

温度微结构的高空气球观测*

曾宗泳 张骏 翁宁泉 龚知本**

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要 本文给出了在河北省香河县的一次高空气球垂直探测大气温度起伏的主要结果。由气球吊篮上端同一水平线上三个钨丝温度计测量的温度起伏计算出不同水平和垂直距离的湍流结构常数。结果表明: 大气在大于 0.33~1.07 m 的范围满足 Kolmogorov 的 2/3 定律, 垂直方向温度谱分析表明-5/3 幂率区可达 20 m 以上。文章还讨论了小尺度湍流的各向同性问题。

关键词 高空气球 光学湍流 各向同性 外尺度

1 引言

近年来, 高分辨率天文观测以及自适应光学的发展, 各种探测整层大气光学湍流的手段, 包括飞机、雷达、星光闪烁和到达角起伏以及温度脉动探空等都得到了较大的发展。它们的基础都建立在 Kolmogorov 均匀各向同性湍流理论上。这个理论假定, 对于充分发展的湍流, 在局地均匀各向同性的条件下, 空间两点 s_1 、 s_2 的温度(或折射率)差的平方之系综平均, 即温度结构函数满足如下关系^[1]:

$$\langle (T(s_1) - T(s_2))^2 \rangle = D_T(r),$$

当 $l_0 \ll r \ll L_0$ 时有

$$D_T(r) = C_T^2 r^{2/3}, \quad (1)$$

r 为空间两点的距离, C_T^2 为温度结构常数, 它表征湍流强度, l_0 为内尺度, L_0 为外尺度。式(1)即是所谓 2/3 定律, 可写成功率谱的形式^[2]:

$$S_T(\kappa) = 0.25 C_T^2 \kappa^{(-5/3)}, \quad (2)$$

κ 为波数。

在近地面不稳定条件下, 或稳定条件风比较大的时候, 2/3 定律得到了充分的证明^[3]。Wyngaard^[4]通过不同风速分量功率谱密度之比证明了近地面小尺度风速湍流是各向同性的。Barat 的高空气球平流层观测表明满足 2/3 定律的区域达到 10 m^[5]。但是, 在某些情况下, 2/3 定律的成立并不证明湍流是各向同性的。风速湍流的各向同性和 2/3 定律的成立并不意味着标量场也一定如此。反之亦然。高层大气经常处于稳定的状况, 湍流得不到充分的发展, 因而经常是分层的, 间断性的。这时的湍流就可能部分乃至全部不满足均匀各向同性的假定, 部分或全部不满足 2/3 定律。Dalaudier^[6]

1995-01-27 收到, 1996-04-20 收到修改稿

* 本项目由 863-410 计划资助

** 参加工作的还有肖黎明、马成胜、汪超、马志军等

的探空观测证实了高空温度场的片状结构并认为这种结构具有强烈的各向异性特征。曾宗泳^[7]在铁塔上对稳定层结下剪切湍流的观测揭示了这种可能性, Виниценко^[8]在自由大气中测量的温度谱其斜率在 $-5/3$ 到 -3 之间。曾宗泳等^[9]在对流边界层上半部的飞机观测也得到了类似的结果。

随着天文望远镜口径加大, 湍流在低频处的行为将影响到达角起伏即大气宁静度测量的结果^[10,11]。如果温度起伏是各向异性的, 那么斜穿大气层的湍流强度和天顶距的关系就不能简单地确定。Coulman^[12]利用星光闪烁测量的折射率结构常数 C_n^2 的廓线来估计外尺度, 指出外尺度的长度十分有限。他的结果在有的高度上, 外尺度短到几乎惯性区不存在。因此, 简单地把整层大气按各向同性, 完全满足 $2/3$ 定律的处理方法就可能满足不了某些问题的要求。高空湍流的各向同性的证实, 无论在理论方面还是在实践上都是有价值的。由于高空气球能够携带计算机进行采样记录, 得到宽得多的动态范围, 因此能够进行普通探空气球难以做到的观测, 对高空湍流的各向同性以及内外尺度进行检验。1993年9月12日在河北省香河县进行了首次整层大气光学湍流结构的高空气球探测。不仅测量了折射率结构常数随高度的变化, 对各向同性及外尺度做了初步的检验, 考虑到气球尾流的影响本文仅给出 $0\sim 20\text{ km}$ 的主要测量结果。

