

一种确定地表粗糙度的独立方法 *

陈家宜

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

王介民

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730000)

光田宁

(日本京都大学防灾科学研究所)

提 要

本文提出一种只用单一超声风温仪的平均风速和湍流量测定值确定地表空气动力学粗糙度的方案。该方法经 Kansas 实验资料验证, 效果甚好, 由 5.66 m 和 22.6 m 两层超声风温仪数据计算的 z_0 彼此一致, 并且完全符合风速廓线确定的数值。将其用于确定 HEIFE 实验区平坦戈壁滩的地表粗糙度, 1988 年和 1990 年两批数据的估值结果大致相符, z_0 分别为 1.5×10^{-3} m 和 1.1×10^{-3} m。由精细风廓线观测发现该地 $z_0 = 1.2 \times 10^{-3}$ m, 证实了所建议的方法和 z_0 估值的可靠性。

关键词: 地表粗糙度; 湍流通量; 戈壁地面。

一、引 言

地面粗糙度 z_0 是表征地表面的空气动力学特征, 并在大气边界层湍流属性通量参数化方案中常用的一个基本参数。在已知地面粗糙度的场合, 人们可以简单地采用单高度风速和两个高度的温度差, 用湿度差计算近地面层大气的动量、感热和潜热通量^[1]。确定地面空气动力学粗糙度的传统方法是利用中性近地面层风廓线外推或非中性层结廓线迭代求最佳拟合解。这种方法要求有较多各高度上风、温廓线的观测, 具备足够多的近中性层结资料。本文建议一种用单一高度无因次化风速确定地表粗糙度的方法, 无需进行风廓线观测。本研究表明这种方法有合乎要求的精确度, 并且可以同时利用各种稳定度的观测资料, 在湍流通量直接测定技术已很普及的情况下不愧是一种有前景的方法。

戈壁滩是“黑河地区地气相互作用实验研究”(HEIFE)实验区的一种有代表性的下垫面。那里大气边界层的稳定度日夜悬殊, 近中性层结只在早晚过渡时刻短暂地出现, 这时候的非定常性强, 缺乏用廓线资料确定 z_0 的合理基础。加之, 戈壁地面的阻力系数小, 风速梯度小, 如无很高质量的风速廓线资料也难得到可靠的结果。我们用本文提出的方法计算平坦戈壁滩的粗糙度取得了成功的结果, z_0 的大小约在 1.1×10^{-3} m — 1.5×10^{-3} m

1992 年 2 月 9 日收到, 6 月 12 日收到修改稿。

* “黑河地区地气相互作用实验研究”成果。该项目中国方面获国家自然科学基金委员会的资助, 日本方面获日本国文部省的资助。

之间,与高质量风廓线确定的数值一致.

二、用无因次化风速确定地面粗糙度

含层结订正函数的近地面层风速廓线规律为

$$\bar{U} = \frac{U_*}{\kappa} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \psi_m(\zeta) \right], \quad (1)$$

于是有

$$\ln \frac{z}{z_0} = \frac{\kappa \bar{U}}{u_*} + \psi_m(\zeta), \quad (2)$$

其中 $\zeta = z/L$, L 是莫宁 - 奥布霍夫长度; $\psi_m(\zeta)$ 是风廓线的稳定度修正函数.

$$\psi_m(\zeta) = \int_{\zeta_0}^{\zeta} \frac{(1 - \varphi_m)}{\zeta} d\zeta, \quad (3)$$

这里 φ_m 是无因次风速梯度, $\varphi_m = \frac{\kappa z}{u_*} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z}$. 若通量廓线关系已知, 取定 Von Karman 常数 κ 的数值即可利用方程(2)从一个高度的无因次风速 $\kappa \bar{U}/u_*$ 的测定值和 ζ 的拟合获得粗糙度 z_0 . 当近中性层结的观测数据足够多的时候可以直接由近中性的 $\kappa \bar{U}/u_*$ 值计算出 z_0 .

