

绕刚体的分离涡流到绕柔体的受控势流

吴介之, 杨延涛

(北京大学工学院力学与空天技术系, 北京, 100871)

摘要:在小粘性流体的现实环境中, 人类学会了利用适当产生的边界层及其涡量来构造航行器和流体机械, 这导致了涡动力学的形成和发展, 并把经典势流理论的应用范围推到边界层、自由剪切层和旋涡之外。但是, 边界层是一柄双刃剑。它本身、它的分离、失稳、转换, 以及由此而来的各种涡结构, 无一不带有或大或小的副作用。现在, 人们遇到的刚体大雷诺数绕流问题越来越复杂(包括湍流)。这些复杂性大都源于边界层的各种不利的、甚至灾害性的副作用。但是, 随着变形体绕流研究的开展和智能变形材料的开发, 人类有可能造出新的近壁流态来代替刚性物面的层流或湍流边界层, 使近壁流之外的流场全是势流。

关键词:变形体流体力学; 旋涡分离流; 粘性势流; 柔壁流动控制

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

0 引言

当人类在历史上向生物学会了水上与水下航行和大气飞行的时候, 人们把生物体的复杂变形及其对航行体的水动力学与空气动力学性能的影响撇在一旁, 首先建立了流体与刚体(或刚体系统)相互作用的理论。在现代流体力学的框架内, 除了少数必须处理流固耦合问题的领域外, 以刚体为边界的流体力学作为航空航天、航海和流体机械等广泛工程技术领域的主要理论基础之一, 业已主导了人们的思维方式达一个世纪。

当前, 随着生物内外流的流体力学、仿生技术和先进流动控制技术的迅速发展, 以刚体为边界的流体力学的局限性正越来越多地显现出来。人们发现, 生物体在与流体相互作用时主动、半主动或被动的复杂变形, 包含有许多微妙的道理, 极其值得学习和挖掘。水族馆的参观者无不赞叹从水母、乌贼到海豚的身体变形所导致的、任何现代人造机械望尘莫及的高超运动能力; 而流体力学家则很难不被吸引去思考这些高超运动能力的物理机理, 以便有所发明。于是, 力学界新一轮源于生物、高于生物的研究热潮近年来正在沛然兴起。从低速到高速的以变形体为边界的流体

力学正在若干热点上首先发展。童秉纲院士是中国率先敏锐地注意到变形体流体力学的重要性并进入这个领域的先行者之一, 也是在中国开展有关研究的有力倡导者和组织者。

本文作者对变形体绕流的基础问题有些初步认识和思考, 不揣冒昧写在这里, 以就教于读者。

1 绕刚体的旋涡分离流和粘性势流

人类生活依靠的空气和水都是小粘性流体, 这个基本事实决定了流体力学和空气动力学最丰富的成果都是对小粘性流体(大流动雷诺数)得到的。它也决定了飞行器和水面、水下航行器以及各种流体机械的基本工作原理。一个固体只有在小粘性流体中运动, 才会产生具有强剪切的边界层; 而如所周知, 机翼上下表面边界层中反号涡量的代数和构成了机翼的环量和升力。事实上, 亚声速飞机翼的所有升力都源于边界层, 没有边界层就没有飞行。倘若空气和水的粘性很大或者完全没有粘性, 绝大部分现代航行器和流体机械都将失效或根本改观。

但是另一方面, 边界层中的涡量也是摩阻和诱导阻力的根源。这些阻力, 尤其是逆压梯度下的边界层分离及其导致的机翼定常与非定常失速、钝体的非定

* 收稿日期: 2007-06-15; 修订日期: 2007-10-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助(10572005).

作者简介: 吴介之(1940—), 男, 教授, 流体力学、空气动力学专业.

