

工业和环境流体力学 (II)

J C R Hunt

英国剑桥大学应用数学和理论物理系

5 环境流体流动

5.1 一些重要的问题

在环境中有许多不同种类的流体运动，而且在这些运动与物理学、化学和生物学的过程之间有许多种类的相互作用。常常得到最大关注的问题，是牵涉到环境流动的那些问题，也就是：①为了人类一般利益的加以利用或改造的流动（例如，利用风能，保护海岸免受波浪破坏，除去和稀释废物）；②对人类活动有有害的影响的流动；③受人类活动影响的环境过程中牵涉到的流动。

5.1.1 利用环境流动 环境流动的最广泛的用途，是用来传输热量和质量，这可能是在另一种流体的形式中（例如液体污染物之类），或者可能是离散的，或以空气流动中的液滴的形式，或以或大或小的固体物质的形式（其范围可从气溶胶粒子到帆船和气球）。这些不同过程之间的一个重要的区别在于，在某些情况下，例如在气球之类的情况下，环境流动的用途是在线控制（通过气球的驾驶员）。即使当流动只是用来扩散释放到流动中的污染物时（为的是在此以后流动将确定污染物的运动），某些“在线”控制可能还是必须的[例如，农民只选取一定范围的风速来对他们的谷物进行扬场，把其中的一些扬弃掉而又不致去掉太多（在某些国家是一个法律上的义务）]。在这些情形中，主要的流动问题是要预报流动以及在所有可能的流动中控制流动过程。

如果流动过程不是所选取的或者是不受控制的（如在定期或偶然排放的流动中），则问题就将了解预报所排放的物质或热量的扩散，两种情况都可能有一些特殊的流动中以及在一些流动的一系综中发生，而且在不同的时间周期以及距离排放源不同的距离处发生。

当通过一种装置（例如，风磨或水轮机）在一有限的区域内利用环境流动的能量时，有关的流体力学问题是有明确的定义的并且在本质上是 Euler 问题，这些问题可化为有限的区域上在有关的时间尺度的来流与装置之间（例如，来流湍流接近于风磨的，以及叶片的转速和弯曲频率的）的相互作用。

目前有许多概念的和定量的环境流动问题，它们与探索环境上的良性解决有关（如有效地利用风来冷却大型建筑物的某些部分，与靠人工和/或太阳加热在建筑内部产生的浮力相结合），或者与探索利用环境流动的最佳位置有关 [例如，污水在江河上的排出口 (Smith 1982)]。同工业的问题相比，环境流动问题是更为难有提法恰当的技术问题的。

5.1.2 有害的影响 在许多情况中环境流动对人类的活动有有害的影响，还有一些流体力学过程及其他过程类似于与利用环境流动有关的那些过程，正如环境可以将污染物运走

那样(这是有益的),它也可以带来污染物或不希望有的物质(例如,沙漠中的沙);而且,产生能量的那些力也带来结构的损伤。因此,牵涉到这些“有害”流动问题的研究,往往类似于“利用”流动问题的研究。例如,已经进行了异重流的研究,因为它们是江河及海面上热水缕流(plumes)蔓延的机理,这些热水缕流是发电厂排出的冷却水在江河及海面上产生的(Simpson 1982)。另一方面,已经发现异重流头部的流动可以描述雪崩前锋中雪粒和空气的运动(Hopfinger & Tochon-Danguy 1977)——一种有害的环境流动。

有些极端有害的环境流动影响与一些特殊的流动现象有关。这不当使流体力学家感到惊奇,即某些极端的情形要比正常的环境流动更容易了解和预报,因为在极端的情形中,流动只受一种或两种机理所支配,可是正常的流动则通常要受许多机理的影响(Hunt & Caruthers 1990)。

