密度流的动力和热力结构

赛丽泰来提 131170006　尹婧楠 131170015　李聪元 131170049

一. 密度流实验意义和目的

密度流是由于密度相对更大的流体嵌入密度相对小的流体下方而形成的一种异重流，这种密度差异可以是由某一流体中溶解或悬浮的颗粒物造成，也可能是由两种流体的温度差异造成的。在大气和海洋中的很多自然现象中都会有密度流形成，一些人为造成的现象中也会涉及到密度流，因此了解密度流动力和热力的结构和性质具有重要的科学意义。

密度流水槽实验可以帮助理解一些中尺度的锋面系统结构，比如雷暴出流和海风锋面，它们都是由于密度较大的冷空气楔入较暖空气下方而形成的重力流。除此之外，大气中还有一些悬浮于大气中层的密度流，其中常见的一种就是由于火山喷发而在大气中高层形成的气体或固体流。而海洋中的密度流则多半是由海洋中的盐度或温度分布不均匀而引起的，如海洋中大范围的温盐环流过程本质上就是由于海水密度的差异导致的。此外，如果海水中混入了淤泥等固体悬浮物也会导致海水密度增加从而形成重力流。除了自然现象，也有一些人为情况中会涉及到密度流，可以说密度流与我们的生产生活的各个方面都有着非常紧密的联系。比如工厂生产过程中如果有大密度的气体发生泄漏，就会形成密度流结构，大气层中悬浮的密度流过程对飞机安全和大气污染物的输送过程都有着重要影响，甚至密度流对于昆虫学和病虫害的防治都有着研究价值。

本次实验研究的密度流通过温度的差异来形成。采用的实验手段主要有 PIV 流场反演和温度探测两种。PIV 流程反演通过具体形象的流场图像来观察密度流的结构特征，以及在流动过程中的变化趋势；温度探测则从密度流的温度随时间变化的角度来抽象地观察密度流的流动过程，并通过温度探头所测温度的变化来比较粗略地计算密度流的速度，并与密度流的理论速度做相应的比较和误差分析。

二. 密度流实验设计和流程

1. 实验仪器：

有机玻璃水槽：长度 1m

水槽隔板：用于将冷水和热水区隔开

夹具：用于夹紧隔板，尽可能避免冷水区漏水

PIV 示踪粒子：粒径，密度

激光器：观测示踪粒子的背景光

测温仪（含热电偶探头）：探测水槽不同位置密度流的温度

摄像机：真实记录密度流的流动过程，便于进行 PIV 流场反演以及计算密度流的实际流动速度

三脚架：架设摄像机

2. 仪器布置：

① **相机架设**：水槽前后各架设一台摄像机，一旦架设并调焦完成后，相机和水槽的相对位置不再移动。

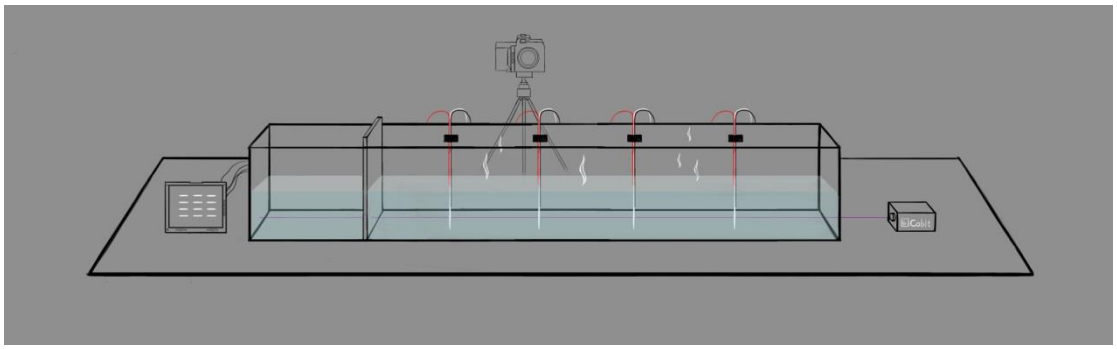
② **测温探头布置**：探头布置在水槽的内侧壁，有两种布设方式，每种方式

都布设 12 个探头。

第一种：在水槽水平方向均匀布设 4 组探头，每组在水槽底层和表层（高度 10cm）各布设一个探头，因水槽长 1m，则各组之间的间隔以及首尾两组探头与水槽两端的距离均为 20cm，接着对第二组探头进行加密处理，在其底层和表层之间的垂直方向上，再均匀布设 4 个探头，即各探头距离水槽左端均为 40cm，而垂直方向上的间距均为 2cm。低层的探头的目的在于通过探头温度的变化测算密度流的实际速度；表层探头的目的没有具体的计算意义，但可以用来观察表层的热对流是否会对实验造成比较显著的误差；中间加密的探头是为了估算密度流的高度以便计算密度流的理论速度。

第二种：将 12 个温度探头全部在上组实验中第二组的位置加密，各探头垂直方向上间隔 1cm，因此最上层探头高度为 11cm 处。这种布设方式是为了进一步勾勒密度流的温度垂直廓线，从而对密度流的结构有进一步的认识。

③ **激光器架设**：激光器的放置需保证激光与水槽侧壁平行穿过水槽，以便拍摄到的示踪粒子的路径与密度流的实际流动方向（平行于水槽侧壁）一致。



（仪器架设示意图）

3. **实验流程：**

为了保证PIV示踪粒子流场分析的结果与温度变化分析的结果具有一致性和可比较性，将示踪粒子实验和温度测量实验融合到同一组实验中，进行多次实验。具体步骤如下：

① 前期准备：架设好相机并调焦，调配 PIV 失踪粒子溶液。

② 将隔板插入水槽中（隔板距离水槽左端 15cm），用夹具将隔板处夹紧，尽可能避免冷水加入以后发生从隔板的两侧及底部泄漏。

③ 向隔板两侧同时倒入冷热水。其中冷水区在隔板左侧，宽度约 15cm，热水器在隔板右侧，宽度 75cm。倒水的时候尽量让冷热水液面保持平行上升，以避免由于液面高低不同而产生的水压使隔板发生倾斜而导致两侧的水发生泄漏或混合。每次实验都控制水面高度 12cm。

④ 打开激光器，并调整激光平行于水槽侧壁穿过水槽。同时打开摄像机开始录制。

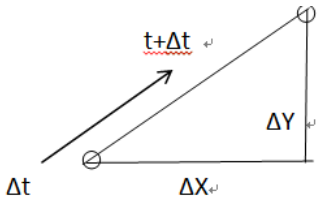
⑤ 松开夹具，抽开隔板。记录下抽开隔板的时间和密度流第一次到达水槽右侧的时间。观察密度流的流动变化过程，直到密度流基本消失并演变成重力内波的形势为止。关闭摄像机。

⑥ 检查视频和温度数据是否完整可靠，一组实验结束。

⑦ 控制不同的温差进行多次实验，比较温差对密度流结构和速度的影响。

三． 密度流的 PIV 流场反演

PIV 即粒子成像测速技术，可以描绘出瞬时的流场剖面上的全部速度矢量。在本课题的诸多次实验中，均是利用 PIV 测量出密度流流场的二维速度矢量，为此，需要在测量的二维平面内均匀散播跟随性好，反光性好且比重与流体相当的示踪粒子，利用相机记录，获取示踪粒子的运动图像，利用专业 PIV 软件对示踪粒子图像进行分析处理，得到实时的二维密度流流场的速度矢量分布图。鉴于实验中有边界效应的影响，故分析中只考虑第一次密度流过程，选取此期间示踪粒子的运动图像进行分析。



1. 密度流实验 PIV 原理及应用

1）实验 PIV 原理

通过摄像机获取的在辅助光源（激光）下的两个不同时刻的示踪粒子的二维运动图像，均可以被划分成许多大小相同的“判询域”（积分格），将每对“判询域”进行互相关运算，运算得到的结果是一个速度矢量，即一块“判询域”产生一个速度矢量，从而形成整个流场的矢量场和速度大小的分布。流场中某一示踪粒子在二维平面上运动,其在 x、y 两个方向上的位移是时间 t 的函数 x(t)、y(t)。则该示踪粒子所在处的流体质点的二维流速可以表示为：

$$\begin{cases} v_x = \dfrac{dx(t)}{dt} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t} = \overline{v_x} \\ \quad t+\Delta t \\ v_y = \dfrac{dy(t)}{dt} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{y(t+\Delta t) - y(t)}{\Delta t} = \overline{v_y} \end{cases}$$

