参赛学生姓名：陈宇遥

中学：上海市控江中学

省份：上海市

国家/地区：中国

指导老师姓名：张海英

指导老师单位：上海市控江中学

论文题目： M 型自启动虹吸的两阶段启动行为与峰后动力学

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

M 型自启动虹吸的两阶段启动行为与峰后动力学

作者：陈宇遥

摘要

本文针对 M 型双峰刚性弯管的自启动虹吸现象开展实验和理论研究，考察初始浸没深度 Δs、两峰高差 Δh、管内径 D 和弯曲半径 R 对启动行为的影响。高速视频显示，主体液柱可出现未越峰、越峰后回退和稳定自启动三种状态，由此将启动过程划分为“越峰”和“峰后启动”两个阶段。

在 Δs = 0 mm、R = 20 mm、Δh = 25 mm 的管径对照实验中，D = 15 mm 时主体液柱前沿未能越过出口侧关键峰 P_2；D = 8、12 mm 时，液柱虽越过 P_2，但随后回退；D = 4 mm 时则实现稳定自启动，并形成持续排流。这表明在所研究的装置和实验条件下，越峰是稳定自启动的必要过程，但并非充分条件。在 Δs = 0 mm、D = 8 mm、Δh = 25 mm 的弯曲半径对照实验中，R = 20 mm 时的峰顶前沿速度约为 0.26 $m·s^{-1}$，但液柱在越峰后回退；R = 30 mm 时的峰顶前沿速度约为 0.21 $m·s^{-1}$，却最终稳定启动。这说明跨不同弯曲半径工况，仅凭峰顶速度大小不足以可靠判定启动结果。

为分析越峰后停滞机制，本文在管道停止运动、主体液柱连续且主界面可由单一前沿描述的条件下，建立充液长度随前沿位置变化的准一维模型。模型表明，液柱越峰后仍可能进入净静态驱动不利区，并因减速而停滞；以有限正向速度穿过该区有利于后续推进，但不能单独保证持续排流。现有实验中观察到的峰后回退与稳定启动现象与上述机制在定性上相符，但尚不足以对完整速度演化过程及启动边界条件进行定量验证。本研究表明，对该类自启动虹吸过程的分析需要区分越峰条件与峰后持续推进条件，而不能仅依据越峰瞬间的速度判断最终启动状态。

关键词：自启动虹吸；M 型弯管；两阶段启动；越峰后回退；峰后不利区

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

目录

1 引言.....1
1.1 研究背景与研究现状.....1
1.2 研究问题与本文独立研究内容.....2
2 实验方法.....3
2.1 实验装置、几何参数与工作流体.....3
2.2 实验流程.....4
2.3 数据处理.....4
2.4 启动状态判定.....5
3 实验结果.....6
3.1 管径对启动状态的影响：三种动力学结果.....6
3.2 初始浸没深度对启动状态的影响：从回退到稳定启动.....7
3.3 弯曲半径对峰后运动的影响：峰顶速度不能单独判定启动结果.....9
3.4 两峰高差变化下的两阶段启动特征.....10
3.5 复杂界面状态与单前沿描述的适用性.....12
4 简化的一维峰后动力学模型.....12
4.1 研究范围和基本假设.....13
4.2 入口条件和动量方程.....13
4.3 峰后不利区的定义及物理解释.....14
4.4 峰后不利区的穿越判据.....15
5 模型对峰后运动行为的解释及实验比较.....16
5.1 峰后停止位置的模型解释.....16
5.2 为什么“峰顶速度更大”仍可能失败.....18
5.3 模型适用范围和不确定性.....19
6 结论.....19
参考文献.....20
致谢与研究过程说明.....21

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026江成榜中学科学奖论文公示

1. 引言

1.1 研究背景与研究现状

虹吸是一种常见的流体现象。液体能够沿弯曲管道越过局部高点，并在重力势能差的驱动下从较高液面流向较低液面。传统虹吸通常需要预先使管内充满液体，以形成连续液柱，其稳定流动过程可以通过经典流体力学进行描述[1]。与之不同，自启动虹吸能够在弯管部分浸入液体后，无需人工抽吸或预先充液而自行建立流动。其启动过程涉及气液界面运动、管内压力变化以及液柱惯性、重力和流动阻力的相互作用，因此其过程比稳定虹吸更加复杂。

已有研究从实验和数值模拟等方面讨论了虹吸启动过程中空气排出、压力变化及连续液柱形成的机制[2,3]。相关的毛细充液和移动界面的研究揭示了管道几何、毛细作用、黏性阻力、惯性及重力对液体前沿运动的影响[4-7]。此外，针对分段自启动虹吸及 U 形自启动虹吸工作范围的研究[8,9]，为理解管路几何对自启动过程的影响提供了基础。然而，对于液体已经越过管道关键高点，却仍未能建立持续虹吸的情况，其动力学机制仍值得进一步研究。

本研究源于 IYPT 2026 第 1 题“Invent Yourself”中的自启动虹吸问题[10]。在研究 M 型弯管的管径、弯曲半径等参数对自启动结果的影响时，我们发现，自启动过程并不能简单分为“成功”和“失败”两种情况，而是可以观察到三种不同结果：（1）液体前沿在出口侧关键峰之前停止，并随后回落，即液体未能越过出口侧关键峰；（2）液体前沿已经越过关键峰，但在继续前进一段距离后逐渐减速、停止，并最终发生整体回退；（3）液体越过关键峰后继续向出口方向运动，最终形成持续的虹吸流动。

其中，第二种“越峰后回退”的现象引起了我们的特别关注。直观上，人们可能认为，只要液体具有足够的速度越过出口侧关键峰，之后便能够在重力作用下继续运动并最终形成虹吸。然而实验表明，即使主体液柱已经越过关键峰，后续运动仍可能因重力驱动、液柱惯性和流动阻力之间的相互作用而停止，最终导致启动失败。因此，本文将研究重点放在“液体越峰之后为什么仍然可能回退”这一现象上，希望通过进一步实验和简化动力学分析，寻找决定液体继续前进或发生回退的主要因素。

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

1.2 研究问题与本文独立研究内容

基于上述实验发现，本文主要研究以下三个问题：

（1）能否在实验中稳定地区分“未越峰”、“越峰后回退”和“稳定自启动”三种运动状态，液体越过出口侧关键峰是否足以保证虹吸成功启动？

（2）管道几何参数及初始浸没深度如何影响液体的越峰行为与最终启动结果？液体通过关键峰时的速度（峰顶速度）能否作为预测稳定启动的有效判据？

（3）能否建立简化的动力学模型，解释液体在峰后继续前进、停滞及回退的现象，并分析稳定启动所需的动力学条件？

针对上述问题，本文开展了以下研究：

（1）**液体运动观测与状态分类。**利用高速摄像记录液体前沿的位置变化，分析不同实验条件下的运动过程，将自启动过程分为“未越峰”、“越峰后回退”和“稳定自启动”三类。

（2）**几何参数与初始条件的影响。**通过改变管径、弯曲半径、两峰高度差及初始浸没深度，研究各参数对液体越峰行为和最终启动结果的影响，比较液体越峰条件与稳定启动条件的差异。

（3）**峰顶速度与启动结果的关系。**根据液体前沿的运动轨迹分析峰顶速度，比较不同实验条件下峰顶速度与最终启动结果的关系，考察峰顶速度能否独立预测虹吸启动成功与否。

（4）**越峰后的简化动力学建模。** 针对液体已越过关键峰且主体液柱近似连续的情况，建立考虑液柱惯性、重力作用和流动阻力的一维动力学模型，分析液体越峰后继续前进、停滞或回退的原因，并探讨持续排流的动力学条件。

2 实验方法

2.1 实验装置、几何参数与工作流体

实验采用透明 PMMA 圆管制作双峰 M 型弯管，工作流体为约 20 ℃的水，加入微量荧光素钠作为示踪剂。实验装置主要由上游水槽、M 型弯管、步进电机驱动机构、高速相机和下游容器组成，如图 1 所示。

