



课程名称: 探究性与创新性实验

实验名称: 超重力环境下毛细现象观察

指导老师: 林伟岸

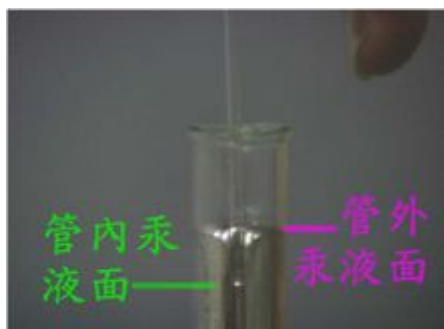
实验地点: 安中实验大厅

小组成员: 戴恩恩 (组长)、黄贤德、耿茂思

一、实验背景

毛细现象: 在一些线度小到足以与液体弯月面的曲率半径相比较的毛细管中发生的现象。毛细管中整个液体表面都将变得弯曲, 液固分子间的相互作用可扩展到整个液体。日常生活中常见的毛细现象, 如水因能润湿玻璃而会在细玻璃管中升高; 反之, 水银却因不能润湿玻璃而在其中下降。究其原因, 全在于液体表面张力和曲面内外压强差的作用。

液体表面类似张紧的橡皮膜, 如果液面是弯曲的, 它就有变平的趋势. 因此凹液面对下面的液体施以拉力, 凸液面对下面的液体施以压力。浸润液体在毛细管中的液面是凹形的, 它对下面的液体施加拉力, 使液体沿着管壁上升, 当向上的拉力跟管内液柱所受的重力相等时, 管内的液体停止上升, 达到平衡。同样的分析也可以解释不浸润液体在毛细管内下降的现象。



毛细现象图片

在自然界和日常生活中有许多毛细现象的例子。植物茎内的导管就是植物体内的极细的毛细管, 它能把土壤里的水分吸上来。砖块吸水、毛巾吸汗、粉笔吸墨水都是常见的毛细现象。在这些物体中有许多细小的孔道, 起着毛细管的作用。

有些情况下毛细现象是有害的。例如，建筑房屋的时候，在砸实的地基中毛细管又多又细，它们会把土壤中的水分引上来，使得室内潮湿。建房时在地基上面铺油毡，就是为了防止毛细现象造成的。

水沿毛细管上升的现象，对农业生产的影响很大。土壤里有很多毛细管，地下的水分经常沿着这些毛细管上升到地面上来。如果要保存地下的水分，就应当锄松地面的土壤，破坏土壤表层的毛细管，以减少水分的蒸发。

毛细现象很早就被人类认识并加以利用。例如，农民在干旱时锄地以破坏土壤中的毛细管，减少水分蒸发以利保墒；运输平板玻璃时，在两片玻璃间夹入纸片可以避免水汽凝结使玻璃粘在一起；在鹅毛笔和钢笔的前端开槽、在圆珠笔和签字笔的笔尖形成环形缝隙，使液体沿毛细管均匀流出；利用毛细现象点亮油灯和酒精灯，甚至用于制造松烟墨；在化验时用毛细管采集血液样本；在基因测序时用毛细管电泳进行分离；利用毛细原理测量多孔固体的孔隙度和孔径分布等。当然，新建房屋的墙壁返潮、石窟艺术因返潮而致剥离损坏等，则是毛细现象给人们带来的困扰。

二、实验目的

虽然毛细现象很早即被人们关注和研究，但在以往的讨论中，人们主要从常重力环境下对液体在圆形毛细管中的上升高度进行讨论，对超重力环境下的毛细现象则很少涉及。本文试图从超重力环境下观察毛细排水的相关现象，对不同重力情况下液体的下降高度进行测量，探究在超重力环境下不同 g 值时砂板中的液体毛细排水高度是否满足相似比 $1/n$ 。同时观察超重力环境下毛细排水高度稳定需要的时间，以增进读者对毛细现象的理解。

三、实验技术及方法

超重力技术是强化多相流传递及反应过程的新技术,上个世纪问世以来,在国内外受到广泛的重视,由于它的广泛适用性以及具有传统设备所不具有的体积小、重量轻、能耗低、易运转、易维修、安全、可靠、灵活以及更能适应环境等优点,使得超重力技术在环保和材料生物化工等工业领域中有广阔的商业化应用前景。