在上式中:v_x 与 v_y 是流体质点沿 x、y 方向的瞬时速度，$\overline{v_x}$、$\overline{v_y}$ 是流体质点沿 x 方向与 y 方向的平均速度，Δt 是测量的时间间隔。当 Δt 足够小时，v_x 与 v_y 的大小可以较为精确地表示 $\overline{v_x}$ 与 $\overline{v_y}$ 的大小，即通过测量示踪粒子的瞬时平均速度实现对二维流场的测量。

流场中的示踪粒子反射或散射来自激光光源的光线,每一粒子上反射或散射的光强信号与其所处空间位置成单一映射,形成了光强信号与空间位置的函数映射关系,通过互相关分析方法可以确定两幅图像之间的对应关系。我们对两个不同时刻的图像对划分网格,通过计算图像对的互相关函数并利用互相关函数极大值的位置确定图像网格的相对位移,即示踪粒子在时刻 $t+\Delta t$ 与 t 之间的位移。在图像对的采集间隔已知的情况下,进一步计算出示踪粒子在时间内的瞬时平均速度,即得到示踪粒子处流体质点在时间内的瞬时平均速度，从而获取密度流流场内部的二维分布。

2）**实验 PIV 系统构建**

上图为密度流实验的二维 PIV 系统示意图，系统构建的重要组成部分包括：玻璃水槽（长 1m，宽 0.1m，高 0.2m），阀门挡板（长 0.2m，宽 0.1m，厚度不计），脉冲激光源、单反相机、数据采集（及控制）计算机。主要过程是水槽中挡板两端分别加入不同温度的水（在控制其它变量不变的情况下，使得两端水温温差分别为 20℃，30℃以及 35℃），保持液面相平至 0.12m 高度处；两端分别加入示踪粒子；脉冲激光面照亮流场中的待测平面，保持扩束在水槽中央；待液面稳定后抽去挡板，密度流发生，此时用单反相机采集平面内的示踪粒子运动图像；后用相关 PIV 软件处理粒子图像获得密度流过程中的速度场。

① **示踪粒子的选取**

PIV 是通过示踪粒子速度的来测量其所处的流场速度，不同的示踪粒子特性不同，其对 PIV 系统的测量结果也会产生很大的差异，为保证密度流实验中流场测量的精度，示踪粒子需满足以下条件：

a) 中性漂浮粒子密度应与实验流体密度尽量一致，使得粒子仅受到流体粘性力作用：

b) 相对于密度流现象其尺寸足够小，保证好的跟随性；

c) 尺寸又需足够大，以保证有效地反射或散射足够光强。对于 PIV 进行整个流场测速来讲，只有粒子存在的位置才能进行测速，因而需要全场均匀布撒示踪粒子，才能保证测得密度流过程中整个流场的速度矢量分布，同时也需要控制示踪粒子浓度，不宜过高，也不宜太低。

② **PIV 系统中激光器的设置**

a) 激光光束直径很小，通过棱镜组合得到的 PIV 所用的片状激光的厚度不同，有个极薄的束腰位置，PIV 的待测流场必须放到这个束腰位置测量结果才能精确；

b) 片状激光的束腰位置在激光工作时要保证连续可调，使得测量时可以不移动待测流体而通过调节光学器件即可，以免给测量带来不便。

③ **PIV 系统中相机的设置**

鉴于密度流实验中实验器材的局限性，单反相机无法拍摄清晰地拍摄整个密度流过程，为保证在图像处理时具有较高的精确度，我们选取一次完整密度流过程中的其中一段用以记录，拍摄实际长度为水槽长度的 1/4，实验证明在此段内的密度流过程可以较好地表征整体的密度流过程。

3）**实验 PIV 粒子图像的处理**

PIV 的数据分析实质上便是图像处理技术，利用由相机获取的示踪粒子运动录像，用专用截图软件按关键帧或者特定时间间隔截取一定数量的粒子图像，然后利用专业的 PIV 软件对截取图像进行分析处理，获取密度流流场的速度矢量分布。但在此过程中需要注意截取的粒子图像个数必须为偶数，因为 PIV 处理图像时运用的互相关理论需要两帧图像来计算期间的粒子运动平均速度，借此得到整个流场的流速分布。PIV 将记录的两帧

图片分别划分成若干个规格相同的“判询域”，一个“判询域”实质上是一个积分窗口，然后对这两帧图片上的任意一对“判询域”进行互相关运算，尽量使得“判询域”内的示踪粒子在同一方向和距离上移动，以保证较好地相关性，从而每个“判询域”得到一个速度矢量。不同的 PIV 处理参数会导致不同的分辨率和计算精度，在本次密度流实验中所选用的参数如下：

a) 图像处理区域（ROI）：长为 24cm，宽为 12cm，时间步长 0.1s；

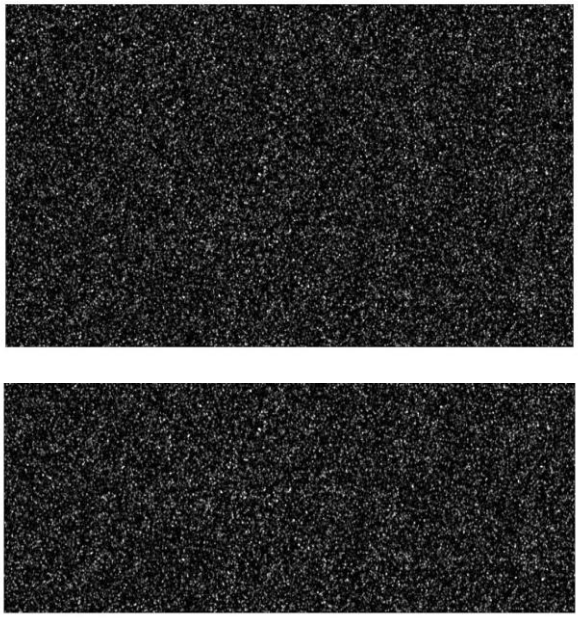
b) 图像预处理：调整对比度，窗口大小为 20px（像素）；高通滤波，滤镜尺寸为 15px；

c) PIV 迭代方法：互相关函数，FFT 窗口变换；

d) 积分窗口（“判询域”）：通道 1，窗口尺寸为 128px，迭代步长为 64px，即迭代 2 次；通道 2，窗口尺寸为 64px，迭代步长为 32px，即迭代 2 次；

e) 运算结果修正：滤去速度异常值，并做平滑处理，有效速度矢量为绿色，插值速度矢量为红色。

2. 密度流实验结果分析

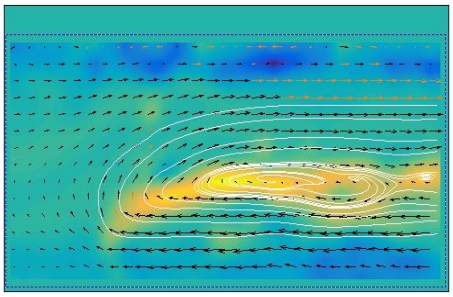


根据 PIV 系统获得的原始示踪粒子运动图像如图 3.2.1 所示，为密度流流场中截取的序列图像中相邻的两幅图，图中的白色亮点即为示踪粒子。

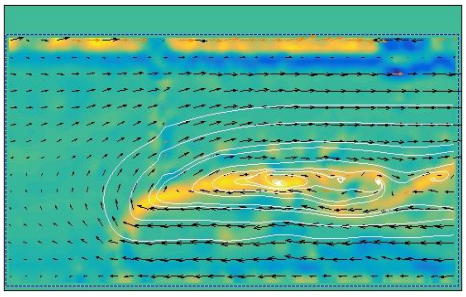
由于这两幅图像的间隔较小为 100ms,即 0.1s，就密度流过程而言，期间流场会发生相应的变化，但单从肉眼来看，我们无法比较这两幅图中存在的差异，无法看出其粒子运动的变化规律。故此，利用 PIV 软件中 FFT 互相关算法来得到粒子运动的方向和距离，进而求得整个流场的速度矢量分布。

（图 3.2.1 密度流流场中的序列图像）

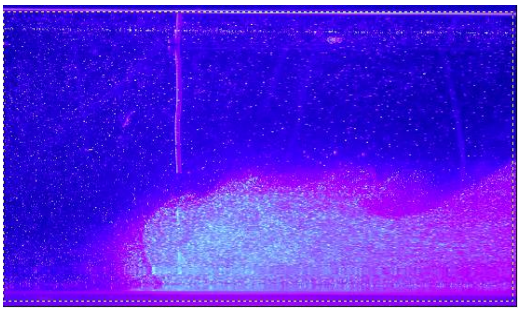
图 2-2(a),2-2(b)是用上图中的两幅静态图像，通过 PIV 系统采用不同参数计算所得的密度流实验中的速度矢量场，相比于图 3.2.1 的粒子原始图像，我们可以清楚地看到流场中具体的运动规律以及与密度流过程相伴随的次生涡旋等。图 3.2.2(c)是同时刻的真实的密度流过程的图像记录，藉此分析当取不同参数所得的 a，b 两流场图描述实际流体的准确程度。



