

湍流和横风切变相对效应的风洞扩散实验研究^{*}

安 维 朴

(北京大学力学系)

提 要

本文详述了一个具有横风切变效应的风洞实验新技术,实验结果表明,如果风向在地面上随高度以 $0.02(^{\circ})/\text{m}$ 变化,当进行扩散模拟实验时,若原型长度尺度大于6 km时,忽略罗斯贝数将会导致严重的误差。

一、引 言

在大气边界层内风速随高度增加,风向逐渐向右偏转,烟云在这种切变的流场中,当运行到某一距离后,不仅使烟云有向前倾斜的趋势,而且使横风向的扩散速率亦大大增强。前者的影响在大气边界层风洞中是不难实现的,而后者影响则由于目前的风洞设备不具有这种模拟的能力,因此现在所进行的一些扩散试验都被局限在小尺度的范围内,成为了风洞进一步开发的一大障碍。为适应当前广泛开展的中尺度扩散研究工作,应力图在这方面探索一些新的实验技术,以便将风洞的污染扩散试验推广到中距离的范围内,这显然是一件非常有意义的工作。

在地球表面附近,大气运动方程可简化为下式

$$\begin{cases} fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \\ -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial v}{\partial z} \right) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

当到某一高度之后,地面的摩擦影响将可忽略不计,并取地转风沿 x 轴方向,于是地转风 V_g 具有如下的形式

$$V_g = -\frac{1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

而在地转风高度以下,其解则可化为

$$\begin{cases} u(z) = V_g(1 - e^{-\xi} \cos \xi) \\ v(z) = V_g(e^{-\xi} \sin \xi) \end{cases} \quad (3)$$

^{*} 本文于1985年4月27日收到,1986年5月28日收到最后修改稿。

其中 $\xi = z\sqrt{f/2\kappa}$, $f = 2\omega\sin\varphi$ 称柯氏参数。

由上面分析可知,地转风与等压线平行,地面风与等压线有一交角,并且可表为

$$\operatorname{tg}\theta = v/u \quad (4)$$

因这一交角与地面的摩擦力有关,陆地上约为 $35^\circ-45^\circ$,海面上约为 $15^\circ-20^\circ$ 。

当然风向的偏转在山区亦可能由于地形的变化所引起,这种局地的影响在风洞模拟试验中是不难实现的,而由于柯氏力作用所引起的风向偏转到目前为止在风洞模拟试验中还没有解决。

设想在近地层中,如有一污染源从某一高度释放出来,烟云不仅受到湍流的作用,而且还受到横风切变的影响,显然,在不具有模拟柯氏力的环境风洞中,所得到的远距离扩散参数必然小于现场实测值。

鉴于上述原因,如能在普通的风洞中采取一些相应的措施,使风向沿高度发生偏转,就有可能将试验范围推广到中尺度距离上。所以实现风向偏转是解决这一问题的关键所在,因为风速沿高度变化的问题, *Counihan*^[1]早有实验结论,在这里就不必更多的引证了。

二、尺度问题的分析

进行物理模拟通常有许多相似准则数应保证风洞与现场的值相等,有关这方面的问题在很多文献中已作了详尽的讨论^[2],但需要值得提出的是在进行风洞扩散实验研究时,忽略偏转力影响时的原型罗斯贝(Rossby)数应取多大才合理。在一般的风洞模拟实验中都假定罗斯贝数 $R_o \gg 1$,所以旋转作用对于流体运动的影响甚小,故可忽略不计。现在的问题是:

1. 当旋转的作用变得明显时,扩散实验能否在风洞中进行模拟;
2. 短距离的扩散实验是否就可以完全忽略柯氏力的影响。

为了能对所提出的这些问题作出某些定量的估算,关键还在于找到在什么距离上横风切变的影响与湍流扩散相比已大到不能忽略的程度。

罗斯贝数是表示惯性力与柯氏力之比

$$R_o = \frac{u}{\Omega L} \quad (5)$$

一个接近无穷大的 R_o 数在模型中是能自动得到满足的,因此作为模拟的一个相似判据亦就被略去了。但这一相似判据不同的模拟工作者却有着不同的结论^[3], *Cermak* 等人甚至提出只要水平的典型尺度小于 150 km 时, R_o 数一般就可从相似性要求中略去。从动力气象学角度来看这一运行距离已属中尺度范围,若用典型的数据作一估算 R_o 数近似等于 1,这亦可能就是提出这种尺度的一个依据。 *Snyder* 则认为这一相似判据,实际上是建立在长度尺度基础上,而不是建立在 R_o 数本身的基础上。因而特征尺度是决定 R_o 数的主要因素,因此,他提出在中性或稳定的条件下,长度尺度大于约 5 km 的原型扩散问题,罗斯贝数 R_o 必须予以考虑。事实上从污染气象学的角度上来看,这种看法亦是有一定道理的。后来 *Pasquill* 根据野外观察的资料提出了包括横风切变在内的 σ_y 近似

估算公式

$$\sigma_y^2 = [\sigma_A x f(x)]^2 + 0.03 \Delta\theta^2 x^2 \quad (6)$$

其中 $\Delta\theta$ 是风向偏转角在烟云所占气层内的总变化, σ_A 是风向脉动的标准偏差, $f(x)$ 是距离的某一函数。此公式可用到 100 km 的范围内, 因而把扩散参数的估计推广到了中距离的尺度上。

上式右边的第一项是横风湍流扩散项, 第二项是横风切变项, 于是(6)式又可改写为

$$\sigma_y^2 = \sigma_i^2 + \sigma_z^2 \quad (7)$$

Pasquill 进一步指出^[4], 当 $\sigma_z/\sigma_i = 0.66$ 时, 横风切变的影响必须给予考虑。显然扩散距离越远, 烟云层越厚, 风向切变的影响就越显著。为了适应现场测试的实际情况, 我们对公式(6)的第二项作某些必要的修正, 于是 σ_y 就化为如下形式

$$\sigma_y^2 = [\sigma_A x f(x)]^2 + c(\sigma_z \theta \pi x / 180 H)^2 \quad (8)$$

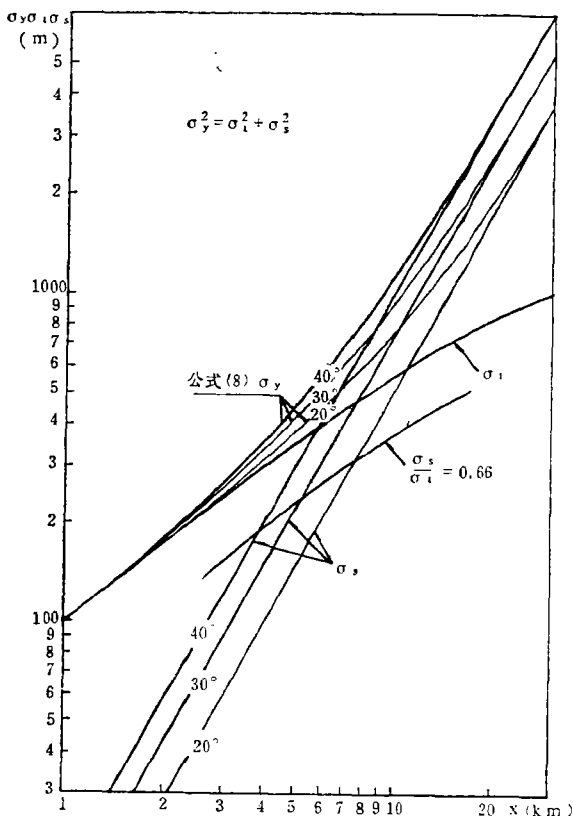


图 1 不同风向的 σ_y 值

式中 $\sigma_z = bx^2$, θ 为地转风相对于地面风的偏转角, H 为该处的边界层厚度, c 为系数。在中性条件下, 可根据该模式求得不同风向切变时 σ_y 估算值, 详见图 1, 其中 $c = 0.5$ 。

