

流体动力学的研究：面向国家需求

美国国家理论与应用力学委员会
2006, 冬

流体动力学这门科学描述液体和气体的运动及其和固体的相互作用。它几乎涉及日常生活的方方面面，并在大部分科学和工程领域中处于核心地位，所以，这是一门宽广的多学科的学科领域。流体动力学影响着国防、国土安全、交通、制造业、医学、生物学、能源和环境科学。预测人体内血液的流动，微流动器件装置的行为，飞机、汽车、船舶的流体动力学性能，电子元件的冷却，或者灾害性天气和气候的预报等，都需要对流体动力学有细致的了解和深入的研究。

由于研究对象复杂、应用背景广泛，流体动力学是最具挑战性、最激动人心的科学活动领域之一。对流体动力学深入理解的需求，促进了应用数学、计算物理和实验技术的不断进步。核心问题是它的基本方程 (Navier-Stokes 方程) 没有一般的解析解，数值求解也具有挑战性。当前，流体动力学的成果丰硕，令人振奋，部分原因是新近发展的实验诊断技术和并行计算机在流动模拟与分析中得到应用，所以，研究者可以获得流体动力学现象复杂、丰富、完整的细节。

未来的流体动力学研究会产生有重大影响的结果。例如，由于理解了飓风形成、发展及其与全球天气系统相互作用的机理，飓风登陆和强度的预报将得到改进；界面不稳定限制了现有核聚变装置的能量密度，了解和控制这种不稳定可以加速聚变能的利用；减少与周围空气的摩擦阻力便可设计高效率的航空器；可以制造出各种新一代微尺度装置，如：代替电池的燃烧器、冷却电子系统的先进流动控制装置，检测 DNA 的“芯片实验系统”。电子数据存储密度正以指数律的速度增长，微流动器件装置中槽道数的增长速度已经比它还要快。

下面，我们以 5 个特定的研究领域为例，说明流

体动力学研究的重要性，它们是：微纳米尺度的流体动力学、环境流动、湍流、流动控制和生物与生物医学流体动力学。每个领域都表明，流体动力学科学知识的进步将会深刻地改变国家的未来。

1 纳、微米尺度流体动力学

许多科学和技术的新进展都以装置小型化为目标。电子工业就是最好的例子：通过设计和控制微小装置，增加生产、提高效率、扩大规模，甚至发明使文明跃进的新产品。流体动力学的研究和应用也同样地在大步前进。如果流体通过的槽道尺度小于 1 mm 叫微米流动器件，小于 1 nm 的称为纳米流动器件 (作为参照，人类头发的直径约 100 μm)，这就是微流动技术。控制流体在如此小尺度槽道中流动的能力，促进了生物、化学、工程和物理学中的基础研究和技术发明。研究中最显著的进展集中在新材料、新制造工艺、电子器件冷却、芯片实验系统中的多相流、以及对单个生物细胞内基本过程的了解。

由于较小的系统可以更迅速地分析流动和反应，更便于操控与医学有关的血液细胞，并可进行批量生产，微、纳米器件方法将导致崭新的技术应用和科学认识。微流动器件系统使人尽量避免使用昂贵而难以获得的样品。最后，此类系统可以同时进行各种可能“组合”的研究。这种研究是化学分析、合成以及药品研制中经常需要的。

理解微小装置中的流体动力学是发展科学和工程的关键。例如，科学家已经掌握如何将数千个微槽道和数百个独立控制的阀门组装成一个“芯片实验系统”，这就为改变电路设计，并导致计算机革命的大规

模集成指明了途径. 图 1 是一张集成微流动器件装置的照片 (注意比例尺). 未来的装置将集成大量不同的微流动器件.

在流体控制和反应的微装置中, 高效地混合流体非常必要. 因为流动处在层流状态, 进行混合变得困难起来. 有效混合对于下一代的基因研究十分关键, 例如: 研究能够放大少量 DNA 的反应, 就需要高效的掺混. 图 2 展示了在槽道中增加一系列的“突起”, 从而搅拌流体、达到混合的方法. 然而, 我们还需要有其它的方法.