（图 3.2.2（a））



（图 3.2.2（b））



（图 3.2.2（c））

图 3.2.2 ：（a）和（b）是取不同大小的积分窗口所得的流场速度矢量图，其中黑色箭头为速度矢量，白色细线为流线，而填图为涡度（黄色为负涡度，蓝色为正涡度）；（c）是与右两图相同时刻的真实流体状况。

PIV 系统中随着参数取值的不同，计算结果也会发生相应的变化，在 FFT 互相关算法中积分窗口的取值会在很大程度上影响其结果的准确度。上图中图 3.2.2(a)是取较大的积分窗口，其通道 1 为 128px*128px,通道 2 为 64px*64px，所得的流场速度矢量分布图；图 2-2(b)是取较小的积分窗口，其通道 1 为 64px*64px，通道 2 为 32px*32px，而得到的流场图。

通过结合 c 图，将 a、b 两图进行比较分析可以发现：图 a 与图 b 所反映的总体结果与真实图像基本一致，也都真实地再现了密度流过程中的楔入过程、伴随的次生流涡旋、密度流与上层流体间的开尔文-亥姆霍兹波以及上层流体的稳定流动过程。但可以明显地看出当去较大窗口 128px 时，流体的速度矢量更加具有连续性和规律性，在涡旋区域也更加稳定，虚假的速度矢量较少；而取较小窗口 64px 时，流体的整体性运动未能很好地展现出来，这一点从流线的平滑度上便可见一斑，而且在描述漩涡以及亥姆霍兹波上，速度矢量与正负涡度的实际的辐合辐散状况未有较好的一致性，存在较多的伪矢量，影响计算结果，这主要是小窗口包含的信息量相对要少，从而降低了准确度的缘故。

PIV 在计算速度矢量时采用 FFT 互相关分析方法，理论上这种方法所能测量的最大位移应是窗口尺寸的 1/2，但实际计算过程中由于不匹配粒子以及噪声干扰，最大位移一般不大于窗口尺寸的 1/3，因此为避免计算出错，积分窗口尺寸须大于最大位移的 3 倍。即窗口的尺寸大小与计算准确度有直接关系。

1）不同温差（密度差）下的密度流流场

贴合本次密度流实验利用不同温度差或者密度差的流体所产生的密度流过程的思路，我们选取三种温度差进行对照试验，分别为 20℃，30℃和 35℃，通过比较不同温度差下的密度流结构、流速等来探究密度（温度）对于密度流的影响，由理想气体状态方程 $p=\rho RT$ 可知，不同的温度对应

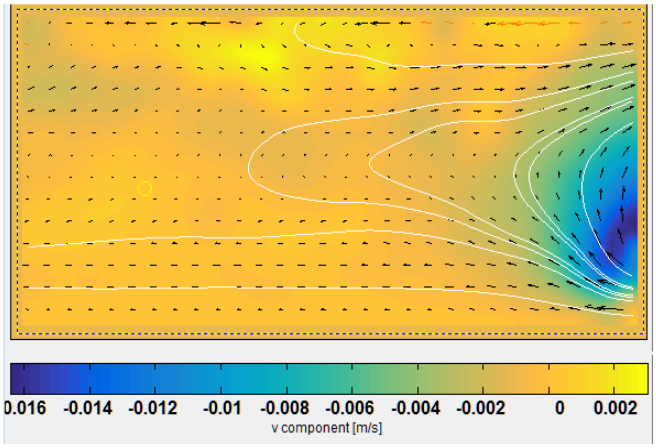
不同的密度，温度高的流体为低密度流体，温度低的流体为高密度流体，实验中的变量温度差等价于密度差。

① 20℃温差

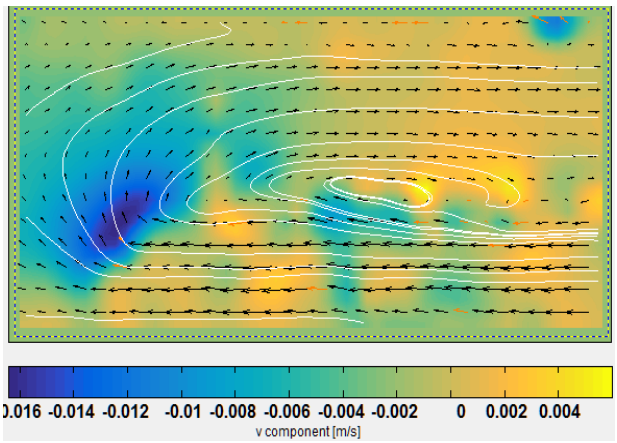
密度流的发生源于调配的 20 与 40 摄氏度的液态水，低温高密度的水体向下楔入高温低密度的水体，从而产生密度流过程。图 3.2.3 中的两幅流场图对应的实际流体剖面的尺寸为 24cm*12cm，而实际流体对应于下述两幅图的时间间隔为 7.4s（a 图记录时间为 15.439s，b 图记录时间为 22.853s，22.853-14.439≈7.4s）。

从两图可以清晰地看出一次密度流过程，由于底壁存在一定的摩擦作用，所以中高层先于底层，而且从时间上来说中高层温度下降比底层要早，从而形成一个前伸的冷空气“鼻子”。在密度流的前方的流场流速小而稳定，而随着密度流的侵入，流场迅速发生变化。通过垂直速度以及流线可以判断出密度流的前缘位置，在此前缘位置，垂直速度较大，有明显的上升运动，流速垂直切变明显，随着密度流的前伸，底层流速显著增大，但底层没有明显的湍流、漩涡混合现象。20℃温差下的密度流过程中出现的湍流混合，漩涡以及亥姆霍兹波位于高度层的中层，约 1/3~2/3 位置处，且这些现象复杂程度相对较小，密度流结构较为平缓稳定。

通过判断得到的密度流前缘位置也可以大致推算 20℃温差下的密度流的整体流速，即 0.24m/7.4s≈0.032m/s。



（图 3.2.3（a））



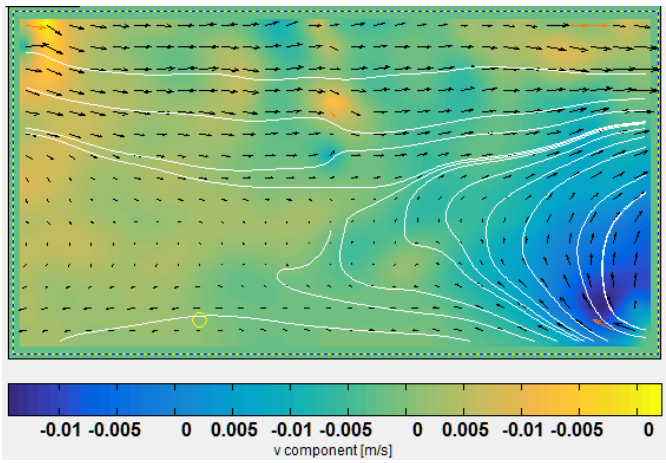
（图 3.2.2（b））

图 3.2.3　20℃温差下的密度流流场，a、b 分别为摄像画面内密度流初始侵入的流场和密度流开始离开该画面时的流场，其中填图为流体质点的垂直速度（黄色为负值，表示下沉运动；蓝色为正值，表示上升运动）

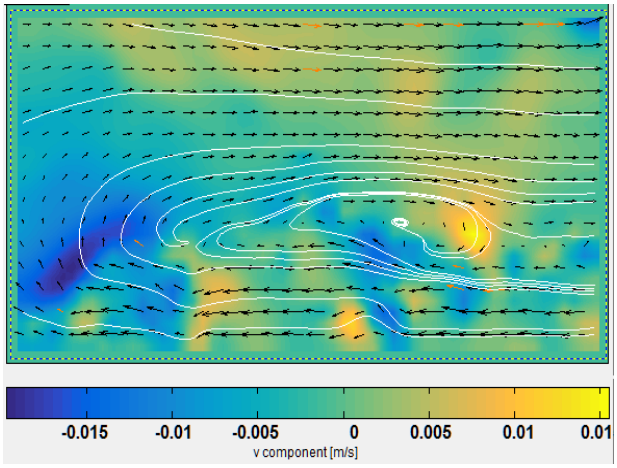
② 30℃温差

30℃的温差来自于 20℃和 50℃的液态水水温差异，图 3.2.4 中的两图表征的真实尺寸同上，为 24cm*12cm，其所代表的实际时间间隔为 5.8s（图 a 的记录时刻为 55.088s，图 b 的记录时刻为 60.920s）相比于上述两图，30℃温差下的密度流呈现出些许不同的结构特征，随着低温高密度的水体侵入，底层流体流速增大，但底层平稳前伸的流场结构高度降低，中间层中的湍流混合，涡旋等向下扩展延伸，内部

