

水平圆振动下淀粉悬浮液中的巴西果效应

胡梦菲 石理新 赵松川*

西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室

介绍

在一定的体积分数和外部激励下，颗粒悬浮液会表现出明显的非牛顿流动特性。浓稠颗粒悬浮液在剪切作用下会发展出局部密度与应力的剧烈变化^[1]。实验中这种剧烈的应力变化表现为悬浮液中大尺寸重物的上浮。本文着重讨论了物体运动与悬浮液局部的不连续剪切增稠的关系。

实验现象

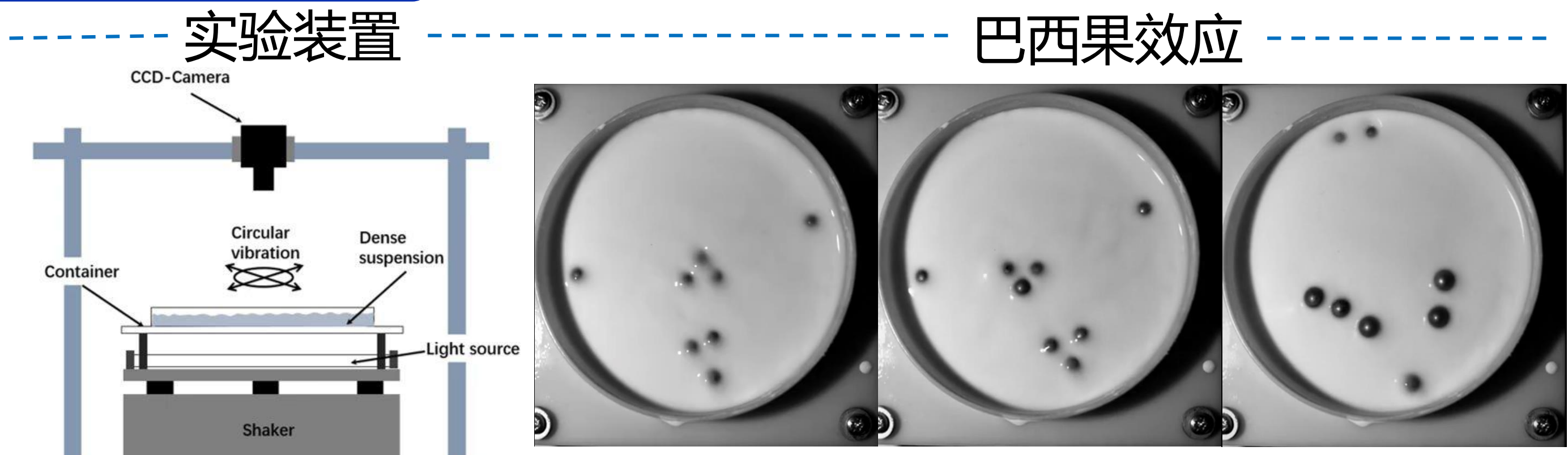


图1.实验装置正视图

图2.巴西果现象：时间增加，激励增强，容器中心的重物逐渐上浮，而边缘的球逐渐下沉

局部高密度区域的出现和重物运动自由度都会影响巴西果效应

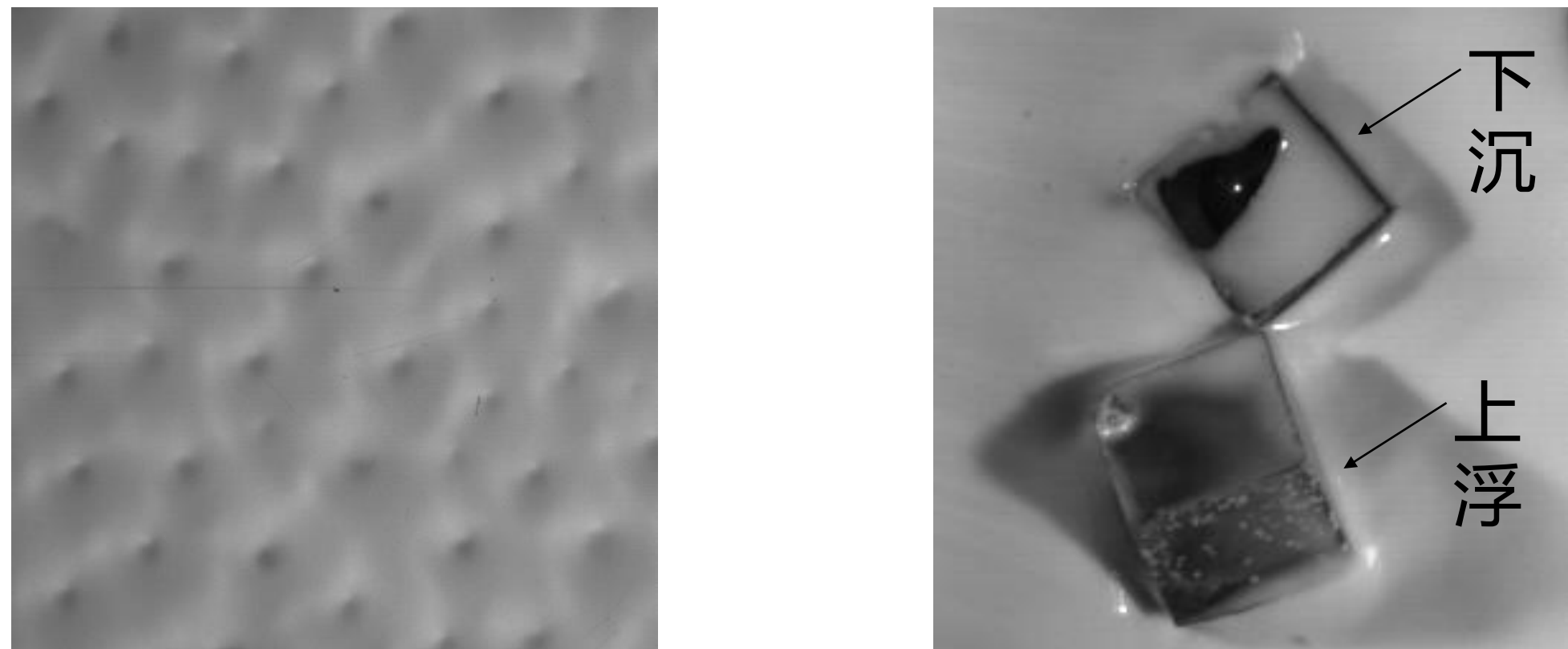


图3.局部高密度区域形成的尖点

图4.六面体重物

运动轨迹

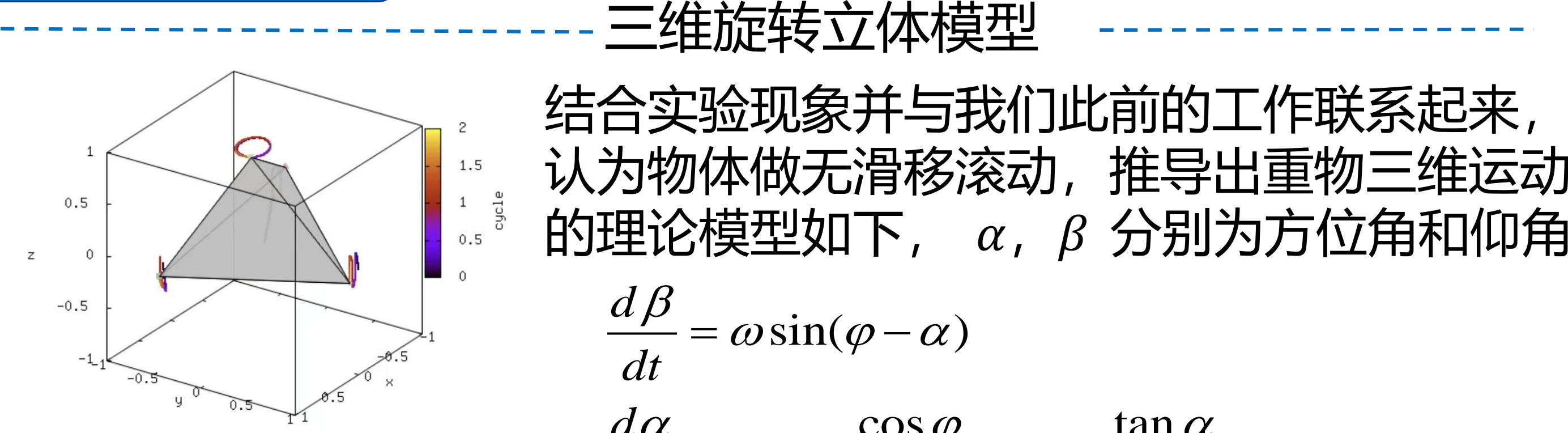


图5.三维旋转立体模型

三维旋转立体模型

结合实验现象并与我们此前的工作联系起来，认为物体做无滑移滚动，推导出重物三维运动的理论模型如下， α 、 β 分别为方位角和仰角。

$$\frac{d\beta}{dt} = \omega \sin(\varphi - \alpha)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\omega \frac{\cos \varphi}{\tan \beta \cos \alpha} - \omega \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} \sin(\varphi - \alpha)$$

实验还原三维运动

三维旋转参考系为实验室参考系，对于在三维空间里的一个参考系，任何坐标系的取向，都可以用三个欧拉角来表现。（ α ）绕着z轴的旋转、（ β ）新X轴的旋转、（ γ ）绕着Z轴的旋转，得到

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma - \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \cos \gamma + \cos \beta \cos \alpha \sin \gamma & \sin \beta \sin \gamma \\ -\cos \alpha \sin \gamma - \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \sin \gamma + \cos \beta \cos \alpha \cos \gamma & \sin \beta \cos \gamma \\ \sin \beta \sin \alpha & -\sin \beta \cos \alpha & \cos \beta \end{bmatrix}$$