本实验利用离心机制造超重力环境并不断改变 g 值,用相机在不同时刻记录观察砂板中的液体在玻璃珠中的下降高度。

附加压强

表面张力对液体球的作用好像增加了一个垂直于球面的压强,称为附加压强。

对液滴,附加压强为 $2 \times$ 表面张力系数/球面半径。

对肥皂泡等空心液体球,附加压强为 $4 \times$ 表面张力系数/球面半径。

上升高度

毛细现象中液体上升、下降高度。 h 的正负表示上升或下降。

浸润液体上升,接触角为锐角;不浸润液体下降,接触角为钝角。

上升高度 $h=2 \times$ 表面张力系数/ (液体密度 \times 重力加速度 $g \times$ 液面半径 R)。

上升高度 $h=2 \times$ 表面张力系数 $\times \cos$ 接触角/ (液体密度 \times 重力加速度 $g \times$ 毛细管半径 r)。

公式:

液柱上升高度是: $h=2\gamma\cos\theta/(\rho gr)$

此处,

γ = 表面张力; θ = 接触角; ρ = 液体密度; g =重力加速度; r = 细管半径。

当 $\theta > 90$ 度,这表示弯液面为凸面;同时 $h < 0$,表示流体在毛细管下降,即

汞在玻璃管的情况。

对于在海平面上，装了水的玻璃管，

$\gamma = 0.0728 \text{ J/m}$ $\theta = 20^\circ$ $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 液柱高度为：

根据此方程式，理论上在 1m 宽的管中，水可以上升 0.014 mm（因此极不容易被察觉）；另外在 1 cm 宽的管中，水可以上升 1.4 mm；而在半径 0.1 mm 的毛细管中，水可以上升 14 cm。

四、实验设备

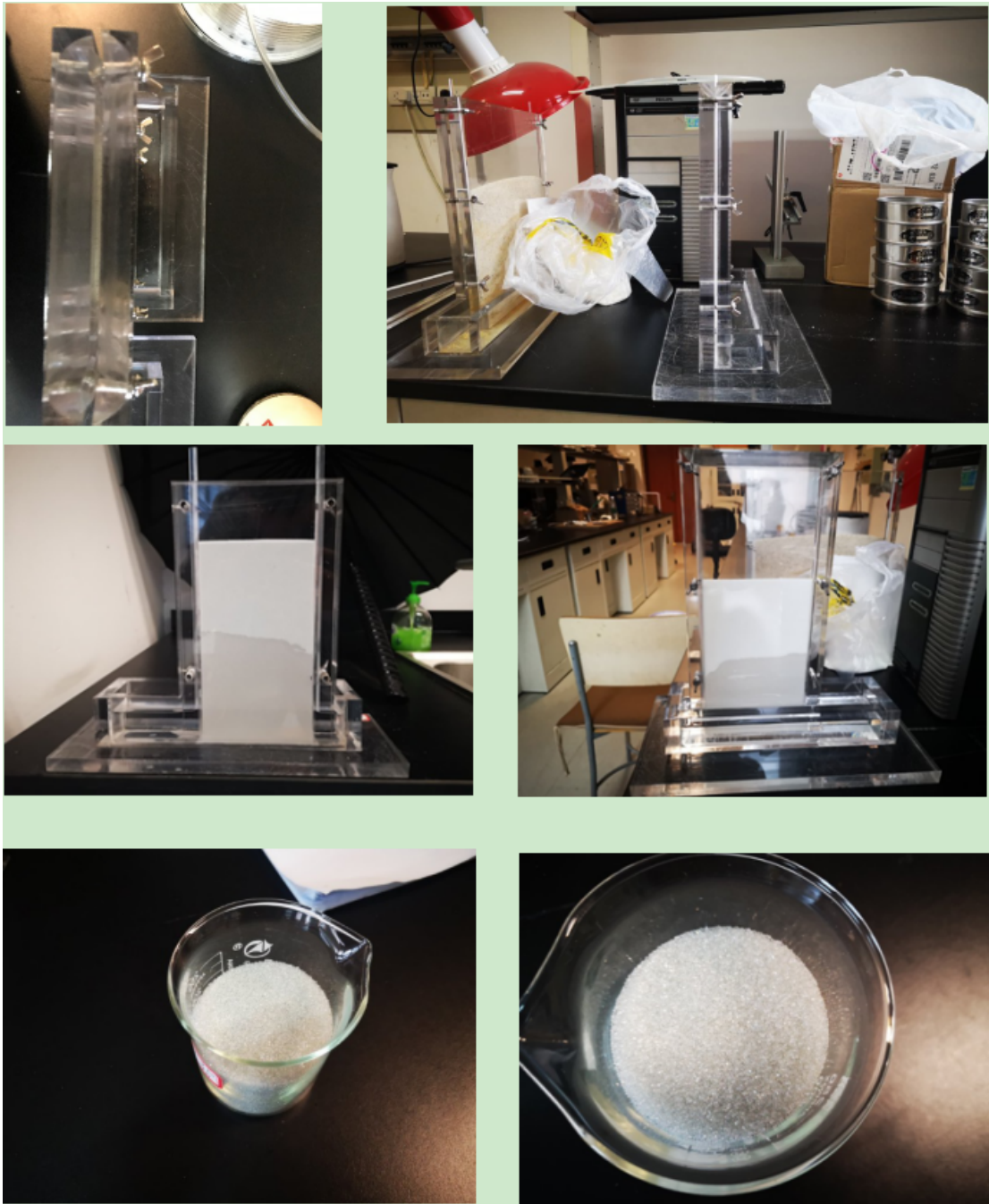
(1)ZJU-400 离心机：本次试验采用 ZJU-400 离心机，ZJU400 土工离心机最大运行能力为 400 gt，最大离心加速度 150g，最大有效旋转半径 4.5 m。离心机在静力试验中可以在负载 2500 kg 的 150g 重力加速度下工作。