常涡脱落、剪切层在大雷诺数下的失稳和转换成湍流、非定常涡运动发出的噪声,以及伴随高速边界层的气动加热,都是边界层带来的副作用。机翼后面拖得很长的尾涡不仅浪费能量,而且有害。总之,作为刚体小粘性绕流最基本的流动结构,边界层是一把双刃剑。边界层及其演化成的各种涡结构在产生各种有利工程效应的同时,总在产生不利的、甚至灾害性的效应。但也正是为了趋利避害,人们不得不把研究的领域从100年前的附着流逐步扩展到越来越复杂的旋涡分离流和湍流,结果导致了涡动力学以及湍流涡结构及其模拟研究的兴起和持续发展。

最近, Wu, Lu & Zhuang^[1]对钝体非定常分离流的各种局部涡结构在钝体受力中所起的作用,作了较详细的分析。他们进一步发现:不仅整体而言边界层是个双刃剑,而且流动中没有任何局部涡结构对升、阻力只有单号的贡献,每个局部涡结构都可划分成两个子集,其中若一个有正贡献,另一个必有负贡献。作者们提到,这种每个局部结构都是双刃剑的状况是不是一个必然规律,尚待回答;如果是,哪一类流动结构的副作用最小,也尚待回答。

其实,原则上说,上面寻求的副作用最小的最佳流动应当是有答案的,那就是最简单的势流,除非人们有意产生漩涡和湍流(例如增加掺混)。根据 Kelvin 的著名定理,不可压势流在满足同样边界条件的所有可能流动中具有最小动能,因此产生这种流动需要的功率输入也最小。虽然这个定理可以推广到可压缩流,为简单计,下面的讨论限于不可压流。

刚体的粘性绕流当然不可能完全是势流。但粘性越小,大多数情况下的有旋流(包括湍流)将局限在越薄的边界层和自由剪切层中,势流所占的区域也越大。倘若能通过各种流动控制的手段理想化地消除所有过早的流动分离,使有旋流缩回到不能不存在的附着边界层中,那么这种粘性附着流的动能将取仅次于全势流的第二最小值。在这种流动中,边界层分离带来的大量副作用将会消失,100年前建立的经典附着流理论可以重新应用。注意,倘若能使流动在逆压梯度下不分离,就可以用厚机翼、飞大攻角而不失速,现代细长薄翼的前缘涡升力也不必有了。

可惜的是,在现实中,涡量不可能仅仅局限在附着流边界层中。根据涡管不能在流体内部终止这个纯运动学定理和 Biot - Savart 定律这个纯运动学公式,三维机翼的边界层一定会在离开机翼后转化成自

由尾涡层并卷绕成集中涡,这是任何控制也不可能完全消除的。但无论如何,上述理想化的概念实验表明,势流区越大,人们也就越接近最佳流动。

需要强调的是,这里所说的势流并不是古典理论中的无粘势流,而是 D. D. Joseph 10 多年来系统研究的粘性势流(如见[2][3]及所引文献)。在势流区存在着 Bernoulli 积分,但那里的流体仍有粘性,也存在着粘性应力和耗散。Joseph 的工作表明,在计算阻力、分析流动稳定性、气动声学、界面流等多个领域,粘性势流的概念能提供新颖的物理理解和方法。有趣的是,Joseph 第一次投到 J. Fluid Mech. 的关于粘性势流的论文曾遭拒,审稿人错误地断定任何粘流都是有旋的。他把官司打到主编 Batchelor 那里,文章才得以发表。

2 柔壁行波对流动的开环主动控制

回到上述最佳流动问题。我们看到,剩下的问题是能不能在粘性绕流中把附着边界层这把双刃剑也消除掉,实现更大范围的势流。对于刚体绕流,这当然是不可能的。但是新兴的变形体绕流研究正开始初步显示出这种可能性。下面,我们通过回顾自己参与的、用变形壁控制近壁流动的两个案例,来讨论这种可能性。由于智能材料的空缺,目前只有一些数值模拟结果佐证我们的讨论。