通过俯视观测特征点的运动和[R]还原运动轨迹，与上述理论比较，提取 ω 和 f ，与我们的理论吻合

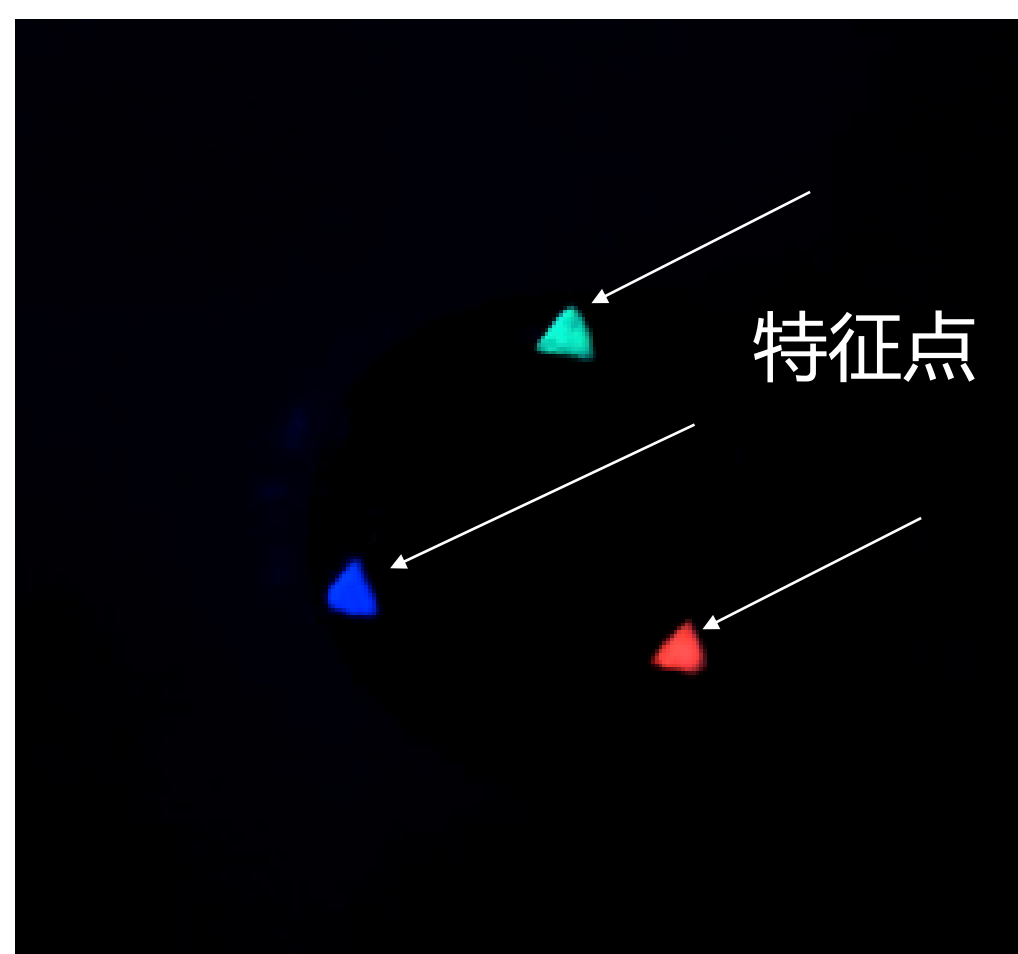


图6.三维旋转俯视图

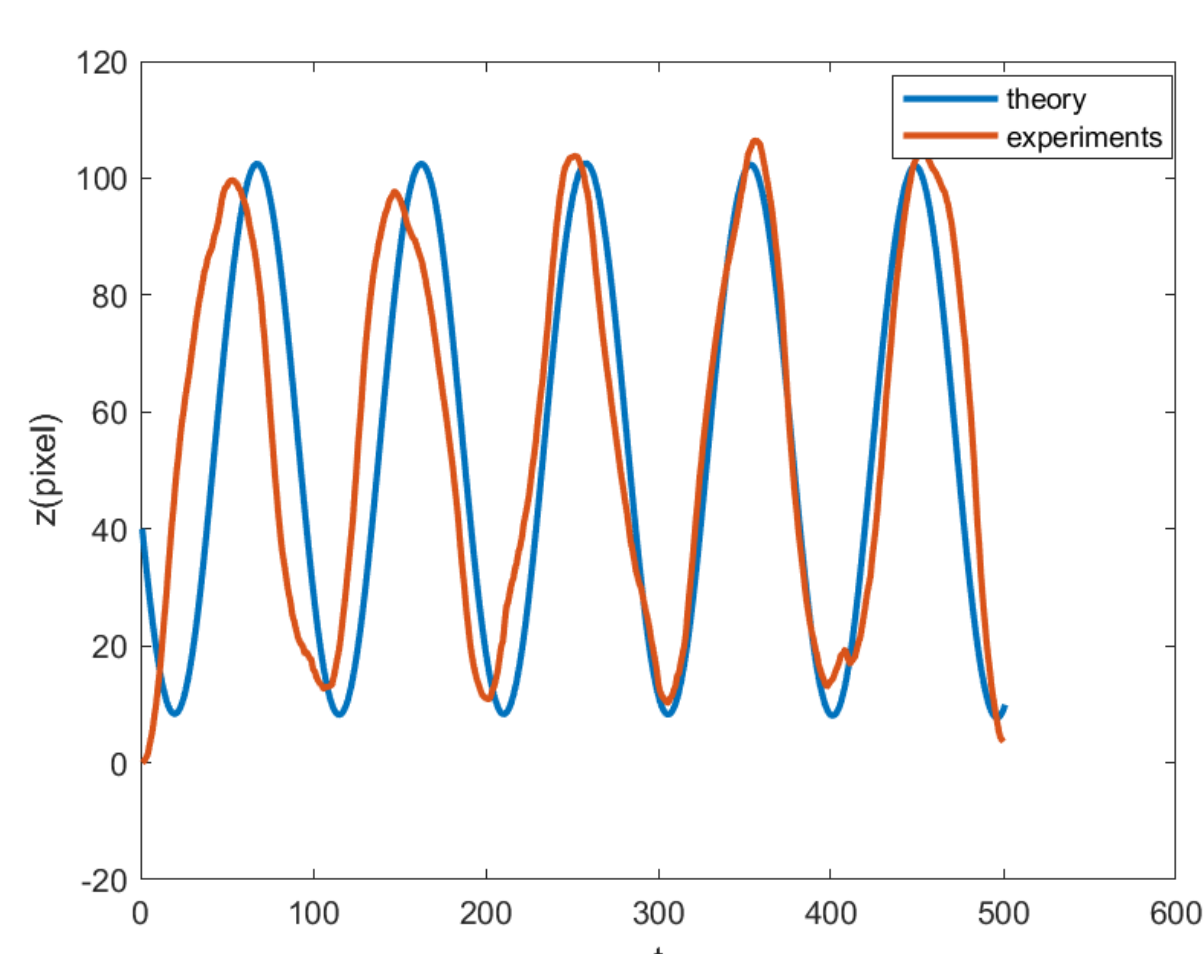


图7.三维旋转理论模型与实验数据

结论

- ✓ 通过巴西果效应可视化了玉米淀粉悬浮液的剪切增稠，从而证实了DST是局部发生的失稳。
- ✓ 实验验证了重物上浮的条件，并确定了重物上浮的运动形式。
- ✓ 通过力学测量，我们将DST产生的应力失稳进行量化，准确的计算出单次失稳法向应力。

