

美国的廓线网及其发展

Robert J. Serafin Walter F. Dabberdt

(美国国家大气研究中心)

提要 本文从资料用户的角度评论美国风廓线仪的应用现状和前景，简要介绍了有关技术问题，但不是重点。总结了现有风廓线仪网和计划中的系统，包括 NOAA、NASA 和大学的系统。描述了资料同化研究的范围和关系。讨论了业务应用和研究项目，包括数值天气预报、航空和空气污染。最后考虑有关风廓线仪在最终取代目前常规无线电探空仪高空系统中的作用问题。

1. 引言

第一次欧洲风廓线仪专题讨论会从用户的观点出发着重讨论了风廓线仪和风廓线仪网的应用。由于这种侧重用户的倾向，我们的重点放在风廓线仪能为用户做些什么，而不必集中在其他可选择的技术上（除非这些技术能给用户提供新资料）。因此，讨论会的目的是评估风廓线技术各种应用的效果。由于这个原因，性能是重要的，而用于获得这种性能的方法则未给予相应的注意。

用户感兴趣的第一个问题是想知道廓线

仪如何能改进他们确定和预报各种时空尺度上的天气的能力。第二个问题是风廓线仪会如何加强他们的研究活动和增进对大气行为的基本认识。了解独立系统怎样才能有价值 and 确定部署廓线仪网的附加价值也是重要的。业务团体中有一个重新提出的至今尚未得到满意回答的问题，即遥感何时将取代无线电探空仪，或无线电探空仪是否将会被取代？

2. 风廓线技术

认识到风廓线雷达就象微波雷达一样

表 1 研究用廓线仪类型

技术规格	廓线仪类型			
	边界层	对流层下层	对流层	对流层-平流层
雷达频率, MHz	900—1500	400—900	200—400	50—200
雷达波长, m	0.33—0.2	0.75—0.33	1.5—0.75	6—1.5
带宽(-20dB点), MHz	~3	~2	~1	~2
天线波束宽度, 度(单向)	≤5	≤5	≤5	≤3
平均功率孔径积, Wm ²	~10 ²	~10 ³	~5×10 ⁵	~10 ⁸
探测高度, km	~0.1—3	~0.15—6	~0.5—17	~0.15—20
高度分辨率, m	~100	~150	~500	~150
时间分辨率, 分	~10	~10	~60	~10
准确度(正交分量), m/s	~1	~1	~1	~1
价格, (\$000)	40—60	120—150	350—450	3000—5000
备注	1)	2)	3)	4)

1) 915MHz研究系统。2) 405和915 MHz 研究系统;正在研制商用系统。3) 自1983投入业务的试验雷达网;已建成3⁰个站的网。4) 由公司为NASA和白沙导弹靶场研制的廓线仪。

不是什么新东西这一点是很重要的。晴空雷达技术可以追溯到50年代初期。

风廓线仪根据其探测高度大致分为四种研究类型:边界层、对流层下层、对流层、平流层-对流层(ST)。表1给出 Strauch 等总结的各种类型风廓线仪的标称技术规格。几种系统的价格和性能特点在数值上可相差1—2个数量级。边界层廓线仪在3 km 内准确度为1 m/s, 高度分辨率为~100m, 名义成本约5 万美元。ST 廓线仪在20 km 内准确度为1 m/s, 成本高达5 百万美元; 较低层的高度分辨率为150 m, 在较高层, 一般为1 km。目前除有限数目的研究系统外, 对廓线仪类型还没有很好建立起广泛一致的标准。原因是这种技术的应用相对来说还处于萌芽阶段。然而我们确实看到, 随着NOAA实验网的实施, 对流层廓线仪公共标准正在获得进展。随着其它三种类型研究系统的进一步试验、应用和改进, 我们期望对这些系统的公共标准和制造厂商有一个更好的规定。

促进风廓线仪网研制和实施的科学动力是它们能在各种广泛的重要问题中应用, 如, 改进短期预报(0—12小时)、对流风暴产生、龙卷产生、冬季风暴和积冰、中尺度系统、气候紧急事件的响应、空气污染等。已安