我们首先利用著名的 Kansas 实验资料^[2]对方法进行试验. Kansas 实验 共在 3 个高度采用超声风速仪进行平均风和湍流统计特征量的测定. 文献[2]已指出其中 11.3m 层的数据质量欠佳, 未予采用. 取 5.66m 和 22.6m 两层各自的平均风速和摩擦速度 U_* 及该实验成果推荐的 $\kappa = 0.35$ ^[3], 得到无因次风速 $\kappa \bar{U}/u_*$, 并用实测的稳定度参数 z/L , 按 Businger - Dyer 的通量廓线关系

$$\varphi_m(\zeta) = (1 - 16\zeta)^{-1/4} \quad \text{不稳定}, \quad (4)$$

$$\varphi_m(\zeta) = 1 + 5\zeta \quad \text{稳定}. \quad (5)$$

计算 $\psi_m(\zeta)$, 得到方程(2)右边的 $\kappa \bar{U}/u_* + \psi_m(\zeta)$. 结果发现该值随稳定度有系统地变化趋势, 稳定时偏低, 不稳定时偏高. 删除偏离较大的一组数据(最稳定的), 对稳定度参数 ζ 作线性拟合得到中性条件下两个高度的无因次风速 $\kappa \bar{U}/u_*$ (中性), 即 $\ln z/z_0$ 分别为 5.40 (5.66m) 和 6.80 (22.6m). 推算的 z_0 分别为 0.026m 和 0.025m, 彼此甚一致. 与 Bradley 从中性风速廓线确定的数据 $z_0 = 0.024$ 也非常接近. 图 1a 和 b 分别是两个高度的无因次风速 $\kappa \bar{U}/u_*$ 随稳定度参数 ζ 的变化. 图中同时绘出 $\kappa \bar{U}/u_*$ 中性值分别取 5.40 和 6.80 时方程(4), (5)对应的规律. 由图可见不稳定条件的原始数据高于方程(4)对应的数值, 稳定条件的原始数据低于方程(5)对应值, 但在近中性条件下分别符合拟合值 5.40 和 6.80. 以上结果证实利用单一高度平均风速和湍流通量测量值计算地面粗糙度可作为一种独立方法使用.

图 1 数据计算中采用了有争议的数值 $\kappa = 0.35$. Wieringa^[3]曾经指出 Kansas 实

验得到异常低的 κ 值主要原因是仪器塔架上辅助设备对气流产生干扰, 导致湍流切应力观测值偏低。经对各主次要因素的合理修正后 κ 就恢复到以往传统公认的 0.40。对于我们的计算而言, 原始的 κ 值, $\bar{U}$ 和 u_* 个别而论可能存在不同程度的误差, 但是联合起来 $\kappa \bar{U}/u_*$ 却仍是可靠的。

三、黑河地区戈壁滩地面的粗糙度

戈壁滩是黑河地区地面—大气相互作用研究野外实验区的一种下垫面类型。1988 年所做的预实验中(HEIFE-POP), 气象塔风廓线资料表明, 戈壁滩的地面粗糙度出奇地小^[6]。为确切起见, 我们应用上节提出的方法独立地做了计算。数据来自华音观测站的短期观测。该站是为进行 HEIFE 实验而专设的五个强化的微气象观测站之一, 它位于临泽县城西南方向的平坦戈壁, 东北方向距绿洲 1km 多, 西南方向距祁连山约 30km, 除观测点西北方向约 2km 处有一块突出的绿洲农田和稀疏树木外, 沿西北—东南方向均为开阔的戈壁滩。观测场附近地面为粗砂和卵石组成^[6-8]。