力学测量

巴西果现象与边界上的运动学条件、力学条件紧密相关，改变约束类型会影响该现象

固定约束力学测量

- 局部高密度区域在固定约束下的聚集和溃散宏观上表现为力学信号的波动。

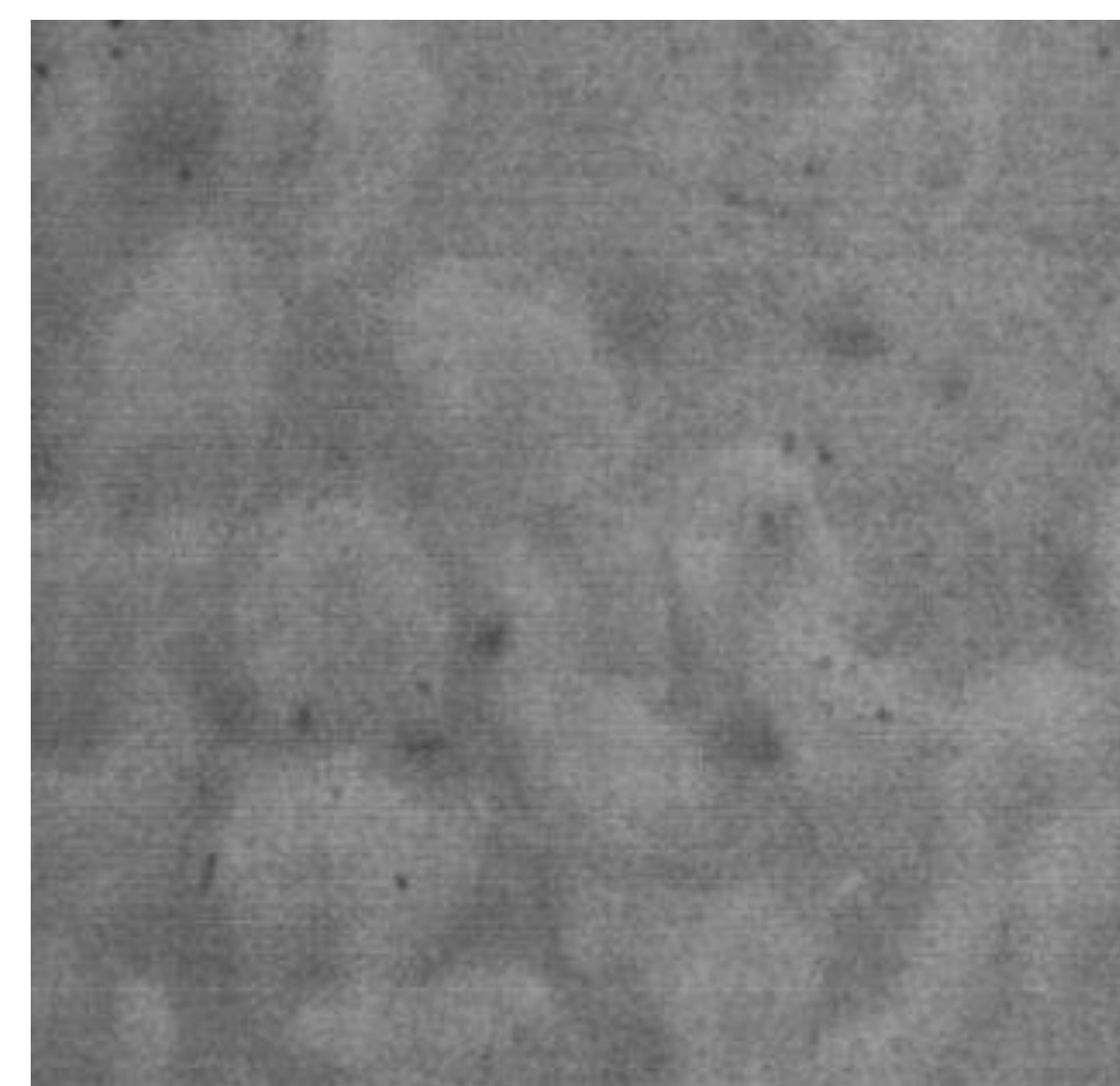