结构渐为复杂，流速矢量规律性减弱；同时从色标可以看出，随着温差的增大，密度流前缘的垂直上升速度有所增长，垂直切变更为明显。垂直切变的增强会导致亥姆霍兹波的产生，这与实际情况相互印证。通过推算亦可得到 30℃温差下的密度流整体流速：0.24m/5.8s≈0.041m/s。



（图 3.2.4（a））

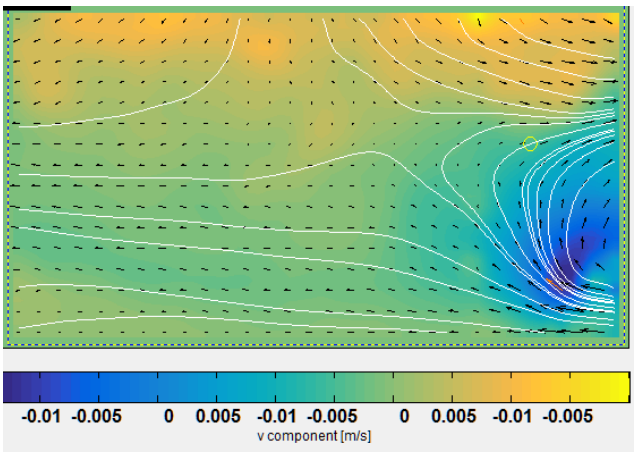


（图 3.2.4（b））

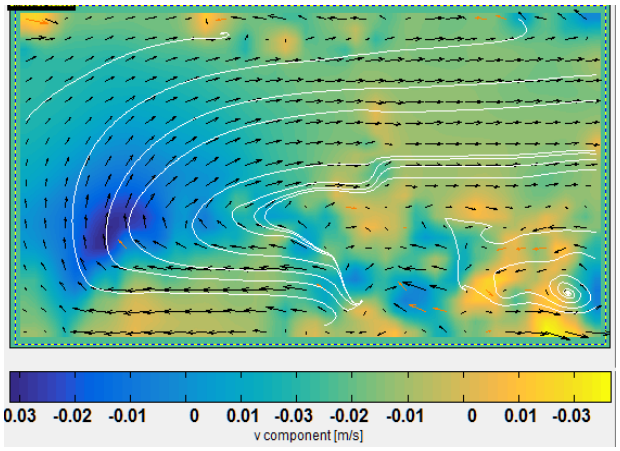
图 3.2.4　30℃温差下的密度流流场

③ **35℃温差**

35℃的温差由于 20℃和 55℃的水温差值产生的，图 2-5 中的两图表征的真实尺寸同上述图像，而其所代表的实际时间间隔为 3.9s（图 a 的记录时刻为 22.572s，图 b 的记录时刻为 26.499s）和图 3.2.2，3.2.3 相比较，流场的结构和密度流流速都不尽相同。35℃的温差下的密度流在前侵的过程中，底部流速增大，迫使上层流体速度随之增加，而中间层的翻卷混合，漩涡以及亥姆霍兹波结构有很大程度地扩展，在湍流的作用下，中间层的内部过程趋于复杂多变，伪矢量也有所增加，这使得密度流中后部的涡旋过程延伸到底层，底层不再是平稳同向等距上的流体质点移动趋势。而在密度流的头部，各要素变化剧烈，其头部前端具有最大的加速度和极强的上升运动。同时相较前图密度流前端上升速度显著增大，垂直切变增加，不稳定度增加，和密度流中的复杂机制相符合。而通过计算得到 35℃的温差下密度流的整体流速为：0.24m/3.9s≈0.061m/s。



（图 4.2.5（a））



（图 4.2.5（b））

图 3.2.5　35℃温差下的密度流流场

四．　密度流温度水平变化

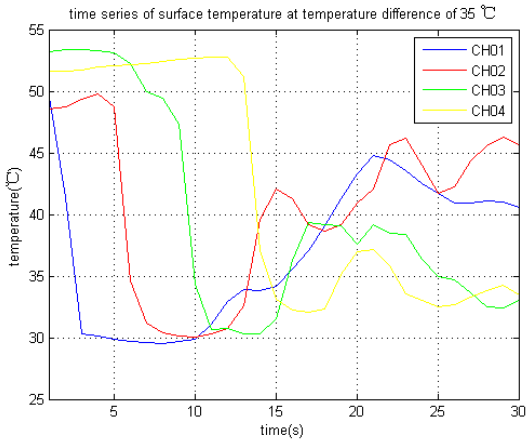
密度流在流经水槽底部的 4 个探头的过程中，探头的温度相继发生响应变化，从探头的温度变化中可以观察到密度流的流动过程，计算和比较密度流在不同温度下的流动速度。为方便起见，固定选取抽取隔板以后的 30s 时间来做绘图和分析，暂时不考虑密度流撞击到水槽的另一端而返回之后的过程。重复实验可以证明在本次实验中的所有温差下，密度流均可以在 30s 的时间内到达水槽的另一端。

1.　35℃温差下

如图 4.1，每一次温度的陡降都是密度流经过探头的过程，从图上可以清晰地看到密度流 4 次经过探头的过程，CH01 是密度流第一个经过的探头。4 个探头的温度都下降至 30℃左右，第 4 个探头由于距离冷水较远，冷热水的混合更严重一些，因此下降达到的温度更高一些，在 30-35℃之间，4 个探头的温度都没有达到冷水的实际温度 20℃，可见在密度流经过的过程中，冷热水还是发生了一定的混合。从图上看，4 个探头时间温度陡降的时间间隔比较接近，说明密度流的速度相对还是比较稳定，没有发生非常明显的变化。图上可见密度流在 15s 以内就通过了第 4 个探头。

每个探头的温度数据在经历了骤降之后约 5-10s 的时间又开始出现一定的回升，由于密度流到达不同的探头时，其高度和速度都有所不同，因此其回升之后所达到的温度也有所差异。其中第 1 和第 2 个探头的升温比较明显，都可以回升到 40℃以上，而第 3 和第 4 个探头的温度则没有超过 40℃。如果从图像上回升温度的平均情况来看，并结合冷热水的初始温度，密度流最后的温度可能会稳定在接近 40℃。

第 1 和第 2 个探头的初始温度较我们想要控制的 55℃低了一些，主要是由于这两个探头比较接近冷水区，从隔板下部和侧壁泄漏的冷水对处于底部的 1 号和 2 号探头造成的一定的影响。



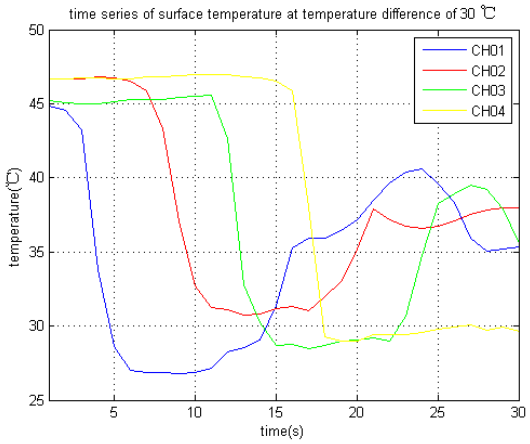
（图 4.1）

2. 30℃温差下

如图 4.2，30℃温差下，4 个探头在温度骤降之后所达到的温度要比 35℃下更低一些，除了第二个探头之外，其他 3 个探头处的温度都可以下降到 30℃以下。4 个探头温度发生骤降的时间间隔仍然比较接近，密度流的速度没有发生非常明显的波动。可以密度流的流动速度要比 35℃温差下慢一些，经过第 4 个探头的时刻在 15-20s 之间。

温度回升之后达到的温度也要比 35℃温差下低一些，平均约控制在 35℃左右。第 4 个探头由于离水槽右端比较近，受到返回的水流的影响，温度几乎没有经历回升过程，很快就被返回的冷水影响而保持在了一个较低的温度。