2026 S.T.Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

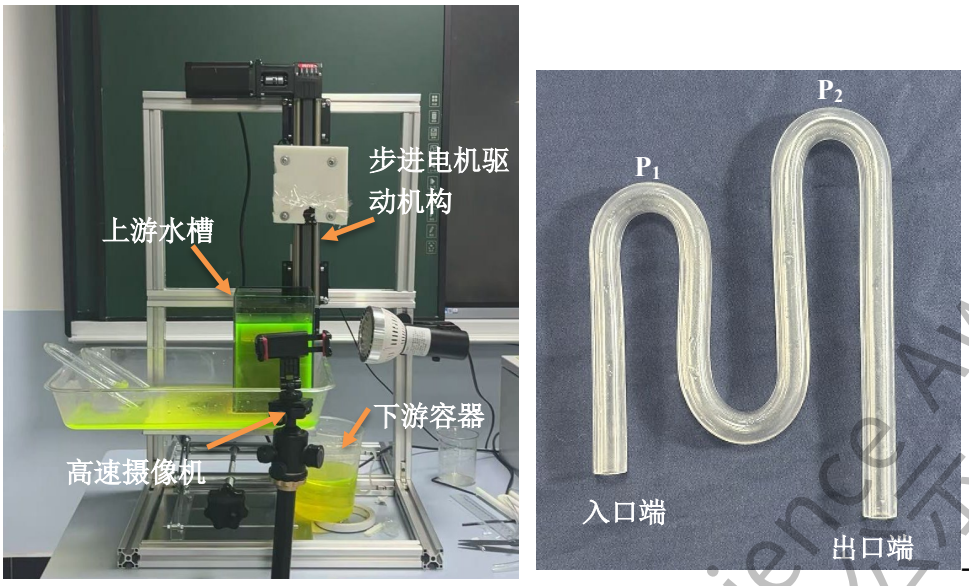


图 1 实验装置和代表性 PMMA 弯管（Δh = 25 mm、D = 8 mm、R = 20 mm）的实物图

如图 2 所示，沿管道中心线从入口到出口依次为入口上升段、第一峰 P_1、中央谷底、第二峰 P_2 和出口下降段。其中 P_2 为本文重点研究的出口侧关键峰。管内径为 D，固定壁厚为 w = 2 mm，弯管中心线的曲率半径为 R，两峰中心线高度差为 Δh。初始浸没深度 Δs 定义为电机停止时 P_1 峰顶处管道外侧上缘低于上游自由液面的垂直距离，向下浸没取正值。

主要实验采用 R = 20 mm，并设置 R = 30 mm 进行对比；管内径 D 取 4、8、12 和 15 mm；两峰高差 Δh 取 25、40 和 75 mm，通过改变 Δs 考察不用条件下的启动行为。

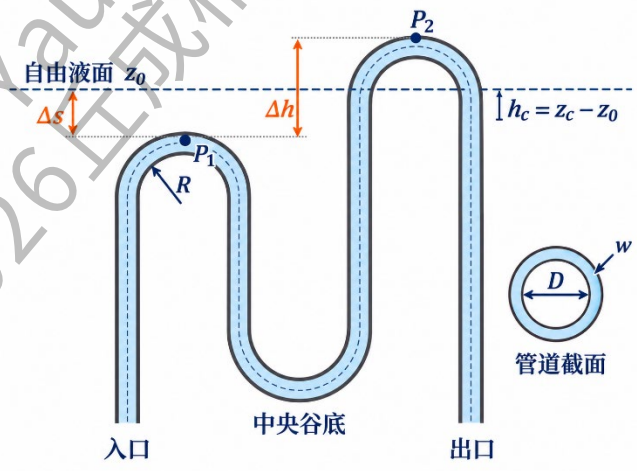


图 2 M 型弯管中心线几何与参数定义：P_1、P_2、Δs、Δh、R 和 D。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

2.2 实验流程

每次实验前，先使水流经整个弯管，随后排空管内液体，以尽可能保持一致的初始润湿条件。实验时，步进电机以约 32 mm·s^{-1} 的恒定速度带动弯管竖直下降。当浸没深度达到预设 Δs 时，停止电机并固定弯管，此后不再施加外部驱动。

实验采用高速相机记录管内液体运动，原始帧间隔为 1.25 ms，对应采样频率约 800 fps。每种工况均进行了重复实验，其中接近启动状态转变的工况至少重复实验 3 次，以检验启动状态分类的重复性。

2.3 数据处理

利用 Tracker 软件逐帧追踪与连续主体液柱相连的主气液界面，将其二维图像坐标（x(t), y(t)）转换为沿管道中心线的弧长坐标 s(t)。

为描述主体前沿相对于 P_2 的位置，定义 $\xi(t) = s(t) - s_{crest}$，其中 s_{crest} 为 P_2 峰顶的中心线弧长坐标。当 $\xi < 0$ 时，前沿尚未达到 P_2 峰顶；$\xi = 0$ 表示前沿位于 P_2 峰顶；$\xi > 0$ 表示前沿已经越过 P_2 峰顶，并进入出口侧的峰后区域。

采用三阶 Savitzky–Golay 多项式对 s(t)进行局部平滑，通过拟合多项式的一阶导数计算前沿速度 v(t)。基准平滑窗口为 61 帧，同时采用 41 帧和 81 帧进行敏感性比较，对应的首末帧时间跨度分别为 75、50 和 100 ms。

实验以电机停止时刻为原始时间零点（$t = 0$）。为比较不同工况的运动轨迹，部分结果采用越峰时刻 t_{crest} 或最大推进位置对应时刻 t_{turn} 进行实践对齐。由于部分工况在电机停止前已越过 P_2，t_{crest} 不一定大于零。理论模型所用计算起点 t_a 在第 4.1 节中定义，其与实验时间基准的关系如图 3 所示。

本文展示的位置-时间曲线主要为代表性单次实验轨迹，并非重复实验的平均结果。根据图像标定和界面识别，主体前沿位置的估计误差约为±0.5 mm，浸没深度的估计误差约为±0.2 mm。对于前沿接近 P_2 峰顶或速度接近零的情况，结合原始高速视频复核运动状态。

2026 Yau High School Science Award
仅用于2026年成利中学科学奖论文公示

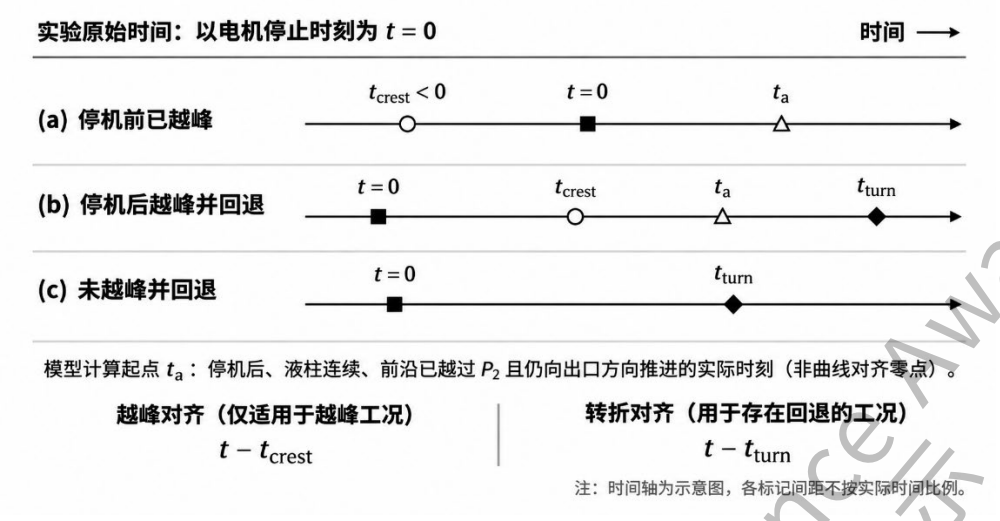


图 3 实验时间基准与模型计算起点示意图

2.4 启动状态判定

根据主体液柱前沿相对于 P_2 的运动轨迹及最终排流状态，将实验结果分为以下三类：（1）**状态 I：未越峰**。主体前沿在到达 P_2 峰顶前停止并回退，最大推进位置满足 $\xi_{max} < 0$。（2）**状态 II：越峰后回退**。主体前沿已越过 P_2 峰顶，满足 $\xi_{max} > 0$，但在峰后推进有限距离后停止，并整体回退，未能建立持续排流。（3）**状态 III：稳定自启动**。主体前沿越过 P_2 峰顶后继续向出口推进，在后续观察过程中未发生整体停滞和回退，并最终形成持续出口排流。

据此，将自启动过程划分为两个阶段：第一阶段为越峰阶段，判断主体前沿能否越过 P_2；第二阶段为峰后启动阶段，判断液柱越峰后能否持续推进，并建立持续排流。因此，越过 P_2 峰顶只是稳定自启动的必要条件，但不是充分条件。

3 实验结果

3.1 管径对启动状态的影响：三种动力学结果

首先，固定 $\Delta s = 0$ mm、$R = 20$ mm、$\Delta h = 25$ mm，改变管径 D，比较不同工况的启动行为。图 4 显示，当 $D = 15$ mm 时，主体液柱前沿沿 P_2 上升支路推进，但在到达峰顶之前停止，随后发生回退，因此属于“未越峰”状态。$D = 8$ 和 12 mm 时，主体前沿均越过 P_2，但越峰之后只继续向下游推进有限距离，随后停止并发生回退，属于“越峰后回退”状态。当 $D = 4$ mm 时，液体前沿越过 P_2 后继续沿出口侧向下游推进，最终形成持续排流，因此判定为“稳定自启动”。