利用柔性壁面的变形控制流动演化是流动控制的一个新方向,而且在我们看来是流动控制发展的高级阶段和必然趋势。例如,从具有自适应前缘的翼型开始到自适应变形翼型和机翼的研究,国外已经开展了近 20 年,已取得显著进展,尤其在无人飞行器(UAV)和微型飞行器(MAV)的研发中很有应用前景^{[4][5]}。控制的目的是根据外流条件的变化自适应地改变翼型和机翼的几何形状以保持附着流。但这还远不是变形壁面的全部潜力。人们还有可能通过柔壁的受控变形运动产生一些新流动结构来变革边界层本身。

观察海豚高速游动的照片,可以看到其身体侧面几个区域的皮肤拱出一些波形。容易想到,流体在波峰处可能分离,在波谷可能出现旋涡,从而可能导致减阻。对此, Taneda^[6]和 Savchenko^[7]首先做了实验研究。他们发现,能够稳定捕获旋涡的波乃是壁面上下振荡产生的、与外流同向的行波,行波速度 u 需为

外流速度 U 的 0.3–0.5 倍。在这些实验结果的启发下,吴建民等^[8]建立了用无限长二维柔壁流向行波捕获稳定涡列的理论模型(此理论后来被推广到无限长轴对称柱状柔壁边界^[9])。他们预测,在特定的波速下,行波确能捕捉到稳定涡列,使得流动呈现自然的周期性,而且行波壁上的总阻力(压阻+摩擦阻)降为零。例如,对于波高为 0.2 波长的正弦波,最佳波速 c 应是 $0.414U$ 。后来的计算证实了这个预测^[10]。

这个方向上的一个关键进展是吴锤结等取得的。Wu, Xie & Wu^[11]首次用数值实验表明柔壁行波控制在有逆压梯度的有限长物体(如翼型)上也有效,而且重要的是能产生和刚体附着流一样的升力。这就为控制大攻角流动分离开辟了新的可能方法。作者们把这种流动控制称为流体滚动轴承(FRB)效应,以区别于边界层那样的“滑动轴承”。最近,Wu, Wang & Wu^[12]又进一步证明,在中等雷诺数(500–5000)和最佳行波速度下,在二维圆柱的背风面只用少数柔壁行波即可产生相当鲁棒的 FRB 效应,在上下表面 FRB 中的小涡在后缘相消,从而完全消除 von Kármán 涡街,使阻力降低 85% (剩余的阻力基本来自圆柱迎风面固定壁的摩擦阻)。结果,在紧邻行波壁面的一层 FRB 之外(或者把 FRB 作为虚拟的固体边界),整个流动都是粘性势流,见图 1。

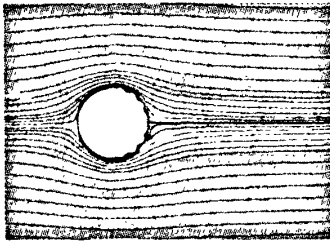


图1 二维柔壁流向行波圆柱绕流的瞬时流线及涡量云图^[12]。背风面共有 8 个行波。 $Re = 500, t = 50$ 。

Fig. 1 The instantaneous streamlines and the vorticity contours of a two-dimensional flow over cylinder with flexible streamwise travelling wave. 8 waves at the lee side. $Re = 500, t = 50$.

图 2 是在以行波速度 c 运动的局部参照系上看到的柔壁行波捕获涡列的示意图,从中可看出 FRB 的生成机制及其物理效果。在这个参照系中,柔壁只沿切向向上游运动,形状保持不变。由柔壁行波产生的作为“滚动轴承”的涡列,在其上下方诱导的速度分别与蓝色外流(势流)和柔壁运动同向,从而两侧的剪切都大大降低。尤其在最佳参数下,FRB 下方紧贴壁