这次实验中，4 个探头的温度都在一定程度上低于我们所想要控制的 50℃，说明相比 35℃温差的那次实验，此时实验的冷水泄漏的距离更远，几乎已经完全覆盖到了整个水槽底部。这可能与加水之后到抽板之间所经历的时间有关，这次实验中可能两个过程的时间间隔相对比较长一些，导致冷水泄漏的距离更远。



（图 4.2）

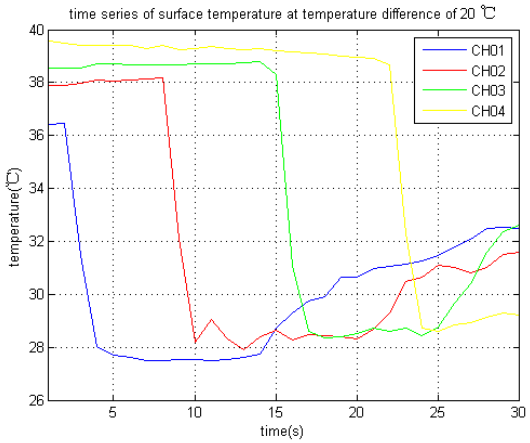
3. 20℃温差下

如图 4.3，在 20℃温差下，温度陡降之后达到的温度与 30℃近似，都是处在 25-30℃之间，骤降之后的温度没有能够随着最高热水温度的降低而降

得更低。可见，在冷水温度确定的条件下，热水温度对温度下降的影响程度有一个相对的极限，无论热水温度如何，在密度流形成的过程中，冷热水始终会有比较明显的混合，从而使得密度流的温度不可能达到冷水的温度。密度流到达 4 个探头的时间间隔依旧比较接近，密度流在行进过程中速度始终没有很大的变化。但平均速度比 30℃温差时更慢，达到大第 4 个探头的时刻在 20-25s 之间。

温度回升后能达到的温度比 30℃温差时更低，回升平均温度在 30℃左右。

这次实验中泄漏的冷水主要是影响到了第 1 个探头，使其温度比我们需要控制的 40℃低了近 4℃，而最后一个探头则基本上没有受到泄漏的冷水的影响，抽板前的初始温度还可以保持在接近 40℃的水平。



（图 4.3）

4. 总结

通过上述 3 组不同温差的对比试验，可以得出以下几个结论：

1） 无论哪种温差，都可以都可以观察到明显的温度骤降的过程，其波动程度要远远由于热对流等因素造成的温度波动，可以确认是一个密度流过程。也就是说 20℃的温差已经足以形成一个比较明显的密度流过程。

2） 除去一些实验的偶然因素的影响，一般情况下，距离冷水区约近的探头，温度骤降所能达到的温度越低，而离冷水区较远的探头温度下降的程度相对会小一点，但差别并不是很大，第 1 和第 4 个探头温度下降之后的温差基本可以保持在 3℃以内。这一现象说明密度流在流动的过程中仍然在不断与热水区发生混合，密度流自身的温度会有一定程度的缓慢上升。

3） 由于密度流在流动过程中自身的温度增加并不是非常明显，因此其到达 4 个探头的时间间隔还是比较接近，也就是这种缓慢的温度回升对密度流速度的影响并不大，密度流的速度还是比较稳定的。

4） 温差对密度流速度的影响非常显著，总体而言，温差越大，密度流的速度越大。但密度流的速度与温差的关系并不是简单的正比关系。可以发现，温差从 35℃降到 30℃，和温差从 30℃降到 20℃的过程中，尽管温差一次仅降低了 5℃，而另一次降低了 10℃，但密度流流经整个水槽所花时间的增量却是接近的，都增加了 5s 左右的时间。可见密度流速度对温差的敏感性是随着温差的增加而增大的。

5） 密度流在经过探头约 5s 之后，探头处显示温度还是有所回升，说明此时密

度流的主要部分已经离开了探头所在位置，该处的冷热水开始发生比较明显的混合过程。这一现象说明由于冷水区域的范围控制得比较小，密度流并不能完全覆盖整个水槽底部，从而在其经过了探头所在位置以后，探头处的温度显示会有明显的回升。

五． 密度流温度垂直廓线

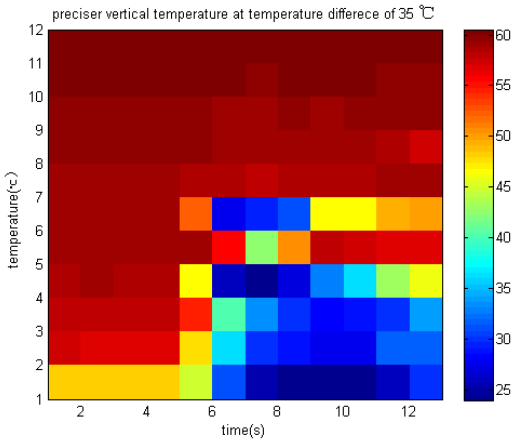
为了使得垂直方向的温度测量更为精密，重新布设了温度探头的位置，将 12 个探头全部以垂直间隔 1cm 加密布置。考虑到密度流刚从冷水区出发形成的时候，直接受冷水区的影响可能比较明显，使得测得的密度流与实际稳定下来的密度流的情况偏差较大。因此一方面尽可能完整地记录密度流垂直廓线随时间的变化过程，另一方面尽量避免直接受冷水区的影响，并尽量向“密度流从无穷远处流出”的理论假设靠近，平衡之下选择将 12 个探头的水平位置定在原第 2 个探头对应的水平位置处，距离隔板约 25cm。

同时，在这组实验中汲取水平温度测量中的经验，不仅记录下抽板的时刻，也记录下密度流第一次到达水槽右端的时刻，在做密度流的垂直廓线分析时，以这两个时刻之差作为分数据析的时间范围，代表一次完整的密度流过程。

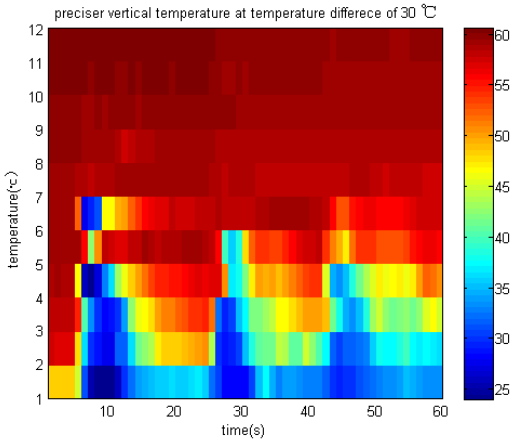
1. 在 35℃温差下

由于热电偶 1s 响应时间的约束，水平方向上的精度还不是非常高。如图 5.1.1 显示，密度流在抽板之后 6s 到达探头位置，13s 后密度流前缘达到水槽的右端。在经过探头的整个过程中，密度流的高度有一定的降低，刚到达探头的时候，密度流的高度可以达到 5cm 的高度，而在密度流前缘到达水槽右端时，探头处所测得的密度流高度仅有约 3cm 了，如果增加观测时间到 1min（如图 5.1.2），则可以完整地观察到密度流从开始的最强到减弱，再到多次返回并经过探头处的全过程。第一次经过的密度流在 17s 后高度达到最低，可以认为此时密度流主体已经经过了探头位置，但热水并没能完全到达底层，水槽的底层依然有一层薄薄的冷水层，可见密度流的尾部还是比较长的，这种效果一方面与水槽底部的拖曳作用有关，一方面也可能受到抽板之前从底部泄漏的冷水的影响。

垂直廓线显示，密度流在 6cm 高度处已经基本由热水控制，但在 7cm 高度处又出现了冷水层，这是典型的亥姆霍兹界面波在温度上的反映。7cm 高度处恰好是被卷起的涡旋所在的高度。约 25s 以后密度流重新返回，第二次到达探头位置，此时密度流的总体高度要略低于第一次经过时，强度有所减弱，但基本的结构没有发生很大的变化，上表面的亥姆霍兹界面波尽管不太明显但依然还是存在。40s 左右密度流第三次经过探头位置，密度流的高度进一步下降，强度进一步减弱，且亥姆霍兹界面波的结构也趋于消失，密度流开始逐渐演变成重力波的形成。