微流动器件的近期工作要设计单个分子的传感器, 并操控单个 DNA 分子. 此外, 微流动器件也能探测单个细胞尺度上的生物、化学和力学过程 (图 3). 这种研究得到了流动中细胞膜的形状改变和力学特性, 以及细胞膜与带电并有蛋白质涂层的壁面之间相互作用的详细知识. 这些知识对控制和消除某些疾病有用.

在这种小尺度上有很多基础研究的问题, 如: 怎样考虑静电力, 如何理解纳米尺度基元物体的内流和绕流. 未来关于微、纳流动器件的科技对美国和世界范围的经济会产生广泛的影响, 并对保持美国在

研究和工业上的竞争优势非常重要. 相关研究将使几乎每种工业的消费者和研究部门都受益.

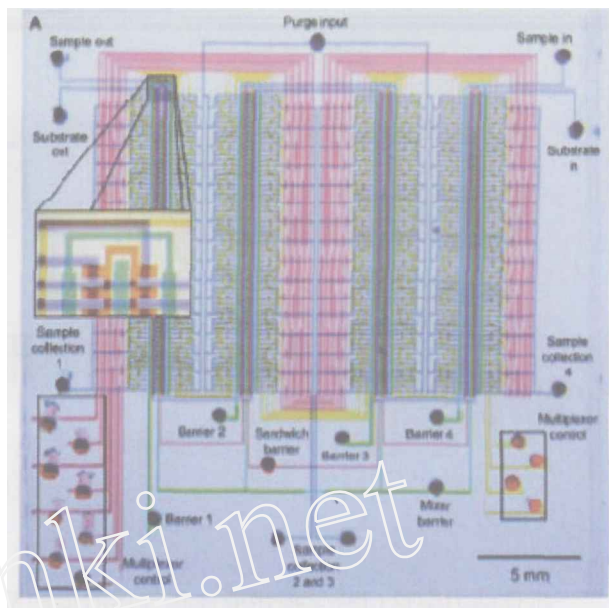


图 1 包含有 2056 个集成槽道的微流动装置. (Thorsen 等人, Science, 2002) 这类装置正使生物医学科学发生重大变化.

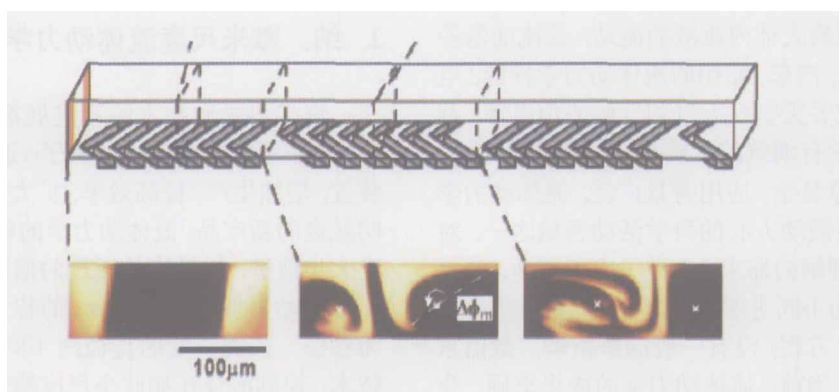


图 2 微槽道中压力驱动流. 一侧的“鱼骨”状浅凹槽导致了旋拧运动和剧烈的掺混. 这是应用该技术的先决条件. (Stroock 等人, Science, 2002)

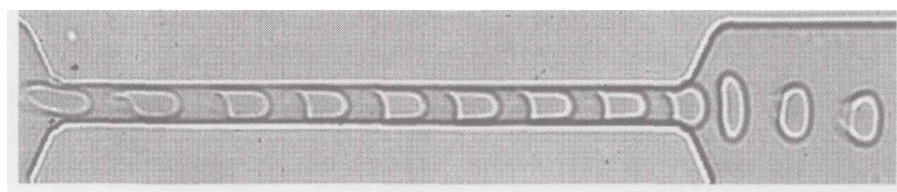


图 3 照片显示了一个红血球细胞如何挤过一个相同尺寸 (约 5 μm) 的微槽道的时间演化过程. 这是微循环中的典型流动. (Stone 等人, Harvard University)

2 环境流动

流体力学的研究使得我们可以了解、模化、预测很多环境流动, 这对工程、规划和决策有重要影响. 环境流动包括大气、海洋、河流、湖泊和地下流动.