如果对结构物或树木造成损害的极高风速发生在时间周期 T_e 中,且长度尺度为 L_e ,则在下述条件下流动将相似于正常的流动:①只要 T_e 显著大于(10倍地大于)流体以速度 U 绕流长度尺度为 L 的结构物的时间尺度 T_u ,②只要 $L_e \gg L$ 。在这种情形下,对典型风所进行的计算或风洞模拟,都是适合于极端风的,然而,在以速度 20 ms^{-1} 运动的半径为60m的龙卷中,以约 100 ms^{-1} 的典型风速绕流直径为30m的大型建筑物(Wen & Ang 1977),风速将很迅速地改变速度和/或方向,足以使 T_e/T_u 小于10以及使 L_e 的量级与 L 相同。在这种情形下,流动将非常不同,并且由惯性(或“附加质量”)及非定常流动的升力所引起的巨大风力将作用在结构物上,对于具有尖锐边缘的结构物,这些升力将受结构物两侧脱落下的涡旋运动的变化强烈影响。在这些条件下,出现了更高的载荷。这两种影响都可以用理论计算或适度的计算机计算估算出来(例如, Graham 1980),这与定常情况下的力不一样。比值 T_e/T_u 也称为Keulegan-Carpenter数,它是很有用的参量,用来确定水波所引起结构物上的非定常载荷的相似性变化(Sarpkaya & Isaacson 1981)。

有害影响也发生在与上述相反种类的极端环境情况下——很低风速的情况下。因为污染物一般是连续不断地排放的而不考虑环境扩散它们的能力,所以,在很低风速的情况下将出现很高的浓度。在这些极端情况下,流动和扩散过程的性质通常是不同的,这主要是由于大气的运动是受“势”温梯度 $d\theta/dz$ [绝对温度 T 的梯度 dT/dz 与它在中性稳定大气中的值之间的差]下作用在铅直运动着的流体元上的稳定浮力或非稳定浮力所控制,而不是受与平均速度 U 或者与平均速度梯度 dU/dz 有关的力所控制。这些浮力和惯性力的大小,是用Richardson (1920)数

$$Ri = g d\theta/dz / [T (dU/dz)^2]$$

来表征,或者用Froude数

$$Fr = U / L [g d\theta/dz / T]^{1/2}$$

的倒数来表征,式中 L 为当地长度尺度。例如,当 Ri 非常大且为负时,湍流主要由上升气流产生,这种上升暖气流使污染物向上和向下迅速地混合,这就可能导致从高耸烟囱排放出的污染物在其地面高度处达到最高的浓度(Weil 1985)。相反,当风很弱且大气很稳定时(这时将有 $Fr \ll 1$),污染物就可能从它们的排放源处沿流线在大约同样的高度上传输得很远,并且浓度有所减小。如果在下风处有一些小山,那就可能出现地面高度处有很高浓度,这是因为,如果 $Fr \ll 1$,流线就可能直接碰撞到小山上,这就导致地面有与来临缕流中

相同量级的高浓度（例如，Egan 1984），已经在新的一类流动实验设备中进行了这些具有大浮力的极端情况的实验研究，这类流动实验设备不同于风洞，它们更适合于具有弱浮力或无浮力的流动（Snyder 1985）。

5.1.3 改变环境 在人类的活动影响环境中的物理过程、化学过程和生物过程方面，大气圈和水圈中的流动起着关键的作用。这些方面的许多影响是无意识的破坏，但都是许多重大的活动或者政治上不变的活动的不可避免的副产品，这些活动有工业上的，交通运输方面的，家庭生活方面的，以及农业上的。为了了解、预报和防止（或者至少是减轻）这些影响，出现了环境问题。此外，环境流动和其他一些过程，都可能通过人类的活动审慎地加以改变，可是往往不知道，这些改变的全部影响是什么，并且它们是在什么时间尺度上发生。

与有害地改变环境有关的许多流动问题，起源于把局部源或区域源中的某些物质排放到大气中（例如，来自烟囱的气体或微粒，来自耕作和燃烧植物的粉尘）或排放到水圈中〔例如，有毒液体在地下水中的扩散（Dagan 1987），来自堆集于河口及海洋底部的污水污泥微粒的扩散〕。这些排放是可以允许的，只要环境能够把排放物稀释到安全的程度，或者不超出适当的时间尺度和长度尺度内环境可以容许的浓度水平。可是，新的大规模化学过程和生物过程不断地出现，它们对越来越低的排放物浓度很敏感，可以容许的浓度水平正在日益降低。与此同时，排放量却在不断地增加。