分析的资料第一部份是 1988 年 9 月 13 日—19 日 POP 期间的观测。平均风速和湍流通量用一台带 TR-61A 探头的 DAT-300 型超声风温仪进行测量。探头安置高度离地面 2.45m。观测与数据处理细节见文献[7]。分析中删去平均风向与探头迎风轴向夹角超过 45° 的数据以避免探头框架对气流的干扰, 同时也删去平均风向和风速变化过大的情况以满足准平稳性。第二部份资料是本研究初步完成后取得的, 即 1990 年 8 月 19 日—24 日 HEIFE 强化观测预实验(PIOP) 期间收集的湍流和平均风廓线资料。湍流测量情况与 1988 年相同, 风廓线采用 Teledyne 轻型杯状风速表配以北京大学开发的采集系统进行观测, 观测中共用 7 个风速表安装在离地面 0.32m 至 5.4m 各高度上。图 2 是 1990 年 PIOP 实验期间超声风速仪和杯状风速表测定平均风速的比较。2.45m 层的杯状风速表值 $U_{cup, 2.45}$ 是从 2.10m 和 3.23m 两层实测值几何内插得到。因为两层风速差不大, 作为这种比较, 精确度是足够的。由图可见两者合理地一致。风速较低时杯状风速表测量值偏高, 这显然是由于过高效应所致^[9]。这一比较结果说明了超声风温仪测定平均风速的精确度。

图 3 和图 4 分别是上述两次超声风温仪观测数据计算的 $\kappa \bar{U}/u_*$ 随稳定度参数 $\zeta = z/L$ 的变化。这里 $z = 2.45\text{m}$, Von Karman 常数采用近年来再次得到承认并为我们观测所证实的 $\kappa = 0.40$ (另文发表)。图中实线为采用(4), (5)两式时分别取 $\kappa \bar{U}/u_*$ 的中性值 7.50(图 3)和 7.70(图 4)的拟合曲线。两组数据计算的地面粗糙度分别是 $1.5 \times 10^{-3}\text{m}$ 和 $1.1 \times 10^{-3}\text{m}$ 。

风速廓线的分析证实了所提出的方法及以上计算值的可靠性。图 5 是 PIOP 期间 6 组近中性略偏不稳定($0 > z/L > -0.11$, $z = 2.45\text{m}$)和 8 组近中性略偏稳定

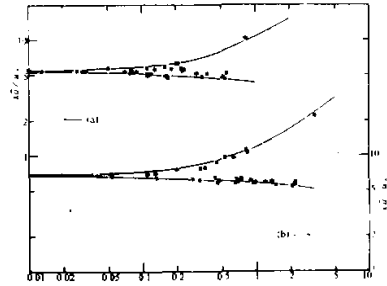


图 1 Kansas 实验无因次风速 $\kappa \bar{U}/u_*$ 随 z/L 的变化

黑点为稳定条件, 圆点为不稳定条件

(a) 5.66m 高度、(b) 22.6m 高度

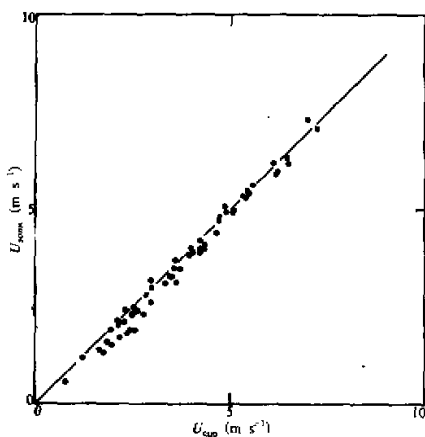
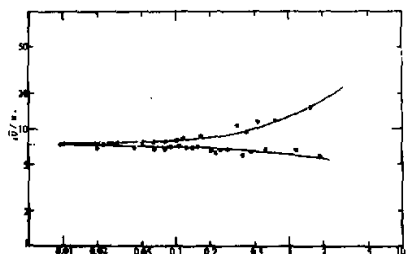
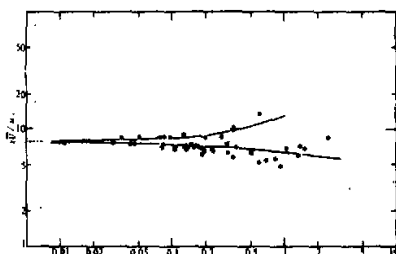


图2 超声风速仪和风杯风速表测得30 min 平均风速的比较

 U_{cup} 风杯风速表测得的风速. U_{sonic} 超声风速仪测得的风速图3 戈壁地面上2.45m高度的 $\kappa \bar{U}/u_*$, 1988年观测资料, $\kappa \bar{U}/u_*$ (中性值)=7.50