从图上可以看到不同的风向偏转角(20°—40°)对 σ_y 有着不同的影响, 切变效应变得显著的时候是与风向偏转角有关的, 当偏转角 $\theta = 40^\circ$ 时, 所对应的距离只有 4 km, 此时 $\sigma_z/\sigma_i \approx 0.66$, 当 $\sigma_z = \sigma_i$ 时亦只有 6 km。由此可见风向偏转角越大切变起作用的距离越近, 若以 $\sigma_z/\sigma_i = 1$ 作为判据, 其变化范围亦在 6—12 km。

综上所述不难看出, 中距离扩散的横风切变效应显然是不应该忽略的因素; 即使是短程扩散, 当偏转角较大时横风切变的影响亦必须认真加以考虑。在不具有模拟柯氏力的风洞中可参照图 1 所给出的模式作出必要的修正。

本文的目的在于探索一种新的实验技术, 以解决横风切变对湍流扩散所造成的影响, 同时反过来亦可通过实验结果进一步验证上面所提出的模式是否正确。

三、实验简介

1. 风向偏转发生器

由于风向偏转所产生的切变效应在烟云扩散中是如此的重要,所以在风洞上如能复制这种流动现象不仅使横风向扩散更加符合实际,而且有助于对这种作用机制深入研究。事实上,地球旋转所引起的一些流动现象,无非是使风向沿高度发生了向右偏转的趋势,如果我们在普通的风洞中架设一组风向偏转发生器,就有可能达到上述的效果,实验结果表明,这一设想是成功的。

风向偏转发生器的具体设计要求,应根据所模拟区域的尺度比例而定,边界层厚度和它的偏转角度可根据现场的实测数据来定,当采用几何缩尺比 $1/4000$ 时,那末,30 cm 高的偏转发生器将模拟 1.2 km 的边界层厚度,假定它的风向偏转角取 20° ,则每层 6 cm 高的偏转器共需五层,最后一层为地转风导向层,每层偏转 4° 。图 2 所示是风向偏转发生器的布置安装图。

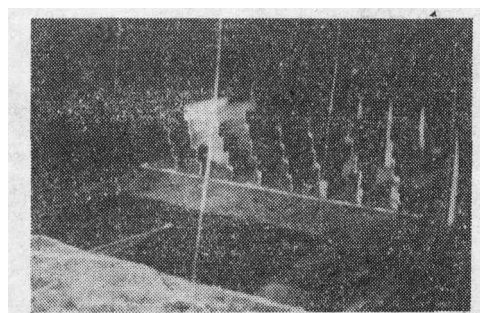


图 2 风向偏转发生器

2. 实验方法及仪器设备介绍

本次实验是在北京大学力学系一号环境风洞上完成的,在这次实验中使用了热偶风速仪、丹麦的热线风速仪进行了速度剖面,湍流度剖面、自相关与功率谱的测量。同时为了显示气流的偏转方向,我们采用烟线法在下风向不同的剖面上作了水平方向气流偏转角度的测量。另外使用多次曝光的办法拍摄了烟云轴线偏转的流动状态,当然这些照片亦可用于计算扩散参数。图 3 所示为

该项实验的流程图。

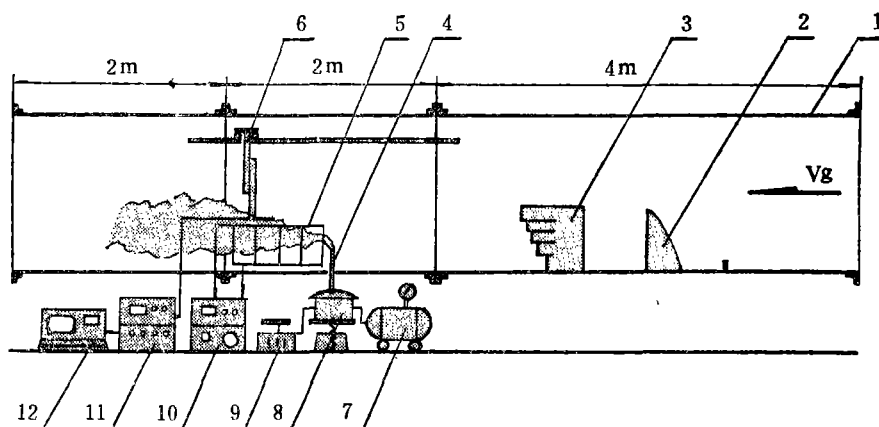


图 3 实验流程图

- | | | |
|---------|--------|----------|
| 1 风洞试验段 | 5 显示烟线 | 9 变压器 |
| 2 椭圆片 | 6 坐标架 | 10 烟线控制器 |
| 3 风向偏转器 | 7 压气机 | 11 热线电桥 |
| 4 模型烟囱 | 8 发烟罐 | 12 微计算机 |