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公文公示

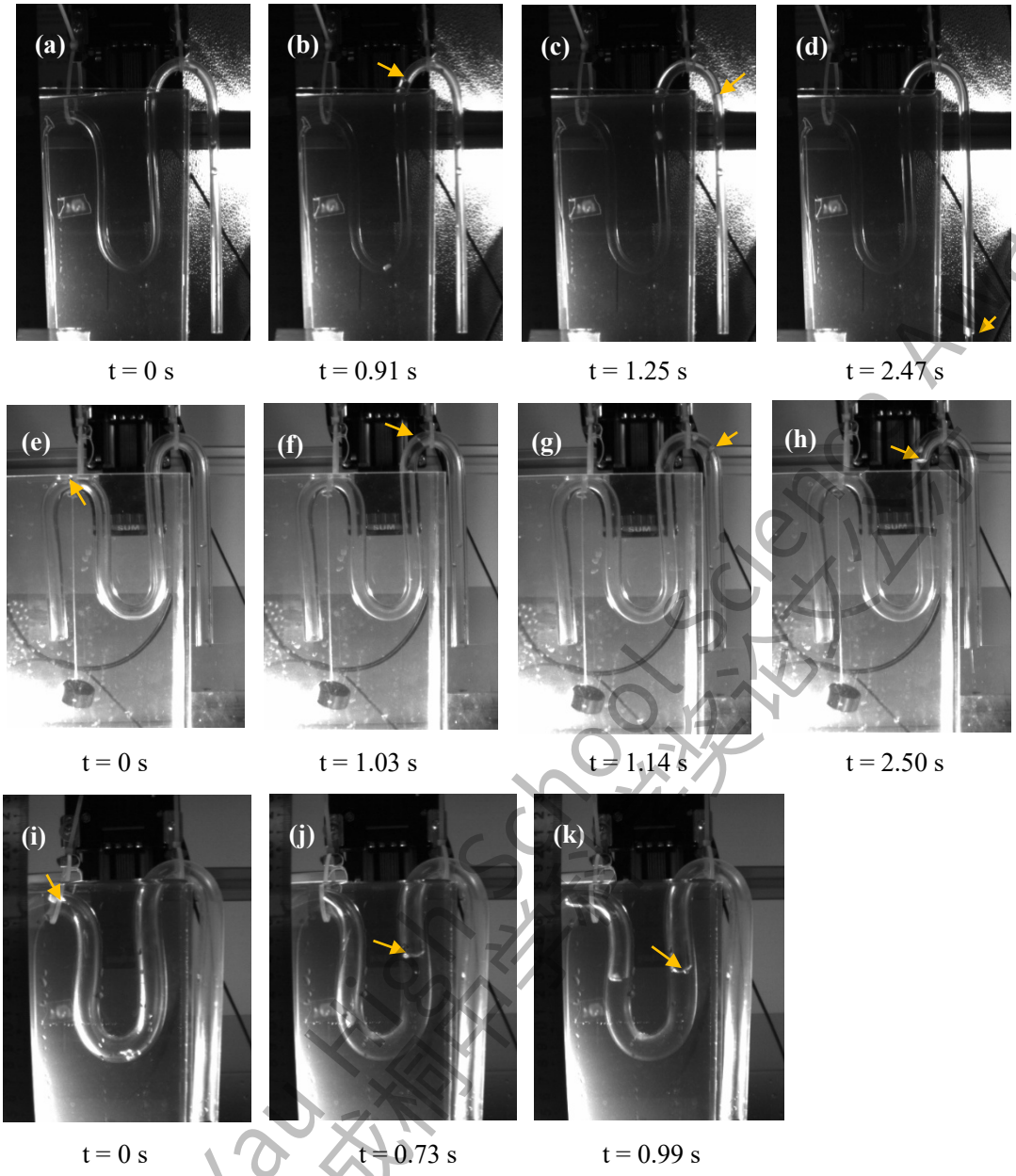


图 4 不同管径下自启动虹吸的三种典型状态: (a-d) D =4 mm：稳定启动；(e-h) D=8 mm：越峰后回退；(i-k) D=15 mm：未越峰。图中箭头指示主体液柱前沿位置，t = 0 定义为弯管下降至预设浸没深度后电机停止的时刻

图 5 进一步显示了不同管径下主体液柱前沿相对于 P_2 峰顶的位置-时间曲线。对于已越峰的 D = 4、8、12 mm 工况，采用越峰时刻 t_{crest} 进行时间对齐；对于未越峰的 D = 15 mm 工况，则采用最大推进位置对应的转折时刻 t_{turn} 对齐。上述时间平移仅用于曲线比较，实验原始计时仍以电机停止运动的时刻为零点。

由图 5 可知，D = 8 和 D = 12 mm 时，ξ(t)均先越过零点，在峰后达到正的最大值后再次减小，表明液柱越峰后发生回退。D = 4 mm 时，前沿越过 P_2 后继续

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学生科学奖评奖公示

向出口方向推进，并最终建立持续排流，对应稳定自启动状态。而当 D = 15 mm 时，ξ(t)始终小于零，说明主体前沿未能到达 P_2 峰顶。这些结果表明，液柱越过 P_2 并不意味着一定能够实现稳定自启动。

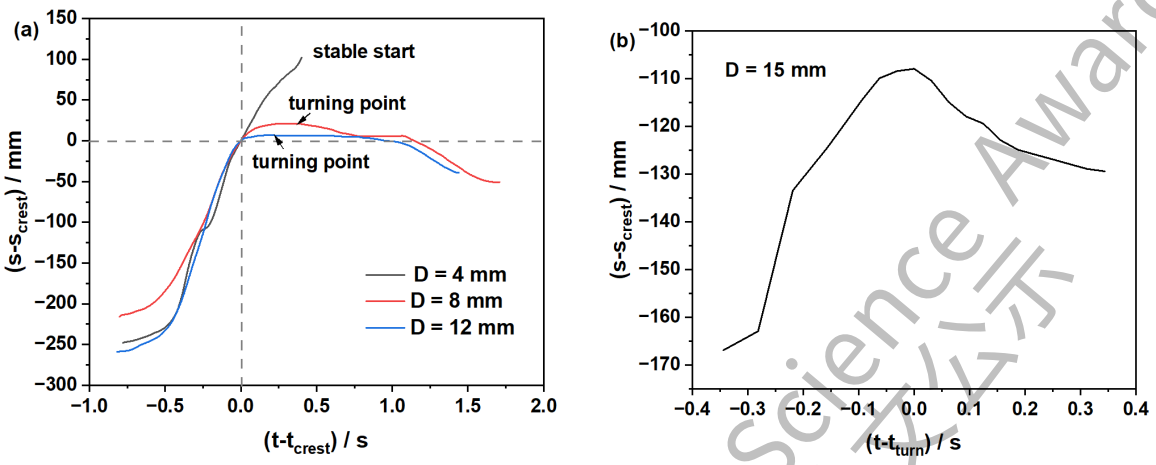
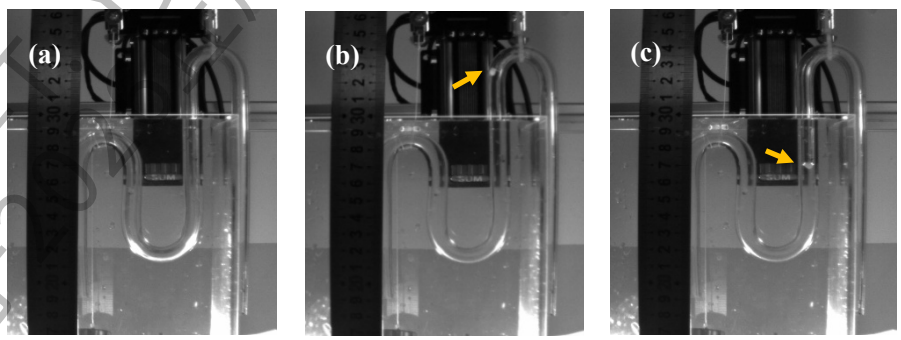


图 5 不同管径下液体前沿相对 P_2 峰顶的位置-时间曲线。左：D = 4、8、12 mm，分别代表稳定自启动、越峰后回退；右：D = 15 mm 未越峰情况（因未越峰，采用转折时刻 t_{turn}）

3.2 初始浸没深度对启动状态的影响：从回退到稳定启动

为进一步观察越峰后回退向稳定启动之间的转变，在固定 D = 8 mm、R = 20 mm、Δh = 75 mm 的条件下改变初始浸没深度 Δs。如图 6 所示，当 Δs = 0 mm 时，主体液柱前沿未能越过 P_2。当 Δs = 7 mm 时，前沿能够越过 P_2，但仅进入峰后区域较短距离后即发生回退。随着 Δs 增大到 24.5 mm，主体液柱越峰后的最大推进距离明显增大，但最终仍发生整体回退。当 Δs = 28 mm 时，主体前沿越峰后持续向出口方向运动，最终形成稳定虹吸。



t = 0 s　　t = 1.23 s (最大推进位置)　　t = 1.78 s (回退)

