

利用平移气球探测北京上空晴空大气垂直扰动*

严开伟 游来光 景荣林 李国杰

(北京大学地球物理系)

利用平移气球(或称等高气球或等压面气球)观测大气运动轨迹以及沿轨迹气象要素的分布,具有独特优点,因此在气象工作中的应用已日益广泛。目前所用的平移气球大致有两种。一种较大^[1],一般用于对流层上层和平流层,主要探测大尺度气流特征^[2-6];另一种较小,用于对流层中、低层^[6,7]。1956年我们进行了平移气球观测试验。本文将介绍我们所用气球的性能,并根据1957年和1958年观测资料对北京及附近地区对流层中下层晴天扰动进行初步分析。

一、平移气球性能

1. 平移气球结构

我们所用的平衡气球与 Gerbier 等所用的很相似^[8],大小亦接近,为350克常用探空气球,外覆绸罩,呈圆形,直径在二米左右。为了减少氦气渗漏对总举力的影响,采取了超压措施。气球在地面即保持超压,并装有简单超压控制器。一方面保证在上升过程中具有足够的泄气率,避免气球爆破。另一方面保证气球到达平衡高度后,能维持预定的超压值。为此,我们进行了下面的实验。

(1)气球临界超压 超压大于临界值后,绸罩可能爆破。对于所用之绸罩,临界超压值 b_c 与临界半径 R_c 之间的关系约为:

$$b_c = \frac{7}{R_c}, \quad (1)$$

式中 R_c 的单位为米, b_c 为水银柱高度,单位为厘米。

(2)超压控制器 超压控制器如图1,由玻璃管制成。a为橡皮塞,在灌氦时紧合在气球口上。曲管下端盛有水银,在e处有泄气支管。当球内气压大于球外大气压时,d管水银上升而f端水银将降至e处,且迫使支管内水银升至c处外泄,而氦也不断排出。根据试验,由于支管内水银加在d端,水银有重新堵塞e处支管口现象,因而泄气过程不稳定。为了减少f端的迅速回升,在管的底部加有纸卷,当d端上升时,水银不致迅速回流到f端。实验表明,这种措施大大改进泄氦率的稳定性。额定超压值h可通过调整管内水银量来完成。b为灌气口,充氦完毕后即封牢。

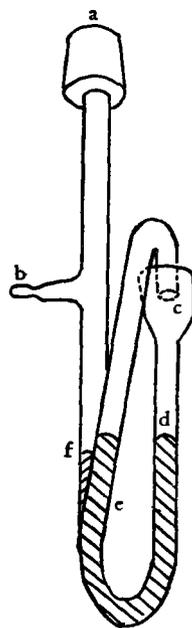


图1 超压控制器示意图

* 本文于1964年4月7日收到,于1965年7月28日收到第一次修改稿。

(3) 減速压舱物¹⁾ 在一定超压下, 上述装置的支管泄气率是一定的, 最大泄气率为临界超压情况下的泄气率, 其值由实验决定。为了使气球在低层的超压值保证在临界值以下, 气球的升速不宜太大。为此气球携带有压舱物, 在上升过程中压舱物逐渐泄漏, 至适当高度即泄漏完毕。早期实验中用水银作压舱物, 后改为干沙。压舱物的量, 以容器的泄漏速度及临界超压情况下支管的泄气率决定。

2. 平移气球的特性

平移气球实际是准等容气球。由于所使用的气球罩受湿度影响有涨缩, 此外罩也有弹性, 内外压差如有改变, 球容积也有变化。令 V, H, b 分别表示容积、相对湿度和超压值, 则容积随时间的变化为:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\partial V}{\partial H} \frac{\Delta H}{\Delta t} + \frac{\partial V}{\partial b} \frac{\Delta b}{\Delta t} \tag{2}$$

为此我们进行了下面的实验。

(1) V 与 H 间的关系 通常有机物质的长度随相对湿度变化符合于对数规律。很自然地作者先假定所用的球罩也符合对数规律, 然后用实验验证。

当容积随相对湿度变化适应对数规律时, 则下列关系成立:

$$n \ln H = \frac{\Delta V_H}{\Delta V_{100}} \tag{3}$$

式中 $\Delta V_H = V_H - V_0, \Delta V_{100} = V_{100} - V_0$ 。 V_H, V_{100}, V_0 分别是相对湿度为 $H, 100, 0$ 时的气球容积。

如令 $\Delta V_{100} = mV_{100}$, 则得:

$$\ln \frac{H_1}{H_2} = \frac{1}{qV_{100}} (\Delta V_{H_1} - \Delta V_{H_2}) = \frac{1}{qV_{100}} (V_{H_1} - V_{H_2}) \tag{4}$$

式中 $q = nm$, 为实验常数, 对于每一个气球 qV_{100} 具有固定值。在半径对数坐标里, H 用对数尺度, $(\Delta V_{100} - \Delta V_H)/qV_{100}$ 用线性尺度, 则两者关系为一直线。图 2a 为实验结果,

