

非均匀下垫面上大气边界层研究进展

徐 大 鹏

中国科学院力学研究所, 北京 (邮政编码100080)

提要 非均匀下垫面对大气边界层影响的研究是环境流体力学的重要课题之一。本文综述了这一领域的近期进展。

关键词 非均匀下垫面; 大气边界层; 环境流体力学

大气边界层, 亦称行星边界层, 指自由大气以下直至下垫面(陆面或水面), 厚度一般为二公里的一层大气(该厚度因大气的稳定性而异, 变化范围由几十米到几公里)。它又可分为两层, 一是靠近下垫面的近地层, 其厚度为总厚度的1/10; 另一是近地层以上的混合层。在大气边界层中, 下垫面的性质如表面粗糙度, 温度, 湿度等, 将通过动量、能量和质量的湍流输运严重影响近地层大气, 又由近地层与混合层之间的相互作用影响混合层的大气。

均匀下垫面的大气边界层理论已经比较成熟^[1]。由这些理论我们知道, 除了大气边界层厚度(该厚度决定了大涡的尺度)外, 表面剪应力、表面热性质等也是影响大气边界层的重要因素。当大气流过非均匀下垫面时, 表面剪应力或表面热性质将发生变化, 这些变化通过湍流交换与大气相互作用, 从而使得大气边界层的速度、剪应力廓线、湍流结构、热通量、水汽通量等发生变化。

认识非均匀下垫面对大气边界层的影响, 对于研究风引起的质量迁移(包括工业废气的排放, 土壤、水面的蒸发, 植被的蒸腾, 水-气交换、地-气交换模式, 土壤的剥蚀, 沙的迁移, 粉尘污染物的扩散等气、液、固三态)^[2-6]; 对于研究建筑物的风载、风振、通风和热损失^[7]; 对于风能的利用和开发^[8], 天气预报^[6]; 对于研究城市风场^[8], 从而优化楼群的布局, 预报污染物的扩散; 对于研究城市热岛, 绿洲和湖泊的冷岛效应^[9]等都具有重要意义。同时, 还能使我们从物理上加深对湍流边界层的认识(Clauser曾借用 Maxwell 的黑箱概念描述湍流边界层, 认为通过观察其对不同外界影响的反应, 可以从物理上加深对它的认识)^[10]。因此, 非均匀下垫面上的大气边界层研究, 近年来一直为大气、海洋、气象、水文、土壤物理等学科所重视, 成为环境流体力学中实验、理论分析、数值模拟的重要课题之一。

非均匀下垫面大体上可以分为两类, 一类是地形的起伏变化, 如山丘、峡谷等; 另一类是由一种表面到另一种表面, 如由水面到陆面, 由陆面到草地或森林, 由郊区到城市, 反之亦

然。近年来,对于这两类非均匀下垫面上的大气边界层,尤其是近地层的研究,无论从理论分析,数值模拟,还是观测和风洞实验方面都取得了相当大的进展。总结和回顾这一领域取得的成绩,了解和认识这一领域的现状,对于我们进一步深入开展研究是不无裨益的。

1 复杂地形对大气边界层的影响

1.1 理论分析 Jackson 和 Hunt^[11] 建立了一个绕山丘大气边界层的线性理论。该理论是在 Hunt^[12], Smith^[13] 和 Jackson^[14] 等人的层流理论基础上,借鉴了 Townsend^[15] 的关于扰动湍流剪切层的理论发展起来的。尽管这一理论受一些假定和近似的限制,但是,该理论可以给出解析解,因此计算时间比采用有限差分法至少少 3 个量级^[16],而且,结果被后来的数值计算所验证^[17,18],因此,受到人们的青睐。事实上,近些年的许多工作是在此基础上发展起来的。

Jackson 和 Hunt 理论(以下称 JH 理论)假定了山的坡度(山高与山的水平尺度之比)要小(一般小于 1/5),表面粗糙度是均匀的,来流速度沿铅直方向为对数分布,山丘对流动的扰动量均小于上游未扰动量。类似于层流理论^[13,14],JH 理论把边界层分为无粘外层和粘性内层两层,认为湍流输运过程是在内层进行的,而内层的扰动是由外层决定的压力梯度驱动的。在 JH 理论中,粘性内层的湍流封闭方程采用的是简单的混合长度公式。

