

参赛学生姓名：张文嘉、刘广羽

中学：北京师范大学附属实验中学

省份：北京

国家/地区：中国

指导老师姓名：冯晓琴

指导老师单位：北京师范大学附属实验中学

论文题目：利用流体力学和微分方程设计的防溅尿蹲便器

利用流体力学和微分方程设计的防溅尿蹲便器

Designing an Anti-Splash Squat Toilet via Fluid Mechanics and Differential Equations

张文嘉、刘广羽 北京师范大学附属实验中学

摘要

数亿人日常使用的蹲便器普遍存在尿液飞溅问题，造成厕所地面及使用者衣裤污染，引发细菌滋生、厕所异味等卫生问题。飞溅出的尿液还增加了保洁负担和清洁用水量，造成资金和水资源浪费。基于“液滴撞击角度越小，飞溅量越少”的流体力学理论，本研究通过微分方程设计了一种新型蹲便器。

为了探究这种新型蹲便器是否能减少尿液飞溅，本研究采用三种方法：绘制蹲便器尿液撞击角度分布图、Fluent 流场仿真和实体实验。首先，利用 MATLAB 绘制蹲便器的尿液撞击角度云图，结果显示新型蹲便器尿液撞击角度远小于常规蹲便器。其次，通过 Fluent 进行排尿过程流场仿真，初步定量表明新型蹲便器尿液飞溅比例远低于常规设计。最后开展实体实验，模拟蹲坑排尿过程。定性观测中，本研究利用荧光方法捕捉尿液飞溅视频，俯拍红色模拟尿液于地面所铺白纸上的飞溅落点图案，结果显示新型蹲便器尿液飞溅比例显著少于常规蹲便器。定量测量中，本研究通过测量模拟排尿后地面所铺白纸吸收飞溅尿液增加的质量，发现新型蹲便器溅出尿液的质量比常规蹲便器减少了 70% 以上。

本研究首次尝试缓解蹲便器的溅尿问题，并验证了利用减小液滴撞击角度的流体力学思想设计的新型蹲便器能有效抑制溅尿。该新型蹲便器投入使用后，不仅有助于营造更为清洁、卫生的厕所环境，降低疾病传播风险，还能减轻保洁费用和人员工作负担，显著减少清洁用水量，支持环保与可持续发展。

关键词：蹲便器、飞溅、撞击角度、计算流体力学、公共卫生、可持续发展

Abstract

Millions of people use squat toilets daily, yet urine splashing remains a common problem, soiling floors and clothing, promoting bacterial growth, and causing unpleasant odors. Beyond hygiene, splashing increases cleaning workload and water usage, raising costs and wasting resources. Based on the fluid mechanics principle that smaller droplet impact angles produce less splashing, this study explores a novel squat toilet design developed using differential equations.

To investigate whether the new squat toilet can reduce urine splashing, three methods were employed: mapping urine impact angles, Fluent flow field simulations, and physical experiments. MATLAB was used to generate cloud maps of urine impact angles, showing that the novel design had much smaller angles than conventional ones. Fluent simulations of the urination process further indicated a significantly lower splashing ratio. Physical experiments simulated urination into squat toilets. In qualitative experiments, side-view images of fluorescent urine splashing under UV light were captured, followed by top-down images of red ink splashing on white paper to analyze splash patterns. The results showed that the novel squat toilet produced significantly less urine splashing than common ones. In quantitative measurements, by measuring the increase in mass of white paper placed on the floor to absorb splashed simulated urine, it was found that the amount of urine splashed from the novel squat toilet was reduced by over 70% compared with conventional designs.

This study is the first to address urine splashing in squat toilets and shows that a design based on reducing droplet impact angles can effectively suppress splashing. Once implemented, the new toilet can create a cleaner, more hygienic environment, lower disease risk, reduce cleaning costs and labor, cut water usage, and support environmental sustainability.

Keywords: squat toilet, splashing, impact angle, computational fluid dynamics, public health, sustainable development

目录

摘要	II
Abstract	III
目录	III
第一章 绪论	1
1.1 蹲便器溅尿问题	1
1.2 飞溅机制	2
1.3 减小溅水研究现状	5
1.3.1 添加软涂层	5
1.3.2 降低气压	5
1.3.3 添加微结构	6
1.3.4 增加润湿性	6
1.3.5 改变撞击点切向速度	7
1.3.6 减小撞击角	7
1.4 研究猜想	8
1.5 研究意义及创新点	8
1.5.1 研究意义	8
1.5.2 创新点	9
1.6 整体思路设计图	11
第二章 防溅蹲便器形状设计	13
2.1 设计思路	13
2.2 理论思路	13
2.2.1 定量分析飞溅阈值	13
2.2.2 本研究设计的理论模型	14
2.2.3 曲线设计	16
2.3 三维设计	19
2.4 三维建模	21
2.4.1 软件介绍	21
2.4.2 建模思路	21
2.5 建模效果	22
第三章 撞击角度云图	24
3.1 总体设计	24
3.2 数学建模过程	24
3.2.1 设计思路	24
3.2.2 网格划分	24
3.2.3 3d 扫描	25
3.3 MATLAB 运算逻辑	26
3.4 结果分析	27
第四章 流体仿真计算	31

4.1 数值仿真目的	31
4.2 模型建造与流域设置	31
4.3 划分网格	33
4.3.1 离散化	33
4.3.2 网格划分方法及质量	33
4.3.3 网格无关性验证	35
4.4 数值模拟仿真构成	35
4.4.1 控制方程	35
4.4.2 湍流设置	38
4.4.3 多相流模型	38
4.4.4 材料属性	39
4.4.5 求解器设置	39
4.4.6 初始化	39
4.4.7 时间步长与迭代次数	40
4.5 结果分析	40
第五章 实体实验验证	42
5.1 实验思路	42
5.2 实体设备搭建	43
5.2.1 3 D 打印和喷漆处理	43
5.2.2 水泵设置和喷头选择	43
5.2.3 整体装置构建	44
5.3 荧光剂	46
5.4 地面飞溅图案	48
5.5 定量测量溅尿质量	51
5.6 统计分析数据	53
5.6.1 正态分布检验	53
5.6.2 方差齐性检验	55
5.6.3 Welch t 检验和 Cohen's d 效应量	56
5.6.4 多重检验	57
5.6.5 Mann-Whitney U 独立样本检验和秩二列相关效应量	57
5.6.6 统计分析总结	58
第六章 总结与展望	60
附录	61
参考文献	73
致谢	79

第一章 绪论

1.1 蹲便器溅尿问题

厕所不仅是解决基本生理需求的重要设施，也是社会文明水平的体现。最常用的厕所类型有蹲便器和坐便器^[1]（见图 1）。其中蹲便器以低成本、便捷性和无直接皮肤接触在全球各地都拥有巨大市场。据调查，全世界公共厕所内蹲便器数量占有所有厕所类型的 49%，亚洲公共厕所内蹲便器占到 74%^[2]。以中国为例，蹲便器在公共场所，比如学校、医院、旅游景点、车站、办公场所都占据主导地位，91%的中国人表示在公共场所相较于坐便器，更喜欢蹲便器^[3]。



图 1 (a): 常见蹲便器样式; (b): 常见坐便器样式^[4]

然而，蹲便器由于设计不合理，普遍会产生较为严重的溅尿问题。据统计，2025 年中国非住宅区域的公共厕所大约安装有 334.56 万座蹲便器，每年有超过 14.08 亿升的尿液会飞溅到蹲便器以外（见附录一）。

尿液的飞溅有诸多危害。首先，尿液为细菌提供了肥沃的滋生地。1969 年，日本科学家发现克雷伯菌等 14 种细菌，在健康个体尿液中培养 12 小时后 11 种细菌显著增长^[5]。若如厕者为感染者，那么多种分枝杆菌可经尿液排出并在其中长期存活，感染免疫低下者^[6]。研究表明，蹲厕边缘及周边地面因污渍积聚、氨含量高和多孔材质易滋生细菌^[7]。事实上飞溅的液滴可以扩散得很远，覆盖地板的大面积区域，通常还会覆盖用户本身。

其次，尿液造成嗅觉和心理不适，因为溅出的尿液会导致公共卫生间常见的恶臭。研究发现，氨（刺鼻性气味）、二甲基二硫醚（腐烂蔬菜味道）、烯丙基甲基硫醚（大蒜或洋葱气味）、4-庚酮（辛辣或霉味）是尿液主要异味来源，在尿液顶空的浓度是其最低可嗅浓度的几百倍^[8]。同时高乐氏公司 2013 年

的调查显示，如果公共厕所有尿味，39%的人选择立即离开餐厅、健身房、学校或其他营业场所。55%消费者会根据厕所清洁度对企业给予更负面的评价。公共厕所的不卫生将会导致商场流失顾客，负面评价增多，影响收益^[9]。

第三，溅尿问题会促使场所雇佣更多保洁人员维持卫生，使用更多清洁剂。使得开销更大。成都三环路 55 座 24 小时公厕一年保洁费用高达约 415 万元^[10]；上海市浦东新区 9 座环卫公厕一年保洁费用达约 260 万元^[11]。同时，溅尿问题还增加了保洁的工作量，使工作环境变得更加恶劣。保洁不得不面对臭味难闻的尿液，幸福感下降。特别夏天在无空调的厕所，保洁员会面对高温压力。

第四，溅尿问题造成在清洁中严重的水资源浪费。水资源在世界各地都非常宝贵。WRI 表示全球有分布在 25 个国家中的 1/4 人口，几乎常年用尽其可用水资源^[12]。而中国人均占有水量仅为世界平均水平的四分之一^[13]，位列世界倒数第二^[14]。全国 60%城市存在不同程度的缺水，超过 100 个城市严重缺水^[15]。但公共厕所的溅尿问题使更多水资源被浪费在清洁中。全国每年用于清洗地面的水资源大约为 5.71 亿立方米，相当于整整 40 个西湖的蓄水量（见附录二）。

1.2 飞溅机制

1.2.1 液滴撞击干燥表面

液滴以特定速度撞击固体表面，结果可分为以下六种：沉积、瞬时飞溅、冠状飞溅、边缘成珠沉积、部分反弹和完全反弹^[16]。不同状态取决于液体特性（表面张力系数、粘度、密度、直径、矢量撞击速度），固体特性（粗糙度和接触角），以及环境特性（气压，温度、气体粘度）。飞溅指的是液滴撞击平面后分解成次级液滴的现象^[17]。发生在干燥表面的飞溅可以分为发生在光滑表面的冠状飞溅和发生在粗糙表面的瞬时飞溅（见图 2）。

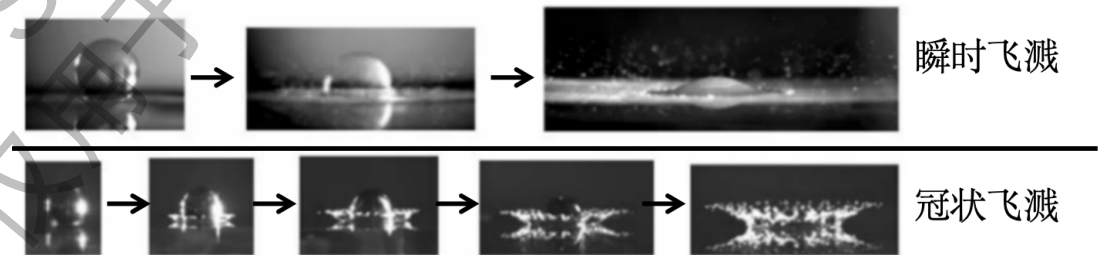


图 2 液滴冲击干燥平面的冠状飞溅和瞬时飞溅^[16]

对于冠状飞溅来说，飞溅的过程中主要分为液滴下落、液膜扩展、液膜边缘抬升和二次液滴产生（见图 3）。

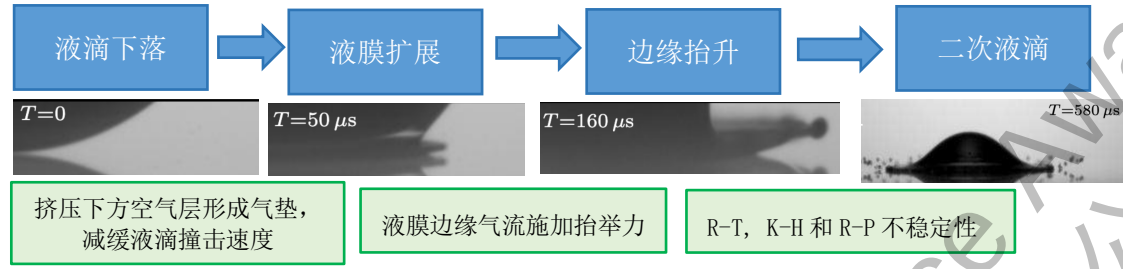


图 3 液滴撞击平面飞溅流程图^[18]

液滴下落时下方气体高速逃逸，来不及逃逸的气体会被液膜包裹形成中心微气泡^[18]，小气泡导致界面局部曲率变大，产生高拉普拉斯压力区^[19]。这导致液滴变形，初次的接触从边缘形成薄环开始。

下落的动能在液滴撞击平面后转换成径向动能，并被表面张力和粘性耗散所消耗，使薄环上方的液体随薄环扩散的同时快速减速。由于必须要保持体积通量总量不变，法向速度引导流体颗粒离开壁面向上堆积，形成具有向上的法向速度的堆积边缘环(rim)。抬升速度如果过小，那么抬起的液膜可能由于毛细收缩作用再次下落^[19]。如果大于固液交界处的扩展速度，那么边缘环脱离固体形成喷射。

由于气体夹带现象，空气被卷到液膜边缘下方，导致液膜边缘下方出现空腔^[20]。空腔气流使液膜不稳定，导致液膜继续抬升并破碎（见图 4）。

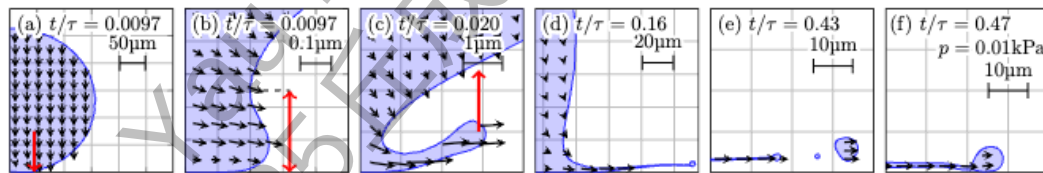


图 4 乙醇液滴冠状飞溅仿真图像（箭头代表速度场）^[21]

因此可知，形成飞溅的关键在于液滴铺展中具有收缩行为(dewet)，以及液膜边缘向上的垂直速度足够大。液膜抬升的作用力来源于下方空气层的润滑力(lubrication force)和液膜上方局部负压的吸力(suction force)^[18]。

而最终的飞溅和液滴的不稳定性密切相关，文献使用 R-T, K-H 和 R-P 不稳定性来解释^[22]。当高密度的液滴压在低密度的空气上，并施加向下的加速度时，便会触发 R-T 不稳定性，使得液膜边缘出现一圈指状突起。由于液膜扩展速度快，与下方空气行层速度差，因此触发 K-H 不稳定性，放大指状突起。而 R-P 可

以解释指状突起破裂的现象。在表面张力的作用下拉伸的指状突起会分裂成小水滴。最终形成二次液滴。

只有粗糙度低于阈值时，才会发生冠状飞溅，否则将发生瞬时飞溅。阈值粗糙度随液体粘度增加而降低^[23]。瞬时飞溅液膜扩张前，固液接触线处的粗糙结构对液膜产生强烈扰动，液滴的惯性力大于粗糙凹坑的毛细管力时，会将自己推进凹坑中。此时即将扩散的液膜破裂，固液交界处的液滴在表面张力的作用下产生具有一定速度的次级液滴^[24]。虽然粗糙度对飞溅有贡献，但是与冠状飞溅类似，液滴下方的中心气膜以及液滴边缘的气体流动仍然是次级液滴抬升，进而产生飞溅现象的重要因素。实验显示，当气压低于阈值时，瞬间飞溅会被消除^[23]。

1.2.2 液滴撞击液体表面

液滴撞击深液池时，液滴推开撞击点下方的液体，最初在下方液体表面形成近乎半球形的凹坑(crater)^[16]。对于粘稠的液池，凹坑会多次碰撞收缩，并在液层上形成向外的毛细波。对于粘性较小的液体，两种液体会明显混合^[25]。被挤出的液体铺展在凹坑周围形成冠状。随后，表面张力为了拉回液面，施加毛细管力使得腔体沿径向向内塌陷，液体在中心汇聚时形成沃辛顿射流（见图 5）。

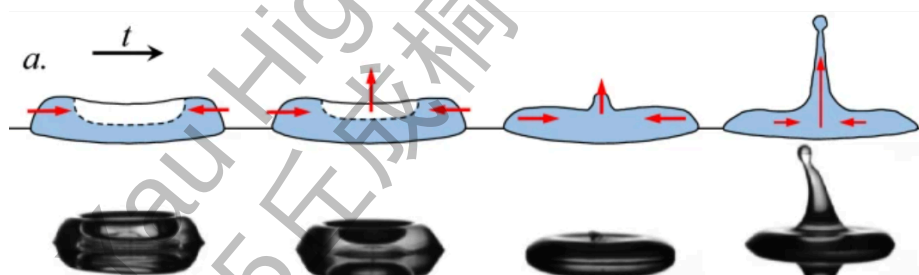


图 5 沃辛顿射流中央结构变化^[26]

液体撞击薄液层基本忽略固体的粗糙度和润湿性的影响。液膜铺展时间比撞击干燥表面的更短^[25]。垂直冲击力的峰值比相同情况下撞击干燥表面出现得更晚，不过峰值更高^[27]。其余飞溅机制与冠状飞溅基本相同，冠状液膜顶部的细小喷射流由于毛细管力破碎成小液滴（见图 6）。

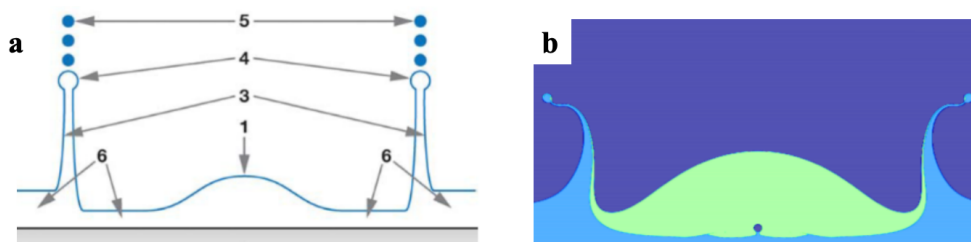


图 6 (a): 飞溅机制示意图^[16]; (b): 液滴撞击薄液面的快照^[28]

由于蹲便器表面在初始状态多为干燥和极薄液膜，尿液基本上首先接触蹲便器表面，蹲便器材质等参数对尿液飞溅状态影响较大。因此本研究主要考虑 1.2.1 中采用液滴撞击干燥表面的理论模型，这样的分析更加符合实际情况。

1.3 减小溅水研究现状

液滴撞击固液表面是喷墨打印、形成气溶胶、喷涂和农药喷洒等技术的关键步骤^[29]。目前国内外有针对减少飞溅的研究，但将其运用于厕所上的文献较少，且多用于坐式厕所上，对蹲便器溅尿问题的研究属于空白。为了减少溅水，可以从撞击液滴和平面两方面入手。由于人体尿液难以控制成分和撞击速度等等，因此我们从改变平面性质入手，一般有以下几个方法。

1.3.1 添加软涂层

将表面改为柔软硅胶材质后，软基材在冲击的最初几微秒内变形引起能量损失，从而减小飞溅。研究显示，杨氏模量 ≤ 100 kPa 的固体可以减少飞溅，液滴撞击最柔软的基材上比撞击刚性基材产生飞溅所需的动能高出 70% 以上^[30]。但是软基材如固态硅胶在次氯酸钠中有明显降解趋势^[31]，易受漂白消毒清洁剂的腐蚀，因此不宜在厕所中使用。

1.3.2 降低气压

降低飞溅环境的气压后，液体降落压缩的空气会由于密度变小而迅速排出，减小对液膜边缘的支撑，从而抑制甚至消除冠状飞溅^[32]。气压越小，相同平面倾斜角度下飞溅阈值越高（见图 7）。但是在厕所中营造真空环境难度极高，因此舍弃此方案。

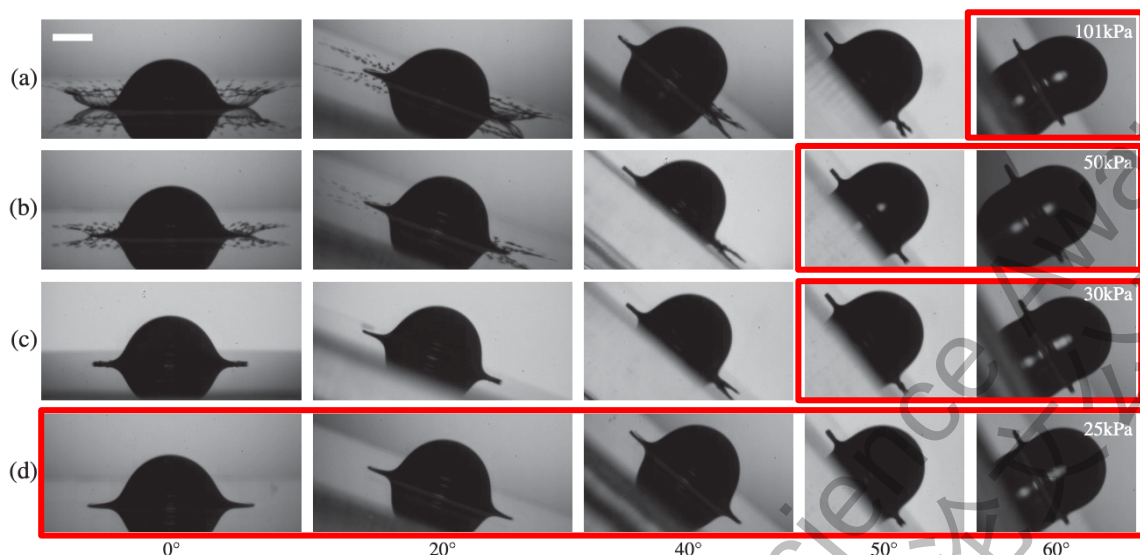


图 7 气压和入射角对飞溅行为的影响（红框为无飞溅情况）^[29]

1.3.3 添加微结构

在撞击表面添加微结构（见图 8）可以减小飞溅。其实增加粗糙度会因湿润区变小而增加瞬时飞溅^[24]，但研究发现微柱间距越大、空气逃逸路径方向越多，越抑制飞溅^[33]。当微结构柱子变高时，飞溅量先增加再减少。甚至当垂直柱高度为 60 微米，柱之间的横向间距为 125 微米时，飞溅可以被完全抑制^[34]。但是加工微米级别微结构成本高昂，研究指出使用激光微加工等技术需要投入高额设备支出和复杂制造流程^[35]，对于生产厕所这种表面积较大的家用卫具成本上不可行。

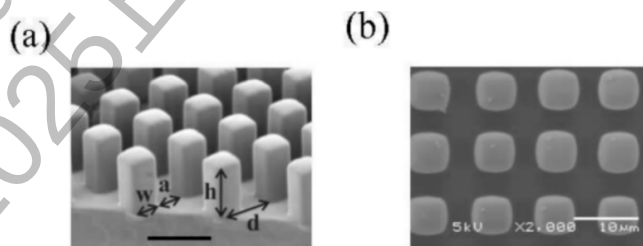


图 8 （a）：微结构表面示意图；（b）：微结构俯视图^[33]

1.3.4 增加润湿性

改变平面的润湿性可以减小飞溅。前进接触角指的是液滴铺展过程中，液滴前沿的最大接触角。研究发现前进接触角大于 90°时液膜更难铺展，此时动能堆

积在液膜边缘环处。更容易飞溅^[22]。因此为了减小溅水，可以给厕所涂亲水材料。目前厕所主要的材质是陶瓷，而商业釉面瓷器的接触角是 51.8° ^[36]，已经是亲水材料。使表面进一步亲水不能影响飞溅行为^[22]。且即使增加其亲水性，尿液滞留易留下尿垢，反而会增加清理成本，因此舍弃此方案。

1.3.5 改变撞击点切向速度

更改平面斜率或水平平面移动速度可以改变撞击点的切向速度，从而减小飞溅。研究发现当接触面沿切向运动且速度提高到阈值后，液滴撞击接触面后产生不对称飞溅。液膜中与接触面运动方向相反的部分液膜更薄，飞溅更少（见图 9）^[37]。在上厕所时移动厕所平面不可行，但是更改平面斜率可能性更大，于是继续探索这一可能。



图 9 改变平面移动速度产生不对称飞溅^[37]

1.3.6 减小撞击角

减小撞击角度可以减小飞溅，撞击角即为液滴运动方向和平面切向量的夹角。撞击角可通过通过倾斜平面或者改变液体喷射角度^[38]来改变。由于人类在排尿时难以控制尿道口角度。因此考虑倾斜平面的方法改变撞击角度。

有研究表明基地越倾斜，液滴滑落速度越快，反弹高度越低，即飞溅行为越小^[39]。研究显示保持液滴垂直下落，平面角度分别是 15° 、 30° 、 45° 时，也就是撞击角分别是 75° 、 60° 、 45° 时，撞击角越小，飞溅越少^[40]。常压下当入射角增加并超过 60° 时后，也就是撞击角度小于 30° 时，平面倾斜飞溅被完全抑制（见图 7）^[29]。同时，有文献证明在撞击角度小于 30° 时，飞溅量相较于最大飞溅量会减少 95%（见图 10）^[41]。因此本研究设定撞击角度 30° 为飞溅阈值，超过 30° 则认为飞溅较多。本实验将从改变平面倾角，也就是改变撞击角度入手，解决蹲便器溅尿问题。详细机制见第二章。

