

气球测风的比较研究*

廖仿玉
(空军气象学院)

提 要

将120号气球和20号气球所测高空风资料进行比较,发现120号气球测风结果大部分落后20号气球测风结果一个高度差(相位差)。高度差变化在50—500m之间,大部分集中在100—300m之间。本文分析了产生这种现象的一些原因。

一、前言

目前,气象业务工作中使用的高空风资料,主要是用气球探测法获得的。我国目前使用的测风气球,常用的有两种,一是探空测风联合观测用的120号气球(以下简称120号气球);二是20号测风气球(以下简称20号气球)。这两种气球所测高空风资料的差别是气象工作者十分关心的问题。研究表明,气球测风误差主要来自以下一些方面。一是跟踪误差,主要是由地面跟踪系统不能准确测定气球空间位置引起的;二是响应误差,主要是由于气球不能充分响应环境风场引起的;三是扰动随机误差,主要是由大气湍流扰动引起气球位置的随机性产生的。此外,气球的其他动力学特性也会引起测风误差。上述各种误差原因对不同的测风方法和不同的气球,其影响程度是不同的。比较不同气球的测风结果,探讨产生差别的原因,便是本文的目的。为此,我们先对观测资料进行分析比较,然后作初步的讨论。

二、资料的观测和处理

为比较120号气球与20号气球的测风结果,我们从1984年5月起,在本院气象观测场组织了15次联合测风观测。合乎要求的观测有12次。

1. 观测方法

通常,我们选用比较晴好的天气条件作为比较观测的时机。观测前,在701测风雷达附近架设1—2部测风经纬仪。每次观测都以雷达标定参照目标为准,进行经纬仪的调整和定向。

20号气球在120号气球施放前10分钟

充灌氢气。在施放120号气球的同时,将20号气球放出。701雷达和其中一部经纬仪跟踪观测120号气球,另一部经纬仪跟踪观测20号气球。每分钟读取一次气球位置参数。读数时间由雷达报分钟统一报时。观测过程及结束处理,均按《规范》执行。

2. 测风资料的计算

观测记录均按高空风观测《规范》要求进行处理,求出计算层风(量得风层风)。20分钟内,每间隔1分钟为一个计算层;20—40分钟,每间隔2分钟为一个计算层;40分钟后,每间隔4分钟为一个计算层。但为了充分利用观测资料,20分钟后均采用滑动时间间隔进行计算。这样处理既符合不同高度采用不同间隔的规定,又可保证每1分钟记录都有一个计算层风资料。

为讨论方便,将计算层风分解成东西分量 u 和南北分量 v 。由于20号气球升速为200m/分,而120号气球升速不固定,两者求出的资料高度不同。为资料比较上的方便,我们采用三次样条内插值函数对两种测风结果进行内插。从200m高度起,每间隔100m求一组 u 、 v 内插值。结果表明,这种内插法对处理高空风廓线是合适的,不会产生大的失真。

