

天津市 250 m 低层大气风廓线模式的试验研究

刘学军 吴丹朱 马富春

(天津市气象科学研究所)

提 要

本文用天津 250m 气象塔的风廓线观测资料, 检验了 M-O 相似理论的近地层风廓线模式. 结果认为, 在中性和不稳定条件下, 使用近地层计算得到的 L 和 U_* , M-O 相似模式可以较好地推广应用. 对稳定层结, 用 Yokoyama 等人提出的 U_* 一级近似表达式替换常通量层公式中的相应量后, U_* 和 $\partial u / \partial z$ 之间的关系在风向随高度没有明显偏转的层次中仍然成立并且至少可推广应用到 120m.

关键词: 天津; 气象塔; 风廓线模式; 相似理论.

一、引 言

随着现代化工业和城市建设的迅速发展, 高烟囱和高层建筑物的高度已超出近地层的高度范围, 因此在大气污染和高耸建筑物工程设计等应用领域中, 均涉及到较高高度的风速计算. 作为实际应用的计算方法, 在定常、均匀条件下, 除一般常用的乘幂律 ($u = u_1 (z/z_1)^m$) 外, 近些年许多研究者都利用高塔观测资料对风廓线理论进行了研究, 例如: Carl, Yamamoto, 叶卓佳、苗曼倩等人, 其中 M-O 相似理论是一种主要的研究方法. 本文把 M-O 相似理论的近地层风廓线模式推广应用到 250m 低层大气的风廓线计算, 并与天津气象塔的实测资料进行比较, 可得

$$AE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i, \quad (1)$$

$$DE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - AE)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

其中

$$E = |(u_{it} - u_{\pi}) / u_{\pi}|$$

n : 计算风廓线总数, i : 代表每根风廓线.

1989年4月17日收到, 12月20日收到修改稿.

分别给出了计算值与实测值之间的平均相对误差和标准差。研究了 M-O 相似模式的适用范围,并同乘幂律的计算结果作了比较。

二、观测点地形特征及实测资料

天津气象塔位于市区南部边缘。塔中心 300m 半径的水平距离内,不同方位的建筑物高度参差不齐,一般为 3—30m。因此在不同方位上的粗糙度 z_0 有明显变化。本文选用了 50 根不同风向的近地层风速梯度观测资料,使用 20, 30, 40, 60m 的观测值按对数律拟合计算出不同方位的 z_0 值列于表 1。

表 1 不同方位的 z_0 值

风向	z_0 值的变化范围(m)	z_0 平均值(m)
NW—NE	0.8—1.5	1
NE—E	0.5—0.1	0.3
E—SW	0.1—0.3	0.1
SW—NW	0.3—0.8	0.5

气象塔高度为 250m,设有 15 层观测平台(高度分别为 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 250m)。塔体结构和平均风、温测量系统均同北京 325m 气象塔^[1]。每小时观测一次,取 10 分钟平均值。本文选用资料为 1985 年 12 月 1 日—26 日的逐时平均风、温梯度观测资料。资料选取原则是:

(1) 风向随高度没有明显单调偏转,用 20m 和 60m 二层的实测值计算出梯度理查逊数 R_i , R_i 取对数差分式

$$R_i = \frac{g}{T_0} \left(\frac{\Delta T}{\sqrt{z_1 z_2} \ln \frac{z_2}{z_1}} + r_d \right) \times \left(\frac{\sqrt{z_1 z_2} \ln \frac{z_2}{z_1}}{\Delta u} \right)^2, \quad (3)$$

其中 $\sqrt{z_1 z_2}$ 是几何平均高度, T_0 是由温度廓线外推的地面温度。按 R_i 数把廓线分类成不稳定层结 ($R_i \leq -0.1$), 中性 ($-0.1 < R_i < 0.1$) 和稳定层结 ($R_i \geq 0.1$)。

(2) 再根据干绝热线和温度廓线判定至 250m 稳定度是否一致,若基本一致则作为资料样本选取。

为尽量满足均一地形条件,计算时按风向扇面取表 1 中的 z_0 平均值。

三、风廓线模式

根据 M-O 相似理论,在均匀、定常条件下,近地层无量纲风速梯度可表示为

$$\frac{k_z}{u_*} \frac{\partial u}{\partial z} = \varphi_m \left(\frac{z}{L} \right), \quad (4)$$