3. 实验结果

1) 风向偏转效应

图 4 所示是由风洞顶部经多次曝光所拍摄的烟云照片,高度 $z=12$ cm, 烟云轴线大

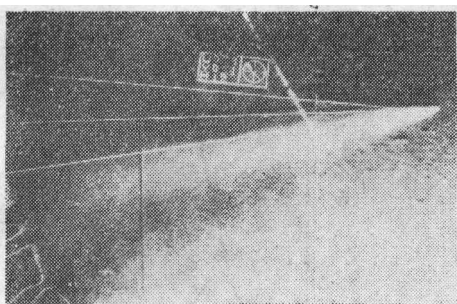
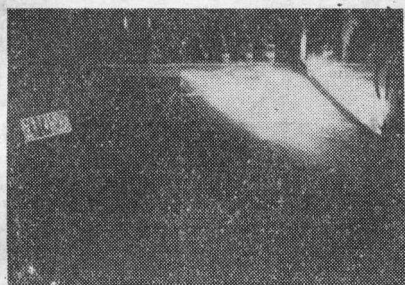
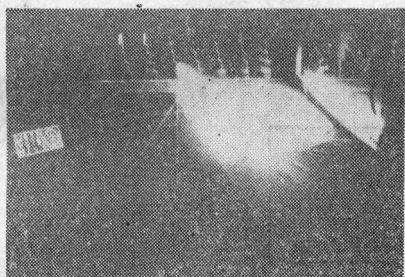


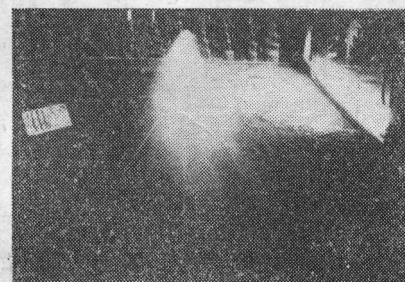
图 4 烟轴偏转流态



z = 4 cm



z = 16 cm



z = 24 cm

图 5 烟云轴线随高度的变化

约偏转 15° 。图 5 所示是由风洞迎风面摄取的烟云照片,从照片上可以明显地看出,随着模型烟囱的向上提升,烟云轴线逐渐恢复到地转风的方向。而且距烟源远处的地方,流动亦具有稳定的状态,同时从烟线法所得到的风矢图亦证明了这一点。

2) 风速剖面 and 湍流度剖面

在下风向的三个不同距离上进行了速度剖面和湍流度剖面的测量,实验风速按 Némoto^[6]相似准则处理。总的来看实验点子的离散度并不很大,速度剖面具有一定的规律性,幂指数 α 平均值约等于 0.29,属城郊类型,详见图 6。图 7 所示是 Ekman 螺线风速分布图,实验值高风速偏离较大,低风速基本相符。

3) 湍流积分尺度的测定

本实验对由热线风速计所采集的动态信号,经 A/D 变换器输入到微计算机中,通过所设计的软件进行了自相关系数的测量,根据实验所获得的数据进行回归分析,得到回归方程后便可求出它的积分尺度,折合现场约等于 104 m,回归拟合曲线详见图 8。

4) 扩散参数的计算

根据烟云在垂直和水平方向扩散角度与湍流度固有的关系,我们通过测量得到了脉动速度在这两个方向上的标准偏差,并依据 Taylor 统计理论所导出的近距离和远距离扩散参数的表达式

$$\begin{cases} \sigma_y(t) = \sqrt{v'^2} t & t \leq T_i \\ \sigma_y(t) = \sqrt{v'^2} \sqrt{2T_i t} & t > T_i \end{cases} \quad (9)$$