图8.固定约束下密度波的扩散现象

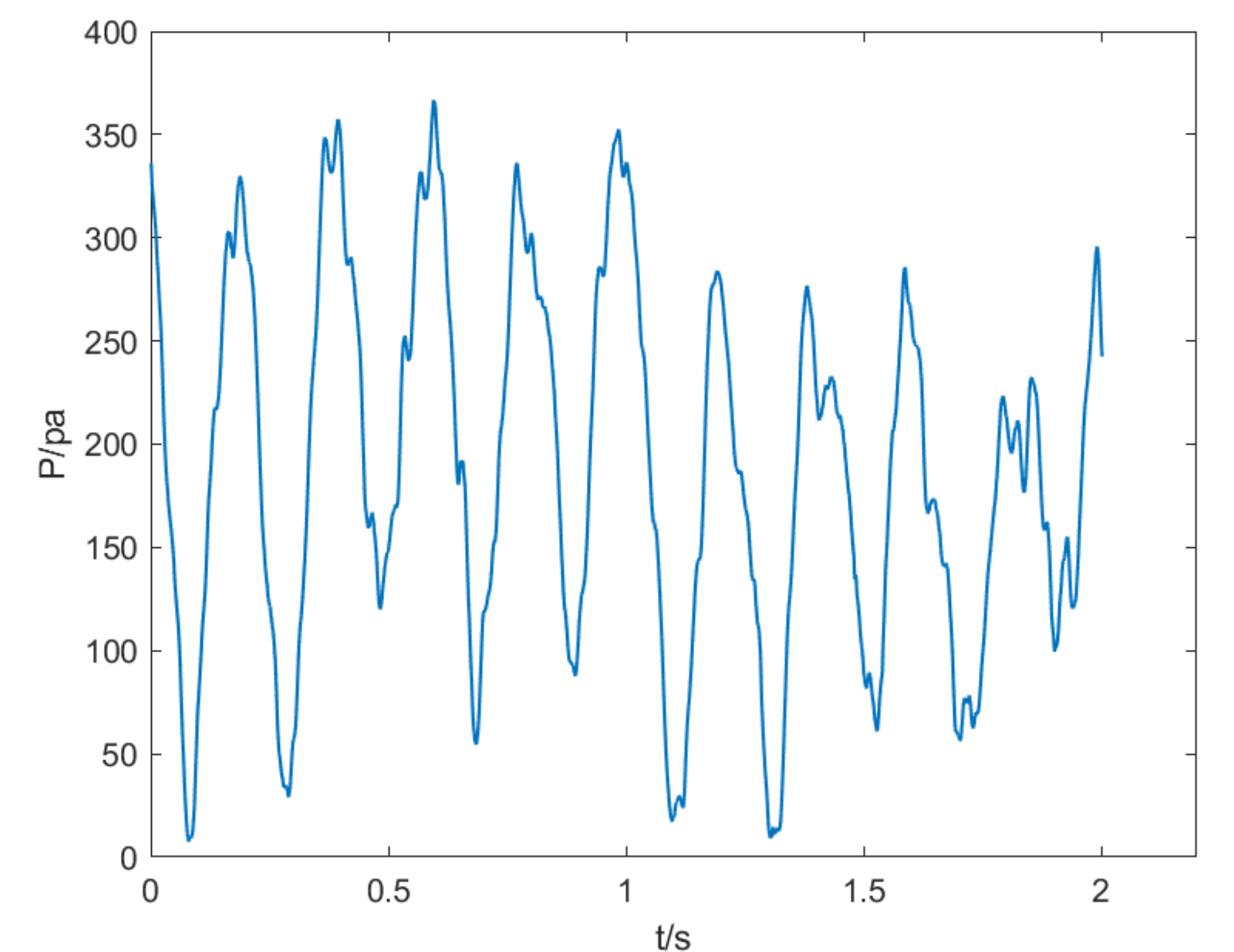


图9.力学信号的波动

- 测量固定约束下悬浮液产生的法向应力，并通过概率模型计算悬浮液单次失稳强度值。

