

观测高空风的新装备

——风廓线雷达

易仕明 陈奕隆

(国家气象局)

提 要

风廓线雷达为最新发展起来的测风雷达,它能自动连续地获取高空风廓线。本文介绍风廓线雷达的原理、构造及性能,简要介绍了1985年美国PRE-STORM试验中风廓线雷达的试用结果,以及美国1988—1992年的试验网计划。

一、引 言

对从事天气研究和预报,特别是对研究中小尺度天气的气象学家来说,目前面临的主要困难还是观测资料不足。气象学家们普遍感到高空探测资料在时间密度和空间密度上都远远不能满足要求。而增加一个常规的探空测风站则要花费相当大的人力和物力,而且还不能获取连续的高空探测资料。近10年发展起来的风廓线雷达(简称风廓线仪)在高空风测量领域上是一个新突破。风廓线仪能自动、连续地观测高空风,它对天气预报,特别是中小尺度天气预报和研究将会作出很大贡献。

目前,世界上已有许多国家建立了风廓线仪试验站。1985年,在美国的PRE-STORM(风暴尺度气象学业务和研究计划前期区域试验)中,有6部风廓线仪组成的观测网被考核试用,以便对其性能及应用价值作出结论性评价。1988年5月31日至6月3日,在美国召开一个称作“低对流层风廓线仪的需求及其技术”(Low Tropospheric Profiling: Needs and Technology)的会议上,专家们对风廓线仪作出了肯定的评价。美国将在1989—1990年布置一个有31部风廓线仪的试验站网,试验将进行到1992年10月,然后进一步作出工程方面和气

象方面的评价。美国国家气象局(NWS)则要将试验站网扩建成为国家业务站网。

本文将简要介绍风廓线仪的原理构造,在PRE-STORM试验中的结果,以及美国的发展计划。

二、发展简史

常规的多普勒天气雷达是用于探测降水和其它相类似的质点移动方向及速度的。由于这种雷达波长较短(如它的工作波长为5cm或10cm),除了在特殊的天气条件下,一般探测不到晴空回波。

在60年代下半期,曾设计用于探测电离层中离子运动状态的雷达,它工作于较长的波长并具有极高的接收灵敏度。后来,上述技术被应用于检测电离层以下(中层、平流层和对流层)的大气层。第一次平流层的测风资料(垂直风廓线)是由电离层物理学家利用研究电离层的雷达测得的。80年代以前的风廓线雷达大多是工作频率较低(50MHz左右)很大的雷达系统,叫做MST(逸散层、平流层和对流层)雷达。80年代初期,美国国家海洋大气局的波传播研究所将风廓线仪用于日常的高空风探测,促使风廓线仪进入了实用阶段。

三、风廓线仪的探测原理及结构框图

大气是不均匀的,大气中空气折射指数

小尺度的不规则变化能散射雷达波束，而大气折射指数的不规则变化是由温度和湿度小的不规则变化引起的。上述的小尺度不规则即是常称的湍涡 (Turbulent eddies)，它随主要气流的流动而流动。灵敏的雷达接收机能探测被湍涡所散射的回波。湍涡在整个对流层及平流层中都存在，越是在低层，湍涡越多，尺度也越小；而高层湍涡的数量相对较少，其尺度也较大。因此，现代的风廓线仪对高层和低层分别进行处理。

当电磁波被一个移动的目标反射或散射时，它的频率将随目标径向移动速度而偏移（称为多普勒频移）。当雷达的探测波束被湍涡所散射时，雷达接收到的微弱电磁波信号，因湍涡随气流流动而产生了多普勒频移。多普勒频移可用下式表示：

$$f_D = -2V_r/\lambda$$

式中， V_r 为散射体沿雷达波束径向速度； λ 是雷达的工作波长。

风廓线仪垂直向上地沿三个方向轮流发射脉冲电磁波，并接收被小尺度湍涡所散射的回波信号，从信号中提取多普勒频移 (f_D)。由此可算出沿三个方向的径向速度，并推导出水平和垂直气流速度。