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026年丘成桐中学科学奖公示

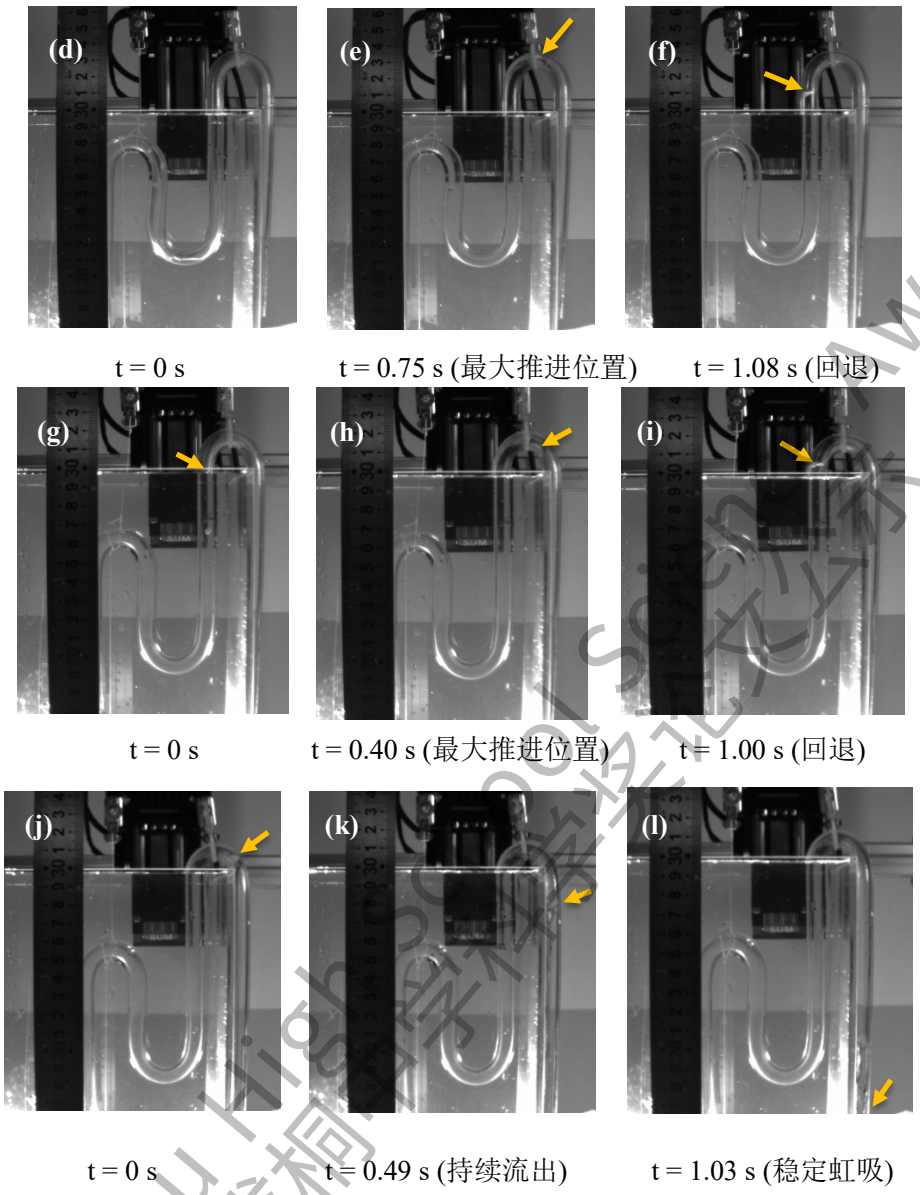


图 6 D = 8 mm，R = 20 mm，Δh = 75 mm 条件下，不同 Δs 时自启动虹吸的三种典型状态: (a-c) Δs = 0 mm：未越峰；(d-f) Δs = 7 mm：越峰后回退；(g-i) Δs = 24.5 mm：越峰后回退；(j-l) Δs = 28 mm：成功启动。图中箭头指示主体液柱前沿位置，t = 0 定义为弯管下降至预设浸没深度后电机停止的时刻。

图 7 给出了相应的位置-时间曲线。当 Δs = 0 mm 时，液柱前沿 ξ(t)始终为负值，说明液柱前沿并未越过 P_2；Δs = 7 和 24.5 mm 时，前沿在越过零点后均达到最大值，随后下降，表明液柱经历了明显的峰后转折；而当 Δs = 28 mm 时，ξ(t)越过零点后继续增大，说明液柱前沿持续向出口推进，对应稳定自启动状态。因此，在保持管道几何不变的情况下，仅改变初始浸没深度 Δs 即可得到未越峰→越峰后回退→稳定自启动的状态转变。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学生数学与科学奖公示

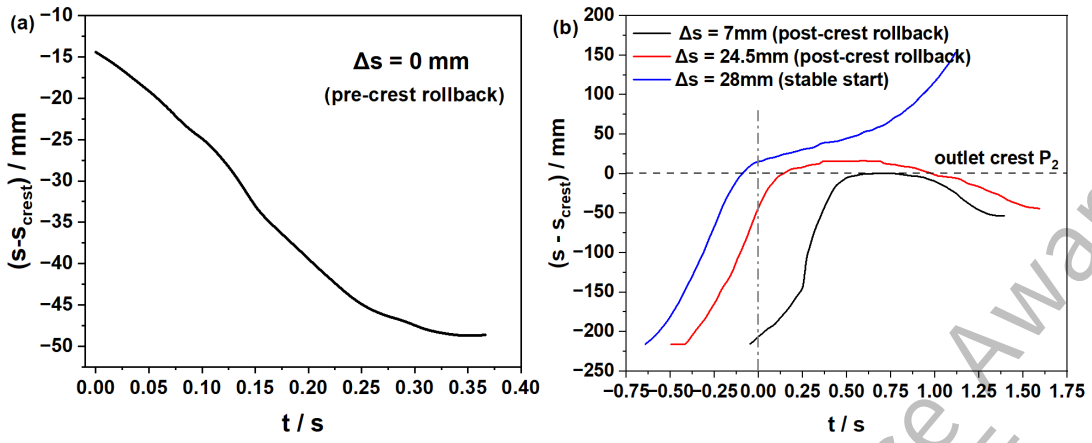
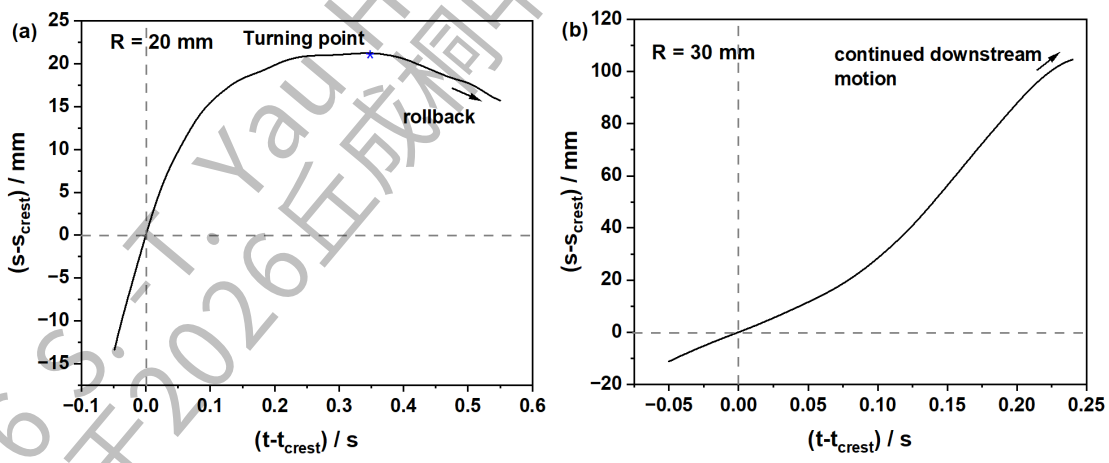


图 7 固定 D = 8 mm，R = 20 mm，Δh = 75 mm，不同初始浸没深度 Δs 下主体液柱前沿相对 P_2 峰顶的位置-时间曲线：(a) Δs = 0 mm；(b) Δs = 7、24.5 和 28 mm。各工况时间均以对应实验中电机停止时刻为零点（t = 0），t < 0 表示电机停止前的运动阶段，t > 0 表示电机停止后的自由演化阶段。

3.3 弯曲半径对峰后运动的影响：峰顶速度不能单独判定启动结果

固定 D = 8 mm、Δh = 25 mm、Δs = 0 mm 的条件下，比较弯曲半径 R 对自启动的影响。如图 8 所示，当 R = 20 mm 时，主体前沿以约 0.26 $m \cdot s^{-1}$的速度越过 P2，但随后减速并回退；而当 R = 30 mm 时，峰顶速度约为 0.21 $m \cdot s^{-1}$，却最终实现稳定自启动。这一对比表明，对于不同的弯曲变径，较大的峰顶瞬时速度并不一定稳定启动，还需考虑峰后运动过程。



