

# 第四章 大气行星边界层

## 4.0 引言

### 4.0.1 流体流动状态

#### 层流

流体分层流动，互不混合，有规则性，称为**层流 laminar flow**。

如右图，管中流速较小，红色液体线为一条直线

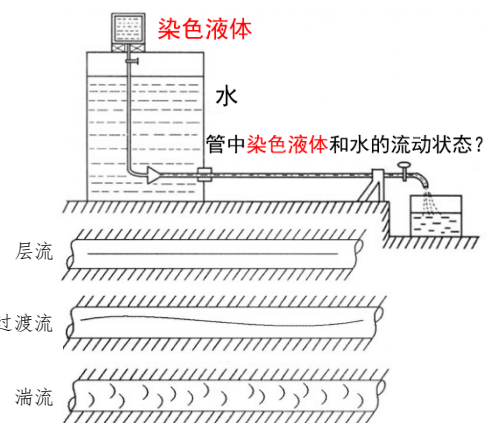
#### 过渡流

管中流速增大，红色液体线有波动，这是上下两者的中间状态。

#### 湍流

流体不规则运动，运动杂乱，这种运动称为**湍流 turbulence**。

管中流速增大且超过临界值，红色液体与水混合，红色液体线不复存在。



#### 湍流是一种随机运动吗？

“随机”的定义：对于一个确定性过程而言，方程中没有随机项，那么从给定的初始状态到下一个时刻只能有唯一的状态；而随机过程则下一个时刻可以有多种不同的状态。因此，湍流不是本质上的随机运动，而是确定性混沌系统。但由于其对初始条件的敏感性和非线性，它在外观和统计行为上类似于随机过程。

### 4.0.2 流体力学中的边界层

#### 定义

**流体与刚性边界之间**会形成一个运动性质与**流体内部**不同的区域，称为**边界层**。

#### 特征

① **几何学特征**： $D \ll L$ ，纵向 $\ll$ 横向

② **运动学特征**：无滑脱条件： $\vec{V}|_{z=0} = 0$  边界线上速度为零

**有很大的流速切变**： $V(z)$  = 垂直方向上动量分布不均匀 导致湍流的重要因素

③ **动力学特征**：**粘性力重要**。对于层流边界层：分子粘性力；对于湍流边界层：**湍流粘性力**。

### 4.0.3 大气行星边界层

#### 引入

前几章所讲述的大尺度运动，在尺度分析的基础上，合理地忽略了**气体内部的摩擦力**，忽略了**热传导和热扩散引起的热量输送**。但是，在接近地球表面的这一层大气中，不能忽略。因为这一层次**受地表影响显著**，运动具有**湍流性**。

#### 观测现象

目前地面气象自动观测系统风向风速的采样间隔时间为 1s。右图蓝线为 3s 的风速风向合成，黑色线为滤波结果（相当于做了滑动平均，去掉了随机性，表现出某种规律性的层流部分）。**所谓湍流，就是蓝色的线减去黑色的线。**

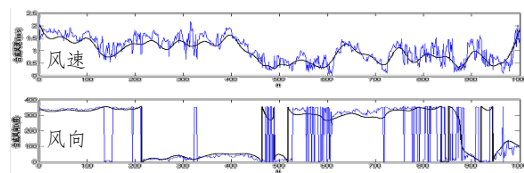


图 5 1999 年 12 月 07 日 13 时原始合成风向风速值（浅蓝色线）与滤波后合成风向风速值（黑色线）的比较图

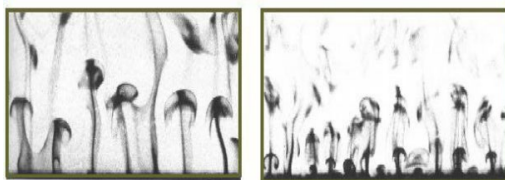
#### 主要作用

① **动力作用**：地球表面粗糙不平，流体的连续性 $\rightarrow$ 边界层的风垂直切变强 $\rightarrow$ 湍流发展

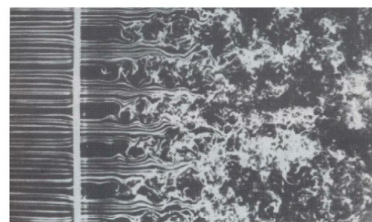
② **热力作用**：地球表面非均匀加热作用 $\rightarrow$ 低层大气温度垂直梯度大 $\rightarrow$ 湍流发展



