

华东中尺度天气试验成果

郑良杰 主编

3

中尺度天气系统的 诊断分析和数值模拟

商务出版社

中尺度天气系统的诊断 分析和数值模拟

主 编：郑良杰

副主编：李洪勣 陆汉城

气象出版社

136209

内 容 简 介

本书为华东中尺度天气试验成果之三,介绍了在电子计算机上实现中尺度天气系统诊断分析和数值模拟的方法。内容包括:资料处理和分析,中尺度天气系统的分离,水平流场的分析和计算,垂直运动的计算,水汽、热量、能量、辐射和位涡收支的计算,锋生和锋生环流的计算,热力不稳定的分析和计算,动力不稳定的分析和计算,飑线的数值模式及飑线的数值模拟,中尺度数值模式和中尺度对流天气系统的数值模拟。

本书的主要对象是从事天气分析和预报工作的专业人员和气象科研人员,也可供气象院校有关专业的师生参考。

中尺度天气系统的诊断 分析和数值模拟

主 编: 郑良杰

副 主 编: 李洪勣 陆汉城

责任编辑: 陆 勇

* * *

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京市昌平环球科技印刷厂印刷

气象出版社发行 全国各地新华书店经售

* * *

开本: 787×1092 1/16 印张: 12.875 字数: 312千字

1989年10月第一版 1989年10月第一次印刷

印数: 1—4,000 定价: 9.35元

ISBN 7—5029—0250—3/P·0151

序

华东中尺度天气试验是中国人民解放军总参谋部气象局组织和领导的一次规模较大的对流性天气试验。

对流性天气包括雷暴、暴雨、冰雹、下击暴流等天气现象，它们不仅严重威胁军事活动，而且给国民经济建设和人民生命财产带来重大损失。1975年8月河南一次特大暴雨，暴雨中心附近过程总降水量达1631.1毫米，造成水库垮坝，江河横流，人民生命财产损失极大，为仅次于唐山地震的严重自然灾害；1972年5月2日，贵阳机场一次持续8分钟的冰雹，飞机受到重大破坏；1961—1980年这20年，据不完全统计，上海市地区强对流天气损坏船舶舰艇1400余艘，飞机6架。这次试验的目的，在于研究华东地区对流性天气的特征以及与之相伴的中尺度天气系统的结构、性质和发生发展演变规律，并建立预报模式和方法，提高对流性天气预报能力。

这次试验由总参气象局和各参试单位指定专人组成领导组。下设的办公室由总参气象局、南京军区司令部和空军气象学院派人组成；技术组由空军气象学院、总参气象研究所、空军第七研究所和南京军区空军司令部气象处派人组成。分别负责试验的日常工作和技术工作。试验区设在长江、淮河中下游地区，以南京为中心，西起安徽的霍山，东迄江苏的东台，北自江苏的泗阳，南至安徽的铜陵，面积约为141000平方公里。试验区设置了27个无线电探空站，13个天气雷达站，无线电探空资料的平均站距达到90公里，时间间隔为3—6小时；天气雷达资料时间间隔为30分钟。试验期间还收集了该地区260个地面气象站和1315个水文站的资料，以及日本GMS-1和2的云图资料。地面观测资料平均站距为55公里，时间间隔为1小时，卫星云图资料时间间隔为3—6小时。试验分为两个阶段进行：现场试验阶段和资料分析研究阶段。

1980—1983年为现场试验阶段，在指挥组（由办公室和技术组联合组成）的统一组织下，于每年4月下旬至6月中、下旬观测。参加单位和人员有北京、沈阳、济南、南京、福州、武汉军区以及海军、空军、二炮和国防科工委所属的30多个部队共40个气象分队近千人。这次试验共抓住32个对流性天气过程，其中探空，测风资料4430时次，雷达回波照片46992张，收集相应的高空、地面资料156000多份，雨量资料11412516份。在试验期间，参加资料收集、审核勘误和加工整理的同志都付出了辛勤的劳动。观测人员往往顶风冒雨，连续奋战几昼夜；为了保证记录的准确，资料分析人员对全部资料反复核对、精细加工、认真整理。显然，没有这些同志的辛勤劳动，不可能取得这样一批时空密度大、过程多、质量可靠的资料。

1983—1987年为资料分析研究阶段，由空军气象学院、总参气象研究所、空军第七研究所、南京军区司令部气象处、南京军区空军司令部气象处、海军东海舰队航空兵司令部气象处、二炮80302部队气象室和国防科工委89960部队的气象室等单位参加协作。中国科学院学部委员、研究员陶诗言同志为科学顾问。分析研究的范围甚广，内容包括对观测区域内雷暴群、飚线、江淮气旋、梅雨、低空急流和中尺度对流复合体等天气系统的研究，发现了一些事实，提出了一些新观点并对之进行了理论解释。研究方法有：传统天气分析、近代天气学