（图 5.1.1）

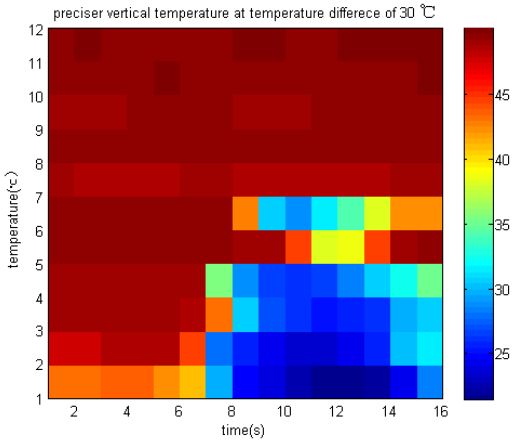


（图 2.1.2）

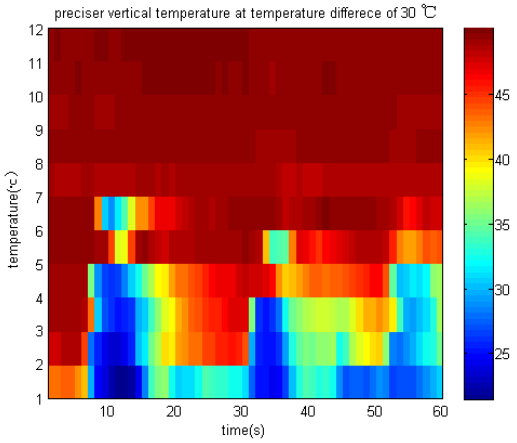
2. 30℃温差下

如图 5.2.1，在 30℃温差下，可以明显看到密度流到达探头位置的时间相比 35℃温差下滞后了一些，到达水槽右端所需的时间也更久，并且在同样的 1min 时间范围内（图 5.2.2），35℃温差下可以观察到完整的 3 次返回的过程，而在 30℃温差下第三次返回的过程体现得不完整。

但三次返回至探头位置时，密度流的高度与 35℃时几乎一致，密度流也是在第三次返回之后还是出现结构变化，逐渐向重力波演变。可见温差对密度流的影响主要还是体现在速度上，对强度的影响没有速度那么显著。



（图 5.2.1）

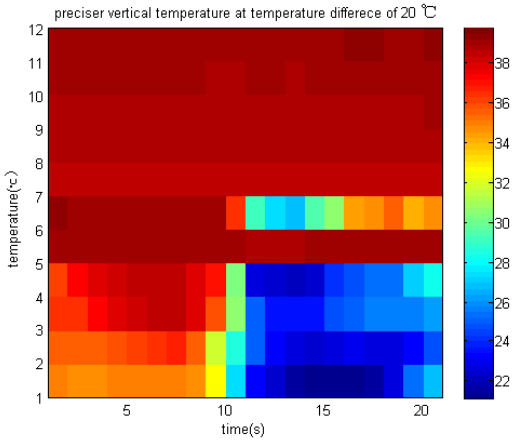


（图 5.2.2）

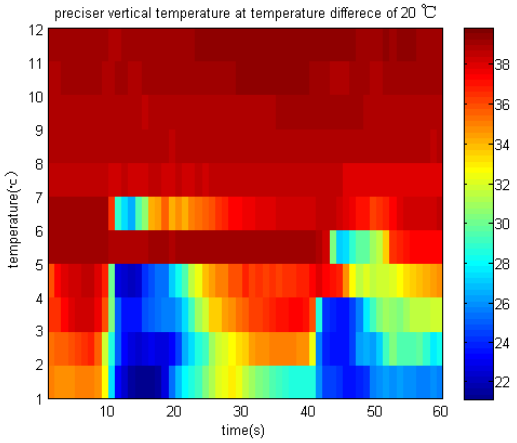
3. 20℃温差下

如图 5.3.1，密度流到达探头位置的时间进一步推迟到了 10s 左右，到达水槽右端的时间推迟到了 20s 以后。在 1min 的时间内（图 5.3.2），仅能观察到密度流两次经过探头的过程。

从前两次返回至探头位置的情况来看，密度流的高度和强度的变化与前两种温差下的区别依然不大。密度流第二次经过探头位置时的高度比第一次经过时降低了 1cm，亥姆霍兹界面的结构也有所衰减但依然存在。



（图 5.3.1）



（图 5.3.2）

4. 总结

随着时间的推移，密度流的高度和强度会逐渐减弱，且密度流的垂直结构会逐渐改变，冷热水交界处的亥姆霍兹界面渐渐变得不明显，密度流向重力波演变。

改变温差条件，密度流的速度改变比较明显，而其高度和强度的变化过程随温差的改变不太明显，即高度和强度减弱的速度随温差改变的变化不大，在不同的温差下经过相同的路程所降低的高度基本一致。温差对密度流的影响主要体现在密度流的前进速度上，而对密度流结构演变的影响不是那么显著。

根据泰勒假设，可以近似用密度流的时间演变过程代替密度流的空间结构。由此可以大致判断处密度流的空间结构分布特征。从图像上看，密度流到达探头位置的时候，其上下层的冷水区基本是垂直的，也就意味着从水平剖面看，密度流的前缘基本与水槽底部垂直，上下层的流动速度一致。而当密度流后部离开探头位置的时候，比较明显地可以观察到上层的冷水区先结束，而下层的冷水区则可以延伸很长一段距离，直到密度流返回以后再次经过探头位置。

六． 密度流速度分析

1. 密度流理论速度的计算方法

1） 无层结环境下的密度流速度

一般情况下，将密度流流经的环境流体看做无层结的均匀流体。根据 Paul Markowski 和 Yvette Richardson 在《Mesoscale Meteorology in Midlatitudes》一书中所述，可以使用公式

$$c = \sqrt{-2\int_0^H B_L dz}$$

来表示密度流的速度。其中，H 表示密度流的高度，可以通过绘制密度流的温度垂直廓线得到。B_L表示水槽左侧（冷水区）的浮力大小。据书中所述，假设浮力随高度线性递减，并用B_{min}来表示底层的最小负浮力，则公式可以化为

$$\mathrm{c} = \sqrt{-B_{min}H} = \sqrt{-\frac{\theta'_{\rho min}}{\overline{\theta_v}}gH}$$

其中，$\theta'_{\rho min}$为冷热水温差，$\overline{\theta_v}$为热水均温，g取$9.8\mathrm{m}/s^2$。这样，只要知道了冷热水的温差和密度流的高度，就可以推算出密度流的速度。

2） 有层结环境下的密度流速度

考虑到实际实验过程中误差的影响，实际情况下热水的温度可能随高度并不是均匀的，即环境流体可能存在层结。假设存在两层层结，下层的高度为 H1，对应的最小负浮力记为$B1_{min}$，上层高度为 H2，对应的最小负浮力记为$B2_{min}$。H1+H2=H。则原始积分公式可以化为

$$c=\sqrt{-B1_{min}H1-B2_{min}H2}=\sqrt{-g(\frac{\theta1'_{\rho min}}{\overline{\theta1_v}}H1+\frac{\theta2'_{\rho min}}{\overline{\theta2_v}}H2)}$$

其中，$\theta1'_{\rho min}$表示下层层结对应的冷热水温差，$\theta2'_{\rho min}$表示上层层结的温差，$\overline{\theta1_v}$可用下层热水平均温度表示，$\overline{\theta2_v}$可用生层热水平均温度表示。

2. 不同温度下密度流理论速度的计算结果

1）35℃温差下

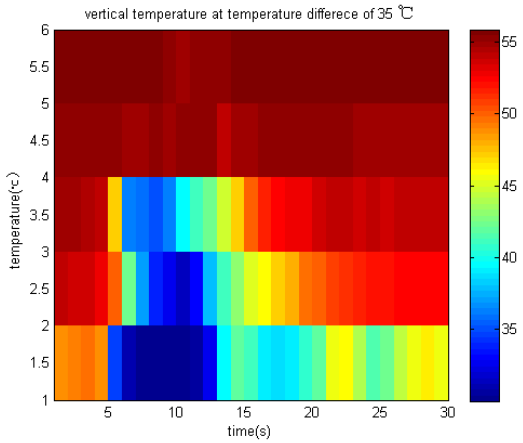
控制冷水温度 20℃，热水温度 55℃，以此来控制冷热水保持 35℃的温差。根据垂直廓线（图 6.2.1）可以判断密度流的高度约为 4cm，根据抽板瞬间水槽底层温度数据（表 6.2.1）可知抽板之前，密度流高度范围内的热水区中，高约 2cm 处存在一个层结。层结的下层热水温度用 4 个探头的平均温度表征，为 50.8℃，上层温度用高度为 2cm 和 4cm 处的两个探头的平均温度来表征，为 54.2℃。这种情况主要是由于隔板下部与水槽底部存在一定缝隙，抽板之前有部分冷水泄露到热水区，导致下层热水温度有所下降所致。下面首先计算无层结下密度流在理论上的速度为：

$$c1=\sqrt{\frac{55-20}{273+55}*9.8*0.04}=0.205m/s$$

而有层结下密度流在理论上速度为：

$$c1'=\sqrt{\left(\frac{50.8-20}{273+50.8}+\frac{54.2-20}{273+54.2}\right)*9.8*0.02}=0.198m/s$$