符号同图1

图4 戈壁地面上2.45m高度上的 $\kappa \bar{U}/u_*$, 1990年观测资料, $\kappa \bar{U}/u_*$ (中性值)=7.70

符号同图1

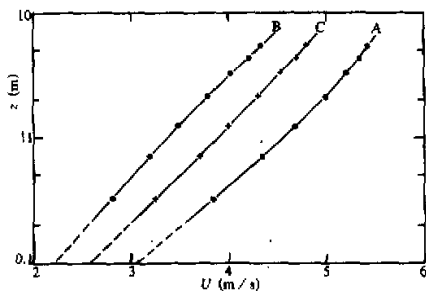
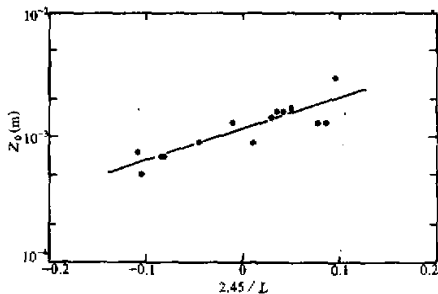


图5 近中性条件的平均风速廓线

(a) 近中性偏不稳定的6次观测平均 $2.45/L = -0.0725$,(b) 近中性偏稳定的8次观测平均 $2.45/L = +0.053$,

(c) 以上14组的总平均

图6 近中性风廓线确定的表观粗糙度 z_0 由 $|2.45/L|=0$ 确定 $z_0 = 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$

($0.1 > z/L > 0, z = 2.45\text{m}$) 的平均廓线及总平均廓线. 由总平均廓线最低 4 层数据按对数律拟合得到 $z_0 = 1.1 \times 10^{-3}\text{m}$. 如果对个别廓线都这么作, 即 z_0 的表观值随稳定度的变化如图 6 所示. 简单线性拟合得 $z_0 \approx 1.2 \times 10^{-3}\text{m}$. 以上数值符合仅用单高度超声风温仪观测数据值的推算.

应当指出, 我们所遇到的戈壁下垫面粗糙度小, 于是湍流切应力通常也较小. 另一方面, 地表的加热冷却鲜明, 日夜稳定度的过渡转变突然, 这样一来既对风廓线的观测要求相当苛刻, 又很难获得足够数量的近中性廓线. 例如图 5 和图 6 所含的 14 组资料中很接近中性的仅有 2 组, 用于确定 z_0 的随机性很大. 其它各组廓线按稳定度呈上凸或下凹形状, 不适于单独用来确定 z_0 , 这时利用单一高度的平均风速和湍流数据推算 z_0 可以吸收较宽稳定度范围的资料, 一定程度上克服了传统廓线方案的困难.

四、讨 论

采用所述方法计算 z_0 的误差取决于无因次风速 $\kappa \bar{U}/u_*$ 的精确度. 若只用 $\kappa \bar{U}/u_*$ 的中性值进行推算, 由(1)或(2)式发现 z_0 的相对误差为

$$\frac{\delta z_0}{z_0} = - \frac{\delta M}{M} \ln \frac{z}{z_0}, \quad (6)$$

这里 $M = \kappa \bar{U}/u_*$ 的中性值. 当 z/z_0 值处于 100 — 1000 之间, 10% 的无因次风速误差将产生 z_0 的误差达 46% — 70%. 因此所建议的方案要求 $\bar{U}/u_*$ 有较高的精确度. 从当前的技术情况来看, 在细心的实验中采用超声风温仪测定 $\bar{U}/u_*$ 的系统误差控制在 5%, 甚至 3% 以内是可以做到的. 非系统性误差较难控制在这样的限度内, 但可以通过多次测量值消除. 当然, 探头或支架对气流的干扰, 取样长度不合适, 探头调平不理想及均匀性平稳性不好的数据都应在排除之列.

