

非单一水平均匀下垫面空气动力学参数的确定*

张宏昇 陈家宜

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

提 要

文章介绍了一种利用单一高度风速、温度湍流资料确定空气动力学参数的方法. 该方法无须进行风速廓线的测量, 可以应用于非单一水平均匀下垫面和非中性层结, 避免了主观性. 用该方法计算了北京城市北部边缘 325 m 气象塔附近的零值位移 d 和地表粗糙度 z_0 . 结果表明: 该处下垫面零值位移 d 和地表粗糙度 z_0 与风向有很强的依赖关系, 与气象塔周围的城市建设相对应.

关键词: 空气动力学参数 湍流观测 下垫面

引 言

大气边界层参数化常用的空气动力学参数地表粗糙度 z_0 和零值位移 d 不仅是描述下垫面空气动力学特征的重要物理量, 而且也是研究地表植被与大气之间物质和能量交换过程首先要确定的基本参数之一. 确定地表粗糙度 z_0 和零值位移 d 的常规方法是利用中性近地面风廓线方程求得. 中性层结下风廓线方程为:

$$\bar{U} = \frac{u_*}{k} \left[\ln \frac{(z-d)}{z_0} \right] \quad (1)$$

其中: k 是 Von-Karman 常数, d 为零值位移, 摩擦速度 $u_* = (\tau/\rho)^{1/2}$, z_0 为地表粗糙度长度.

理论上, 当获得 3 个以上高度的风速梯度观测资料时, 就可对式(1)进行非线性回归求解^[1]. 但在实际应用中会有诸多的困难或不便. 如: (1) 中性层结资料获取的困难, 例如在戈壁下垫面, 大气边界层的稳定度日夜相差悬殊, 近中性层结只在早晚过度时刻短暂地出现, 这时候的非定常性强, 缺乏用风廓线资料确定空气动力参数的基础^[2]. (2) 进行高质量风廓线测量的困难和实施风速梯度观测的不便. 仅仅有 3 层风速测量往往是不够的, 需多个高度的风速梯度资料. (3) 由于 u_* 、 d 、 z_0 在物理上相互制约和关联, 仅仅依靠式(1)不能同时给出三者唯一的准确值^[3]. 所以, 人们一直在寻求既简便易行又能独立确定空气动力参数的方法或测量手段.

Thom(1971)^[4]直接从 d 的物理意义出发, 提出了压力中心法计算零值位移 d 和地

* 本研究为国家自然科学基金委员会资助项目成果.
1996-05-20 收到, 1996-11-15 收到修改稿.

表粗糙度 z_0 的设想. Kustas 等(1985)^[5]假设零值位移 d 与植物高度 h 呈一定的比例关系. 这些方法虽然克服了利用风廓线测量资料计算 d 值和 z_0 的困难,但在实用中存在一定的主观性,经验性很强、误差较大. 鉴于风速和温度涨落的测量目前已较容易实现,陈家宜等(1993)^[2]给出利用单一高度超声风温仪的湍流测量资料确定地表粗糙度 z_0 的方案. Rotach(1994)^[6]提出通过测量温度脉动方差确定零值位移 d 的温度方差方法(Temperature-Variance-Method, 简称 TVM), 式(1)中的 3 个相互关联的空气动力参数 u_* 、 d 、 z_0 可分别独立获得.

1 TVM 方法简介

根据 Monin-Obukhov 相似理论,在不稳定层结下, σ_θ/θ_* 与 $z'/L(z'=z-d)$ 呈 $-1/3$ 幂次方关系. 这一规律已被众多野外实验所证实,而且适用于城市、郊区等各种下垫表面和较高的观测高度^[7~12]. Tillman(1972)^[7]建议了如下表达式:

$$\frac{\sigma_\theta}{\theta_*} = -C_1(C_2 - z'/L)^{-1/3} \quad (z'/L < 0) \quad (2)$$

式中: $\theta_* = -\overline{w'\theta'}/u_*$; C_1 、 C_2 为系数, Wyngaard 等(1971)^[11]建议 $C_1=0.95$, C_2 由近中性层结时的系数 $C_3(=-C_1C_2^{-1/3})$ 确定. C_3 的取值在 2.5~3.5 之间^[7, 8, 11].