三个波束的方向分别为垂直向上；向正北偏斜一定的角度；向正东偏斜一定的角度。美国试验网上用的风廓线仪是偏斜 16.3° 。设偏斜角为 α ，沿偏北、偏东及垂直向上三个波束方向上气流的径向速度为 N 、 E 和 V ，则可通过下列关系式求得它们的数值，即

$$N = v \sin \alpha + w \cos \alpha$$

$$E = u \sin \alpha + w \cos \alpha$$

$$V = w$$

式中， u 、 v 、 w 为风速的三个分量。

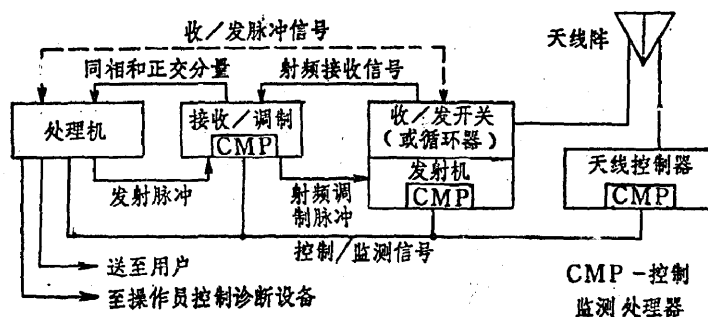


图1 风廓线仪方框图

图1是芬兰瓦依萨拉公司的子公司Tycho技术公司生产的DORA 400型风廓线仪原理方框图。

从处理机单元发出的天线波束位置指令，通过天线的CMP（控制监测处理器）把天线波束调整到指定位置。接着又送出一脉冲信号，使收/发开关处于发射状态。同时，处理机送出一触发脉冲信号给接收/调制器单元。调制器产生一射频脉冲信号，被发射机放大后，送到天线子系统，将脉冲电磁波信号发送出去。在上述发射过程中，接收/调制器是与天线断开的，以免过荷损坏。但在

发射过程结束后，收/发开关将天线收到的微弱信号接至接收机单元。接收机将信号放大，并区分出同相和正交（或正弦或余弦）分量。处理机单元对上述同相和正交分量信号进行必需的数据处理，包括规定时间范围内的积分、快速傅里叶转换（FFT）及谱分量平均计算等，以求得沿该天线波束位置上风的数据。这些数据包括被接收信号功率、平均径向速度和频宽度。

处理机单元控制每个天线波束指向位置（垂直向上、偏北、偏东），完成数据处理过程，并把处理得到的数据送到风廓线仪的资

料分析、显示和存档的处理机去。此处理机实际上是通用的计算机，它可建在当地，也可设在远处。

四、风廓线仪的工作性能

1. 最低探测高度

风廓线仪最低探测高度决定于它的工作频率、发射脉冲宽度和形状、从发射到接收收发开关的回复时间。一般来说，工作频率越低，其最低探测高度越高；工作频率越高，最低探测高度越低。如在PRE-STORM试验中使用的风廓线仪，最低探测高度在1.5—2km左右。工作频率为400MHz的风廓线仪最低探测高度为150m。

2. 垂直分辨率

实际的垂直分辨率是脉冲持续时间的一半(见图2)。回波信号按选定的等时间间隔上(也称作距离门)被取样(见图3)。一般来说，每距离门之间的取样间隔应与垂直分辨率相同，以保证相邻两取样点上的回波信号相互独立。大多数风廓线仪的距离分辨率为100—500m间。

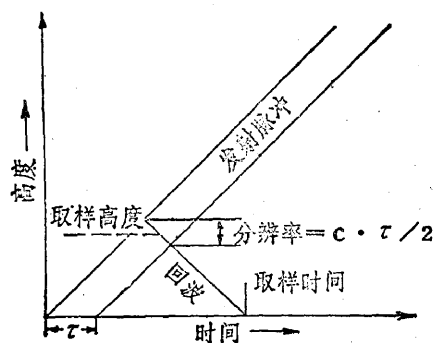


图2 取样时间与高度、分辨率的关系

3. 最高探测高度

风廓线仪最高可探测高度取决于平均发射功率、天线的大小、气象条件和工作频率。前3个影响因素是很显然的。越大的平均发射功率或越大的天线，可以获得越强的回波信号，因而可探测的高度就越高。同样，大

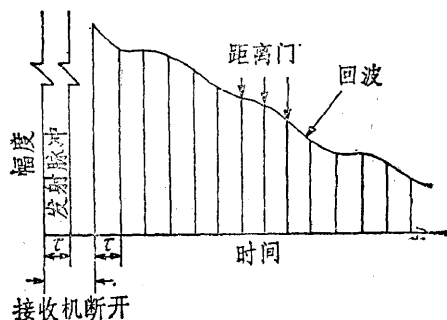


图3 回波按距离门(选定时间)取样

气层中湍流越多。回波信号也越强，探测高度越高。图4说明了探测高度与工作频率(波长)的关系。回波信号的大小与适合于该工作波长尺度的散射体的多少有关。较小尺度(cm级尺度)的湍流在低层大气层中大量存在，而高空湍流尺度较大而且较少。较高频率的电磁波被散射得很弱，所以较高的工作频率不易探测到较高高度上大尺度湍流，而低的工作频率却可探测到，所以能探测的高度较高。高的工作频率虽然比低的分辨率好，但易受水汽凝结物散射或衰减，因而不能达到很高的探测高度。