2026 C.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公文设计

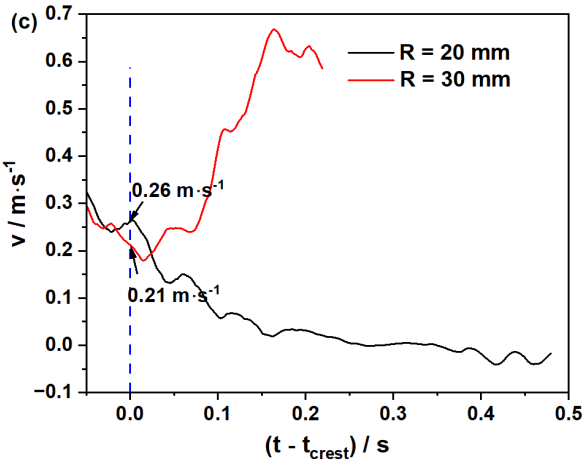


图 8 (a) R = 20 和(b) R = 30 mm 弯管中液体前沿相对 P_2 峰顶的位置-时间曲线; (c)速度演化

3.4 两峰高差变化下的两阶段启动特征

固定 D = 8 mm、R = 20 mm，分别在 Δh = 25、40、75 mm 条件下改变初始浸没深度 Δs，得到图 9 所示的启动状态分布。随着 Δs 增大，各组工况总体表现出启动失败向稳定自启动转变的趋势。其中，Δh = 40 和 75 mm 时，可清楚观察到未越峰、越峰后回退、稳定自启动三种状态。随着 Δh 增大，在本实验测试范围内，实现稳定启动所需的 Δs 总体增加，同时越峰后回退状态对应的测试区间也呈扩大趋势。而对于 Δh = 25 mm 的工况，即使在最低测试浸没深度（Δs = 0 mm）下，主体液柱前沿仍能够越过 P_2 峰顶，但随后发生回退。因此，该组实验未能确定越峰阶段的临界浸没深度，只能根据现有实验结果将稳定启动的转变范围限定在 Δs = 0 与 5 mm 之间。

上述结果表明，两峰高差的变化不仅影响稳定自启动所需的初始浸没深度，还可能改变液柱越峰后的运动状态。在相同管道几何参数和初始浸没深度下，随着 Δh 增大，P_2 相对于上游自由液面的高度增加，液柱越峰及峰后继续推进时所需克服的重力势能障碍可能增大。这为图 9 中稳定启动所需 Δs 总体增加的趋势提供了定性解释。相关峰后动力学机制将在第 4 节进一步分析。

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

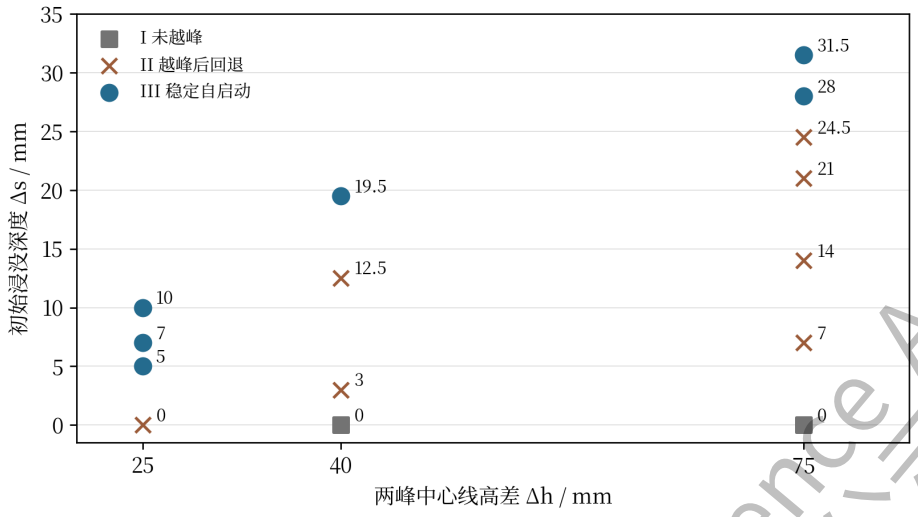


图 9 固定 D = 8 mm，R = 20 mm，不同Δh 和Δs 下的启动状态分布

3.5 复杂界面状态与单前沿描述的适用性

除启动状态外，实验还观察到气液界面形态会随弯管几何参数发生明显变化。在部分较大管径或较大两峰高差的工况中，气液界面可能出现壁膜先行、主体界面明显倾斜，以及不同部分推进不同步等现象（图 10(b)）；而在图 10(a)所示的界面较完整的工况中，主体液柱前沿能够较清楚地由单一位置表示。

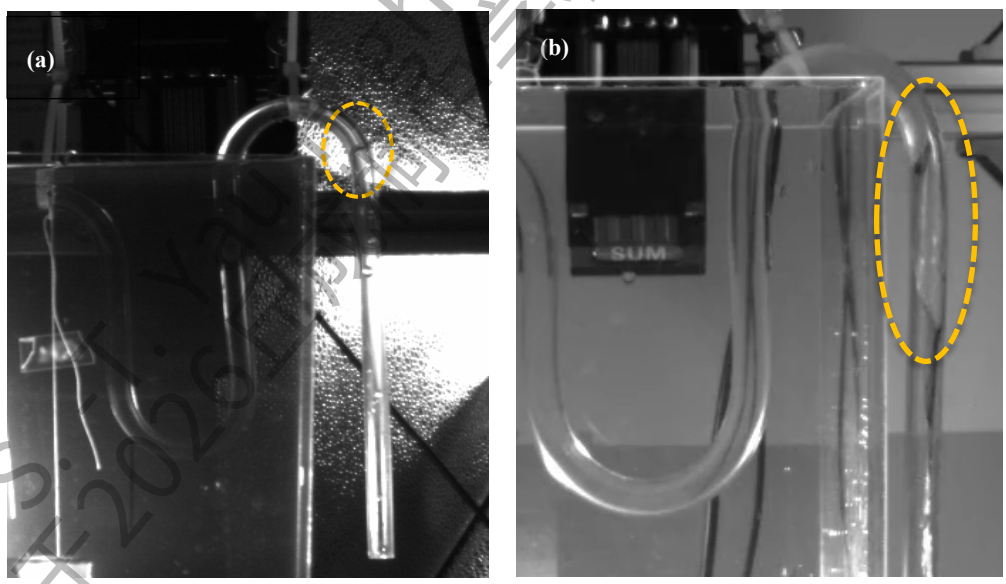


图 10 不同工况下的典型气液界面形态：(a) D = 4 mm 气液界面较完整、主体液柱连续；(b) D = 8 mm 出现壁膜先行、密闭气团等复杂界面状态

2026 Sixth Young Scholar Science Award 仅用于2026年青少年科学奖论文公示

这些现象说明，在壁膜先行、界面明显变形或液柱分离等复杂情况下，单一前沿位置 s(t)难以完整表征实际两相运动。因此，后续一维模型仅适用于主体液柱连续、主气液界面能够明确识别的工况。

4 简化的一维峰后动力学模型

4.1 研究范围和基本假设

为解释液柱越过 P_2 峰顶后仍可能停止并回退的现象，本文建立简化的一维峰后动力学模型，分析液柱越峰后的运动及其持续推进条件。

模型仅考虑弯管停止运动后的自由演化阶段，并作如下假设：入口始终浸没于上游水槽中，短时间内水槽自由液面高度近似不变；管内液体形成连续且近似充满截面的液柱，主气液界面可由单一前沿位置描述；前沿侧气体与大气连通，入口流动采用准稳态近似，忽略水槽侧流体的附加惯性。沿程摩擦及弯管局部损失统一计入速度相关阻力项。

由于弯管下降过程可能影响液柱初始运动状态，选取电机停止后、主体液柱前沿已越过 P_2 并仍向出口推进的时刻 t_a 作为计算起点，此时的实测前沿位置和速度分别记为 ξ_a 和 v_a。

以 P_2 峰顶为原点，沿管道中心线向出口方向定义弧长坐标为 ξ。记入口至 P_2 峰顶的中心线长度为 L_c，则已充液长度和前沿速度分别为 $L(\xi)=L_c+\xi$，$v=\frac{d\xi}{dt}$。

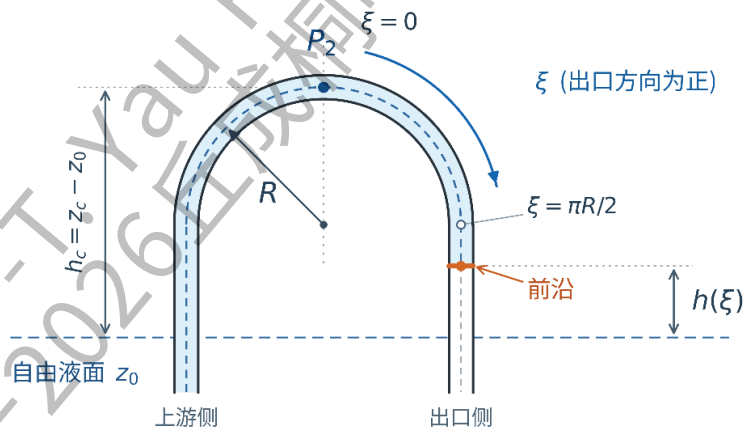


图 11 峰后管道的局部几何结构

设上游自由液面高度为 z_0，P_2 峰顶中心线高度为 z_c，则峰顶相对于自由液面的高度为：

$$h_c = z_c - z_0 = \Delta h - \Delta s - \left(\frac{D}{2} + w\right) \tag{1}$$

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

对于图 11 所示的峰后管道几何，主体前沿相对于上游自由液面的高度可表示为：

$$\mathrm{h}(\xi) = z_f(\xi) - z_0 = \begin{cases} h_c - R\left[1 - \cos\left(\frac{\xi}{R}\right)\right], & 0 \le \xi \le \frac{\pi R}{2} \\ h_c - R - \left(\xi - \frac{\pi R}{2}\right), & \xi > \frac{\pi R}{2} \end{cases} \tag{2}$$