面的红色流体层中的剪切很弱,对一个波长或周期的平均为零。这导致大幅减阻。另一方面,FRB 还把红色近壁层屏蔽起来,使其中的流动只取决于行波的局部尺度如波长、振幅和频率,而不受涡列上方整体外流(包括雷诺数、逆压梯度)的影响。外流逆压梯度不能穿透到壁面,从而消除了大尺度分离的物理根源。

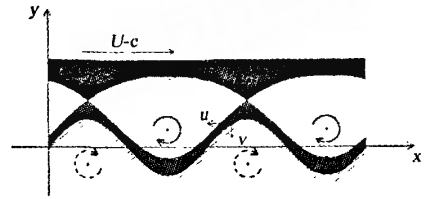


图2 在以行波速度 c 运动的局部参照系上看到的柔壁行波捕获涡列的示意图^{[9][12]}

Fig. 2 A sketch of the vortex row captured by a flexible wall with travelling wave, viewed in a local reference frame moving with the wave speed c ^{[9][12]}

上述关于流向柔壁行波、流体滚动轴承和钝体附着流的研究,目前只做到二维层流。在三维流和湍流中这种效应是否还存在,仍需从头探索。但是对于三维壁湍流,Zhao, Wu & Luo^[13]发现用柔壁展向行波能以另一种方式变革边界层。他们对槽道湍流的开环主动控制直接数值模拟(DNS)表明,柔壁展向行波能实现和用电磁力控制^[14]几乎相同的减阻效果(约 30%),但可用于非导电流体如空气。文献[13]和[16]进一步发现,柔壁展向行波会在近壁区把相当随机的流向涡改造成一个具有交替流向涡量的高频广义 Stokes 层(GSL),见图 3。它沿展向的变化可以用林家翘的理论^[15]进行理论模化,从而得到壁面流向涡量的解析解^[16]。几种波形控制下的理论结果和直接数值模拟(DNS)相差无几,如见图 4。DNS 结果表明,柔壁展向行波开环控制下的表面摩擦力分布也是非常有序化的(图 5)。

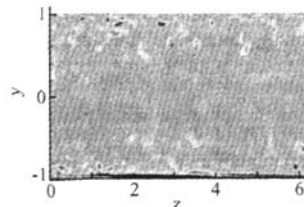


图3 正态分布波形控制时某时刻轴截面流向涡量分布。下板控制。引自文献[16]。

Fig. 3 An instantaneous streamwise vorticity contours at the axial section, under a flexible wall control with Gaussian wave patterns at the bottom boundary. From [16].

从本文关注的角度看,这个结果的主要意义在于提供了一个有趣的范例,表明物面变形能使湍流场在一个近壁薄层中变得高度有序化和简单化,亦即层流化。特别是,如果说刚性壁面边界层流动的失稳及其转换成壁湍流是一种必然存在,那么对于适当变形运动的柔壁,这种复杂的存在或许是可以避免的,代之出现的是广义 Stokes 层之类的、摩阻较小的新型有序结构。值得一提的是,目前的广义 Stokes 层理论只是二维横截面上的理论。倘若能对流向涡沿流向的分布作出理论模化(此问题并不简单),就有可能得到行波壁上展向涡量的分布,从而进一步预测出受控湍流的表面摩擦力分布和摩阻。

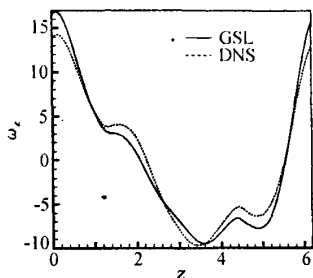


图4 正态分布波形的柔壁展向行波控制下槽道湍流的壁面流向涡量沿展向的分布。理论(GSL)与DNS比较^[16]。
Fig. 4 The streamwise vorticity at the controlled wall of a channel flow, under a flexible wall control with Gaussian wave patterns. Comparison between the theoretical and DNS results. ^[16]