三、资料的比较

按前述方法计算得到的,每间隔100m高度的 u 、 v 分量资料,逐一点绘在计算纸上,便可分别得到120号气球与20号气球

* 陈良栋副教授审阅了本文,张伟星、常洪义等同志提供了观测原始资料,在此致谢。

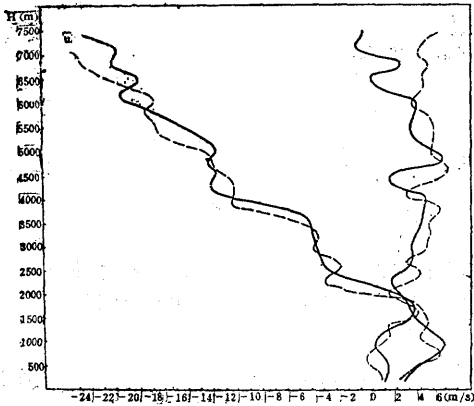


图1 1984年5月18日两种气球测风的u、v廓线比较
实线 表示120号气球所测结果
虚线 表示20号气球所测结果

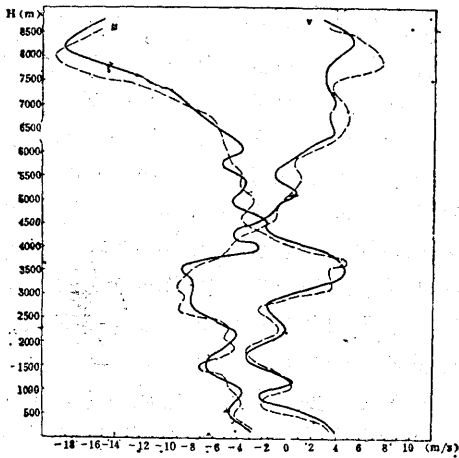


图2 1984年6月12日两种气球测风的u、v廓线比较
实线 表示120号气球所测结果,
虚线 表示20号气球所测结果

所测u、v分量的廓线。图1和图2便是两份典型的资料。

由u、v廓线资料可看出,120号气球与20号气球所测高空风廓线变化趋势和形状是相似的,但120号气球的结果大部分落后于20号气球的结果。为较客观地确定落后的“相位差”,我们将用相似比较法来具体进行计算。其计算方法如下:

设有两组离散样本 X'_{i+k} 和 X_i ($i=1, 2, 3, \dots, n; k>0$)。引入新变量 Y_i ,

$$Y_i = X'_{i+k} - X_i \quad (i=1, 2, 3, \dots, n)$$

则研究样本 X'_{i+k} 与 X_i 的关系,可转化为研究新序列 Y_i 的统计特性。我们将计算 Y_i 的均值 \bar{Y} 和方差 S^2 。

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$$

可以证明,当 $S^2=0$ 时, X'_{i+k} 与 X_i 两组样本变化形状相似。若同时有 $\bar{Y}=0$, 则两组样本相同。若 $S^2 \neq 0$, 则两组样本的形状不完全相似。 S^2 越大,两者越不相似。相反地, S^2 越小,两者越相似。

由此可见,要确定120号气球与20号气球的“相位差”,可用滑动相似比较法来进行计算,即

$$Y_i = X'_{i,j} - X_i \quad (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m)$$

当 $j=0$ 时,表示相同序号上的样本进行

表1 相位差分析结果

观测日期	20号气球观测时间	测风型式	u分量			v分量		
			\bar{Y} (m/s)	S^2 (m/s)	ΔH (m)	\bar{Y} (m/s)	S^2 (m/s)	ΔH (m)
5.18	40'	R-120	-0.1	1.9	200	-1.4	4.3	250
5.31	30'	R-120	0.4	3.5	200	0.3	1.7	200
		T-120	0.3	3.0	200	0.1	1.4	200
6.4	23'	R-120	1.7	7.8	300	-1.3	6.5	500
		T-120	0.0	0.8	200	-0.4	0.4	300
6.5	16'	R-120	2.2	5.1	200	-0.5	2.4	100
		T-120	-0.1	0.4	100	-0.4	0.3	150
6.12	46'	R-120	0.0	1.1	100	-0.4	1.0	100
6.25	19'	R-120	0.3	0.8	100	0.3	0.5	100
6.26	50'	R-120	-0.3	1.9	350	-0.6	2.1	400
		T-120	-0.3	1.8	300	-0.1	1.6	400
6.27	32'	R-120	0.0	0.7	50	-0.2	0.5	250
10.10	33'	R-120	0.8	2.5	150	0.7	1.0	350
10.24	40'	R-120	0.0	2.2	200	-0.1	3.2	200
		T-120	0.0	2.3	300	-0.2	2.3	300
11.7	15	R-120	0.0	0.8	100	0.1	2.2	100
11.16	50	R-120	-0.5	1.5	150	0.1	1.3	100

比较; 当 $j=1$ 时, 表示 X'_j 比 X_j 落后一个序号; 当 $j=2$ 时, 表示 X'_j 比 X_j 落后两个序号。如此一直比较下去, 直到找到一个使 S^2 最小的 j , 这便是 X'_j 与 X_j 的“相位差”。