便可求出不同扩散时间 t 的水平方向的扩散参数。显然由第二式所作出的估算,并没有包括横风切变的影响,因为它只考虑了湍流扩散的作用。在此情况下采用 Pasquill 的近似表达式会更加符合现场的实测值。但对风

洞而言就不仅是个模式的选择问题了,而是它本身并不存在横风切变的机制,如图 9(b)中由虚线带所标出的以往风洞的测量数据就清楚地说明了这一点。如果我们由 Taylor 所导出的公式用固定点的脉动风速估算本实验的扩散参数,亦大体落在了虚线带的附近

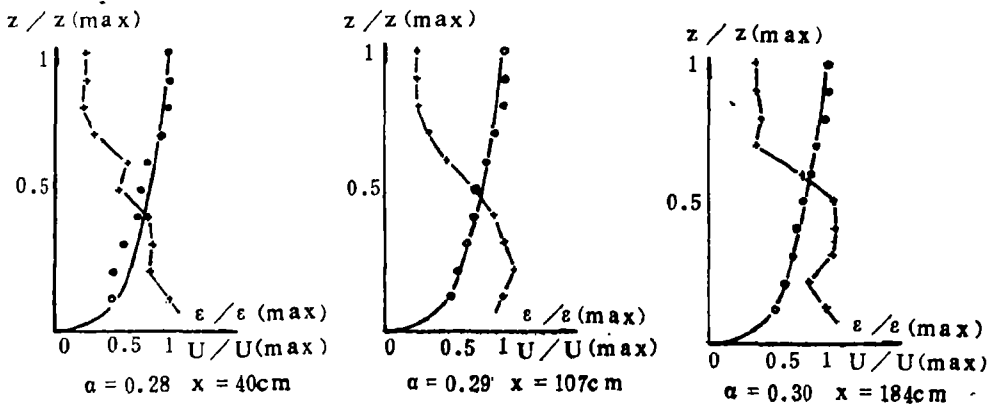


图 6 速度剖面 and 湍流度剖面

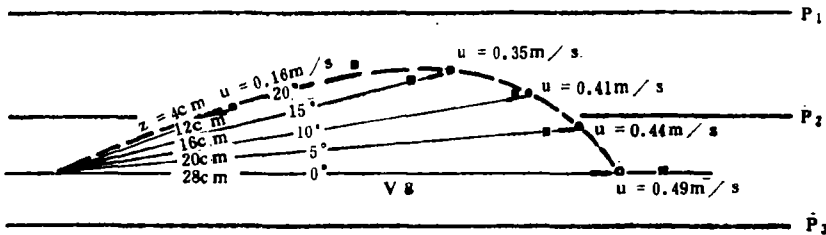


图 7 爱克曼螺旋风速分布

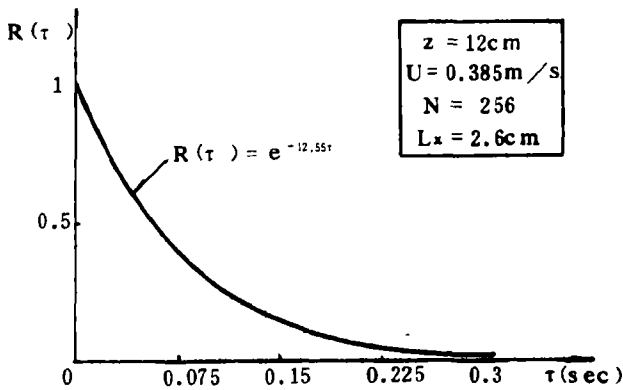


图 8 自相关测量值的回归拟合曲线

若采用实测下风向烟云宽度的办法进行计算则与 Pasguill 的近似公式相符,表明风向偏转发生器确实起到了横风切变的效应。

以风向偏转 20° 的实验结果来看, σ_z 基本上与 $P-G$ 曲线相符(图 9 a),而 σ_z 在 4 km 以下时则与 Pasguill 所给出的公式一致,6 km 的实测值就是一明证,详见图 9(b)。

作为一般的预评价来讲,可选用合适的模式进行预测,但应根据不同的偏向角作出修正,而当地形变得复杂时,切变对扩散的影响就不像平坦地形那样简单,使用本文所提供的方法,将会受到更好的效果。