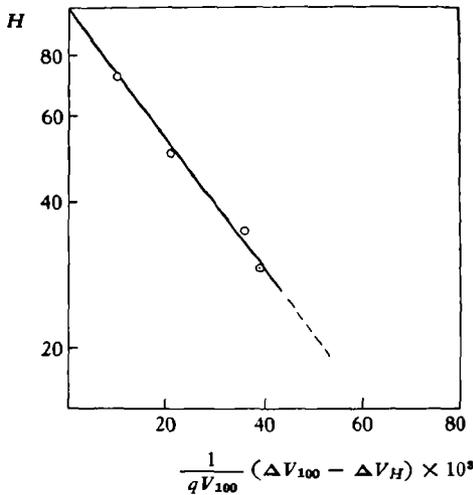


图 2a $(\Delta V_{100} - \Delta V_H)/qV_{100}$ 与 H 间的关系

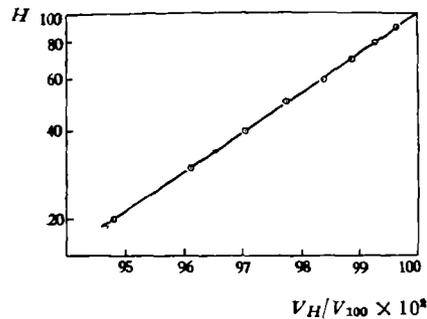


图 2b V_H/V_{100} 与 H 间的关系

1) 也可以根据预定高度, 使球在地面部分充气而不用減速压舱物。

显然符合对数规律。为了便于对不同容积气球进行湿度影响的订正, 在单对数坐标里给出 H 与 V_H/V_{100} 的关系, 如图 2b。

(2) 容积与超压间的关系 在不同超压下测定对应的容积。在线性坐标上给出 $\log V$ 与 $\log b$ 的关系, 结果很接近于直线。如图 3 所示, V 与 b 之间的关系符合

$$\frac{V}{V_1} = \left(\frac{b}{b_1}\right)^\varepsilon, \quad (5)$$

式中 $\varepsilon = 1.3 \times 10^{-2}$ 。

实际上 b 受三个主要因子影响, 即球内气温、氢的渗漏和外界气压。下面分别讨论这三个因子。

1) 氢的渗漏对 b 的影响 在外界气压及气温较平稳的情况下, 测定超压随时间的变化。对于容积较小的 3550 公升气球, 实验结果如图 4。开始 b 值为 2.45 厘米水银柱, 150 分钟后 b 值降低了 0.55 厘米。由图 3 所示关系, 气球容积减小 10 公升左右, 即容积减小 $1/350$ 。如果平移高度在 700 毫巴左右, 上述 b 值的减少将导致平移高度下降约 2 毫巴, 平移高度愈高则影响愈小。

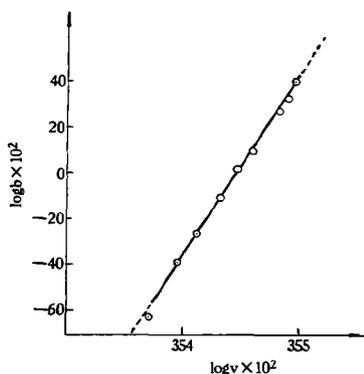


图 3 b (水银柱高度; 厘米) 与 v (立升) 间的关系

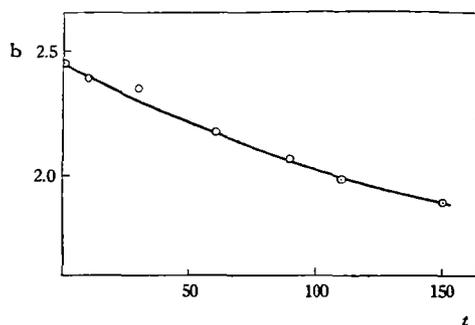


图 4 b (厘米水银柱) 与 t (分) 间的关系

实验还表明, 开始的 b 值愈小, 则 b 值下降也愈缓慢 (图 4 未列出 150 分钟以后结果)。

实测记录表明, 气球在平移过程中不断上下运动, 只在气球轨迹最高点上的超压才为地面预定的数值, 在平均高度上要低于预定值。这个值可根据预定的 b 值及轨迹最高处的大气压, 利用后面讨论的(11)式来求出。为了促使气球能适应较大的垂直扰动振幅, 初压宜大。但为了使 b 下降缓慢, 初值不宜过大。较合适的 b 初值, 可根据天气条件予以估计。大气扰动较强烈时, b 值可取大一点; 大气扰动较弱时, 可取小一点。