根据上述方法, 我们设计出程序, 由计算机直接寻找出 120 号气球测风结果落后 20 号气球结果的“相位差”(高度差)。其计算结果如表 1 所示。

表 1 中, \bar{Y} 和 S^2 分别表示滑动比较中出现“最相似”时(即 S^2 最小时), 对应的均值和方差。 ΔH 为“最相似”时的高度差, 即 120 号气球测风落后 20 号气球测风的“相位差”。R-120 号表示雷达观测 120 号气球测风与 20 号气球测风的比较; T-120 号表示经纬仪观测 120 号气球测风结果与 20 号气球测风的比较。

四、结果与讨论

由表 1 可以看出, 无论是 u 分量还是 v 分量, 当滑动比较“最相似”时, 两者对应点上差值的统计均值 \bar{Y} , 虽然有时为正值(120 号气球测风大于 20 号气球测风时), 有时为负值(120 号气球测风小于 20 号气球测风时), 但总体上看, 两者没有明显差别。这表明两种测风气球对风场扰动振幅的响应上, 没有大的差别。但两种气球对风场垂直向扰动的相位测量结果是有明显差别的。120 号气球的测量结果大部分落后 20 号气球的测量结果 ($\Delta H > 0$), 其值变化在 50—500m 之间, 其中 90% 以上在 100—300m 之间。为了探讨产生这种现象的原因, 先作必要的理论分析。

以升速 W_b 在自由大气中上升的球形气球, 其基本运动方程可近似表示为:

$$\begin{cases} m_b \frac{dU_b}{dt} = -\frac{1}{2} \rho C_D S |\bar{V}_a - \bar{V}_b| (U_a - U_b) + m_a \frac{d}{dt} (U_a - U_b) \\ m_b \frac{dW_b}{dt} = -\frac{1}{2} \rho C_D S |\bar{V}_a - \bar{V}_b| (W_a - W_b) + m_a \frac{d}{dt} (W_a - W_b) \end{cases} + (m_a - m_b)g \quad (1)$$

式中, m_b, m_a 分别表示气球系统的质量和气球排开周围同体积大气的质量; \bar{V}_a, \bar{V}_b 分别表示环境风场和气球的速度矢量; U_a, U_b 分别表示环境风场和气球速度的水平分量; W_a, W_b 分别表示环境风场和气球的垂直速度分量; C_D 是阻力系数; S 是气球截面积; ρ 是环境大气密度。

假定气球升速 $W_b \approx$ 常数; 周围大气的垂直速度分量 $W_a \approx 0$; 水平风场的垂直向扰动是随高度 Z 变化的正弦风场, 即

$$U_a = U_0 + u_a \sin(2\pi Z/L) \quad (2)$$

式中, U_0 为风场的恒定部分; u_a 为扰动振幅, L 是垂直扰动波长。

于是, 由 (1) 式可解得,

$$U_b = U_0 + M u_a \sin(\omega t + \delta) \quad (3)$$

其中,

$$M = \left(\frac{1 + \omega^2 T^2 k^2}{1 + \omega^2 T^2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$\delta = \text{tg}^{-1} \left[\frac{(1-k)\omega T}{1 + \omega^2 T^2 k} \right] \quad (5)$$

$$T = \frac{(m_a + m_b) W_b}{(m_a - m_b) g} \quad (6)$$

$$K = \frac{m_a}{m_a + m_b} \quad (7)$$

$$\omega = \frac{2\pi W_b}{L} \quad (8)$$

M 称为响应函数, δ 称为相位角。

为便于分析比较, 用净举力 A , 球皮和附加物重量 B 来进行计算。

假定气球体积为 V , 则

$$m_a = \rho V / g, \quad m_b = \nu V + B$$

ν 是氢气密度。

将 $A = (\rho - \nu)V - B$ 代入上两式, 得到

$$m_a = \frac{A + B}{ng} \quad (9)$$

$$m_b = \frac{(1-n)A+B}{ng} \quad (10)$$

式中 $n = 1 - \frac{\nu}{\rho}$

将(9),(10)式代入(6),(7)式,可得到

$$T = \frac{(2-n)A+2B}{nA} \cdot \frac{W_b}{g} \quad (11)$$

$$K = \frac{A+B}{(2-n)A+2B} \quad (12)$$

将(11),(12)式代入(4),(5)式,并设定20号气球的 $B=35g, A=190g, W_b=200m/分$; 120号气球的 $B=2000g, A=1200g, W_b=400m/分$,我们便可得到两种气球的响应函数 M , 相位角 δ 和相位高度差 ΔH 与垂直波长 L 的关系曲线,如图3所示。