Zju-400 离心机

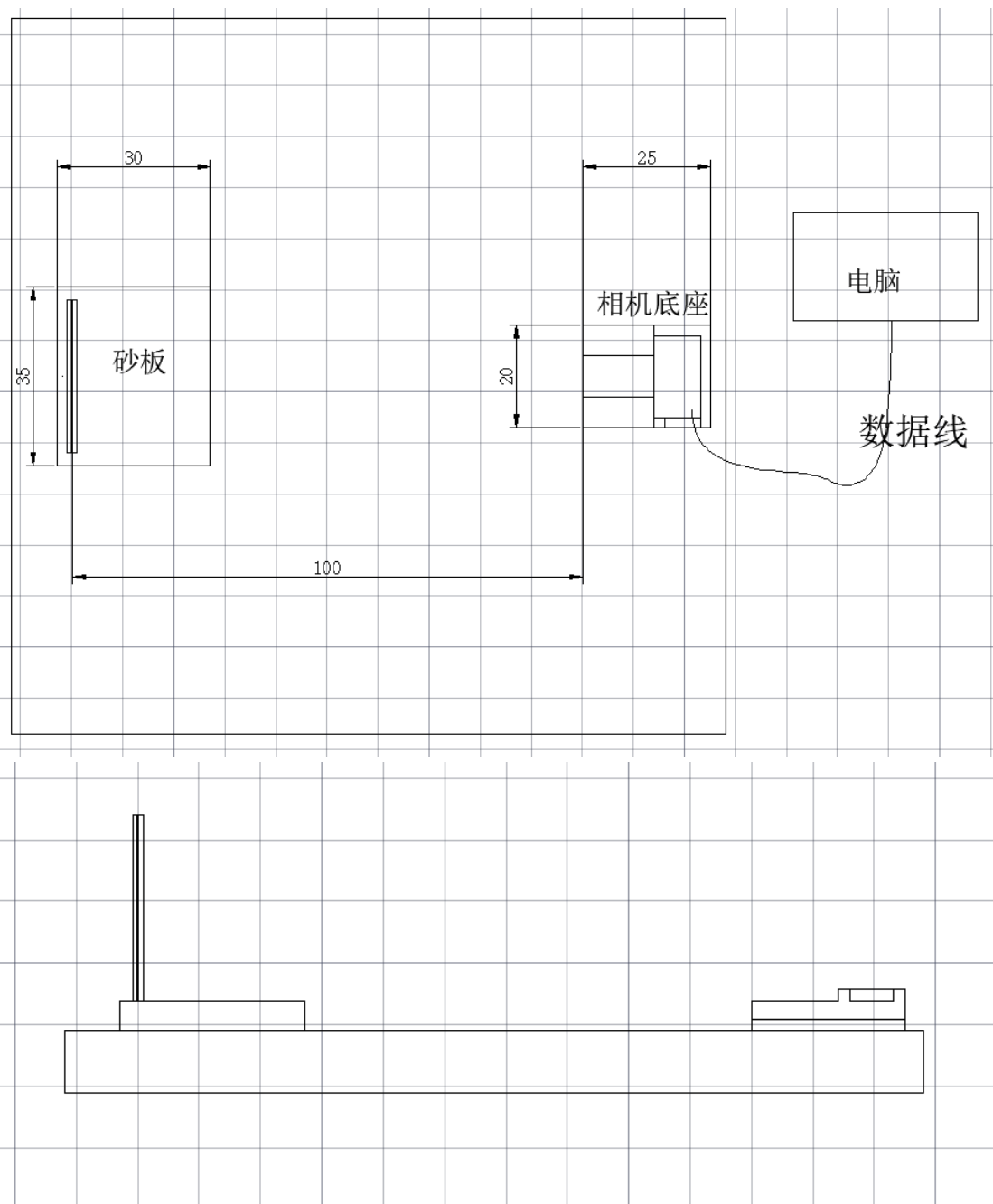
(2)砂板*3：已经完成多种工况下毛细上升现象的砂板，质量为 4.8kg，长宽高尺寸 30cm*35cm*35cm，砂板槽宽度 0.2cm，三个砂板分别内装三种尺寸的玻璃