JH 理论简单、实用。同时,作为复杂地形对大气边界层影响研究的开创性工作,对后来的研究产生了不可低估的影响。但它还不完善,存在着除该理论本身的假定和近似的限制外的两个缺点。一是该理论给出的结果在壁面附近与观测不符^[18]。这主要是由于 JH 理论假定了粘性内层的对流速度沿铅直方向不变,等于内层高度的气流速度。这一假定远离壁面是正确的,但靠近壁面就不对了。另一个缺点是内外层水平扰动速度不匹配(仅压力匹配)^[20]。

Sykes^[21] 给出了一个三层结构的湍流边界层绕过山丘的渐近理论。这一理论是层流三层结构^[22](triple deck)理论的延拓。但是,由于 Sykes 理论对于扰动进行了线性化处理,因此,该理论没有保留三层结构理论的非线性特点。如果将 Sykes 理论与 JH 理论加以比较,可以发现,两个理论的无粘外层基本上是一致的,不同的是, Sykes 理论把原来 JH 理论的粘性内层又细分为两层。一层是 Reynolds 应力子层,另一层是近壁层。近壁层的引入,克服了上面提及的 JH 理论的第一个缺点,即靠近壁面与观测结果不符的缺点。此外, Sykes 理论中, Reynolds 应力是用二阶封闭方程计算的。

JH 理论由 Mason 和 Sykes^[23](以下称 MS 理论)推广到三维。从而为后来的 Walmsley 等^[24], Taylor 等^[16] 及 Mason 和 King^[25] 的工作奠定了基础。这些工作试图把 MS 理论应用于实际的山丘,而且,对原有的理论作了一些改进,引进了依赖波数的长度和速度尺度。Walmsley 等^[26] 改进了 JH 理论和 MS 理论,使之可以用于表面粗糙度有变化的情形。Beljaars 等^[27] 采用 $k-\epsilon$ 模式替换 JH 和 MS 理论中的混合长度模式,给出了一个混合谱的有限差分法,并且,对不同封闭方程的影响进行了讨论。

为了克服上面提到的 JH 理论的缺点, Hunt 等^[20] 提出了新的四层结构理论。这一理论将原来 JH 理论的无粘外层进一步分成一个无粘外层和一个无粘剪切层。无粘剪切层的引入,解决了内外层水平扰动速度不匹配的问题。类似于 Sykes 理论,新的理论将原来的粘性内层分为剪应力层和近壁层两层。同时,该理论放松了 JH 理论的来流速度对数分布的要求,讨论了对数、幂次和线性分布的情况。并且,涉及了弱稳定和不稳定层结的情形。Hunt 等^[28,29] 将

该理论应用到了绕山丘流动的温度、湿度和浓度场问题。

1.2 数值模拟 与上述理论分析相并行,发展了很多数值模拟模式。数值模拟的优点在于不受理论分析所要求的那些假定和近似的限制,如线性化,低阶湍流封闭模式等,但这是以增加计算量为代价的。数值模拟一般采用有限差分法。虽然数值模拟不必再象理论分析那样将边界层分为多层,但由于铅直方向流动变化比较剧烈,差分离散控制方程之前,首先要进行坐标变换,使得越靠近壁面,网格越密。Taylor^[18]计算了流过二维周期波动表面、山丘、峡谷和斜坡的边界层流动。对于平均量, Taylor 的结果类似于 JH 理论给出的结果。但是,由于 Taylor 在计算中采用的是湍流动能方程的一阶模式,对于湍流量,不能期望会获得比 JH 理论更好的结果。Newly^[30]用二阶湍流封闭方程替代了 Taylor 的能量方程。Zeman 和 Jensen^[31]也给出了一个二阶模式。结果表明,对于湍流量,高阶模式给出的结果更符合观察数据。

1.3 观测和风洞模拟 由于测量技术的提高和人们认识复杂地形对大气边界层影响的迫切愿望,近10年来,观测和风洞模拟方面都取得了很大的进展。人们先后对无量纲水平尺度 $2 \times 10^2 < L/z_0 < 2 \times 10^5$ (L 为水平尺度, z_0 为表面粗糙度),坡度 $0.1 < h/L < 1.1$ (h 为山高)的10几个山丘进行了观测^[19],取得了大量的平均量和湍流量的数据。对于其中的一些山丘,还平行地进行了风洞模拟实验。Taylor^[19]详细地讨论了每个山丘观测所得到的数据。总的说来,已有的观测结果,对于检验和改进已有的理论和计算模式将起巨大作用。但是,现有的数据几乎都是对于中性大气的,而且,山丘的水平尺度范围还不够宽。