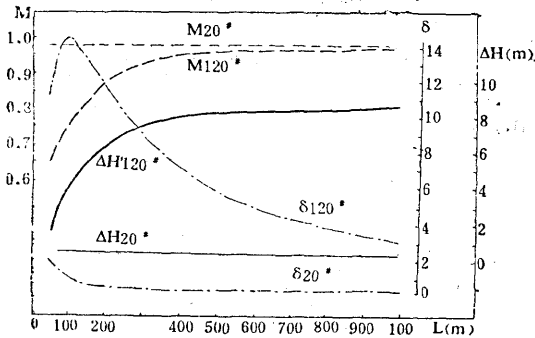


图3 响应函数 M , 相位角 δ , 相位高度差 ΔH 与波长 L 相关图

由图3可见,20号气球对环境风场的响应特性比120号气球好。120号气球对风场

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{1}{t_2-t_1} \int_{t_1}^{t_2} [U_0 + Mu_a \sin(\omega t + \delta)] dt = U_0 + \frac{Mu_a}{\omega(t_2-t_1)} [\cos(\omega t_1 + \delta) - \cos(\omega t_2 + \delta)] \\ &= U_0 + M_0 \sin\left(\frac{2\pi}{L} \cdot \frac{Z_1+Z_2}{2} + \delta\right) \end{aligned} \quad (13)$$

其中,

$$M_0 = \frac{Mu_a}{\omega(t_2-t_1)} \cdot \frac{\sin \omega(t_2-t_1)}{2} \quad (14)$$

为平均风响应函数。 $Z_2 = W_b \cdot T_2$,

振幅的响应函数 M_{120} 在波长 $L > 750m$ 时,才能响应99%;而20号气球的 M_{20} 对波长 $L > 50m$ 的扰动便可达到99%以上。其次是相位落后差别大。20号气球对各种波长的扰动,其相位落后均小于1m;而120号气球对 $L < 300m$ 的扰动,相位落后是随波长 L 增大而增大的;对 $L > 300m$ 的扰动,其相位落后几乎保持在8m左右。由此可见,在一定假设条件下,理论得出120号气球测风结果比20号气球测风结果,通常落后8m左右。这个结论与实际测量结果相差较大,其原因可分析为:

1. 风场垂直向扰动并非正弦扰动。由图1、图2可见,风场的垂直向扰动是相当复杂的。既非正弦扰动,也非单一波长扰动。在垂直向正弦扰动风场假设下推出的结果虽具有一定的意义,但不符合实际情况。

2. 探空气球系统并非正圆球体。120号气球携带的探空仪系统重量相当于整个系统重量的一半,且中间用长约12m的绳子相连,气球上升过程中,探空仪又作不规则的绕动。这些都大大增加了气球探测系统的响应滞后。这与理论分析中的假设相差甚远。相反地,20号气球可近似满足假设,这使得两种气球测量到的风场差别扩大了。这可能是影响理论分析结果的重要原因之一。

3. 高空风观测中,由于某一高度上的风是用两个不同高度间气球的水平位移来计算的,当气球高度测量中存在误差时,也会引起相位的变化。

如果取样间隔为 t ($t = t_2 - t_1$),则在 t 间隔上,由气球水平位移算出的平均风,可由(3)式积分得到,

$Z_1 = W_b \cdot T_1$ 为气球在 t_2 和 t_1 时刻的高度。

将(13)式与(3)式作比较,可清楚地看出:

如果 $\frac{Z_1 + Z_2}{2} > Z$ (Z 是假定气球要上

升到的高度), 表示气球实际升速大于预定升速, 则观测到的风场比实际风场超前一个相位, 即会将较高处观测到的风作为较低处的风。

如果 $\frac{Z_1 + Z_2}{2} < Z$, 表示气球实际升速

小于预定升速, 则观测到的风场比实际风场落后一个相位, 即会将较低处观测到的风作为较高处的风。

120号气球的上升高度是用雷达直接测量到的, 或是从探空得到的时间-高度曲线上查到的。尽管存在着测量误差, 但一般地说, 气球高度的测量误差是随机误差, 从统计平均上看, 还是有相当的准确性和可靠性的。但20号气球的高度是假定气球匀速上升 ($W_b = 200\text{m/分}$) 求得的, 可靠性便差得多。有关研究资料表明, 在2km以下的边界层中, 由于受大气湍流的影响, 气球实际升速往往比预定升速高10—30%。若比气球实际升速高20%左右, 则5分钟后气球实际高度比计算高度超出200m左右。由(13)式和(3)式可见, 这时观测到的风场将比实际风场提前200m左右。但120号气球的高度是实测的, 两者相比就会出现120号气球测风结果落后20号气球结果约200m的现象。

表2的资料是从两种气球测风廓线直观比较中得到的最大相位差 ΔH_{\max} , 最小相位差 ΔH_{\min} 及其出现的对应高度。表2资料表明, 同一次比较观测中, 最小相位差 ΔH_{\min} 总是出现在较低层; 最大相位差 ΔH_{\max} 总是出现在较高层。这是因为气球的高度误差受升速误差影响有累积作用。当20号气球实际升速大于预定升速时, 越到高层, 高度误差越大, 120号气球测风结果落后20号

表2 最大相位差、最小相位差及其出现的高度(m)

观测日期	u 分量				v 分量			
	ΔH_{\min}	H_1	ΔH_{\max}	H_2	ΔH_{\min}	H_1	ΔH_{\max}	H_2
5.18	200	900	400	6500	250	2000	500	6090
5.31	100	700	600	5500	200	400	400	3500
6.4	200	600	350	1000	300	600	400	2300
6.5	0	1000	250	2300	0	500	150	2500
6.12	100	700	350	8500	250	800	400	7800
6.25	200	1000	250	1700	150	500	200	3700
6.26	300	750	700	8000	0	750	450	3500
6.27	0	800	250	2500	100	500	400	3000
10.10	0	1700	550	6000	0	1200	600	5800
10.24	150	2000	400	3000	100	4000	600	7000
11.7	0	800	100	2300	100	500	250	2400
11.26	300	750	700	8000	0	750	450	3500

气球测风也就越大。

为提高气球测风的精度, 对120号气球来说, 应当减少系统的重量(特别是探空仪的重量), 改善探测系统的结构, 以便减少响应误差。对20号气球来说, 应当研究其升速变化规律, 寻求更适合我国的气球升速公式。特别是阻力系数, 我们一直沿用苏联早期的研究结果。是否适合于我国, 是否全国都能通用, 都是值得研究的。有关这方面的工作, 有待进一步研究。

参考文献

- [1] G. H. Fichtl, Aerodynamic properties of spherical balloon wind sensors. *J. Appl. Meteor.*, 11 (3), 1972.
- [2] G. D. Nastrom & T. E. Vangandt, An analytical study of nonlinear responses of rising balloons to horizontal winds. *J. Appl. Meteor.*, 21 (3), 1982.
- [3] W. H. Jaspersen, The limiting accuracy of wind profiles obtain by tracking rising balloons. *J. Appl. Meteor.*, 21 (6), 1982.
- [4] 张巨洪等, 《BASIC语言程序库》, 清华大学出版社, 1983年。

A comparison between wind measurements by balloons

Liao Fangyu

(Air Force Meteorological Institute)

Abstract

Compared with the upper winds measured by 20* balloon, most of the upper winds measured by 120* balloon are found to lag behind in height deviation (phase deviation). The height deviation varies from 50m to 500m, most of them from 100m to 300m. Some reasons of the height deviation caused by balloons are discussed.