和 $\bar{U}/u_*$ 一样, Von Karman 常数的取值对 z_0 有实质性影响. 到目前为止 κ 的大小尚有争议, 较共同的意见是 κ 的最可几范围是 0.35 — 0.41. 若取其中间值 $\kappa = 0.38$, 可能的变化范围为 $\pm 8\%$, 由此导致 z_0 估值的系统误差相当可观. 所幸的是误差分析表明, 如果所确定的粗糙度是用于从单高度风速和两高度的气象要素差计算湍流切应力(动量通量)和被动属性通量, κ 值和 z_0 值成对使用, 那么产生的误差尚可以接受. 例如, 在现实可能情况下 u_*^2 的相对误差不超过 κ 的相对误差 $\delta\kappa/\kappa$. 近中性和稳定条件下湍流感热通量或潜热通量的相对误差一般也只与 $\delta\kappa/\kappa$ 相当, 但在很不稳定条件下可达 $\delta\kappa/\kappa$ 的 2.5 倍左右, 即约 $\pm 20\%$, 按目前的技术水准衡量尚算在允许范围之内.

五、结 论

由于湍流涨落测定技术的进步和普及, 可以采用诸如超声风温仪这类仪器的观测数据确定地面粗糙度, 从而避免多层风速观测的麻烦. z_0 的精确度与 Von Karman 常数的取值有关. 在有争议的 κ 值范围内 z_0 的确定值不影响切应力的实用估算, 但在很不稳定条件下湍流感热通量和其他属性通量的误差会稍大些.

此方法应用于 HEIFE 实验区的平坦戈壁表面, 发现其粗糙度在 $1.1 \times 10^{-3} - 1.5 \times 10^{-3} \text{m}$ 之间, 与高质量风廓线资料的确定值相符.

参 考 文 献

- [1] McBean, G. A., 1979, The planetary boundary layer, WMO Technical Note No. 165, WMO, Geneva, 148.
- [2] Izumi, Y., Kansas, 1971, 1968 Field Program Data Report, AFCRL Research Report No. AFCRL-TR-72-0041, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford MA, 79.
- [3] Businger, J. A., J. C. Wyngaard, Y. Izumi and E. F. Bradley, 1971, Flux profile relationships in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 181 — 189.
- [4] Bradley, E. F., 1971 The effect of thermal instability on the drag coefficient measured close to the ground, *Agri. Meteorology*, 1971, **9**, 183 — 190.
- [5] Wieringa, J., 1980, A revolution on the Kansas mast influence on measurements of stress and cup anemometer overspeeding, *Boundary Layer Meteorology*, **18**, 411 — 430.
- [6] 胡隐樵, 奇跃进, 杨选利, 1990, 河西戈壁(化音)小气候和热量平衡特征的初步分析, 高原气象, **9**, No. 2, 113 — 119.
- [7] 王介民, 刘晓虎, 祁永强, 1990, 应用涡旋相关方法对戈壁地区湍流输送特征的初步研究, 高原气象, **9**, No. 2, 120 — 129.
- [8] 光田宁, 1988, 中日合作地面 — 大气相互作用研究计划, 天气, **35**, 501 — 505 (日文)
- [9] Hayashi, T., 1987, Dynamic response of a cup anemometer, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **4**, 281 — 287.

An Independent Method to Determine the Surface Roughness Length

Chen Jiayi

(Dept. of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Wang Jiemin

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

Yasushi Mitsuta

(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan)

Abstract

A technique for independent evaluation of surface roughness length has been suggested. This approach only uses mean wind speed and simultaneous measurement of turbulent fluxes at a single level without the need for wind profile data. It was checked at first using the data of the Kansas Experiment. Inter-consistent z_0 derived from 5.66m and 22.6m data has been obtained and is in excellent agreement with that derived from wind profiles. The technique was applied for determining the z_0 of the Gobi desert in the HEIFE area basing on the sonic anemometer-thermometer data collected during 1988 Pilot Observation Period. The estimate has been repeatedly conducted using the data collected in 1990 and again a value of z_0 was obtained which is consistent with the value derived from wind profiles. The estimation of the surface roughness for the Gobi desert ranges from $1.1 \times 10^{-3} \text{m}$ to $1.5 \times 10^{-3} \text{m}$. Analyses of the errors in z_0 and the resulting effect in practical estimate of turbulent fluxes are given.

Key words: Surface roughness; Turbulent fluxes; Gobi desert.