排的下个十年的重大观测计划, 如美国国家 STORM 计划、多国 TOGA 海-气耦合响应试验计划 COARE, 对廓线网提出了更具体的要求。

3. 美国的现有设备

风廓线仪越来越普及, 但目前仍主要由研究单位使用。Strauch 等描述的科罗拉多风廓线网是建立区域网的第一次尝试。由此导致了405 MHz 样机的研制, 旨在建立一个风廓线仪业务网。科罗拉多网目前由科罗拉多州 Flagler 和 Platteville 的50 MHz 廓线仪和丹佛的915 MHz 廓线仪组成; 科罗拉多州 Fleming 的一部50 MHz 廓线仪一直工作到1988年11月, 提供一个50 MHz 三角形网的两条180 km 长侧边的资料。Platteville 站1988年11月前还有一个405 MHz 系统, 现供加利福尼亚中南部沿岸范登堡空军基地试验场作示范用。另一部50 MHz 廓线仪安装在新墨西哥州白沙导弹靶场, 也用来支持试验靶场的业务。宾夕法尼亚州立大学在宾夕法尼亚北中部的校园附近安装了3个风廓线系统。宾州的廓线网由3部50MHz 廓线仪组成, 它们构成一个边长140 km 的中尺度三角形。另外, 一个可移动的404MHz系统于1986年开始工作。

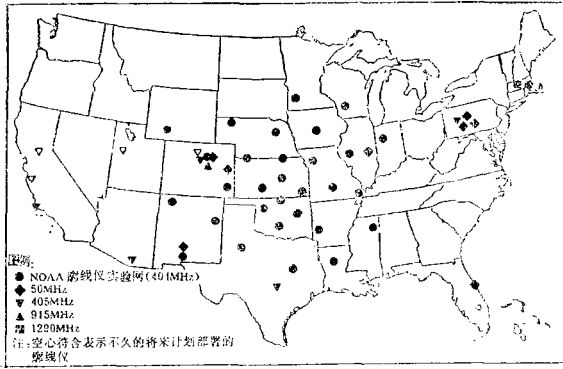


图 1 美国本土风廓线仪的位置

在潘播-尼巴纳的伊利诺斯大学安装了一部 40 MHz 的风廓线系统。为了满足肯尼迪空间飞行中心有关航天飞机业务对短期天气预报和监视的更高要求，最近 NASA

在该中心安装了一部 50 MHz 的风廓线雷达。NOAA 高层大气物理实验室在Pohnpei 和圣诞岛安装了 50 MHz 的风廓线仪。Pohnpei 的系统只测量垂直速度分量，但 1989 年夏季增加水平风速的测量，圣诞岛系统测量风速的三个分量。1987 年美国国家气象中心和欧洲中期天气预报中心在全球分析和预报中开始利用这些资料。Gage 等人报告说，这种分析的统计评价表明安装风廓线仪后有明显的改进。高层大气物理实验室正着手开发其它系统，用来在赤道附近从南美太平洋沿岸向西扩展的带状阵网中部署。这些系统将安装在秘鲁的皮乌拉和印度尼西亚的比阿克岛上。

图 1 表示美国本土现在和计划安装的微

表 2 Tycho 技术公司生产的商业风廓线仪性能

技术规格	廓线仪类型		
	对流层-平流层	对流层	对流层下层
工作频率, MHz	49.25	404.37	404.37
峰值功率, kW	250	35	0.9
取样距离, km	1.6—22	0.25—16	0.125—5
垂直分辨率, m	150/1200	250/1000	150/450
时间分辨率, 分	3—6	6	0.75—60
天线面积, $10^3 m^2$	15.6	0.125	0.038
波束宽度, 度	2.9	4	8
移动性	差	可移动	好
显示和辅助处理所要求的典型计算机	Micro VAX	Micro VAX或PC-兼容	Micro VAX或PC-兼容