自然流动的一个令人感兴趣的方面是: 其特征尺度范围极广——在时间和空间上有时可跨越 10 个数量级. 大尺度天气系统和海洋输运带是大尺度的 (全球范围), 它们具有数万公里的空间尺度; 较小层次的上千公里量级的有雷暴现象和海洋环流; 飓风和大气

(如两极) 漩涡具有约 100km 的直径; 海洋中的涡旋, 山脉引起的大气背风波和城市范围流动的空间尺度为 10km 左右. 准确预报和环境监测可以减轻因风暴造成人员死亡和破坏.

上述这些运动都受到地球自转和密度分层的影响, 并产生许多引人入胜的地球物理现象. 这些影响在较小尺度上的运动中更为明显. 例如, 携带污染物的气流穿过城市中的街谷, 并穿进建筑物内; 海洋波浪; 湍流状态的阵风; 影响人体健康的肺内气流. 最小尺度的流动是毫米量级的旋流, 它们可耗散能量, 并使微、纳米尺度的粒子(如气溶胶、污染物、微生物等) 悬浮在空中. 各种尺度运动的相互作用使地球环境参数始终处在利于生物生存的狭窄范围内. 自然界的流动将营养物质分配到不同物种、栖息地和生态系统中, 从而维持地球上的生物多样性.

环境流体力学对社会发展的贡献是普遍、深远的. 飓风路径的预报精度在 15 年前已经有了巨大的飞跃, 误差减少了 50%. 流体力学也是计算机预报模型的基础. 近年来, 有些模式进步很大, 改进了诸如: 厄尔尼诺现象、臭氧空洞、海啸传播、污染物输运、水文预报, 空中射流追踪和机载激光防御等. 生化恐怖主义的迹象增加了制定突发事件撤离预案的需求, 它与基于流体力学原理的有毒物质输运模型有密切关系.

也许, 环境预报中最重要的问题莫过于所谓“亚格子尺度”的参数化——即发生在预测模型计算网

格内部的流动过程的数学表述. 由于自然现象的非线性, 对这些过程(湍流、混合、漩涡、波、对流和扩散) 只有定性的了解, 而缺乏定量的和整体的了解. 不同尺度的运动, 以及尺度之间的相互作用始终是前沿研究的沃土. 对通常尺度的实际流动的研究也十分需要.

水力学中的许多传统问题也已经变得具有挑战性. 这些问题有: 可持续发展的水供应和给排水; 泥沙输运的控制; 泥沙 - 水 - 污染物的交换; 地下渗流、储存和回灌(含水层动力学); 河流; 植被、湿地和植物冠层上的流动; 堤岸的稳定性(如防波堤) 以及河流和漫滩之间的交换, 还有鱼梯和栖息地等等. 所有这些都同经济可持续发展有关.

为了克服空间尺度范围宽的困难, 人们将特定尺度的模型整合成“嵌套模型”(图 4). 然而, 嵌套模型中初始条件的选择仍然存在困难, 例如: 应该怎样处理气候系统中关键子系统(如大气、海洋和冰) 之间的界面. 可以同时进行模拟、数据采集、处理, 并将数据结合到模型中的“监测 - 模式”新领域有可能以低廉的费用极大地改进环境预报. 有关传感器放置, 数据采集, 高性能计算和物理过程自动识别正在取得重要进展.

准确的预报需要高质量的数据, 这些数据往往来自于遥感, 遥感数据可以用于检验流动模型的可靠性. 可以预期, 通过基于环境流动知识的研究可以产生重大的社会效益.



图 4 应用嵌套模型模拟俄克拉何马城中有毒蒸汽羽流的运动. 大尺度、中等尺度和城市尺度(计算流体力学) 模型同时显示. (在亚利桑那州立大学决策电教室陈列. 该电教室是复杂的社会、经济和自然过程可视化, 并进行研究和决策的地方)

3 湍流

宇宙中大部分物质是流体, 其中绝大部分处于

湍流运动状态. 滚滚烟雾, 积云和瀑布是日常生活中可见的湍流例子. 不可见的湍流实例广泛存在于运输系统, 过程工业和自然环境中(大气、海洋、河流

甚至恒星上). 相对于层流 (如: 从广口瓶中流出的蜂蜜), 湍流具有混沌性、三维性、非定常性, 并且特征尺度范围很宽. 飞机飞行时的颠簸可能由大气湍流中大于飞机尺寸的漩涡引起. 然而, 机翼和机身受到的阻力则来自于小于 1mm 的湍流漩涡.