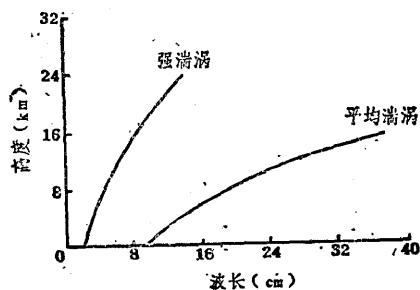


图4 探测高度与湍流、工作波长的关系

综合上述因素，采用工作频率400MHz左右的风廓线仪可获得较好的探测结果。

由于高空的湍流较大，数量较少，散射能力较弱，因而需用脉冲持续时间较长的发射脉冲，以获得较大的反向散射功率。风廓线仪常可采用两种工作模式。一种是低空工作模式，例如探测高度为0.5—9.25km，分

辨率为 250m；另一种是高空工作模式，例如探测高度为 7.5—16.25km，分辨率为 1000m。

五、回波信号的处理

由湍流散射回的微弱信号，通常埋于环境噪声和设备的电子噪声之中。为了将微弱的信号检出，需在一个时间范围内对回波信号进行积分处理。由于湍流在主要气流中，在一定时间范围内是足够稳定的，这就允许通过对信号进行积分处理，将它从杂乱无章的噪声中区分出来。通常是在小于 0.01 秒时间内，在每个距离门上，采样 50 个回波信号，进行积分平均处理。为提取多普勒频移，则需对信号做 FFT（快速傅里叶变换），为此，在每个距离门上需输入一系列的平均积分信号（一般为 64，128 或 256 个）。在给定的时间内，点子越多，测得的径向速度分辨率越高。为使检出的信号更可靠，应将几个连续的 FFT 变换后所得的信号频谱进行非相关平均。这决定天线波束在每个位置上停留时间，一般是一分钟。上述处理步骤依次对 3 个波束轮流进行。若风廓线仪采用两种工作模式，它就产生两种宽度的发射脉冲，一个用于探测低层，一个用于探测高层。这样，一个处理周期就需要 6 分钟（也可以说时间分辨率为 6 分钟）。上述信号处理方法不是唯一的方案，但这是一种较好的方案。风廓线仪是否可在几秒时间内将风廓线测出，理论上说是可以的，但它受到器件和技术困难的限制。而较长时间测出的风廓线，代表性和一致性更好。

六、美国 PRE-STORM 风廓线仪
试用情况及今后计划

美国于 1985 年在 PRE-STORM（风暴尺度气象学业务和研究计划前期区域试验）中试用了三种风廓线仪，目的是考查这些廓线仪在实际使用中的效果。试验中同时进行无线电探空测风及飞机观测以便比较，并补充 2km 以下风廓线仪观测资料的缺测。三种

风廓线仪都用同一频率（接近 50MHz），但构造和性能不同，详见表 1。

表 1

地 点	McPherson	Liberal	Norman
频率(MHz)	49.25	49.92	49.92
波束	3	3	2
倾斜波数倾角	8°	15°	15°
峰值功率(KW)	125	40	20
平均功率(W)	5000	200	400
天线大小(m²)	49×49	100×100	50×50
脉冲宽度(μs)	1	4	3 (低层) 9 (高层)

1985 年 6 月 10—11 日和 26—27 日，观测到两次飚线系统，均从东北向西南延伸，并整体向东南方向移动。第一个较强，也较典型；第二个较弱，也较松散。但它们的中尺度结构特征是共同的，即在飚线前，高空风从地面向上，直到 5km 高度，明显顺转，在边界层内（1.5km 以下）有一个低空急流，它以 $15\text{--}20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度冲击飚线前沿，在顺转层以上为带有中度西风切变的盛行西风。在主要对流线后部，最下层为北风，它随高度逆转，逆转层达到的高度随时间抬升，逆转层上部为从西北来的后部入流急流。再往上逐步转为偏南风，它是飚线风暴顶部气流向外形成的南风（见图 5、6）。