波风廓线仪的位置。NOAA 的 404 MHz 廓线仪实验网(后文中讨论)被明确标出，其它设备则仅用雷达频率来标识(即 50, 405, 915 和 1290 MHz)。

美国目前有两个常规 UHF 风廓线仪制造厂家。Tycho 技术公司(科罗拉多州博尔德)提供一种 VHF ST 廓线仪、一种 UHF 对流层下层系统和一种 UHF 对流层廓线仪，见表 2。UNISYS 公司目前生产 NOAA 为其实验网定购的 UHF 对流层风廓线仪，见表 3。

4. 廓线仪研究

Gage 和 Gossard 对已做过的用风廓线仪系统研究边界层、对流层和平流层下层特性工作作了极好的评论。这项研究的重点是这些层的结构、波动和基本后向散射机制。

5. 应用

NOAA 环境研究实验室从 1989 年开始在美国中部建立一个 30 个站的业务风廓线仪实验网(见图 1)。表 3 给出了廓线仪的技术规格，第一个(样机)系统是 1988 年末从制造厂商(UNISYS 公司)得到的，现正在科罗拉

表 3 NOAA实验风廓线仪的技术规格

最大数据高度	16.25km
最小数据高度	0.5km
垂直单元间隔	250m
最大水平风	200ms ⁻¹
最大垂直风	22.4ms ⁻¹
频率	404.37 MHz
峰值功率	15kW
平均功率	2200W
脉冲宽度(经压轴的)	1.67/6.67μs
脉冲重复周期	100/153μs
天线类型	同轴直排天线阵
增益	>32dB
时序波束	东, 北, 垂直
旁瓣电平	-20到-40dB
接收机噪声系数	0.5dB
平均无故障时间	>4400h
平均修复时间	90分
工作条件	
温度	-40—+50°C
湿度	0—100%
风	83m/s(阵风83m/s)
雨	7.6cm/h
雪	1.22m
冰	7.6cm(径向)

多接受试验。该网将在两年内建成。还要根据网在许多业务应用中的能力对它进行评

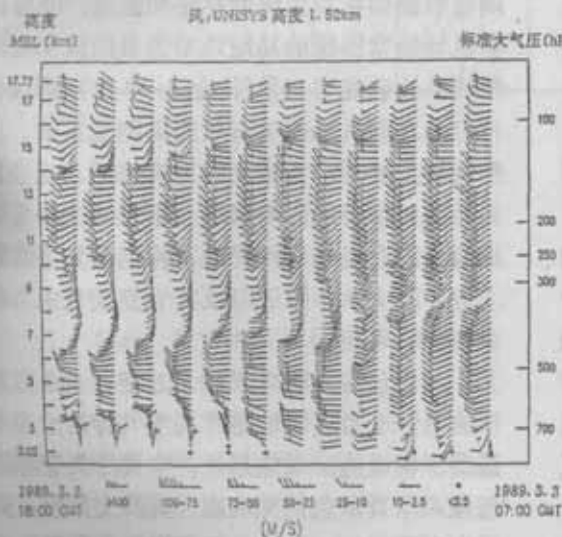


图 2 科罗拉多州 Platteville UNISYS 廓线仪的时间-高度剖面图——NOAA 廓线仪实验计划样机系统

估, 这些应用是: 中小尺度数值天气预报、局地尺度分析和预报方案, 与其它天气观测平台的结合。实验网的建立将补充而不是取代现有的无线电测风探空站。

图 2 是在科罗拉多州 Platteville 运行的最初的 UNISYS 系统 12 小时时间-高度剖面的一个例子。样机系统在约 50% 时间内超过规定的最大数据高度 16.25 km agl (离地高度), 只有 10% 的廓线没有达到 13.5 km agl, 仅极少数廓线未能达到 11.5 km agl。