湍流能进行高效的输运, 并以高掺混率为特征. 各种引擎 (如汽车、飞机和轮船) 的燃料和空气的掺混过程中, 湍流是基本的现象; 并且设计提高湍流混合率的手段对节省燃料和减少污染物排放有明显的效益. 另一方面, 交通工具的阻力很大程度上由湍流在动量传输中的作用引起, 所以, 在这个意义上, 我们不需要湍流. 通过管道输送油气的费用也直接与湍流引起的摩擦损失成正比关系. 在这些例子中, 设计减小湍流摩擦和阻力的方法有非常重大的经济价值. 而在其他一些情形, 目标是抑制有害的不稳定性和随之而来的湍流. 惯性约束核聚变的成功很大程度上取决于能否控制 Rayleigh-Taylor 不稳定性, 这就是一个例子. 在高超音速飞行中, 推迟向湍流的转捩可以影响大气层再入任务的成败.

从科学的角度来看, 湍流是众所周知的难题. 可以列举一系列著名的诺贝尔奖获得者的名字, 他们曾经攻关湍流, 但最终都在其他领域做出更有价值的贡献. 湍流的主要困难是: 它的三维、非定常、混沌特性, 以及发生在众多不同尺度运动之间的非线性相互作用.

湍流内在的困难促使研究工作应用现代技术, 如: 使用激光诊断技术 (在实验室中) 和采用高性能计算进行数值模拟. 诸如数字粒子成像测速仪 (DPIV) 的技术可用来确定三维脉动速度场. 这类实验观察提供了湍流中的相互作用过程的宝贵信息.

在所有工程领域, 计算机模拟正起着越来越重要的作用, 可以解决如下问题: 如果我们制造了专门设计的装置, 其性能如何? 或者应如何设计价廉物美的装置? 只有对内在的物理机制有充分的理解, 使得计算模型是可信的、高精度的和计算上易处理的, 计算机模拟才可用来回答上述问题. 湍流研究的一个重要进展是发展了大涡模拟 (LES) 技术. 如图 5 和图 6 所示, 这种方法明确地描述大尺度运动, 而隐含的小



图 5 卡车尾部湍流尾迹的计算机模拟. (Fluent, Inc.)



图 6 气体涡轮燃烧室的计算机模拟, 显示燃料的喷雾 (绿色). (Stanford University)

尺度运动影响被近似地模化。在美国,如图 5 所示的重型卡车,每年消耗约 300 亿加仑的柴油。研究卡车尾流的复杂流态可以指导改进设计,从而减小阻力,节省燃料。

LES 的出现使研究重点转向重要的小尺度过程。一个重要的小尺度过程就是湍流和微小悬浮粒子、液滴或气泡之间的相互作用。其它例子还有暖云中雨滴的形成;灰尘、花粉、孢子和生物剂的扩散;汽油机、柴油机或飞机涡轮发动机中的燃料喷雾等。图 6 展示了一个 Pratt & Whitney 飞机发动机燃烧室的大涡模拟结果,其中燃料以喷雾的形式进入燃烧室(如绿色部分所示)。为了使 LES 在上述应用中成为可靠、精确的设计工具,可以达到节省燃料、减少污染的效益,对这些过程进行进一步的研究是十分必要的。

湍流的一个副产品是噪声,这是人们不需要的。由于飞机噪声,多数社区居民反对机场扩容,它也使许多机场运营受到限制。因此,航空工业越来越关注固定翼和旋翼飞机的气动噪声。气动声学工程学会面临的关键问题是:发展不降低系统性能的减噪技术。旋翼叶片、飞机发动透平、射流排气装置产生的非定常空气动力学过程和湍流是噪声的主要来源。理解并预测降噪技术的影响是将较“安静”的产品推向市场的关键。湍流的细微流动结构是噪声产生机制的一个关键因素,因此它们应该被更精确的模化。