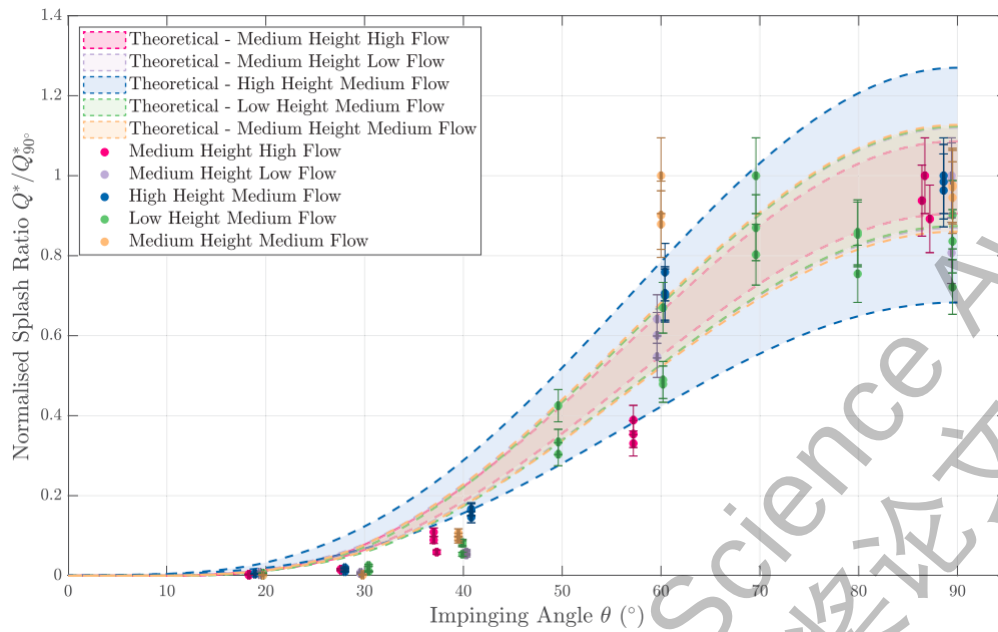


图 10 不同撞击角度下的飞溅比例函数图^[41]

1.4 研究猜想

以上六种方案中前五种在现实生活中均难以实现或对溅水的影响微乎其微，减少撞击角成为最优选。为了解决蹲便器溅尿问题，本研究利用撞击角越小，飞溅量越少的物理原理设计了一款新的蹲便器，猜想它能减少溅尿问题。

为了实现撞击角的减小，本研究基于液体撞击动力学理论，通过微分方程设计了与尿液轨迹夹角恒定为 60° 的曲线并进行斜面设计，使得撞击角小于现存的市面上常见的蹲便器，详细见第二章。

1.5 研究意义及创新点

1.5.1 研究意义

本研究设计的蹲便器可以显著减少溅尿，不论是对卫生环境、人们日常生活，还是对保护自然资源和环境都起到极大贡献作用。

第一，减小蹲便器溅尿可以降低病原体的污染和扩散，避免链式传播。飞溅的尿液不仅自身可能存在细菌，还可能将蹲便器内部的细菌携带出来。尿液滋生细菌后会腐败变质。如果仅仅维持厕所地面的干燥，则不能杜绝细菌的生长。因为有研究显示最常见的院内病原体如金黄色葡萄球菌、分枝杆菌可在干燥表面上存活数月^[42]。如果仅仅避免手部接触蹲便器表面，也不能避免细菌的感染，因为

尿液可以在空气中产生气溶胶^[43]，其携带的细菌从而进入口鼻^[44]。只有减小溅尿，才可以从源头减少尿液附着于蹲便器表面、地面、厕所把手或者使用者衣裤上，通过减少扩散范围来避免其在各个地方滋生细菌，减少病原体在人群中传播。

第二，减小异味、清除尿垢可大幅改善如厕体验，使得公共厕所使用率更高。35%至 37%不习惯使用公共厕所的人愿意在清洁和气味好的情况下开始尝试公共厕所，甚至有地区 70% 的受访者表示愿意支付费用来使用干净的厕所^[45]。减少溅尿意味着能给市民在公共厕所如景区、高铁站、学校、办公场所等等更好的如厕体验，减少厕所恶臭和地板脏乱差带来的不适。并且如厕体验显著改善后，采用本研究新设计的蹲便器的商场、景区或火车站等公共场所的客流量，会比采用原来的蹲便器的场所大，从而获得更多经济效益。

第三，减少清洁频次不仅可以减少保洁员的工作量。在采访学校保洁阿姨的过程中，本研究人员通过采访学校保洁阿姨，发现每次学生上厕所后，保洁阿姨都需要忍受不卫生的环境清理地面上残余的尿液和污垢（见附录三）。如果能从源头减小飞溅量，那么不仅能改善一线工作者的工作环境，还能帮助减少清洁厕所的财政开支。保洁员减少了重复性劳动的时间，缩短了完成工作任务所需的时间，增加了休息时间。而且部门也可以减少在水费和清洁剂上的开销。

第四，采取改进后的蹲便器以减小溅尿，可大幅减少清洁用水。根据实体实验结果（详见 5.5），在 45°排尿角度下，相较于箭牌和九牧两款蹲便器，使用本研究新设计的蹲便器可以分别减少 77.84%和 86.56%的溅尿量。假设通过减少溅尿量，可以节省一半的清洁用水，也就是节省 2.85 亿立方米清洁用水，即约 20 个西湖的水量，则可实现每年可增产水稻约 31.1 万吨，或满足 3.06 亿株绿洲防护林中典型树种小叶杨的生长需水（见附录四）。

1.5.2 创新点

尽管蹲便器溅尿问题相当严重，对于蹲便器溅尿机制和防控仍属领域空白。现有文献多聚焦于马桶飞溅问题，极少关注蹲便器的卫生安全。本研究是第一个聚焦于蹲便器溅尿问题并进行优化改进的研究。

本研究基于数学上的微分方程和液体撞击动力学中于撞击角有关的飞溅阈值理论进行蹲便器的设计优化。同时，本研究是首次通过 CFD 仿真模拟了溅尿

过程，清晰地得到市面上常见的蹲便器和本研究设计的蹲便器的飞溅量，并进行对比，发现实验组飞溅量远小于对照组，达到抑制溅水的效果。

在实体实验中，本研究首次利用绿色荧光剂和红色墨水结合的技术优化蹲便器防溅水设计，对飞溅进行定性和定量的研究。其中通过绿色荧光剂，配合紫光灯和镜头绿色滤光片，本研究首次拍摄到蹲便器的溅水过程。同时，尿液速率首次模拟真实排尿过程随时间进行变化。喷头采取质地较软的硅胶鸭嘴阀，其形状是狭缝状，“尿液”流出时变为枣核状，还原尿道口的实际情况。本实验中喷头、蹲便器、水桶、水管和水泵组成回路，实现泵水自循环。

1.6 整体思路设计图

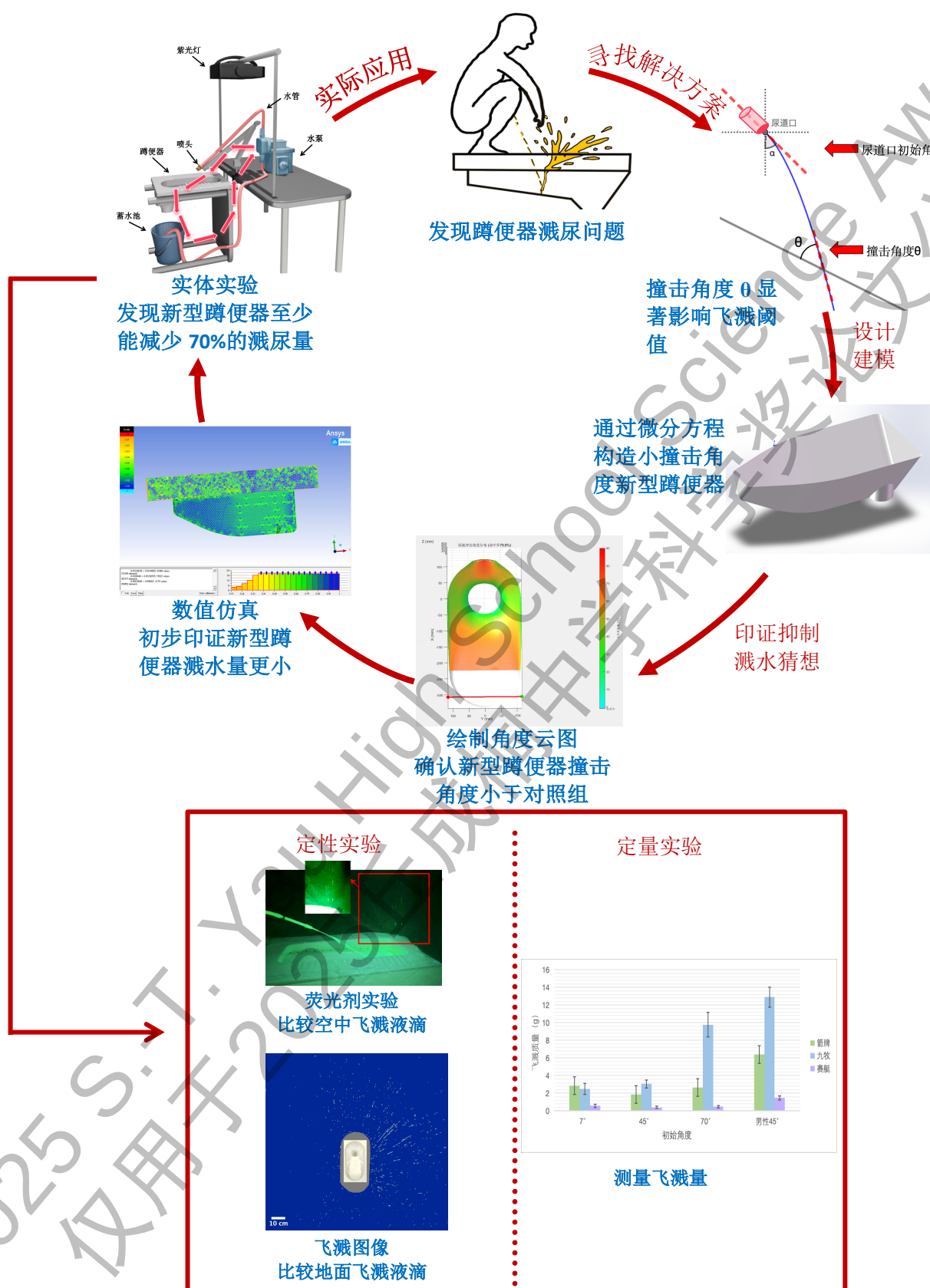


图 11 研究流程图（循环图）

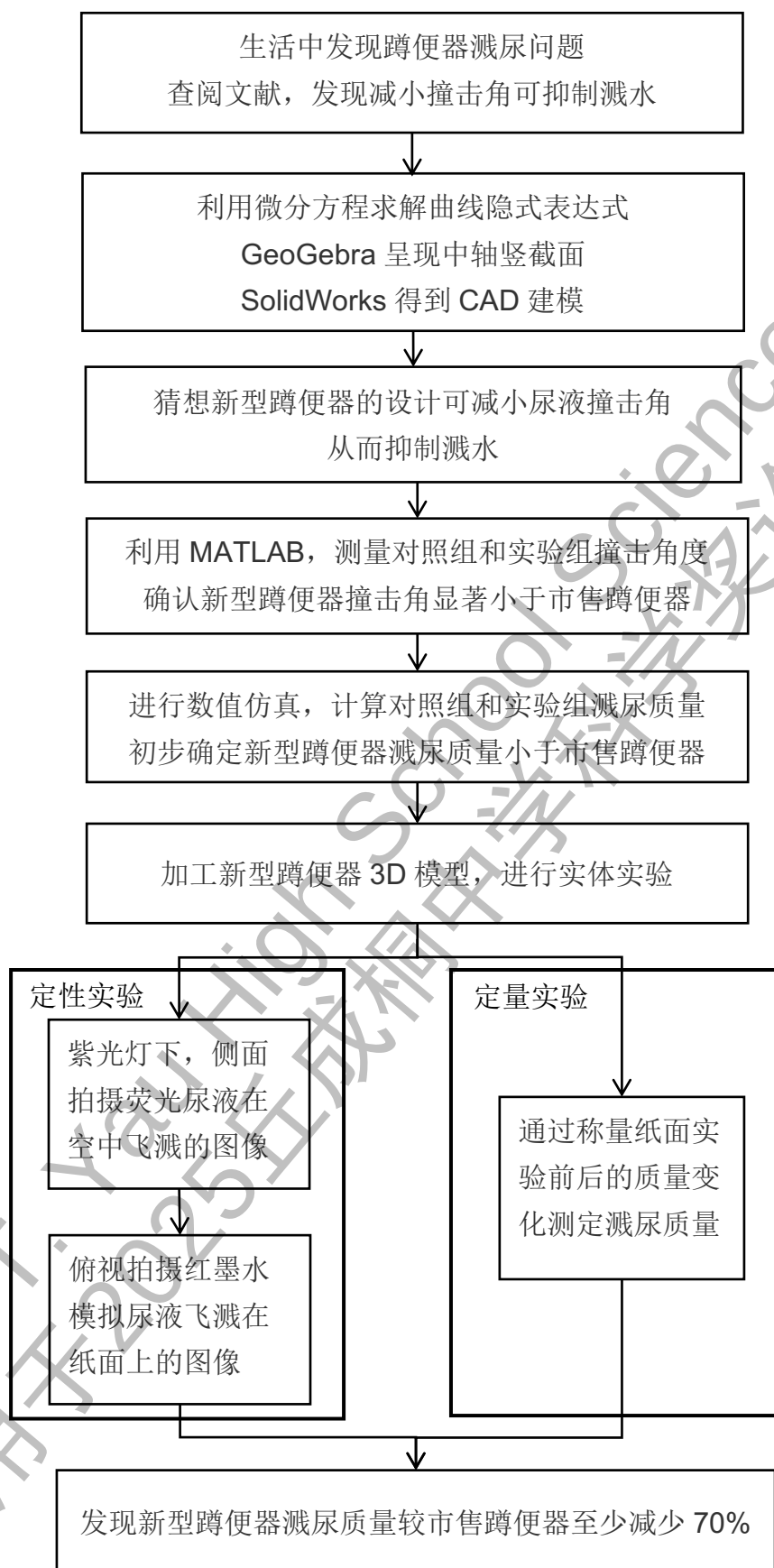


图 12 研究流程图（文字版）

第二章 防溅蹲便器形状设计

2.1 设计思路

本研究首先发现蹲便器溅水的问题，通过文献调查发现撞击角越小，飞溅量越小的实验现象，研究了飞溅阈值随撞击角变化的理论模型。我们将尿液轨迹看作二次项系数变化的二次函数，通过微分方程解出了与其在交点处的切线夹角分别恒定为 30° 、 45° 和 60° 的曲线。在考虑了安装成本等因素后，本研究基于夹角恒定为 60° 曲线来设计防溅水蹲便器，使整体形状具有连续性和可导性。在进行 CAD 模型设计时，本研究设计 60° 曲线为中轴，进行左右两边的斜面设计，以此保证撞击角均小于 60° 。本文设计的蹲便器 CAD 模型见 2.5。本研究猜想它可以通过减小撞击角来抑制溅尿。

2.2 理论思路

2.2.1 定量分析飞溅阈值

在惯性力(inertia force)、粘性力(viscous force)和表面张力(surface tension)的作用下，液滴撞击平面飞溅的问题可以化简为最大扩展因子 $\beta = \frac{D_{max}}{D_0}$ 与无量纲数的关系。韦伯数是惯性力与表面张力的比值，判断液滴是否破碎飞溅。若 We 大于 1 意味着惯性力相较于表面张力占主导地位，液滴更容易飞溅：

$$We = \frac{\rho U^2 L}{\sigma} \quad (1)$$

其中 ρ 代表液体密度， σ 代表表面张力系数。 U 代表液滴特征速度。 L 代表液滴特征长度，在液滴撞击动力学通常指的是液滴直径。

雷诺数是惯性力与粘性力的比值，用于判断流动是层流还是湍流。若雷诺数大于 1 意味着惯性力相较于粘性力占主导地位，液滴更容易飞溅：

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2)$$

其中 μ 代表液体粘度。其他参数表达形式与上面一致。

奥内佐格数则综合了惯性力、粘性力和表面张力，描述粘性对飞溅的作用。其经常与韦伯数结合。它的优势是独立于液滴的速度，仅取决于液体的物理性质和液滴的尺寸。参数表达形式与上面一致：

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma L}} = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (3)$$

毛细管数将粘性力与表面张力进行比较。粘性力占主导时应力在液膜边缘集中，易形成微小飞溅。表面张力占主导时液滴倾向于完整形状，不易破裂。参数表达形式与上面一致：

$$Ca = \frac{\mu V}{\sigma} = \frac{We}{Re} \quad (4)$$

早期研究聚焦动能转换成表面能和耗散热，提出围绕表面张力和粘性力建立最大扩展因子 β 预测模型，比如 $\beta = \frac{We^{1/2}}{1.24 + We^{1/2} \cdot Re^{-1/5}}$ ， $\beta = Re^{1/5} f(We \cdot Re^{-2/5})$ ， $\beta = 0.87 Re^{1/5} - 0.4 Re^{2/5} We^{-1/2}$ [22]。

但是最大扩展因子 β 只能定量预测液膜铺展。为预测液滴飞溅，Mundo 提出著名阈值模型，如果 $K = Oh \cdot Re^{1.25}$ 大于 57.7，则发生飞溅[46]。Cossali 则引进表面粗糙度，设粗糙度 $R_{nd} = \frac{R_a}{D}$ ，其中 R_a 是表面粗糙度差值平均值， D 为液体直径。设定无量纲数 K 的阈值为 $K_s = 649 + \frac{3.76}{R_{nd}^{0.63}}$ [47]。Vander 等人提出简化模型，如果 $\sqrt{Ca}$ 大于 0.35 则发生飞溅[48]。Stevens 引进环境气压，针对低粘度液体提出阈值模型 $\left(\frac{D_0}{l}\right)^{0.5} Re^{-1.1} We^{1.5}$ ，其中 l 是气体平均自由程[49]。Geijo 等人引进液体润湿性，提出临界韦伯数 $We \geq K^2 (8 \cos \theta_0)^{3/5} (2R_{rms}/D_0)^{-3/5}$ ，其中 K 为常数， θ_0 是液体与光滑表面之间的静态接触角， R_{rms} 是均方根粗糙度[24]。

有文献引入液滴撞击速度来预测液滴飞溅。Xu 等人发现 $\Sigma_G \propto \rho_G C_G V_e$ ，其中 Σ_G 是气体引起的失稳应力， ρ_G 是气体密度， C_G 是气体中的声速， V_e 是液膜尖端速度。 Σ_G 值越大，越容易产生飞溅行为[32]。Riboux 和 Gordillo 以气体对液膜的抬升作用作为模型基础，提出无量纲阈值 $\beta = \left[\frac{K_l \mu_g V_t + K_u \rho_g V_t^2 H_t}{\sigma} \right] \sim O(1)$ ，其中 K_l 是与液膜抬升边缘夹角有关的无量纲数， K_u 是无量纲系数， V_t 是液膜边缘速度， H_t 是液膜厚度[18]。本论文主要通过速度飞溅阈值解释撞击角改变带来的飞溅行为改变。

2.2.2 本研究设计的理论模型

2019 年研究者发现入射角增加并超过 60° 时后，即撞击角小于 30° 时，飞溅被完全抑制^[29]。研究者进一步通过理论探究撞击角和飞溅阈值的关系。本研究设入射角为 α ，撞击角度为 θ （见图 13）。

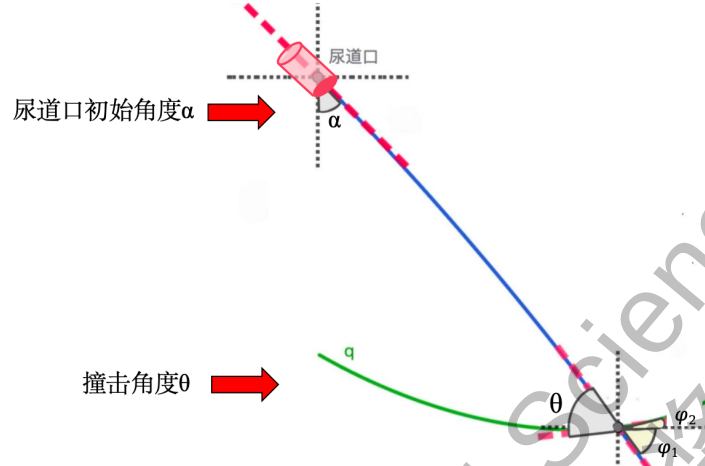


图 13 初始角度 α 和撞击角度 θ 示意图

定性地讲，当撞击角变小时，切向速度分量增加法向速度分量减弱。液滴在接触面上更容易产生沿切线方向的位移。然而法向速度分量减弱，无法迫使液膜向外铺展，使得液膜尖端速度减小，从而抑制飞溅。

定量地讲，液滴速度 V_0 可正交分解为法向速度 V_n 和切向速度 V_t 。当斜面倾斜角度 $(90 - \theta)$ 大于 $(90 - \theta)_{t,u}$ 时，向上的飞溅被抑制；当 $(90 - \theta)$ 进一步大于 $(90 - \theta)_{t,d}$ 时，向下的飞溅被抑制。设 V_l 是 V_n 引起的薄膜尖端速度，则液膜沿表面向下扩散的速度 $V_{l,d} = V_t + V_l$ ，向上扩散的速度 $V_{l,u} = V_l - V_t$ 。

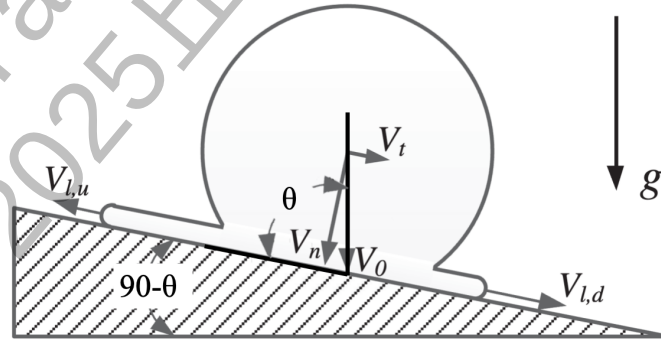


图 14 液滴撞击倾斜平面的角度示意图^[29]

根据 Riboux 和 Gordillo 的理论^[29],

$$V_l = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{D_0 V_n}{2T}} \quad (5)$$

其中 T_e 是从液滴撞击平面开始计算的时间。已知 $V_n = V_0 \sin \theta$ ， $V_t = V_0 \cos \theta$ ，因

此：

$$V_{l,u} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{D_0 V_0 \sin \alpha}{2T}} - V_0 \cos \theta \quad (6)$$

$$V_{l,d} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{D_0 V_0 \sin \alpha}{2T}} + V_0 \cos \theta \quad (7)$$

此公式只有在液膜形成后，也就是 T_e 后成立。它可以由飞溅时刻 $t_e = \frac{2T_e V_n}{D_0}$ 得

到。而 t_e 又和无量纲数, Re 和 Oh 建立联系: $\frac{\sqrt{3}}{2} Re^{-1} t_e^{-1/2} + Re^{-2} Oh^{-2} = 1.21 t_e^{3/2}$ 。

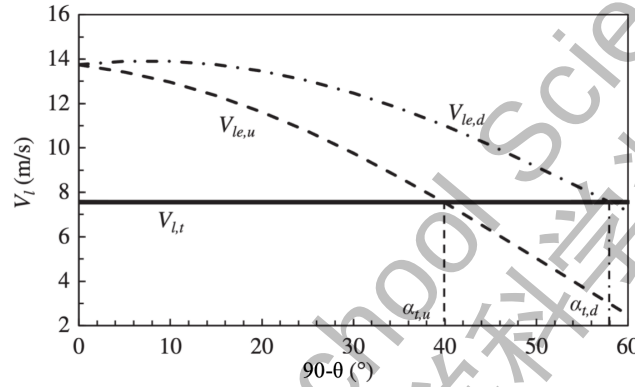


图 15 $We=579$ 时液膜尖端速度随倾角变化^[29]

由图可见 $We=579$ 时斜面倾斜角度 $(90 - \theta)$ 增加，即撞击角减小， $V_{l,u}$ 随之减小。斜面倾斜角度 $(90 - \theta)$ 不超过 10° 时，撞击角减小时 $V_{l,d}$ 随之增大，随后减小。

只有 t_e 时刻当 $V_{l,u}$ 和 $V_{l,d}$ 超过阈值 $V_{l,t}$ 时才会发生飞溅。假设斜面倾斜角度为 $(90 - \theta)$ 时，液膜尖端速度阈值 $V_{l,t}$ 所对应的法向速度阈值 V_n ，与垂直撞击时法向速度 V_n 的值相同。已知 θ 的情况下，通过实验得到 V_n 的值后，带入计算 V_l 公式计算得出阈值 $V_{l,t}$ 。因此相同撞击速度 V_0 下，也就是相同飞溅阈值 $V_{l,t}$ 下， α 越小时 V_n 越小 V_t 越大，由公式可知 $V_{l,u}$ 越小， $V_{l,d}$ 先增加后减小，因此液膜尖端速度越可能小于飞溅阈值，越不可能飞溅。

2.2.3 曲线设计

撞击角会显著影响液膜边缘与空气的切向速度差，因此是影响溅水的重要因素。总体上来看撞击角度越小，飞溅行为越少（见 1.3.6）。因此在设计蹲便器形状时，我们分别根据微分方程绘制了与尿液轨迹始终保持切线夹角是 30° 、 45° 和 60° 的曲线。

把尿液看做一连串质点，以一定速度做斜抛运动，尿液轨迹可以被看做抛物线 $y = kx^2 + bx$ ^[50]。根据斜抛运动公式：

$$y = -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 + x \tan \alpha \quad (\text{公式 8})$$