其中 k 为卡曼常数(本文取 0.4), u_* 为摩擦速度, 作为一级近似, u_* 在近地层可视为常数, φ_m 是某一通用函数, 中性时 $\varphi_m = 1$. 对非中性层结, 许多研究表明^[2] φ_m 有如下形式

$$\varphi_m = \left(1 - r_m \frac{z}{L}\right)^{-\frac{1}{4}} \quad L < 0, \quad (5)$$

$$\varphi_m = 1 + \beta_m \frac{z}{L} \quad L > 0, \quad (6)$$

其中 L 是 M-O 稳定度长度, γ_m, β_m 是由实测值确定的经验常数. 参考 Businger 等人的实验结果, 并通过天津气象塔 40m 以下的实测资料验证, 本文取 γ_m 和 β_m 分别为 16 和 4.7. 由于没有湍流通量的测量, 所以 L 和 u_* 按照苗曼倩等人^[3] 验证给出的方法计算. 风廓线计算公式如下:

(1) 中性层结

Thuillier 和 Lappe 指出, 在均匀条件下, 从地面至 150m 高度内的风廓线与对数律之间差别不大, 后为观测事实证实^[4], 取 $\varphi_m = 1$ 对(4)式从 $z_0 - z$ 积分得对数律

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0}. \quad (7)$$

(2) 不稳定层结

Panofsky 认为^[2], 在不稳定条件下, 至少可以把 M-O 相似概念无多大困难地推广到 150m 高度. 因此本文仍视 u_* 为常数直接使用(5)式代入(4)式从 $z_0 - z$ 的积分结果

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) + \psi_m \left(\frac{z_0}{L} \right) \right], \quad (8)$$

其中

$$\psi_m = \ln \left[\frac{1+x^2}{2} \left(\frac{1+x}{2} \right)^2 \right] - 2\text{tg}^{-1}x + \frac{\pi}{2},$$

$$x = \left(1 - 16 \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{4}} = \varphi_m^{-1}.$$

(3) 稳定层结

一般说来, 稳定层结时的风廓线理论还不能令人满意. 对常通量层, M-O 相似模式为

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{kz} \left(1 + 4.7 \frac{z}{L} \right). \quad (9)$$

由于稳定层结抑制了湍流, M-O 相似模式的使用受到限制, 但许多近地层风速梯度观测资料仍证实了(9)式的可靠性. 对常通量层以上的低层大气, Yokoyama 等人^[5] 利用 313m 高塔的湍流特征量实测值对湍流结构作了研究, 并验证了他们推广应用 M-O 相似概念提出的动量通量 u_* 随高度变化的一级近似表达式

$$u = u_{*0} \left(1 - \frac{z}{h} \right)^n = u_{*0} \zeta^n, \quad (10)$$

其中 h 为大气边界层厚度, u_{*0} 为地面值.

Yamamoto 等人^[6]的研究认为, 用(10)式替换(9)式中的常量 u . 后, (9)式对整个稳定大气边界层仍然适用. 在风向随高度没有明显单调偏转的层次中, 若忽略科里奥力的影响, 只考虑 u 随高度的变化, 由(9)式和(10)式得微分方程

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_{*0}}{kz} \left(1 + 4.7 \frac{z}{L} \right) \left(1 - \frac{z}{h} \right)^n. \quad (11)$$

为了便于计算, 参考Yamamoto 等人的试验结果, 取 $n=1/2$ 对(11)式从 $z_0 = z$ 积分并利用 $z_0/h \ll 1$ 的条件得到

$$u = \frac{u_{*0}}{k} \left[\ln \frac{z}{z_0} + 2 \left(\zeta^{\frac{1}{2}} - \ln(1 + \zeta^{\frac{1}{2}}) - 0.31 \right) + 3.13 \frac{h}{L} (1 - \zeta^{\frac{1}{2}}) \right], \quad (12)$$