总之,湍流广泛存在于经济、交通、化学过程工业和环境的主要领域。尽管湍流给物理科学研究提出一个难题,但是随着现代技术的应用,如激光诊断技术和高性能计算技术,湍流研究将越来越富有成果。湍流研究有巨大的潜在效益,包括加强能源安全和减少化学的与噪声的污染。

4 流动控制

“流动控制”指的是:操纵流动处于具有所需特性的流动状态的方法的集合。成功的流动控制可以加强掺混,增加传热,降低噪声和减少污染,增加升力和机动性,并减小阻力。控制流动的能力在很多科学和工程应用领域产生重大的影响,同时对美国保持技术领先地位起关键作用。

高尔夫球上的凹坑就是关于如何进行流动控制,以达到所需效果的有趣例子。绕布满小坑的高尔夫球流动的分离点远比光滑球上的分离点要靠后,从而大大减小了阻力。因此,有经验的高尔夫球手可以将高尔夫球击出 300 码的距离,几乎是光滑球飞行距离的 3 倍。因此,我们同样可以预期交通工具性能的提升。

全世界海洋运输业每年大约消耗 21 亿桶石油。仅减少 10% 摩擦阻力的一个流动控制方案就可以为海运工业一年节省 100 亿美元(以 50 美元一桶原油计)。由此导致轮船排放的污染物的减少量也同样惊人。类似的项目也可以应用于年耗 15 亿桶飞机燃料的航空工业。如果需要,减阻也可提高飞行速度。

流动控制可以显著提升飞机和武器的灵活性和机动性,它可能改进的性能远远超过传统方法(图 7)。此外,将微流动喷管的流动控制技术应用于小型无人飞行器(UAVs)和智能武器特别有吸引力。

在很多工程应用中,加强或抑制传热十分重要。一个恰当的例子是计算机芯片的冷却,它主要受注入气流的控制。随着芯片制造技术中单个电子芯片上晶体管数目不断增加,冷却不足往往是制约条件。大规模超级并行计算机对于保持美国处于尖端科学研究的最前列是十分关键的,它可得益于对密集组装在一起的芯片组的高效冷却。成功的流动控制可以大大加快传热,从而使芯片进一步小型化。

流动控制提高喷气发动机、陆上和海洋交通工具内燃机和发电厂的燃烧效率。除了减少燃料的消耗,改善燃烧外,还可以减小污染、噪声和设备磨损。在有流体流动的制造业、化学过程和生物医学的应用方面,也可以进行改进。这些例子都体现了流动控制在突破技术障碍方面极其重要。流动控制所具有的直接和潜在的经济、环境和军事效益巨大,机遇众多。

成功的流动控制需要对所考虑的流动内在的物理机制有深入地了解:有效的流动控制算法,稳健的传感器和作动器,而这些因素都可以得到显著改进。随着计算流体力学、控制理论和微纳米制造工艺的进步,流动控制已取得了跨越。对边界层中有序结构的作用更好的认识提出了控制这些流动的新方法。更好地理解自由剪切层的不稳定性可以用小输入功率产生控制结果。制造大量传感器和作动器的能力为湍流控制提供了新机遇,这在以往是非常困难的。

传统控制方法通常通过反复试验或者依靠设计者的物理洞察力来实现。现代流动控制方法与此不同,从而为我们提供了新的机遇和挑战。现在,设计者可以依靠理论来设计优化控制系统。在实际应用这些方法于复杂流动系统的控制之前,还要解决许多具有挑战性的课题。

总之,只要在流体流动是重要因素的领域,流动控制是有所作为,促成技术进步的领域,流动控制的研究可以使美国保持技术领先。但是,要使可能变为现实,还需要在流体动力学和控制理论的基础研究方面不断有所进展。