2 表面粗糙度变化对大气边界层的影响

2.1 理论分析 当充分发展的大气边界层遇到粗糙度变化的表面时,新的边界条件的影响不是一下子就遍及整个边界层,而是由靠近壁面的区域开始,逐渐向外传播。表面粗糙度的增加,使得表面剪应力,速度梯度随之增加,从而增加了湍流能量,一部分湍流动能向外输运,改变了速度和湍流剖面。大气边界层内,遭受改变的区域称为内边界层。

Elliott^[32]采用通常的边界层假定,忽略动量方程中的分子粘性项和压力项,假定内边界层中速度沿铅直方向为对数分布,剪应力只是水平坐标的函数。应用类似于 von Karman-Pohlhausen 方法沿铅直方向积分动量方程,得到一个关于内边界层厚度和表面剪应力关系的常微分方程,在内边界层外缘速度连续的条件求解,便可得到内边界层厚度,表面剪应力及速度剖面等。Panofsky 和 Townsend^[33], Taylor^[34]假定了不同形式的内边界层中的速度分布,改进了 Elliott 理论。

Townsend^[15,35,36]研究了 Elliott, Panofsky 和 Townsend 理论中所假定的速度分布形式,发现速度扰动是自持的。Townsend 给出了自持发展的条件,并且针对另外几种自持流动,如点粗糙度变化,表面温度变化等进行了讨论。

Blom 和 Wartena^[37]发现 Townsend 理论中内边界层的速度剖面与边界条件不一致,并设法进行了改进。同时,将改进的理论应用到表面粗糙度有连续两个变化的表面。Mulhearn^[38]也曾对 Townsend 的工作作了一些改进和简化。

尽管 Walmsley 等^[20]的工作是针对绕山丘气流进行的,但该理论可应用于表面粗糙度变化的问题。而且,原则上适用于任意分布的表面粗糙度的变化。Walmsley 理论是在 JH 理论和 MS 理论基础之上发展起来的,因此,它继承了上面讨论的 JH 理论的限制和不足。

Beljaars 等^[27]的混合谱有限差分理论与 Walmsley 理论的差别主要在于选取的封闭方程不同, Walmsley 选取混合长公式作为封闭方程, 而 Beljaars 采用了 $k-\varepsilon$ 模式。Beljaars 理论也可以应用于任意分布的表面粗糙度变化。

徐大鹏和 Hunt (1987)^[39]给出了一个四层结构的线性理论。基于 Hunt 等^[20]绕山气流的四层结构理论, 该理论也是将大气边界层分为无粘外层, 无粘剪切层, 粘性应力层和近壁层四层。假定扰动量均小于上游未扰动量, 从而线性化动量方程。对线性化了的动量方程及连续性方程作富氏变换, 在波数空间求解常微分方程, 得到解析的一阶和二阶近似解。对这些解再进行富氏逆变换, 便可以得到物理空间的扰动速度, 剪应力等。该理论考虑了压力的影响, 适用于任意分布的表面粗糙度变化。徐大鹏和 Hunt (1987) 将该理论推广到二维的表面粗糙度变化 (三维大气边界层)^[40]以及表面粗糙度引起的温度、湿度^[41]和浓度^[42]变化等情形, 该理论中湍流封闭方程采用的是混合长度公式。

2.2 数值计算 Taylor^[43]采用水平方向的动量方程 (在通常的边界层假定下, 略去压力和分子粘性项的形式)、连续性方程和混合长公式, 先将这组方程的铅直坐标作对数变换, 然后对其差分离散, 得到水平坐标的常微分方程组, 用 Runge-Kutta 法求解。结果与 Panofsky 和 Townsend 理论很符合。Taylor 还发现, Townsend 理论只适用于较小表面粗糙度变化情形。

Peterson^[44]假定水平剪应力与湍流能量成正比, 引进湍流能量方程封闭了控制方程组。他在铅直方向用中心差分, 水平方向用后向差分进行差分离散, 用向前推进法进行计算。

