

一种新的用于中尺度气象研究的 综合探测系统

W. F. Dabberdt 等

一、前 言

大气研究和业务部门非常需要高分辨率的对流层大气廓线测定,用来进行中尺度研究、预报及气候分析等等。美国国家天气局(NWS)和联邦航空管理局(FAA)实施了一系列的观测系统研制试验(如NEXRAD和示范廓线仪站网)以满足业务的需要。此外,中尺度研究中非常需要可移动式观测系统。

综合探测系统(ISS)是NCAR、NOAA和威斯康星大学(UW)正在联合研制的一种探测系统,用以满足研究部门对高分辨率大气廓线连续测定的需要。单个的遥感或就地测定的传感器无法完成全部所需的观测,所以,把各种不同的遥感传感器,包括有源和无源的综合到一起,以协作和互补的方式才能担负全部观测任务。可以入选的ISS子系统包括:无线电声学探测的UHF风廓线仪;以导航测风设备(NAVAID)为基础的探测设备;地面自动气象站;微波廓线仪以及高分辨率的红外探测器。通过与4维数据同化模式取得一致,ISS站网的设施将支持制作高分辨的中尺度气象参数场。

二、观测要求

Dabberdt等(1986)曾对大气科学界对边界层廓线测定的要求进行过调查。大约有25个科学家参加了用户调查及后来的研讨会,他们确定了最重要的大气参数的测定优先程度以及必不可少的廓线测定系统的性能规定。与会者代表了各种各样的研究兴趣:

行星边界层(PBL)模拟、对流系统、航空终点站的天气、人工影响天气、大气化学、环境气象学以及中尺度业务预报。一级优先程度的参数包括:水平风、温度和湿度,其它的参数及其优先程度是:边界层厚度(2级)、液体水(3级)、湍流(3级)、云底高度(3级)、气溶胶(3级)以及像臭氧、二氧化硫和二氧化氮等痕量气体(3级)。表1中归纳了一级优先程度各参数的所谓一致同意的测定要求。根据表1,其性能规定为:风、温度和湿度的观测高度应达到约3.5公里,高度的分辨率为大约75米,而时间分辨率的要求是15分钟。表1还给出了所要求的准确度、精度和阈值以及一些规定测定要求变化范围的统计值(由个别研究人员提出的)。

表 1 一致同意的边界层廓线仪的测定要求
(Dabberdt等,1986)

测定要求	水平风 (米/秒)		温度(K)		比湿 (克/千克)	
	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差
观测高度 (公里)	3.4	1.1	3.7	1.4	3.6	1.4
高度分辨率 (米)	82	53	58	39	72	34
时间分辨率 (分)	15	14	15	15	16	16
阈值	0.7	0.4	—	—	1.2	1.6
准确度	0.8	0.5	0.7	0.3	0.7	0.3
精度	0.5	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4

与会人员还就仪器的性能及其重要性发表了意见。认为系统站网的调动部署能力非常重要,而方位扫描和垂直扫描并不十分重要。整个系统的连续运转很关键,而不必把

对各种天气的观测性能放在第一位。

三、综合探测系统

1. 概况

目前,在日常业务中使用的能连续进行垂直廓线测定的方法是使用无线电探空仪。但在各研究计划中日常使用了各种遥感技术,其中包括多普勒 UHF 和 VHF 风廓线仪、无线电声学探测系统(RASS)、微波和毫米波多普勒雷达、差分吸收光达、Raman 光达、微波辐射仪以及高分辨率傅利叶变换红外干涉仪-光谱仪,参见 Sarafin 和 Dabberdt 最近的有关介绍(1990)。

通过综合应用现代化的遥感和就地测定技术和模拟技术,正在研制一种数据同化和综合探测系统相配合的系统,试图提供中 β 尺度的且具有高分辨率的四维温度、湿度和水平运动以及垂直运动的场。可以入选的 ISS 测定设备包括:

UHF/VHF 多普勒风廓线仪和 RASS,
微波辐射仪,
高分辨率干涉仪光谱仪(HIS),
高分辨率 NAVAID 大气探测系统,
地面气象站。

下面将对构成 ISS 的各种测定系统进行讨论。我们应用数据同化,试图提供相互协调的各 ISS 测定的风、温度和湿度的垂直廓线。在 ISS 站网利用数据同化还可以获得中尺度试验配置区域的高时、空分辨率的三维场。

2. 多频率风廓线仪和 RASS

在最近十年,地基风遥测设备的研制取得了重大进展,在一些重要外场计划中甚至日常(示范)业务中越来越多地使用多普勒雷达风廓线仪。风廓线仪以几种不同的频率工作,如 VHF 波段的 50 MHz 和 UHF 波段的 405 MHz 和 915 MHz。最近几年,一直对无线电声学探测系统(RASS)进行研制,它可以与风廓线仪一起使用以获取虚温廓线(May 等, 1990)。