2) 球内气温对 b 的影响 球内气温受球内壁温度影响, 主要通过分子导热, 随内壁温度变化而变化。球内气温每改变 1°C , 内压约改变 $1/270$ 。如果内压为 540 毫巴, b 的改变约为 2 毫巴。平移高度愈低, 则影响愈大。在地面球内气温改变 1°C , b 值变化则接近 4 毫巴。

由于所使用的球罩为洁白色, 有较强的反射率, 在晴朗少云天气, 10—15 时之间 (本文观测主要在这段时间内), 球内平均温度不致有明显的持续增减。

云和通风在短时间里的差异,可能使球壁温度涨落,但球内气温振幅要小得多。球外表各部分温度涨落情况很可能不一致,向阳面可能稍大,背阳面较小。假定总的效果相当于整个内壁具有振幅为 5°C , 周期小于 10 分钟的正弦变化。那么球内平均温度涨落不大于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

3) 外界气压变化对容积的影响 随着气球的高度起伏, b 也有起伏。设外压由 p_0 变至 p , 内压由 p'_0 及 b_0 改变至 p' 及 b , 令

$$\Delta p = p - p_0, \quad \Delta p' = p' - p'_0, \quad \Delta b = b - b_0$$

由于 $p + b = p'$, 故

$$\Delta p' = \Delta p + \Delta b. \quad (6)$$

由公式(5)知

$$\Delta b = \frac{b}{V\varepsilon} \Delta V, \quad (7)$$

因而

$$\Delta p' = \Delta p + \frac{b}{V\varepsilon} \Delta V. \quad (8)$$

当球内的气温变化较小时,可忽略温度影响,由波义耳-马略特定律有:

$$\Delta p' = -\frac{C_0}{V^2} \Delta V, \quad (9)$$

代入(8)式得到:

$$-\Delta p = \left(\frac{C_0}{V^2} + \frac{b}{V\varepsilon} \right) \Delta V, \quad (10)$$

此式表示了外压对容积的影响。

3. 平移高度的计算

平移高度 p_0 与容积 V_0 之间有下列关系:

$$V_0 = M \left[\rho_s \frac{p_0 T_s}{\rho_s T_0} - \rho_{H_s} \frac{(p_0 + b_0) T_s}{(\rho_s + b_0) T_0} \right]^{-1}, \quad (11)$$

式中 ρ 及 ρ_H 为空气及氦的密度, 附标 s 表示地面数值, 附标 0 表示平均平衡高度上的数值。如果企图使球在预定高度 p_0 上移动, 可根据气象台探空资料, 调证 M 使符合(11)式。高空湿度与地面差别较大时, 尚需对 V 进行湿度订正。表 1 列举了 5 次计算平移高度与实测平移高度(根据气压讯号的平均值), 两者相当接近。