Lloyd(1991)^[9]发现:利用式(2)和温度方差 σ_θ 测量值推算感热通量 $\overline{w'\theta'}$ 时,观测高度 z 的误差会对计算结果有较大的影响,而高度 z 的误差主要是零值位移 d 的影响. 当 $(z-d)$ 没有误差(即 d 值估算准确),由式(2)和 σ_θ 测量值推算的 $\overline{w'\theta'}$ 也没有误差. 这一结果说明利用式(2)和温度脉动方差计算感热通量 $\overline{w'\theta'}$ 对于 d 值是敏感的. 反之, d 值对 $\overline{w'\theta'}$ 也具有一定的敏感性. 如果取 σ_θ/θ_* 实测值与式(2)差的均方根(*rms*)的数值最小,这时对应的预测 d 值即为零值位移 d . 计算时应注意以下几点:(1) 由于 $z'/L=(z-d)/L$, 为了能够求得最小的均方根值,参与每一预测 d 值计算均方根值的原始湍流资料必须一样、数目相同,则不同预测 d 值计算的均方根值才有可比性.(2) 近中性层结下,由于湍流通量很小,使得无因次温度涨落方差的准确性变差. 尤其是城郊环境的测量结果往往有一较宽的变化范围,这种离散不一定是测量的不精确,常常缘于城郊下垫面复杂性的影响. 因此,对于中性层结的资料一定要小心挑选,例如剔除风速和热通量比较小的数据组.(3) 一般情况下 $z \gg d$, 当 d 值变小时, TVM 方法计算 d 值误差相应增大.

2 非单一水平均匀下垫面空气动力学参数的确定

利用 TVM 方法估算位于北京城市北部边缘中科院大气物理研究所 325 m 气象塔^[13]位置的零值位移 d . 气象塔地处北三环和北四环之间的北古土城旧址附近,距北三环和北四环均约 1 km,南面距德胜门 2.7 km. 气象塔的北部、东北、东南、南部和西南方向约 1 km 以外有新建的高层建筑楼群,1 km 内是以平房为主的住宅及商业区,隆起的马甸立交桥位于气象塔的正南偏东方向;东面为古土城墙、西面及西北偏西方向为东西走向的土城和小月河河道;西北方向有牡丹电视机厂区和 6 层住宅楼群.

湍流观测于1993年5月进行. 风速测量采用日本海上电机公司生产的DAT-300型探头TR-61C型超声风温仪, 温度脉动测量采用自制铂丝温度脉动仪. 超声风温仪和铂丝温度脉动仪均架设在距地面47m高度的东北偏东方向伸臂上, 超声风温仪垂直探头面向正北. 铂丝温度脉动仪温度探头和超声风温仪垂直探头相距为20cm, 采样时间为30min, 采样频率为16Hz^[12]. 在分析中剔除水平风速小于1m/s、热通量小于2W/m²、风速垂直倾角大于5°以及其它明显不合理的数据组. 由于观测地点为非单一水平均匀下垫面, 各方向来流状况有较大差别, 为此, 将数据按风向0°~360°分为8个区段, 每个区段间隔为45°, 除了90°~135°和270°~315°风向段为5组和8组数据外, 其余各风向段均有14组以上的数据组.

由于式(2)中系数的取值对计算结果影响不大, 根据前人的结论和观测场地周围状况, 零值位移 d 的预测值取值范围为0~20m, 间隔取0.2m. 计算结果表明: 对于所有风向组, σ_θ/θ_s 测量值与式(2)差的均方根有一清晰的极小值. 图1给出了0°~45°的实例, 图2显示了不同风向的零值位移 d 计算值, 其数值与气象塔周围的地表状况是吻合的. 其中, 由于90°~135°风向的湍流数据较少, 因此该风向区间没有计算零值位移 d , 并且用虚线表示; 225°~270°风向区段为超声风温仪探头处于气象塔塔身的背风区, 故也没有计算零值位移 d (虚线). 式(3)是苏红兵等(1994)^[14]给出的气象塔附近的 σ_θ/θ_s 与 z'/L 的拟合曲线关系.