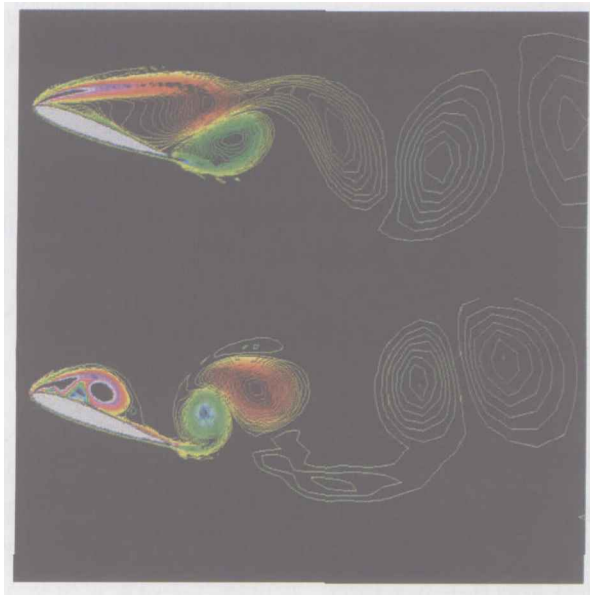


图 7 通过从一个小孔周期地吹、吸气可以推迟大攻角机翼的流动分离。上：无控制，下：有控制。（S. C. Huang 和 J. Kim, UCLA）

5 生物流体动力学

生物流动出现在有机生命体的各个方面。生命的基本功能——生殖、发育、饮食、新陈代谢和运动，都要由流体的流动维持。许多器官，如：大脑、眼睛、肺、心脏、肝脏和肾脏的正常工作，关键是依靠流体的输运过程；这些过程提供组织与血液之间分子的快速交换。任何在纳米（亚细胞量级），微观（细胞量级）或宏观（血管、器官量级）尺度上生物流体输运的中

断或失效，都会导致严重的血管疾病（如动脉粥样硬化和动脉瘤），心力衰竭，中风，脑水肿和青光眼；这些都严重地损害人体健康。对于生物流全面的理解可能发展更好的诊断方法和经济、有效的治疗手段。

与人体内生物流动有关的一个最普遍的问题是心血管疾病。根据美国心脏协会的调查，在美国心血管疾病仍然是导致死亡人数最多的疾病。美国经济每年在心血管疾病上的花费是 3000 亿美元。加上其他有关“生物流”的疾病，这个数字还会大大的增加。此外，调查显示，随着“生育高峰代”易感“生物流”疾病人群的老龄化，这方面的费用还会急剧增加。

生物流体力学给实验和计算力学界和医学设备工业提出了一些最困难的基础科学和工程问题。产生这些困难的原因是：它涉及的特征尺度范围极宽（从细胞到组织），流动中的柔性边界（血管壁移动和可变形的细胞），以及生物流固有的复杂性（如血液）。这些问题甚至存在于最简单的生物流体力学问题中。

可以从一个经典例子：血液流动对动脉粥样硬化和血管重建的作用中，看到这些问题复杂性。发展对这些疾病更好的治疗对策，需要更好地理解各种因素之间的关系，如：壁面剪应力导致瘢痕的形成和内皮细胞相应的反应与组织的生长。在这一方面，已经取得了一些进展，其中，现有的最新生物医学成像技术和强大的计算与模拟工具起了促进作用。在这里，我们拟给出一些例子。

使用快速共焦显微方法显示胚胎期斑马鱼心脏内部流动速度场（图 8），使科学家可以研究心壁组织对流动产生的作用力的响应。这类研究对了解心壁对因人工瓣膜造成的不同流型的反应很有帮助。