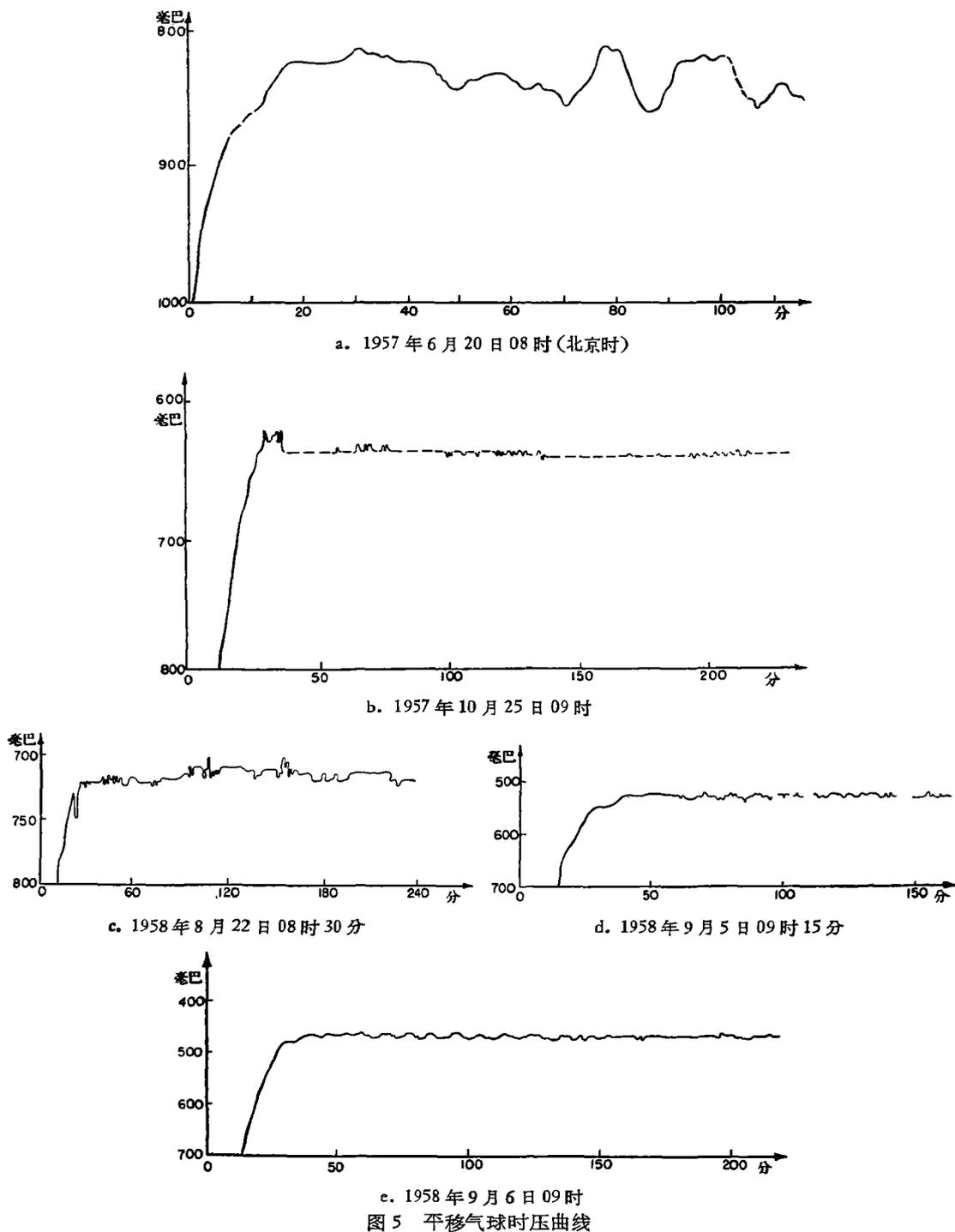
表 1

施放日期	实测高度(毫巴)	计算的平移高度(毫巴)	
		未经湿度订正	经湿度订正
1957年6月20日	835	835	841
1957年10月25日	631	630	
1958年8月22日	718	715	
1958年9月5日	528	542	
1958年9月6日	465	441	

4. 实际施放结果

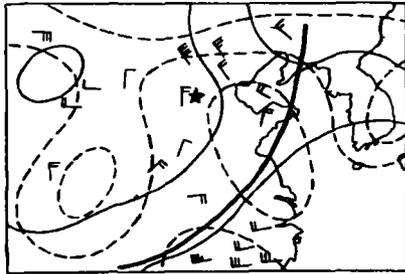
在气球下方 30 米处携带 H-50 型探空仪, 探测气压、气温和湿度。目测及经纬仪观

测皆表明上升极为平稳, 毫无自由气球常有的摇摆旋转及抖动现象。因而讯号可靠程度似应接近实验室检定水平。图 5 为对应表 1 的 5 次气压记录。图 6 为接近平移高度的等压面形势图。除 1957 年 6 月 20 日由于讯号突然中断, 和 1957 年 10 月 25 日气球平移 6



小时后突然下降外,其余 3 次系经过 3—4 小时后放弃接收讯号。

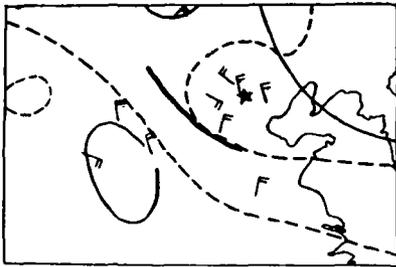
所有气球施放后皆回收检查,除 1957 年 10 月 25 日气球及罩爆破外,其余 4 次不仅球罩完整,且罩内 350 克气球虽经拾者压挤氦外泄,仍无损伤,探空仪也很完整。根据气



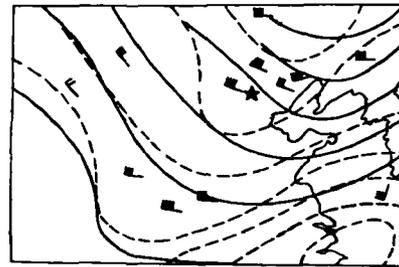
a. 1957年6月20日08时850毫巴形势图



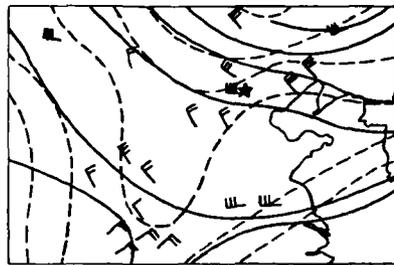
b. 1957年10月25日08时700毫巴形势图



c. 1958年8月22日08时700毫巴形势图



d. 1958年9月5日08时500毫巴形势图



e. 1958年9月6日08时500毫巴形势图

图6 接近平移高度的等压面天气图

球性质,对于下沉气流,气球性能不受影响;但上升气流过强,气球超过平衡高度过多,将有大量氦通过超压控制器外泄,使总举力大大下降。一旦上升气流减弱,气球将下沉至地面。根据拾者来信,所有气球都是在 12 小时内降落至地面的,而探空讯号表明至少前 4 小时内平移性能良好。考虑上述事实及前述地面试验结果,很可能有一部分气球的下降是受较突然的强烈上升气流所致。

