

网站地图 (<http://www.imech.cas.cn/serv/wzdt/>) | 联系我们 ([http://www.imech.cas.cn/serv/lxfs/201212/t20121205\\_3698646.html](http://www.imech.cas.cn/serv/lxfs/201212/t20121205_3698646.html)) |

所长信箱 (<http://www.imech.cas.cn/serv/szxx/>) | 所内网 (<https://ioa.imech.ac.cn>) | 邮件系统 (<https://mail.cstnet.cn/>) | English (<http://english.imech.cas.cn/>) |



中国科学院力学研究所 (<http://www.imech.cas.cn/>)  
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

Search



当前位置: 首页 (../..../) >> 科学传播 (../..../) >> 力学园地 (../..../) >> 前沿动态 (../..../)

## 【前沿动态】湍流和壁面压力脉动时空谱

2023-07-01 16:00

【放大 缩小】

编者按: 力学研究所非线性力学国家重点实验室的杨子轩研究团队近期在槽道湍流壁面压力方面取得了研究进展, 本刊特此予以介绍, 以飨读者。

### 湍流和壁面压力脉动时空谱

杨博文 杨子轩

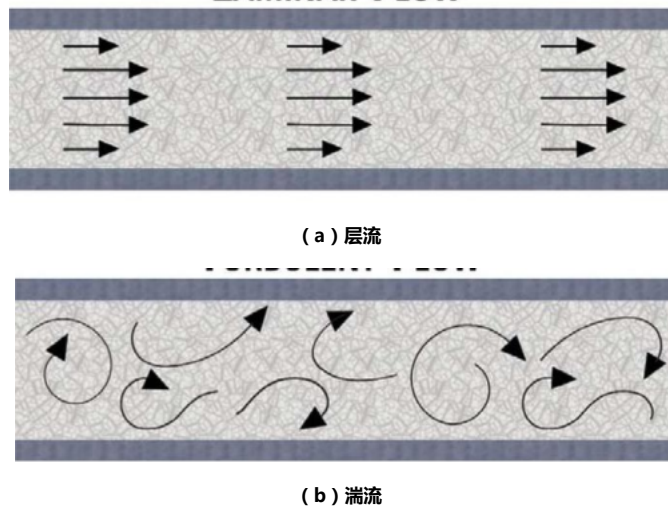
请大家想象以下场景: 在一个没有风的安静夏夜, 你坐在路边的长椅上数着星星, 一位老者慢慢地在路上走着, 突然“嗖”的一声, 一个人骑着车从旁边飞驰而过……在上面这段话里, 老人和自行车都在运动, 为什么自行车飞驰而过能发出响亮的声音, 而慢慢行走的老人就没有声音却无声无响呢 (其实从理论上讲也是有的, 但是太小了以致于你的耳朵听不到)? 这个现象和我们今天要介绍的话题有关, 这就是湍流。当然, 也许你可能听到老人的脚步声, 但那是双脚触地引起的振动发声, 与湍流无关, 咱们就不考虑了。



图1 骑自行车的人从你身边“嗖”的一声驶过 (图片来源: 百度图片)

在上面的场景里, 声源是什么呢? 这里的声源是指发出声音的物体。比如, 我们说话的声源是声带, 小提琴的声源是琴弦。声源振动就产生了声音, 上面提到的自行车骑过的时候, 骑车的人和自行车的整个表面都会振动从而发出声音。随之而来的第二个问题就是骑车的人和自行车的表面为什么会振动? 当然这里我们说的是一个零件完好装配完整的自行车, 而不是那种骑起来除了铃铛哪都响的破车。之所以会振动, 是因为它们的表面压力在不停地变化。试想一下, 你用手指戳一个橡皮球, 按下去又松开, 橡皮球表面的压力发生变化从而就会引起变形, 当外界压力在不停变化时变形的大小也随之改变, 这样就形成了振动。只是骑车人和自行车表面的变形幅度很小, 以至于你无法用肉眼观察到而已。

我们继续追问, 是什么引起自行车和骑车人表面压力发生变化的呢? 答案就是湍流。当物体在运动时, 它和环境大气之间就处于相对运动状态。在流体力学中, 我们常常可以认为物体是“静止”的, 而空气在物体周围“流动”, 空气的流动速度就是物体的运动速度 (只是方向相反)。对于流体运动, 力学家发现有层流和湍流两种不同的形态 (参见图2)。流体质点作有条不紊的运动, 彼此不相混掺的形态称为层流; 流体质点作不规则运动, 互相混掺, 轨迹曲折混乱的形态叫做湍流。湍流的基本特征是: 流体运动表现为随机性, 就是说, 流体质点的速度、压强等都是随着时间、空间作不规则的脉动。