一般地讲，在离 $\sim 1\text{m}^2$ 的连续排放源约10 km 距离的地方，大气稀释某种物质的能力，平均1 hr 的时间内约为 10^6 分之一，但在平均 $\sim 1\text{yr}$ 的时间内则约为 10^7 分之一（在该地区只有一个或两个特有风向）。在深度约为10 m 的沿海水域中，与上述相当的数字约为 10^4 分之一（例如，Fischer 1976）。在某一个例子中，这样的稀释能力，对于从发电厂或汽车产生的氧化氮来说是不能胜任的。汽车排放的 NO_x ，按体积计约为 10^{-3} ，在1 km 内稀释时会产生按体积计约为 10^{-10} 的浓度。这符合环境健康标准，只要不出现艳阳天情况下大气中发生的化学反应。如果发生化学反应，就将增大浓度到约 10^{-7} ，这超过了推荐的 NO_x 浓度水平。（也产生其他的化学成分，如臭氧。）

来自降雨的高度沉积同土壤、植物及动物的吸收相结合，可以更加有效地增大有毒物质的浓度。例如，1986年苏联 Chernobyl 核电厂放射性物质泄漏事故之后约5—6天的期间内，西欧上空空气中放射性物质浓度约为 $1-10\text{ Bq (Becquerels) m}^{-3}$ ，相应于约 10^4 的泄漏地点附近100 m 直径和1 km 高体积中的稀释度。此稀释度主要由高度畸变和盘卷云层中的横向蔓延所引起。西欧某下雨地区在几天内的地面总沉积量上升为 10^4 Bq m^{-2} 。几个月期间内土壤中的浓度约为 $10^4-10^5\text{ Bq m}^{-3}$ ，大大高于空气中的浓度。这些影响导致绵羊不能承受的放射性水平（Smith 1988）。（事实上，在英国，土壤内的总放射性水平由于本底放射性水平而增大为 Chernobyl 泄漏事故前沉积值的 $\sim 2-3$ 倍。）

这些环境过程依赖于范围广泛的流动过程，范围从最大尺度的天气系统，经过云层中的湍流混合和相变，小至地上控制沉积的最小尺度的运动。在某些其他流动过程中，当环境流动本身发生变化时，就具有更大的复杂性。人们不希望发生的许多环境流动的变化，甚至当浓度已经稀释到只能用肉眼看见的水平时，都由排放到环境中的物质所引起。当大气中粉尘的浓度达到大气深度内的 10^{-2} kg m^{-2} 的水平时，到达地上的太阳辐射将显著地减小。这种减小又使热引起的湍流减小，从而减小微粒的扩散，这是干燥或沙漠地区宁静的冬季情况下

城市区域的一个普通的问题 (Moore 1987)。这恰好是人类活动对气候的一个局地的影响, 牵涉到许多相互作用的流动和其他的过程。

改变环境流体流动也可以审慎地进行, 以便更好地利用流动或者减轻这些流动的影响。江河是最好的例子。为了上述这些原因, 江河已经得到最完善的控制。最近的流体力学研究照例是用于计算湍流流场作为水力学设计的一部分 (例如, Benqué et al 1982)。然而, 有许多特性是不能很好地预报和不能完全地确定的, 尤其是二相流动很重要的地方, 如沉淀运动问题 (Dyer & Soulsby 1988) 和空气卷挟问题等。

大气流动是更难以改变的 (它只有一个边界面, 即地面, 可以用来控制流动) ! 不过, 有许多成功的减小风速的古老方法, 用以促进作物的生长, 或减小土壤的侵蚀, 或降低房屋的热损失, 今天, 这些却都是利用全部流体力学研究的技术来进行设计了 (例如, Jensen 1961, Bradley & Mulhearn 1984)。还有, 有关改变环境流动的活动引起了一些新的问题, 最近的一个例子是对许多排的风磨所产生的风环境和噪声场的影响。事实上, 这是沿流流动对小扰动敏感的另一个例子, 因为在一些小山山顶附近的地面流动的微小变化 (例如粗糙度的变化或障碍物之类), 可以对尾流有很大的影响 (例如, Britter et al 1981)。(并且再一次引起法学家的参与!)