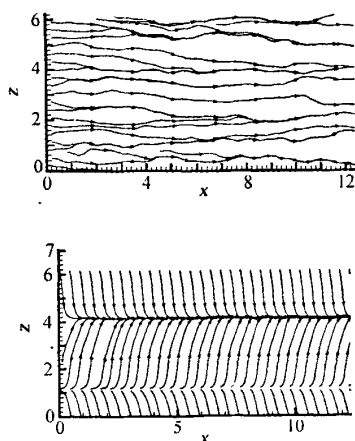


图5 槽道湍流的瞬时表面摩擦力线分布,DNS结果^[16]。
上图:无控制。下图:柔壁展向行波控制。
Fig. 5 The instantaneous friction lines on the wall of a channel flow, DNS results ^[16]. Upper: without control; bottom: flexible wall control with spanwise travelling wave.

进一步看,如果以该薄层上边缘作为内部湍流场的虚拟边界,内部湍流场的演化特性也应和无控制湍流不同。这就为用柔壁产生的近壁结构来取代刚性物面湍流边界层、获得最大限度的粘性势流的思路,提供了又一个启发。沿着这个方向还有些问题值得进一步研究,例如:有没有可能(或者如何)使有序化结构有最佳强度和贯穿深度,以阻断壁湍流的自持机制(self-sustaining)?假如答案是肯定的,那就不只是降低壁湍流摩阻的控制,而是消除壁湍流存在的控制了。

3 没有常规边界层的绕柔壁受控势流:可能的应用与功耗

变形物面之所以能产生出在刚性物面上不可能出现的新兴流态,原因在于变形体有大量(理论上)是无穷多)新的运动自由度,它们通过边界条件传给了流体。这对小粘性流体内部、特别是贴近变形物面的流体运动有两个方面的重要影响:一是物面的法向变形运动改变了流体边界的几何形状,二是物面的切向变形运动改变了近壁流的剪切过程。

在用二维流向柔壁行波捕获涡列的例子中,上述两种效应同时出现。几何形状改变的效果是明显的,例如图2所示的每个波峰后的局部流动分离和下一个波峰前的再附,它们是形成FRB的必要条件。另一方面,物面的切向变形运动改变近壁流的剪切过程,直接提供了扬弃原来必然出现的附着边界层的可能性。在图2所用的“波参照系”中,这表现为壁面的非均匀切向运动,它和涡列诱导的速度同向,从而消除了近壁流体层内的强剪切。与此对照,在用展向柔壁行波产生广义 Stokes 层的例子中,完全是切向变形运动以比随机湍流更强大的力量改变着近壁流的剪切过程。

应当看到,上面讨论的两种受控柔壁流动形态,只是许多种可能的新流态中最简单的。随着对变形物面附加运动自由度认识的深入,尤其是随着新的智能变形材料的开发,必能找到更先进的受控柔壁流态来代替刚性物面的常规层流或湍流边界层,向实现没有常规边界层、没有不可控流动分离、没有失速、阻力极小的绕柔壁的受控势流这个目标,迈出新的步伐。这个目标倘能实现,将是变形体带给流体力学的一个意义深远的突破。

当然,即使具有所需变形性能的材料已能制备,上述突破也只能在一定条件下和一定范围内实现。例如,为形成 FRB,柔壁行波的波高不能太小,约需波长的 0.2 倍以上(这个要求排除了用若干已知的变形材料产生 FRB 的可能性)。此外,波峰后的局部分离剪切层必须足够薄以在波谷卷成旋涡,因此基于波长的雷诺数需在 100 这个量级以上^[12](这个要求又可能排除了用 FRB 直接控制近壁湍流相干结构的可能性)。或许,就像海豚那样,受控 FRB 将最先出现在物面的某些关键局部区域,并和物面的整体大变形(如海豚摆尾)联合工作。它也可能用到未来更高级的 UAV 和 MAV 上。