诊断、数值试验、雷达气象学和卫星气象学。这次试验的大部份研究论文已被汇集成《华东中尺度天气试验论文集》，为了全面系统地总结华东中尺度天气试验成果，我们在该论文集的基础上编著了《华东对流性天气的分析预报》、《长江中下游梅雨暴雨的研究》和《中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟》三册书，并由气象出版社正式出版。相信这一成果对改进华东地区春末夏初强对流性天气的预报保障工作必将起到积极的作用。

这次试验得到了许多单位的支持。地方气象部门、水文部门和电讯部门为这次试验的观测场地、气象资料以及资料传输都作出了很大的贡献，我们对他们表示衷心的感谢。

张丙辰

1987年7月15日于南京

前 言

诊断分析和数值模拟在中尺度天气系统研究中是深受重视的理论分析工具。通过诊断分析可以从有限几种气象观测资料中提取出许多重要的天气信息，并对各种天气系统的动力和热力特征作出定量的解释；采用数值模拟方法研究中尺度过程，可以避免理论研究中求解非线性方程组的困难，并能推动气象科学向着“实验”的方向发展。

本书的素材主要取自“华东中尺度天气试验”期间有关中尺度天气诊断分析和数值模拟的部分研究成果。本书意在便于实际应用，因此，对各种诊断模式和数值模式的建立、数值计算方案和求解步骤均作了详细介绍。本书各章具有相对独立性，读者可以根据需要选读有关章节。

本书第一章是陈永胜、魏绍远、徐幼平和张少洪同志编写的；第二章是章震越和夏大庆同志编写的；第三章和第四章是夏大庆和郑良杰同志编写的；第五章是林锡怀、沈新勇和陆汉城同志编写的；第六章是钱家声同志编写的；第七章是李洪勋同志编写的；第八章是陆汉城同志编写的；第九章是张铭同志编写的；第十章是郑良杰、夏大庆同志编写的。北京大学张玉玲教授审阅了本书的原稿，并提出了宝贵意见，谨致深切谢意。

本书主要收集了1985年以前的研究成果，近几年得到的一些研究成果未能编入。因限于我们的水平和经验，本书一定存在缺点和错误，热忱希望读者批评指正。

目 录

序

前 言

第一章 资料处理和分析	(1)
第一节 资料检误.....	(1)
第二节 探空资料的气球漂移偏差估计.....	(5)
第三节 客观分析.....	(13)
第二章 中尺度天气系统的分离	(20)
第一节 改进的Shuman-Shapiro 中尺度分离方案.....	(20)
第二节 有限区域和有限时段气象要素场的单波分离方法.....	(24)
第三节 几种常用的波动分离方案的比较.....	(27)
第三章 水平流场的分解和计算	(31)
第一节 实测风的分解和修正.....	(31)
第二节 流函数 ϕ 和速度势 χ 的计算.....	(33)
第三节 利用位势高度场计算风场.....	(35)
第四节 用实测风计算位势高度.....	(39)
第五节 近地面风场的计算.....	(39)
第四章 垂直速度的计算	(41)
第一节 计算垂直速度的运动学方法.....	(41)
第二节 计算垂直速度的动力学方法.....	(44)
第三节 应用举例.....	(53)
第五章 水汽、热量、动能和位涡收支的计算	(60)
第一节 水汽、热量源(汇)的计算.....	(60)
第二节 辐射的计算.....	(62)
第三节 动能收支的计算.....	(67)
第四节 位涡的诊断分析.....	(70)
第六章 锋生与锋生环流的计算	(76)
第一节 锋生强度计算及锋附近上滑运动的计算.....	(76)
第二节 锋生函数与中尺度锋生环流.....	(81)
第三节 中尺度锋生环流计算实例.....	(87)
第七章 热力不稳定的分析和计算	(94)
第一节 单站探空资料的数值分析.....	(94)
第二节 不稳定能量的计算及其在强对流天气分析和预报中的应用.....	(103)
第三节 温度平流及其引起的不稳定能量变化的计算.....	(113)
第四节 湿有效位能的计算.....	(118)
第五节 干暖盖的分析.....	(120)

第八章 动力不稳定的分析和计算	(123)
第一节 正压不稳定的分析计算.....	(123)
第二节 正压-斜压联合不稳定的分析计算.....	(126)
第三节 对称性不稳定.....	(130)
第九章 飚线的数值模式和数值模拟	(144)
第一节 数值模式.....	(145)
第二节 模式飚线的结构.....	(148)
第三节 对流凝结加热对飚线生成演变的影响.....	(153)
第四节 急流触发飚线的试验.....	(155)
第五节 实际飚线的数值模拟.....	(157)
第六节 中尺度数值模式中的分解算法.....	(162)
第十章 中尺度数值模式和中尺度对流天气系统的数值模拟	(169)
第一节 套网格N层原始方程模式.....	(169)
第二节 位势不稳定能量的释放与中尺度对流系统生成 和发展的数值模拟试验.....	(182)
第三节 高、低空急流的动力作用与中尺度对流系统生 成和发展的数值模拟试验.....	(189)