Shir^[46]认为, Peterson 的结果之所以与 Bradley^[46]的观测结果符合得不好, 主要原因是忽略了压力的影响。Shir 数值求解了涡量-流函数方程 (隐含压力项和铅直方向动量方程)。封闭方程还是采用湍流能量方程。计算结果与 Bradley 的观测数据符合得很好。Rao 等^[47]采用高阶湍流模式, 给出了一个显式有限差分方法。在他们的计算中, 忽略了压力的作用。Wood^[48]把三种不同的模式, Panofsky 和 Townsend 模式, 湍流动能方程模式和高阶模式与 Bradley 的观测结果进行了比较, 发现 Panofsky 和 Townsend 模式没有后两种模式好。有趣的是, 高阶模式并不比湍流动能方程模式好。

Claussen^[49]采用类似于 Shir 的方法讨论了表面粗糙度变化对上游的影响。

2.3 观测和风洞实验 Bradley^[46]在一个旧机场上进行了由平滑到粗糙, 由粗糙到平滑的许多观测。他测量了平均速度剖面和表面剪应力的变化。后来的大量理论分析和数值计算都是与这些数据进行比较的。

Antonia 和 Luxton^[50,51]进行了大量细致的风洞模拟实验。Jackson^[62]总结和比较了一些观测和风洞实验结果。近期的发展可参见 Smits 和 Wood^[10]。

综上所述, 非均匀下垫面上的大气边界层中近地层的研究取得了相当大的进展。绕复杂地形的大气流动已经发展到实用阶段。但是, 现有的工作主要侧重在动力学方面。关于热力方面的工作, 无论在理论还是在实验方面都很少。此外, 对于表面粗糙度变化对大气边界层的影响的实验研究还不多。这些都需要进一步深入做工作。

参 考 文 献

- 1 Arya S P. Engineering Meteorology. Ed. by Plate E. (1982) : 233—277
- 2 Hunt J C R, Simpson J E. Engineering Meteorology. Ed. by Plate E. (1982) : 269—318
- 3 Hunt J C R. 力学进展, 11 (1981) : 59—69, 153—164
- 4 孙菽芬. 力学进展, 14 (1984) : 1—10
- 5 徐大鹏, 孙菽芬, 姚德良, 卞荫贵, 陈允明. 长江三峡工程对生态与环境的影响及其对策研究论文集 (1987)
- 6 Hunt J C R. Workshop on the Planetary Boundary Layer. Ed. by Wyngaard J C. (1980) : 107—144
- 7 孙天凤, 林荣生. 力学与生产建设, 中国力学学会第二届理事会扩大会议论文集汇编 (1982) : 25—37
- 8 颜大椿. 力学进展, 16 (1986) : 473—479
- 9 苏从先, 胡隐樵. 科学通报, 10 (1987)
- 10 Smits A J, Wood D H. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 17 (1985) : 321—358
- 11 Jackson P S, Hunt J C R. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 101 (1975) : 929—955
- 12 Hunt J C R. *J. Fluid Mech.*, 49 (1971) : 159—178
- 13 Smith F T. *J. Fluid Mech.*, 57 (1973) : 803—824
- 14 Jackson P S. The flow around obstacles in boundary layer. Ph. D. dissertation, Cambridge Univ. (1973)
- 15 Townsend A A. *J. Fluid Mech.*, 22 (1965) : 773—797
- 16 Taylor P A, Walmsley J C, Salmon J R. *Boundary Layer Meteorol.*, 26 (1983) : 169—189
- 17 Deaves D M. *J. Ind. Aerodyn.*, 1 (1976) : 371—391
- 18 Taylor P A. *Boundary Layer Meteorol.*, 11 (1977) : 439—465
- 19 Taylor P A, Mason P J, Bradley E F. *Boundary Layer Meteorol.*, 39 (1987) : 107—132
- 20 Hunt J C R, Leibovich S, Richards K J. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 114(1988): 1435—1470
- 21 Sykes R I. *J. Fluid Mech.*, 101 (1980) : 647—670
- 22 Smith F T, Sykes R I, Brighton P W M. *J. Fluid Mech.*, 83 (1977) : 163—176
- 23 Mason P J, Sykes R I. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 105 (1979) : 383—395
- 24 Walmsley J L, Salmon J C, Taylor P A. *Boundary Layer Meteorol.*, 23 (1982) : 17—46
- 25 Mason P J, King J C. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 111 (1985) : 617—640
- 26 Walmsley J L, Taylor P A, Keith T. *Boundary Layer Meteorol.*, 36 (1986) : 157—186
- 27 Beljaars A C M, Walmsley J L, Taylor P A. *Boundary Layer Meteorol.*, 38 (1987) : 273—303
- 28 Hunt J C R, Raupach M R, Weng W S. Manuscript (1987)
- 29 Hunt J C R, Weng W S, Carruthers D J. The 6th NATO/CCMS Int. Tech. Meeting on Air Pollution Modeling and Its Applications, Apr. 5—10, 1987, Lindau, West Germany
- 30 Newly T M J. Turbulent air flow over hills. Ph. D Thesis, University of Cambridge (1985)
- 31 Zeman O, Jensen N O. 7th Symp. on Turbulence Diffusion, Amer. Meteorol. Soc., Boston (1985): 292—295
- 32 Elliott W P. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 39 (1958) : 1048—1054
- 33 Panofsky H A, Townsend A A. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 90 (1964) : 147—155
- 34 Taylor P A. On turbulent wall flows above a change in surface roughness. Ph. D Thesis Univ. of Bristol (1967)
- 35 Townsend A A. *J. Fluid Mech.*, 22 (1965) : 799—822
- 36 Townsend A A. *J. Fluid Mech.*, 26 (1966) : 255—266
- 37 Blom J, Wartena L. *J. Atmos. Sci.*, 26 (1969) : 255—265
- 38 Mulhearn P J. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 103 (1977) : 785—802
- 39 Xu D P, Hunt J C R. to appear in *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* (1989)
- 40 Xu D P, Hunt J C R. to appear in *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* (1989)
- 41 Xu D P, Hunt J C R. Submitted to *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* (1988)
- 42 Xu D P, Hunt J C R. Submitted to *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* (1988)
- 43 Taylor P A. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 95 (1969) : 77—91
- 44 Peterson E W. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 95 (1969) : 561—575
- 45 Shir C C. *J. Atmos. Sci.*, 29 (1972) : 304—310
- 46 Bradley E F. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 94 (1968) : 361—329
- 47 Rao K S, Wyngaard J C, Cote O R. *J. Atmos. Sci.*, 31 (1974) : 738—746
- 48 Wood D H. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 104 (1978) : 383—392