与柔壁被动变形(这里不讨论)不同,在柔壁主动控制的研究中,除了可行性和鲁棒性外,一个不可回避的问题是这种分布式控制所需的功耗。目前,国内外各种热门流动控制方案的工艺可行性(technological feasibility)比其技术可行性(technical feasibility)低得多。到上世纪末,美国获得专利的流动控制方案中只有千分之二、三成为工业界的考虑对象。其中,施加控制所需的功耗远远大于可接受的功耗量级是主要原因之一。不少学术论文甚至根本避谈功耗问题,难免有掩盖控制方案不现实之嫌。因此,这里有必要对实现绕柔壁的受控势流所消耗的功率作些估计。我们只能讨论流体力学功耗,即控制时克服压力和粘性摩擦所需要的功率输入,无法包括造波机构的未知消耗。

就产生 FRB 效应而言,对文献[8]研究的平直柔壁,流体力学功耗相当小,最佳波速所需的行波法向速度振幅约为来流速度的 8%。对柔壁圆柱^[12],为克服逆压梯度需要较大功率输入,最佳波速所需的法向速度振幅需达外流速度的 24% 左右。但 FRB 的流体力学功耗仍小于减阻得到的功耗收益,这是各种主动控制方案中少见的好结果。

另一方面,在用柔壁展向行波降低湍流摩擦阻的研究之前,人们曾用展向振动刚性壁或在静止壁上引入展向振荡流(驻波)进行开环控制减阻研究,虽然也能减阻 30%,其功耗却达减阻收益(因减阻而节约的功率)的 1000 倍。只有做成闭环控制,功耗才能降到和收益同量级^[17]。Du & Karniadakis^[14]曾报导,他们的电磁力控制功耗只有减阻收益的 1/5,但在 Du 的博士论文^[18]和他们后来的详细论文^[19]中这个估计均不再提起。其他多种分布式控制也有功耗远大于收益

的困难。与此相比,柔壁行波开环控制的功耗约为减阻收益的 7.5 倍^[13],算是较好的了。杨延涛^[16]证明,柔壁的展向速度波和流向涡量波的位相差越接近 $\pi/2$,功耗越小。因此,他利用广义 Stokes 层的解析理论系统研究了几种不同的控制波形对功耗的影响,结合 DNS 计算发现:在相同的减阻效益下,正态分布波形比正弦波的功耗小,约为减阻收益的 2 倍(20% 减阻)到 5 倍(30% 减阻)。考虑到减阻并非控制的唯一收益,这个估计也已经很不错了。

4 变形物面上的流体运动学

上两节对柔壁行波效应的物理解释只是直观的定性说明,需要量化和深化。另一方面,没有边界层的受控势流是个很吸引人的研究课题,但不是变形体绕流研究的全部课题。一般地说,变形物面上的流体动力学是所有变形体绕流问题的根基,因为和刚体绕流的一切本质差别全在这里。

过去,这方面的研究多是结合具体的界面流变问题进行,虽有 20 多年历史,还缺乏简洁统一的严格理论。由于流体的任何动力学研究都以相对普适的(独立于本构关系的)运动学理论为基础,人们首先需要描述流体在变形表面的运动学行为的理论。对于满足无滑移条件的粘性流体在无渗透变形物质表面上的运动学行为,Wu 等^[20]给出了这样一个严格的理论。它表明,除了法向变形运动直接改变流体边界的几何形状外,变形物面的拉伸(收缩)会给紧贴物面的流体元的应变率张量增加一个纯切向分量。对于牛顿流体,虽然这个纯切向分量并不直接出现在物面上的流体应力中,但它会改变应变率张量的特征值,从而改变拉伸和压缩主轴的方向,结果对近壁流动的特征和稳定性以及表面摩擦力线的走向(参见图 5)有巨大影响。文献[16]和[20]利用变形物面流体运动学的这个特性,对上述两种流动控制案例的物理机制给出了新颖深入的解释。