$$\frac{\sigma_\theta}{|\theta_s|} = 5(1 - 16z'/L)^{-1/2} \tag{3}$$

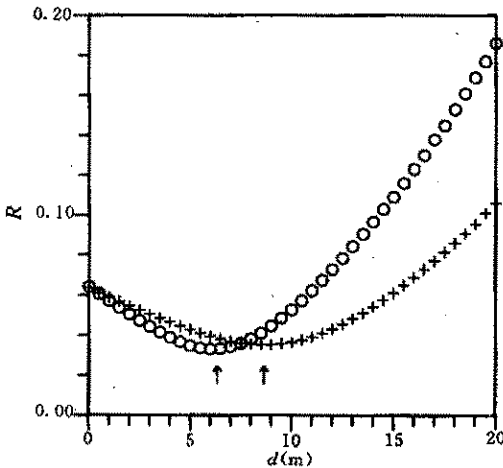


图1 σ_θ/θ_s 实测值与计算值差的均方根 R 和预测 d 值的关系(以0°~45°风向为例, +: 式(2), O: 式(3))

Fig. 1 The relationship between the root-mean-square difference R and zero plane displacement d (take the wind direction sector 0°~45° as example, +: Equ. (2), O: Equ. (3))

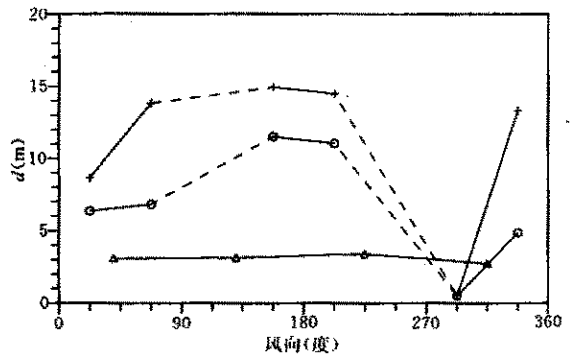


图2 不同 σ_θ/θ_s 拟合方程和胡非方法计算零值位移 d 的比较(+: 式(2), O: 式(3), Δ: 胡非(1994))

Fig. 2 Comparison of the zero plane displacements d from the fitting Equ. (2) (+), Equ. (3) (O) and Hu(1994) (Δ)

图 2 同时给出了依据式(3)计算的零值位移 d 。可见，利用式(2)和式(3)计算零值位移 d 的趋势很一致，但数值存在差异。其原因之一是：式(3)是根据 1992 年的湍流观测资料拟合得到的，而在拟合过程中，零值位移 d 引用了 1986 年前后的数值^[15]。依据胡非(1994)^[15]给出的 1986 年前后的地表粗糙度 z_0 值和 $d=5z_0$ 的假设，图 2 还给出了 1986 年前后的零值位移 d 。与 1986 年相比，1993 年的零值位移 d 变化较大，这与 80 年代末和 90 年代初气象塔周围的大规模建设相对应。对于 $270^\circ\sim 315^\circ$ 区段显示很小的零值位移 d ，甚至小于 1986 年的计算值，其原因有二：(1) 该方位区段为北土城和小月河明河道，地势较低， d 值较小是可以接受的；(2) 1986 年的 d 值是依据地表粗糙度 z_0 和 $d=5z_0$ 的假设得到的，而 z_0 是整个西北方向的平均值， $d=5z_0$ 也不是处处一定成立。