气球平移距离实际上受风速支配,表 1 中所列 5 次观测,气球到达位置北至昌平以北,东到塘沽,东南到达山东省北部。飞行距离在 100—200 公里,高度在 850—400 毫巴之间。

平移高度的系统性变化不明显,但细致分析气压记录,还是存在变化的。表 2 列举分析结果,高度变化用气压单位表示,负值时高度增加,正值时减少。表中列出平移高度

表 2

施 放 日 期	时 间 (北 京 时)	高 度 变 化 (毫 巴)	风 向	风 速 (米/秒)
1957 年 6 月 20 日	08:35—10:15	+10	33	14
1957 年 10 月 25 日	09:30—15:20	+ 8	18	7
1958 年 8 月 22 日	09:00—10:30	-10	多 变	4
	10:30—12:30	+10		
1958 年 9 月 5 日	09:40—11:10	- 3	31	12
	11:10—	不 清 楚		
1958 年 9 月 6 日	09:30—10:50	+ 2	30	13
	10:50—12:30	- 2		

上的风向风速, 风向用 36 方位表示。从表 2 看来, 高度变化与氫的泄漏及日高角的关系不明显。由于缺乏沿轨迹云的记录, 难以断定云的影响。1957 年 10 月 25 日和 1958 年 9 月 6 日沿轨迹云量似应小于 1 (我们观测为 0), 而两次高度变化性质不同, 有可能系统性高度变化, 在一定程度上与尺度为 10^2 千米范围内的垂直气流有关。

平移过程中, 气球高度不断地迅速涨落, 明显的周期大致在 10—20 分钟之间, 除 1957 年 6 月 20 日振幅接近 50 毫巴外, 其它一般不超过 20 毫巴。所用的气球自振周期约为 2.5 分钟, 且阻尼强, 振幅衰减很快。如前所述, 云对小周期涨落影响不大, 显然自振与云都不是引起周期性振动的主要因子。由此, 我们认为高度涨落主要是受扰动流支配, 从这个观点出发, 我们进行了晴天大气垂直扰动的分析。

二、北京地区对流层中下层晴天大气垂直扰动分量初步分析

1. 计算脉动速度的方法

由于垂直气流影响, 气球高度有涨落。气球运动方程为:

$$M \frac{d^2 s}{dt^2} = L(s) + \frac{1}{2} \rho C_D A \left(\omega_a - \frac{ds}{dt} \right) \left| \omega_a - \frac{ds}{dt} \right|, \quad (12)$$

式中 M 为球与携带物的总质量, s 为球与平衡高度之间的距离 (向上为正), $L(s)$ 为球的净举力 (为 s 的函数), C_D 为球的比抗阻, ω_a 为空气垂直运动速度, A 为球的最大截面积。

(12) 式中 M , A 和 ρ 皆为已知量。确定 $L(s)$, C_D , s , $\frac{ds}{dt}$ 和 $\frac{d^2 s}{dt^2}$ 以后, 就可以利用 (13) 式计算出垂直气流速度分量 ω_a 。下面将对这几个量进行讨论。

(1) 净举力 $L(s)$ 当气球位置与平衡位置有偏离时, 容积变化符合 (10) 式规律。由 (10) 式推算不同脉动高度上容积 V , 可采用逐次迭代法。令平衡高度上的容积为 V_0 , 超压为 b_0 , 并假定 $\Delta p = 1$ 毫巴, 则可由下式求出对应的 ΔV_1 ,

$$\pm 1 = \mp \left(\frac{C_0}{V_0^2} + \frac{b_0}{V_0 \epsilon} \right) \Delta V_1. \quad (13)$$

又令 $V_1 = V_0 \pm \Delta V_1$, 并由图 4 求出 V_1 对应的超压 b_1 。然后用 V_1 和 b_1 代替 (13) 式的 V_0 和 b_0 , 计算出 ΔV_2 。用这种办法迭代 x 次, 可求出 $\Delta p = x$ 毫巴时气球容积 V , 进而由下式计算 L :

$$L = [V(\rho - \rho_H) - M]g, \quad (14)$$

作出 $L(r)$ 与 r 的关系曲线。实际计算表明当 $|\Delta p| < 10$ 毫巴时, $L(r) \approx -kr$, k 为系数, 由 V_0 及平衡高度上的气压决定。因此当 $|\Delta p| < 10$ 毫巴时, 可用 $\pm \Delta p$ 代替(13)式左端的 ± 1 求出 ΔV , 再进一步求 k 。当 $|\Delta p| > 10$ 毫巴时, 仍需进行迭代, 但可用 ± 5 毫巴代替(13)左端 ± 1 毫巴。