如同上面这些例子所表明的, 环境过程有许多不同的时间尺度, 其范围从约 1s (流体能量装置或结构物的响应) 到 10^3 s (大气中污染物的反应), 到长达 10^9 s (海洋中示踪物的放射性衰减)。必须对每个问题有关的最长的时间尺度和长度尺度来考虑流体的运动 (比方说, 通过大洋盆的稀释时间); 然而, 短得多的时间尺度的运动也是有关的, 例如, 通过海洋和大气稳定分层的各层的铅直扩散, 则依赖于较短时间尺度 (10—100s) 的微弱运动。后面这些运动看来对于清除来自大气的含氯氟烃 (chlorofluorocarbons) 是很关键的 (McIntyre 1990)。这说明了基础研究对这些实际问题的重要性。常识不会提出未必可能的环境敏感性问题的, 也不会认为在环境控制和环境保护中牵涉到流体流动。

5.2 从研究到决策到行动

在考察环境流动时通常有 3 个或 4 个阶段: 有关流动的问题, 测量和计算; 流动与有关过程或问题的联系; 作出科学的和行政管理的决策; 最后, 采取技术上的行动来解决问题或使问题有所缓和。

在任何环境流动问题的考察中的第一步, 是获得关于流动的有关信息。这至少必须以流动的某些测量以及决定流动的那些因素的测量为基础 (例如, 空气的温度, 海潮的高度等)。在许多情形中只能得到有限的一些数据, 不过这些数据可能已经足够用来对特殊的问题在适当的长度尺度和时间尺度下, 以适当的精度估算或计算流场。对大气 (例如, Browning 1989) 和沿海水体的现代遥感测量方法, 已经能够不断地提供一些特定位置处的数据; 许多环境问题的一个重要的方面是判定所需要的数据的水平。

孟加拉湾气旋期间洪水和大风造成的某些灾难性影响, 由于在它们出现的前 1 天或 2 天预报了海平面的上升而得以防止。首先, 从卫星拍摄的云的运动图象估算出了气旋的范围和风速, 并且从当地验潮仪 (tide gauge) 测得沿岸潮位。然后, 利用这些数据作为边界条件及初始条件, 根据印度气象局 (Indian Meteorological Office) 的计算机模型对流动进行计算并作出专门预报 (Johns et al 1983)。

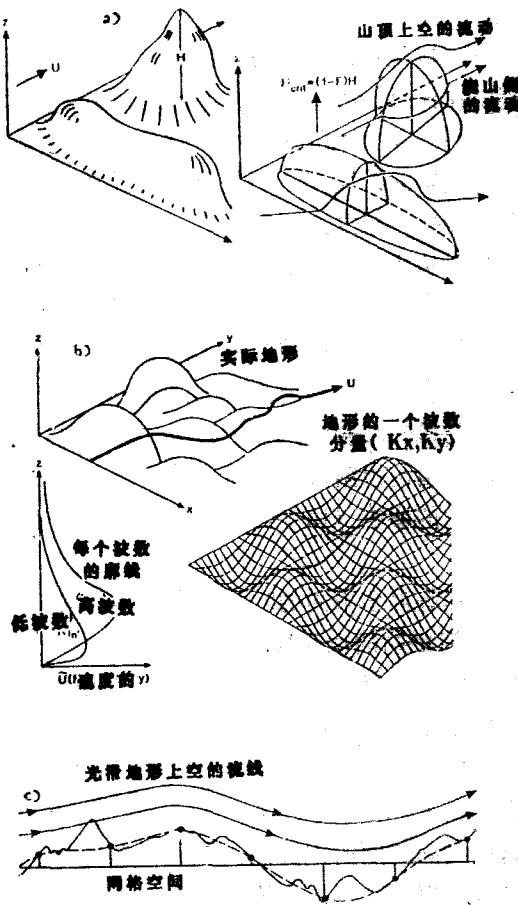


图8 多山地地形上空的流动和扩散的环境流动问题, 这种问题的求解是通过对地面的不同理想化办法以及通过不同的近似方法:
 a) 椭球体; b) Fourier 级数; c) 网格空间中的平滑线段, 对于 a), 注意把流动分成 H_{crit} 之上和之下两个区域的有用方法