其中 V_0 代表初始速度， θ 为入射角度， g 为重力加速度。当初始速度取到无限大时， $\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2$ 趋近于 0，尿液轨迹 $y = bx$ 。可知 $k \in (-\infty, 0)$ 时有物理意义。

本研究设定尿道口在坐标轴原点处，取 $x \geq 0$ 为定义域。女性尿道初始角度的大小在 7° 到 70° 之间^[51]，本研究基于偏向中间值的 45° 设计曲线。这样的选取具有代表性，且方便后续计算及建立模型。将 $\alpha = -45^\circ$ 代入斜抛运动公式，尿液轨迹可表示为 $y = -\frac{g}{v_0^2} x^2 - x$ 。女性尿道口高度的中位数为 7.9cm ^[52]，因此设 $d=0.79\text{m}$ 为地面高度。

为了寻找一条曲线 q ，使其满足 $v_0 \in (0, \infty)$ 取任意值时，与 y 的交点处的切线夹角为定值，本研究通过微分方程求解。设尿液轨迹 y 在交点处的切线与过该点平行于 x 轴的直线的夹角为 φ_1 ，因此切线可以表示为 $y' = \tan \varphi_1$ 。曲线 q 在交点处的切线与过该点平行于 x 轴的直线的夹角为 φ_2 ，因此切线可以表示为 $q' = \tan \varphi_2$ 。因此有

$$\tan \varphi_2 = \tan(\varphi_1 + \theta) = \frac{\tan \varphi_1 + \tan \theta}{1 - \tan \varphi_1 \tan \theta} \quad (9)$$

由 y 在交点 (x_0, y_0) 处的切线为 $2kx_0 + b$ ，因此有 $\tan \varphi_1 = 2kx_0 + b$ ，代入公式 9，可得：

$$\tan \varphi_2 = \frac{2kx_0 + b + \tan \theta}{1 - (2kx_0 + b) \tan \theta} \quad (10)$$

由交点处 $y_0 = kx_0^2 + bx$ ，得 $k = \frac{y_0 - bx_0}{x_0^2}$ ，将 $\tan \varphi_2 = f'(x)$ 代入式子，得：

$$f'(x) = \frac{\frac{2(y_0 - bx_0)}{x_0} + b + \tan \theta}{1 - \left(\frac{2(y_0 - bx_0)}{x_0} + b\right) \tan \theta} \quad (11)$$

由于要求的曲线 q 上每个点都满足交点 (x_0, y_0) 的要求，因此：

$$f'(x) = \frac{\frac{2(f(x) - bx)}{x} + b + \tan \theta}{1 - \left(\frac{2(f(x) - bx)}{x} + b\right) \tan \theta} \quad (12)$$

将 $b = -1$ ，以及 $\theta = 30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 分别代入，求解该微分方程，可得隐函数解：

对于 $\theta=30$ ，可得微分方程为 $\frac{dy}{dx} = \frac{2\sqrt{3}y+(\sqrt{3}+1)x}{(\sqrt{3}-1)x-2y}$ ，解得隐函数解为：

$$C_1 = \frac{(3\sqrt{3}-1)\sqrt{3\sqrt{3}+2}}{\sqrt{2}(3\sqrt{3}+2)} \arctan\left(\frac{4y+(\sqrt{3}+1)x}{\sqrt{2}\sqrt{3\sqrt{3}+2}x}\right) - \frac{\ln(2y^2+(\sqrt{3}+1)(xy+x^2))}{2} \quad (13)$$

对于 $\theta=45$ ，可得微分方程为 $\frac{dy}{dx} = -\frac{x}{y} - 1$ ，解得隐函数解为：

$$C_2 = \frac{\ln(y^2+xy+x^2)}{2} + \frac{\arctan(\frac{y+2x}{\sqrt{3}y})}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

对于 $\theta=60$ ，可得微分方程为 $\frac{dy}{dx} = \frac{2y+(\sqrt{3}+1)x}{x-\sqrt{3}(2y+x)}$ ，解得隐函数解为：

$$C_3 = \left(\frac{3\sqrt{6\sqrt{3}+20}-\sqrt{18\sqrt{3}+60}}{6\sqrt{3}+20}\right) \arctan\left(\frac{4\sqrt{3}y+(\sqrt{3}+1)x}{\sqrt{2}\sqrt{3\sqrt{3}+10}x}\right) - \frac{\ln(2\sqrt{3}y^2+(\sqrt{3}+1)(xy+x^2))}{2} \quad (15)$$

这三条曲线以隐函数解的形式放在计算机图形软件 GeoGebra 中绘制。设原点为尿道口。尿液轨迹可表示为 $y = kx^2 - x$ ， $k \in (-\infty, 0)$ 时有物理意义。为了保证设计的蹲便器曲线对于基于所有 v_0 大小构建的尿液轨迹，撞击角度均能小于 60° ，本研究假设初始速度 v_0 无限大，此时尿液轨迹为 $y = -x$ 。曲线 q 在与 $y = -x$ 交点以左， y 轴以右，且 x 轴以下的区域内才有意义。

经过计算，发现夹角为 30° 的曲线定义域约为 $x \in (0, 0.796)$ ，夹角为 45° 的曲线定义域约为 $x \in (0, 0.366)$ ，夹角为 60° 的曲线定义域约为 $x \in (0, 0.247)$ 。于是绘制出以下曲线图（见图 16）。

在选取曲线时经过测量得出，箭牌和九牧蹲便器靠近洞口的平面距离上边缘分别为 147mm 和 151mm 左右。过 $(0, -0.2)$ 时 60° 、 45° 和 30° 的曲线， C 分别是 0.627、-1.307 和 -0.475。三条曲线的最低点分别大约是 795mm，367mm 和 255mm，减去尿道口高度后，得到三条曲线与地面的距离分别为 716mm，288mm 和 176mm。我们选取第三条，也就是与二次函数在交点处切线夹角恒为 60° 的曲线，作为蹲便器中轴的基础曲线，以最小化安装成本和难度考虑，更好地符合现代建筑的设计参数。

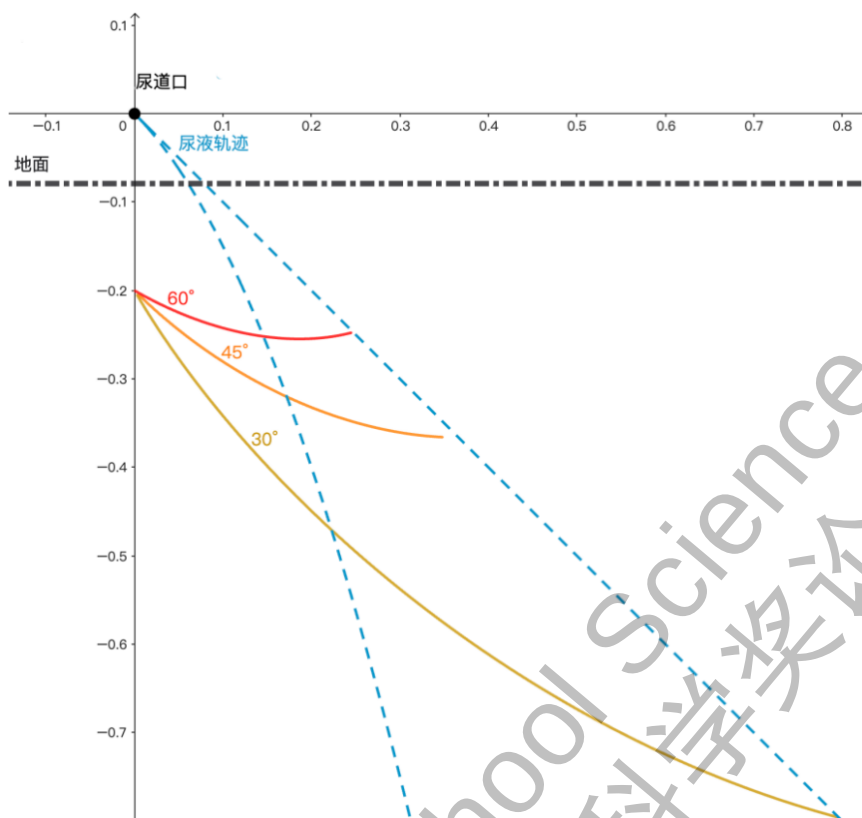


图 16 与尿液轨迹夹角恒为 30、60、90 度的曲线

2.3 三维设计

我们需要将与尿液轨迹在交点处的夹角恒为 60° 的曲线（见公式 15）和直线拼接扩展成一条曲线。

考虑到蹲便器坑壁形状需要避免出现台阶、断层等造成潜在飞溅风险，保持结构的自然光滑，因此我们设计的蹲便器内壁需要具有连续性。内壁最好同时可导，避免存在尖角处积聚污垢。同时，蹲便器从尿道口往前至最低点这段需要保证“单调不递增”，也就是当 $x_2 > x_1$ 时， $y_2 \leq y_1$ ，这样液滴能靠重力自然往下流入管道，避免出现液体聚集或回流。

考虑到箭牌蹲便器的深度约 147mm，九牧蹲便器的深度约 151mm，因此设曲线经过 $(0, -0.2)$ 。此时蹲便器最低点距离地面的高度大约是 176mm 左右。由于曲线在 $x = 0$ 处不连续，而我们取 $x > 0$ 的部分，C 值约为 0.627。同时为了保证“单调不递增”性，我们取曲线最低值，其坐标约为 $(0.1865, -0.2547)$ ，作为曲线的最右端。由于尿道口在原点，我们取曲线 y 轴右侧部分。

我们先看曲线左边部分。为了保证连续性和单调不递增性，已知曲线近似过

点(0, -0.2)。因此在曲线最左端，我们接函数 $y = -\frac{\sqrt{3}}{3}x - 0.2$ 并取其 y 轴左侧部分，此函数的导数恒定为 $-\frac{\sqrt{3}}{3}$ ，与 y 轴夹角为 $90 - \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}}{3}\right)$ ，即 60° ，能完美衔接在二次函数的二次项系数无限小时满足切线夹角为 60° 的曲线。我们设尿道口在蹲便器最后端向前 0.1m 处，因此 $y = -\frac{\sqrt{3}}{3}x - 0.2$ 的定义域为 $x \in [-0.1, 0]$ 。为了满足蹲便器两端与地面高度齐平的原则，函数 y 最右侧点与其正上方在 $y=0.079$ 的点相连，构成蹲便器的后壁。

我们再看曲线右边部分。曲线最低点(0.186455, -0.2547) 右侧为了保证“单调不递增”性，且与尿液轨迹交点处切线夹角不能大于 60° ，因此我们接 $y=-0.2547$ 直线。加上脚踏处，箭牌和九牧蹲便器的长度分别为 0.595m 和 0.55m，而蹲便器左边边缘在 $x=-0.1\text{m}$ 处，因此直线的最右端取到 $x=0.4\text{m}$ 处，满足蹲便器全长为 0.5m。同样，为了满足蹲便器两端与地面高度齐平的原则，函数 y 最右侧点与其正上方在 $y=0.079$ 的点相连，构成蹲便器的前壁。

同时从主流蹲便器堵头尺寸可知，目前蹲便器洞口直径为 6-8cm 左右，为了保证洞口到尿道口这段保持“单调不递增”，因此设洞口最右端设在右侧拐点处，形状为直径为 0.06m 的圆形。为了增强蹲便器的光滑性，在蹲便器最左端和最右端的拐角处，我们设置半径为 0.02m 的圆角，也就是让半径为 0.02m 的圆形在拐角处与两条线段分别相切后取圆弧，使得构成蹲便器在中轴的横截面的线整体可导（见图 14）。

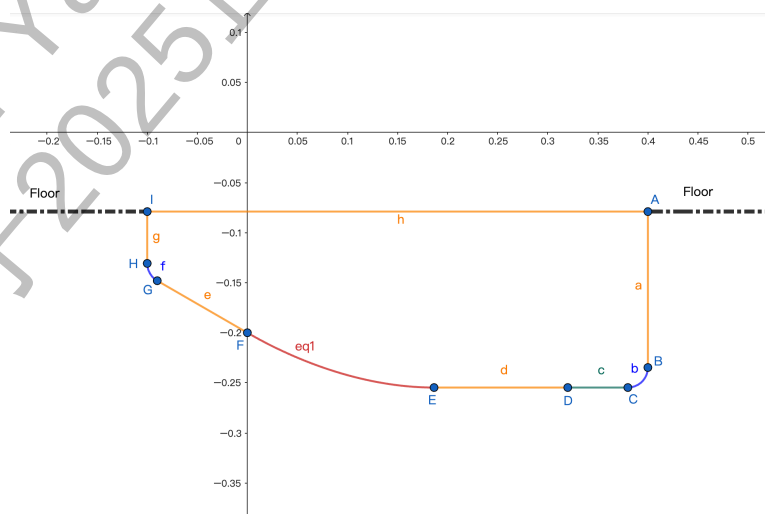


图 14 新型蹲便器截面

2.4 三维建模

2.4.1 软件介绍

CAD 软件发展始于 20 世纪 60 年代，早期用于二维图象绘制，计算能力提升后主要用于三维建模。三维建模是通过计算机在三维空间中创建虚拟实体的过程，严格按照现实生活中的尺寸构建零件结果特征并进行几何约束。SolidWorks 是计算机 CAD 软件，它采取参数化建模方式进行精确建模。本研究的蹲便器设计在 SolidWorks 中制作。

而自由建模软件如 Blender 属于 3D 图形软件，主要用于效果展示和渲染。第五章的实体实验装置图由渲染软件 Blender 制作。

2.4.2 建模思路

本研究使用 SolidWorks 软件进行初步模型示意图。一开始，本研究想沿 z 轴直接将曲线进行水平平移，得到“浴缸”状的 3d 模型。



图 15 “浴缸”状蹲便器示意图

此时在尿道口同步进行 z 轴的水平平移时，由于尿液轨迹 $y = kx^2 - x$ 始终与该蹲便器在交点处的夹角始终为 60° 。而根据 xx 文献，夹角为 60° 时飞溅阈值并没有显著升高，抑制溅水效果作用不明显。

为了最大可能减小撞击角，本研究改进上述方案。本研究以曲线为中心，两端沿轴延伸。接着中线保持不变，两侧边缘均沿 y 轴抬起相等高度，从而与中线

构成两个斜面，而中心的母曲线为整个蹲便器的最低点。整体的蹲便器以 x 轴为对称轴，呈现出“赛艇”状的 3d 模型。

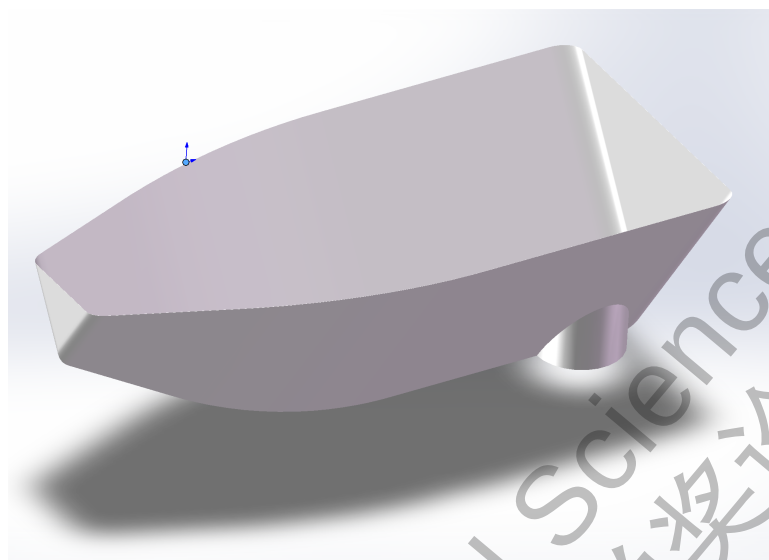


图 16 “赛艇”状蹲便器示意图

这样设计的最大优势考虑到真实排尿场景后，制作了蹲便器两边的“斜面”。尿道口若正对中心母曲线，则尿液轨迹与曲线的切线夹角，也就是撞击角是 60° 。而正常人在排尿时尿道口不可能严格对准中心线。因此当尿道口稍微偏离中心线时，尿液轨迹的落点将在倾斜的斜面上。此时法向速度将被进一步分解成斜面倾斜方向的切向速度，撞击角度进一步减小，因此可以进一步减少飞溅。因此这样的设计整体上来看，撞击角度基本小于阈值 30° ，最大值是 60° 且仅仅在中线可以达到。具体角度图分布可以在第三章看到。

2.5 建模效果

为了在 SolidWorks 中进行精准的参数化建模，便于后续对模型进行 3D 打印，本研究将隐式曲线提取数据点导入 SolidWorks，并通过“曲线放样”得到初步的“赛艇”模型，长 500mm 宽 175mm 高 240mm。洞口外径 70mm，内径 60mm，外径最前端位于蹲便器前端下策圆角处。得到最终的赛艇模型。

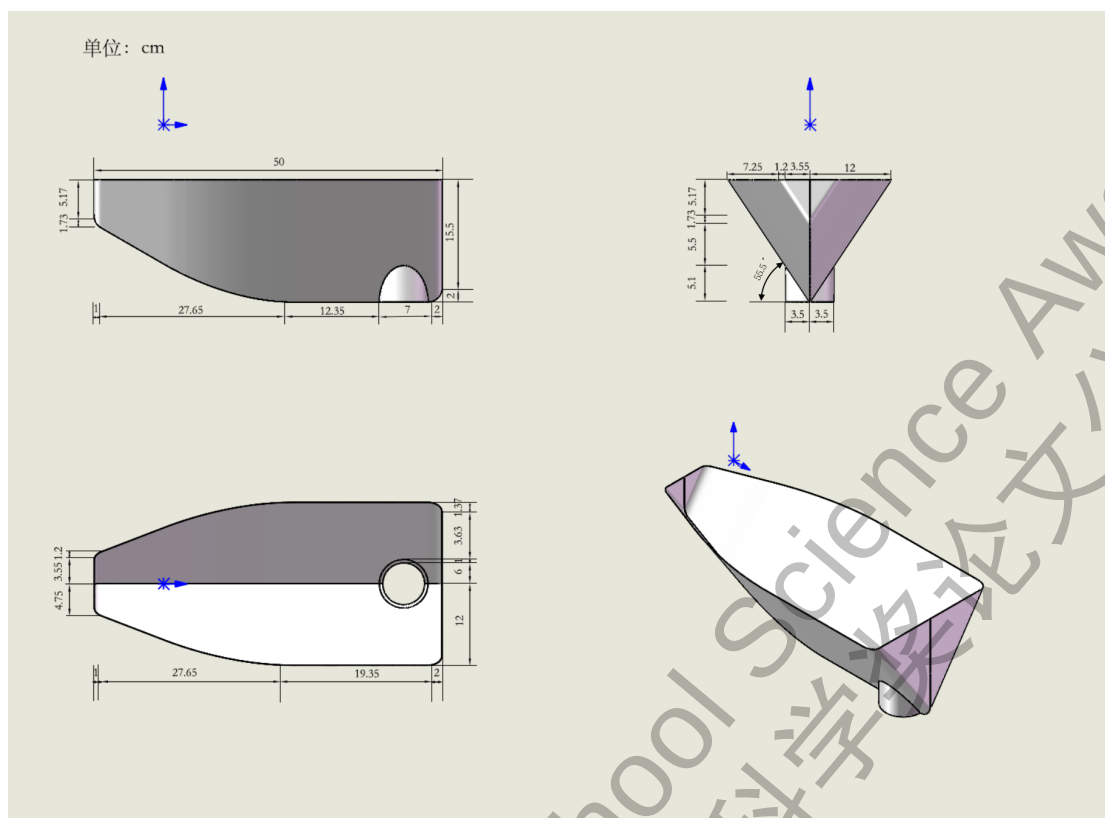


图 17 “赛艇”状蹲便器的三视图和轴侧图

第三章 撞击角度云图

3.1 总体设计

根据液滴和平面撞击角越小、飞溅量越少的理论,本研究设计了新型蹲便器。为了验证新型蹲便器的撞击角度确实比市售蹲便器小,本研究分别制作了对照组和实验组蹲便器的撞击角三维图。如果新型蹲便器的撞击角基本小于实验组,则说明新型蹲便器有抑制尿液飞溅的效果。

3.2 数学建模过程

3.2.1 设计思路

绘制角度图时尿液轨迹永远平行于蹲便器。尿道口比蹲便器最高处高 $0.079\text{m}^{[52]}$,比蹲便器最后边向前 0.1m 。考虑到真实情况人类排尿时,脚踏的位置和身体角度等等会影响尿道口位置,因此本研究设尿道口平行于蹲便器后侧边缘直线移动,带动尿液轨迹进行平移。这样在固定 k 值,也就是初始速度的情况下,可以遍历一排平行于蹲便器后侧边缘的三角面。接着让 k 在 0 到接近正无穷(也就是速度理论上的无穷大值)中移动。这样可以遍历无数排三角面,也就是蹲便器底部曲面上在物理上有意义的全部三角面。

由第二章设计思路可知,本研究基于尿道口初始角度 45° 的参数,建立尿液轨迹 $y = kx^2 - x$ 。为了验证对于其他尿道口初始角度,赛艇蹲便器的撞击角度同样小于对照组,除了绘制基于初始角度 45° 的角度图以外,本研究还分别绘制了基于尿道口初始角度为 7° 、 20° 、 60° 和 70° 的角度图。前文提到女性尿道口角度在 7° 到 70° 之间^[51],这样的选取完全覆盖了女性尿道口初始角度。

考虑到部分厕所男女共用的情况存在,为了验证对于男性参数,赛艇蹲便器的撞击角度同样小于对照组,除了以上女性参数的角度图绘制以外,本研究还绘制了男性参数绘制角度图。由于男性尿道口距离蹲便器上缘的中位数为 $864\text{mm}^{[53]}$,因此本研究在研究男性参数时选取尿道口高度 864mm ,初始角度 45° 。

3.2.2 网格划分

可见为模型划分三角网格至关重要,直接影响角度图的准确性,而 `stl` 文件

格式正好满足要求，且可以导入 Matlab 中。由于 SolidWorks 参数化建模生成的是基于分段多项式的光滑 NURBS 曲面，它将曲面转换成三角面时最大可能满足几何形状，而不是三角面的等边和均匀。因此需借助网格划分软件对 SolidWorks 生成的常见 step 文件进行重新剖分（remeshing），也就是把连续的曲面做三角面的离散化，将它处理分割成有限元。

本研究选择产生边长均为 2mm 的三角形面，这样的选择是尝试多种边长后兼具精确性和计算效率的选择（见图 18）。

划分网格后 stl 文件便可以导入 Matlab 进行代码运算，均匀的网格有助于遍历面更加细致且角度图制作更加精确均匀。

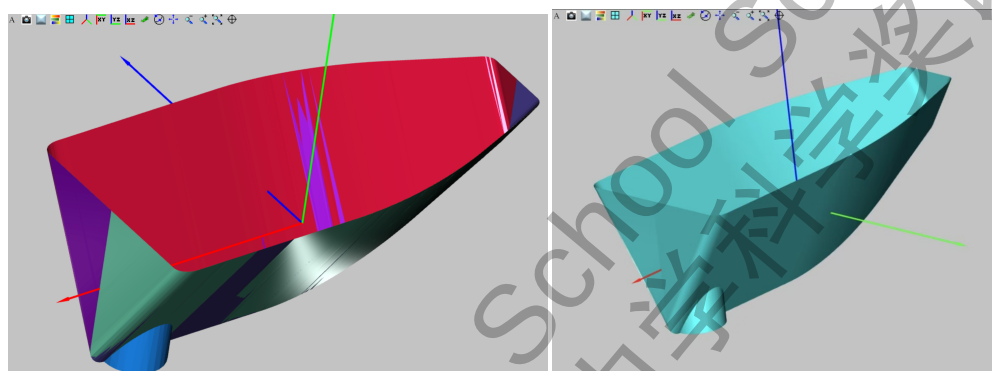


图 18 蹲便器网格重新划分前后效果对比图

3.2.3 3d 扫描

为了获得已经商业化、存在评价和销量证明其的市场份额较高、依据真实参数的对照组模型，本研究选择了分别位列淘宝销量榜第一和第二的箭牌和九牧品牌进行 3d 扫描“逆向建模”。箭牌对照组为长 595mm、宽 450mm、高 256mm 的 A5007 型号，九牧对照组为长 440mm、宽 550mm、高 255mm 的 14095-2 型号（3d 扫描流程详见附录五）。为了简化网格，减少网格数量，提高计算效率，计算角度图时只截取能直接被尿液冲击的蹲便器曲面和排污管上端，舍弃地面脚踏处等地方（见图 19）。

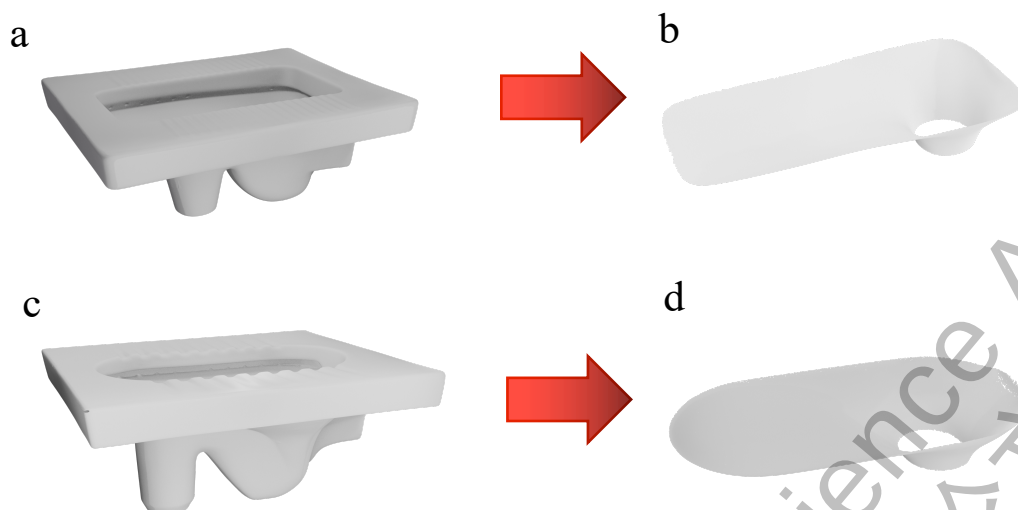


图 19 (a-b) 箭牌蹲便器 3d 扫描图；(c-d) 九牧蹲便器 3d 扫描图

3.3 MATLAB 运算逻辑

早在 1950 年代，出现的 Fortran 语言为计算矩阵和线性代数打下基础。数值计算软件在此基础上发展，而 Matlab 是基于自身编程语言的最热门数值计算软件之一。它提供三维绘图功能，绘制函数曲线、数据分布等等很便捷。