相对误差为$3.5\%<5.0\%$，认为误差在可接受的范围内。



（图 6.2.1）

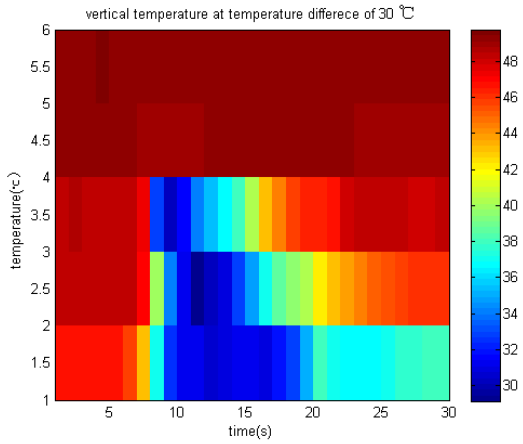
35℃下抽板前密度流高度范围内的热水温度层结						
高度（cm）	0	0	0	0	2	4
温度（℃）	49.82	48.54	53.21	51.58	53.58	54.79

（表 6.2.1）

2）30℃温差下

控制冷水温度 20℃，热水温度 50℃，以此来控制冷热水保持 30℃

的温差。根据垂直廓线（图 6.2.2）可以判断密度流的高度仍然约为 4cm，根据抽板瞬间水槽底层温度数据（表 6.2.2）可知抽板之前，热水区仍在高约 2cm 处存在一个层结。层结的下层热水平均温度约为 45.9℃，上层温度约为 48.3℃。以同样的方法可以算得，无层结下密度流在理论上的速度约为 0.191m/s，而有层结下密度流在理论上的速度约为 0.182m/s，相对误差为4.9% < 5%，依然可以认为误差在可接受范围内。



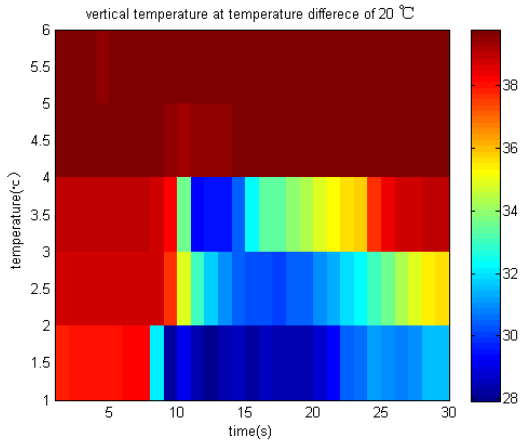
（图 6.2.2）

30℃下抽板前密度流高度范围内的热水温度层结						
高度（cm）	0	0	0	0	2	4
温度（℃）	44.82	46.67	45.24	46.67	48.12	48.38

（表 6.2.2）

3） **20℃温差下**

控制冷水温度 20℃，热水温度 40℃，以此来控制冷热水保持 20℃的温差。根据垂直廓线（图 6.2.3）可以判断密度流的高度仍然约为 4cm，根据抽板瞬间水槽底层温度数据（表 6.2.3）可知抽板之前热水区仍在高约 2cm 处存在一个层结。层结的下层热水平均温度约为 38.1℃，上层温度约为 38.9℃。可见，由于此次试验误差控制得相对较好，外加冷热水温差相对也较小，因此层结的上下两层的温差没有前面两次那么显著。同样算得，无层结下密度流在理论上的速度约为 0.158m/s，而有层结下密度流在理论上的速度约为 0.153m/s，相对误差为3.3% < 5%，误差在可接受范围内。



（图 6.2.3）

20℃下抽板前密度流高度范围内的热水温度层结						
高度（cm）	0	0	0	0	2	4
温度（℃）	36.4	37.9	38.53	39.57	38.78	38.96

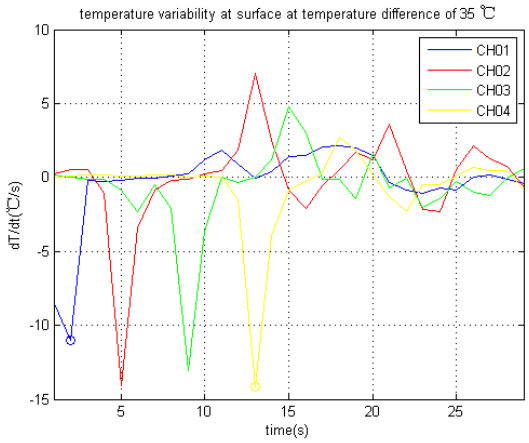
（表 6.2.3）

3. 不同温度下密度流实际速度的计算结果

1）35℃温差下

由于底层 4 个探头的间隔固定且已知，只要通过温度数据找到密度流经过第一个和最后一个探头时的时刻，得到两者间的时间间隔，就可以得到密度流的平均速度。需要指出的是，这里计算得到的密度流平均速度，是密度流前缘的推进速度，而非后部的平均流速。密度流的前缘与环境流体会产生一定的混合效应，对前缘速度有削弱作用，使得密度流前缘的速度比其后部的平均流速要小。

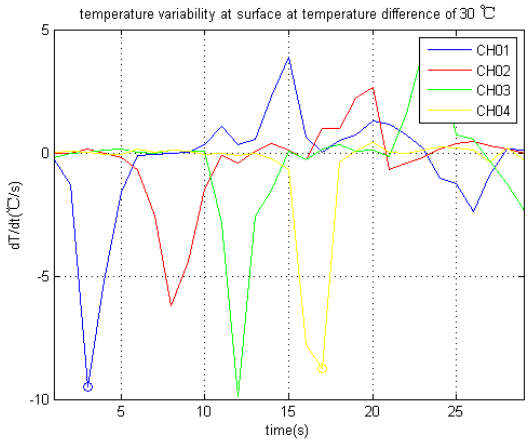
由于密度流经过探头的时候，温度会有突变，因此只需要找到温度变率的极值点，即可作为温度通过探头的时刻。根据温度变率随时间的变化（图 6.3.1）可知，密度流经过第一个和最后一个探头之间的时间为 11s，两个探头之间间隔 60cm，可算得密度流的实际速度约为 0.055m/s。这与前面的计算略有差异，这可能是在相机记录时误触相机导致画面抖动所致，也可能是温度探头的灵敏度问题所致。



（图 6.3.1）

2）30℃温差下

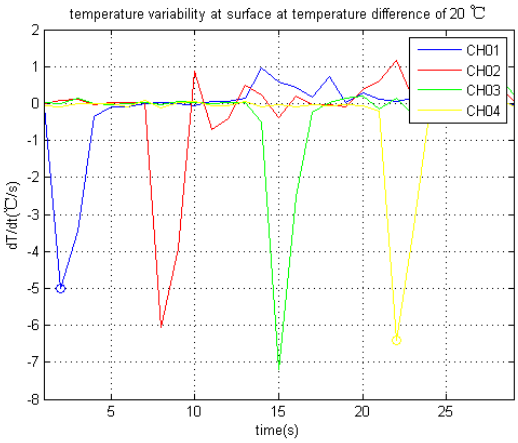
根据 30℃温差下温度变率随时间的变化图像（图 6.3.2），密度流流经首尾两个探头的时间间隔为 14.0s，可得密度流的实际速度约为 0.043m/s。这与 PIV 计算所得 0.041m/s 颇为符合。