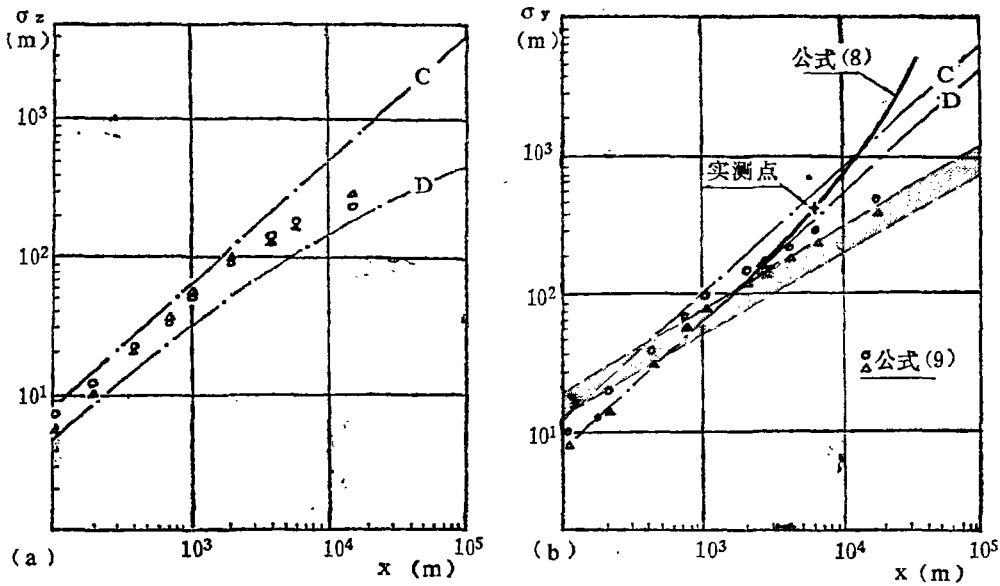


图 9 扩散参数实测值与计算值比较图

四、对本项实验的展望

1. 随着对中距离扩散的研究工作的展开,横风切变的影响必将为人们所重视。鉴于现场实测的困难,扩大风洞的模拟范围显然是一项很有意义的课题,本文在这方面作了一些初步的探索,以求对这项研究工作有所推动。

2. 实验结果表明,利用风向偏转发生器是可以模拟横风切变效应的。如将偏转发生器设计成一种连续可调的多层结构,将会获得更为理想的结果。

3. 从实验所获得的各项结果来看,流场具有大气边界层的特性。通过扩散参数的实测结果表明,本文所提出的切变修正公式是合理的,同时这一实验技术是有发展前途的。

致谢: 参加本实验的还有沈静燕、丁润田、庞岩,在实施本方案的过程中叶文虎同志也给予帮助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Counihan, J., A method of simulating a neutral atmospheric boundary layer in a wind tunnel, AGARD Conf. Proc. 48, 14.1—14.13, 1969.
- [2] Cermak, J. E., Laboratory simulation of the atmospheric boundary layer, AIAA J., 9 1746—1754, 1971.
- [3] Snyder, W. H., Similarity criteria for the application of fluid models to the study of air pollution meteorology, Boundary-Layer Meteorology, 3, 117—120, 1972.
- [4] Pasquill, F., Atmospheric Diffusion 176—178 New York, 1983.
- [5] Nemoto, S., Similarity between natural wind in the atmosphere and model wind in a wind tunnel, Papers in Meteorology and Geophysics, 13(2), 171—193, 1962.

**A WIND TUNNEL EXPERIMENTAL STUDY
ON THE RELATIVE EFFECT OF TURBULENCE
AND CROSSWIND SHEAR IN THE
DISPERSION OF AIR POLLUTANTS**

An Weipu

(Department of Mechanics, Peking University)

Abstract

In this paper, a new experimental technique with crosswind shear effect is described in detail. If the rate of wind directional variation from the earth surface is about $0.02(^{\circ})/\text{m}$, results of this experiment demonstrate that the neglect of the Rossby number can lead to serious errors, as the modeling of diffusion in a prototype with length scale greater than six kilometers.