，25 日为 $16\times10^{-3}s^{-1}km^{-1}$，两天探测的重力波强度都比气候学的平均强度大得多. 对风数据进行了空间频谱分析，谱幅度如图 3 所示，可以看到 19 日重力波主波的波长为 5km 左右，25 日主波的波长大约是 4.5km. 重力波能够向上传播到电离层区域，引起电离层扰动.

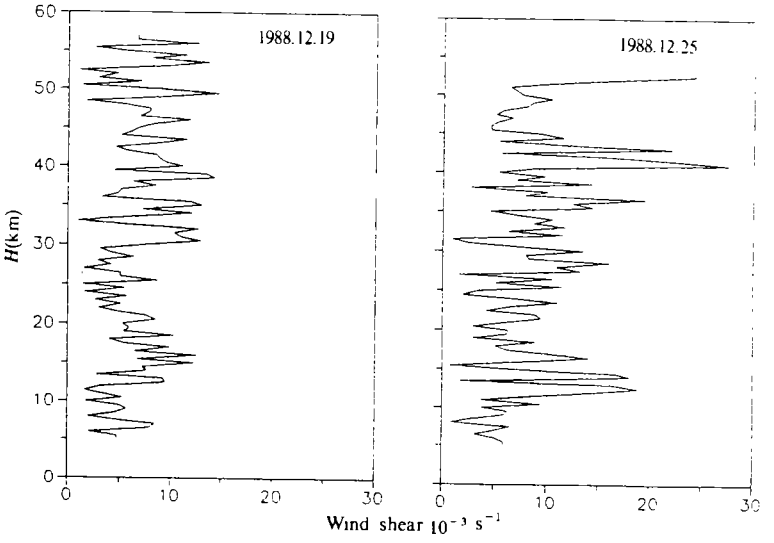

图 2　风切变的垂直分布

Fig. 2　Vertical wind shear profiles

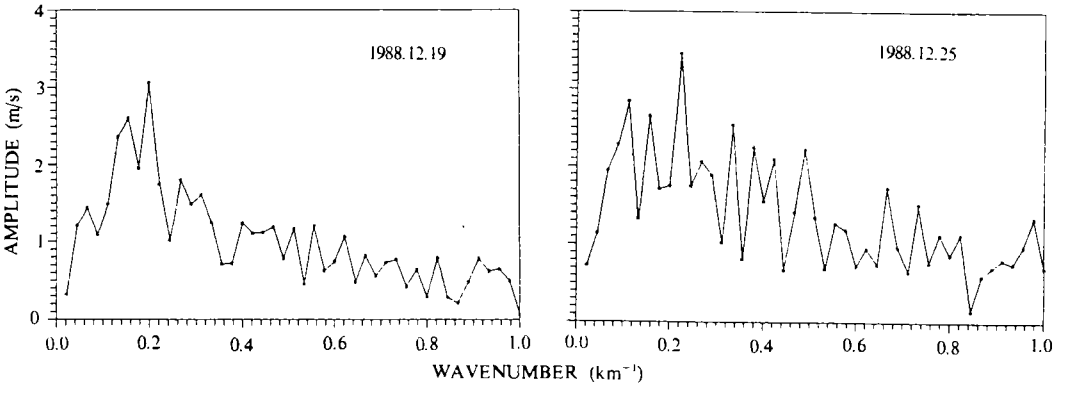

图 3　重力波垂直波数谱

Fig. 3　Vertical wavenumber spectrum of gravity waves

致谢　本文所用测风数据是参加研制 ZN－1 火箭系统和海南试验的全体人员共同努力的结果，在此表示衷心感谢.

参　考　文　献

[1] COSPAR International Reference Atmosphere: 1986, *Adv. Space Res.*, Vol. **10**, p.1, 1990

[2] ISO 5878－1982 /ADD. 1－1983, International Standards Organization, 1983

[3] Luers, J. K., AFCRL－70－0366, Air Force Cambridge Research Laboratories, 1970

[4] Wu, Y. F. and H. U.Widdel, *J. Atmos. Soi.*, Vol. **49**, p. 1781, 1992

[5] Hirota, I., *Handbook for MAP*, Vol. **16**, p. 144, 1985

WIND AND WIND SHEAR OBSERVED BY ZN-1 ROCKET AT HAINAN STATION

MA Ruiping

(*Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

Abstract

Middle atmosphere sounding experiment was taken at HAINAN station in December, 1988 using the ZN-1 rocket. The principle of wind sounding by rocket as well as the results and the methods of data process is discussed in the paper. The results show that there exist rather strong wind shears and gravity wave disturbance at the low latitude of the middle atmosphere. There are distinctive differences between the rocket wind data and the CIRA 1986 or ISO reference atmosphere (ISO 5878-1982 / ADD. 1-1983).

Key words Rocket sounding, Wind shear, Reference atmosphere