第一章 资料处理和分析

第一节 资料检误

天气分析和研究工作必须有足够多的准确可靠的资料,才能得到具有正确物理意义的结果。事实上,我们所能得到的气象资料常常出现错误和误差。气象资料错误和误差的原因是多方面的,主要有:仪器误差;观测和计算误差;通讯传递误差等等。这些原因引起的误差,势必影响分析研究的结果。因此,对于这些气象记录必须采取适当的方法加以检误和修正。华东中尺度天气试验获取的气象资料是在目前大气探测条件下得到的常规天气报告,经过检验,这些资料的质量达到了现行气象台站常规天气报告的水准,因此,它们是可信的。为进一步提高资料的质量,对已有的资料进行常规检误是必要的。根据华东中尺度天气试验的资料情况,参照欧洲中期天气预报中心的检误方案制定了针对地面气象资料和无线电探空资料的检误方案。地面资料主要是对气压场进行订正,使之全部订正为海平面气压,以便于分析比较。无线电探空资料主要是对各标准等压面上的温度、露点、高度和风进行检误和修正。

一、地面资料的检误和修正

华东中尺度天气试验期间的逐时地面天气图,是根据国家气象台站地面观测网的逐时观测资料填绘的。各站资料的内容和规格不完全一致,有些台站资料来源于自记记录的读数,各气象要素并不齐全。所有要素中只有气压和温度的记录比较完整。因此对地面资料的检误和修正主要是对气压记录的检查 and 订正。

(1) 极值检误。首先统计华东中尺度天气试验区的各气象要素的气候平均值和极值,将试验期的地面天气报告的气象要素参照极值进行检误,若资料报告值超过极值而又无明显的天气现象对应即为错误报告,对具有一定天气现象对应的超极值报告要综合处理,如参照强对流天气的统计极值等来决定正误。

(2) 用比较法判断记录中各要素之间是否有矛盾的现象,若有互不相容的情况,则可根据实际天气确定某个要素是否有错误。

(3) 判断气压记录究竟是本站气压还是海平面气压,若是本站气压,则要订正为海平面气压。利用初始观测资料,对那些判断为本站气压的气压值进行高度订正。我们用 20°C 时的高度气压订正值作为气压订正值,本站气压加上气压订正值即可得到海平面气压。

二、无线电探空资料的检误、修正和插补

检误的内容包括各标准等压面上的温度(TT)、露点(T_d)或温度露点差($TT -$

$T_d T_d$)、风(包括风向 DD 和风速 FF)、高度(HHH)。检误的步骤如下:

第一步:检查各标准等压面上的记录是否缺漏。

第二步:检查各标准等压面上的各种要素是否有错。办法是:

a. 极值检查:分别对照气候极值表和强对流天气下气象要素统计极值表,检查各标准等压面上各种要素值是否超过极值所规定的范围。超过极值的又没有明显天气现象的记录为错误的记录,不超过极值的记录尚需作进一步检查。

b. 对温度进行绝热检查和内插订正。对温度场的检查应从地面层开始,向上逐层检查温度垂直递减率是否超绝热,若有超绝热的现象,则判断为错误,需要加以订正。

1. 检误的方法

(1) 由绝热方程计算:

$$NT_{i+1} = T_i \left(\frac{p_{i+1}}{p_i} \right)^{R/c_p} \quad (1.1)$$

其中, p_i , T_i 为下层的已知的实际气压和气温; p_{i+1} 为上层的气压,即所检查的那个高度上的气压; T_{i+1} 为上层的气温,即所要检查层次的气温; NT_{i+1} 为根据干绝热方程计算的上层的温度。

比较 T_{i+1} 和 NT_{i+1} , 若 $T_{i+1} \geq NT_{i+1}$, 不是超绝热的, T_{i+1} 可视为正确。若 $T_{i+1} < NT_{i+1}$, 则为超绝热, T_{i+1} 错误。

根据这一原理,也可由 $T-\ln p$ 图上的层结曲线判断是否有超绝热的现象。

(2) 根据统计结果给出相邻的标准等压间温度的最大可能变化值(表1.1)。若资料报告的两个标准等压面之间的温度变化值超过了最大可能变化值,则认为记录有错。检查时首先确定下层的温度,然后从下层逐层向上检查,若发现超出规定变化范围,一般可确定上层记录有错。

表1.1 相邻标准等压面之间温度最大可能变化值

1000 850百帕	850 700百帕	700 600百帕	600 500百帕	500 400百帕	400 300百帕	300 250百帕	250 200百帕	200 100百帕
14℃	16℃	12℃	14℃	16℃	19℃	12℃	15℃	49℃