Balsley 和 Gaga(1982)介绍了进行风廓

线测定的多普勒雷达的设计考虑。每种频率都有其优点,但也有局限性,结论是未来的探测系统应该是使用多种频率的综合探测系统,以满足多种目的廓线测定的需要。例如,频率较低时声衰减变小,所以,可以用 RASS 以 50 MHz 的频率测定直到 10 公里的虚温,但以 915 MHz 频率只能测 1—2 公里以下的温度。频率较低的 VHF 雷达还有一个优点,就是受降水的影响很小,还可以用来测定对流层顶。UHF 雷达一般达不到 VHF 雷达的测定高度,但它们比较小,便宜一些且易于安装。915 MHz 雷达能以很好的垂直分辨率测定对流层低层的风,但易受降水影响,即使小雨也影响它的测定;从另一方面看,可以用它们确定降水的滴谱(Gossard 和 Strauch, 1988)。综合应用 915 MHz 和 50 MHz 的雷达就能测出相对于晴空运动的降水下落速度,并且可用来测定降水和滴谱。

3. 微波廓线仪(MWP)

MWP 的主要产品是低垂直分辨率的温度廓线以及水汽和云液体水的累积量(Hogg 等,1983)。MWP 以 6 种频率(20.6、31.65、52.85、53.85、55.45 及 58.8 MHz)测定亮度温度。其中频率较低的两个通道对于水汽和云液体水很敏感,其余 4 种频率在 60 GHz O_2 分子波段内,对于温度很敏感。所有这 6 个通道具有相同的波束宽度 2.5° ,能同时测定相同立体角的天顶发射。这种仪器通过天线与两个参照黑体的依序转接进行内部校准。外部校准需要根据无线电探空仪得出的辐射传输计算值和(或)“翻转曲线”进行。各校准因子不需要经常更新,大约一个月一次。

使用叫作“线性统计转换”的廓线反演技术,根据 MWP 测定,每 2 分钟推导一次温度、水汽和云液体水。导出的各参数的统计准确度已通过与国家气象局(NWS)无线电探空仪资料进行比较得到了评定。导出的可降水汽与 500 百帕以下位势高度的准确度与探空仪差不多。在地面 1 公里以上,温度廓

线的垂直分辨率迅速变坏, 结果是无法分辨此高度以上的转换值。

MWP 敏感性极强, 一些迅速变化的动力特性如锋面移动可以容易地观测到。由于它的可靠性已得到证实, 能在近于全天候条件下测定以及它对所测定的辐射率的小变化极为敏感, MWP 可以提供日常使用的气象观测。它的最终使用取决于其数据对其它系统如 HIS 和 RASS 测定结果的改善程度。例如, 在晴空和有云条件下 HIS 和 MWP 可得出高质量的探空, MWP 和 RASS 的结合已显示出要优于它们之中任一个单独的使用。

4. 高分辨率干涉仪光谱仪(HIS)

将在综合探测系统中使用的 HIS 仪器是在威斯康星大学研制的, 它使用了 Michelson 干涉仪。这种干涉仪最初是作为新一代卫星探测器的机载样机研制的。它的工作光谱范围是波数为 600 至 2600cm^{-1} (即 16.8 — $3.8\ \mu\text{m}$) 的红外区, 使用三个检测器把此光谱分为三个波段: 波段 1 (600 — 1080cm^{-1})、波段 2 (1080 — 1850cm^{-1}) 及波段 3 (2000 — 2600cm^{-1})。原始数据的光谱分辨率大约为 $3000:1$ 。通过对截断并切趾的干涉图进行傅利叶变换来处理原始资料, 得出的光谱分辨率约为 0.5 (波段 1)、 1.5 (波段 2) 和 1.5cm^{-1} (波段 3)。使用两个黑体每分钟对测定进行一次校准, 一个黑体是加热到 300K 的 Eppley 腔体, 另一个是 77K 的液氮池。为了进行大气廓线测定, 每 4 秒钟产生一个校准过的谱, 并对它求 5 分钟平均, 输出平均谱和标准差谱, 用于探空和痕量气体浓度的反演。使用线性联立统计转换方法 (Smith 等, 1989) 根据 HIS 谱反演大气温度廓线和露点温度廓线。

5. 交叉链远程导航仪 (LORAN) 大气探测系统 (CLASS)