根据已求得的零值位移 d 和式(2)、式(3)重新拟合 σ_θ/θ 与 z/L 的关系，发现 $C_1=1.05$ 。图 3 给出 σ_θ/θ 与稳定度参数 $(z-d)/L$ 的变化关系。图中相同稳定度对应经过 d 值订正的 σ_θ/θ 存在差异，是缘于数据来自不同的风的来向。与 $d=0$ 相比，利用 TVM 方法确定的零值位移 d 使得数据曲线更为光滑，从一个侧面反映了利用单一高度风速、温度湍流观测的数据确定零值位移 d 的可行性。在近中性层结下，从不稳定和稳定两种层结估算 C_3 的取值分别为 3~4 和 5~6(见图 3)，前者较小的数值与 de Bruin 等的数值 $C_3=3$ 和 Wyngaard 等的数值 $C_3=3.5$ 相近，后者较大的数值与苏红兵等(1994)给出的数值 5 相近，但稳定靠中性层结的数据点仅有一个，不足以证明系数 C_3 取值较大，作者赞同 $C_3=3.5$ 。另外，由图 3 可见，式(2)和式(3)在强不稳定条件下趋于一致；在近中性

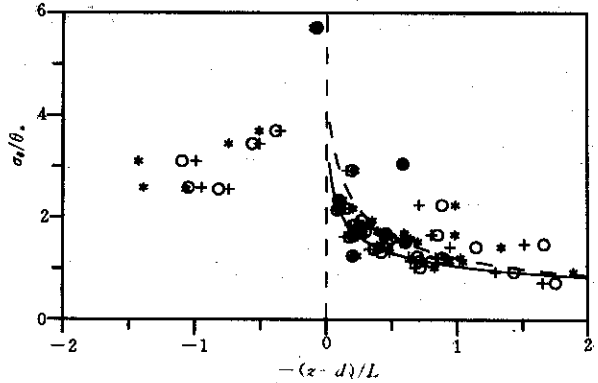


图 3 σ_θ/θ 与稳定度参数 $(z-d)/L$ 的关系

(*: $d=0$; +: d 解自式(2); O: d 解自式(3), 实线: 式(2), $C_1=1.05$; 虚线: 式(3))

Fig. 3 σ_θ/θ against stability parameter $(z-d)/L$ (*: $d=0$; +: d obtained from Equ. (2); O: d obtained from Equ. (3); solid line, Equ. (2), but $C_1=1.05$; dashed line, Equ. (3))

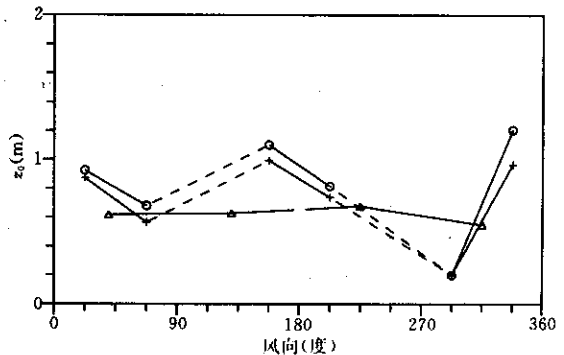


图 4 北京城郊 325 m 气象塔位置地表粗糙度 z_0 随风向的变化(+和O对应 d 值解自式(2)和式(3), Δ 为胡非(1994)的 1986 年前后的 z_0 值^[15])

Fig. 4 The relationship between roughness and wind direction(+ and O are same as Fig. 3 Δ : z_0 value of Hu about 1986)

层结估算 C_3 的取值分别为 3~4 和 5~6(见图 3)，前者较小的数值与 de Bruin 等的数值 $C_3=3$ 和 Wyngaard 等的数值 $C_3=3.5$ 相近，后者较大的数值与苏红兵等(1994)给出的数值 5 相近，但稳定靠中性层结的数据点仅有一个，不足以证明系数 C_3 取值较大，作者赞同 $C_3=3.5$ 。另外，由图 3 可见，式(2)和式(3)在强不稳定条件下趋于一致；在近中性

层结下,式(2)的数值略低于式(3)。

利用上面求得的零值位移 d ,根据陈家宜等^[2]提供的用单一高度湍流通量测量资料确定地表粗糙度的方法,分别计算出325 m气象塔8个风向段内的地表粗糙度参数 z_0 ,结果绘于图4。从图4同样可见,80年代末和90年代初,气象塔周围的大规模建设较大地改变了地表粗糙度 z_0 ,与世界几个城市地表粗糙度 z_0 ^[16](如东京为1.7 m,利物浦为1.2 m)相比,图4是合理的。