200百帕—100百帕之间常为对流层顶的位置,温度变化的范围较大。

2. 检查中发现温度有错误或缺漏时的修正或补充方法

(1) 线性内插法

假定温度随高度($\ln p$)呈线性变化,则有以下插补或修正公式:

$$T_s = T_i + \frac{\ln\left(\frac{p_s}{p_i}\right)}{\ln\left(\frac{p_{i+1}}{p_i}\right)} (T_{i+1} - T_i) \quad (1.2)$$

T_s 为温度插补值; p_i , T_i 和 p_{i+1} , T_{i+1} 分别为所要计算的标准等压面 p_s 的下层和上层的特性层或标准层的气压和温度的资料报告。

要注意公式(1.2)中 T_i 和 T_{i+1} 所反映的温度直减率不能大于 γ_d 。

与上述原理相同,可直接由 $T-\ln p$ 图上点绘的层结曲线上读取插补值。

(2) 静力学订正法

由静力平衡关系导出两等压面之间的厚度为：

$$D_i = \frac{R_d}{g} \frac{T_i + T_{i+1}}{2} \ln \frac{p_i}{p_{i+1}} \quad (1.3)$$

变换 (1.3) 式可得到 p_{i+1} 高度上的订正温度：

$$T_{i+1} = \frac{2gD_i}{R_d \ln \frac{p_i}{p_{i+1}}} - T_i \quad (1.4)$$

D_i 为 p_{i+1} 和 p_i 等压面之间的厚度，由实际报告给出； p_i ， T_i ， T_{i+1} 的意义同前； R_d 为干空气气体常数； g 为重力加速度。

为方便起见，可事先做好 $\frac{g}{R_d} \ln \frac{p_i}{p_{i+1}} \frac{D_i}{T_i + T_{i+1}}$ 的计算表，然后根据 T_i 直接查表计算 T_{i+1} 。

3. 露点温度的检误和修正补充

(1) 极值检误

$T_d T_d$ 的极值检误与上述要素的检误方法一样。

(2) 露点温度的修正和补充

若露点温度错误或某层缺测，可利用与温度修正和出插补相同的方法进行修正和插补。

4. 高度的检误和修正补充

检误的基本原理：由静力学方程导出等压面之间的厚度和平均温度的关系，由已知平均温度求出二个等压面之间的厚度，再与下层等压面的高度相加，即为上层等高面的高度。将所求之高度和资料报告中的高度相比较，以确定其为正确或错误，即由：

$$D_i = \frac{R_d}{g} \frac{T_i + T_{i+1}}{2} \ln \frac{p_i}{p_{i+1}}$$

计算出 p_{i+1} 的高度 NH_{i+1} ：

$$NH_{i+1} = H_i + D_i \quad (1.5)$$

将计算的高度 NH_{i+1} 与实际报告中的厚度 H_{i+1} 进行比较，若其差值不超过20位势米的记录为正确记录，否则为错误，应加以修正。差值20位势米的确定是由资料抽样统计结果确定的。

检误的步骤是：首先对最下层等压面的高度检查并进行订正；然后从下向上逐层检查，求出各相邻等压面之间的厚度 D_i 和 NH_{i+1} 。

也可以事先作好 D_i 与 $\bar{T}$ 的查算表， $\bar{T}$ 是所要计算的那个标准等压面上的温度和下层有资料报告的那个标准等压面上的温度以及它们之间所有特性层的温度的算术平均值，即：

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_j \quad (1.6)$$

然后，由 $\bar{T}$ ， p_i ， p_{i+1} 根据 (1.3) 计算出 D_i 。实际检查高度资料时，只要将下层 p_i 的高度与 D_i 相加，即为计算的上层等压面 p_{i+1} 的高度 NH_{i+1} 。最后比较资料报告中的 p_{i+1} 的高度 H_{i+1} 和计算出的高度 NH_{i+1} ，并确定其正误。若 H_{i+1} 是错误的，则按 (1.7) 式进行订正：

$$(H_{i+1})_{\text{订正值}} = \begin{cases} NH_{i+1} - \frac{20 + \text{实际差}}{2} & (\text{观测值 } H_{i+1} \text{ 偏低时}) \\ NH_{i+1} + \frac{20 + \text{实际差}}{2} & (\text{观测值 } H_{i+1} \text{ 偏高时}) \end{cases} \quad (1.7)$$

5. 风的检误和修正

(1) 风速的检误、修正和补充

1) 风速的极值检误。将各标准等压面上的测风报告与表 1.2 以及华东地区探空报告的气候统计资料的极值报告相比较, 若资料报告中的风速 FF 超过极大值 FF_{max} 则记录为错。

表1.2 各标准层等压面上风速的可能极大值 FF_{max}

PPP(百帕)	1000	1000 850	850 700	700 500	500 400	400 200	200 50	<50
HHH(位势米)	<500	500 1500	1500 3000	3000 5500	5500 6500	6500 12000	12000 22000	>22000
FF_{max} (米/秒)	60	65	70	133	128	154	130	130