这个变形物面流体运动学理论能够非常简洁地得到,关键是利用应变率张量的一个内禀三重分解。如所周知,流体元的变形率张量可以分解成对称应变率张量和反对称涡张量,只有前者出现在应力张量之中。但是极易证明,应变率张量本身还可进一步内禀地分解为一个各向同性的胀压张量、一个反对称的涡张量和一个面变形张量^[21]。因此牛顿流体的应力

也可相应地分解为一个法向胀压应力、一个切向剪切应力和一个既有法向分量又有切向分量的面变形应力。前两种应力分别反映牛顿流体运动的两种基本过程—胀压过程和剪切过程—的动力学特性,面变形张量只存在于涉及流体面元变形的过程中,在人们研究体过程时往往隐而不见,因此曾长期是个比较陌生的东西,直到40年前才由Dishington^[22]首先系统地加以研究。然而,一旦认识到它的存在并得到应变率张量的内禀三重分解,大量涉及流体界面和变形物面流体力学的问题就很容易处理。例如,把牛顿流体应力三重分解用在自由表面上,可立即看出在弯曲的运动自由面上流体元一定有旋^[21],其涡量和自由面的曲率与切向速度成正比,因而经典势流水波理论不适用于毛细波(Longuet-Higgins^[23]最先发现这个结果的一个特例)。应变率张量内禀三重分解的另一个直接结果是刚性表面流体应变率的经典Caswell公式^[24]及其向变形物面的推广,后者即是变形物面流体运动学理论^[20]的出发点。

上述变形物面流体运动学理论只处理了无滑移、无渗透的变形物面。在大量的变形体流体力学(特别是生物流体)问题中,人们需要考虑有渗流的变形物面以及允许部分滑移的微尺度流动。计及这些情况的一般变形物面流体运动学理论还有待于建立。在这些努力的基础上再引入各种介质的本构关系,才能建立完整的变形物面流体动力学。但无论问题如何复杂,可以预计:流体面元变形张量和相应的面变形应力的概念都将起一个不可或缺的作用。

5 结束语

涡动力学和粘性势流理论是一对互补的理论领域,它们的应用对象此长彼消。通过柔壁主动控制消除分离流,扩大势流理论的应用对象,是历史上从势流理论发展到有旋流理论之后的某种螺旋式上升。有趣的是,没有边界层的绕柔性体受控势流这种可能性,不是靠势流理论本身发现的,而是有旋流理论研究的结果。

参考文献:

- [1] WU J Z, LU X Y & ZHUANG L X. Integral force acting on a body due to local flow structures[J]. *J. Fluid Mech.*, 2007, 576: 265–286.
- [2] JOSEPH D D & LIAO T Y. Potential flows of viscous and viscoelastic fluids[J]. *J. Fluid Mech.*, 1994, 265: 1–23.
- [3] JOSEPH D D. Potential flows of viscous and viscoelastic liquids[M]. Cambridge University Press, 2007.
- [4] GURSUL I, GORDNIEL R & VISBAL M. Unsteady aerodynamics of nonslender delta wings[J]. *Prog. Aerospace Sci.*, 2005, 41: 515–557.
- [5] KOTA S, HERTRICK J A & OSBORN JR R F. Adaptive structures: moving into the mainstream[J]. *Aerospace America*, 2006, Sept.: 15–18.
- [6] TANEDA S. Visual study of unsteady separated flows around bodies[J]. *Prog. Aerospace Sci.*, 1978, 17: 287–348.
- [7] SAVCHENKO Y N. Hydrodynamics effects of a traveling wave[R]. USSR Bionics. Trans. JPRS L/9420, 1980.
- [8] WU J M, WU J Z, WU C J & VAKILI A D. Preliminary study of nonlinear flow over traveling wavy wall[A]. In: J. A. MILLER & D. P. TELIONIS (eds.) *Nonsteady Fluid Dynamics*[M], Philadelphia: SIAM, 1990, 359–368.
- [9] YANG Z & WU J Z. Drag reduction by axisymmetric traveling wavy wall[J]. *J. Univ. Sci. Tech. of China*, 2005, 35: 471–479.
- [10] WU J Z & WU J M. Vorticity dynamics on boundaries[A]. In: J. H. HUCHINSON & T. Y. WU (eds.) *Adv. Appl. Mech.* 32[M], Academic Press, 1996, 119–275.
- [11] WU C J, XIE Y Q & WU J Z. “Fluid roller bearing” effect and flow control[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2003, 19(5): 476–484.
- [12] WU C J, WANG L & WU J Z. Suppression of the von Kármán vortex street behind a circular cylinder by a traveling wave generated by a flexible surface[J]. *J. Fluid Mech.*, 2007, 574: 365–391.
- [13] ZHAO H, WU J Z & LUO J S. Turbulent drag reduction by traveling wave of flexible wall[J]. *Fluid Dyn. Res.*, 2004, 34: 175–198.
- [14] DU Y & KARNIADAKIS G E. Suppressing wall-turbulence via a transverse traveling wave[J]. *Science*, 2000, 288: 1230–1234.
- [15] LIN C C. Motion in the boundary layer with a rapidly oscillating external flow[A]. *Proc. 9th Intern. Congress Appl. Mech*[M]. Brussels 1957, 4: 155–167.
- [16] 杨延涛. 柔壁波形对槽道湍流减阻的影响[D]. 北京大学本科毕业论文. 2004.
- [17] BERGER T W, KIM J, LEE C & LIM J. Turbulent boundary layer control utilizing the Lorentz force[J]. *Phys. Fluid*, 2000, 12: 631–639.
- [18] DU Y. Parallel DNS of electro-magnetic flow control[D]. Ph. D. Thesis, Brown University. 1999.

- [19] DU Y, SYMOENODIS V & KARNIADAKIS G E. Drag reduction in wall - bounded turbulence via a transverse traveling wave[J]. *J. Fluid Mech.*, 2002, 457: 1 - 34.
- [20] WU J Z, YANG Y T, LUO Y B and POZRIKIDIS C. Fluid kinematics on deformable surface [J]. *J. Fluid Mech.*, 2005, 541: 371 - 381.
- [21] WU J Z, MA H Y and ZHOU M D. Vorticity and vortex dynamics[M]. Springer - Verlag. 2006.
- [22] DISHINGTON R H. Rate of surface - strain tensor[J]. *Am. J. Phys.*, 1965, 33: 827 - 831.
- [23] LONGUET - HIGGINS M S. Mass transport in water waves [J]. *Phil. Trans. R. Soc., London*, 1953, A245: 535 - 581.
- [24] CASWELL B. Kinematics and stress on a surface of rest[J]. *Arch. Rat. Mech. Anal.*, 1967, 26: 385 - 399.

From rigid - body separated vortical flows to flexible - body controlled potential flow

WU Jie - zhi , YANG Yan - tao

(State Laboratory for Turbulence and Complex System, College of Engineering,
Peking University, Beijing, 100871, China)

Abstract: In the realistic flow with small viscosity, the boundary layers and the vorticity therein have long been used for constructing aircrafts and fluid machines, during which the vorticity and vortex dynamics was formed and showed significant development, and the application of the classic potential theory was extended beyond the boundary layer, free shear flow, and the vortices. But the boundary layer has both advantages and disadvantages. The boundary layer itself, its separation, instability, transition, and the vortical structures produced in these processes may cause some unfavorable effects. Now, the flow over a rigid body at large Reynolds number becomes much more complicated (including turbulence). Most of the complexity arises with the bad, even disastrous influences of the boundary layers. However, as we keep studying the flow over the deformable body and developing the intelligent flexible materials, a new near - wall flow state can be introduced to replacing the laminar or turbulent boundary layer adjacent to a rigid surface, so that the flow may stay potential except the near - wall region.

Key words: fluid mechanics with flexible body; separated vortex flow; viscous potential flow; flow control with flexible wall