其中 $\zeta = 1 - z/h$. 当计算高度 $z > h$ 时, (12)式无定义. 根据 Mohin 和 Clarke 提出的稳定大气边界层高度诊断方程, 在本文的计算中, 当 $L \geq 10$ 时, h 由下式确定

$$h = 0.6 (k u_{*0} / f) \quad (13)$$

其中 f 为科里奥利参数(本文取 10^{-4}). 当 $L < 10$ 时, 用(13)式计算得到的 h 值较小, 因而限制了(12)式的可计算范围. 考虑在实际应用中常使用位温逆温高度 h_θ 和风廓线中最低明确出现最大风速值的高度 h_u 来定义 h , 所以分别对资料月中 $L < 10$ 时的风、温实测廓线进行统计, 权重平均结果为 $\overline{h_\theta} = 126.6 \text{ m}$, $\overline{h_u} = 118.2 \text{ m}$. 其中 h_θ 为第一次出现 $\partial\theta/\partial z \approx 0$ 的高度(本文取 $\Delta\theta/\Delta z < 10^{-4}$). 由此确定 $L < 10$ 时 h 取特征高度 120 m .

四、计算结果

计算过程分为两步, 首先使用(7), (8), (9)式对不同稳定度时 40 m 以下的层次进行计算并与实测值比较, 以检验计算公式在较低层次中的可靠性, 结果列于表 2.

表 2 40 m 以下计算值与实测值比较

$z (\text{m})$	中 性				不 稳 定			稳 定			
	10	20	30	40	10	30	40	10	20	30	40
AE (%)	1.3	4.3	4.1	3.9	8.4	3.3	3.5	5.9	7.3	5.7	5.6
DE (%)	0.9	2.9	3.7	3.5	4.4	1.9	2.1	4.8	8.8	6.8	7.1

由表 2 可知,不同层结的计算值在 40m 以下的层次中均和实测值吻合较好.在此基础上继续向上计算,结果如下:

(1) 中性层结

$|R_i| < 0.1$ 的廓线总数为 72 根,整层稳定度一致的有 59 根,占总数 82%.使用其中 20 根计算出平均 u_* 值和幂指数,分别代入对数律和乘幂律对另一组(39 根)廓线进行计算,比较结果列于表 3

表 3 中性时计算值与实测值比较

$z(m) \rightarrow$	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	250	公式
AE(%)	4.14	4.77	5.96	5.95	6.23	6.58	7.58	9.11	10.2	11.7	14.9	(7)
	3.55	4.49	6.35	7.54	8.65	10.4	11.2	12.7	13.8	15.3	17.8	*
DE(%)	5.38	5.44	5.33	5.27	5.23	5.30	6.04	7.46	8.68	9.96	12.1	(7)
	2.38	2.60	4.17	5.26	6.06	7.04	8.17	9.21	10.0	10.9	12.6	*

* 乘幂律, $m=0.273$.

(2) 不稳定层结

$R_i < -0.1$ 的廓线总数为 105 根,整层稳定度一致的有 87 根,占总数 83%.使用其中 30 根计算出平均 u_* 和幂指数,分别代入(8)式和乘幂律对另外 57 根进行计算,比较结果列于表 4

表 4 不稳定时计算值与实测值比较

$z(m) \rightarrow$	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	250	公式
AE(%)	3.62	3.67	3.96	4.82	5.93	7.46	7.49	8.09	8.16	8.79	9.99	(8)
	3.93	7.04	7.98	9.03	9.85	11.2	11.3	11.4	11.5	12.0	13.0	*
DE(%)	3.21	2.70	3.00	3.63	4.25	4.78	5.33	5.86	6.36	7.05	8.38	(8)
	3.17	4.94	5.74	6.56	7.01	7.44	7.71	8.13	8.32	8.67	9.46	*

* 幂次律, $m=0.167$.

(3) 稳定层结

除去风向随高度有明显单调偏转的资料, $R_i > 0.1$ 的廓线总数为 79 根,整层稳定度一致(包括单层贴地逆温高度小于 250m)的廓线有 62 根,占总数 78%.其中 $L \geq 10$ 的有 32 根, $L < 10$ 的有 30 根.利用(9)式计算出的 u_* 作为 u_{*0} 代入(12)式自 40m 向上计算,并从 $L \geq 10$ 和 $L < 10$ 的廓线中各抽出 10 根求出幂指数代入乘幂律计算,比较结果列于表 5 和表 6.