科学界在国家风暴尺度业务和研究气象学计划 (STORM) 中实施的一些计划一直是对美国廓线仪技术的演变和发展最有影响的因素之一。这些计划 (UCAR 和 NCAR) 的重点主要放在中尺度, 因为人们普遍认为如果基本认识得到改进, 则在改善中尺度天气预报方面同样能获得最大的进展。科学界毫不含糊地声明, 进行国家中尺度或 STORM 计划需要从美国中部地区开始, 安装一个风廓线网。STORM 方案中的现行计划过去几年在不断发展以便更多地利用作为美国国家气象局现代化成果而实施的现有技术。图 3 表示下个十年随着新技术的应用, STORM

计划如何从 1992 年的中西部计划发展到



图 3 国家 STORM 计划中的尺度相互作用试验 (SIE) 时间表

1995 年的东部和中西部计划, 进而发展到 1998 年的全国计划。90 年代初期将首先在美

国中部安装 NEXRAD 和终端多普勒天气雷达 (TDWR) 系统、自动地面观测站和实验风

廓线网。下个10年里随着时间的推移，可以预料这些技术将进入美国的东部地区，最后将覆盖整个美国大陆。这项计划将跨越下个10年，并将需要研究和业务团体之间的密切配合。STORM的基本目标主要有两个方面：更好地了解中尺度过程和改进中尺度天气预报。

有关廓线仪的主要问题是廓线网如何用于改进数值天气预报。我们的看法是这个问题只能通过实验网的实际部署来回答。单站的工作不能有力地说明一个完整或部分网的附加价值。为此，需要得到有效的保证，以便结合四维资料同化和数值模拟中类似的活动进行最终的野外试验。许多有关业务用廓线网效能的基本问题，我们期望通过以国家STORM计划为代表的深入的研究工作来回答。

第二个重要应用是短期天气预报和临近预报。Kuo等，以及Gage和Schlatter描述了单部风廓线仪观测资料或适度的小尺度网观测资料如何才能用于了解中尺度系统的结构。这种观测资料对支持改善临近预报和短时预报产品有多么重要还不清楚。但它们在进行特定的事后个例研究中无疑是非常重要的。

风廓线仪一个明显的应用是航空业务。准确的短期预报和飞行高度上风的最新分析对航空具有巨大的经济意义。就全国而言，即使每次飞行节约几分钟，每年就可节省燃料费几亿美元。航线工作者反复指出，对于急流，特别是在强梯度大风速区域，需要更及时和更高分辨率的分析。通过国家网或甚至中西部网的部署，风廓线技术将能连续监视各飞行高度上的风，并使这种信息几乎可实时地应用于航空部门。

有关航空方面的第二个应用是检测和监视晴空湍流和尽可能做出预报。限于我们的知识，这方面具有决定性的工作做得很少。

通常提到的一个明显的应用是探测机场下层风切变。尽管一个密集的对流层下层风

廓线雷达网确实能用于监视机场附近的三维空气运动，但对于这种方法是否令人满意或是否能导致以较低成本解决问题还不清楚。垂直指向风廓线仪通常不能测量地面上大约100 m以内的风。这是飞机飞行的关键区域。低层风切变结构，如微下击暴流，水平尺度为3—10 km。从取样角度考虑，规定网的密度应相距1 km或更小。如果希望监视机场附近下层气流，比如说机场边界层5 km以内的气流，那么需要覆盖的区域应该是100 km²，这将需要100部风廓线仪。这种部署在业务上或经济上的可行性是有疑问的。然而这样的网能测量空气的垂直运动则是确实的。就微下击暴流风切变而论，单部微波多普勒雷达能为整个机场区域提供足够的保护这一点已得到证实。此外，这样一部雷达还能提供各种其它天气现象的一般监视和警报，而且似乎比部署风廓线雷达网更耐用，更节省成本。

沿进场和起飞航道部署的成本很低的边界层廓线仪有可能提供有价值的垂直速度情报，以补充微波测量资料。另外，这种补充网能够提供夜间急流的存在和强度、世界许多机场经常出现的局地地形造成的风切变的资料。这也说明少量(比如1—3部)廓线仪可以为小型机场提供有效的风测量系统。这些机场主要供小型螺旋桨飞机使用，受微下击暴流风切变的影响较小。不过这些小型飞机通常没有足够的风资料，特别是复杂地形上方、较大水体附近以及其它复杂气象环境中的资料可用。