在牵涉到污染的大气扩散、结构物的风载、能源、森林破坏等等的问题中, 需要一些特殊地方的风和温度的统计和结构方面的信息, 这些特殊地方包括山顶或城区内部, 往往没有这些地方的有关数据。因此, 需要根据当地某一距离的测量端得到的数据和根据高空风来计算出局地风。在实践中采用几种不同的方法来进行这算些计, 其中对不同的对象根据不同种类的简化, 如对地体形状的简化 [例如, 用 Fourier 级数把小山或者表示成网格点之间的平缓线段, 或者表示成椭球体 (Walmsley et al 1982, Pielke 1984, Perry & Finkelshtein 1990)], 对地体表面的简化, 以及对流动的结构简化 [例如, 利用具有不同湍流速度分布的不同层的渐近分析和分层的渐近分析 (Carruthers et al 1989)]. 关于这些简化的例子, 见图 8。

环境流动问题的考察的第二阶段, 牵涉到研究实际的流动过程, 例如, 大潮和大风对沿海岸结构物和交通运输的影响, 污染物的输运、反应及沉积过程, 或者对结构物的

作用力等。这些过程可能是一些特殊的事件 (可能已经发生过的), 可能是“实时”事件 (例如在一次事故期间预报污染物的扩散等), 或者可能是一些极端的事件 (参见第 5.1.2 节)。很多问题牵涉到根据模型和/或数据预报事件的分布, 或者很可能是影响问题的流动和其他因素的分布, 例如事故, 运输系统的运行, 等等。在所有这些问题中, 环境流动的研究必须同其他的环境过程及其他的因素联系起来进行, 这些环境过程及其他因素可能是化学的, 生物的, 甚至连科学的性质或技术的性质也都不是的; 往往还必须考虑庞大数量的事件或者“情景”, 其中流动过程可能只是问题的一小部分 (例如, 在复杂的化学反应中; 或者在确定有关油井设备 (oil rig) 或核电厂的危险时)。因此, 可以在实践中使用的流动过程的最合适的模型, 必须是简单的而且计算机计算是快捷的 (参见第 6 节)。

一旦问题中的流动过程和其他方面都已经研究了, 就到了环境问题中的第三阶段——作出决策的过程。这些决策往往牵涉到把研究的结果同某些判据相比较, 这些判据例如有: 对

孟加拉湾的公众构成危险的潮位，一定时间可能是危险的污染级，或者风能计划或潮汐能计划的成本和收益，等等。这些比较的作出可能导致作出行政上的决定，例如向人民报警（在遥远乡区的人民，可能对根据难以理解的技术方法作出的预报是非常不相信的）。往往这种决定又导致更多的环境流动问题，例如扩展或者修改以前的研究（例如，由于所得结果太不精确了，或者由于所有可能的事件或者设计都是不能考虑的），或者寻找用来补充决定的方法。

许多环境流动问题的解决，要求采取改变环境过程的行动，这是把这些问题作到底的第四阶段。这些行动可能包括采用，比方说，植树造林或者修建结构物（例如，挡潮堤或人工礁带）。其他措施可能是控制或改变人类与环境相互作用的活动。这些可以是永久性的改变，例如允许排放一定的污染物。另一方面，在有些国家，污染物的排放到江河及大气，是不断地（“联机”）依据环境条件和污染级的情况加以控制的。这要求有一个先进的环境监测、计算、预报和排放控制方法（技术的和行政的）的系统。这些手段将变得更为普通，但很可能不是如此，除非更多的技术问题得到了了解和解决，其中许多问题牵涉到流体力学中富有挑战性的问题。