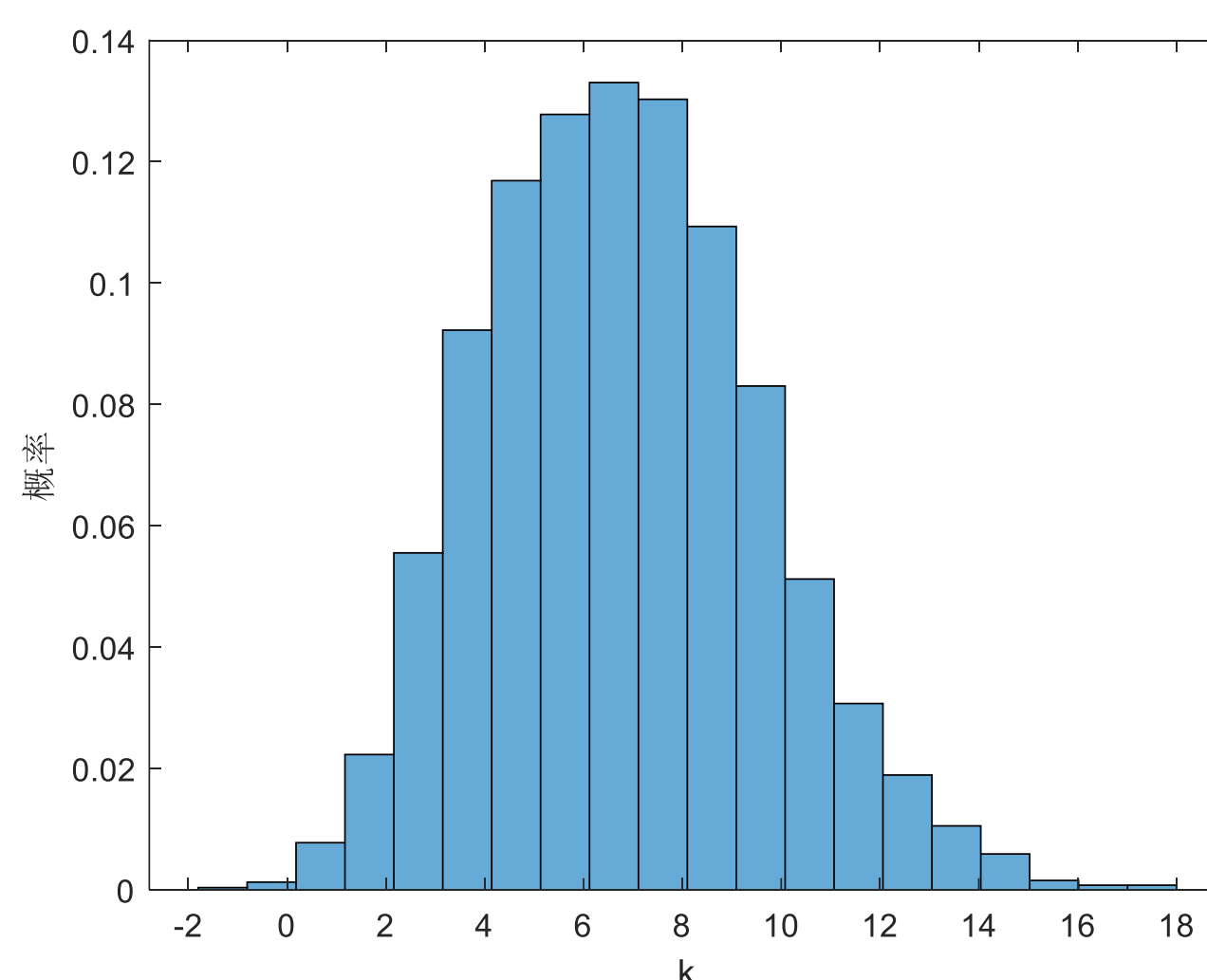


图10.失稳数k的概率分布图

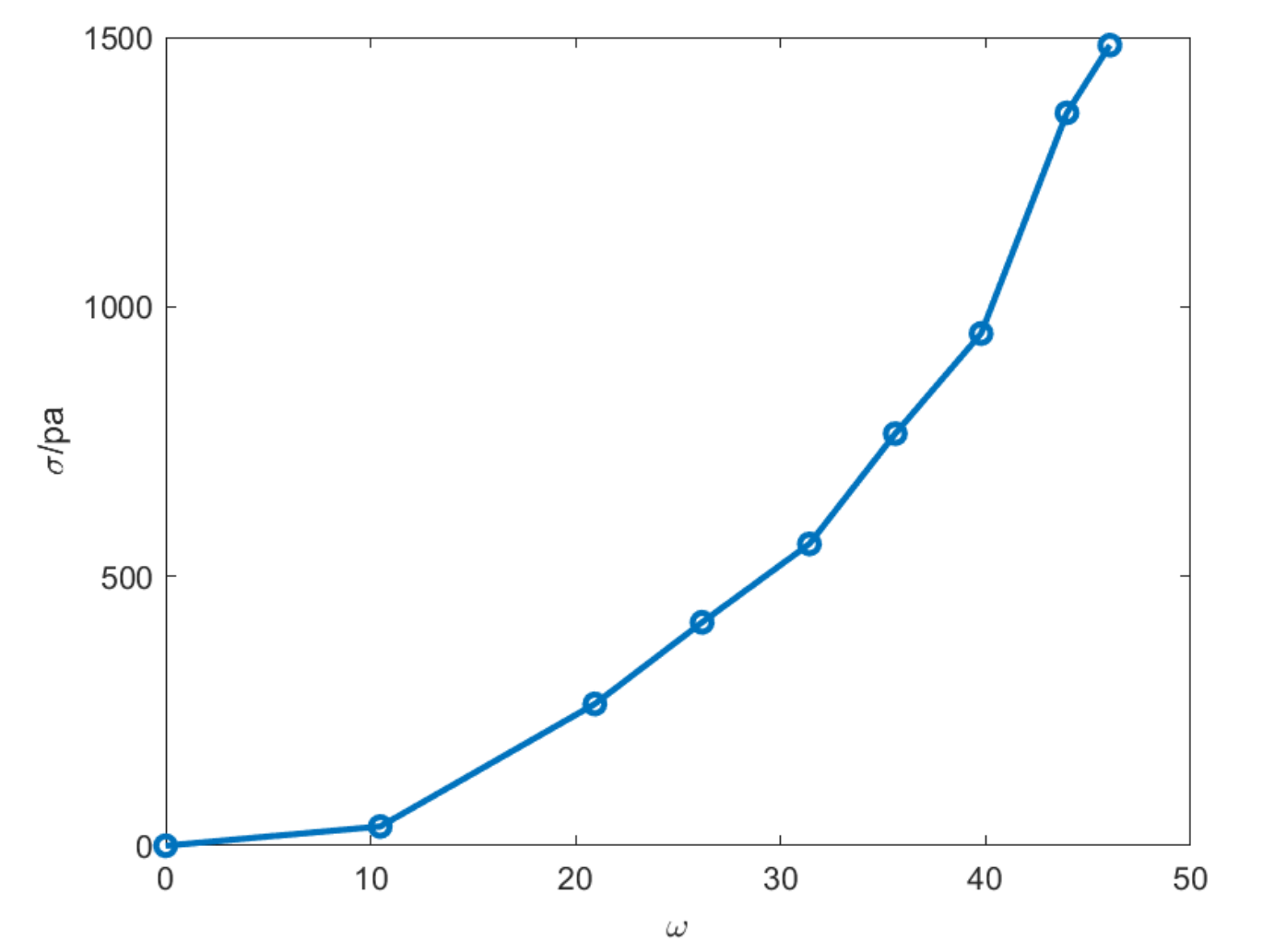