其中，z_f为主体前沿的高度。

4.2 入口条件和动量方程

液柱越峰后的运动受到压力、重力和流动阻力的共同作用。

（1）净静态驱动

设主体前沿气体侧压力为 p_g、液体侧压力为 p_l，定义毛细压差及其等效压头为

$$\Delta p_\sigma = p_g - p_l, \quad h_\sigma = \frac{\Delta p_\sigma}{\rho g}$$

当前沿气体与大气连通时，有$p_l \approx p_{atm} - \Delta p_\sigma$。

在暂不考虑速度相关损失的情况下，水槽自由液面至主体前沿的净静态压差由重力压差和毛细压差共同组成：

$$\Delta p_{\mathrm{eff}} = \rho g\left(z_0 - z_f\right) + \Delta p_\sigma$$

将$h(\xi) = z_f - z_0$，$\Delta p_\sigma = \rho g h_\sigma$代入，并将净静态压差除以液体密度，得到：

$$\mathrm{G}(\xi) = \mathrm{g}[h_\sigma(\xi) - \mathrm{h}(\xi)] \tag{3}$$

其中，$G(\xi)$ 为单位密度对应的净静态驱动项目，G > 0 有利于液柱向出口推进，G < 0 则不利于正向运动。

式（3）说明，即使前沿已越过 P_2 并沿出口侧下降，只要其相对高度$h(\xi)$大于毛细压头$h_\sigma(\xi)$，净静态驱动仍然为负。

（2）液柱动量方程

设管道入口截面的压力和高度分别为 p_i 和 z_i。在准稳态入口近似下，上游自由液面至入口截面的能量关系为：

$$\frac{p_i - p_{atm}}{\rho} = g(z_0 - z_i) - \frac{1 + K_e}{2} v^2 \tag{4}$$

其中 K_e 为入口局部损失系数，常数项 1 对应入口速度水头。

结合前沿压力和沿管道方向的重力作用，可得入口至主体前沿的压力和重力驱动之和：

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

$$\frac{p_i - p_l}{\rho} + g(z_i - z_f) = G(\xi) - \frac{1 + K_e}{2} v^2$$

管内液柱还受到沿程摩擦及弯管局部损失。设管道截面积为 A，已充液长度为$L(\xi) = L_c + \xi$。由于$dL/dt = v$，液柱动量变化率为：

$$\frac{d(\rho A L v)}{dt} = \rho A L \frac{dv}{dt} + \rho A v^2$$

在一维变质量控制体的动量平衡时，入口流入液体携带的动量通量为$\rho A v^2$，恰与液柱质量增长对应的第二项抵消，因此有效惯性项为$\rho A L\, dv/dt$。

综合净静态驱动、液柱惯性和速度相关阻力，得到正向推进阶段的动力学方程：

$$\frac{d\xi}{dt} = v, \qquad L(\xi)\frac{dv}{dt} = G(\xi) - \frac{C(\xi, v)v^2}{2} \tag{5}$$

其中，综合阻力系数为

$$\mathrm{C}(\xi, \mathrm{v}) = 1 + K_e + K_b(\xi, \mathrm{v}) + f_D(\xi, \mathrm{v})\frac{L(\xi)}{D} \tag{6}$$

式中，K_b 为已充液管段内弯管等局部损失系数之和，f_D 为达西摩擦阻力系数。常数项 1 来自入口速度水头。

式（5）表明，液柱加速度由净静态驱动与速度相关阻力的差值决定，并受到当前充液长度的影响。当净静态驱动不足以抵消阻力时，液柱即使保持正向运动，也会逐渐减速。

4.3 峰后不利区的定义及物理解释

根据式(3)，净静态驱动的方向取决于毛细压头与前沿高度的相对大小。当$h(\xi) > h_\sigma(\xi)$时，有 $\mathrm{G}(\xi) < 0$。特别地，若 P_2 峰顶满足$h_c > h_\sigma(0)$，则

$$G(0) = g[h_\sigma(0) - h_c] < 0$$

因此，液柱越过峰顶并不意味值其已经越过净静态驱动不利的区域。

本文将从 P_2 峰顶沿出口方向延伸、满足 $\mathrm{G}(\xi) < 0$的连续区间定义为**峰后不利区**。若净静态驱动在出口前首次由负转正时，记该位置为 ξ_r，则

$$G(\xi_r) = 0, \quad h(\xi_r) = h_\sigma(\xi_r) \tag{7}$$

此时，$0 < \xi < \xi_\mathrm{r}$ 为峰后不利区。

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

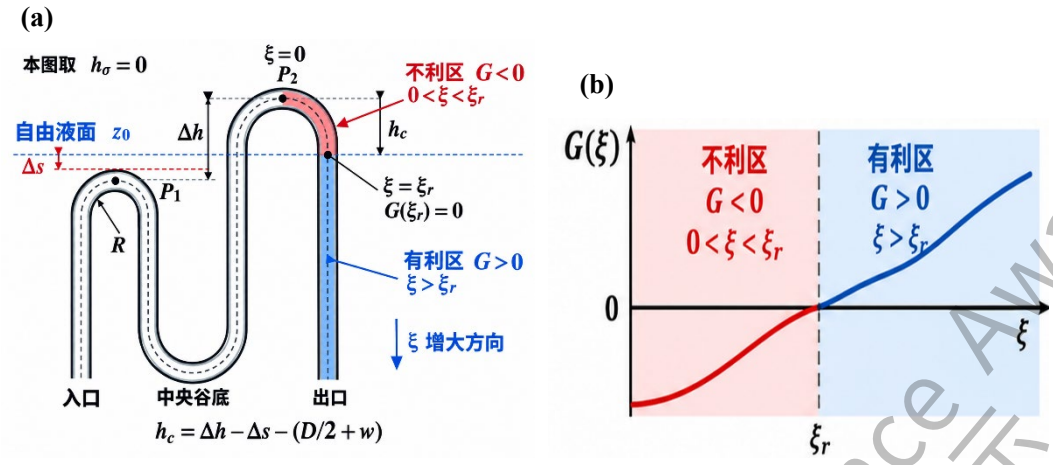


图 12 峰后不利区的几何定义及净静态驱动。(a) 峰后不利区及其终点；(b) $h_\sigma = 0$时的净静态驱动示意图，红色为 G < 0，蓝色为 G > 0。

图 12 采用 $h_\sigma = 0$ 的示意近似，此时$G(\xi) = -gh(\xi)$。主体前沿越过 P_2 后虽然沿出口侧下降，但在其高度仍高于上游自由液面时，净静态驱动仍为负。随着前沿继续下降，$h(\xi)$减小，净静态驱动逐渐增大，并在前沿与上游自由液面等高时变为零。

从重力势能角度看，当主体前沿仍高于上游自由液面时，液体继续进入管道可能使系统总重力势能增加。因此，液柱需要依靠已有动能克服不利驱动及流动损失，才能继续向出口推进。

若进一步将毛细压头近似为常数，并满足$h_c > h_\sigma$，则由式(2)和式(7)可得：

$$\xi_r = \begin{cases} R\arccos\left(1 - \frac{h_c - h_\sigma}{R}\right), & 0 < h_c - h_\sigma \le R \\ \frac{\pi R}{2} + h_c - h_\sigma - R, & h_c - h_\sigma > R \end{cases} \tag{8}$$

4.4 峰后不利区的穿越判据

峰后不利区内满足$G(\xi) < 0$。根据式(5)，当液柱保持正向运动且速度相关阻力非负时，有

$$\frac{dv}{dt} < 0$$

这意味着液柱在不利区内虽然仍可能向出口推进，但速度会持续减小。因此，决定其后续运动结果的关键是**液柱能否在速度降至零之前穿越不利区**。

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

为分析这个问题，定义速度平方$u(\xi) = v^2(\xi)$。对于 v > 0 的正向运动过程，由链式法则可得$\frac{du}{d\xi} = 2\frac{dv}{dt}$。代入式（5），得到：

$$\frac{du}{d\xi} + \frac{C(\xi,\sqrt{u})}{L(\xi)}u = \frac{2G(\xi)}{L(\xi)} \tag{9}$$