我们预料风廓线仪技术近期在业务应用中的另一个重要领域是有关空气污染方面的活动。明显的两项应用是：空气污染管理和预报，以及紧急情况响应。美国大多数主要城市定期预报一级和二级污染物的短期大气质量状况。对流层下层风廓线仪通过提供大大改进了的边界层风资料和混合深度估算值，使这些地区有可能更为准确地预报大气质量短期变化。混合深度可以根据平均风廓

线和多普勒谱宽确定；已经知道，返回信号的强度在高层逆温层底部上方明显增强。在美国，空气污染状况越是严重的地区越是如此，在这些地区，高层的下沉逆温经常引起较弱的混合。目前的短期预报工作由于缺乏局地高分辨率风廓线资料而受阻；现在所用的典型资料输入来自相距 50—100 km 的常规天气站一天两次的无线电探空仪资料。

也许风廓线仪对空气污染前景最为重要的业务应用是它们支持紧急响应活动（如切尔诺贝利和三里岛的核事故，以及更经常的由氯气泄漏、化学起火等引起的事故）的潜在应用。在过去 5 年中，美国已建立起广泛

的基本设施，用以提供事故响应和减轻这些事故影响的业务能力。

风廓线仪在支持以观测为基础的气候调查研究方面提供了重要前景。这主要是根据后勤和经济方面的考虑得出的。虽然我们还没有风廓线仪运行的长期经验，但我们知道 NOAA 的廓线仪实验网规定的风廓线仪单次故障间隔时间大于 4400 小时（1 年半）。由于这一设计的故障水平，很有可能在岛屿和其它边远地段安装廓线仪，在这些地段，后勤保障方面的考虑可能阻碍了无线电探空仪系统的应用。风廓线仪较高的数据率对进行气候驱动过程的研究也是有益的。正如后

表 4 对边界层廓线仪的一致要求

要 求	水平风(m/s)					温 度(K)					比 湿(g/kg)				
	平均	s.d	最小	最大	模式	平均	s.d	最小	最大	模式	平均	s.d	最小	最大	模式
探测高度, km	3.4	1.1	1.5	5.0	3.0	3.7	1.4	1.0	6.0	5.0	3.6	1.4	1.0	6.0	3.0* 5.0*
高度分辨率, m	82	53	10	200	100	58	39	10	100	100	72	34	10	100	100
时间分辨率, 分	15	14	1	60	15	15	15	1	60	1* 30*	16	16	1	60	30
阈值	0.7	0.4	0.1	1.0	1.0	—	—	—	—	—	1.2	1.6	0.01	5.0	1.0
准确度	0.8	0.5	2.0	0.1	0.5	0.7	0.3	0.05	1.0	1.0*	0.7	0.3	0.1	1.0	1.0
精度	0.5	0.3	1.0	0.1	0.5	0.3	0.3	0.02	1.0	0.1* 0.2*	0.4	0.4	0.01	1.0	1.0

* 双模式

文中讨论的，廓线仪比无线电探空仪也要经济得多，这是因为后者在人力和消耗品上有很高的成本；这一点可能进一步鼓励增加廓线仪站的密度。

另一方面，目前的廓线仪技术不能提供可从无线电探空仪获得的热力学资料。不过目前无线电声学技术似乎能提供约 2 km 高度的温度廓线。被动微波和红外系统使得提供整个对流层的温度和水汽廓线有了希望。然而这些系统能否以无人值守方式实际可靠地工作还有待证实。