6 工业和环境问题中的流体力学——实际的用途和新的挑战

6.1 极多的问题和极大的多样性

本文叙述的工业和环境流动问题涉及已经研究过的多种多样的流动现象，其中有些是已经利用流体力学的许多分支解决了的。在有些情况中，是某些机构所面临的问题，这些机构主要从事与流体流动有关的技术问题（例如，航空航天、汽车、化学、动力等工业以及环境领域方面，与风能和波能、结构载荷或污染扩散有关的机构）。甚至在这些机构中，也有着保证要根据现代的概念和最新的研究成果来解决流动问题的困难。

更经常的情况是，流体流动仅仅是工业机构或环境机构面临的问题的一个部分，这些机构的主要技术焦点并不在流体流动方面。可想而知，这些机构不太可能使用流体力学方面的专家！[例如，电炉的制造厂家（参见第3.4节）或林业机构。]可是，纵然流体流动问题并不是他们主要关心的，解决这些问题仍然可能有相当大的经济重要性和社会重要性。

总之，有极多的重要流体流动问题是物理上有可能应用最新的专门知识和技术去解决，虽然只解决了其中的一小部分。这是由于，最新的进展只有不多一些研究小组知道。可是，人们应当问一问，这些进展怎样才能变为广泛可以得到的？如果它们不能成为可以得到的，流动问题就将只能利用老的方法来解决，因为它们总得给以解决——大多数流动问题是太重要了，迫切期望着给以解决！

6.2 一些概念

如同技术史所指出的（Basalla 1988；参见第3.3节），科学的许多进展之促进技术的进展，其程度正如通过科学研究成果的应用是与通过广泛概念的应用一样大的。下面给出几个例子来说明这点。事实上，专门科学研究的成果，总是需要用文字和图形来给以解释，让研究者本人能够感到满意，也让其他的专家（例如各“年评”刊物的读者）得以了解；科学的应用正好是进一步的促进因素。

Poincaré (1905) 极好地说明了这第一个方面如下：

当一项比较冗长的计算已经进行到给了我们某种简单的惊人的结果时，我们还是不满意

的，除非我们已经指出，我们会有某种预见，如果不是该整个结果，至少是其大部分特性有此特点。为什么？

因为这项冗长的计算也许不可能再一次使用，可是这并不是正确的理由，半直觉就往往会使我们能够预见到该结果？

Poincaré是对数学物理写这段话的，但是他的见解完全可以用到理论、实验和计算流体力学。这门学科的所有这三个分支都已经得出一些具有实际应用的新的概念。流体力学的一个特点是，流动显示（包括实验流动及计算流动两方面）可以完全同样地用文字和图形来交流（以及探讨）那些根本性概念，尤其是那些牵涉到非定常三维流动的结构的概念，这些流动例如发生在边界层中和航空学中（Werlé 1973）。流动显示也能够将流体力学现象向大学生、工程师、建筑师以及需要求解和使用这些现象的其他许多人给以清楚的说明。

到现在为止，指导解决实际流动问题的那些概念的使用，尚未成为计算机专家系统的一个特点。把这些概念纳入计算机专家系统，将很可能是流体力学的一个重大的发展；这肯定应当牵涉到实验流体力学家（Andrews 1988）。

上面这些说明指的是从研究到应用这个单向的运动。可是，同样重要的是应当记住：许多重大的流体力学问题，是如何直接地从实际流动问题或者间接地从实际流动问题所促进的研究所已经引起和继续引起的（例如，核工业和石油工业问题所促进的二相流的最新的研究，或者减阻需要所促进的湍流结构的最新的研究）。

6.3 计算机计算

应用于工业和环境流动问题的流体力学进展的另一主要方面，是通过新的计算机计算方

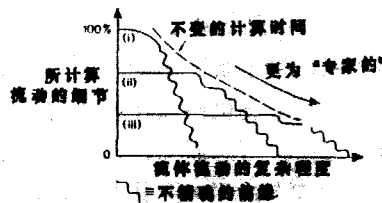


图9 工业和环境流体力学问题计算方法示意图：(i) 完全方程的直接计算——总精度和复杂程度的一般性但范围有限制；(ii) 某些经验性近似（例如，湍流的和多相流动的），加上方程组的某些简化；(iii) 一些特别复杂流动的一些特殊方法，利用实验，分析，等等