图11.固定体积分数下单次失稳强度随激励频率的变化

自由转动状态下力学测量

- 实验表明物体保持自由约束下的力学变化与固定约束（限制转动）有明显差异

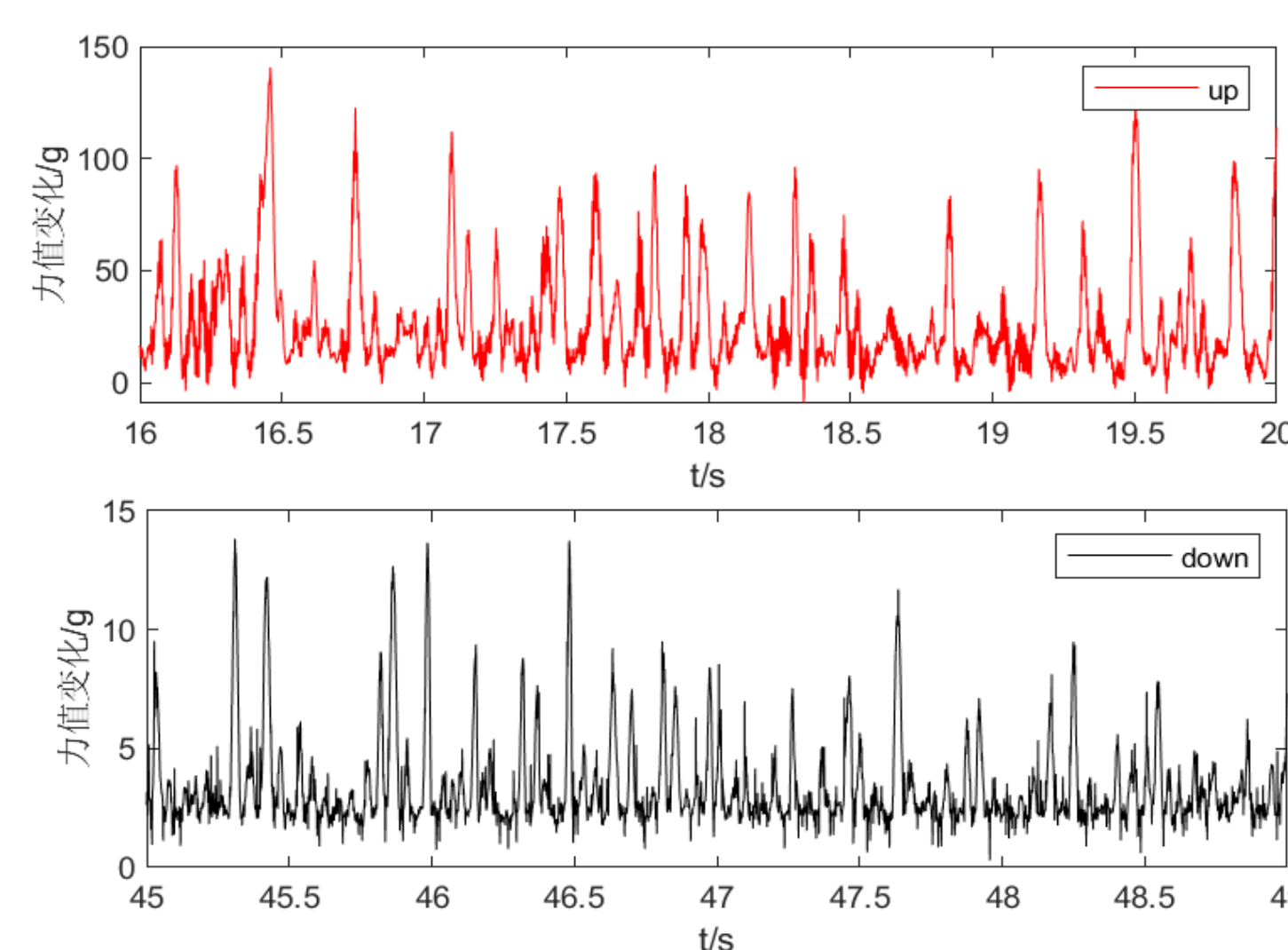