6. 辅助廓线技术

Dabberdt等调查了大气科学团体对获取

边界层廓线的要求。大约 25 位科学家参加了用户调查及随后的讨论会，以便对最重要的大气变量和所需廓线系统的性能指标确定一致同意的优先级。科学家们指出学科的范围包括：边界层模拟、对流系统、终点站航空天气、人工影响天气、大气化学、环境气象学和业务用中尺度预报。第一优先级的变量是水平风、温度和湿度；其它变量及其相应的优先级（括号内数字）包括：边界层高度(2)、湍流(3)、云底高度(3)、气溶胶(3)、和痕量气体(3)，如臭氧、二氧化硫和二氧化氮。作者在表 4 中概括了对满足关心边界层过程的大气科学家所需要廓线系统的一致要求。有趣的是，May等在表 1 中给出的

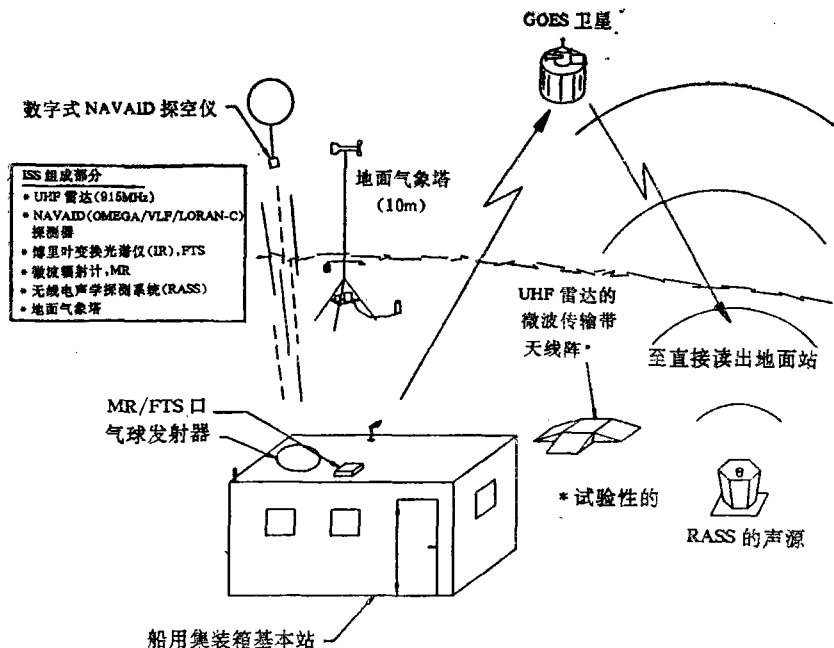


图4 集成探测系统的原理设计

边界层风廓线仪性能与表 4 概括的要求实际上是一致的。

过去几年中,在测量另一第一优先级变量温度方面取得了重大的进展。用于获取这种进步的技术是所谓的无线电声学探测系统,即 RASS。RASS 方法利用一台多普勒风廓线仪跟踪由声波产生的折射指数梯度的传播来测量声速的垂直廓线。在进行了湿度和大气运动的订正后,声速与温度的平方根呈单值相关。Strauch 等利用 50、404 和 915 MHz 风廓线仪和 5.5 和 50 W 声波发射器分别评价了三个 RASS 系统。三个系统达到的最大高度分别是 5—9, 1.5—2.5 和 0.6—1.5 km。频率越高探测最大高度越低实际上是声波吸收率增加的结果。

尽管 RASS 是风廓线仪技术直接发展的产物,但目前还没有已经证实的用于获取湿度廓线的类似应用。即便使用 RASS,也还有前面指出过的探测高度的局限。虽然这些高度满足边界层用户团体的需要,但它们不能满足中尺度、天气和气候部门对高层的需要。作为实现这些要求的一个尝试,由国家

大气研究中心(NCAR)、NOAA 环境研究实验室(ERL)和威斯康星大学(UW)组成的科学家小组提出了研制一种叫做集成探测系统的混合式廓线仪,它将一套相互补充的主动和被动远距离和现场传感器结合在一起。图 4 是这种集成探测系统的原理说明。候选部件传感器包括:UHF 风廓线仪、RASS、导航无线电探空测风仪系统、高分辨率红外干涉仪-光谱仪(HIS)、微波辐射计和地面气象系统。该系统的目标是提供综合的连续的高分辨率对流层低层热力学廓线以及对流层上层和平流层的低分辨率廓线。这种集成探测系统容易运输和在各种联合网中部署,以供各种研究工作之用。

7. 无线电探空仪的前景

为了有效地取代现有无线电探空仪系统,对负责高空网工作的人员必须回答几个问题:

—探测高度是否满足中尺度和天气尺度的需要?