(2) 比抗阻 C_D 利用已知容积的气球, 测定不同净举力的升速 ω , 通过下式求 C_D :

$$L = \frac{1}{2} C_D \rho A \omega^2. \quad (15)$$

1956 年于北京清华大学礼堂¹⁾用直径为 2 米的球进行实验。结果如图 7 中线 I 和 0 号所示。当雷诺数 $Re < 1.5 \times 10^5$ 时, 处于近临界区, C_D 的平均值约为 0.56。考虑到近临界处的 C_D 值对 ω_s 的计算具有较大意义, 1963 年 5 月又在北京大学礼堂重复一次实验。

图 7 中虚线 II 和 Δ 号为实验结果, 近临界区 C_D 平均值接近 0.45。图 7 中还列举今井一郎^[9]和 Galcit 的自由气球结果(线 IV 和 III), 以资比较。

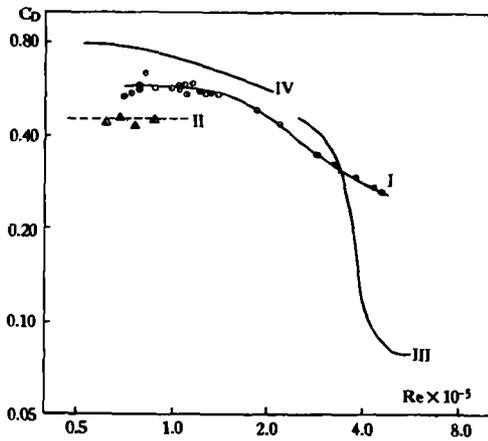


图 7 平移气球比抗阻 C_D 与雷诺数 Re 的关系
I. 1957 年平移气球结果,
II. 1963 年平移气球结果,
III. Galcit (1933) 自由气球结果,
IV. 今井一郎自由气球结果

根据计算, 本文所讨论的各例, 取 $C_D = 0.45$, Re 皆小于 1.5×10^5 。由(13)式可看出, C_D 在 0.45 ± 0.1 的范围内, 计算出 $\omega_s - \frac{ds}{dt}$ 的偏差一般不超过 $\pm 10\%$ 。仅当 $\frac{ds}{dt}$ 接近 $\left[2 \left(\frac{d^2S}{dt^2} + kS \right) / C_D \rho A \right]^{\frac{1}{2}}$ 时, C_D 值对 ω_s 的计算值有较大的影响, 但在这种情况下, $|\omega_s|$ 一般较小。实例计算结果也表明, 取 $C_D = 0.45$, 抑或 $C_D = 0.56$, 计算的 ω_s 一般说来差别小于 10% 。本文计算 ω_s 时, C_D 采用 0.45。

(3) S , $\frac{dS}{dt}$ 和 $\frac{d^2S}{dt^2}$ 的推求。根据接收

到的气压讯号先作出 $p-t$ 线, 经过光滑, 转换成 $S-t$ 线, 从线上每隔半分钟读出 S 值。根据每相邻半分钟的两读数的差值, 作出 $\frac{\Delta S}{\Delta t}-t$ 光滑线。再从 $\frac{\Delta S}{\Delta t}-t$ 曲线上每隔半分钟读出 $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ 值, 根据相邻半分钟的两读数的差值作出 $\frac{\Delta^2 S}{\Delta t^2}-t$ 的光滑曲线。计算任意时刻的 ω_s 时, 可从光滑线上得到对应的 S , $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ 和 $\frac{\Delta^2 S}{\Delta t^2}$, 用 $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ 和 $\frac{\Delta^2 S}{\Delta t^2}$ 代替 $\frac{dS}{dt}$ 和 $\frac{d^2S}{dt^2}$ 。

根据实例, 光滑 $p-t$ 线时, 在气球处于相对最高及最低位置时, 容易产生主观性偏差。由于气压误差为 ± 1.3 毫巴左右, 造成球达到相对最高或最低位置后, 往往气压讯号

1) 这次实验是董保军进行的。

在 1—3 分钟内维持不变。如果气压果真不变, 则意味着 $\frac{dS}{dt}$ 和 $\frac{d^2S}{dt^2}$ 为零, 但光滑 $p-t$ 线时, $\frac{dS}{dt}$ 和 $\frac{d^2S}{dt^2}$ 不一定为零。为了了解光滑后的 $p-t$ 线对计算结果的影响, 我们分别用 (13) 式及 (15) 计算相对最高或最低位置的 ω_a 。结果表明两种方法的偏差不超过 20%。应当指出, $|\omega_a|$ 的极值并非出现在相对最高或最低点, 而光滑 $p-t$ 线对 $|\omega_a|$ 极值及 $\sqrt{\omega_a^2}$ 的影响不大, 因此可以认为利用光滑后的 $p-t$ 线所得到的 ω_a 有一定的正确性。