动力作用

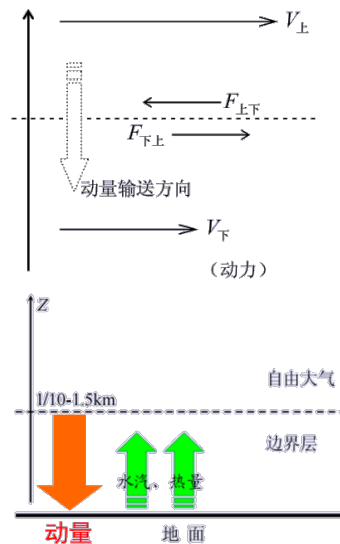


热力作用导致湍流



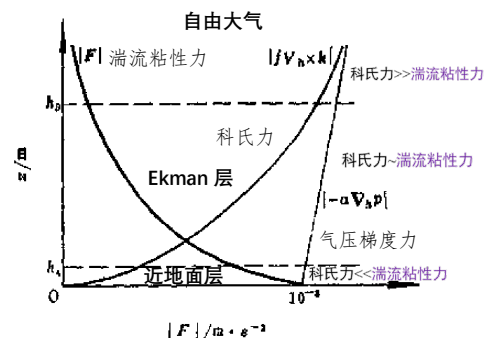
从层流演变为湍流

<b>PBL 定义</b>	<b>大气行星边界层 PBL</b> : 与 <b>地表相接触</b> , 厚度约为 <b>1~1.5km</b> , 受地面 <b>热力和动力</b> 影响大, 具有 <b>湍流特性</b> 的大气层。它是地球表面和大气间能量和物质交换的重要通道。
<b>湍流</b>	湍流是不规则的涡旋运动, 其中有许多 <b>使流体发生混合的涡旋</b> , 称之为 <b>湍涡</b> , 和分子不规则运动类似。
<b>湍流作用</b>	强烈的混合作用 <b>引起物理量输送</b> , 具体指: 具有 <b>存在物理量的梯度</b> , 从物理量大值区向小值区输送, 又考虑到边界层中物理量的 <b>垂直梯度最大</b> , 所以, <b>湍流输送主要在垂直方向上</b> 。 大气行星边界层中物理量 <b>水平方向输送</b> 由 <b>风的平流输送</b> 完成, 比湍流水平输送大很多。
<b>湍流尺度</b>	湍流的尺度一般小于 2m, 属于 Micro $\sigma$ 尺度
<b>重要性</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 湍流的混合作用使得地面的<b>热量和水汽向上输送</b>, 使得<b>动量向地球的表面输送</b>, 比分子扩散的混合作用大几个数量级。</li> <li>② 高层动量输送到低层, 以补偿大气边界层和下垫面不光滑所造成的动量摩擦耗散。<b>大气行星边界层几乎消耗整个大气动能的一半左右</b>。</li> <li>③ 根据观测, 入射于地气系统的太阳能约有 43% 被地面吸收, 以潜热 23%、感热 6% 和辐射 14% 的形式进入大气边界层, 然后通过大气边界层传输到自由大气。</li> <li>④ 大气中的水汽来自于下垫面, 几乎<b>全部为大气边界层接受</b>, 通过大气边界层传输到高处, 再通过各种垂直运动输送至自由大气; 通过水汽向大气提供 50% 的内能。</li> <li>⑤ 大气边界层是整个大气主要的<b>热量源、水汽源、动量汇</b>。</li> <li>⑥ 大气行星边界层过程的热力和动力强迫及其耗散作用是影响自由大气中天气系统发生、发展演变和消亡的重要因子。研究边界层过程的性质和特征是认识大气运动规律的重要组成部分。</li> </ol>
<b>研究目的</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 在整个大气中起重要作用: 如数值预报中的物理过程描述, 大气运动的强迫耗散问题。</li> <li>② 边界层本身的特性: 如污染物的扩散, 飞机起降、植物生长等。</li> </ol>
<b>研究方法</b>	由于对湍流结构还很不了解, 本章将采用 <b>半经验半理论</b> 的方法, 用平均运动的参数来表示湍流输送过程, 即采用参数化方法模拟湍流对平均运动的影响, 从而研究行星边界层中运动的规律。