图片分享

图2 流体运动的两种基本形态：（a）层流；（b）湍流（图片来源：百度图片）

怎样判定流体运动形态是层流还是湍流呢？这就要提到一个重要的无量纲参数——雷诺数 $Re$ 。它的定义是 $Re=uh/\nu$ ，其中 $u$ 和 $h$ 是流动的特征速度和特征长度， $\nu$ 则是流体的粘性。雷诺数增大时流动便从层流转变为湍流。这样就可以解释为什么自行车在骑行时有湍流而人在慢走的时候没有湍流了。在我们的例子中，特征速度 $u$ 是空气相对于人或者自行车的运动速度，这样老人走路的速度 $u$ 很小，而自行车的速度 $u$ 较大；特征长度 $h$ 是人的身高，在慢走和骑车的情况下是相当的；空气的粘性 $\nu$ 可以看作一个常数。因此，这里，影响雷诺数的物理量是速度，老人慢走时雷诺数低，空气的流动是层流形态，骑车急行时雷诺数高，空气的流动是湍流形态。

对于湍流，为了便于研究，力学家一般把它的“总体运动”分解为“平均运动”和“脉动”（参见图3）。具体而言，就是把大小随时间变化的部分称为脉动，对应的不随时间变化的运动，称为平均运动。因此层流状态下，只有平均运动，没有脉动。速度脉动可以引起浸没在流体中的物体表面压力的变化，可以发出声音。所以，一个慢走的老人表面压力不会发生变化，是因为他周围的空气是做层流运动，没有湍流从而没有这种湍流机制导致的声音。

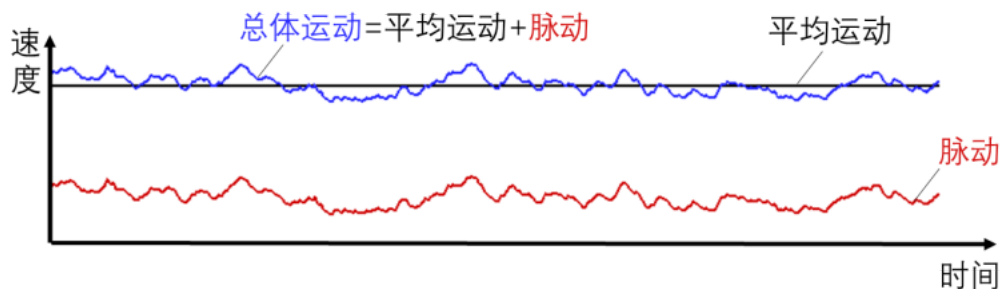


图3 平均运动、脉动和总体运动（图片来源：作者自绘）

从上面的叙述中可以知道，研究湍流运动引起的声音，关键是研究壁面压力脉动的特征。可是自行车的几何外形太复杂了，而且骑行时的速度也很难始终保持不变，直接研究这个问题难以得出规律性的结论，在这种情况下，科研工作往往考虑从一个基础的模型入手，我们选择了所谓的槽道湍流。槽道指两块无穷大的平板，中间有一定间隙，并且有一个固定的压力梯度驱动流体在两板之间沿某一方向运动（这个方向称之为流向）。上面图2（b）便可以看作是槽道湍流的简示。

近期，国际顶级流体力学期刊Journal of Fluid Mechanics刊登了我们在槽道湍流壁面压力方面的研究进展，论文题目为《槽道湍流中壁面脉动压力的时空谱》（On the wavenumber-frequency spectrum of the wall pressure fluctuations in turbulent channel flow）。在这个工作中，我们使用傅里叶变换方法对壁面压力脉动的时空信号进行了谱分析。这里，先说明一下，目前计算湍流的一种途径是“直接数值模拟（DNS）”，它是指用网格分辨所有尺度的运动而不加入任何模型的一种数值模拟手段，是进行机理研究最常用的方法。但是由于通过直接数值模拟计算壁面压力时空谱时，需要较大的计算资源与存储空间，目前国内文献中壁面压力时空谱的DNS研究仅局限于 $Re=180$ 的低雷诺数情况。我们则研究计算了 $Re=180 \sim 1000$ 的槽道湍流以及相应的壁面脉动压力时空谱，而且在壁面脉动压力时空谱的研究中成功地应用了“随机下扫模型”。