用风廓线仪的记录和其附近无线电测风记录比较，在对流线的相对位置上风向、风速基本上是一致的。但在飚线上强对流降水时，两者均有失测。此外，风廓线仪少数记录有明显的误差，可能是计算处理造成的。

在多个强对流泡后面分布很广的层状云雨区中，风廓线仪运行得非常好，在整个对流层中，连续数小时获得完整的风廓线记录，显露出连续变化的风结构。风廓线仪从层状云雨区进入无雨区得出连续平滑的风廓线变化，表明 50MHz 风廓线仪在中度降水时不会产生明显的影响。

风廓线仪观测到的连续的记录是过去所

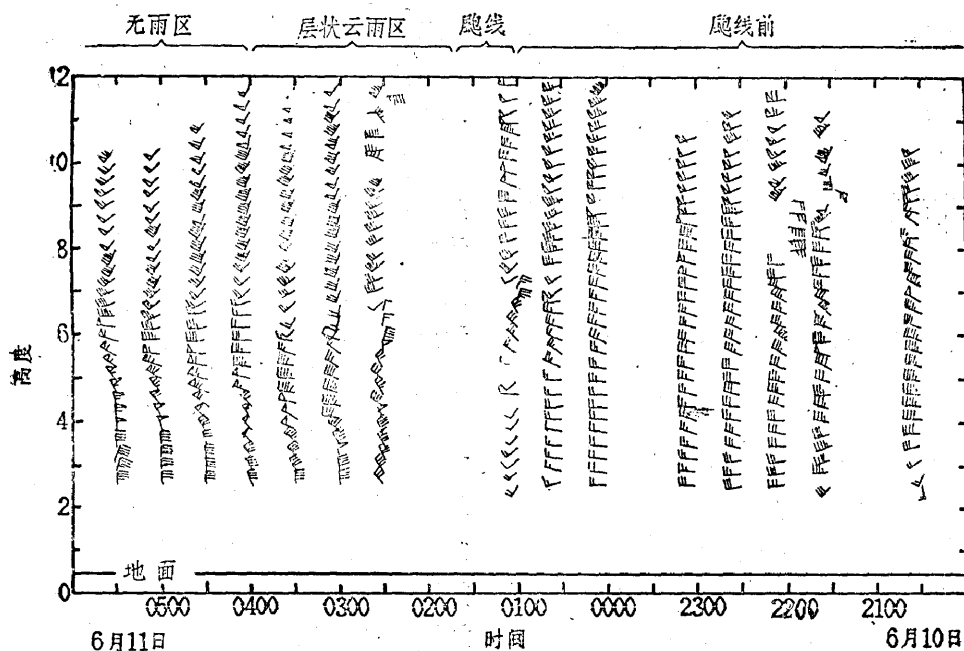


图5 McPheron 风廓线仪测风资料时间剖面图
高度为平均海平面以上的高度，风羽符号与通常表示法相同

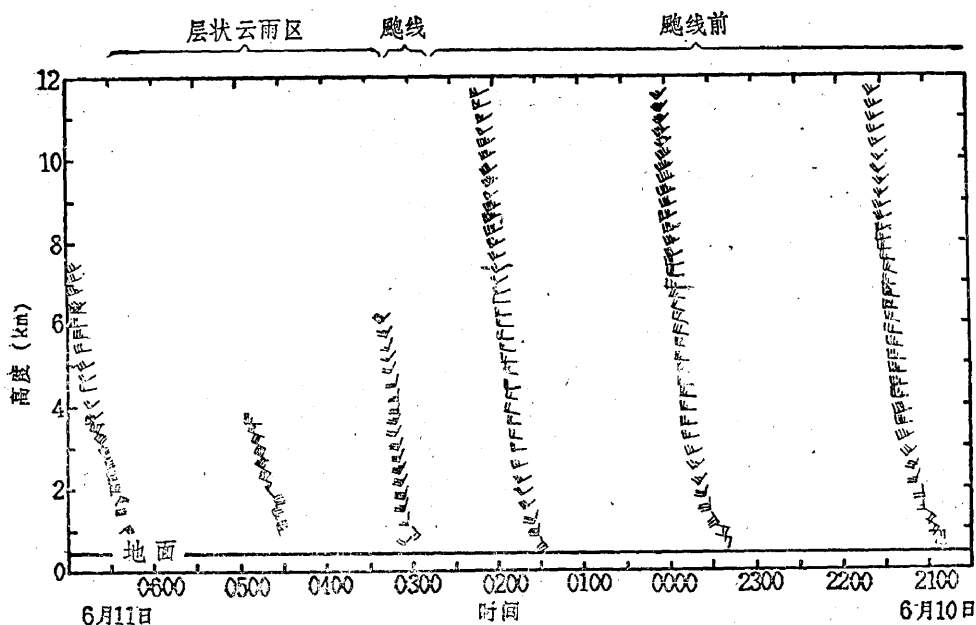


图6 Wichita 无线电测风资料时间剖面图 (符号说明同上)