本研究通过 Matlab 在蹲便器 stl 文件表面绘制角度图（代码见附录六）。首先确定蹲便器模型的尺寸用于采样范围设置，并按照前文所说设置尿道口高度（见 3.2.1）。k 值在 0.0001 和 50 之间移动，共取 80 个值。尿道口在蹲便器模型范围内的 y 轴平移，取 60 个点。计算三角面的中心点、法向量（用来计算撞击角度）和面积。

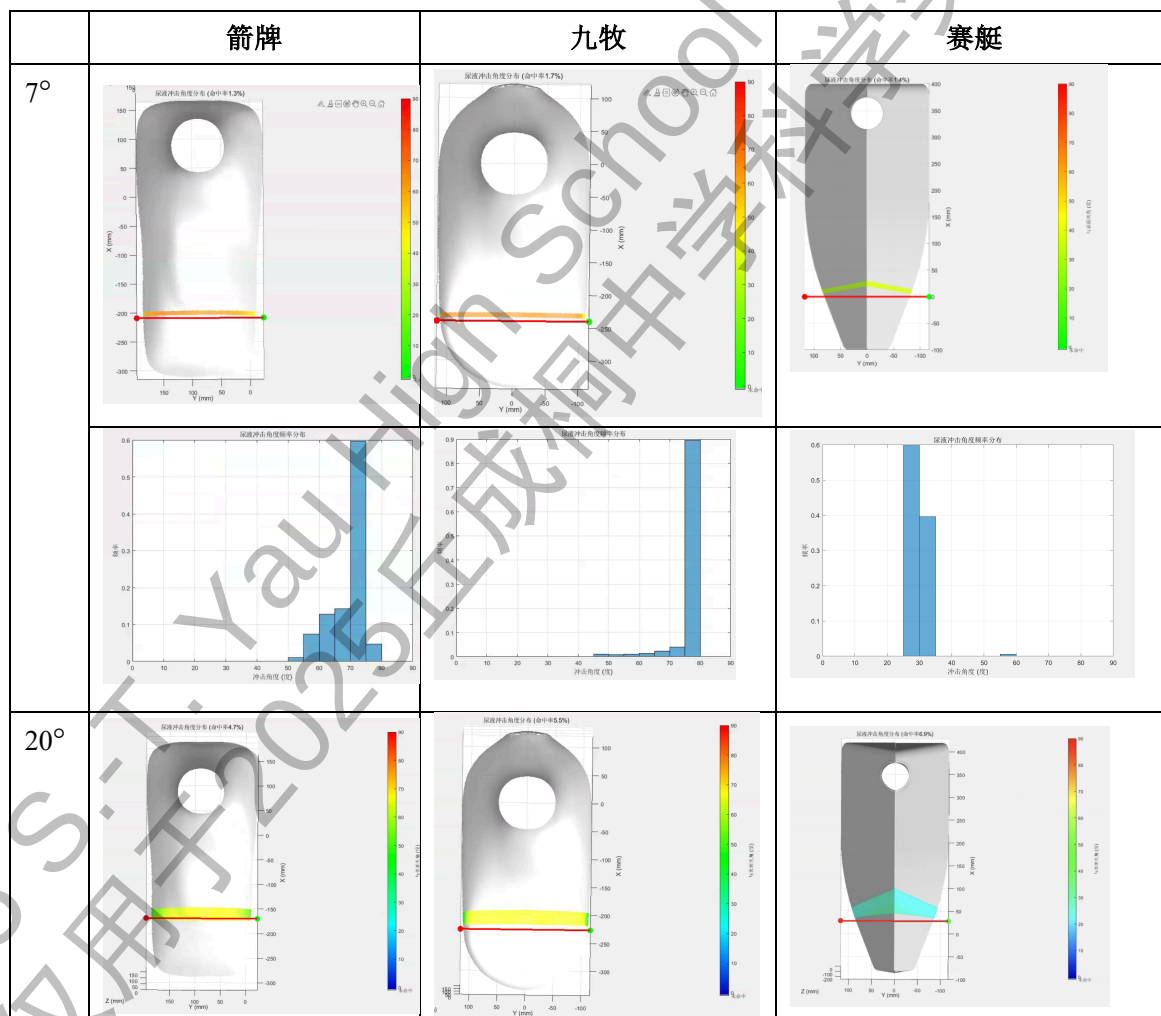
本研究随后设置粗检测阈值和精检测阈值，两者显著影响循环后的角度图结果。粗检测计算在一定 x 轴坐标和 k 值下理论上能被尿液轨迹击中的面中心的 z 坐标。如果实际三角面中心的 z 坐标和理论相差不超过粗检测阈值，则认为通过粗检验。精检测在粗检验筛选出的这个三角面基础上再随机挑选若干个面，判断它的 z 坐标和重新得到的理论高度。点的个数随着三角面的面积大小而加权。本研究设置的是面积 200 时取 2 个点，以此类推。如果存在一个点，两者相差不超过精检测阈值，则认为这个点所在的面被击中，可以测量撞击角度。由于不同初始角度击中的区域大小不同，初始角度大于 45° 的粗精检测阈值均大于初始角度小于等于 45° 的阈值，保证最终画出的角度图不会有面被误判未击中。

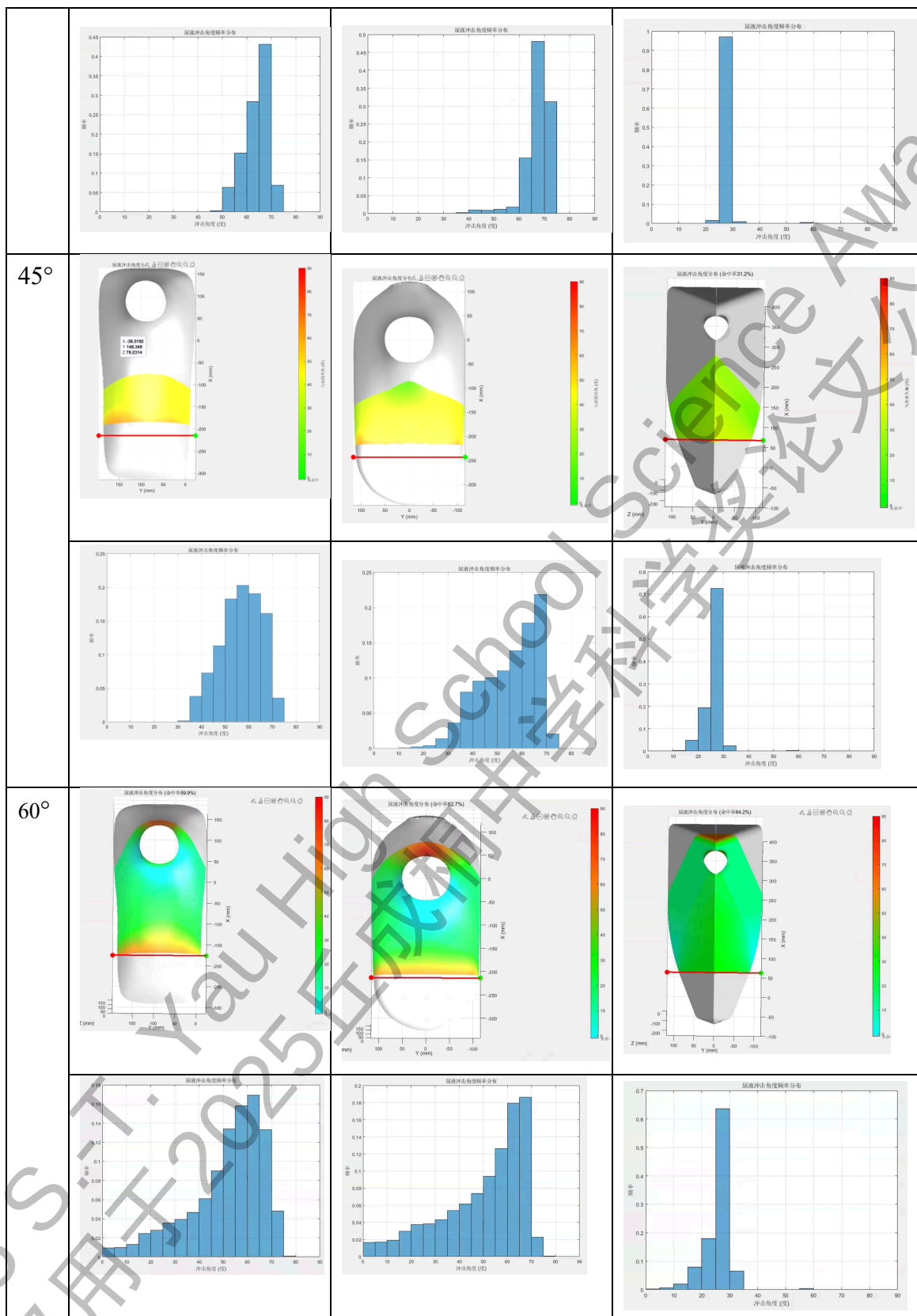
接着，来到最重要也是耗时最长的主计算循环。这里采用 for 循环遍历 y 值和 k 值，同时经过粗精检测后计算轨迹切线 $\frac{dz}{dx} = 2kx + b$ 与面法向量夹角，并取其夹角作为撞击角度。每个面可能因误判而被击中多次，取最小角度。

最后需要实现撞击角度的可视化，用面颜色表示角度大小。对于不同撞击角度，本研究设置不同的颜色条来凸显出对照组和实验组分别的特征。未命中面显示为灰色，尿道口移动轨迹显示为红色线段。同时对所有命中面的角度进行统计，绘制角度频率分布直方图。

3.4 结果分析

在 Matlab 运行不同初始角度下的两个对照组和实验组模型，得到如下图表：





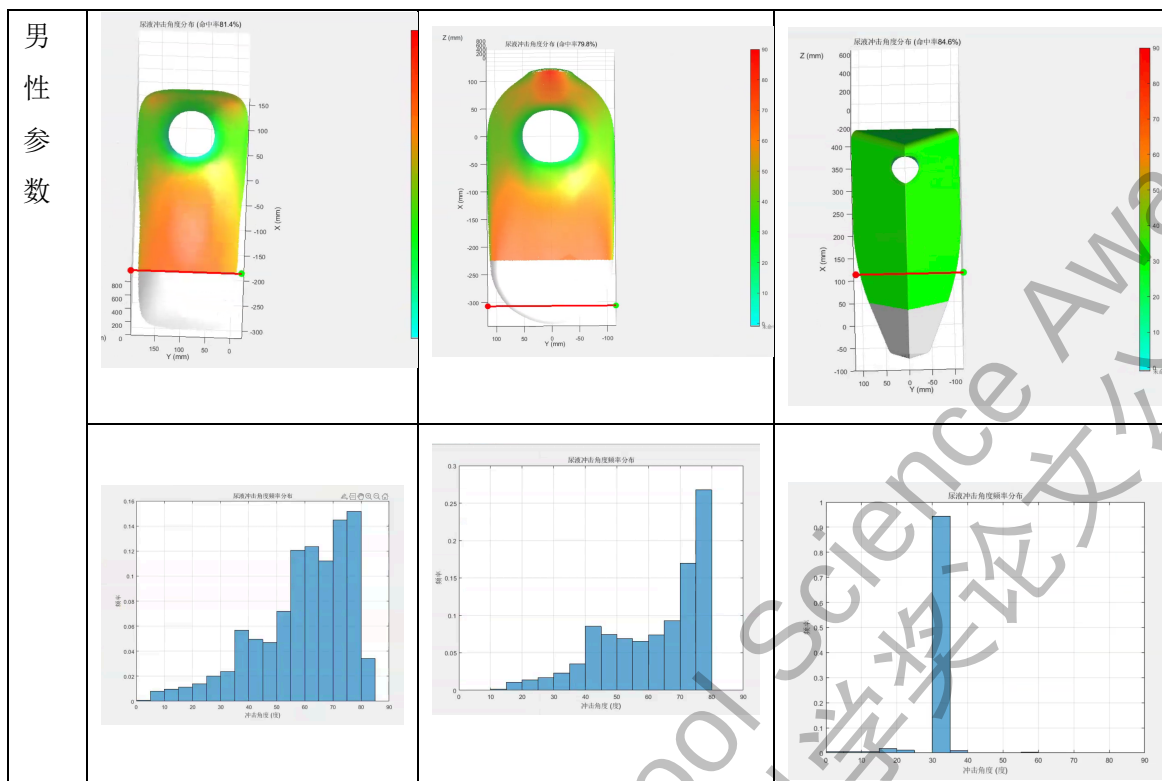


图 20 : 3d 撞击角度云图和角度频率分布图

3d 撞击角度图显示，箭牌和九牧偏红区域明显大于赛艇，赛艇偏绿区域明显大于箭牌和九牧。由于偏红区域代表撞击角度大，偏绿区域代表撞击角度小，因此可以直观得出赛艇的尿液撞击角度基本小于箭牌和九牧。

角度频率分布图显示，对照组撞击角度明显偏大，位于区间 50° 到 80° 的尿液命中点居多。而实验组撞击角度明显偏小，大部分小于 30° ，全部小于等于 60° 。也可以得出赛艇的尿液撞击角度基本小于箭牌和九牧。

由第二章的结论可知，撞击角度越小，尿液飞溅量越少。因此由撞击角度云图和角度频率分布图的结果，可知赛艇的尿液飞溅量小于箭牌和九牧。

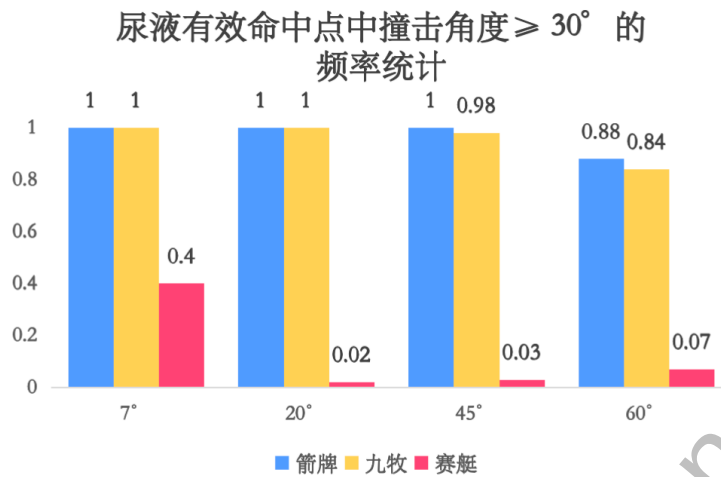


图 21：尿液有效命中点中撞击角度 $\geq 30^\circ$ 的频率统计

由角度频率分布图的数据整理，得出对照组和实验组的尿液有效命中点中撞击角度 $\geq 30^\circ$ 的频率统计图（见图 21）。由图可知在各个参数下，对照组的尿液命中点处的撞击角度，几乎全部大于飞溅阈值 30° 。对比之下，实验组大部分撞击角均小于阈值 30° 。

而撞击角度小于 30° 时，飞溅量相较于最大飞溅量会减少 95%^[41]。本研究设定撞击角度 30° 为飞溅阈值，超过 30° 则认为飞溅较多（见 1.3.6），由尿液有效命中点中撞击角度 $\geq 30^\circ$ 的频率统计图可知，实验组几乎不产生飞溅，而对照组则会产生大量飞溅量。

实验组的分布图显示，有极少量面的撞击角接近 60° ，这是由于尿流刚好击中赛艇的正中轴。本研究在中轴设计的微分曲线就是恒满足撞击角度是 60° 。综上所述，实验组的撞击角度明显小于对照组，印证了第二章设计中的猜想，为下面测量飞溅量提供了支撑。

第四章 流体仿真计算

4.1 数值仿真目的

流体力学研究有三种方法，理论、实体实验和数值仿真。前文已经依据理论进行分析设计了新型蹲便器。实体实验可以用来准确的探究新型蹲便器尿液飞溅量是否比当前常用蹲坑更少。但是需要花费很多时间和金钱。同时实体实验无法避免客观条件的限制，数据采集较为困难。所以本研究在实体实验之前通过仿真得出不同蹲便器的飞溅比例，初步验证新型蹲便器相较于市售蹲便器溅尿量更少，同时更便利地获取想要的的数据。

4.2 模型建造与流域设置

仿真模型由三个部分组成：蹲便器模型、蹲便器上空的计算域和喷头。本实验在对照组和实验组上空建立长宽均大于蹲便器的长方体。长方体底部是与蹲便器上侧表面平齐的地面。尿道口在长方体中上部，出尿处在长方形内部。喷头、长方体与蹲便器合并为流域。蹲便器和喷头为刚性壁面。

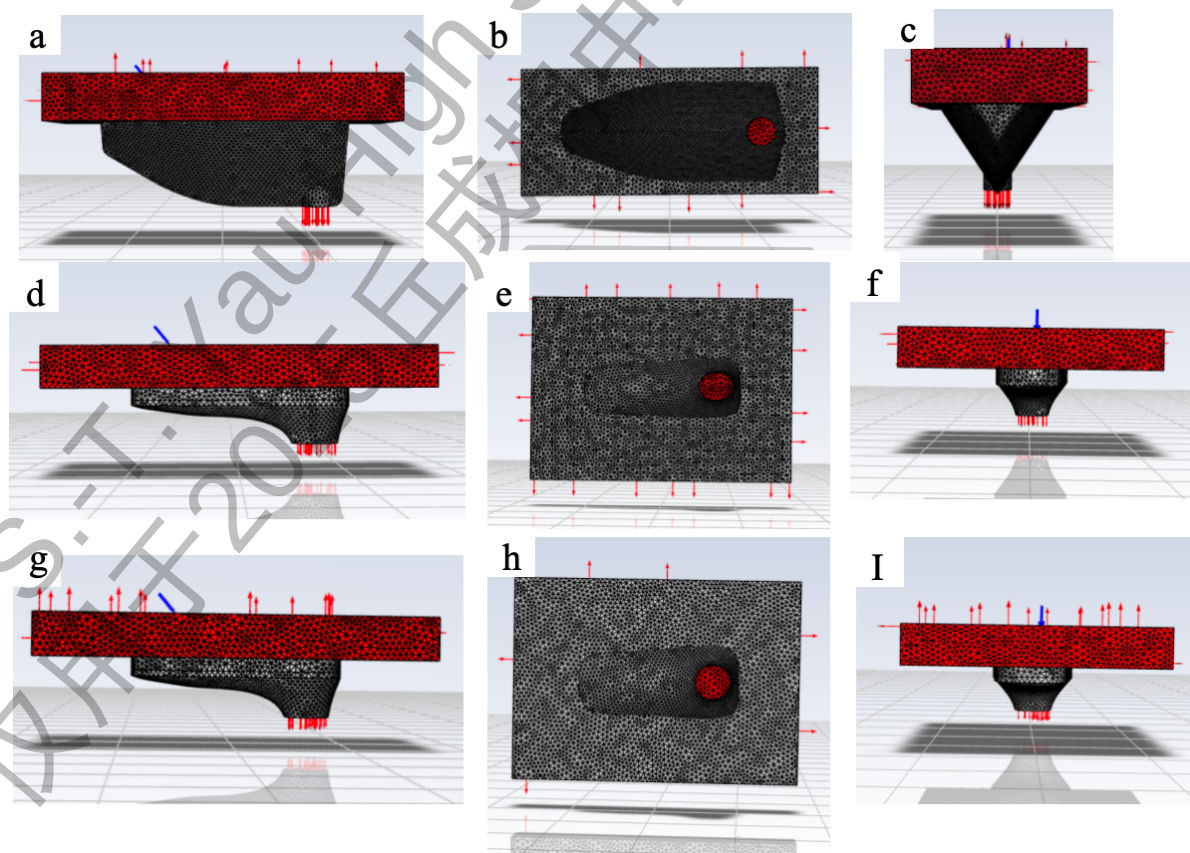


图 22 (a-c): 赛艇仿真模型；(d-f): 箭牌仿真模型；(g-h): 九牧仿真模型

喷头采取直径为 5mm 的圆形模拟尿道口，作为整个模型的入口。如第二章设计中所说，由于女性尿道口初始角度在 7° 到 70° 之间^[51]，喷头采取偏向中间值的 45° 作为初始角度。同时考虑到实际排尿情况，精确对准中轴排尿的概率太小，因此喷头偏离中轴 2cm。入口处选用速度入口，使用导出的数据点组成的 prof 文件，实现入口流量随时间变化，真实模拟尿液排出的生理过程（见图 22）。出口为压力出口，设在长方体除去地面和天花板的部分，以及蹲便器出口处。

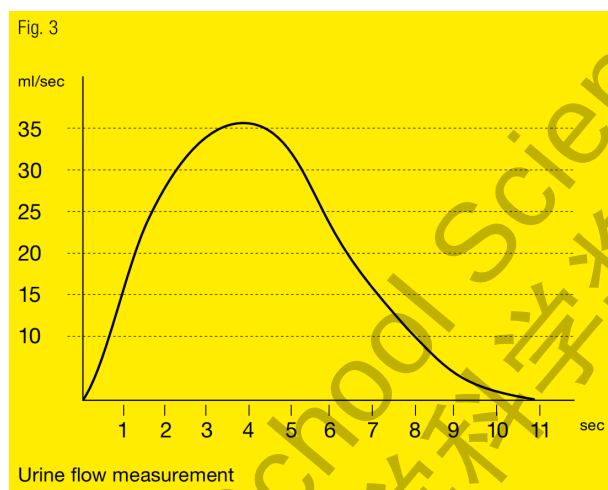


图 23 尿液体积流量随时间的变化图像^[51]

壁面选用 wall 类型，也就是即限制流体不能穿透壁面。设置无滑移边界，也就是粘性液体在固体表面一层的速度为 0，与上层液体由于速度不同而产生剪切应力。采用标准粗糙度模型。由于本研究研究液体飞溅问题，撞击平面时液滴产生铺展，需要考虑到剪切应力，因此选用无滑移边界是合理的。

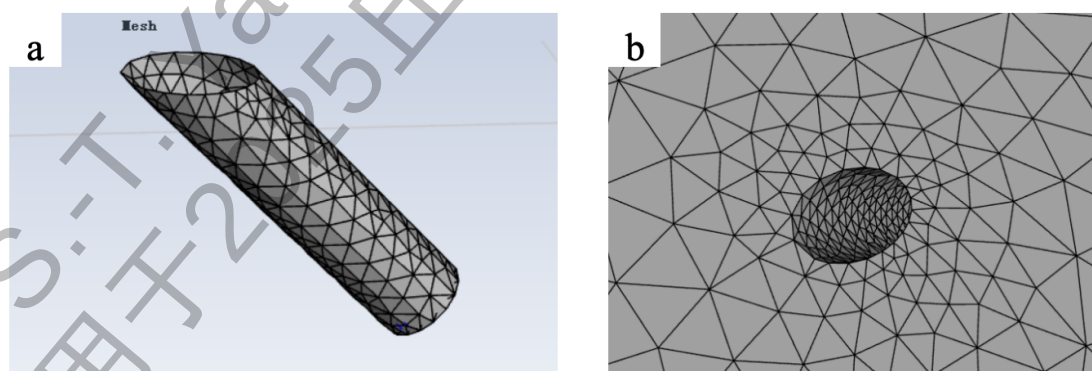


图 24 (a): 仿真喷头建模; (b): 喷头处加密网格

外尿道口（external urethral orifice）周围的软组织，不明显阻碍排尿时尿液的流动。因此为了减少网格数量、节省计算成本，本模型忽略尿道口以外的人体组织。

4.3 划分网格

4.3.1 离散化

离散化的这三种形式最为常见：有限元法（FEM）、有限差分法（FDM）和有限体积法（FVM）。有限元法划分计算域为小单元并用分段函数逼近解，有限差分法用相邻离散点的函数值之差来近似表示导数。

而本研究选取最适合流体问题的离散方式“有限体积法”。它将计算域划分为控制体积，基于控制方程对所有控制体积积分，得到离散方程。控制体积可以是非结构网格，离散基于积分守恒保证质量不会凭空出现或者消失，对于求解 CFD 问题帮助很大。

计算边界面通量时，可以采取不同的变量差值方式，包括一阶迎风格式、二阶迎风格式和 QUICK 格式。由于一阶迎风格式的离散方程数值耗散大滑，而 QUICK 格式计算复杂，对存储要求高，加上本研究基于蹲便器空间网格离散的要求划分网格时采用的是非结构化网格。本文的离散格式采用二阶迎风格式。

4.3.2 网格划分方法及质量

本研究利用 Fluent Meshing 划分计算网络。划分网格时使用渐进式网格。为了更高效地实现精确计算，在喷嘴处局部加密。局部加密处的网格增长率为 1.1。最小网格尺寸 0.1mm。这样的尺寸既满足模型有效拟合的结果，也满足了计算速度和效率。喷嘴处面网格划分情况如图 23 所示。