上面这段文字里提到了“谱”的概念，为了便于理解，可以类比声谱和光谱。“声谱”通常指把声音按照频率进行分解，给出各个频率下的声音强度。按照定义，“频率”是单位时间内完成周期性变化的次数，是一个描述周期性变化频繁程度的量。对于这类周而复始变化的物理量（人们也常常采用名词“波”来描述之），每重复一次所经历的时间则定义为“周期”。一般而言，频率是一个和时间相关的概念。频率和周期成反比，频率低则周期长，频率高则周期短，不同频率的声音在音乐上对应了不同的音高，人们常说一个歌手唱歌没有杂音，其实是指这位歌手唱出来的每一个音的声谱都集中在某一个特定的频率上。相比而言，湍流脉动导致的声音则是一种噪声，人们称之为“湍流噪声”。如果流体介质是空气，这种湍流噪声也常常被称为“气动噪声”。研究和预报湍流噪声有着广泛的应用。例如，深潜于海水之中的潜艇具有很好的隐蔽性，但是人们发明了声呐，通过探测噪声可以发现潜艇并且予以定位（参见图4）。因此，研究湍流噪声可以为“静音型”潜艇外形的设计提供科学依据。



图4 深潜于海水之中的潜艇（图片来源：百度图片）

对于光谱，人们很少按照频率来进行分解，这是因为光的振动频率太高了，我们可以用耳朵分辨声音的频率，却不可能用肉眼去分辨光的频率。我们的眼睛可以分辨光的颜色，其实这对应了把光按照不同的波长进行分解，例如红光的波长比紫光的长。白光则是由各种波长的光混合而成，是一种宽谱信号。不难理解，波长是一个和空间相关的概念，其定义是：波在一个振动周期内所传播的距离。声和光都是波动现象。相对于声和光，湍流脉动信号既在不同频率上有很大差别，也在不同波长上有不同的特征，因此要全面地描述湍流脉动的信号，我们需要研究它的时空谱，也就是对湍流脉动信号在时间和空间上同时进行傅里叶变换。

有了时空谱的概念，我们继续介绍什么是随机下扫模型，这就必须要引入另一个概念，叫做“泰勒冻结假设”。先举个日常生活中的例子，假如我们想临摹一幅清明上河图，我们通常会从一头开始，画完一部分把画纸挪动一下再画下一部分。可是在实验室里，如果我们想要测量一个很长的湍流结构，流体不会像清明上河图那样乖乖地停留在原地等你一点一点地挪动你的相机，这时我们该怎么办呢？“泰勒冻结假设”认为，上游的信号会在之后的某个时刻一成不变地传到下游，比如流动速度是3米/秒，那么我在1秒之后拍到的某一位置的流场和当前时刻上游3米处的流场是一样的，这样我们只需要在拍照窗口上多拍几张照片，然后把它们拼起来就可以得到当前时刻在不同位置处的流场（参见图5）。

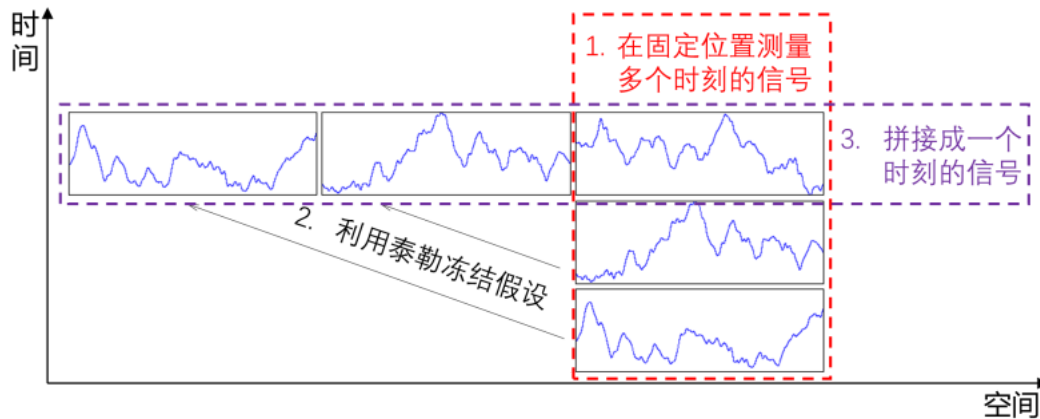


图5 泰勒冻结假设示意图（图片来源：作者自绘）

这里需要指明的是，如果没有速度脉动，那么泰勒冻结假设是准确的。可是对于湍流而言，由于脉动的存在，信号在传播过程中是不可能“一成不变”的。为了更准确地描述湍流的运动，需要对泰勒冻结假设进行修正，其中最常用的修正就是随机下扫模型。在泰勒冻结假设中，人们认为信号在时空之间的关联关系只依赖于平均运动的速度。“随机下扫模型”则认为，湍流信号的时空关联关系还应该依赖于湍流脉动的均方根。泰勒冻结假设给出的时空谱的所有能量都集中在一条直线上（被称为“对流线”），而随机下扫模型给出的时空谱的能量等值线则是许多类似于椭圆的封闭曲线。在图6中，我们给出了两种理论模型下的湍流脉动能量等值线的形式，其中横坐标“波数”是波长的倒数。有了随机下扫模型之后，较为复杂的时空谱就被简化为空间谱和一个特定的时间分布函数的乘积。这样数值模拟的耗时大大减少，只需要从较短时间的数值模拟数据中计算出空间谱，再结合随机下扫模型的时间分布函数就可以得到时空谱。这样不仅大大减少了获得时空谱所需要的时间资源，还节省了存储空间。