2 仪器和观测

温度起伏的测量采用钨丝传感器, 钨丝长度为 12 mm , 直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 可以基本无衰减地测量 10 Hz 以下的起伏, 噪声为 0.002°C 。传感器的电桥有对称的两个温度探头, 一个测量瞬时温度, 另一个测量平均温度, 其响应时间约 4 min 。电桥的输出和两者的差成比例, 这样可以解决高灵敏度和气温变化范围宽的矛盾, 因此所测温度为

$$T' = T - \langle T \rangle, \quad (3)$$

T 和 $\langle T \rangle$ 分别是瞬时和平均气温, T' 是脉动温度。其频率范围是 $0.02\sim 30\text{ Hz}$ 。我们使用了三只传感器, 几乎呈直线地放在一个水平面上。传感器之间的距离分别为 1.07 、 0.75 、 0.33 m 。按温度结构函数的定义

$$D_T(r) = \langle (T(r) - T(0))^2 \rangle = \langle (T'(r) - T'(0))^2 \rangle, \quad (4)$$

r 为两传感器的距离, T' 可以是不同时刻的瞬时值, $D_T(r)$ 就表示了温度水平方向的结构函数。此外, 由于气球随水平风移动并带有 $W \approx 5\text{ m/s}$ 的升速, 并且湍流以较高的精度满足泰勒假定, 每个传感器所测温度起伏的时间序列实际上是温度在垂直方向上的变化, 因此计算的时间结构函数和垂直方向的结构函数有如下的关系:

$$D(\Delta t) = D((W + \Delta V)\Delta t) = D(r_\perp), \quad (5)$$

Δt 为延时, ΔV 为气球和吊篮处的风速差, $r_\perp$ 为垂直方向两点间的距离。由式(1)和不同方向、不同距离的结构函数可以计算出不同的 C_T^2 值, 进而由下式计算出不同的折射率结构常数 C_n^2 值

$$C_n^2 = (79P/T^2)^2 C_T^2 \times 10^{-12}, \quad (6)$$

P 为气压(hPa), T 为温度(K)。

如果由水平距离不同的结构函数按(1)式计算出的 C_n^2 相同, 则说明在相应的尺度范围内满足 2/3 定律。同样, 如果 $r_{\perp}$ 和水平距离 $r_{\parallel}$ 相等时, 按(1)式计算的结构常数相等, 则说明湍流是各向同性的。由于晴空大气最易出现稳定的层结, 湍流在垂直方向受到限制, 因此垂直和水平方向的对比是主要的。对温度起伏的时间序列做谱分析, 可以得到外尺度。

传感器来的电压信号经 A/D 转换后记录在计算机的硬盘中。采样以 24 次/s 的速率不间断地进行, 吊篮回收后再处理。吊篮和气球的距离在低空时约 80 m, 球的直径 8 m, 加上风切变较强, 球体和吊篮风不一致, 球尾流对测量没什么影响。高空时, 球直径加大, 和吊篮距离变近, 风切变也可能减小乃至等于零。例如 20 km 时, 距离减少到 65 m 左右, 气球直径增加到 22 m, 虽然湍流的耗散速度很快^[13], 但这样近的距离时气球扰动的影响必须考虑。因此我们只分析 20 km 以下的结果, 并对气球尾流的影响做具体分析。正常情况下, 传感器的误差主要是标定误差和平均气温测量的辐射误差, 前者约 5%。后者仅在太阳照射并且流场剧烈变化时才出现。