初始条件为

$$u(\xi_a) = v_a^2$$

式(9)可以直接判断液柱在不利区内是否发生首次停滞。对于$0 < \xi_a < \xi_r$、$v_a > 0$的初始状态，可区分三种情况：

（1）**不利区内首次停滞**。若液柱在到达ξ_r前首次降至零，则存在ξ_t，满足

$$\xi_a < \xi_t < \xi_r, \qquad u(\xi_t) = 0, \qquad G(\xi_t) < 0 \tag{10a}$$

此时，液柱在不利区内首次发生停滞。在忽略接触线钉扎等静态阻碍的条件下，停滞瞬间的加速度为负，液柱具有开始回退的趋势。

（2）**以有限速度穿越不利区**。若液柱在不利区内始终保持正向运行，且满足

$$u(\xi) > 0 \quad (\xi_a \le \xi \le \xi_r), \qquad u(\xi_r) > 0 \tag{10b}$$

则液柱能够在速度降至零之前穿越峰后不利区。

（3）**临界穿越状态**。两种运动结果之间的数学分界满足

$$u(\xi) > 0 \quad (\xi_a \le \xi < \xi_r), \qquad \lim_{\xi \to \xi_r^-} u(\xi) = 0 \tag{10c}$$

即液柱在接近不利区终点时，正向速度趋于零。

由上述分析可知，液柱能否穿越峰后不利区，取决于初始位置和速度、净静态驱动、充液长度及流动阻力的共同作用。因此，不能仅凭越峰时的瞬时速度判定后续运动结果。

5 模型对峰后运动行为的解释及实验比较

5.1 峰后停止位置的模型解释

为考察峰后不利区与实际运动状态的关系，图 13 比较了 D = 8mm、Δh = 75 mm、R = 20 mm 条件下，Δs =24.5 mm 和 Δs = 28 mm 两种工况的重力压头 H_g 和主体前沿速度 **v** 的变化。

2026 年 T·Yau Hirst School Science Award
仅用于 2026 年度高中学科学奖论文公示

定义重力压头 $H_g = z_0 - z_f = -h(\xi)$。当 $H_g < 0$ 时，主体前沿仍高于上游自由液面，重力对应的静态压差不利于正向推进。在忽略毛细压头的近似下，由式(3)有 $G = gH_g$，因此图 13 中的 $H_g = 0$ 可以作为净静态驱动零点的近似参考位置。

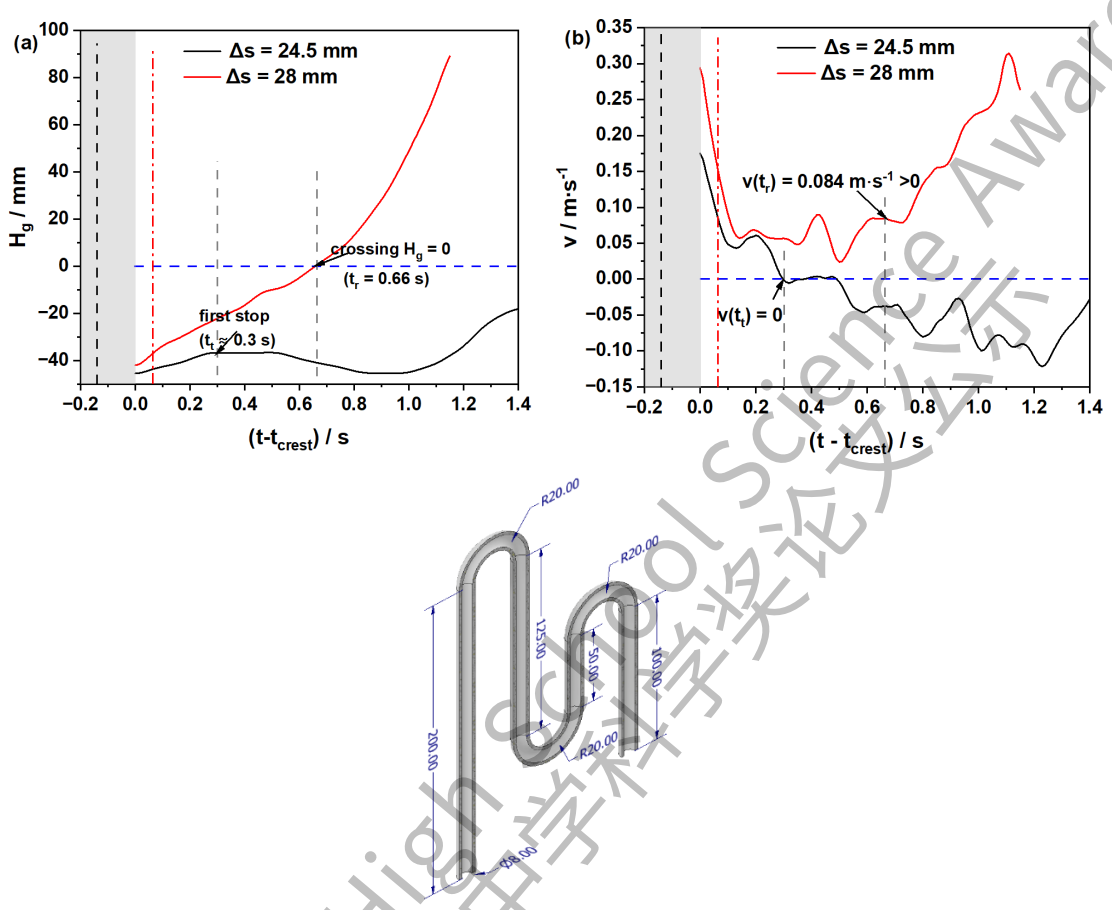


图 13 不同初始浸没深度下峰后重力压头和主体前沿速度的时间演化。上：(a)重力压头 $H_g = z_0 - z_f$；(b)主体前沿速度 v。黑色和红色曲线分别对应 Δs = 24.5 mm 的越峰后回退工况和 Δs = 28 mm 的稳定自启动工况。黑色竖直虚线和红色竖直点划线分别表示两组工况的电机停机时刻；灰色竖直虚线 t_t 表示 Δs = 24.5 mm 工况的首次停滞时刻，t_r 表示 Δs = 28 mm 工况穿过 $H_g = 0$ 参考位置的时刻。蓝色水平虚线分别表示 $H_g = 0$ 和 v = 0。在忽略毛细压头的近似下，才有 $G = gH_g$ 。下方为实验弯管的几何尺寸。

如图 13 所示，当 Δs = 24.5 mm 时，液柱越过 P_2 峰顶后逐渐减速，并在相对于越峰时刻约 0.3 s 时首次停滞，停滞位置约为 $\xi_t = 17$ mm，此时 H_g 仍明显小于零，随后实验中观察到主体液柱整体回退。这一现象与式(10a)所描述的不利区内首次停滞情况相符。

2026 CJT 仅用于2026年成利中学科学奖论文公示 Chu Li High school Science Award

相比之下，当 Δs = 28 mm 时，液柱越峰后同样经历减速，但在到达 $H_g = 0$ 参考位置时仍具有约 0.08 m·s^{-1} 的正向速度，随后继续向出口推进，并最终形成持续排流。该过程与式(10b)所描述的有限速度穿越峰后不利区的机制一致。

两组实验说明，液柱越峰顶后即使已沿出口侧下降，仍可能在不利静态压头作用下减速并停滞；而保持有限正向速度通过该区域，则有利于后续推进。

5.2 为什么“峰顶速度更大”仍可能启动失败

第 3.3 节的实验表明，R =20 mm 工况的峰顶速度约为 0.26 m·s^{-1}，却在越峰后回退；而 R =30 mm 工况的峰顶速度约为 0.21 m·s-1，却能稳定自启动。根据式(5)，液柱越峰后的运动不仅与初始速度有关，还取决于净静态驱动、充液长度及流动阻力。弯曲半径的变化不仅影响峰后几何关系和充液长度，也可能改变局部流动损失。因此，较大的峰顶速度不一定对应更有利的后续运动条件。

图 14 放大展示了 R = 30mm 工况在 P_2 峰顶附近的速度变化。采用 61 帧平滑窗口得到的结果显示，前沿速度由峰顶附近的约 0.21 m·s^{-1} 降至局部最小值约 0.18 m·s^{-1}，随后重新增大。局部最小值出现在 $t-t_{crest} \approx 0.015$ s 附近，表明稳定自启动过程也可能经历短暂减速。为评估平滑窗口选择对速度计算结果的影响，图 14 中的灰色阴影表示采用 41、61 和 81 帧平滑窗口所得速度的逐时刻变化范围。三种窗口下的速度曲线均呈现越峰后先减速、再加速的总体趋势，表明这一变化趋势并非由数据处理造成的。