四面体网格是根据面网格生成的，选择非结构化网格（见图 24-26）。

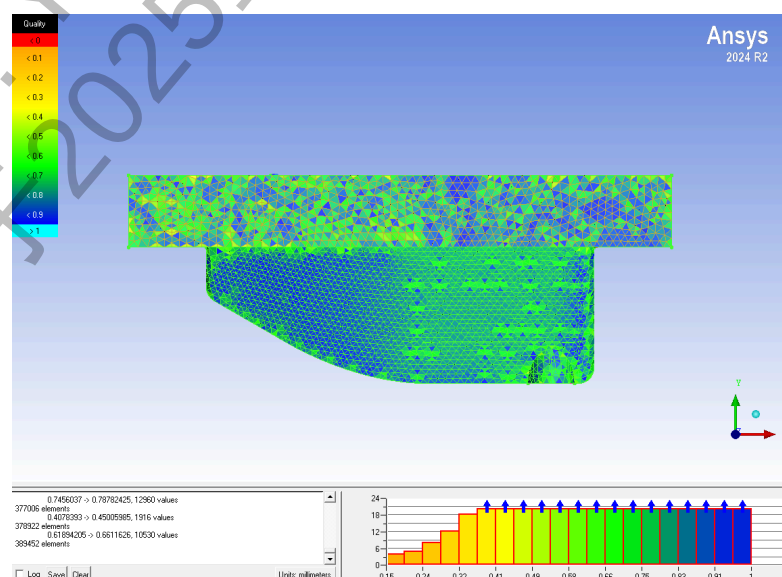


图 25 实验组网格质量分布图

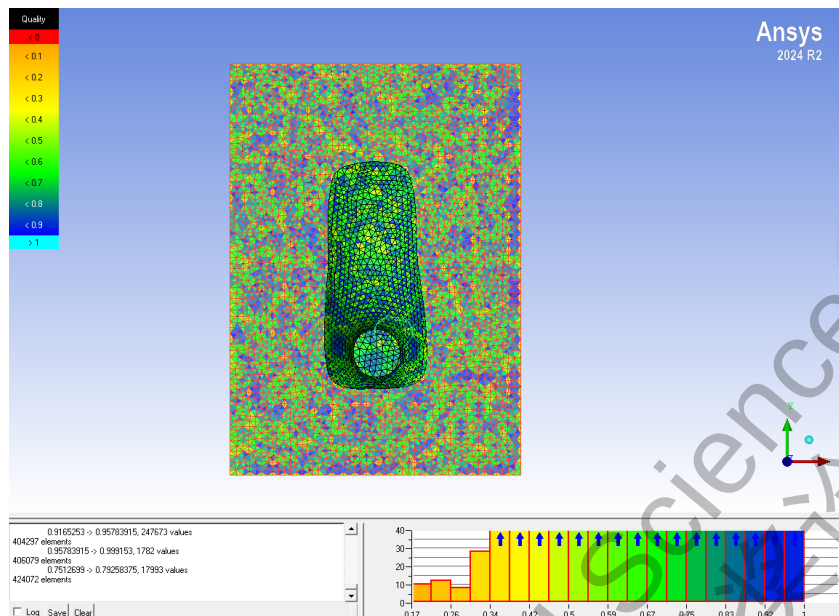


图 26 对照组箭牌网格质量分布图

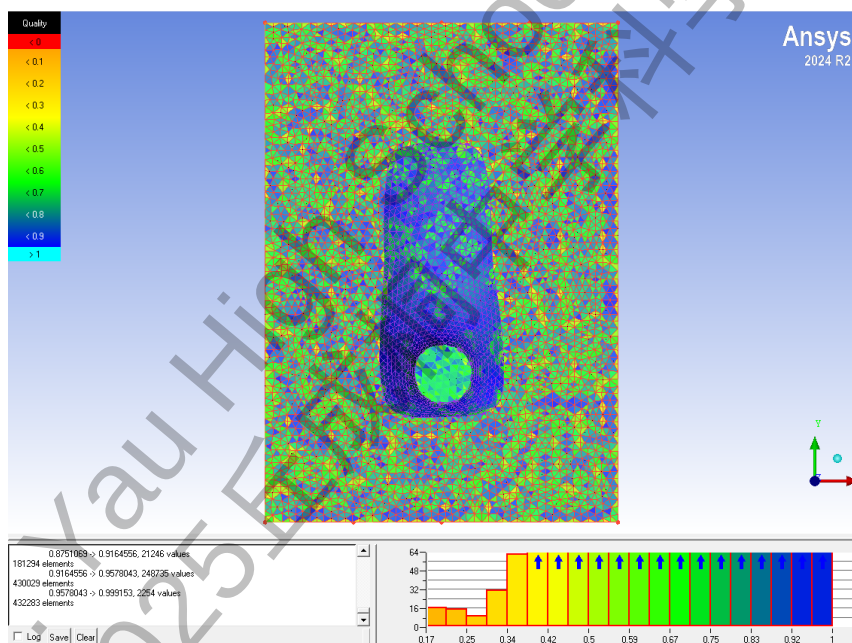


图 27 对照组九牧网格质量分布图

网格正交质量反应网格的好坏，其范围在 0 到 1 之间，越接近 1 说明网格质量越高。本研究平均网格正交质量约为 0.87，认为网格质量较好（见表 1）。

	对照组箭牌	对照组九牧	实验组赛艇
平均正交质量	0.841103	0.851837	0.870169
最好正交质量	0.999153	0.998679	0.998927

表 1 对照组和实验组网格正交质量表

4.3.3 网格无关性验证

由于网格数量或多或少会影响计算结果,网络无关性验证有助于保证仿真结果的精确性和客观性。本研究选取箭牌对照组的工况开展网格无关性验证,分别划分约 113.2 万网格、92.1 万网格和 62.3 万网格作为 mesh1, mesh2 和 mesh3。对比不同网格划分下的飞溅比例,结果如下。

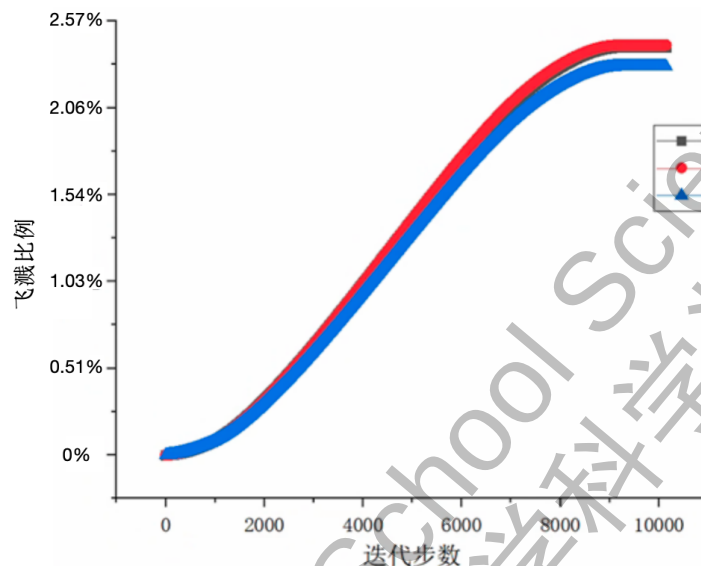


图 28 网格无关性验证

可见 92w 网格和 113w 网格下箭牌蹲便器的飞溅比例基本相同,可见目前的 92w 网格划分足够满足对飞溅比例的计算。据此合理推断其他模型也通过了无关性验证,并认为原网格数量足够支撑本研究的研究目标——对比对照组和实验组的飞溅比例。为了在保证精度的情况下提高计算速度,其他两种蹲便器均采用 mesh2 的网格密度进行仿真计算。

4.4 数值模拟仿真构成

Fluent 是目前世界顶尖 CFD 软件。它不仅支持网格的能力极强,支持界面不连续网格、混合网格、动/变形网格以及滑动网格等,还有基于解的网格自适应技术。同时它还具备先进物理模型,本实验采用标准 k- ϵ 湍流模型组,模拟在边界层附近的湍流影响。

4.4.1 控制方程

Fluent 仿真的计算，都是基于控制方程：连续方程、动量方程和能量方程。它们分别是质量守恒、牛顿第二定律和能量守恒的数学表达。对于本研究模型应用三大定律，得到守恒型偏微分控制方程。

第一，本次仿真运用流体流动的连续方程来计算。根据质量守恒定律，设流出控制体表面的净质量流量为 $A = \iint_S \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS$ ，其中 S 是控制体的表面， $\mathbf{u}$ 是速度向量， $\mathbf{n}$ 是外法向单位向量， $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$ 即为速度在法向方向上的分量， $\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$ 即为法向方向的质量通量密度。速度在控制体内质量随时间减小量为 $B = -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV$ ，其中 t 是时间， ρ 是流体密度， V 是控制体体积。因此 $\iint_S \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV = 0$ 。接下来需要将积分方程转为微分方程，保证有限控制体内部连续。

由于流动模型是固定于空间的有限控制体， V 不变，因此式子改为：

$$\iint_S \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS + \iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = 0 \quad (16)$$

根据高斯定理，对空间内每个三维体积积分，等于对其表面曲面进行积分。设 u , v , w 分别为 x , y , z 方向上的速度分量。 $\mathbf{n}$ 为单位法向量，得到

$$\iint_S \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS = \iiint_V \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dV \quad (17)$$

将速度转换为质量流量，将面积分项改为体积分项，引入哈密顿算子，得到

$$\iiint_V \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) dV + \iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = 0 \quad (18)$$

要使得方程等于 0。被积函数就得等于 0，得到连续性方程：

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

对于不可压缩液体，密度不随时间变化，因此得到流量守恒方程，可见不可压缩液体中速度散度为 0，即流动的通量没有净产生或净消失：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

第二、本研究涉及到粘性流动，所以控制方程还需要包括粘性模型。狭义上的 N-S 方程为动量方程：

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = \rho \mathbf{f} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (21)$$

其中 p 为控制体受到的静压力, f 为单位质量力, μ 是流体动力粘度。方程在 x 轴上的分量形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] + f_x \quad (22)$$

其中 f_x 是质量力在 x 轴的分量。

早期选用直接数值模拟 (DNS) 试图求解 N-S 方程。它的精度虽然高, 但是对算力要求过大。于是雷诺提出雷诺平均模型 (RANS) 以简化计算, 即认为瞬时值等于平均值加脉动值, 只求解平均流动。其求解成本较低, 适用于简单飞溅问题。而大涡模型 (LES) 只求解大尺度涡旋, 将小尺度涡旋转换成湍流应力, 不适合本实验研究的液体飞溅问题。因此本实验选用 RANS 进行数值模拟:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (23)$$

新出现的一项 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 被称为雷诺应力张量。涡黏模型可以模拟湍流 (见图 28), 具体可见 4.4.2。

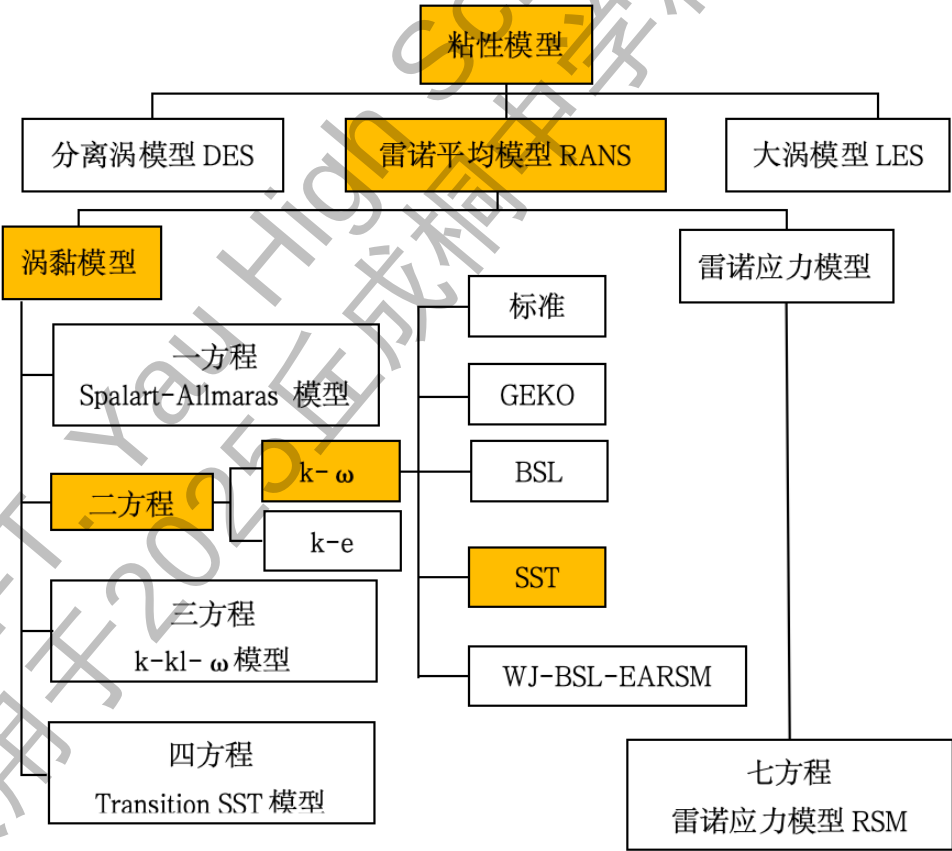


图 29 粘性模型分类

第三、由于本研究涉及到运动的气体和液体两种相, 需要涉及多相流模型

(Multiphase)。“相”在这里指的在与流场和势场相互作用中表现出不同的运动方式的一种物质。多相流可分为气液流或液液流；气固流；液固流动；和三相流。本研究针对连续气体中离散液体，属于气液流。为了计算多相流数值，可以采用欧拉-拉格朗日方法，或者欧拉-欧拉方法。前者认为一些相是连续体，其他相是离散体，离散体用拉格朗日追踪运动轨迹（也就是 DPM 方法）。而后者认为每个相都是连续体，互相间可以穿透，单元格内体积分数总和为 1。本实验为了清晰看到液柱变形成单个液滴飞溅的过程，选择非离散化的欧拉-欧拉方法^[54]。

4.4.2 湍流设置

在 RANS 基础上，本研究选择二方程标准 k-ε 模型进行湍流计算。布辛涅司克参考牛顿内摩擦定律，提出指导涡黏模型的雷诺应力公式

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (24)$$

其中 k 是湍流动能。此时未知数是动态粘度 μ 和 k。 μ 可以用湍流运动粘度 ν_t 乘密度表示。布辛涅司克假设，

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (25)$$

其中 ε 是湍动能耗散率， C_μ 为经验常数，常取 0.09。此时要求的未知数变为 ε 和 k。它们通过以下方程求解：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u_i} \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_i \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} - \varepsilon \quad (26)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u_i} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (27)$$

其中 C_1 , C_2 为经验常数，分别为 1.44 和 1.92。 σ 是湍流扩散系数， σ_1 和 σ_2 凭借经验，取 1.0 和 1.3。这样就能求解出离散的 N-S 方程^[55]。

本研究为了节省算力，且不涉及壁面流动，因此没有设置边界层，不采用适合分析边界层流场的 k- ω SST。k- ε 模型已经能够较好模拟液体飞溅。

4.4.3 多相流模型

多相流模型主要有 VOF 模型、Mixture 混合模型和欧拉模型。其中 VOF 在固定的欧拉网格中通过体积分数描述不同流体的界面，只能使用压力基求解。混

合模型假设不同相间速度差异不大, 建立一个共同的动量方程描述混合流体的运动, 计算量最小, 但最不精确。欧拉模型为每个相都建立动量方程和连续方程, 耦合压力相和各界面交换系数。本实验探究不同网格中尿液所占体积分数, 因此采用 VOF 模型, 其对算力要求适中。

VOF 模型设定体积分数 a 为目标流体占据网格单元的体积比 ($0 \leq a \leq 1$)。相之间界面的跟踪是通过求解体积分数的连续性方程完成的。对于相 q^h 位, 方程为:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (28)$$

其中 $\dot{m}_{pq}$ 代表从 p 到 q 的质量流率, $\dot{m}_{qp}$ 代表从 q 到 p 的质量流率^[54]。

在选择体积分数形式时, 显式形式数值精确度更高, 但是能运算的时间不长更小。对算力要求过高。因此选择隐式形式, 采用一阶时间离散格式, 调用隐式体积力进行计算。由于一个相里的体积分数依赖于这个相里其他变量的函数, 需要通过迭代方式求解这种耦合方程。

4.4.4 材料属性

本研究没有运动的固体材料, 壁面用来约束计算域。仿真只涉及到空气和尿液两种流体。根据文献, 尿液在流体仿真中可被认为是牛顿流体, 不可压缩且介质均匀^[56]。其动态粘度 μ 恒为正常体温下的尿液粘度 $0.0008439 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ^[57], 密度取 1017.5 kg/m^3 ^[58]。空气取 Fluent 中默认的粘度 1.7894×10^{-5} , 密度 1.225 kg/m^3 。

4.4.5 求解器设置

边界条件以及出入口设置详见 4.2。Fluent 对于不可压缩液体使用压力基求解器, 它包含 SIMPLE、SIMPLEC、PISO 和 Coupled 等其他压力-速度耦合算法。其中 SIMPLE 算法应用最为广泛, 采用猜测-修正的过程, 交错网格的基础上来计算流场, 从而达到求解。本研究采用 SIMPLE 算法。同时由于本实验重点在使得流场随时间的变化变得可视化, 因此计算方式选用瞬态计算。

4.4.6 初始化

Fluent 是通过迭代对方程进行求解的，给出迭代的第一组值就被称为初始化。初始化的值会影响到收敛状态的迭代次数。初始化主要有标准初始化和混合初始化，前者认为整个场的初始值是均匀的，后者通过求解拉普拉斯方程来提前迭代速度场和压力场。由于标准初始化可以直接设置从入口处开始计算流场，且本身已是瞬态计算，因此选用标准初始化即能满足需求。

4.4.7 时间步长与迭代次数

采用瞬态计算，假如时间步长设置过大，则加快计算速度但降低收敛性；假如时间步长设置过小，则计算速度明显降低。更为理想的情况是求解比较精细时使用较小的时间步长，计算接近稳态时使用较大的时间步长。因此本实验采取自适应时间步长（Adaptive），最初时间步长为 1×10^{-5} 秒。方法采用 Multiphase-Specific，控制库伦数为 2。库伦数表示的是，在一个时间步 Δt 内，流体运动距离 $u\Delta t$ 不应超过网格长度 Δx 。其表达式是：

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (29)$$

其中 u 指的是流体局部速度。本研究设置每隔 1 个时间步输出一次计算结果。

4.5 结果分析

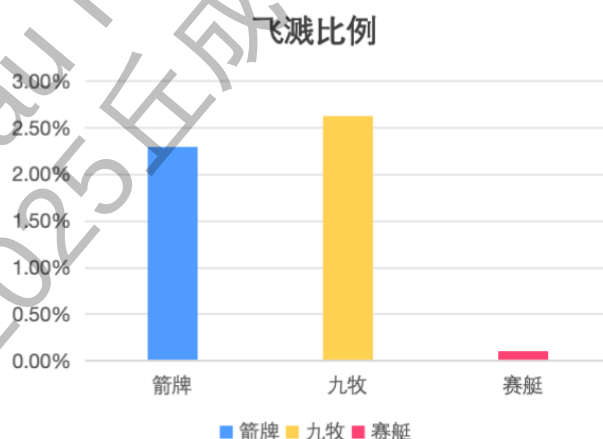


图 30 对照组和实验组飞溅比例的仿真比较

飞溅比例指从蹲便器向上飞溅的溅尿量占总排尿量的比例，用于衡量溅尿问题严重程度。仿真结果表明，对照组的尿液飞溅比例显著高于实验组。九牧飞溅比例最高，约为 2.6%，箭牌次之，飞溅比例约为 2.3%。而赛艇飞溅比例最低，

不到 0.5%。结果表明，赛艇赛艇蹲便器在抑制尿溅上有明显优势。

通过成本较低的流体仿真，本研究初步印证了赛艇蹲便器的结构设计能够显著改善溅尿问题。尽管数值仿真在低成本下模仿了尿液飞溅，但是它不足以完全复刻真实场景的条件。因此，为了进一步印证结果的可靠性，验证在真实环境下赛艇蹲便器有显著改善效果的猜想，本研究继续进行实体实验。

第五章 实体实验验证

本实验初步通过 Matlab 绘制角度图和数值仿真的方法，成功验证了基于微分方程设计的新型蹲便器结构有良好的抑制飞溅效果。在此基础上，本研究开展成本最大、最接近真实使用环境的实体实验，以在实际使用条件下验证新型蹲便器抑制溅尿的效果，确保真实反应其性能表现。

5.1 实验思路

将撞击角和飞溅阈值的理论运用于蹲便器的领域尚为空白。为在真实排尿环境确认“赛艇”状新型蹲便器确实有抑制溅水效果，本研究进一步开展实体实验。

本研究将“赛艇”状新型蹲便器用 3d 打印的方式制作出实体。为了控制接触面材质一致，本研究在实验组和对照组模型表面上同时喷漆。同时，本研究对水泵进行编程设置，使得其喷水的速度严格仿照真实环境中随时间变化的尿速。

搭建好实验设备后，本研究先后进行了定性和定量的实验。首先用紫光灯侧面拍摄荧光尿液空中飞溅，对比对照组和实验组在排尿同一时间时的飞溅图像。其次在蹲便器周围铺白纸，循环十次排尿后拍摄红墨水尿液在白纸上留下的飞溅图像。最后在蹲便器周围铺白纸，累加十次排尿后测量白纸前后质量变化来反应飞溅量，每个尿道口高度参数记录十次数据点。并通过统计学方法（t 检验和 Mann - Whitney U）来分析数据。

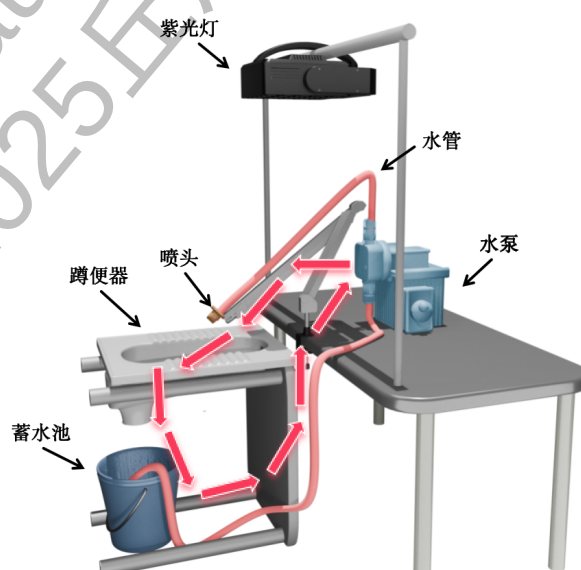


图 31 实验装置 Blender 建模示意图

5.2 实体设备搭建

5.2.1 3D 打印和喷漆处理

为了完成实体实验，本研究需要将 Solidworks 中建模的蹲便器模型 3D 打印出来。

制作“赛艇”状新型蹲便器时用了 SLA 光固化打印技术，也就是先把 stl 模型切割成许多薄片，然后每层连贯使用紫光灯照射液态树脂使其变成固态。随后为了更好地聚合内部树脂，需要对模型进行后固化，也就是进行二次紫光灯照射。最后在模型表面喷涂白色面漆和保护漆。



图 32 “赛艇”状新型蹲便器 3d 打印实体

对照组蹲便器属于瓷质卫生陶瓷产品，国家规定所有裸露表面必须有釉层覆盖^[59]。考虑到飞溅过程中材质表面的接触角是溅水的关键变量，应该控制不变，因此 3D 打印出的蹲便器表面接触角应该跟带釉陶瓷一样。但是直接打印 3D 打印陶瓷模型需要开模等过程，成本上万，性价比较低。因此本研究选择将对照组和实验组模型表面统一喷涂接触角接近带釉陶瓷¹的丙烯酸清漆²。

5.2.2 水泵设置和喷头选择

由于正常的尿液体积流量随时间变化的曲线呈现钟形流动曲线 (bell-shaped flow curve)，而非一成不变的单一体积流量，而体积流量显著影响撞击区域和面积。为了模拟出真实排尿场景，本研究实体实验中水泵泵出的“尿流”完整模拟一次排尿的流量变化（见图 32）。本研究依据从文献中整理的尿液流量曲线提取

¹ 文献中对照组的陶瓷表面接触角为 60 度 错误!未找到引用源。

² 丙烯酸 PMMA 与纯水的静态接触角为 64.7 度^[61]

的数据点（见图 22），使水泵的体积流量每 0.1s 变化一次，一共设置 110 个点。从中可知一次排尿总时长为 11s，平均体积流量约为 17.8ml/s，最大瞬时流量为 35.5ml/s，到达最大瞬时流量约花费 4s，通过梯形法将流量对时间积分可知总尿量约为 194.6ml。



图 33 水泵调节流量界面

研究表明尿道口呈非对称形状的椭圆形，使射出的流束不再是理想的圆柱，而是带有波纹或摆动的形态^[62]，不稳定性显著影响了尿液飞溅行为。女性外尿道口横截面呈现“短纵裂”形状，是一个长度约为 5-6mm 的前后槽^[63]。因此本研究最终找到呈扁平鸭嘴状的硅胶鸭嘴阀。当内部流体压力达到开启阈值时阀口沿中缝向两侧张开，且硅胶质地柔软，模拟尿道口排尿时的形状。

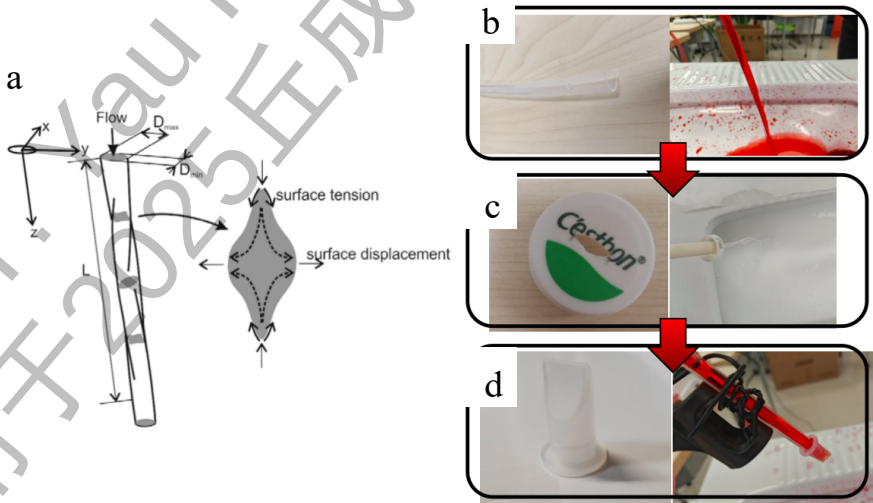


图 34 (a): 椭圆形尿道口形状^[62]; (b-d): 喷嘴迭代过程

5.2.3 整体装置构建

本实验在暑假中学校提供的多功能教室进行。第一步需要将蹲便器和“假想地面”抬高到离地一定高度，既方便在排污口下搁置水桶，也方便实验人员开展飞溅实验。同时本实验将水桶对准蹲便器排污口接住留下的水，同时水泵管子在水桶中搁置，形成泵水系统自循环，中间无需实验人员反复往水桶中加水，大大提高实验效率（见图 34）。