3 测量结果

测量结果的可靠性首先由三个探测器的一致性来验证, 利用(5)式计算出三个探测器在垂直方向测量的 C_n^2 值。由 5 min 平均计算出三个 C_n^2 中, 两两相比有两个在整层大气中相差不大于 6%, 其余一个可能因温度稳定性稍随高度有 10%~20%的飘移。因此 C_n^2 的测量误差可望小于 20%。由两个传感器测量值相减得到的水平方向 C_n^2 值误差可能还要大一些。图 1 中每 30 m 计算一个 C_n^2 值, 再按 300 m 平滑平均。测量时间是 17 点 48 分至 20 点 10 分。图上还画出了由平均风速和温度计算的稳定度参数 Ri , 13 km 以下接近临界值 0.25, 湍流容易发展。2 km 以下 $Ri=0$, 可能是还未消退的对流边界层, 因此湍流较强。 C_n^2 表明湍流较强的区域分布在 2 km 和 6 km 附近似乎和较小的 Ri 相关。10 km 以下风切变大致为 0.008 s^{-1} , 气球尾流影响不明显, 在原始温度脉动记录上多半呈间歇性的正起伏, Dalaudier 有类似的测量结果^[6]。10 km 以上风切变减少到 0.002 s^{-1} , 18 km 以上减少到零。10 km 起原始温度脉动记录逐渐出现对称的高频强起伏, 而且间歇时间越来越短, 因此说明了气球尾流的影响。下面的谱分析结果将进一步说明这个问题。

图 2a 是水平距离 0.33 和 1.07 m 结构常数之比按 500 m 平滑平均, 其比值

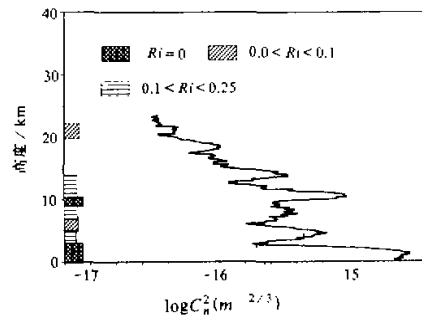


图 1 折射率结构常数的高度分布, 平滑平均厚度 300 m, 稳定度参数 $Ri = [g(\partial\theta/\partial z)] / [T(\partial v/\partial z)^2]$, θ 为位温, 由 59 型探空计算, v 为风速, 由雷达测量, g 为重力加速度, T 为绝对温度

起伏仍较大, 平均有 25% 的偏离。由 1.07、0.75、0.33 m 三个距离计算的 C_n^2 之比为 1:1.24:0.96。三者之间的差别和距离没有明显的关系, 因此可以说明大气在 0.33 至 1.07 m 的范围内满足 2/3 定律。计算时间结构函数时取延时 $\Delta r = 0.212$ s, 对应的垂直距离 r_z 约等于 1.0 m, 由此计算得到的结构常数和距离为 0.75 m 的结构常数相比, 比值画在图 2b 中。垂直方向的起伏系统地偏低 25%, 考虑到测量误差, 不能说明大气温度脉动不是各相同性的。