珠（粒径分别为 0.2mm、0.4mm、0.4-0.6mm 混合三种），装置和玻璃珠如下图：



(3)相机：sony 相机及其底座，质量约为 1kg。

砂板与相机模型设计 cad 图：



砂板与相机间距约为 1m，相机底座左侧开槽，用于远程操控线路走线，相机镜头与砂板的间距为 0.8m-1m 时可以观察到大约 7-8cm 的高度；由于在正常重力环境下，液体毛细上升高度约为 15-25cm，在起始 5g 的条件下，预计排水高度为 3-5cm，7-8cm 的观察高度已经足够，且离心机载物台的尺寸为 1.2m*1.2m，正好可以容纳 1m 间距，所以选择 1m 作为间距。

- (4) 长 5m 的数据线。
- (5) 实验室工程机电脑。
- (6) LED 照明灯。
- (7) 在进行常重力毛细排水实验中需要的针筒、水箱、盛放玻璃珠的烧杯等。

五、实验流程及加载工况

(1) 前期准备工作：

制作相机固定装置：该试验将通过相机对实验过程中的毛细上升现象进行记录，在离心机中，装置的运动速度较快，一旦脱落会导致相机损坏，所以需要我们制作固定装置并确保在设备无损坏的情况下达到观测记录的最佳效果。