计算发现,当 $L \geq 10$ 时,风速计算值对 h 的精度要求并不高,当 $L < 10$ 时,风速计算值与实测值吻合较好的高度范围稳定的趋于 120m,说明取 h_0 或 h_s 的平均高度作为 h 的特征值是合理的.

表 5 稳定时 ($L \geq 10$) 计算值与实测值比较

z (m)→	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	250	公式 ↓
AE(%)	2.48	4.85	7.18	9.86	9.96	9.68	10.8	11.1	11.9	14.5	18.0	(12)
	7.19	10.3	12.6	14.1	15.1	14.3	14.5	15.1	15.6	17.0	19.0	*
DE(%)	2.18	4.21	4.72	6.99	6.36	5.63	6.71	9.81	11.6	13.9	21.8	(12)
	4.48	6.33	8.23	9.70	11.5	10.4	9.26	9.05	9.66	9.88	11.2	*

* 乘幂律; $m=0.525$.

表 6 稳定时 ($L < 10$) 计算值与实测值比较

z (m)→	40	60	80	100	120	公式 ↓
AE(%)	3.58	7.85	10.6	11.0	10.6	(12)
	10.5	16.5	19.5	20.0	18.3	*
DE(%)	2.27	5.09	7.01	7.25	6.56	(12)
	7.4	13.5	15.7	15.6	13.8	*

* 乘幂律

五、结 论

(1) 在中性和不稳定条件下, 使用较低(60m 以下)层次计算得到的 L 和 $\overline{u}$ 值, $M-O$ 相似理论的近地层风廓线模式可以较好地推广应用到 250m 的高度范围.

(2) 在稳定条件下, 对常通量层公式中的 u , 按(10)式进行修正后, $L \geq 10$ 时 160m 以下(12)式的相对误差小于 10%, $L < 10$ 时(12)式可使用到 120m 高度, 所以 $M-O$ 相似模式仍可以推广应用.

(3) 与乘幂律相比, $M-O$ 相似模式的计算精度要高, 并能够在没有湍流通量测量的条件下, 通过模式反映出当地湍流通量的平均特征及下垫面的影响. 与用 Yokoyama 假设的 K 模式通过运动方程导出的风廓线计算公式相比(见文献 [3]), 本文的计算没有考虑科里奥利力的影响以及湍流交换特征, 因此在使用时受到文中的条件限制, 但公式较为简单且满足精度要求, 便于实际应用.

参 考 文 献

[1] 中国科学院大气物理研究所, 1983, 北京 325m 气象塔的测量系统(集刊第 11 号), 科学出版社, 10—13.
[2] D. A. 豪根主编, 李兴生等译, 1984, 微气象学, 科学出版社, 157—162.
[3] 苗曼倩等, 1987, 近地层湍流通量计算及几种塔层风廓线模式的研究, 大气科学, 11, 420—429.
[4] Douglas, M. Carl. et al., 1973, Profiles of Wind and Temperature from Tower over Homogeneous Terrain, *J. Atmos. Sci.*, 30, 788—794.

- [5] Yokoyama, O. et al., 1979, The Vertical Profiles of the Turbulence Quantities in the Atmosphere Boundary Layer, *J. Meteor. Soc. Japan*, **57**, 264 — 271.
- [6] Yamamoto, S. et al., 1979, Observational Study on the Turbulent Structure of the Atmospheric Boundary Layer under Stable Conditions, *J. Meteor. Soc. Japan*, **57**, 423 — 431.

EXPERIMENT STUDY OF THE MODELS OF WIND PROFILES IN 250 M LOWER ATMOSPHERE LAYER IN TIANJIN

Liu Xuejun, Wu Danzhu and Ma Fuchun

(Tianjin Research Institute of Meteorological Science)

Abstract

Using measurements of wind profiles from the 250 m, meteorological tower in Tianjin, models of wind profiles derived from the M – O similarity theory in the ground layer were examined. The results show that using the calculated L and u_* in the ground layer under neutral and unstable conditions, the M – O model can be applied well. For stable stratification, taking the first – order approximation expression of u_* suggested by Yokoyama et al. instead of that in the formula for a constant flux layer the relationship between u_* and $\partial u / \partial z$ is valid for the base in which the wind deflection is not obvious with height, and can be valid up to at least 120 m.

Key words: Meteorological tower; Tianjin; Models of wind profiles; Similarity theory.