2) 风速垂直切变的检误。若上下邻近二层的风速 FF_{i+1} 和 FF_i 的切变值:

$$|FF_i - FF_{i+1}| > 16.5 + 0.22(FF_i + FF_{i+1}) \quad (\text{米/秒}) \quad (1.8)$$

则风速有错。

3) 风速的修正和补充。在需要修正和插补的标准等压面邻近的上下层各找一个实测风的资料, 然后根据线性关系内插。

先将邻近上、下层实测风速分解成 u, v , 然后内插出等压面上的 u, v 分量, 最后将 u, v 合成:

$$\begin{cases} \text{全风速} & V = \sqrt{u^2 + v^2} \\ \text{风向} & D = \text{tg}^{-1} \frac{u}{v} \end{cases} \quad (1.9)$$

(2) 风向切变的检误和修正

高空风风向的误差一般有两种, 一种是观测的系统误差, 例如定错方位, 这种误差容易判断; 一种是观测和传递引起的偶然误差。

风向切变的检误可根据下式进行:

$$FF_i + FF_{i+1} > 0.8 \Delta V_{max} \quad (\text{米/秒}) \quad (1.10)$$

在满足上式条件时, 风向切变有错误, 若下面的风向正确, 则上面的风向是错的。

式中 ΔV_{max} 为相邻等压面所允许的全风速切变的最大值, 由表 1.3 给出。

表1.3 ΔV_{max} (米/秒) *

层次 (百帕)	<30℃	≥30℃	≥40℃	≥50℃	≥60℃	≥70℃	≥80℃	≥90℃
1000—850		72	61	57	53	49	46	41
850—700		72	61	57	53	49	46	41
700—500		110	84	77	70	63	52	50
500—400		110	84	77	70	63	52	50
400—300		110	84	77	70	63	52	50
300—200		110	84	77	70	63	52	50
200—150		110	84	77	70	63	52	50
150—100		72	61	57	53	49	46	41
<100		72	61	57	53	49	46	41

* 参照欧洲中期天气预报中心检误表。

上述对温度、露点及风和等压面位势高度的检误是常规检误，只在检验观测记录的可靠性方面，起着保证观测资料质量的作用¹⁾。

第二节 探空资料的气球漂移偏差估计

目前高空温、压、湿和风资料的采集仍主要依靠无线电探空来实现。我们知道，无线电探空就是在测站上人们利用一个飞升的气球将探空仪带入空中，同时利用气象雷达以及经纬仪追踪探空仪，然后根据探空仪发回的无线电信号和气球所在的空间位置变化，计算整理出测站在不同高度层的温度，等压面位势高度、湿度和风等气象资料。一般来说，人们往往把这样所采集的资料认为是测站上某一时刻要素值的铅直分布。然而，事实上，由于气球受大气高空风的影响，气球的漂升通常并非是完全垂直的，而是同时还存在沿水平方向的移动，即无线电探测从一组测球点到下一组测球点的水平位置将有变化（图 1.1），因此，所测的各层要素资料存在着水平位置差异。在时间上，由于气球也非迅速瞬间上升，资料还存在着时间差异。根据我们的实例计算，从地面到 100 百帕高度，气球空间水平漂移一般可达 40—50 公里，时间上也可相差 40 分钟以上（我国探空气球升速为 400 米/分）。这对于我国目前时间间隔为 12 小时，空间测站间距为 385 公里左右的常规高空探测网来说，该偏差影响很小，可以忽略不计。但是，在华东中尺度试验中，为了研究中尺度系统及其活动规律，试验时高空观测网进行了时空加密，加密后高空探测的时间间隔为每 3 小时一次，空间测站平均间距为 90 公里左右。对于这样的加密测站网，气球漂移偏差的时空尺度已快与观测的时空尺度相接近，因此，气球漂移对探空的影响就成为一个值得关心的问题。本节将说明我们对上述问题所采用的处理方法。

一、探空资料的空间漂移偏差订正

（一）气球水平漂移距离的确定

估算气球空间漂移对探空的影响大小，必须首先确定探空气球的水平漂移距离。水平漂

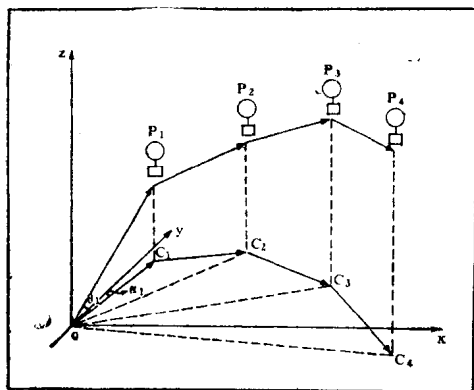


图1.1 气球轨迹与它在水平面的投影（漂移）

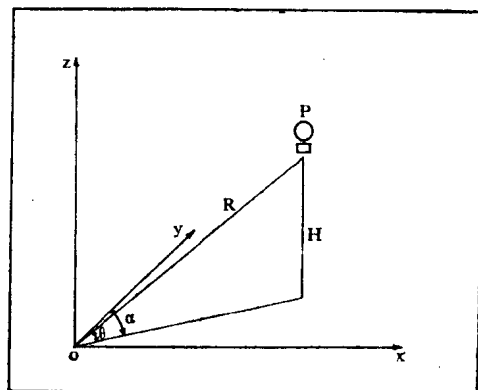


图1.2 探空气球的空间位置关系

1) 本节常规检误方案均参照 “B. Norris, Quality Control Checks applied to Observational Data ECMWF Operations Department, TECHNICAL NOTE.”