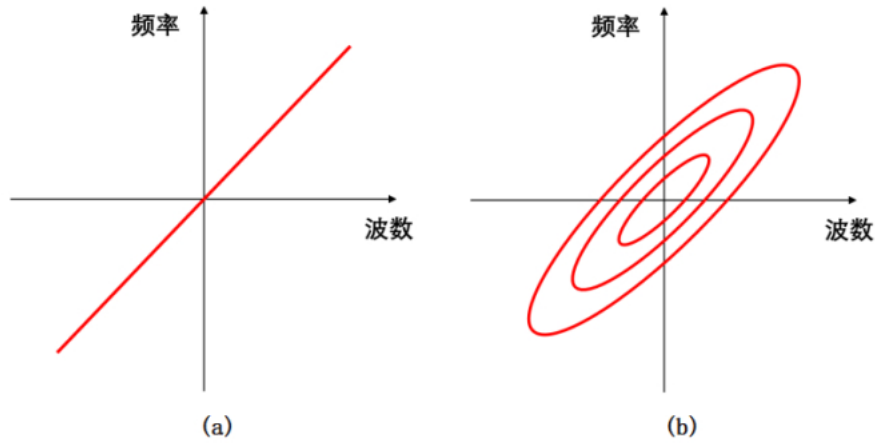


图6 不同理论模型下的时空谱能量等值线示意图：(a) 泰勒冻结假设；(b) 随机下扫模型（图片来源：作者自绘）

为何研究湍流压力也可以成功地应用随机下扫模型？原来和速度信号类似，压力信号也会随着流动从上游传播到下游（人们称之为“对流”），但是其传播的速度不仅受到平均流动的影响，还受到能量较高、尺度较大的湍流脉动（人们称之为“大尺度涡”）的影响。因此，平均运动对流以及大尺度涡的随机下扫作用是壁面压力时空关联的两个主要机制，壁面脉动压力时空谱可以采用随机下扫模型描述。在这一物理解的基础上，我们推导出表述壁面脉动压力时空谱的可以得到随机下扫模型的时间分布函数的形式为高斯函数。这一函数中只包含两个具有明确物理意义的速度尺度：平均对流速度以及缓冲区（即近壁湍流最活跃的区域）的脉动速度，除此之外不包含任何可调参数。与直接数值模拟（DNS）相比，它大大简化了模拟计算的复杂程度。图7对比了壁面压力时空谱的DNS结果与随机下扫模型的计算结果，证实了随机下扫模型可以很好地得到壁面压力时空谱的含能区性质。这里，含能区是指能量较高的区域（即图中颜色较深的区域），在这个区域，随机下扫模型结果和DNS结果符合较好。

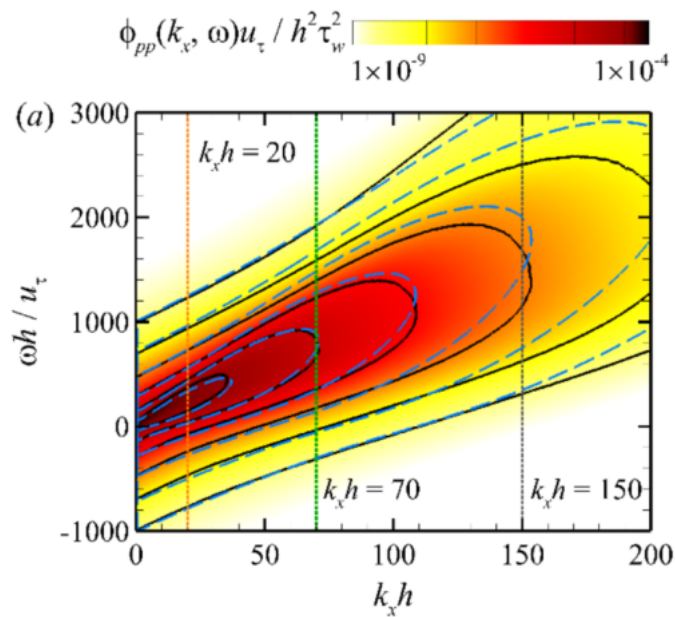


图7 壁面脉动压力时空谱的DNS结果（实线）与随机下扫模型（虚线）的对比



中国科学院 (http://www.cas.cn)  
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

中国科学院力学研究所 版权所有 京ICP备05002803号 京公网安备110402500049

地址：北京市北四环西路15号 邮编：100190

(http://bszs.conac.cn/siteName?method=show&id=081D2D6355AD574EE053022819ACCBA7)