1984 年末和 1985 年初, NCAR 设计并研制了交叉链远程导航仪大气探测系统 (CLASS), 以满足大气科学界为支持中尺度

研究的探测系统之需要。CLASS 是一个装载在 $3.6\text{米} \times 2.4\text{米} \times 2.1\text{米}$ 拖车上的封闭移动式高空探测系统。拖车包括一个气球充气 and 施放设备、一个用来接收探空仪射频 (RF) 信号的电子控制台以及一个进行数据采集、处理和系统控制的科学用膝上型计算机。由于 CLASS 系统具有内置的气球施放设备, 它能够在各种恶劣天气条件下进行测定。这种专门设计的气球施放设备能在 40 — 50 海里/小时风速下进行探空。

实时 CLASS 资料包括 10 秒钟平滑的风和压、温、湿 (PTH) 资料及其相应的质量码, PTH 资料是 20 秒的平滑值, 平滑过程中使用了一种最小二乘解和由残差的标准差产生的数据质量码。风资料是根据三个或三个以上的 LORAN-C 站信号的到达时间 (TOA) 计算的。然后, 再使用一种最小二乘解进行 30 秒时段的平滑处理, 并计算数据的质量码。

对导出的要素种类的数目没有限制, 但标准的要素包括高度和露点以及由用户规定的其它导出参数。可以通过键盘命令打印 10 秒平滑的等压面资料 (等压面间隔可任意选择) 以及原始数据。压、温、湿和风的资料都有给定的质量标记, 注明测定中的可能误差。气球飞行中或飞行后可把所有要素都点绘出来。飞行后也可以点绘许多形式的分析结果, 如温度对数气压斜交图表。还可以输出 WMO 标准层和特性层的探空报 (TMEP), 经由全球电信系统 (GTS) 发送出去。

6. MWP、HIS、RASS 和 CLASS 对比实例

在丹佛进行地基大气廓线测定试验 (GAPEX) 期间, 从 1988 年 10 月 28 日至 11 月 4 日间断性地进行了 CLASS、MWP、HIS 和 RASS 的测定。11 月 1 日, 以上 4 种系统每 3 小时进行一次同时测定, 其中 MWP 和 HIS 数据进行 24 小时连续记录。对比分析的结果表明:

1) 以 CLASS 作为检验资料, 其它三

种遥测系统的测温看来能达到误差不超过 1°C ，最大差异出现在地表逆温层附近（820 百帕）和点绘图的顶部附近（即 650 百帕）。

2) RASS 在它有限的垂直观测范围内，其测定的垂直分辨率最高，它相对于 CLASS 的偏差明显地是由于垂直运动对所测定的声波速度之影响，而在把声速变换为大气温度过程中没有进行这种订正。在 RASS 观测之前和之后测定的垂直风速，与这种偏差密切相关，但风的起伏使订正无法进行。

3) 随着高度的增加，MWP 与 CLASS 的差异要比 HIS 与 CLASS 的差异增加更迅速，这可能是由于 HIS 的谱通道数目远多于 MWP。

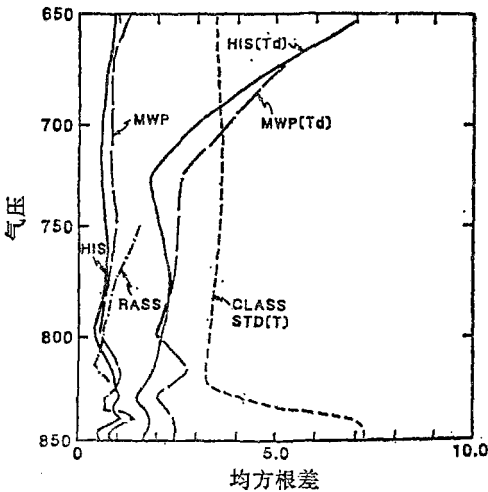


图 1 三种遥测系统与 CLASS 测值的均方根差。同时还给出了研究时段 CLASS 测定的温度廓线与其平均的标准差。露点温度以 T_d 表示

图 1 给出了作为检验值的 CLASS 与 MWP、HIS 及 RASS 三个温度廓线之间的均方根差。尽管 HIS 比 RASS 和 MWP 稍好一些，但无统计显著性，不过，就整体而言，HIS 最为接近 CLASS。RASS 与 CLASS 测定之间的差异随高度而增加是垂直风变率随高度增加所致。通过改进处理方法，这一点可以得到订正，其均方根差应该可达到 0.5°C 。根据这些遥测的误差与 CLASS 资料的标准差的比较可以看出，所有这三种遥测系统在测定对流层低层温度的变化上是相