（图 6.3.2）

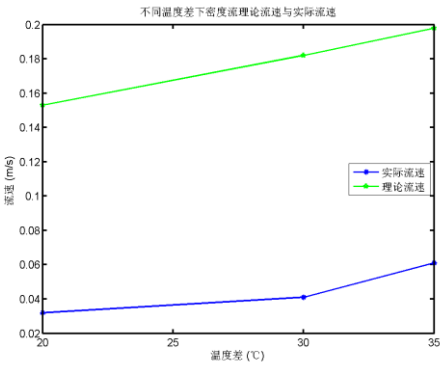
3） **20℃温差下**

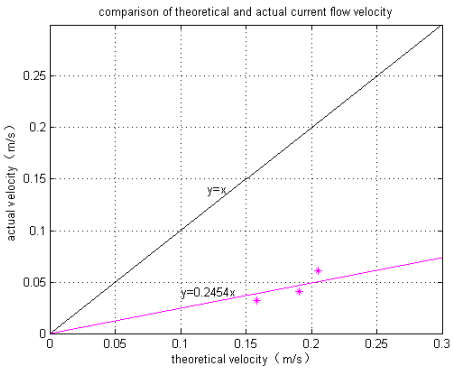
根据 20℃温差下温度变率随时间的变化图像（图 6.3.3），密度流流经首尾两个探头的时间间隔为 20s，可得密度流的实际速度约为 0.030m/s，这样 PIV 流场分析中得到的 0.032m/s 很接近，其间的差异多源于前缘位置的判定。通过对密度流实际速度的计算，可以进一步证明到上一部分提到的问题，即密度流速度对温差的敏感度是随着温差的增大而增大的。当温差从 35℃降低到 30℃，温差减小 5℃，而密度流速度降低了 0.012m/s，而当温差从 30℃下降到 20℃，温差减小 10℃，密度流速度降低了 0.013m/s，可见两次减小温差的过程中密度流的降速程度几乎是相同的。



（图 6.3.3）

4） **密度流实际速度与理论速度的比较**





（图 6.3.4（a））　　（图 6.3.4（b））

图 6.3.4（a）为在不同的温差下的实际速度和理论速度，可以看到两者的差别非常之大。为进一步观察两者的差距，绘制了图 6.4.3（b），红色的点的横纵坐标分别表示不同温差下对应的理论速度和实际速度，黑色实线为 y=x 参考线。红色点离参考线越近表示实际速度与理论速度吻合得越好，但实际情况是两者之间的误差非常大，红色拟合线的斜率为 0.02454，只有参考线斜率的 1/4 不到。

4. 密度流速度误差分析

从密度流的实际速度和理论速度的比较可以看到两者的差别非常之大，实际速度比理论速度慢了约 3-4 倍。但需要再次说明的是，我们这里测得的密度流速度为其前缘推进速度，而理论分析得到的速度则后部平均速度，两者并非完全匹配的。下面对实验过程中的误差做一些分析。

1）前面已经提到过，密度流的前缘推进速度与后部的平均速度是有差异的，前缘推进速度会比后部平均速度慢一些，这是由于密度流与环境流体的混合作用导致的。根据 Simpson 和 Britter 的研究和大气观测的结果，一般可以认为密度流前缘的推进速度大致为后部平均速度的 2/3。而在我们的实验中，实际前缘推进速度则只达到了理论平均速度的 1/4 左右，这说明除了测量位置不同导致的误差，还存在其他因素对密度流速度起到了减缓作用。

2）由于实验仪器不够精密，隔板底部与水槽底部之间还存在一定的缝隙，另外尽管使用了夹具来尽可能使两者贴合，隔板两侧与水槽侧壁之间也依然存在少量缝隙。这就导致在加水以后未抽板之前，就有少量的冷水从隔板的底部和两侧泄漏到热水区，从而降低了水槽底部的实际温度，导致温差有所减小，从而使得密度流的实际速度也有所减小。但通过上述计算已经可以证明，这部分误差对实验结果的影响并不大，相对误差都在 5%以内，并不是造成如此大的误差的主要因素。

3）水槽底部的摩擦阻力会减慢密度流的流动速度。

4）水槽侧壁的摩擦阻力以及侧壁上探头的布设也都会对密度流的速度减缓作用。并且，由于接近侧壁的密度流同时受到底部和侧壁的摩擦阻力，而在中间位置流动的密度流则基本只受到底部的摩擦阻力，因此位于中间位置的密度流的速度会比两侧的速度大一些，从而密度流的前端可能不是平行的，而是一个弧形。

5）密度流前缘会发生一些混合，这种混合会不断削弱密度流的速度。

6）实验过程中密度流的情况与理论计算时假设的情况还是有一定的差别。

理论计算过程中是假设密度流来自于无穷远处，流经一个非常长的距离，而计算过程中只是选取了其中间的一个很小的范围作为参考区域来进行计算和研究，这个参考区域需要包括密度流与周围环境流体相遇的过程。因此理论计算中密度流的长度是完全可以覆盖这个区域的。而实际的实验过程中，我们将水槽所框定的范围近似地当做上面所选取的这个参考区域，在这个区域内完成密度流与环境流体相遇的过程，此时的密度流是直接从水槽的一端出发，即是相当于从参考区域的一端出发，这样的情况下密度流的速度与它从无限远处出发到达参考区域所达到的速度可能是有较大区别的。另外由于冷水区域比较小，密度流无法完全覆盖水槽底部，导致密度流的势力比理论预期的情况弱很多，也会导致一个明显的减速。

7）还有一些理论计算时为了简化计算而进行的假设在实际情况下是无法实现的。比如，理论中假设在密度流的高度 H 处的扰动 $p'(H)=0$，但在实际情况下一般不为 0 等。

七. 总结

1. 密度流，亦称异重流，是由重力和密度差异所引起的静压力导致的高密度流体向低密度流体下方的侵入的现象。火山岩浆、火山碎屑、雪崩等均属于重力流，或称密度流。

   本实验主要与雷暴和飑线过程中的密度流过程相联系，雷暴密度流是雷暴中稠密冷空气在边界层内沿地面向外高速流动的气团。雷雨云中冷的下沉气流到达低空和地面成为流出气流时,这种流出气流具有对流层中下部环境空气较大的水平动量,使得在低层具有强的风垂直切变,而这些冷下沉气流的地面水平速度分量侵入近地面较高温度的空气产生密度流过程，这对应于雷暴过程中的低层流出气流的浪涌现象。当雷暴密度流过境时，地面气压、风速、风向和温度等均发生剧烈变化，且在雷暴密度流中存在着强烈的阵风浪涌和垂直运动,同时密度流的头部是气象要素变化最为剧烈的区域,尤在密度流头部后方存在着最大的风速垂直切变和最强的下沉气流;而头部前缘存在着最大的水平风速加速度和最强的上升气流.。这些现象与本次密度流实验过程中观察到的情形几近一致。

   飑线是一种有组织的中尺度对流系统，由一组长而连续的阵风锋后面排成一行的单体和中尺度对流涡旋构成。旧对流单体包含于由前向后的上升气流中，从飑线后部进入的蒸发冷却空气占据了对流上升气流后部的中低层，这后部出流即对应于密度流过程。

2. 实验发现，密度流的流场和整体流速与密度差有关，当两种不同密度的流体相遇易触发密度流过程，若密度差越大，密度流流场结构愈加复杂，密度流内部的漩涡、湍流和两种流体交界面的开尔文-亥姆霍兹波的范畴扩展并向底层延伸；而密度流流速也越大，出流速度加快；密度流头部前缘的上升运动更加剧烈，水平加速度增加；而密度流头部后方垂直速度切变增大，下沉气流更加明显。

3. 在用 PIV 系统进行速度矢量计算时，参数的取值会影响最终结果，比如积分窗口的大小与计算结果的准确度有直接关系，积分窗口的边长至少为计算最大位移的 3 倍，过小的积分窗口会因损失重要信息以致结果有误，因此窗口尺寸与粒子位移的匹配度至关重要。同时若对图像进行预处理，诸如滤原色、

调节对比度及高通滤波、平滑等都会引起不同的效果，需要加以注意。

参考文献

【1】 朱翠娟，叶卓佳，李兴生等. 强雷雨云低层流出气流的结构分析[J].

【2】 袁子鹏，王瀛，崔胜权等. 一次中尺度飑线的阵风锋发展特征分析[J].气象，2011. 31(7) :814-820

【3】 孙鹤泉，康海贵，李广伟. PIV 的原理与应用[J].水道港口, 2002. 23(1)

【4】 许联锋，陈 刚，李建中等. 气液两相流中气泡运动速度场的 PIV 分析与研究[J]. 实验力学, 2002. 17(4)

【5】 Paul Markowski， Yvette Richardson《Mesoscale Meteorology in Midlatitudes》

【6】 J.E.SIMPSON and R.E.BRITTER. 《A laboratory model of an atmospheric mesofront》. Quart.J.R.Met.Soc(1980),106,pp.485-500

【7】 John E.Simpson. 《Gravity Currents in the Laboratory, Atmosphere, and Ocean》. Ann.Rev.Fluid Mech. 1982.14:213-234

【8】 R.E.BRITTER and J.E.SIMPSON. 《Experiments on the dynamics of a gravity current head》. J.Fluid Mech.(1978), vol.88,part 2,pp.223-240