法。图9是这些计算方法的示意图，它指出了这些方法的各个不同的方面，纵坐标是**精确度**，横坐标是可以解决的流动问题的**复杂程度**，是由流体的性质，边界条件，或者Reynolds数的大小（它是流动内各种尺度变化的量度）等所确定的。不同的曲线对应于流动是怎样特殊以及方法依赖于假设或者实验结果或其他计算结果的多大程度。每一种方法都用图上的一条线指出，但是每条线都有模糊的边缘，它确定该方法可以应用于更复杂的流动到多么远的地方。横穿过这条线必然要应用一些方法来确定它们的限制范围，这是新的一些方法所牵涉到的一个方面。

流体运动的完全方程，在边界的几何形状非常简单且在中等 Reynolds 数下，其离散化形式的数值计算可以给出几乎100%的精确度（Rogallo & Moin 1984）。这些数值仿真可以提供实验上不能得到的关于流动的信息（例如，湍流的结构或者不稳定性的增长）。由于可得到的巨大计算能力不断增长，大量的信息已经可以迅速地获得。（下转第521页）

在表述有界湍流流动壁面层的分析模型和理论方面需要更多的研究工作。这方面的工作没有与实验方面的工作保持一致步调，这主要是由于表述 2 维或 3 维非定常模型很困难。数值仿真数据的有效性大大有助于解释壁面区内的某些事件，但是，数值仿真本身并不能产生能够说明流动的物理机理的数学模型。目前有了大量的资料，但是，还严重缺乏使用能够得到分析计算格式的概念性模型来解释这些资料。

33.11 涡的控制

怎样才能控制这些结构，以便获得像减阻和降低噪声之类的有益结果？

改进基于结构概念的模拟，应当提高我们的计算能力，来获得提供技术上控制有益的流动变化的方法。

33.12 小 结

过去几年已经看到，我们在了解典型湍流壁面流动（管流，槽流以及无压强梯度的边界层流动）的结构方面有了良好的进展。现代数值仿真和实验技术，无疑已经产生，并且继续产生新的数据和思想。把这些知识推广到非典型流动是今后的主要目标。把数值仿真和实验二者推广到高 Reynolds 数是非常困难的问题，需要集中努力工作。以结构为基础的湍流计算方法，是一个重大挑战性任务。

某些可能影响结构研究的新思想刚刚冒出地平线。这些方法利用了非线性力学和动力学系统。分解定理已经应用来关联数据场，以抽取出具有大部能量、涡量等的涡或某种其他参量。当研究来自动力学系统的方法时，这些涡看来抓住了猝发过程的某些本质性的单元。另一方面，来自浑沌领域的数学模型已经证实，这种方法可以表达出某些观察到的湍流特征。在这些新领域需要进一步的研究工作。

董务民译自： *Appl. Mech. Rev.*, 43, 8 (1990) : 153—170.

~~~~~  
(上接第 528 页)

目前，这种计算能力正在用来彻底检验和发展一些特殊种类流动的新概念和新方法，也用来改进和校准半经验的实际模型，这些模型不太精确，可是可以应用于较广泛的流动种类，例如广泛用于计算速度场低阶矩的那些流动 [这几页是由 Reynolds (1976) 和 Zeman (1981) 综述的]。

工业和环境问题流动过程的大多数计算不是解偏微分方程组，而是计算代数表达式构成的公式或一阶微分方程组。这些公式只应用于某些有限范围的流动，它们的基础通常是相当大量研究的成果或者是经验关系式。

例如，目前用于复杂地形和表面非均匀体上方的空气流动的公式和简单计算机程序（第 5.2 节中所叙述的），都是基于湍流流动的最新理论和先进的计算模拟，基于在实验室和现场进行的许多实验——事实上，它们都是专家系统！在许多工业流动问题中，把导出计算起来简单的新公式的几种技术同样结合起来的办法，发现是流动计算的最合适的方法。对于许多种流动问题，计算流体力学对实用程序、公式和专家系统的这种贡献，同提供计算（借助于巨大的计算能力）每种情况下的整个流场的算法相比，可能是更有力的贡献。

**参考文献** (107篇，略)

董务民译自： *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 23 (1991): 1—41.