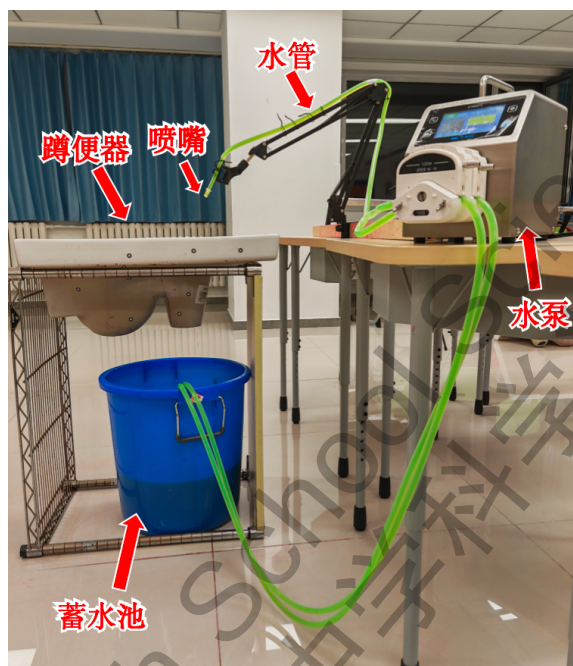


图 35 实物装置图

本实验中，正立的教室桌面为抬升的“假想地面”，教室桌子侧面放倒后可以将对照组蹲便器抬升到“假想地面”的需求，但无法满足实验组蹲便器的规格。本实验利用快递包装箱、箱子中的泡沫以及脚手架等材料，手工制作了可以镶嵌“赛艇”状蹲便器的箱子。

第二步需要调试尿道口位置和初始角度。本实验在 5mm 半径的硅胶软管前端连接由签字笔笔杆优化而来的塑料硬管子，再连接硅胶鸭嘴阀作为喷嘴，组成尿路。根据文献，女性初始尿道口角度为 7° 到 70° ^[51]，实体实验中主要选取最小值 7° 、 45° 和最大值 70° 三个典型初始角度作为实验条件，进行飞溅实验。

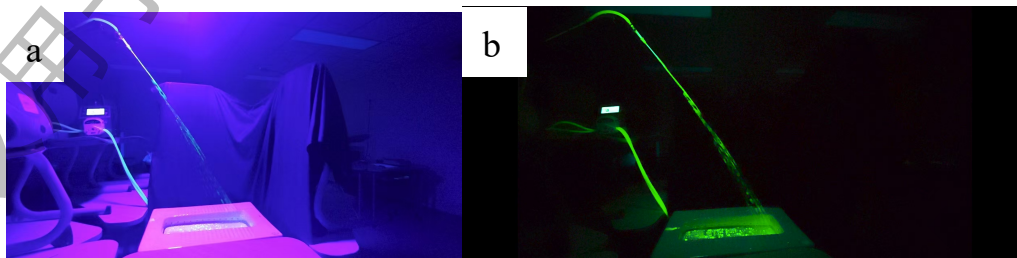
为了便于调节尿道口距离“假想地面”的高度和距离蹲便器中轴的距离等，需要将“尿路”绑定在可调节高度且可弯曲的硬杆上。本研究选取具有三段可自由调节角度的悬臂式麦克风夹进行“尿路”绑定，麦克风夹夹在一根直木横梁上，软管和硬管采用钢丝进行固定。为了防止横梁因为重心不稳而前俯，后续在横梁两端添加重物。

第三步是对水桶中的水进行加盐和加热的进一步处理，更加模拟真实尿流，使结果更加精确客观。查询文献得知尿液粘度 $0.0008439 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{[57]}$ ，尿液密度为 1.005 到 $1.030^{[58]}$ 。通过表格得知水的盐度为 3% ，温度为 30°C 时，其粘度为 $0.000851 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{[64]}$ ，密度为 $1.018 \times 10^3 \text{ kg/m}^3^{[65]}$ ，基本与尿液真实情况一致。因此实验过程中，先对水桶中的水去皮称重，得到质量为 a 克，设加盐 x 克，代入方程式进行计算，从而得到盐的质量。在精度为 0.01g 的实验室电子秤上得到等质量的盐后，将它们倒入水桶并均匀搅拌³。搅拌后使用带温度探头的控温电子加热棒，将桶内盐水加热到 30°C 。这样加热后的盐水可以非常好地模拟真实尿流，进行后续的实验。

5.3 荧光剂

本研究首先通过紫光灯照射荧光剂尿液，侧面拍摄液滴在空中的瞬时飞溅，定性地对比对照组和实验组的飞溅行为。

为了清晰拍摄空中飞溅图像，本研究尝试可用于污水追踪剂的绿色荧光剂。此荧光剂以荧光素钠为主要成分，这是一种广泛应用的荧光染料。为了保证紫光灯清晰照射飞溅过程，本研究将紫光灯绑在伸缩杆上，杆子搭在两个椅子之间，达到照射需求。为了强调荧光剂效果，本研究在手机镜头上添加 58mm 的绿色荧光片（见图 35），并在蹲便器周围添加黑布（见图 36）。女性参数下，喷嘴高度距离桌面 7.9cm ，由于尿道口初始角度范围为 7° 到 70° ，因此分别采取初始角度 7° 、 45° 和 70° 进行实验。同时，考虑到男女共用厕所中男性站立向小便池中排尿的少数情况，本实验同时完成对男性参数的实验。调整代表男性尿道口的喷嘴距离蹲便器上沿 $864\text{mm}^{[53]}$ ，在蹲便器后沿上空，保持初始角度为 45° 。两种参数下，考虑到精确对准中轴排尿的概率太小，每次实验尿道口均偏离中轴 2cm 。



³ 后续在做荧光剂和红墨水的实验时，均先向水中加荧光剂和红墨水，再称重计算盐的质量

图 36(a): 镜头未加绿色荧光片的图像; (b): 镜头加上绿色荧光片的图像



图 37 荧光剂装置图

本研究通过录像并后期慢倍速截图的方式，每组角度下均截取模拟排尿的第 3 秒进行截图，整理得到如下表格。

	箭牌（对照组 1）	九牧（对照组 2）	赛艇（实验组）
7°			
45°			
70°			
男性 参数			

图 38 荧光剂飞溅对比表格

从荧光剂实验的侧面截图可以清晰地看出，在总喷射时间相同时，女性参数 7°、45°和 70°的初始角度下，以及男性参数下，对照组侧面拍摄到的飞溅液滴均显著多于实验组。说明实验组在抑制飞溅上表现优于对照组。

5.4 地面飞溅图案

本研究在定性对比中不仅通过竖截面观察飞溅情况，还希望通过横截面对比对照组和实验组的飞溅范围和飞溅量，从而印证实验组有良好抑制溅尿效果。



图 39 飞溅图案装置图

本研究选择红墨水作为液体模仿“尿液”，同时使用不易渗墨的 A1 白色绘图纸铺展在实验桌上。与荧光剂实验相同，本研究分别采取女性参数和男性参数进行实验。本研究在拍摄每种蹲便器的每个角度的飞溅图像前，都循环十次水泵的每个运行周期。也就是说，拍摄出的图像模拟的是蹲便器被人类排尿十次后地面的飞溅情况（见图 39）。这是由于 1 次排尿周期后的图像不具有普遍性，误差较大。累加 10 次排尿周期后可以提高实验结果的可靠性，真实地反应日常生活中的飞溅状态。

循环十次后立刻正上空拍摄。随后经过 Photoshop 软件的“选取颜色范围”分离红色和其他颜色，其他颜色统一成蓝色背景，红色的飞溅尿滴在地面上的痕迹改成更醒目的绿色呈现。为避免和飞溅液滴的痕迹混淆，蹲便器原来的位置变为灰色，并在上面粘贴空白蹲便器做示意（见图 40）。



图 40 地面飞溅图像（处理前）

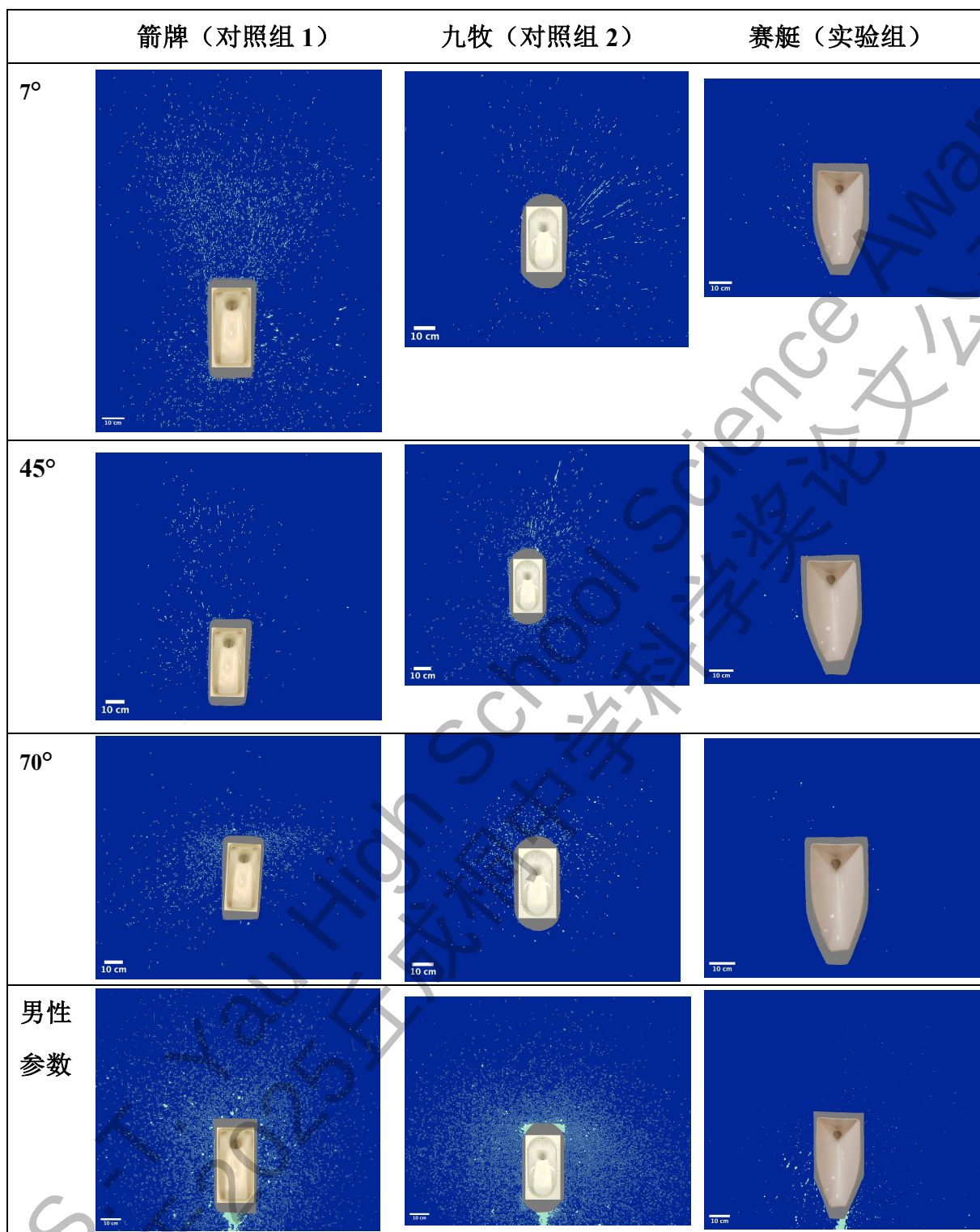


图 41 地面飞溅图像对比图

从横向拍摄的地面飞溅图像可以清晰看出不同实验条件下尿液飞溅在地面上的痕迹的分布特征。在女性参数下初始角度为 7°、45°和 70°，以及男性参数的实验条件下，箭牌和九牧对照组的绿点标记基本从蹲便器呈现向外放射状分布，绿色均覆盖较广、大小不一，且数量众多。

相比之下，在所有实验条件下，赛艇实验组的绿色痕迹只零星表现在极为靠近蹲便器的地方，数量极少，分布零散，覆盖面非常有限，几乎没有向外扩展的趋势。可知实验组地面绿点的覆盖面积和密度均明显小于对照组。由于绿色代表飞溅尿液在地面上的痕迹，从地面飞溅图像可以清晰直观地看出，实验组相对于对照组，具有优越的抑制溅尿效果。

5.5 定量测量溅尿质量

除了定性判断实验组具有抑制飞溅的效果以外，本研究还通过定量计算出 10 次排尿周期累加后对照组和实验组的溅尿质量，比较差异并进行统计学分析，使得结果在数值上清晰呈现，验证实验组在抑制溅尿方面的有效性。

实验过程中，在蹲便器周围相同高度铺上 A1 白色绘图纸，通过称量喷溅前后 A1 纸的质量差得到飞溅质量。为了尽可能减小实验误差，防止飞溅的液滴在称量前蒸发，需要使水汽压尽可能接近饱和水汽压，但需防止水蒸气凝结成液滴干扰测量。本研究通过两台加湿器、三壶烧水壶以及一个烧开水的电磁炉，同时关闭室内空调阻止冷凝水，关闭门窗降低室内空气流速，将称量实验中的湿度上升至 75% 左右。此湿度数值通过工业湿度计测量得出，这样的湿度下大幅水滴蒸发速率将大大减小^[66]。

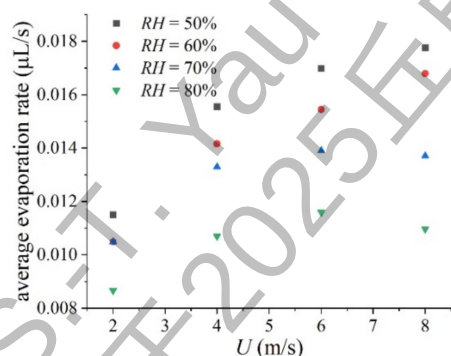


图 42 水滴蒸发速度随湿度变化图^[66]



图 43 电磁炉烧开水提高水汽压

与 5.3 中参数相同，为了考虑全面排尿情况，本实验分别采取女性参数下和男性参数进行实验，先称量空白 A1 纸的质量，循环十次水泵运行周期后再次称量 A1 纸质量，得到质量差。每组蹲便器每个角度循环试验，得到十次质量差。数据表格见附录七。

品牌	7°	45°	70°	男 864mm, 45°
箭牌	2.873	1.853	2.638	6.402
九牧	2.501	3.045	9.771	12.906
赛艇	0.586	0.409	0.476	1.478

表 2：10 次循环周期下尿液飞溅质量平均值表格（单位：克）

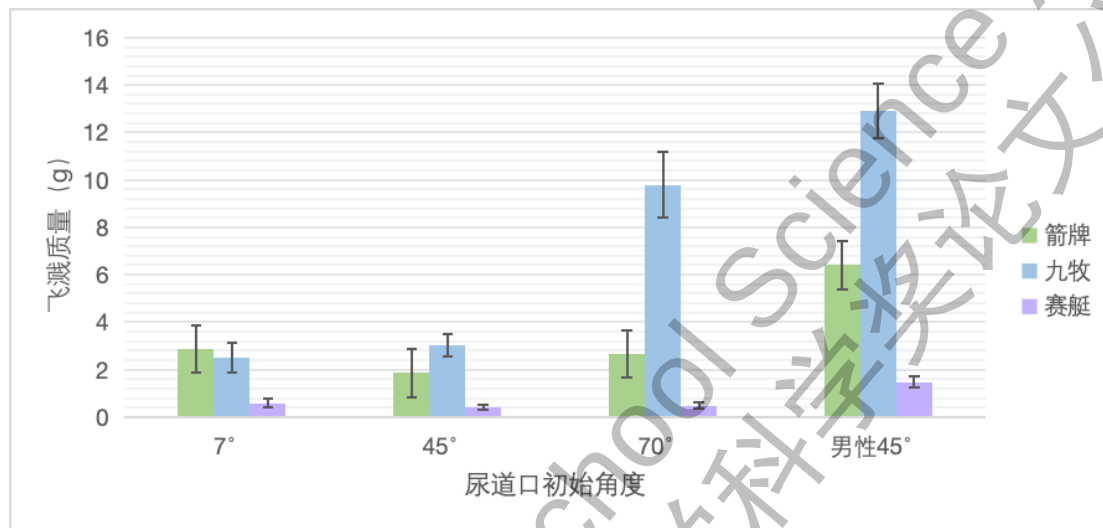


图 44 飞溅质量对比图（平均值±SD）

由尿液飞溅质量整理飞溅质量对比图，可以清晰地看出在哥哥实验条件下，赛艇实验组的飞溅质量均明显小于箭牌和九牧对照组。由 10 次循环后的定量飞溅质量结果（见表 2）可以看出，在女性参数下初始角度为 7°、45°和 70°时，“赛艇”蹲便器的平均飞溅质量分别约为箭牌蹲便器的 20.56%，22.16%和 18.18%，约为九牧蹲便器的 23.60%，13.44%和 4.91%。在男性参数下，“赛艇”蹲便器的平均飞溅质量约为箭牌蹲便器的 23.13%和九牧蹲便器 11.46%。整理得出，实验组至少相较于对照组减少了 75%的溅尿量，说明“赛艇”蹲便器对于抑制溅尿有着极大的作用。

本研究发现 70°的初始角度下，九牧飞溅量明显提升。观察后本研究认为这是由于在这个初始角度下尿液刚好击中排污管内储存的液体。事实上当液体呈离散液滴击中水面时，飞溅会明显比液体击中固体表面时更大^[67]。本研究设计的赛艇状新型蹲便器在基本覆盖真实情况的实验条件下，尿液排出过程中均不会击中排水口，从而避免尿液击中液面出现更多飞溅。

5.6 统计分析数据

为了验证从数据中得出的结论，也就是“赛艇”蹲便器在抑制溅尿上显著优于箭牌和九牧两组对照蹲便器，本研究进行了假设检验。由于本实验不涉及到分类组别，均为连续数值数据，因此不采取卡方检验。由于本实验的目的在于将对照组和实验组对比，不涉及到箭牌和九牧的对比，因此不采取 ANOVA+Tukey，直接对正态分布的样本采取 t 检验进行两两对比，并通过计算 Cohen's d 效应量。得出差异的幅度。为了避免“假阳性”，随后采取 Bonferroni 检验进行多重检验，验证 p 值的显著性。

对于未能通过正态分布检验的样本，采取 Mann - Whitney U 独立样本检验进行对照组和实验组的对比，并计算秩二列相关以得到数据分布差异的幅度。

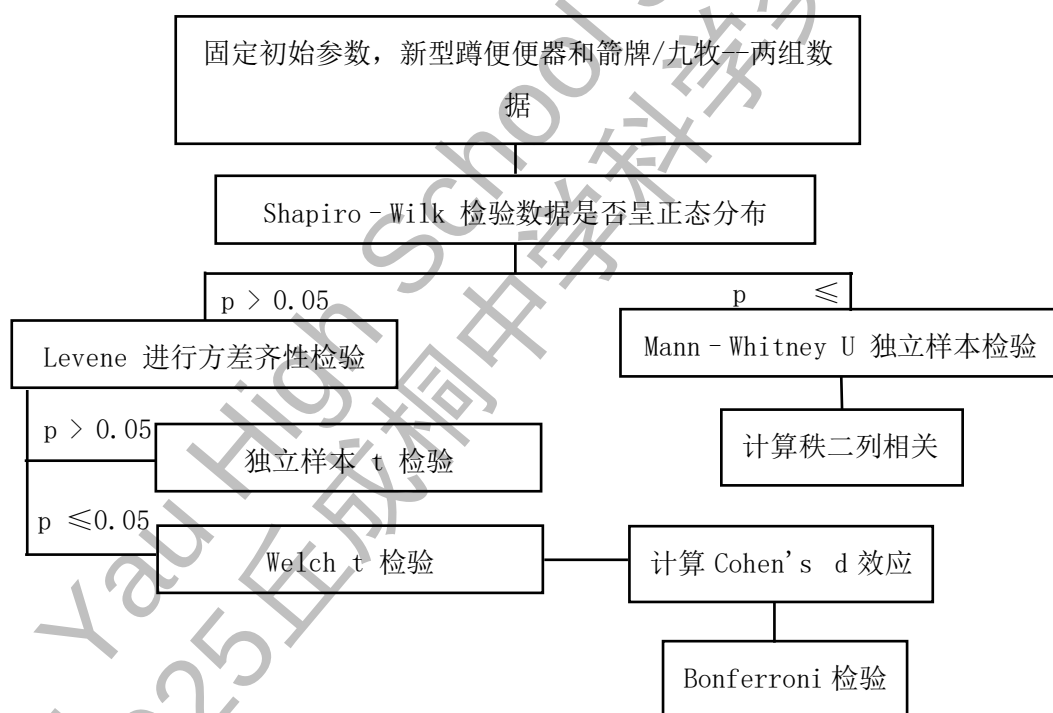


图 45 统计数据思路

5.6.1 正态分布检验

首先进行 S-W 正态分布检验。由于样本量 $n=10$ ，不采取研究大样本分布的 K-S 检验。本研究将不同初始角度下的溅尿数据分别导入 SPSS 软件，得到对照组和实验溅尿量的四分位数表。图基枢纽 (Tukey's Hinges) 指的是找到中位数后，分别寻找中位数上半部分和中位数下半部分的中位数。而加权平均寻找四分

位数时会插值处理。从图中可以明显看出，赛艇新型蹲便器的溅尿量小于对照组。

		百分位数							
		类别	5	10	25	50	75	90	95
加权平均（定义 1）	溅尿量	箭牌	1.9500	1.9540	2.3350	2.5350	3.5325	4.2480	
		九牧	1.8000	1.8160	2.0125	2.4500	2.8200	3.7410	
		赛艇	.3600	.3660	.4575	.5550	.7100	.9260	
图基枢纽	溅尿量	箭牌			2.4500	2.5350	3.3900		
		九牧			2.0300	2.4500	2.7500		
		赛艇			.4700	.5550	.6800		

图 46 初始角度为 7°时对照组和实验组的溅尿量百分位数表

		百分位数							
		类别	5	10	25	百分位数			
					50	75	90	95	
加权平均（定义 1）	溅尿量	箭牌	1.6400	1.6490	1.7375	1.7700	2.0000	2.1440	.
		九牧	2.1500	2.1820	2.6500	3.1650	3.4375	3.5230	.
		赛艇	.2500	.2500	.2950	.3850	.5300	.6200	.
图基枢纽	溅尿量	箭牌			1.7400	1.7700	1.9700		
		九牧			2.7100	3.1650	3.4300		
		赛艇			.3100	.3850	.5300		

图 47 初始角度为 45°时对照组和实验组的溅尿量百分位数表

		百分位数							
			百分位数						
	类别		5	10	25	50	75	90	95
加权平均（定义 1）	溅尿量	箭牌	1.9900	2.0090	2.2400	2.3650	3.0075	3.8550	.
		九牧	8.3500	8.3980	8.9050	9.4400	10.2650	12.3740	.
		赛艇	.2700	.2830	.4225	.4500	.5500	.6970	.
图基枢纽	溅尿量	箭牌			2.2600	2.3650	2.8600		
		九牧			8.9300	9.4400	9.6400		
		赛艇			.4300	.4500	.5100		

图 48 初始角度为 70°时对照组和实验组的溅尿量的溅尿量百分位数表

		百分位数							
		类别	5	10	25	百分位数			
					50	75	90	95	
加权平均（定义 1）	溅尿量	箭牌	4.9700	4.9950	5.6250	6.3300	7.2275	7.7330	.
		九牧	10.4100	10.5680	12.1325	13.1050	13.7275	14.1790	.
		赛艇	1.1200	1.1340	1.2750	1.4200	1.7350	1.8970	.
图基枢纽	溅尿量	箭牌			5.7600	6.3300	7.0800		
		九牧			12.1800	13.1050	13.6700		
		赛艇			1.2800	1.4200	1.7200		

图 49 男性参数下对照组和实验组的溅尿量百分位数表

S-W（夏皮洛-威尔克）检验将排序后的样本值和理论正态分布的期望值做出对比，如果两者呈现高度线性相关，那么说明数据是正态分布的，检验统计量 W 更接近 1。依据 W 和样本量，通过查表可以得到 p 值。p 值即显著性，提出原假

设 H_0 为数据符合正态分布，如果 H_0 成立，那么得到现在的 W 值的概率为 p 。如果 p 大于 0.05，即得到现在的 W 值概率较大，说明 H_0 成立，数据呈现正态分布。由图中夏皮洛-威尔克检验下的显著性可知， p 值大基本全部大于 0.05，说明样本呈现正态分布（见附录八）。但是初始角度为 70° 的九牧 p 值为 0.007，这可能是样本量过小导致的非正态分布。因此 70 度赛艇和九牧比较时，将采取 Mann - Whitney U 独立样本检验。其他样本继续采取 t 检验。

p 值	箭牌	九牧	赛艇
7°	0.244	0.287	0.541
45°	0.188	0.213	0.404
70°	0.078	0.007	0.128
男性参数	0.734	0.252	0.701