## 4.1 大气行星边界层及其特征

<b>概述</b>	地表是大气的动力边界(无滑脱边界)和热力边界。受地表影响, 大气边界层是 <b>湍流边界层</b> 。
<b>动力边界</b>	大气最底层靠近地球表面, 受 <b>地面摩擦阻力</b> 影响。大气流过地面时, 地面上各种 <b>粗糙元</b> (草、沙粒、庄稼、树木、房屋)会使大气流动受阻, 这种摩擦阻力由于大气中的湍流而 <b>向上传递</b> , 并随高度的增加而逐渐减弱, 达到某一高度后便可忽略。 地表对大气的影随高度增加而减弱, <b>湍流的强度随高度增加而减弱(切变减小)</b> , <b>湍流粘性力随高度增加而减小</b> , 湍流粘性力的重要性随高度不同而不同。因此, <b>不同高度上受力会不同</b> 。
<b>受力分析</b>	<p><b>水平气压梯度力</b>: 气压梯度随高度的增加而缓慢减小, 但比容随高度的增加呈指数增加, 因而数值随高度的增加而增加。</p> <p><b>水平科氏力</b>: 在地表面风速可认为是零, 但<b>风速的数值随高度的增加而增加</b>, 因而水平科氏力的数值随高度的增加而增加。</p> <p><b>湍流摩擦力</b>: 风速垂直切变的数值随高度的增加而减小, 而且在下界面附近, 由于热力和动力原因, 湍流交换剧烈, 因而数值在下界面附近较大, 粗略估计, 湍流摩擦力的数值随高度的增加而<b>呈e指数减小</b>。</p>



受力分析与大气分层图

### 4.1.1 大气分层

<b>概述</b>	按湍流粘性力的重要性, 对稳定层结大气在垂直方向上进行分层。
<b>贴地层</b>	<b>贴地层一般几厘米</b> , 具有如下特征:

- ① 附着在地表,  $\vec{v} \approx 0$ , 无湍流。
- ② **湍流粘性力 = 0**, **分子粘性力最重要**。

- ③ 温度垂直梯度很大，穿过 1 毫米厚度温度变化 10 度。（地表温度远高于大气温度）
- ④ 大气动力学很少研究，但在**农业气象**中重要。

## 近地面层

**常值通量层**，近地面层顶高度为 **80-100m**，具有如下特征：

- ① **湍流运动非常剧烈**，以湍流粘性力和水平气压梯度力为主，科氏力忽略。
- ② 风向几乎不随高度变化，但**风速随高度增加而增大**。
- ③ **物理量的垂直输送几乎不随高度改变**，故又称为常值通量层。
- ④ 地气相互作用强烈（热量与水汽）。

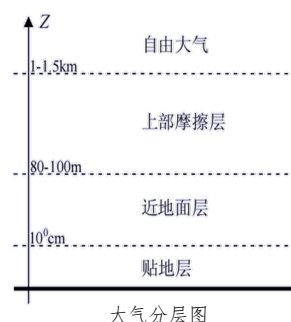
## 上部摩擦层

**Ekman 层**，上部摩擦层顶高度为 **1-1.5km**，具有如下特征：

- ① **湍流粘性力、科氏力、气压梯度力同等重要**，三力平衡， $\vec{F}_{\text{压}} + \vec{F}_{\text{科}} + \vec{F}_{\text{粘}} \approx 0$ 。
- ② 风向、风速随高度均有变化。
- ③ 物理量的输送以垂直方向为主。
- ④ **下界面对近地面层的影响通过该层向上输送影响自由大气。**