移距离与气球漂升的轨道有着密切的关系。由于气球的质量很小，因此，惯性很小，可以近似地把它看作是空气质点。在直角坐标系中，质点的轨迹方程一般形式可为：

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1.11)$$

在无线电探空中，气球的空间位置一般由三个参数决定：一个是某时刻的气球方位角 α ，一个是某时刻的仰角 θ ，还有一个是斜距 R （或高度 H ）。上述方程可变换为以 α ， θ ， R （或 H ）为变量的表达式。如图1.2所示，根据三角形关系，方程可改写为以下形式（以测站为原点）：

$$\begin{cases} x = R \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha \\ y = R \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha \\ z = R \cdot \sin \theta \end{cases}$$

或
$$\begin{cases} x = H \cdot \operatorname{ctg} \theta \cdot \sin \alpha \\ y = H \cdot \operatorname{ctg} \theta \cdot \cos \alpha \\ z = H \end{cases} \quad (1.12)$$

式中，我们只要已知气球不同时刻的 R （或 H ）， α ， θ ，就可以完全确定气球的运动轨迹。这里我们可注意到，轨迹的水平分量 x ， y 实际上就是气球的水平漂移距离。对于日常的探空， R （或 H ）， α ， θ 值往往不是连续记录，而是隔一段时间记录一次，于是我们直接通过（1.12）式所得到的仅是在某些时刻的气球漂移位置，为了获得其它时刻的气球漂移位置，我们可采用曲线拟合的方法内插完成。

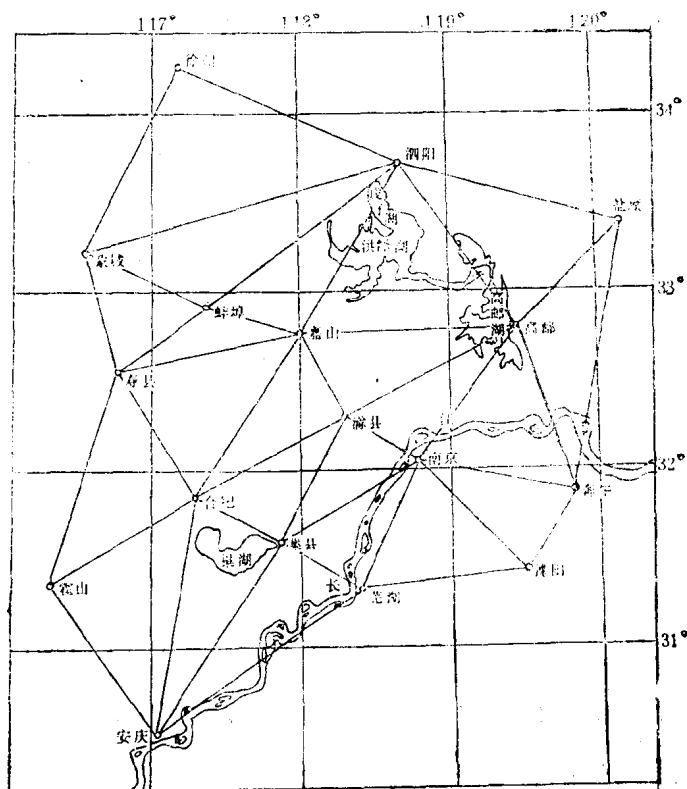


图1.3 17个探空站的分布和三角形网的分布

(二) 探空资料的空间漂移偏差订正

我们考虑气球漂移问题的思路是通过寻找一些方法来订正气球漂移对探空要素值的偏差,然后比较订正前后要素值的差异,从而衡量出气球漂移对探空资料的影响大小。根据这种想法,我们现在讨论探空资料的空间漂移偏差的订正。上面我们已确定了探空气球的水平漂移距离,这个距离实际上可反映探空资料点相对于测站的空间水平位置差。现在我们对位置差引起的资料偏差进行订正。我们采用三角形面积权重订正方法,这种方法由于它与探空要素值密切相关,并且处理时对资料的平滑程度小,因此它能对位置差所引起的要素值变化较敏感,可以较好地反映气球空间漂移的影响。具体方法如下:

我们先以华东中尺度高空探测网的测站为顶点,将该网连成若干个三角形。如图 1.3 所示。然后我们注意在漂移过程中三角形网的变化情况。图 1.4a,b 表示的是一个三角形的三个测站上气球上升到某一高度的漂移过程。图中三角形 $\triangle ABC$ 是由三个测站 A, B, C 所构成,三角形 $\triangle A'B'C'$ 是由测站 A, B, C 上的气球上升到某高度后的探测点所构成。由于有漂移,三角形 $\triangle A'B'C'$ 离开了测站位置,其可能覆盖某个测站点,不妨设其为 C 点,于是在上述高度上的 C 点要素值就可根据 $\triangle A'B'C'$ 的三个顶点 A', B', C' 的探测值内插而求出。

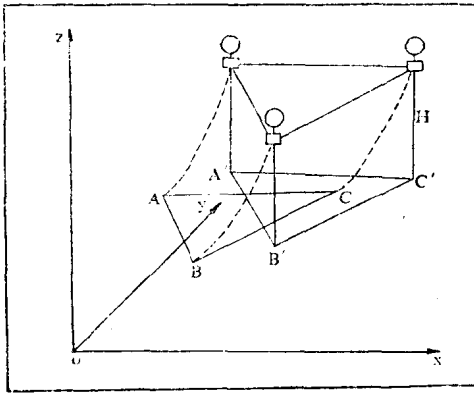


图 1.4a 探空站网中某三角形上三个测站气球上升到某高度的三维空间概略图

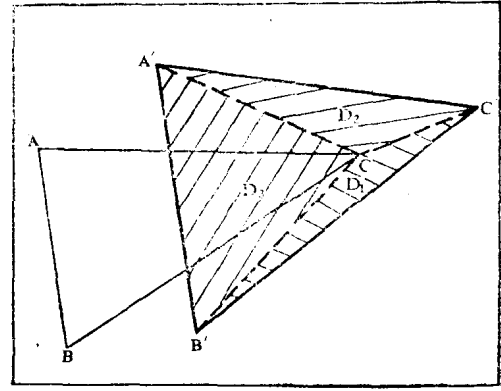


图 1.4b 某三角形空间水平漂移概略图

现在认为 A', B', C' 上的探空要素分别为 E_1, E_2, E_3 , 均是探测到的已知值。那么 C 点 (测站位置) 上的订正要素值可写为:

$$\begin{aligned}
 E_C &= \sum_{k=1}^3 W_k E_k \\
 W_k &= D_k / D_0 \\
 D_0 &= S_{\triangle A'B'C'} = \frac{1}{2} [X_1(Y_1 - Y_3) + X_2(Y_3 - Y_1) + X_3(Y_1 - Y_2)] \\
 D_1 &= S_{\triangle C'B'A'} = \frac{1}{2} [X_C(Y_2 - Y_3) + X_2(Y_3 - Y_C) + X_3(Y_C - Y_2)] \\
 D_2 &= S_{\triangle A'C'B'} = \frac{1}{2} [X_C(Y_3 - Y_1) + X_3(Y_1 - Y_C) + X_1(Y_C - Y_3)] \\
 D_3 &= S_{\triangle B'A'C'} = \frac{1}{2} [X_C(Y_1 - Y_2) + X_1(Y_2 - Y_C) + X_2(Y_C - Y_1)]
 \end{aligned} \tag{1.13}$$

式 (1.13) 中, E_c 是由三个探测点 A' , B' , C' 上的 E_k 进行面积加权平均而求得。权重 W_k 决定于第 k 个测站所对应的子三角形面积 D_k 和全三角形面积 D_0 之比。我们由公式注意到, 当 C 点和 C' 点重合, E_c 的值就是 C' 点的探测值, 这时实际上不存在气球的水平位移。而当 C 点距 C' 点越远, D_3 就越小, 相应的权重也就越小, 这时 C 点上的值与 C' 的值关系就越弱, 漂移影响可能就要大些。

在上述式中, X_k , Y_k 为漂移点的相对坐标, 其可为:

$$\begin{cases} X_1 = X_A + x_A & Y_1 = Y_A + y_A \\ X_2 = X_B + x_B & Y_2 = Y_B + y_B \\ X_3 = X_C + x_C & Y_3 = Y_C + y_C \end{cases} \quad (1.14)$$

式中, (X_A, Y_A) , (X_B, Y_B) , (X_C, Y_C) 分别为 A , B , C 三个测站的坐标, (x_A, y_A) , (x_B, y_B) , (x_C, y_C) 分别为三个测站气球水平漂移的位置坐标, 即探测点的水平位置差。

利用上面的方法, 我们可以对漂移三角形网内的测站要素加以订正, 对于漂移三角形网之外测站要素值的订正, 可采用外延的办法和人工分析的方法加以处理。

二、探空资料的时间偏差订正

前面我们讨论了探空资料的空间漂移偏差的订正, 但没有涉及到探测中的时间偏差问题。事实上, 由于气球特性以及放球时间并非完全同步, 从而会使同一个站点不同高度以及同一高度不同站点的探测资料存在着时间差异。这种时间差异对探空资料也有影响。基于前面同样的想法, 我们将对探空资料加以订正。