提前进行常重力情况下毛细现象排水实验。

事先将实验需要的软件安装在工程机上，测试相机的远程操控，对离心机进行实地测量及考察。

(2) 常重力下毛细现象排水实验：

1、将 0.2mm 玻璃珠倒入砂板中，达到约 25cm 的高度后停止，晃动装置使得其中的玻璃珠均匀。

2、将装置略微倾斜，缓慢浸入水中，待全部浸没后保持一段时间，以排除气泡。

3、将装置从水中拿出，放于桌面上，迅速将砂板下面的水用针筒抽出，直到液面为 1cm。

4、记录液面大致稳定的时间，拍摄稳定状况下砂板中液面的图片，利用图像处理软件得到毛细排水的高度。

5、在另外两个砂板中分别倒入粒径为 0.4mm、0.4-0.6mm 的玻璃珠，重复以上实验过程。

(3) 装置安装工作：

将相机和固定装置安装在离心机上。

用 5m 数据线将相机与安装于离心机上的工程机连接，测试远程操控软件。

将已经进行的并产生明显毛细上升现象的装置安装在固定装置上。

检查确定所有装置均已就位。

安装完成后，测量砂板与中心位置的距离，计算出加速度为 5g、10g、20g、30g 下该位置的实际加速度。

(4) 实验开始：

1、超重力离心机加速至 5g，保持加速度 10 分钟左右，10 分钟结束后拍照记录，期间记录液面稳定需要的大致时间。

2、超重力离心机加速至 10g，保持加速度 10 分钟左右，10 分钟结束后拍照记录，期间记录液面稳定需要的大致时间。

3、超重力离心机加速至 20g，保持加速度 5 分钟左右，5 分钟结束后拍照记录，期间记录液面稳定需要的大致时间。

4、超重力离心机加速至 30g，保持加速度 5 分钟左右，5 分钟结束后拍照记录，期间记录液面稳定需要的大致时间。

5、超重力离心机减速至常重力，实验结束，收集数据。

6、换用含不同粒径颗粒的砂板重复以上实验，收集并处理数据。

六、实验数据及分析

【解释说明】

根据选用颗粒粒径不同，先分为 A、B、C 三组实验：

A 组：粒径为 0.2mm；

B 组：粒径为 0.4mm；

C 组：粒径为 0.4-0.6mm；

A、B、C 三组实验又分别分为两组实验，一组为常重力(1g)情况下进行的预实验，做对照组；另一组为超重力(5g、10g、15g、20g、30g)情况下进行的试验，为实验组。

预实验为常重力下的毛细排水试验（上文有详细记述）。而实验组限于超重力的实验环境，无法进行完整的排水实验，只能在预实验组加载不同重力，判断稳定的高度。

由于电脑设备等客观因素，实验未完成，以下实验数据及分析是根据文献预测出的。

【实验数据】

A 组：

重力加速度/g	毛细高度/h(cm)	毛细下降时间/t(s)
1g	25	t
5g	5	t/25
10g	2.5	t/100

15g	1.67	t/225
20g	1.25	t/400
30g	0.83	t/900

B 组:

重力加速度/g	毛细高度/h(cm)	毛细下降时间/t(s)
1g	20	t
5g	4	t/25
10g	2	t/100
15g	1.33	t/225
20g	1	t/400
30g	0.67	t/900

C 组:

重力加速度/g	毛细高度/h(cm)	毛细下降时间/t(s)
1g	15	t
5g	3	t/25
10g	1.5	t/100
15g	1	t/225
20g	0.75	t/400
30g	0.5	t/900

【数据分析】

毛细上升公式的推导：

液体之所以能够在毛细管中上升，与液体在亲液毛细管中形成弯曲液面并产生附加压力（ Δp ）有关。Young 和 Laplace 导出 Δp 与液面曲率半径的关系：

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

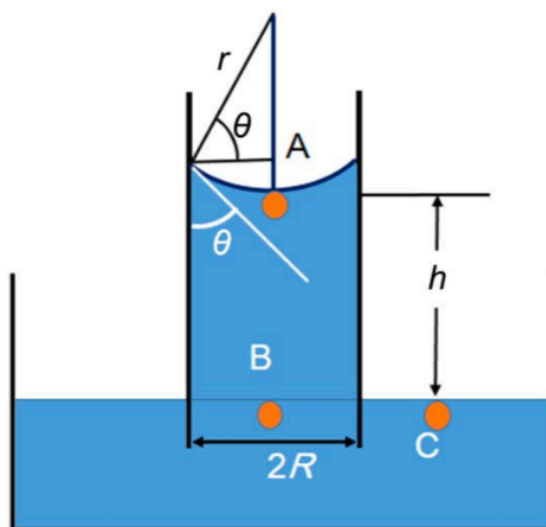
式中， σ 为液体的表面张力， r_1 和 r_2 为弯曲液面在两个方向上的曲率半径。如果液面为球形的一部分，则 $r_1=r_2$ ，式(1)可简化为：

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}$$

如图 1 所示，当达到平衡时，处于同一水平液面高度的 B 和 C 两点，其压力应相等，由此即可导出毛细上升公式为：

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\Delta \rho g R}$$

式中 θ 为接触角， R 是圆形毛细管的半径， $\Delta \rho$ 是液体与气体的密度差， g 是重力加速度。该方法是最常见的推导毛细上升公式的方法。



弯曲液面的曲率半径(r)、毛细管半径(R)及润湿角(θ)之间的关系

方形管等讨论过程为上述讨论类似。

由上述讨论我们可以看出，毛细上升高度 h 与重力加速度大小成反比。

又根据学长指导和文献检索，我们预测毛细排水下降时间与重力加速度大小近似为平方的反比的关系。

七、实验结论及建议

【实验结论】

根据实验数据的整理分析，我们发现：

- 1、毛细上升高度 h 与重力加速度大小成反比。

$$h \propto \frac{1}{g}$$

- 2、毛细排水下降的时间与重力加速度平方成反比。

$$t \propto \frac{1}{g^2}$$

【实验问题】

- 1、理论上使用的毛细上升公式是最一般的毛细上升公式,与该实验的实际情况可能存在偏差,从而造成一定的实验误差。
- 2、超重力离心机平台上不同位置的重力加速度是不一样的,由于未进行实验,无法通过计算确定准确的实验重力加速度。
- 3、超重力离心机稳定在较小的 g 值下很难,所以实验过程中通常是稳定在目标 g 值附近的一个重力加速度,而我们预测的实验重力加速度则是理想的精确 g 值。