2. 北京地区对流层中下层晴天大气垂直扰动概况

根据表 1 所列 5 次观测结果, 除 1957 年 10 月 25 日由于讯号故障未能计算垂直速度外, 其它四次按 (12) 式计算了垂直扰动速度。表 3 列出了垂直扰动速度极值及 $\sqrt{\omega_a^2}$ 。

表 3

日 期	平 移 高 度 (毫 巴)	向上垂直扰动速度极值 (米/秒)	向下垂直扰动速度极值 (米/秒)	$\sqrt{\omega_a^2}$ (米/秒)
1957 年 6 月 20 日	835	2.0	-1.7	1.0
1958 年 8 月 22 日	718	3.3	-1.5	1.3
1958 年 9 月 5 日	528	1.7	-1.2	1.3
1958 年 9 月 6 日	465	1.8	-1.3	0.7

从图 5 可以看出, 北京地区上空有周期性波动现象。在 1957 年 6 月 20 日, 1958 年 9 月 5 日和 1958 年 9 月 6 日 3 次西北气流情况下, 尤为明显。北京处于燕山之麓(观测地点西和西北方向距山区不过 10—20 千米), 有重力波的可能。通常重力波周期 β_g 可由下列公式确定,

$$\beta_g = 2\pi \left(\frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

式中 θ 为位温。表 4 为西北气流情况下的 3 次实测周期, 与由 (15) 式计算的周期。显然 1958 年 9 月 5 日和 1958 年 9 月 6 日两次实测值与计算值很接近。1957 年 6 月 20 日则相差较多。

表 4

日 期	实测周期(分)	计算周期(分)
1957 年 6 月 20 日	18	11.5
1958 年 9 月 5 日	10	12
1958 年 9 月 6 日	9.5	10.5

当压舱物泄漏完毕后, 从气球升速随时间的变化, 可以了解平衡高度以下大气垂直扰动速度。图 8 为 1958 年 9 月 5 日的例子, 从图中可以看出, 700 毫巴以上周期性升速变化很明显。周期为 12 分钟左右, 与重力波周期理论值一致。700 毫巴以下压舱物未泄漏完, 不便分析。同样 1958 年 9 月 6 日 700 毫巴以上周期性升速变化也很清楚, 约为 12 分钟, 也接近理论值。1957 年 6 月 20 日似乎也存在周期性

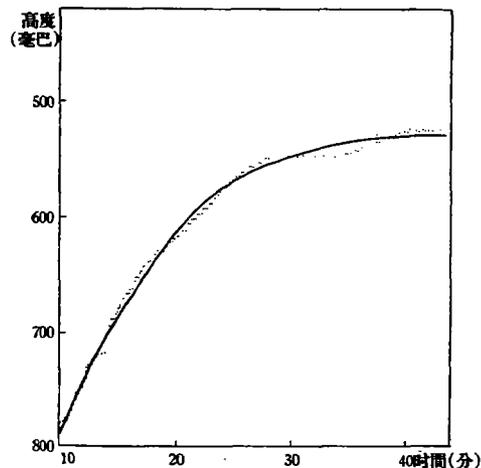


图 8 1958 年 9 月 5 日气压讯号的时间曲线
(—— 气压讯号, —— 平滑后的时压线)

升速变化,但由于平衡高度过低,不足 20 分钟气球即到达平衡高度,难以具体肯定。

由于实测周期与重力波理论周期符合得较好,至少说明北京地区上空在西北气流情况下,相当厚的气层内存在重力波现象。

当垂直速度随时间呈周期性变化时,空气块轨迹也在垂直方向上呈周期性振动。若气块轨迹的振幅超过气球的振幅不多,可以近似假定气块的垂直速度接近平移气球所反映的数值,则气块在垂直方向的位移为:

$$z(\tau) = \int_{\tau_0}^{\tau} \omega_a(t) dt, \quad (16)$$

式中 τ_0 为气球处于平均平移高度上的任意时刻。图 9 为 1958 年 9 月 6 日的例子,虚线为 ω_a ,实线为 $z(\tau)$,两者皆呈明显的周期涨落。1957 年 6 月 20 日的振幅较大(图 10),接近 600 米。其它各次的振幅在 200—300 米左右。