没有过的，它能很好地揭示天气系统的中尺度对流结构。但本试验中的风廓线仪还有一些缺点，主要是测不到 1.5—2.0km 以下的风。

美国 NOAA 计划组成一个包括 31 个风廓线仪的观测网(布点见图 7)。这个网的第一个正式产品将在 1988 年后期或 1989 年初安置，在 1990 年中期全部建成，那时试验网将

充分发挥作用。这个网的试验期到1992年止，NWS 将负责对它作出评价。评价分工程和气象两方面进行，工程方面包括风廓线仪本身的性能，通讯及控制等的评价；气象方面则是评价其资料对气象业务及科研的作用，特别是在中央指导预报和地方天气预报中的作用。

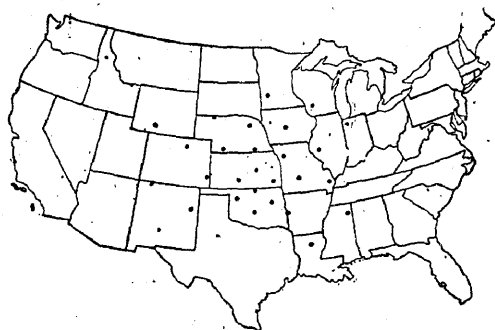


图7 试验网风廓线仪位置图
黑点为布点位置

试验网所用风廓线仪性能如表2所示。

表2

频 率(MHz)	低 段 404.37	高 段 404.37
高度范围(km)	0.5—9.25 36个取样段	7.5—16.25 36个取样段
分辨率(m)	250	1000
脉冲持续时间(μ s)	3.33	200
脉冲压缩比	2:1	3:1
脉冲重复频率(KHz)	10.1	6.6
峰值功率(可选, KW)	16/8/4	16
平均功率 (W)	540/270/135	2100

天线为相控阵天线（参见气象，1988年

第10期封底），其面积为 $10 \times 10\text{m}^2$ ，是固定式的天线。天线馈电相位控制开关使波束流向三个方向发射电磁波脉冲。一个垂直向上，一个偏东 16.3° ，另一个偏北 16.3° 。

风廓线仪易受干扰。因此，为避免或减少地面干扰，架设场地最好选择在宽阔的平地或山顶上，远离大山或高大建筑。在天线周围有高出天线高度的树木或其他植物将有利于天线旁瓣的衰减。

七、小 结

风廓线仪是近年来计算机和无线电技术高度发展的最新应用成果。其优点为：能连续自动地进行高空风测量；探测范围可从100m到18km；适用于各种气象条件；较低的运行成本。它的缺点是极高的一次性设备投资。总之，风廓线仪的应用将推动天气学，特别是中小尺度天气学研究的进展。

参考文献

[1] Donald T. Acheson, The wind profiler demonstration program, WMO Technical conference on instruments and methods of observation (TECO-1988), 13—18, 1988.
[2] Ilkka Ikonen, Wind profilers—New tools to measure upper air wind, WMO Technical conference on instruments and methods of observation (TECO-1988), 157—169, 1988.
[3] John A. Augustine and Edward J. Zipser, The use of wind profilers in a mesoscale experiment, Bull. Amer. Meteor. Soc., 68, 4—17, 1987.
[4] Tycho Technology, Inc., The wind profiler radar, A new tool to complement radiosonde systems, Vaisala News, 111—112, /87, 12—15, 1987.

A new instrument for upper-wind measurements:
wind profiler

Yi Shiming Chen Yilong
(State Meteorological Administration of China)

Abstract

The wind profiler, developed recently with advanced technology, can be used to measure upper-air wind automatically and continuously. Its principle, structure and performance are briefly described in this paper. In addition, the results from us PRE-STORM experiment in 1985, in which the radar was taken in practice, Wind Profiler Demonstration Program (1988—1992) in the United States are introduced simply.