现对一个单站加以考虑。设有一组探空要素资料为 $\{E_k\}$, $(k=0, 1, 2 \dots n)$, 这些资料是该站在不同时间放球所探测到的某高度上的某要素值。它们对应的放球时间序列为 $\{t_k\}$, 对应的气球飞升时间序列为 $\{\delta t_k\}$, 于是要素值 E_k 的实际探测的时间为:

$$T_k = t_k + \delta t_k \quad k=0, 1, 2 \dots n$$

若认为某个规定探空时间为 T , 并且有: $\min\{T_k\} < T < \max\{T_k\}$ 。那么对时间偏差作订正的问题可认为是一个插值问题。为使插值精度更好, 我们根据资料情况分三种方式进行插值:

(1) 若 $n \geq 3$ 时, 那么我们采用三次样条插值。分式如下:

$$\begin{aligned} E = & \frac{M_k(T_{k+1}-T)^3}{6h_k} + \frac{M_{k+1}(T-T_k)^3}{6h_k} + \left[(T_{k+1}-T) \left(\frac{E_k}{h_k} - \frac{M_k h_k}{6} \right) \right] \\ & + \left[(T-T_k) \left(\frac{E_{k+1}}{h_k} - \frac{M_{k+1} h_k}{6} \right) \right] \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$k=0, 1, 2 \dots n$$

其中, $h_k = T_{k+1} - T_k$, M_k 是 E_k 在时间 T_k 的二阶导数值, 它由下式迭代求解:

$$\begin{aligned} & \frac{h_{k-1}}{h_{k-1}+h_k} M_{k-1} + 2M_k + \frac{h_k}{h_{k-1}+h_k} M_{k+1} \\ = & \frac{6}{h_{k-1}+h_k} \left[\frac{E_{k+1}-E_k}{h_k} - \frac{E_k-E_{k-1}}{h_{k-1}} \right] \end{aligned}$$

令 $M_0 = 0, M_n = 0 \quad k = 1, 2, \dots, n-1$

(2) 若 $n=2$ 时我们采用拉格朗日插值公式进行计算。其公式为:

$$E = \frac{(T - T_1)(T - T_2)}{(T_0 - T_1)(T_0 - T_2)} E_0 + \frac{(T - T_0)(T - T_2)}{(T_1 - T_0)(T_1 - T_2)} E_1 + \frac{(T - T_1)(T - T_0)}{(T_2 - T_1)(T_2 - T_0)} E_2 \quad (1.16)$$

(2) 若 $n=1$ 时, 即只有两个时次的探空记录, 我们则采用线性插值, 其公式为:

$$E = E_0 + \frac{(T - T_0)}{(T_1 - T_0)} (E_1 - E_0) \quad (1.17)$$

采取上述三种插值, 则能充分利用探空资料, 使时间偏差订正更可靠。不过计算的可靠性还与放球的时间间隔有关, 时间间隔过长, 插值的代表性将受影响, 因此一般要求探空时间间隔在 6 小时之内才进行订正。

三、对比分析

为了了解气球漂移对华东中尺度探空网的影响, 我们利用上述方法对中尺度试验实例进行了估算。

此外计算物理量场的方法, 是采用廖洞贤等提出的直接用观测资料进行计算的三角形方法。

表1.4和表1.5分别给出了1983年6月2日07时和1983年5月12日01时五个基本要素漂移偏差订正前后平均绝对误差的垂直分布。由表上看, 随着高度的增加, 要素值的绝对误差是逐渐增大的。这从实际中可以理解。因为高度越高, 气球随风漂移离测站的距离就越远, 时间滞后也越大, 因此要素值偏差也将更大。从数值上看, 根据我们对多个时次资料的计算, 一般来说, 对流层上层风速绝对误差可达1—2米/秒, 温度和露点的绝对误差可达0.5—1℃, 位势高度的绝对误差可达5—35位势米, 而它们的相对误差均在5%以下。这说明在华东中尺度试验中气球漂移对探空基本要素值的偏差是在日常资料误差可允许的范围内。

表1.4 1983年6月2日07时五个基本要素漂移订正前后平均绝对误差的垂直分布

绝对误差 百帕	要素	U	v	T	T _d	H
850		0.18	0.09	0.05	0.14	0.22
700		0.29	0.37	0.03	0.09	0.56
600		0.45	0.28	0.12	0.11	0.78
500		0.39	0.53	0.12	0.08	1.11
400		0.38	0.52	0.13	0.59	2.44
300		0.64	0.49	0.26	0.73	4.78
200		0.92	1.21	0.80	0.67	8.22
100		1.51	1.32	0.93		30.44