3 结论与讨论

用单一高度风速、温度湍流观测数据确定空气动力参数的方法具有无须进行风速廓线的测量,避免多层风速观测的麻烦,能够利用各种稳定度资料,可以应用于非单一水平均匀下垫面等特点。用该方法计算了北京城市北部边缘1993年的零值位移 d 为9 m左右,地表粗糙度 z_0 为1 m左右,这个结果与世界几个城市相比是合理的,其数值与风向有很强的依赖关系。本文利用1993年的实测资料给出的零值位移 d 和地表粗糙度 z_0 高于前人早期的结果,与325 m气象塔周围的城市建设相吻合。即:随着近年来气象塔周围环境的变化,该处的地表动力学参数零值位移 d 和地表粗糙度 z_0 呈增大趋势。通过讨论近中性层结的温度归一化标准差的取值,认为式(2)中系数 $C_3=3.5$ 的置信度较高。

参考文献

- 1 Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers, U. S. A., 1988, p380.
- 2 陈家宜,王介民,光田宁.一种确定地表粗糙度的独立方法.大气科学,1993,17:21~26.
- 3 覃文汉.应用压力中心法确定农田空气动力参数.气象学报,1994,52:99~106.
- 4 Thom A S. Momentum absorption by vegetation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1971, 97: 414~428.
- 5 Kustas W P and Brutsaert W. Wind profile constants in a neutral atmospheric boundary layer over complex terrain. *Boundary-Layer Meteor.*, 1986, 35: 35~54.
- 6 Rotach M W. Determination of the zero plane displacement in an urban environment. *Boundary-Layer Meteor.*, 1994, 67: 187~193.
- 7 Tillman A S. The indirect determination of stability, heat and momentum fluxes in the atmospheric boundary layer from simple scalar variables during dry unstable conditions. *J. Appl. Meteor.*, 1972, 11: 783~792.
- 8 De Bruin H A R, Kohsiek W and Van Den Hurk B J J M. A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat and water vapour using standard deviation and structure parameter of scale meteorological quantities. *Boundary-Layer Meteor.*, 1988, 43: 231~257.
- 9 Lloyd C R, Culf A D, Dolman A J and Gesh J H C. Estimates of sensible heat flux from observations of temperature fluctuations. *Boundary-Layer Meteor.*, 1991, 57: 311~322.
- 10 Roth M. Turbulent transfer relationships over an urban surface. I: Integral statistics. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 1993, 119: 1105~1120.
- 11 Wyngaard J C, Cote O R and Izumi Y. Local free convection, similarity and the budgets of shear stress. *J. Atmos. Sci.*, 1971, 28: 1171~1182.
- 12 张宏昇.近地面层湍流输送观测仪器和方法研究.北京大学博士研究生论文,1995.
- 13 洪钟祥.北京气象塔.北京:科学出版社,1983.1~7.

- 14 苏红兵, 洪钟祥. 北京城郊近地面层湍流实验观测. 大气科学, 1994, 18:739~750.
- 15 胡非. 湍流间歇性的分析研究. 中国科学院大气物理研究所博士研究生论文, 1994.
- 16 Metin Yersel and Robert Goble. Roughness effects on urban turbulence parameters. *Boundary-Layer Meteor.*, 1986, 37: 271~284.

ESTIMATION OF AERODYNAMIC PARAMETERS ON NON-SINGLE HORIZONTAL HOMOGENEOUS UNDERLYING SURFACE

Zhang Hongsheng Chen Jiayi

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

The method to estimate aerodynamic parameters with only velocity and temperature fluctuation data is applied to non-homogeneous surfaces and non-neutral stratification. The turbulence data measured in Beijing Meteorological Tower which is 325 m high are used to determine the zero plane displacement d and surface roughness z_0 . It is shown that the d and z_0 are considerable dependent on wind direction.

Key words: Aerodynamic parameter Turbulent measurement Underlying