【改进建议】

- 1、在老师、学长的指导下,查阅相关文献资料,推出在实验颗粒粒径情况下准确的毛细上升公式。
- 2、在进行超重力实验之前,准确测量实验装置(沙板)的位置;在实验过程中,准确记录超重力离心机稳定的 g 值大小。通过理论运算得出准确的实验 g 值。
- 3、增大实验 g 值范围、提高硬件水平(照相机精度等),探究更一般的实验规律。

八、实验感想

耿茂思:

经过一整个长学期的创新型与探究型实验课程的学习,感觉自己受益匪浅。学习上,作为本科生的我接触到了本科生乃至研究生阶段都无法接触到的知识,虽然无法完全掌握,但却让我的眼界更加开阔,意识到了“知识无止境”的道理;科研上,作为本科生的我早早接触了实验,对实验的流程以及探究过程有了一个基本的认识,同时我也有幸进入了在国内乃至世界范围内都领先的超重力实验室,

并亲自设计需要使用超重力离心机的实验；除此以外，我还认识了许多博学的老师和优秀的学长，与他们讨论交流的过程，让我深刻体会到了榜样的力量。

同时我也想关于这门课提个小小的建议：希望能有更多的动手做实验的机会，同时课程能够连贯紧凑。

总之，很幸运也很开心能上这门课，感谢老师学长，也感谢我的队友们。

戴恩恩：

本次实验最终因为相机的拍照软件与离心机的工程机不兼容而没有完成，原本已经可以上机的实验因为一个小小的问题功亏一篑，十分可惜。但在准备实验的过程中我也得到了许多感悟与教训。

这次实验让我对于超重力离心技术有了一定的了解。让我知道，土木工程也可以很高大上，我们也是有很高的科技含量的。对于岩土工程在资源开采、环境保护、地质勘测等方面的作用也有了一定的认知。

事先要有周到的安排以及计划。这次实验因为要申请使用离心机，在前期准备以及实验方案上的要求更高，需要多和老师沟通。在这个过程中，我们的效率其实比较低，每次去实验室其实都没有把当时可以解决的问题完全解决，这周的问题留到下周。最终出现问题的时候就没有时间解决了。

真正的实验需要严谨的方案。我们这个实验说起来很简单，把装置放到离心机上转一下拍个照就好了，然而真正能够上机还需要大量细节，比如光照条件、g 值选取、装置质量对于配重的影响等等。i

黄贤德：

经过了一个学期的探究性与创新性实验这门课的学习，感觉自己学到了很多与实验相关的知识，最开始的时候在老师的介绍下开始对超重力有所了解，也对

土木未来所需要研究的方向有了一些了解；虽然我们最后的实验由于设备原因没有成功完成，但我觉得实验准备的过程也让我学到了很多知识，学会了去思考如何精确的做一个实验，尽量去避免或者减少误差，这是在以前的课程里没有学过的。

一个实验的成功是离不开前期的准备工作的，设备的安装，调试，以及影响因素，实验方案的设计等，这些都需要耐心的去完成；我相信有了这次探究性与创新性课程的学习我在以后的实验工作中会避免许多失误，实验会更得心应手。

很感谢林老师以及几位学长对我们的帮助和指导，让我们接触到了如此高端的实验，知道了土木也可以做得高大上。也感谢我的几位队友在实验中的互帮互助。

[1]程阳.由于毛细现象液面上升高度计算的思考[J].数理医药学杂志,2010,23(04):477-478.

[2]赵留鹏,张树永.毛细上升公式的推导方法及其在方形毛细管中的应用[J].大学化学,2016,31(11):83-88

[3]杨新生.吸管中的水为什么会下降——浅析一个验证毛细现象的实验[J].教学与管理,2003(23):60

[4]曾东,李振虎.超重力技术的应用研究[J].石油化工,2018,47(07):763-768

[5]李燕,王维民,高金吉.超重力机自动平衡系统的设计及模拟试验研究[J].振动、测试与诊断,2010,30(01):16-18+95