## 自由大气

- ① 湍流粘性力可忽略，**气压梯度力与科氏力相平衡**： $\vec{F}_{\text{压}} + \vec{F}_{\text{科}} \approx 0$
- ② 自由大气不考虑摩擦，但它紧挨着边界层，因而**受大气行星边界层顶垂直运动的影响**，从而边界层的摩擦作用还会**间接影响**自由大气。



## 工作分层

一般实际工作中把大气分为三层：**近地面层、上部摩擦层、自由大气**

大气	边界层	湍流粘性力重要	大气边界层占整个大气的 1/10
	自由大气	湍流粘性力可略	
	近地面层		

## 4.1.2 边界层的一般特点

### 特点一

近地面层**气象要素的日变化大**：大气与地表相比，地表热容量小，由于地球自转和太阳辐射作用，其日变化大，而近地面层贴近地面，因而日变化大。

### 特点二

近地面层**气象要素的垂直梯度大**：与**近地面层外部**（自由大气）比梯度很大；与**水平方向**比梯度很大。

### 特点三

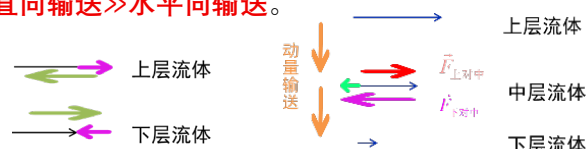
湍流运动引起物理量的输送：由于垂直梯度大，所以**垂直向输送**  $\gg$  **水平向输送**。

### 特点四

比较刚体和流体运动中摩擦粘性力：

**刚体**：与相对运动**趋势相反**，有静摩擦的存在。

**流体**：在相对运动反方向，**无静摩擦的存在**。



### 静摩擦力

两个相互接触的物体，当其接触表面之间有相对滑动的趋势，但尚保持相对静止时，彼此作用着阻碍相对滑动的阻力，这种阻力称为静摩擦力。

**分析中层流体**：中层流体所受湍流粘性力等于**上、下层流体对其的合力**（上层加速，下层减速）。湍流粘性力在运动的反方向（不是完全如此，取决于上下层流体的相对大小）。

湍流粘性力在运动反方向一侧， $\vec{F}_k$  不一定和  $\vec{V}$  正好相反，也可以出现在  $\vec{V}$  反方向的任意位置一侧。

### 特点五

上部摩擦层中，满足三力平衡： $-\frac{1}{\rho} \nabla p - f \vec{k} \times \vec{V} + \vec{F}_k = 0$

风穿越等压线指向低压一侧，湍流粘性力在运动反方向一侧，与地转偏差相垂直。

## 原理说明

$\vec{V} \cdot (eq.) \Rightarrow \vec{V} \cdot \left( -\frac{1}{\rho} \nabla p - f \vec{k} \times \vec{V} + \vec{F}_k \right) = 0$  ①  $\vec{V} \times \vec{F}_k < 0$  摩擦耗散动能 ②  $\vec{V} \cdot (-f \vec{k} \times \vec{V}) = 0$  科氏力不做功 ③  $\vec{V} \cdot \left( -\frac{1}{\rho} \nabla p \right) > 0$  气压梯度力作正功。因此**从能量平衡角度看**：**风必然穿越等压线指向低压一侧**。

## 动量输送

边界层和自由大气均为**低压系统**时，边界层中穿越等压线指向低压，低压辐合运动，产生上升运动，进入自由大气。① 自由大气产生辐散，使得**气旋减弱**。② 边界层**气旋加强**，补偿湍流粘性耗散。**(动量从上往下输送)** 相同的层结条件下，在正压和斜压条件下，在高层可形成不同的环流配置。