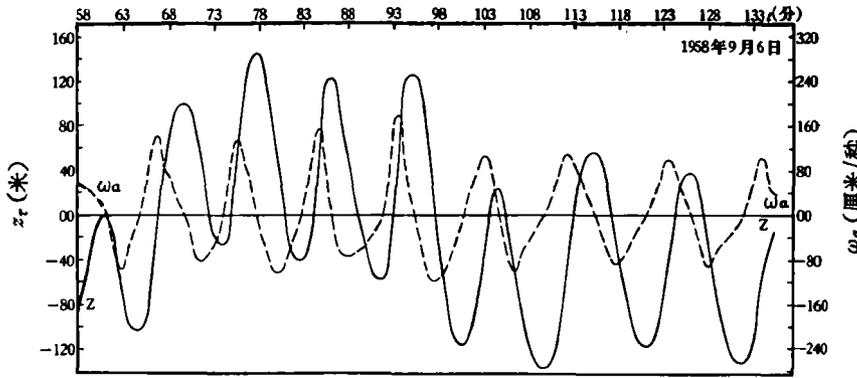


图 9 1958 年 9 月 6 日 ω_a (厘米/秒)的时间曲线和气块位移的时间曲线 (横坐标为时间)

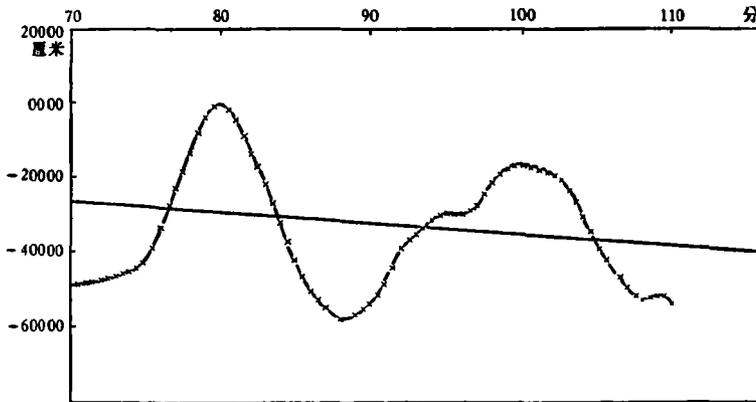


图 10 1957 年 8 月 20 日气块高度随时间的变化

当气块沿垂直方向运动时,气块温度也有变化,因而气球内外的温差也有相应的影响。假定气块绝热变温,则对于所讨论的记录,任意高度上的气温涨落不大于 1°C (计算时大气递减率用自由气球探测结果)。考虑到气球上下运动时,球内气温也有改变,能部分抵消气块绝热变化对气球浮力的影响,因而在计算 ω_a 时可以忽略不计。

前面已提到过, 气球高度还存在系统性变化, 对应这种变化, 垂直气流应存在较长周期的涨落现象。由于目前的记录不够长, 仅能大略地估计周期大于 2 小时, 至于涨落现象的性质尚有待进一步研究。

另外, 冷锋过境后, 往往有系统性下降气流, 1957 年 8 月 20 日为冷锋后的情况, 图 5a 表明下沉气流随时间增加 (亦即与山区之间的距离增加而增加)。由于平均平移高度已受平均垂直气流的影响, 而后者是不能从几小时内的平移记录得到的, 因而下沉气流强度无从判断。图 10 中直线为气块高度的平均变化近似情况, 由此计算出仅由于 ω_0 随时间的系统性变化, 气块的平均下沉速度约达 3 厘米/秒。

本文承蒙张钧同志协助观测并提供意见, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] Master, H. D. and Andersen, A. D., *Weatherwise*, 7 (1954), 79—81.
- [2] Neiburger, M. and Angell, J. K., *J. Meteor.*, 13 (1956), 166—194.
- [3] Angell, J. K., *Mon. Wea. Rev. Wash.*, 87 (1959), 427—439.
- [4] Angell, J. K., *J. Meteor.*, 15 (1958), 522—530.
- [5] Angell, J. K., *J. Meteor.*, 17 (1960), 20—35.
- [6] Dorst, C. S. and Gibbert, G. H., *Roy. Meteor. Soc.*, 76 (1950), 75—86.
- [7] Angell, J. K. and Pack, D. H., *Mon. Wea. Rev. Wash.*, 88 (1960), 235—247.
- [8] Gerbier, N. and Berenger, M., *Roy. Meteor. Soc.*, 87 (1961), 13—23.
- [9] 今井一郎, 气象集志, 第二辑, 1954 年, 183—191.

OBSERVING CLEAR AIR TURBULENCE OVER PEKING BY MEANS OF CONSTANT LEVEL BALLOON

YEN KAI-WAI YOU LAI-KUANG JEN YUNG-LIN
AND LEE KUO-JIE
(Peking University)

ABSTRACT

The constant level balloons used by the authors were rubber balloons enclosed in silk envelopes of about 200 cm in diameter. Various properties of such a kind of constant level balloons were studied. Experimental results in the laboratory and upper air sounding data show that they are suitable for the purpose of studying clear air turbulence in the lower and middle troposphere.

Five flights in the year of 1957—1958 were analysed. It seems that there exists pronounced gravity wave in deep layer of air over Peking when Peking is in the lee ward side of Yan Mountain range, i.e. the general air current is from around West-Northwest. There are also some evidences for a vertical motion's periodicity of period longer than two hours.