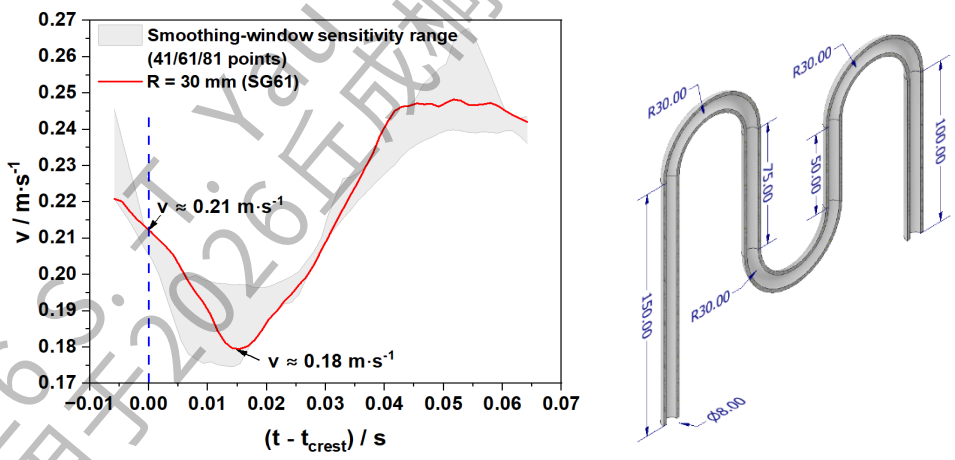


图 14 R = 30 mm 稳定自启动工况的弯管几何及越峰初期前沿速度演化。左：主体液柱前沿速度随时间的变化。红线为采用 61 帧 Savitzky–Golay 平滑窗口得到的速度曲线，灰色阴影表示 41、61 和 81 帧窗口所得速度的逐时刻变化范围。右：R = 30 mm 弯管的几何结构及尺寸。

2026 C. T. You | IJS Schol Science Award
仅用于2026年成绩中学学术公示

上述现象与式(5)所揭示的动力学关系相符：当净静态驱动小于速度相关阻力项时，前沿减速；当净静态驱动大于阻力项时，前沿加速。因此，**稳定自启动并不要求液柱越峰后立即加速**，而取决于其后续能否持续推进并形成稳定排流。

5.3 模型适用范围和不确定性

本文的一维模型适用于弯管停止运动后、主体液柱连续且主气液界面可由单一前沿描述的正向推进阶段。当出现明显壁膜先行、封闭气团、液柱断裂或强界面变形时，模型假设不再严格成立，不能完整描述实际两相流动。

此外，模型初始位置和速度受到界面识别及平滑处理误差的影响，动态毛细压头和流动损失参数也尚未独立测定。因此，当前模型主要用于解释峰后减速、首次停滞和有限速度穿越机制，并与实验现象进行定性比较，尚不能定量预测稳定启动的临界边界、临界速度或具体停滞位置。

6 结论

本文通过高速可视化实验研究了 M 型弯管的自启动行为，分析了初始浸没深度及管道几何参数的影响，并建立简化的一维峰后动力学模型。主要结论如下：

（1）M 型弯管的自启动存在未越峰、越峰后回退和稳定自启动三种状态。自启动过程可分为越峰阶段和峰后启动阶段，液柱越过出口侧峰顶 P_2 是稳定自启动的必要条件，但并非充分条件。

（2）初始浸没深度和管道几何参数显著影响启动结果。在本实验范围内，随着两峰高差增大，实现稳定自启动所需的初始浸没深度总体增加，越峰后回退状态对应的测试区间也呈扩大趋势。

（3）峰顶瞬时速度不能单独决定启动结果。实验中，R = 20 mm 工况的峰顶速度高于 R = 30 mm 工况，但前者越峰后回退，后者稳定自启动，说明峰后运动演化同样重要。

（4）一维峰后动力学模型表明，液柱越峰后仍可能处于净静态驱动不利区。模型建立了首次停滞与有限速度穿越的判据，实验现象与该机制定性一致。液柱能否在首次停滞前穿越不利区，是影响峰后启动的重要因素，但穿越不利区并不保证稳定自启动。受动态毛细压头及流动损失参数不确定性的限制，模型目前主要用于定性解释峰后运动行为。

2026 SJTU High School Science Award
仅用于2026年成利中学科学奖论文公示

参考文献

[1] 戴啸扬, 张莹秋, 郑俊等. 细管径虹吸流速计算参数分析与修正计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(2): 62-69.

[2] CHEN Y, FENG J, ZHU D Z, et al. Air Pocket Removal during Siphon Priming[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 149(7): 04023017.

[3] 陈奇, 刘霞, 黄可灿等. 泵站虹吸式出水流道驼峰排气过程气液两相流研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(10): 163-171.

[4] 李亚婷, 王忠东, 董艳鹏等. 微通道中毛细流动及其工程应用的研究进展[J]. 化工学报, 2024, 75(1): 159-170.

[5] CAI J, CHEN Y, LIU Y, et al. Capillary imbibition and flow of wetting liquid in irregular capillaries: A 100-year review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2022, 304: 102654.

[6] KOLLIOPOULOS P, KUMAR S. Capillary flow of liquids in open microchannels: overview and recent advances[J]. NPJ Microgravity, 2021, 7: 51.

[7] DUAN C, YANG X, JIANG S, et al. Early stage of externally driven filling of viscous fluids within a microfluidic pore-doublet network[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(2): 022001.

[8] VIRIDI S, NOVITRIAN, MASTERIKA F, et al. Segmented self-siphon: Experiments and simulations[C]. AIP Conference Proceedings. 2012, 1450: 190–195.

[9] NURHAYATI, HIDAYAT W, NOVITRIAN, et al. Simulation of fluid flow in a U-shape self-siphon and its working space[C]. AIP Conference Proceedings. 2014, 1589: 95-98.

[10] International Young Physicists' Tournament. Problems for the 39th IYPT 2026: Problem 1 "Invent Yourself"[EB/OL], 2025. https://www.iypt.org/wpcontent/uploads/2025/07/Problems-for-IYPT-2026-3.pdf.

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

致谢与研究过程说明

1. 研究背景与研究问题的形成

本研究源自 IYPT 2026 第 1 题“Invent yourself”（自启动虹吸）。最初的研究主要考察管径、弯曲半径、两峰高差和初始浸没深度等参数对自启动结果的影响。在实验过程中，发现自启动过程并不能简单划分为“成功”和“失败”两种情况，而是可以重复观察到三种不同的动力学结果：未越过出口侧关键峰、越峰后回退以及稳定自启动。

基于这一实验现象，本研究进一步将问题集中到“液体越峰后为什么仍可能停止并回退”。为此，通过不同管径、初始浸没深度和弯曲半径条件下的对比实验，结合高速视频获得的液体前沿位置与速度数据，对越峰后的动力学过程进行分析，并在主体液柱连续、主气液界面可以近似为单一前沿的条件下建立最低阶一维动力学模型，用于讨论峰后惯性、静态驱动和流动耗散之间的竞争关系。

2. 指导关系、研究分工和外部协助

指导教师为本校社团及物理学术竞赛指导教师，无偿指导。感谢指导教师张海英老师在选题讨论、实验方案与安全、数据分析、理论解释以及论文结构和文字修改方面提供的指导。

参赛学生负责选题与问题提出、实验方案设计、装置搭建、实验实施、高速视频和原始数据获取、Tracker 轨迹提取、数据整理与计算、理论分析、图表制作及论文初稿与修订。除上述指导外，无其他人员或机构提供实验、数据、设备或分析协助。

3. 研究困难及解决过程

主要困难是区分主体液柱运动与局部壁膜铺展，并解释越峰后回退。部分工况出现界面变形、壁膜先行、气腔封闭等现象，单一前沿位置难以完整表征流动。研究中通过逐帧复核视频，区分主体前沿与局部液膜，根据主体液柱运动判定启动状态；数据处理中比较 41、61、81 点平滑窗口的结果，评估速度变化对处理方法的敏感性。

理论分析限定于主体液柱连续、主界面可近似为单一前沿的阶段，讨论惯性、静态驱动与耗散的竞争。对于壁膜先行、强界面变形或液柱分离等复杂状态，结

2026 Shi Yan High School Science Award
仅用于2026年成都中学科学奖论文公示

合影像讨论现象及模型局限。由于部分损失参数、动态接触角和气相压力尚未独立测量，当前模型仅用于解释机制，无法用于普适的定量预测。

4. AI 工具使用情况

本研究使用 OpenAI ChatGPT（GPT-5.6）作为辅助工具，指导教师在使用前已知情并同意。自 2026 年 9 月 6 日起，在论文整理与修订中根据实际需要开展多轮交互，具体时间及频率见随附对话记录。

AI 主要用于论文结构与语言修改、公开参考文献信息核查辅助、理论模型适用范围检查、以及 Tracker 轨迹数据的 Savitzky–Golay 平滑处理和示意图绘图脚本编写。在理论分析过程中，AI 建议区分主体前沿与壁膜运动，并在变长度液柱的动量分析中考虑质量变化及入口动量通量的影响。此外，AI 还辅助比较不同平滑窗口的处理结果，并对相关段落和公式表述提出修改建议。

AI 未参与实验实施、原始数据采集、分析实验视频、提取液柱前沿的轨迹以及最终状态判定。所有 AI 辅助内容均由参赛学生结合原始实验资料、数据及物理推导进行核验，并自主决定是否采用。未经核验的内容不作为定稿依据。AI 相关聊天记录和辅助材料另行提交，供组委会核查。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示