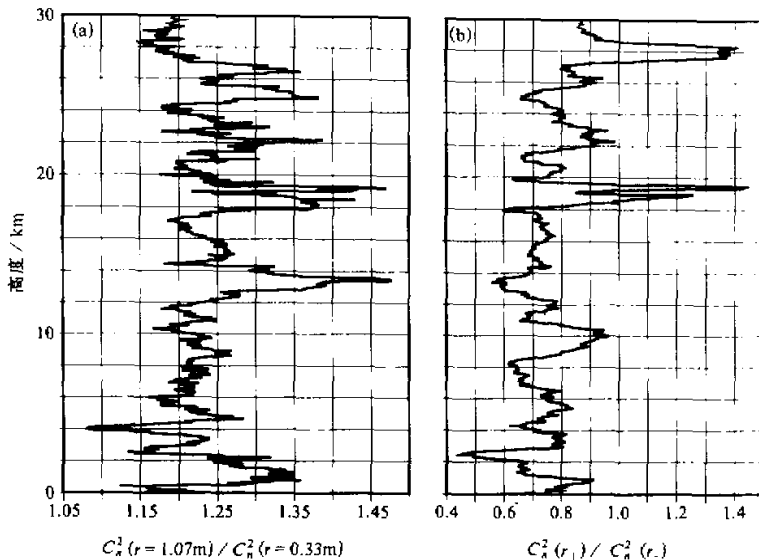


图 2 (a) 不同水平距离时结构常数之比, 平滑平均厚度 500 m; (b) 垂直方向结构常数和水平方向结构常数之比, 平滑平均厚度 500 m。 $C_n^2(r_z)$ 为垂直方向结构常数, $C_n^2(r_x)$ 为水平方向结构常数, $r_x = 0.75$ m。结构函数计算平均时间 5 s

图 3 给出了 1.7~2.6 km 垂直温度起伏的功率谱, 清楚地看到 $-5/3$ 次幂的惯性区。如果用 von Karman 谱^[14]去拟合可以得到外尺度 $L_0 = 20$ m。10 km 以下谱曲线和图 3 类似, 外尺度最大 38 m。图 4 中出现了两个 $-5/3$ 幂率区, 虽然 Barat 有类似的测量结果, 但根据前面所说的理由, 频率高的一个可能是气球尾流造成的。另一个仍然反映了大气的温度起伏, 因此整层大气的外尺度都大于 Coulman^[12] 的估计, 考虑到只在垂直方向有温度层结对湍流的限制, 因此可以期望水平方向的外尺度比垂直方向的要大。干涉仪的测量有类似的结果^[15], 测量到的外尺度都比较大。

4 讨论

不同的测量手段, 不同的数据处理方法对测量结果的影响不同, 每种方法在空间和时间的频率响应, 灵敏度, 平均时间和平均方法上存在着差别, 这些差别有可能成为观

- 6 Dalaudier, F. et al., 1994, Direct evidence of sheets in the atmospheric temperature field, *J. Atmos. Sci.* **51**, 237~248.
- 7 Zeng Zongyong, 1989, The intermittence of turbulence and its effects on wave propagation, *Proceedings SPIE*, **1114**, 23~27.
- 8 Вилинченко, Н. К., 1976, Турбулентность в Свободной Атмосфере, Гидрометеонаиздат, с.110.
- 9 曹宗泳等, 1983, 大气温度微结构观测, *大气科学*, **7**, 277~285.
- 10 Tofsted, D. H., 1990, Outer-scale effects on beams-wander and angle-of-arrival variances, *Appl. Opt.*, **31**, 5865~5870.
- 11 宋正方等, 1994, 湍流外尺度对大气相干长度和等晕角的影响, *强激光与离子束*, **16**, 469~473.
- 12 Coulman, C. E., 1988, Outer scale of turbulence appropriate to modeling refractive-index structure profiles, *Appl. Opt.*, **27**, 155~160.
- 13 Brown, J.H. et al., 1982, Sonde experiments for comparative measurements of optical turbulence, AFGL-TR-82-0079, AD A118740, Air force geophysics laboratory, Hanscom air force base, Massachusetts
- 14 周秀骥等, 1991, 高等大气物理学, 北京: 气象出版社, 290pp.
- 15 Buscher, D.F. et al., 1995, Interferometer seeing measurements on Mt. Wilson. Power spectra and outer scales, *Applied Optics*, **34**, 1081~1096.

Aerological Observation of the Temperature Microstructure

Zeng Zongyong, Zhang Jun, Weng Ningquan and Gong Zhiben

(Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract Some important results of the measurements of the atmospheric temperature microstructure obtained by three balloon-borne tungsten wire thermometers installed along a level at the top of gondola are presented in this paper. The temperature spectra in perpendicular direction and the structure parameters over the various horizontal or perpendicular distance were calculated. It has been found that Kolmogorov's $2/3$ law is satisfied in the range of 0.33~1.07 m and outer scale is larger than 20 m in perpendicular direction. The isotropy of fine scale temperature fluctuations was discussed.

Key words balloon measurement optical turbulence isotropy outer scale