当成功的。

7. 地面自动气象站

地面自动气象站将进行地面风、温度、气压和湿度的测定，对这些常规的气象要素开始将用 NCAR PAM（移动式中尺度自动观测网）II 型遥测气象站所使用的各种传感器进行测定。此外，这种地面自动气象站还可能具有对所有地面能量平衡分量进行直接观测的能力。这些分量包括净辐射平衡、显热和潜热通量以及土壤的温度、湿度和热量通量。

对地面能量平衡分量的测定将依靠 NCAR ASTER（大气地面湍流交换研究）的设备。上述的常规气象要素传感器和地面能量平衡传感器的数据将用 ASTER ADAN（自动数据采集模块）处理并经以太网传送到 IDASS 中央计算机。ADAN 是一个加强的资料前端系统，它以实时方式处理从传感器阵列来的模拟的和数字的数据，并传送给远处的资料归档计算机。

8. ISS 现场数据和遥测系统

ISS 现场数据和遥测系统将具备下述能力：1) 从所有观测平台获取数据；2) 资料集的中央归档；3) 现场方式质量控制；4) 数据的初步整理、显示和分析；5) 数据集向资料同化中心的传送。

这个系统的中央处理单元是一个 ISS 资料系统，这是个“工作站”类型的计算机，有磁盘和磁带作为外存，还有网络接口板、显示器和打印机。这一硬件和软件系统为各种测定系统产生的数据产品提供中央存贮和处理，现场的用户通过这一系统可以显示、叠加及编辑这些资料，并进行实时分析。

从整体上看，该系统实际是一个网络系统，每个观测平台都是以太网上的一个结点。而 ISS 数据系统也将是一个结点，ISS 数据系统的文件空间对于各观测系统是透明的，且能直接存取。网络使用的是光纤数据线，这保证了所有观测平台与数据系统之间的电隔离。

四、中尺度资料同化

1. 前言

为了满足中尺度研究部门对观测和模拟的需要, 关键的是 ISS 网络应能提供高分辨率的测定, 能以中 γ 尺度的水平分辨率描述大气的结构。要做到这一点, 我们把就地测定的和遥测的数据与一个现代化的中尺度模拟系统耦合在一起。在中尺度资料同化过程中, 模式解要逐次接近观测值, 这样, 模式解与观测保持了一致。在那些没有观测的地区, 模式场的演变受到模式的动力学过程和物理学过程的约束。它的最终产品是高分辨率的 4 维气象资料集(包括三个分量的风、温度、湿度、云水和累积水汽量)。

2. 简介

中尺度资料同化方案使用的是 Anthes (1974) 和 Hoke 及 Anthes(1976) 最初研制的牛顿接近法。在资料同化阶段, 使用风、温度和湿度的观测值来使随时间变化的模式变量接近(或逐次接近)实测值。然后, 模式的动力学和热力学过程把观测值的影响扩展到附近格点上, 这样就可以获得一个与模式方程组一致的平衡四维气象要素场。具体地说, 是在模式预报方程中加上一个强迫(或逐次接近)项。这一附加的强迫项的大小随测值与模式解之间的差值而变, 且随测值与正在分析的具体模式格点之间的时间差和空间距离而变。关于中尺度资料同化方法的细节可参见 Kuo 和 Guo (1989) 以及 Stauffer 和 Seaman (1990)。Anthes(1974)使用了这一方法用于飓风模式初值化的飞机观测值进行同化处理, Kuo 和 Guo(1989)使用此方

法检验了对拟议中的风廓线仪站网的连续测定值进行同化处理的可行性。

中尺度模式是这个资料同化系统中一个极为重要的部分, 为此, 将选用宾夕法尼亚州大学/NCAR 的中尺度模式。该模式包括了对地面和行星边界层各种过程、对流和非对流的云以及辐射的参数化处理。为了与这一模式相配合, 已研制了一个综合的资料分析系统, 可以使用实时资料进行试验。

3. 对 ISS 的某些考虑

ISS 的每部分仪器都有其长处和短处, 并具有不同的测定能力和误差特性。最关键的是如何最佳地综合各部分仪器提供的信息, 以获得动力学上协调的对大气结构的正确而详细的描述。例如, RASS 能提供良好的温度连续测定, 但测定范围有限, 只能达到离地面 1—3 公里。另一方面, 微波辐射仪能非常准确地测定累积云水量、水汽及平均气温, 但它的垂直分辨率极差。

五、展 望

1990 年 1—3 月在科罗拉多东北部落基山脉西坡进行“冬季结冰和风暴计划”期间, 要对这种综合探测系统进行初步的评价。将把各种现有的观测系统放在一起使用, 以模拟一套 ISS 完整设备, 同时, 一个探空和风廓线仪站网将提供资料来模拟 ISS 站网, 这样就能对该资料同化系统进行评价。

诚意译自《7th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation》pp.J128-J133,
文昌校