表 3 正态分布检验 p 值分布表

5.6.2 方差齐性检验

其次，进行 Levene 方差齐性检验，其通过比较数据与均值的偏离程度（也就是方差），来判断是否能采用独立样本 t 检验。如果某些组的数据波动远大于其他组，直接比较均值是不公平的，因此需要对 7 度、70 度和男性参数进行方差检验。由于数据中不存在异常数据，因此无需基于中位数进行计算（详见附录九）。

与赛艇的 p 值	箭牌	九牧
7°	<0.001	0.009
45°	0.366	0.005
70°	0.003	
男性参数	0.001	0.012

表 4 方差齐性检验 p 值表格

原假设为各组方差齐次。由于 p 值大部分小于 0.05，因此说明各组方差不齐。对于 p 值小于 0.05 的参数，使用传统的独立样本 t 检验会误差较大，因为 t 检验假设各组方差相，因此本研究选取 Welch t 进行检验。而对于 p 值大于 0.05 的参数，本实验选用传统的独立样本 t 检验。

5.6.3 Welch t 检验和 Cohen's d 效应量

t 检验是为了比较两组独立样本的均值是否显著不同。独立样本 t 检验假设各组数据正态分布，且方差相等：

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (30)$$

其中 s_p 是合并方差：

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (31)$$

依据 t 可以得出显著性 p。而 Welch t 检验不需要方差相等：

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (32)$$

原假设为各组均值相等。如果 p 小于 0.05，说明两组数据均值差异显著。本研究将实验组和两个对照组分别对比，得到 45°下的假定等方差的 p 值和其他参数下的不假定等方差的 p 值（见附录九）。由于 SPSS 无法直接设置单尾 p 值的方向，因此需要研究者根据均值自己比较：

与赛艇的 p 值	箭牌	九牧
7°	<0.001	<0.001
45°	<0.001	<0.001
70°	<0.001	
男性参数	<0.001	<0.001

表 5 t 检验 p 值表格

从结果可以看出，原假设错误。各组均值差异非常显著。由于赛艇的均值始终小于对照组，因此从统计上认证了赛艇新型蹲便器的溅尿量要远远小于箭牌和九牧。

为了进一步说明均值差异显著，需要看 Cohen's d（效应量）。它是衡量差异的指标。d 越大，说明差异越大（见附录九）。

与赛艇的效应量	箭牌	九牧
7°	0.57759	0.45038
45°	0.15160	0.34291
70°	0.44271	

男性参数	0.69897	0.81839
------	---------	---------

表 6 Cohen's d 效应量表格

从表格可以看出，效应量位于 0.15 到 0.82 之间，说明实验组的均值相较对照组有较大差异，在抑制溅尿方面效果胜于对照组。

5.6.4 多重检验

统计学中将误判两组数据有差异称为第一类错误，也就是因为样本原因误认为 p 值小于 0.05。如果进行多次 t 检验，那么出错概率就会膨胀，也就是“第一类错误膨胀”。为了避免出现这种“假阳性”，需要做多重检验。为了绝对严谨，本研究使采取相对保守的 Bonferroni 校正，将显著性阈值 0.05 除以比较次数 6 次，得到新的阈值 0.00833。只有低于新阈值的 p 值才被认为是显著的。由于本研究得出的 p 值全部小于 0.001，说明这些 p 值通过多重检验，均呈显著。

5.6.5 Mann - Whitney U 独立样本检验和秩二列相关效应量

对于 70°初始角度下赛艇和九牧的对比，根据 5.6.1，初始角度为 70°时九牧的数据分布呈非正态。因此采用不需要数据服从正态分布的 Mann - Whitney U 独立样本检验。它将两组数据合并后排序，分别计算每组数据序数总和 R_1 与 R_2 ：

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1 \quad (33)$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - R_2 \quad (34)$$

其中 n_1 和 n_2 分别是两组样本的样本量， R_1 和 R_2 分别是两组样本的秩序和。通过此式得到 U_1 和 U_2 后，取更小的 U 计算 p 值。原假设是两组数据的总体分布相同。如果 p 值小于 0.05，说明两组数据分布呈现较大差异。同样的，SPSS 无法设置单侧方向，因此需要研究者从秩 R 中判断。 R 较小，说明溅尿量更靠前，也就是更小。

赛艇的平均秩次 R 为 5.50，九牧的平均秩次 R 为 15.5，很显然赛艇溅尿的最大值比九牧溅尿的最小值还要小。两者计算出的 p 值小于 0.001（见附录九），说明两者之间存在显著差异。

为了进一步说明两者在秩次上的差异显著，需要计算秩二列相关(Rank-biserial

correlation) r_{rb} 。它表示两组数据之间差异大小的效应量，也就是在 A 组中随机选取一个样本 A，从 B 组随机选取样本 B，A 大于 B 的概率减去 B 大于 A 的即为秩二列相关。若 $r_{rb} = 0$ ，说明 A 组和 B 组数据分布相同，没有一方偏大或偏小的趋势；若 $r_{rb} = 1$ ，则说明 A 组所有数均大于 B 组；若 $r_{rb} = -1$ ，则说明 B 组所有数均大于 A 组。

$$r_{rb} = 1 - \frac{2U}{n_1 n_2} \quad (35)$$

本实验设 7°初始角度下九牧对照组的飞溅量样本为 A 组，赛艇实验组的飞溅量样本为 B 组。经过计算，得出 $r_{rb} = 1$ ，这说明九牧的飞溅量全部大于赛艇，赛艇实验组在抑制溅尿方面效果胜于对照组。

5.6.6 统计分析总结

本研究为了比较对照组和实验组蹲便器的溅尿量差异，并验证 5.5 得出的“赛艇状”蹲便器抑制飞溅效果显著优于对照组的结论是否正确，利用定量测量溅尿质量的数据进行两两对比的 t 检验统计学分析，通过 p 值反应溅尿量差异。

由于进行 t 检验的前提假设是数据正态分布，因此对四种实验状态（女性参数下初始角度分别为 7°、45°和 70°，以及男性参数）下得到的对照组箭牌、九牧和实验组赛艇的数据进行正态分布检验。发现除了初始角度为 70°的九牧飞溅量数据以外，其他组数据 p 值均大于 0.05，说明其均呈正态分布。

如果两两对比的数据满足方差齐次性，则进行独立样本 t 检验，否则进行 Welch t 检验。将其余 7 组对照组数据与相对应的实验组数据进行 Levene 方差齐次检验，发现方差均不齐次，因此均进行 Welch t 检验。通过这 7 组 t 检验，可以发现 p 值均小于 0.001，且 Cohen's d 效应量位于 0.15 和 0.82 之间，说明赛艇实验组飞溅量与对照组存在非常大的差异。由于本统计共进行 7 次 t 检验，为了避免假阳性，本研究还进行 Bonferroni 校正进行多重检验，发现结论仍然成立。

由于初始角度为 70°的九牧飞溅量数据不满足正态分布，因此与对应的赛艇飞溅量数据采取 Mann - Whitney U 独立样本检验。发现 p 值小于 0.001，且秩二列相关效应量等于 1，说明初始角度为 70°下赛艇飞溅量的每个数据均小于九牧，两者存在较大差异。

因此，统计分析验证了由定量测量溅尿质量的实验得出的结论，也就是实验组赛艇的飞溅量与对照组箭牌和九牧存在较大差。这说明赛艇成功改进了现有蹲便器常见设计，大大减少尿液飞溅量。根据 5.5 的计算可知，实验组赛艇至少相较于对照组减少了 75% 的溅尿量。

第六章 总结与展望

为了解决现有蹲便器的溅尿问题,本研究基于减小尿液撞击蹲便器的角度以减小飞溅的流体力学理论,基于微分方程设计了“赛艇”状新型蹲便器。Matlab绘制的撞击角度云图,验证了相较于现有设计,新型蹲便器的结构确实显著降低撞击角度。Fluent 流场仿真在成本极低的基础上定量证明新型蹲便器的飞溅比例显著降低。基于此,本实验开展最接近真实使用环境的实体实验,验证新型蹲便器在实际使用条件下有良好的抑制溅尿的效果,其溅出尿液的质量比常规蹲便器减少了 70%以上。这样的设计投入使用后,可以改善保洁阿姨工作环境,极大改善公共厕所卫生,减少清洁用水,推动社会的可持续发展。

由于仿真难以还原真实生活中复杂多变的流场,而实际生活场景中排尿是很主观且随机的动作,学校教室内手工搭建的实体实验环境尽可能还原了真实环境,但不能重现人类在排尿时的不确定性。因此本研究设计的蹲便器在替代现有结构、大规模生产并投入使用前,还将要做以下方面的工作:

首先,未来可以完善新型蹲便器的脚踏处。在蹲便器左右两侧设计带有凹凸微结构的脚踏处,这样能减少厕所内滑倒的风险。同时为了避免使用者蹲得太过靠前,从而产生尿液飞溅,在脚踏处粘贴脚印贴纸,或者设计符合脚形状的凹坑微结构,这样来引导使用者站立在最安全的位置。

本研究还可以进一步开展实际使用测试。本研究设计的“赛艇状”蹲便器具有大量减小溅尿的效果,有望投入到实际使用中。未来可以针对学校、车站、商场等不同公共厕所的环境先小规模安装新型蹲便器,开展初步用户使用调查,收集不同年龄段的人群的反馈意见。同时大规模收集保洁人员对新型蹲便器改善溅尿效果的评价。这样全面评估该设计在各种使用环境下的效果,从而来进一步优化设计,助力产品的推广。

附录

附录一：中国 2025 年蹲便器溅水量推导：

根据中国政府官网，2021 年末全国公共厕所达 37 万余座。其中行业公厕（包括公园、景区、交通枢纽等）约 7.1 万座，社会单位开放厕所（包括企事业单位、公共机构、商场、加油站等）约 8.1 万座^[68]。由于城市公厕数量较 2017 年增长 21.4%，县城公厕增长 21%^[68]，假设其他公厕数量不变，城市和县城公厕仍以每四年增长 21% 的速率来计算，到 2025 年城市和县城公厕数量将是约 26.62 万座。加上其他类型公厕，总共 41.82 万。

广州全市各类公厕数量达 11534 座^[69]，市中男大便蹲位 45300 个，女蹲位 46106 个^[70]，因此我们假设每座公共厕所平均有 8 个蹲便器，那么全国在非住宅区域大约 $N_t = 334.56$ 万座蹲便器。假设这些蹲便器被使用 1 年，即 $t = 365$ （以天为单位），则每日每个蹲便器溅水量 A_s 可以用每人平均单次尿流量 V_u 乘一天中平均日均排尿频率 f 乘每个蹲便器每日使用人数 U 乘尿液溅水比例 η 得到。女性蹲姿平均尿流量 $326.9 \pm 12.87 \text{ml}$ ^[71]。因此 V_u 可取平均值 326.9ml 。女性平均每日排尿频率 5.6 次^[72]。政府文件指出公共厕所一个厕位每天服务人数，女生最低为 40 人，男生最低为 60 人^[70]。因此假设一个厕位每天服务人数为 50 人。45 度的排尿初始角度下，箭牌和九牧的溅水比例分别是 0.95% 和 1.56%，取平均值约为 1.26%。

因此 A_s 可以计算为：

$$A_s = V_u \times f \times U \times \eta = 326.9 \text{ml} \times 5.6 \times 50 \times 1.26\% \approx 1153.3 \text{ml} \quad (36)$$

因此可以带入下面的公式， Q_s （单位为升）可以计算为：

$$Q_s = t \times N_t \times A_s = 365 \times 3345600 \times 1153.3 \text{ml} \approx 14.08 \times 10^8 \text{L} \quad (37)$$

附录二：中国每年用于清洗公厕地面的水量：

冲洗公共厕所水量每次每平方米 5 升，每天冲洗两次^[73]，平均每个厕位面积指标 4.67 平方米^[70]，可计算出每个公共厕位每天清理地面需要使用 $5 \times 2 \times 4.67 = 46.7$ 升水。全国在非住宅区域大约 $N_t = 334.56$ 万座蹲便器，则中国每年用于清洗地面的水资源大约为

$$3,345,600 \text{ 座} \times 46.7 \text{ 升/天} \times 365 \text{ 天} = 5.7057 \times 10^{10} \text{ 升} \approx 5.71 \text{ 亿立方米} \quad (38)$$

附录三：研究人员采访学校保洁阿姨



图 50 研究人员采访保洁阿姨

附录四：中国每年节省下来的清洁用水换算

如果 2.85 亿水资源全部用作灌溉粮食作物, 全球水稻平均 CWP 为 $1.09\text{kg}/\text{m}^3$ [74], 即一立方米水增产 1.09 千克水稻, 则 2.85 亿立方米水能使得每年增产约 31.1 万吨水稻.

如果用来防护绿洲治理沙漠, 中国西北干旱典型绿洲防护林树种的小叶杨, 单株平均日耗水量 4.43kg , 生长季从 4 月持续到 10 月约 210 天 [75], 因此每年可供约 3.06 亿株小叶杨生长。

附录五：3d 扫描生成模型的过程

本研究采用先临品牌 UE Pro 手持式激光扫描仪, 通过每次打出激光线得到的相机图像来提取有亮度信号的像素, 构成三维坐标。得到很多个离散的坐标点组成的点云后, 用渐进式三角形网络连接, 也就是在更细节的地方三角形更细更密, 从而做成连续封闭的 3D 模型。不过由于扫描出的 3D 模型采取的坐标系是世界坐标, 也就是扫描仪所定义的物理环境下的坐标系, 所以在导入 Matlab 之前, 还需要将其导入 Blender 中的绝对坐标, 也就是计算机软件所定义的坐标系, 对模型进行旋转, 使模型上边缘平行于地面, 方便后续 Matlab 的代码运算。

附录六：赛艇初始角度为 45° 时，计算撞击角度的代码（victory.stl 为赛艇 stl 模型名称）

```
clear; close all; clc;

%% 1. 模型加载与预处理
gotta = stlread('victory.stl');
vertices = gotta.Points;
faces = gotta.ConnectivityList;

model_bounds = [min(vertices); max(vertices)];
fprintf('模型尺寸: X[%0.2f,%0.2f]mm, Y[%0.2f,%0.2f]mm, Z[%0.2f,%0.2f]mm\n',...
        model_bounds(:,1), model_bounds(:,2), model_bounds(:,3));

%% 2. 参数设置
x0 = model_bounds(1,1) + 100;
z0 = model_bounds(2,3) + 79;

k_range = linspace(-0.05, -0.000001, 80);
b = -1;
y_range = linspace(model_bounds(1,2), model_bounds(2,2), 60);

coarse_thresh = 180;
fine_thresh = 36;

%% 3. 预计算面属性
[centroids, normals, face_areas] = deal(zeros(size(faces,1),3));
for i = 1:size(faces,1)
    v = vertices(faces(i,:),:);
    centroids(i,:) = mean(v);
    n = cross(v(2,:)-v(1,:), v(3,:)-v(1,:));
    normals(i,:) = n/norm(n);
    face_areas(i) = norm(n)/2;
end

%% 4. 主计算循环（双重检测机制）
face_angles = NaN(size(faces,1),1);
face_hit_count = zeros(size(faces,1),1);
all_angles = [];

fprintf('开始计算，共%d个y位置和%d个k值...\n', length(y_range),
        length(k_range));
progress = 0;

for y_idx = 1:length(y_range)
    y0 = y_range(y_idx);

    for k_idx = 1:length(k_range)
        k = k_range(k_idx);
```

```

for face_id = 1:size(faces,1)
    P = centroids(face_id,:);

    if P(1) <= x0, continue; end
    if P(2) < y0-20 || P(2) > y0+20, continue; end

    dx = P(1)-x0;
    z_theory = z0 + k*dx^2 + b*dx;
    if abs(P(3)-z_theory) < coarse_thresh

        sub_samples = max(2, ceil(face_areas(face_id)*0.01));
        for sub = 1:sub_samples
            r1 = sqrt(rand()); r2 = rand();
            v = vertices(faces(face_id,:),:);
            P_sub = (1-r1)*v(1,:) + r1*(1-r2)*v(2,:) + r1*r2*v(3,:);

            dx_sub = P_sub(1)-x0;
            z_sub_theory = z0 + k*dx_sub^2 + b*dx_sub; % 使用  $y = kx^2 + bx$  轨迹

            if abs(P_sub(3)-z_sub_theory) < fine_thresh
                tangent_vec = [1, 0, 2*k*dx_sub + b];
                tangent_vec = tangent_vec/norm(tangent_vec);

                angle = acosd(abs(dot(tangent_vec, normals(face_id,:))));
                angle = 90 - angle;
                angle = max(0, min(90, angle));

                all_angles = [all_angles; angle];

                if isnan(face_angles(face_id)) || angle <
                    face_angles(face_id)
                    face_angles(face_id) = angle;
                end
                face_hit_count(face_id) = face_hit_count(face_id) + 1;
            end
        end
    end
end

progress = progress + 1;
if mod(progress,100) == 0
    fprintf('进度: %.1f%%, 已命中%d 个面\n',...
        100*progress/(length(y_range)*length(k_range)),...
        sum(face_hit_count>0));
end
end
end

```

%% 5. 结果可视化 - 3D 夹角云图

```

colors = [ 0 1 0; % 绿 (0°)
          1 1 0; % 黄
          1 0 0 ]; % 红 (90°)
cmap = interp1(linspace(0,1,size(colors,1)), colors, linspace(0,1,256));

fig1 = figure('Position', [100 100 1200 800]);
ax1 = axes('Parent', fig1);

face_colors = face_angles;
face_colors(isnan(face_colors)) = -1;

patch(ax1, 'Faces', faces, 'Vertices', vertices,...
      'FaceVertexCData', face_colors,...
      'FaceColor', 'flat',...
      'EdgeColor', 'none',...
      'FaceAlpha', 0.85);

colormap(ax1, [0.7 0.7 0.7; cmap]);
caxis([-1 90]);

hold on;
plot3([x0 x0], [min(y_range) max(y_range)], [z0 z0],...
      'r-', 'LineWidth', 3, 'DisplayName', '尿道口轨迹');
plot3(x0, min(y_range), z0, 'go', 'MarkerSize', 10,...
      'MarkerFaceColor', 'g', 'DisplayName', '起点');
plot3(x0, max(y_range), z0, 'ro', 'MarkerSize', 10,...
      'MarkerFaceColor', 'r', 'DisplayName', '终点');

view(-35, 25);
axis equal tight;
grid on;
xlabel('X (mm)'); ylabel('Y (mm)'); zlabel('Z (mm)');
title(sprintf('尿液冲击角度分布 (命中率%.1f%%)',...
              100*sum(face_hit_count>0)/length(face_hit_count)));

light('Position', [0 0 1], 'Style', 'infinite');
light('Position', [1 1 0.5], 'Style', 'infinite');
lighting gouraud;
material([0.4 0.6 0.5 10 0.3]);

c = colorbar;
c.Label.String = '与表面夹角 (度)';
c.Ticks = [-1, 0:10:90];
c.TickLabels = {'未命中', '0', '10', '20', '30', '40', '50', '60', '70', '80', '90'};

saveas(fig1, 'Urine_Impact_Angle_3D.png');

%% 6. 角度频率分布图
fig2 = figure('Position', [100 100 800 600]);
histogram(all_angles, 0:5:90, 'Normalization', 'probability');

```

```

grid on;
xlabel('冲击角度 (度)');
ylabel('频率');
title('尿液冲击角度频率分布');
xlim([0 90]);

saveas(fig2, 'Urine_Impact_Angle_Histogram.png');

disp('计算完成，结果已保存为 Urine_Impact_Angle_3D.png 和
Urine_Impact_Angle_Histogram.png');

```

注：1.其他模型只需在此基础上更改 ‘gotta = stlread('victory.stl');’ 这一行的 stl 文件名称
2.改变初始角度时，需要更改 ‘b = -1;’ 这一行的 b 的值。b 即为二次函数在原点处切线斜率。

附录七:实体实验飞溅质量原始数据

吸水纸飞溅后质量为 m_1 ，飞溅前质量为 m_2 ，相减得出的飞溅质量为 m_s

7 度			45 度			70 度			男 864mm,不往前, 45 度		
m_1	m_2	m_s	m_1	m_2	m_s	m_1	m_2	m_s	m_1	m_2	m_s
541.12	539.17	1.95	539.76	537.79	1.97	460.52	456.62	3.9	461.49	456.52	4.97
539.78	537.31	2.47	531.44	529.53	1.91	458.59	455.84	2.75	464.78	458.2	6.58
539.49	536.93	2.56	536.31	534.55	1.76	526.06	523.75	2.31	465.43	460.21	5.22
539.52	535.24	4.28	539.85	538.21	1.64	462.73	460.47	2.26	466.79	459.12	7.67
541.67	537.71	3.96	540.44	538.7	1.74	462.58	460.59	1.99	465.37	458.29	7.08
539.93	537.48	2.45	542.33	540.57	1.76	453.78	451.52	2.26	466.21	459.33	6.88
538.77	536.26	2.51	541.41	539.68	1.73	450.99	448.57	2.42	464.46	458.42	6.04
540.24	536.85	3.39	530.36	528.27	2.09	458.2	455.34	2.86	466.09	460.33	5.76
541.39	538.22	3.17	531.26	529.11	2.15	458.38	456.2	2.18	464.71	458.63	6.08
542.25	540.26	1.99	539.24	537.46	1.78	458.79	455.34	3.45	467.15	459.41	7.74
	平均数	2.873			1.853			2.638			6.402
	标准差	0.797			0.169			0.613			0.955

表 7 箭牌（对照组）飞溅质量原始数据

7 度			45 度			70 度			男 864mm,不往前, 45 度		
m ₁	m ₂	m _s	m ₁	m ₂	m _s	m ₁	m ₂	m _s	m ₁	m ₂	m _s
459.01	456.74	2.27	459.02	456.87	2.15	474.36	461.96	12.4	470.67	458.49	12.18
459.66	457.01	2.65	463.88	460.45	3.43	471.05	461.66	9.39	470.07	459.66	10.41
460.12	457.49	2.63	460.92	457.69	3.23	471.16	461.52	9.64	472.32	459.23	13.09
462.02	458.2	3.82	460.09	457.38	2.71	470.59	461.66	8.93	473.07	459.17	13.9
462.94	460.19	2.75	460.08	456.69	3.39	470.66	461.66	9	472.31	460.32	11.99
463.04	461.01	2.03	458.81	456.34	2.47	469.89	461.54	8.35	474.77	460.56	14.21
462.73	460.66	2.07	459.45	456.47	2.98	469.68	460.14	9.54	474.65	461.02	13.63
462.89	461.09	1.8	459.66	456.2	3.46	470.23	460.74	9.49	473.72	460.86	12.86
462.76	460.8	1.96	458.69	455.59	3.1	474.04	461.9	12.14	474.69	461.57	13.12
463.05	460.02	3.03	459.8	456.27	3.53	471.45	462.62	8.83	474.69	461.02	13.67
	平均数	2.501			3.045			9.771			12.906
	标准差	0.612			0.467			1.375			1.129

表 8 九牧（对照组）飞溅质量原始数据

7 度			45 度			70 度			男 864mm,不往前, 45 度		
m ₁	m ₂	m _s	m ₁	m ₂	m _s	m ₁	m ₂	m _s	m ₁	m ₂	m _s
465.81	465.32	0.49	472.33	472.08	0.25	467.66	467.26	0.4	462.81	461.03	1.78
466.37	465.85	0.52	472.7	472.45	0.25	467.51	466.84	0.67	463.59	462.06	1.53
467.29	466.93	0.36	472.16	471.73	0.43	468.17	467.72	0.45	465.1	463.82	1.28
468.49	467.69	0.8	467.11	466.78	0.33	468.39	467.94	0.45	466.04	464.7	1.34
469.06	468.38	0.68	467.08	466.77	0.31	468.02	467.59	0.43	464.16	462.77	1.39
469.22	468.63	0.59	467.39	466.9	0.49	468.46	467.76	0.7	465.28	463.56	1.72
469.93	469.46	0.47	467.09	466.56	0.53	468.94	468.51	0.43	464	462.55	1.45
469.86	468.92	0.94	467.43	466.8	0.63	468.75	468.48	0.27	464.59	462.68	1.91
469.07	468.65	0.42	467.39	466.86	0.53	468.16	467.71	0.45	463.99	462.73	1.26
469.98	469.39	0.59	467.29	466.95	0.34	468.19	467.68	0.51	464.05	462.93	1.12
	平均数	0.586			0.409			0.476			1.478
	标准差	0.178			0.132			0.126			0.254

表 9 赛艇（对照组）飞溅质量原始数据

附录八：S-W 正态性检验结果

正态性检验

		柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫 ^a			夏皮洛-威尔克		
类别	统计	自由度	显著性	统计	自由度	显著性	
溅尿量	箭牌	.253	10	.070	.904	10	.244
	九牧	.160	10	.200 [*]	.911	10	.287
	赛艇	.191	10	.200 [*]	.939	10	.541

*. 这是真显著性的下限。

a. 里利氏显著性修正

图 51 初始角度为 7 度时 S-W 正态性检验

正态性检验

		柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫 ^a			夏皮洛-威尔克		
类别	统计	自由度	显著性	统计	自由度	显著性	
溅尿量	箭牌	.267	10	.042	.894	10	.188
	九牧	.170	10	.200 [*]	.899	10	.213
	赛艇	.200	10	.200 [*]	.925	10	.404

*. 这是真显著性的下限。

a. 里利氏显著性修正

图 52 初始角度为 45 度时 S-W 正态性检验

正态性检验

		柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫 ^a			夏皮洛-威尔克		
类别	统计	自由度	显著性	统计	自由度	显著性	
溅尿量	箭牌	.239	10	.111	.861	10	.078
	九牧	.338	10	.002	.776	10	.007
	赛艇	.282	10	.024	.879	10	.128

a. 里利氏显著性修正

图 53 初始角度为 70 度时 S-W 正态性检验

正态性检验

		柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫 ^a			夏皮洛-威尔克		
类别	统计	自由度	显著性	统计	自由度	显著性	
溅尿量	箭牌	.132	10	.200 [*]	.956	10	.734
	九牧	.184	10	.200 [*]	.906	10	.252
	赛艇	.144	10	.200 [*]	.953	10	.701