—系统是否足够可靠?

—所有被测变量是否有足够的精度和准确度?

—大气状况能否保证观测资料不会有不能接受的间断?

—系统有无全天候运转能力?

—可以改进预报吗?

—系统是否节省费用?

怎么可能回答这些问题?虽然目前已具有相当丰富的风廓线仪的经验,但廓线仪网能否通过减少业务费用或改进预报而证明它实际是经济效益的这一点仍有待验证。在遥感这些状态变量时还存在一些重要的局限。

为了说明某些成本效益问题,我们对一个探空仪系统和一部风廓线仪(具有和不具有 RASS 能力)运行的相对成本进行了估算。表 5(a、b)(表略)估算了与三个廓线系统有关的各种业务和测量费用。用于这种分析的无线电探空仪系统采用 LORAN 或 OMEGA 导航系统测风,采用常规探空仪测压、温、湿,风廓线仪是 ST 型(见表 1)。风廓线仪的人工费用按每周 8 小时作了足够的估计;所有人力、供应品和消耗性用品的费用每年按 4% 增加。获取数据的费用是基于“单位廓线”概念,这里“单位廓线”定义为一种气象变量(即压、温、湿、北风分量、东风分量或垂直分量)的一条廓线。表 5 b 假定每天施放两个 NAVOID 探空仪,遥感廓线仪每 6 分钟给出一条廓线。在这样的条件下,遥感的单位风廓线费用超过 1 年为 1.60 美元,超过 5 年为 0.45 美元,超过 10 年为 0.30 美元;类似的单位廓线费用对 RASS 而言约低 15%。相比之下,单位无线电探空仪廓线对 1、5 和 10 年以上期限,估计费用分别为 58.10、41.11 和 41.35 美元。超过 10 年,无线电探空仪的单位廓线费用比 RASS 风廓线仪的费用高 165 倍。一般可以认为,6 分钟

廓线间隔对许多应用来说是有富余的,而每小时廓线间隔的费用要少 27 倍。尽管费用悬殊很大,我们不期望、也不主张在下一个十年里替换无线电探空仪。这有几方面的原因: RASS 探测高度有限,目前还没有寿命较长的湿度(和气压)遥感探测器,而且在某些环境下(如船舶上)主动遥感系统不能工作。不过我们确实看到遥感系统正朝着更多地日常工作中使用的方向迈进,使得有可能在 10—20 年的时间内取代无线电探空仪。我们还认识到遥感探测器在数据分辨率和费用方面的优点,我们预料而且推荐将无线电探空仪和遥感系统在同一个站或不同的(但相互配合的)站相互补充应用。

另外,我们还得出结论:只有通过部署诸如正在美国部署的这种实验网才能回答前面所提出的问题。

8. 结 论

注意到风廓线未来的利用不在于新技术的开发,而在于更广泛地利用现有技术这一点很有益处。我们相信,在今后 10—20 年里将会看到遥感技术在常规无线电探空仪的补充下得到更广泛的应用。测定温度和湿度廓线需要发展新技术,但目前有可能使用无线电声学探测系统(RASS)技术,以及高分辨率辐射测量技术和光谱测定技术,它们带来了重大希望。最终,我们可能看到传统的无线电探空测风仪的使用将显著减少并在很大程度上被连续工作的遥感系统取代。然而在这段时间内,无线电探空仪技术不大可能被抛弃。这可能就是美国的战略和计划,而且在今后 10—20 年内可能得到报偿。

许继武 节译自《Meteorol. Rdscb.》

1990.5

林泉校