- 49 Claussen M. *Boundary Layer Meteorol.*, **40** (1987) : 31-86
50 Antonia R A, Luxton R E. *J. Fluid Mech.*, **48** (1971) : 721-761
51 Antonia R A, Luxton R E. *J. Fluid Mech.*, **53** (1972) : 737-757
52 Jackson N A. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **102** (1976) : 924-933

ADVANCES IN THE STUDY OF ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER OVER A NON-HOMOGENEOUS UNDERLYING SURFACE

Xu Da-peng

Institute of Mechanics, Academia Sinica

Abstract The study of the effect of a non-homogeneous underlying surface on atmospheric boundary layer is one of the important tasks in environmental fluid mechanics. Recent advances in this field are reviewed in this paper.

Keywords *non-homogeneous underlying surface, atmospheric boundary layer, environmental fluid mechanics*

《工程力学》杂志由广西迁京办刊

《工程力学》杂志已由国家科委(88)第726号文件批准,由中国力学学会主办,科学出版社出版,国内外公开发行,由广西迁京办刊。现已在京登记,国内统一刊号为CN 11-2595。本刊仍以应用为主,为工程建设服务。主要刊登:力学在建筑、土木、交通、铁路、冶金、水电、石化、矿业、机电、造船、地质、通讯、航空、航天和商业工程中的应用和理论,设计方法,电脑应用,工程实例,试验技术,施工技术,国内外最新科技信息和动态,专题综述和研究简报。读者对象主要为设计、科研、工矿企业和施工单位的工程力学工作者、结构工程师和有关科技工作者,高等院校有关师生和研究生。1989年出版4期,每期约20万字,定价4.50元,全年共18元。订阅地址:北京市阜成路11号西二楼《工程力学》编辑部。开户银行:北京阜成信用社,帐号:07155。欢迎订阅。

主编:陈祥福;副主编:秦荣,李家宝。

《工程力学》编辑部供稿