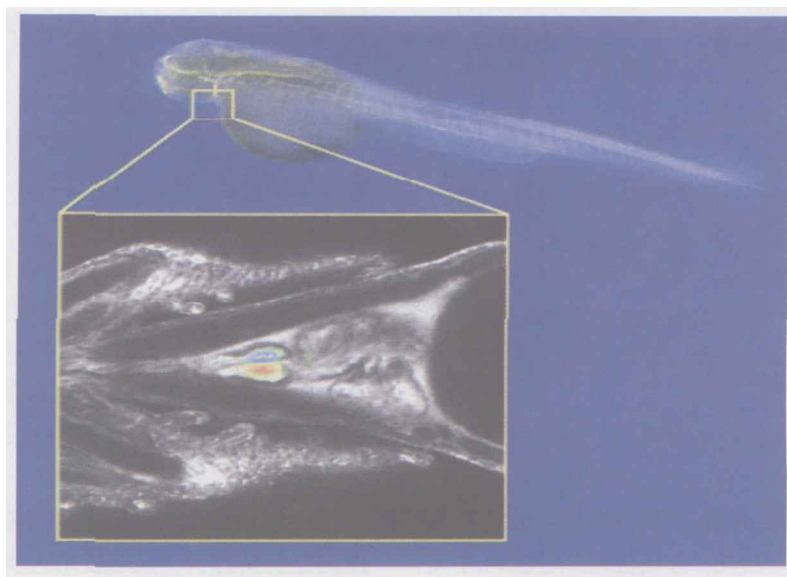


图 8 一条胚胎期的斑马鱼及其心脏（植入）。红色和蓝色显示的循环流动揭示了大动脉心瓣下游强剪切的存在。（Hove 等人，Nature 2003）这些强剪切与心脏病有关

医学成像领域已经有了很大的进步,它可以使人们对人体主、次血管进行精确的观察.观察数据与现有的强大计算流体力学工具的结合,可以对患者进行流动模拟,并用于预测外科心血管手术的效果.在

图9中,我们展示了一个这样的模拟,显示了血液流动产生的全局壁面应力分布.临床医生可以根据这些分布来预测瘢痕可能的生成位置,或者预测外科手术可能带来的流动变化.

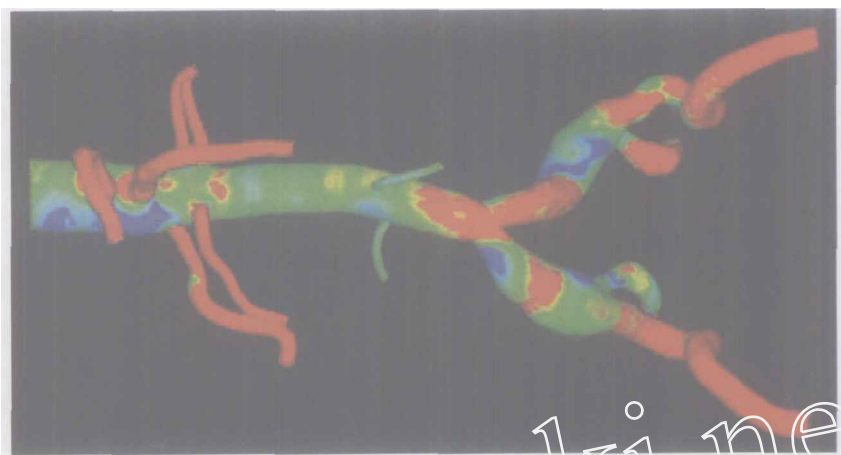


图9 计算机模拟患者人体大动脉壁面剪应力分布. (Charles Taylor, Stanford University)

生物流体力学研究领域已超越了医学应用的范畴:通过生物学模型来设计流动运输系统对于“后9.11时代”的国防具有十分重大的意义.无人航空或水下交通工具的最新设计可以追溯到飞行和游动生物运动的基础科学研究.除了医学上可预期的进步外,生物流体动力学也可以发展在空中侦察,水雷探测和危险区的检查等方面的应用.这些可能的应用前景为生物流体动力学研究的潜在效益提供了丰富多彩的实例.

6 总结

可以预期,流体动力学研究对重要国家需求有重大影响,包括:提高运输和能源利用效率,预测和减缓环境问题影响,发展微流动器件的新技术,保障安全与加强国防和对人类健康的巨大贡献.最后,流体动力学研究对于培养未来的工程师和科学家有重要作用.

致谢 该报告由 Jerry Gollub (Haverford) 收集整理;由 H. Fernando (Arizona State), Morteza Gharib (Caltech), John Kim (UCLA), Steve Pope (Cornell), Alexander Smits (Princeton), 及 Howard Stone (Harvard) 提供材料.经美国物理学会流体力学分会执行委员会 (<http://www.aps.org/units/dfd/index.html>) 批准.首页上图显示了流体射流的碰撞,由 MIT J. Bush 和 J. Hasha 提供.

USNC/TAM 办公室

主席: Ted Belytschko

前主席: Wolfgang Knauss

副主席: Nadine Aubry

秘书: Carl T. Herakovich

(北京大学工学院力学与空天技术系 杨延涛 译

北京大学工学院力学与空天技术系 黄永念,

中国科学院力学研究所 李家春 校)