图12.上浮的重物与沉没重物所受法向力

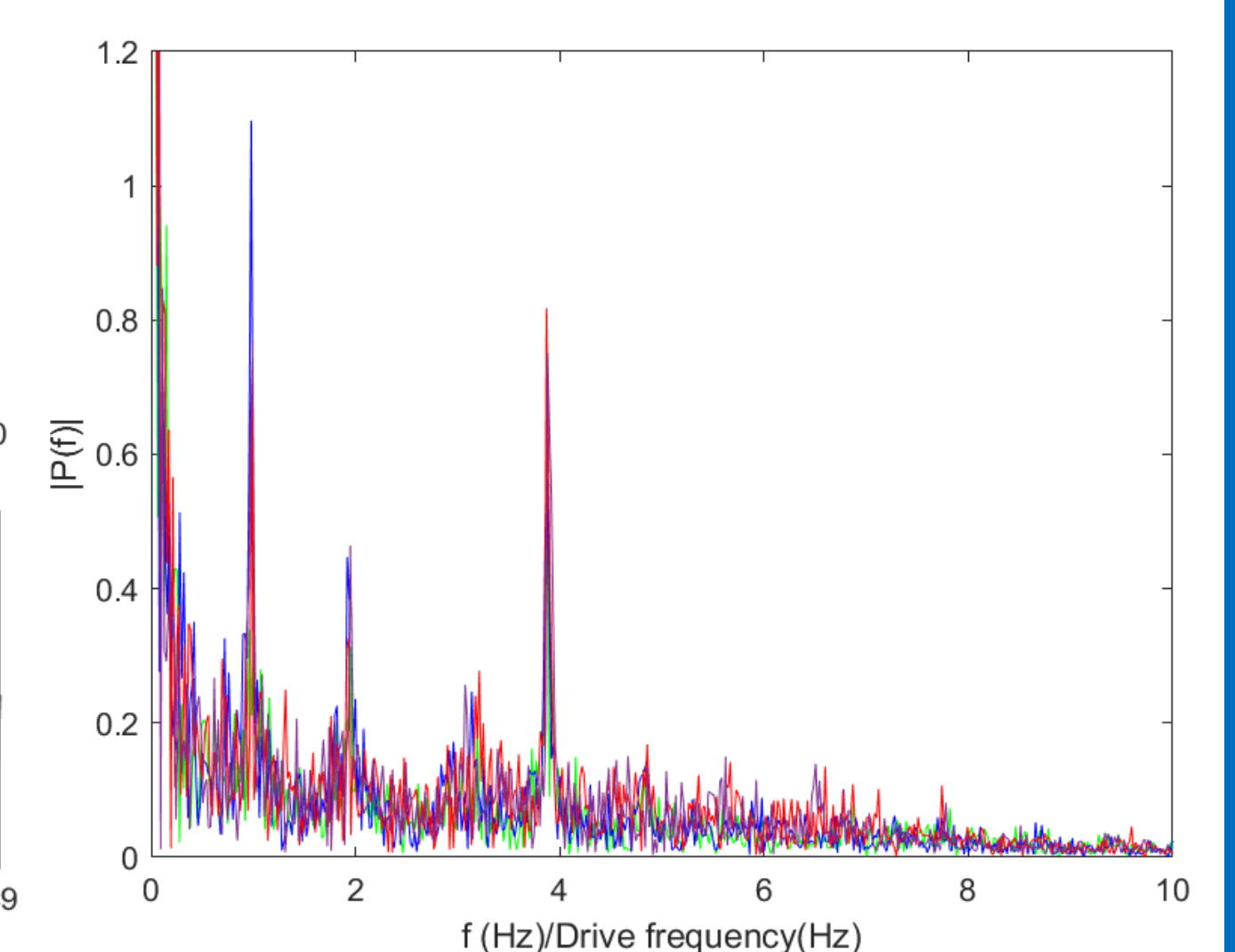


图13.上浮重物质心高度变化的傅里叶变换

结合重物运动状态和力值变化，我们确定无滑滚动对重物上浮的必要性。