*. 这是真显著性的下限。

a. 里利氏显著性修正

图 54 男性参数下 S-W 正态性检验

附录九：方差齐次检验、t 检验以及 Mann - Whitney U 检验结果

T-检验

组统计

类别		N	均值	标准差	标准误差平均值
溅尿量	箭牌	10	2.8730	.79718	.25209
	赛艇	10	.5860	.17815	.05634

独立样本检验

莱文方差等同性检验				平均值等同性 t 检验							
		F	显著性	t	自由度	显著性		平均值差值	标准误差差值	差值 95% 置信区间	
						单侧 P	双侧 P			下限	上限
溅尿量	假定等方差	17.297	<.001	8.854	18	<.001	<.001	2.28700	.25831	1.74432	2.82968
	不假定等方差			8.854	9.897	<.001	<.001	2.28700	.25831	1.71064	2.86336

独立样本效应大小

		标准化量 ^a	点估算	95% 置信区间	
				下限	上限
溅尿量	Cohen d	.57759	3.960	2.388	5.495
	Hedges 修正	.60314	3.792	2.287	5.263
	Glass Delta	.17815	12.837	6.957	18.722

a. 估算效应大小时使用的分母。
Cohen's d 使用合并标准差。
Hedges' 修正使用合并标准差，加上一个校正系数。
Glass's delta 使用控制（即第二个）组的样本标准差。

图 55 初始角度为 7 度时实验组和箭牌的莱文方差齐次检验与 t 检验

T-检验

组统计

类别	N	均值	标准差	标准误差平均值
溅尿量 九牧	10	2.5010	.61151	.19338
赛艇	10	.5860	.17815	.05634

独立样本检验

莱文方差等同性检验				平均值等同性 t 检验								
		F	显著性	t	自由度	显著性	单侧 P	双侧 P	平均值差值	标准误差差值	差值 95% 置信区间	
											下限	上限
溅尿量	假定等方差	8.611	.009	9.508	18	<.001	<.001	<.001	1.91500	.20142	1.49184	2.33816
	不假定等方差			9.508	10.517	<.001	<.001	<.001	1.91500	.20142	1.46919	2.36081

独立样本效应大小

		标准化量 ^a	点估算	95% 置信区间	
				下限	上限
溅尿量	Cohen d	.45038	4.252	2.602	5.867
	Hedges 修正	.47030	4.072	2.492	5.619
	Glass Delta	.17815	10.749	5.799	15.698

a. 估算效应大小时使用的分母。
Cohen's d 使用合并标准差。
Hedges' 修正使用合并标准差，加上一个校正系数。
Glass's delta 使用控制（即第二个）组的样本标准差。

图 56 初始角度为 7 度时实验组和九牧的莱文方差齐次检验与 t 检验

T-检验

组统计				
类别	N	均值	标准差	标准误差平均值
溅尿量 箭牌	10	1.8530	.16905	.05346
赛艇	10	.4090	.13186	.04170

独立样本检验										
莱文方差等同性检验				平均值等同性 t 检验						
		F	显著性	t	自由度	显著性 单侧 P	双侧 P	平均值差值	标准误差差值	差值 95% 置信区间 下限 上限
溅尿量	假定等方差	.861	.366	21.298	18	<.001	<.001	1.44400	.06780	1.30156 1.58644
	不假定等方差			21.298	16.993	<.001	<.001	1.44400	.06780	1.30095 1.58705

独立样本效应大小				
		标准化量 ^a	点估算	95% 置信区间 下限 上限
溅尿量	Cohen d	.15160	9.525	6.308 12.719
	Hedges 修正	.15831	9.121	6.041 12.180
	Glass Delta	.13186	10.951	5.911 15.989

a. 估算效应大小时使用的分母。
Cohen's d 使用合并标准差。
Hedges' 修正使用合并标准差，加上一个校正系数。
Glass's delta 使用控制（即第二个）组的样本标准差。

图 57 初始角度为 45 度时实验组和箭牌的莱文方差齐次检验与 t 检验

T-检验

组统计				
类别	N	均值	标准差	标准误差平均值
溅尿量 九牧	10	3.0450	.46667	.14757
赛艇	10	.4090	.13186	.04170

独立样本检验										
莱文方差等同性检验				平均值等同性 t 检验						
		F	显著性	t	自由度	显著性 单侧 P	双侧 P	平均值差值	标准误差差值	差值 95% 置信区间 下限 上限
溅尿量	假定等方差	10.390	.005	17.189	18	<.001	<.001	2.63600	.15335	2.31382 2.95818
	不假定等方差			17.189	10.428	<.001	<.001	2.63600	.15335	2.29620 2.97580

独立样本效应大小				
		标准化量 ^a	点估算	95% 置信区间 下限 上限
溅尿量	Cohen d	.34291	7.687	5.036 10.313
	Hedges 修正	.35807	7.362	4.822 9.876
	Glass Delta	.13186	19.990	10.902 29.101

a. 估算效应大小时使用的分母。
Cohen's d 使用合并标准差。
Hedges' 修正使用合并标准差，加上一个校正系数。
Glass's delta 使用控制（即第二个）组的样本标准差。

图 58 初始角度为 45 度时实验组和九牧的莱文方差齐次检验与 t 检验

T-检验

组统计

类别		N	均值	标准差	标准误差平均值
溅尿量	箭牌	10	2.6380	.61322	.19392
	赛艇	10	.4760	.12624	.03992

独立样本检验

莱文方差等同性检验				平均值等同性 t 检验							
		F	显著性	t	自由度	显著性		平均值差值	标准误差差值	差值 95% 置信区间	
						单侧 P	双侧 P			下限	上限
溅尿量	假定等方差	12.225	.003	10.920	18	<.001	<.001	2.16200	.19798	1.74605	2.57795
	不假定等方差			10.920	9.762	<.001	<.001	2.16200	.19798	1.71940	2.60460

独立样本效应大小

		标准化量 ^a	点估算	95% 置信区间	
				下限	上限
溅尿量	Cohen d	.44271	4.884	3.059	6.676
	Hedges 修正	.46229	4.677	2.929	6.393
	Glass Delta	.12624	17.125	9.324	24.942

a. 估算效应大小时使用的分母。
Cohen's d 使用合并标准差。
Hedges' 修正使用合并标准差，加上一个校正系数。
Glass's delta 使用控制（即第二个）组的样本标准差。

图 59 初始角度为 70 度时实验组和箭牌的莱文方差齐次检验与 t 检验

T-检验

组统计

类别		N	均值	标准差	标准误差平均值
溅尿量	箭牌	10	6.4020	.95525	.30208
	赛艇	10	1.4780	.25420	.08039

独立样本检验

莱文方差等同性检验				平均值等同性 t 检验							
		F	显著性	t	自由度	显著性		平均值差值	标准误差差值	差值 95% 置信区间	
						单侧 P	双侧 P			下限	上限
溅尿量	假定等方差	14.120	.001	15.752	18	<.001	<.001	4.92400	.31259	4.26727	5.58073
	不假定等方差			15.752	10.268	<.001	<.001	4.92400	.31259	4.22997	5.61803

独立样本效应大小

		标准化量 ^a	点估算	95% 置信区间	
				下限	上限
溅尿量	Cohen d	.69897	7.045	4.588	9.475
	Hedges 修正	.72989	6.746	4.393	9.073
	Glass Delta	.25420	19.371	10.561	28.201

a. 估算效应大小时使用的分母。

Cohen's d 使用合并标准差。

Hedges' 修正使用合并标准差，加上一个校正系数。

Glass's delta 使用控制（即第二个）组的样本标准差。

图 60 男性参数下实验组和箭牌的莱文方差齐次检验与 t 检验

T-检验

组统计				
类别	N	均值	标准差	标准误差平均值
溅尿量	10	12.9060	1.12912	.35706
赛艇	10	1.4780	.25420	.08039

独立样本检验									
莱文方差等同性检验					平均值等同性 t 检验				
		F	显著性	t	自由度	显著性 单侧 P 双侧 P	平均值差值	标准误差差值	差值 95% 置信区间 下限 上限
溅尿量	假定等方差	7.743	.012	31.224	18	<.001 <.001	11.42800	.36600	10.65907 12.19693
	不假定等方差			31.224	9.910	<.001 <.001	11.42800	.36600	10.61150 12.24450

独立样本效应大小					
		标准化量 ^a	点估算	95% 置信区间	
溅尿量	Cohen d	.81839	13.964	9.351	18.558
	Hedges 修正	.85459	13.373	8.955	17.772
	Glass Delta	.25420	44.957	24.604	65.377

a. 估算效应大小时使用的分母。
Cohen's d 使用合并标准差。
Hedges' 修正使用合并标准差，加上一个校正系数。
Glass's delta 使用控制（即第二个）组的样本标准差。

图 61 男性参数下实验组和九牧的莱文方差齐次检验与 t 检验
曼-惠特尼检验

		秩		
类别	N	秩平均值	秩的总和	
溅尿量	10	15.50	155.00	
赛艇	10	5.50	55.00	
总计	20			

检验统计 ^a		溅尿量
曼-惠特尼 U		.000
威尔科克森 W		55.000
Z		-3.782
渐近显著性（双尾）		<.001
精确显著性[2*(单尾显著性)]		<.001 ^b

a. 分组变量：类别
b. 未针对绑定值进行修正。

图 62 45 度下实验组和九牧的 Mann - Whitney U 检验

参考文献

- [1] Yaghoubi Z, Sarrafzadeh J, Ansaripour M, et al. A Brief review of the advantage and disadvantage of squat and sitting toilets on fecal defecation in Traditional Persian and Conventional Medicine perspectives[J]. Journal of Islamic and Iranian Traditional Medicine, 2017, 8(3): 335-345.
- [2] QS Supplies. Public Toilet Charges Around the World - Types & Local Names[EB/OL]. QS Supplies, 2023[2025-09-12].
<https://www.qssupplies.co.uk/world-toilet-rates.html>.
- [3] Pan L, Chen S L, Guo Y S, et al. Limiting potential COVID-19 contagion in squatting public toilets[J]. Hong Kong Physiotherapy Journal, 2021, 41(02): 119-125.
- [4] Nagamoto H, Okunuki T, Takahashi S, et al. Are floating toes associated with lifestyle in children? A cross-sectional study[J]. Journal of foot and ankle research, 2023, 16(1): 90.
- [5] Igari J. Effect of urine pH and osmolarity on the growth of bacteria in the urine[J]. Nihon Densenbyo Gakkai Zasshi, 1969, 42(12): 343-352.
- [6] Orumwense P O, Torvinen E, Heinonen-Tanski H. The survival of mycobacteria in pure human urine[J]. Water science and technology, 2013, 67(8): 1773-1777.
- [7] Lee M C J, Tham K W. Public toilets with insufficient ventilation present high cross infection risk[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 20623.
- [8] Liu B, Giannis A, Chen A, et al. Determination of urine-derived odorous compounds in a source separation sanitation system[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 52: 240-249.
- [9] Clorox Professional Products Company. Surveys Uncover How Restroom Cleanliness Affects Usage[EB/OL]. CleanLink, 2013-06-19. [2025-09-03].
<https://www.cleanlink.com/news/article/Surveys-Uncover-How-Restroom-Cleanliness-Affects-Usage--15698>.
- [10] 成都市公共资源交易服务中心. 三环路环卫公厕保洁服务项目一标段中标结果公示[EB/OL]. 成都市公共资源交易服务中心, 2021[2025-09-03].
<https://ggzyjy.sc.gov.cn/jyxx/002001/002001001/20210426/595EC70C62074119AC8326A70875F186.html>
- [11] 招标人. 镇管公共厕所保洁管理项目中标（成交）结果公告[R/OL]. 中国政府采购网, 2025-06-04 [引用日期: 2025-09-03]. 可获得:
https://www.ccgp.gov.cn/cggg/dfgg/zbgg/202506/t20250604_24710856.htm.
- [12] World Resources Institute. 25 Countries, Housing One-Quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress[EB/OL]. World Resources Institute, 2023-08-16 [引

用日期: 2025-09-03]. 可获得:

<https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries>.

[13]Kama R, Song J, Liu Y, et al. Water availability and status of wastewater treatment and agriculture reuse in China: A review[J]. *Agronomy*, 2023, 13(5): 1187.

[14]Pietz D A. China' s Water Challenges[J]. *Education About ASIA*, 2017, 22(2).

[15]Browder G, Xie S, Im Y, et al. Stepping Up: Improving the Performance of China's Urban Water Utilities [EB/OL]. Washington, DC: World Bank, 2007 [2025-09-03]. Available from:

https://web.archive.org/web/20150911211359/http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSPContentServer/WDSP/IB/2007/09/25/000310607_20070925111156/Rendered/PDF/409640P0704130Public.pdf

[16]Yarin A L. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing...[J]. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2006, 38(1): 159-192.

[17]Quetzeri-Santiago M A, Castrejón-Pita J R, Castrejón-Pita A A. Controlling droplet splashing and bouncing by dielectrowetting[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 21410.

[18]Riboux G, Gordillo J M. Experiments of drops impacting a smooth solid surface: a model of the critical impact speed for drop splashing[J]. *Physical review letters*, 2014, 113(2): 024507.

[19]Boelens A M P, de Pablo J J. Simulations of splashing high and low viscosity droplets[J]. *Physics of Fluids*, 2018, 30(7).

[20]Driscoll M M, Stevens C S, Nagel S R. Thin film formation during splashing of viscous liquids[J]. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2010, 82(3): 036302.

[21]Wu Z, Cao Y. Dynamics of initial drop splashing on a dry smooth surface[J]. *PLoS One*, 2017, 12(5): e0177390.

[22]Zhang H, Zhang X, Yi X, et al. Effect of wettability on droplet impact: Spreading and splashing[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 124: 110369.

[23]Latka A, Strandburg-Peshkin A, Driscoll M M, et al. Creation of Prompt and Thin-Sheet Splashing by Varying Surface Roughness or Increasing Air Pressure[J]. *Physical review letters*, 2012, 109(5): 054501.

[24]de Goede T, de Bruin K, Shahidzadeh N, et al. Droplet splashing on rough surfaces[J]. *Physical Review Fluids*, 2021, 6(4): 043604.

[25]Ersoy N E, Eslamian M. Phenomenological study and comparison of droplet impact dynamics on a dry surface, thin liquid film, liquid film and shallow pool[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 112: 109977.

[26]Potnis A, Saha A. On formation and breakup of jets during droplet impact on

- oscillating substrates[J]. *Experiments in Fluids*, 2025, 66(1): 2.
- [27] Yu X, Shao Y, Teh K Y, et al. Force of droplet impact on thin liquid films[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(4).
- [28] Josserand C, Ray P, Zaleski S. Droplet impact on a thin liquid film: anatomy of the splash[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 802: 775-805.
- [29] Hao J, Lu J, Lee L, et al. Droplet splashing on an inclined surface[J]. *Physical review letters*, 2019, 122(5): 054501.
- [30] Howland C J, Antkowiak A, Castrejón-Pita J R, et al. It's harder to splash on soft solids[J]. *Physical review letters*, 2016, 117(18): 184502.
- [31] Eleni P N, Krokida M K, Polyzois G L, et al. Dynamic mechanical thermal analysis of maxillofacial prosthetic elastomers: the effect of different disinfecting aging procedures[J]. *Journal of Craniofacial Surgery*, 2014, 25(3): e215-e255.
- [32] Xu L, Zhang W W, Nagel S R. Drop splashing on a dry smooth surface[J]. *Physical review letters*, 2005, 94(18): 184505.
- [33] Tsai P, CA van der Veen R, van de Raaij M, et al. How micropatterns and air pressure affect splashing on surfaces[J]. *Langmuir*, 2010, 26(20): 16090-16095.
- [34] Xu L. Liquid drop splashing on smooth, rough, and textured surfaces[J]. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2007, 75(5): 056316.
- [35] Lawes R A. Manufacturing costs for microsystems/MEMS using high aspect ratio microfabrication techniques[J]. *Microsystem technologies*, 2007, 13(1): 85-95.
- [36] Acikbas G, Calis Acikbas N, Ubay E, et al. The influence of varying Cu doping concentrations on the microstructure, phase evolution and surface wettability of ceramic glazes modified with nano Cu-ZnO[J]. *Applied Physics A*, 2024, 130(5): 354.
- [37] Bird J C, Tsai S S H, Stone H A. Inclined to splash: triggering and inhibiting a splash with tangential velocity[J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(6): 063017.
- [38] Okawa T, Shiraishi T, Mori T. Effect of impingement angle on the outcome of single water drop impact onto a plane water surface[J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 44(2): 331-339.
- [39] Li B, Fan L, Bai J, et al. Water-droplet impact and sliding behaviors on slippery surfaces with various weber numbers and surface inclinations[J]. *Coatings*, 2023, 13(2): 264.
- [40] Liu J, Vu H, Yoon S S, et al. Splashing phenomena during liquid droplet impact[J]. *Atomization and Sprays*, 2010, 20(4).
- [41] Thurairajah K, Song X, Zhu J D, et al. Splash-free urinals for global sustainability and accessibility: Design through physics and differential equations[J]. *PNAS nexus*, 2025, 4(4): pgaf087.

- [42]Kramer A, Schwebke I, Kampf G. How long do nosocomial pathogens persist on inanimate surfaces? A systematic review[J]. BMC infectious diseases, 2006, 6(1): 130.
- [43]Schreck J H, Lashaki M J, Hashemi J, et al. Aerosol generation in public restrooms[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(3).
- [44]Locke L, Dada O, Shedd J S. Aerosol transmission of infectious disease and the efficacy of personal protective equipment (PPE): a systematic review[J]. Journal of Occupational and Environmental Medicine, 2021, 63(11): e783-e791.
- [45]Magarinos-Ruchat B, Ravily M. Improving the user experience: a powerful lever to improve sanitation practices in low-income communities[J]. Field Actions Science Reports. The journal of field actions, 2020 (Special Issue 22): 88-95.
- [46]Mundo C H R, Sommerfeld M, Tropea C. Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup process[J]. International journal of multiphase flow, 1995, 21(2): 151-173.
- [47]Cossali G E, Coghe A, Marengo M. The impact of a single drop on a wetted solid surface[J]. Experiments in fluids, 1997, 22(6): 463-472.
- [48]Wal R L V, Berger G M, Mozes S D. The splash/non-splash boundary upon a dry surface and thin fluid film[J]. Experiments in fluids, 2006, 40(1): 53-59.
- [49]Stevens C S. Scaling of the splash threshold for low-viscosity fluids[J]. Europhysics Letters, 2014, 106(2): 24001.
- [50]Lotti L, Spatafora P, Marzi V L, et al. A Velocity-Based Approach to Noninvasive Methodology for Urodynamics Analysis[J]. International Neurourology Journal, 2023, 27(1): 63.
- [51]Schelbert V, Kriwanek L, Sakthivel S R, et al. How women and men pee: assessing gender-specific urination practices for a comfortable toilet experience[J]. Ergonomics in Design, 2024, 32(1): 5-12.
- [52]IIT Guwahati. Reference Datasheet 9: Squatting posture[EB/OL]. Guwahati: Virtual Lab of IITG, 2025-09-13 [引用日期: 2025-09-13]. 可获得:
https://ergonomics-iitg.vlabs.ac.in/Reference%20Datasheet_9.html
- [53]NASA. Anthropometry and Biomechanics: Man-Systems Integration Standards, Section 3[EB/OL]. (2002-07-07)[2025-08-15]. Web archive.
<https://web.archive.org/web/20221220022020/https://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm>.
- [54]ANSYS Inc. ANSYS Fluent Theory Guide—Chapter 14: Multiphase Flows [OL]. Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2025R2 [引用日期 2025-09-03].
https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v252/en/flu_th/flu_th_sec_mphase_intro_examples.html

- [55]杨海霞. 沟槽面湍流边界层减阻的数值研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2008. DOI:10.7666/d.y1437613.
- [56]Singla N, Singla A, Lee J S. A novel, non-invasive approach to diagnosing urinary tract obstruction using CFD[J]. Journal of young investigators, 2008, 18(6): <https://www.jyi.org/2008-may/2008/5/13/a-novel-non-invasive-approach-to-diagnosing-urinary-tract-obstruction-using-cfd>.
- [57]Inman B A, Etienne W, Rubin R, et al. The impact of temperature and urinary constituents on urine viscosity and its relevance to bladder hyperthermia treatment[J]. International Journal of Hyperthermia, 2013, 29(3): 206-210.
- [58]日本国立癌症研究中心. 臨床試験プロフェッショナル育成カリキュラム基準値一覧(临床试验专业人员培养课程基准值一览)[EB/OL]. (2024-01-02)[2025-08-15]. https://www.ncc.go.jp/jp/ncch/division/clinical_trial/info/clinical_trial/professional/Rinshou/kijunchi_ichiran_20240102.pdf.
- [59]全国建筑卫生陶瓷标准化技术委员会. 卫生陶瓷: GB/T 6952-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [60]Sfez R, De-Botton S, Avnir D, et al. Sol-gel glazes-a safe glass and ceramics coloring approach[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2022, 102(3): 562-573.
- [61]Pogorzelski S, Janowicz P, Dorywalski K, et al. Wettability, Adsorption and Adhesion in Polymer (PMMA)—Commercially Available Mouthrinse System[J]. Materials, 2023, 16(17): 5753.
- [62]Wheeler A P S, Morad S, Buchholz N, et al. The shape of the urine stream—from biophysics to diagnostics[J]. 2012.
- [63]Endoscopic Diagnosis and Treatment in Urethral Pathology: Handbook of Endourology[J]. 2015.
- [64]Nayar K G, Sharqawy M H, Lienhard J H. Seawater thermophysical properties library[EB/OL].(2016)
- [65]Ramsing N, Gundersen J. Seawater and gases[J]. Limnol. Oceanogr, 2011, 37: 1307-1312.
- [66]Xu Q, Tao Y, Liu Q S. Experimental study on the evaporation characteristics of sessile droplets under different substrate materials and relative humidity[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2025, 3006(1): 012047.
- [67]Guo Y. Numerical investigation of drop impingement on dry and wet surfaces[J]. 2017.

- [68] 中华人民共和国中央人民政府. 全国市县公厕数量超三十七万座[EB/OL]. (2021-11-24)[2025-09-14]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-11/24/content_5652984.htm.
- [69] 广州市人民政府. 全市公厕达 11534 座, 广州持续推进“厕所革命”增进民生福祉[EB/OL]. (2022-09-30)[2025-09-14]. https://www.gz.gov.cn/xw/zwlb/content/mpost_8597915.html
- [70] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市公共厕所设计标准: CJJ 14-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [71] Ünsal A, Çimentepe E. Voiding position does not affect uroflowmetric parameters and post - void residual urine volume in healthy volunteers[J]. *Scandinavian journal of urology and nephrology*, 2004, 38(6): 469-471.
- [72] Burgio K L, Engel B T, Locher J L. Normative patterns of diurnal urination across 6 age decades[J]. *The Journal of urology*, 1991, 145(4): 728-731.
- [73] 徐冬喜. 高速公路服务区给水排水设计[J]. *中国给水排水*, 2002, 018(007):60-61. DOI:10.3321/j.issn:1000-4602.2002.07.019.
- [74] Zwart S J, Bastiaanssen W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize[J]. *Agricultural water management*, 2004, 69(2): 115-133.
- [75] Fu S, Xu B, Leng Y, et al. Comparison of the water consumption levels of four shelterbelt tree species in a typical arid oasis in Northwest China[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2024, 17(2): 169-176.

致谢

张文嘉进行寒假的流体力学学习后,想到一直存在的女厕蹲便器溅尿问题可以借助流体力学的知识进行解决,并找到做过流体力学方面研究的刘广羽商讨解决方案。我们学习大量文献并进行无数次方案的推翻重构,最终决定通过减小撞击角度来减小飞溅,作为抑制溅尿的最优方案。

整个研究过程中,我们密切配合。刘广羽主要负责理论推导、微分方程求解和数值仿真。张文嘉主要负责文献调研、Matlab 角度图绘制和实体实验数据采集。两人共同完成论文的撰写和校订。

利用 Matlab 绘制撞击角度云图时,程序连续运行两周后意外闪退,不得不从头再来。随后在 Ansys-Fluent 中进行流体仿真,庞大的网格和巨大的计算量让电脑 CPU 长时间高负荷运转,机身滚烫。即使在我们睡觉的时候,电脑也吃熏运行着。电脑最终跑出了结果。暑假期间我们向学校提交提案,成功争取到多功能教室作为实验场所。我们通过向学校借用实验器材、从五金商店购买材料等方式,凑出完整的实验器械,将成本压到最低。在测量飞溅量时,为尽可能减少液滴蒸发,我们关闭空调和门窗,搬来一台电磁炉、两台加湿器和三壶热水壶,将湿度稳定在 75%左右。就这样克服了诸多困难,我们一步步完成了实体实验。

对于能完成这篇设计新型蹲便器的论文,我们无比感谢校内指导老师冯晓琴老师,以及学校各个老师。他们不厌其烦地回答我们关于理论分析的问题。最开始,初次接触各个无量纲数的我们在理论分析中晕头转向,在阅读大量书籍并向老师们请教后,我们终于掌握了飞溅相关的流体力学基础知识。本研究的实体实验过程中,学校全力支持,为我们提供了最宝贵的实验场地。甚至在暑假期间,我们实体实验遇到困难时,老师们愿意专程来到学校进行指导。实体实验分析数据时,数学老师耐心地指导我们做统计分析。在老师的指导下,我们得以独立完成整个研究过程。我们感受着科学研究的严谨,并享受其中的乐趣。

另外还要感谢学校的后勤工作人员。保洁阿姨不仅支持实验,还欣然接受我们关于溅尿问题的采访;暑假里我们几乎天天在校,保安叔叔常常陪到深夜守护安全。与他们的交流让我们更深切体会到,科研的价值正是为了改善人们的生活。

最后,由衷感谢参加论文评审和答辩过程的各位教授和专家。