

大连理工大学流体力学实验报告

“水”火箭制作与优化

学 院（系）： 运载工程与力学学部

专 业： 工程力学

组 名： Starry night

姓名（学号）： 李 馨 201031088

姓名（学号）： 宋海滨 201031087

完 成 日 期： 2012 年 12 月 4 日

大连理工大学

Dalian University of Technology

摘 要

水火箭是一个利用质量比和气压作用而设计的玩具，同时是物理教学中著名的案例之一。

我们制作的水火箭是利用废弃的饮料瓶制作成动力舱、箭体、箭头、尾翼，灌入一定数量的水，利用打气筒充入空气到达一定的压力后发射。利用水和空气的质量之比（水的密度是空气的 816 倍），压力空气把水从火箭尾部的喷嘴向下高速喷出，在反作用下，水火箭快速上升，加速度、惯性滑翔在空中飞行。目标是向远处飞行达到 50 米以上。

关键词：水火箭

目 录

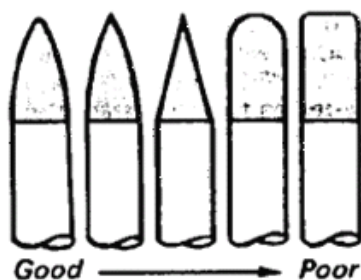
摘 要.....	II
1 水火箭基本理论.....	1
1.1 水火箭相关基本问题.....	1
1.2 “水”火箭制作特点.....	1
2 我们的水火箭.....	2
2.1 制作材料准备.....	2
2.2 火箭制作成果相关参数及制作过程.....	3
2.2.1 大、小火箭相关参数测量值.....	3
2.2.2 具体制作过程.....	3
2.3 “水”火箭优化分析.....	4
2.3.1 理论原理和公式推导.....	4
2.3.2 “水”火箭优化过程.....	5
结论与感受.....	8
参 考 文 献.....	9

1 水火箭基本理论

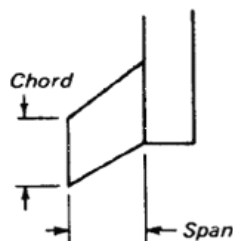
用打气筒与发射架上“水”火箭（装有水的饮料瓶），形成一个密闭的空间。把气体打入密闭的容器内，使得容器内空气的气压增大，当饮料瓶中表压达到最大允许值 400kPa 时，用手闸释放饮料瓶，装有“水”火箭沿初始设定过角度的轨道，水通过喷口向后喷出，获得反作用力射出。

1.1 水火箭相关基本问题

- (1) 长径比：细长的火箭通常稳定性略好。
- (2) 头椎：“流线型”减小阻力，提高稳定性。
- (3) 尾翼：对于细长(L/D 较大)的火箭，长宽约为 1.5 个筒径。
- (4) 重心与压心位置：为保持火箭飞行稳定性，要求重心相比较压心更靠近头椎。



头椎



尾翼

1.2 “水”火箭制作特点

增大“水”火箭射程、增强飞行稳定性，关键是增大初动能和减小空气阻力。

1.2.1 容量大

增大初动能最根本的方法是使“火箭”储存足够大的能量，“箭”内空气必须多，压强必须大，这就必须增大容量，由于实际情况，我们的制作方法达不到连接两个塑料瓶加 400kPa 表压的强度。因此我们使用单个饮料瓶作为动力装置。

1.2.2 头稍重，水适量

适当增加“火箭”的质量可使其初动能增大，并增强飞行稳定性。为此，可在箭头内放一些橡皮泥，湿纸等重物作配重，增强飞行的稳定性“火箭”过轻过重都不好，需反复试验确定最佳值。

“火箭”装水要适量，可以先经过理论计算得出适合值，再反复试验确定最佳值。

1.2.3 头圆尖，尾细小

物体在流体中运动，所受的阻力与其几何形状有很大关系，圆头尖尾的流线形物体能显著减小阻力，因此要把箭头做得圆尖，尾做得细小。饮料瓶口朝下，不仅可以作为注气装置，还可以保证尾部细小。

1.2.4 口适宜，翼薄小

喷口大小已经确定，为 0.085cm，尾翼选用薄而硬的材料，尽量做得小些，减小尾部重量，这样既减小了摩擦阻力和压差阻力，又增强了飞行的稳定性

1.2.5 面光滑，身细长

在流体中运动的物体所受摩擦力与表面积大小及光滑程度有关，箭体要做得细长，因为空气阻力与截面积成正比，宜选用身稍细的饮料瓶。

2 我们的水火箭

我们的制作了“四代”水火箭，是在不断的在实验中汲取经验教训的过程中慢慢改进的。由于第三代火箭在试飞过程中损坏，所以目前只有三“个”水火箭



图 1 队员照片与我们的第一代水火箭

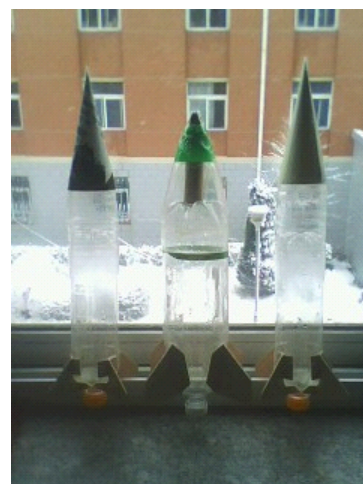


图 2 “水”火箭

2.1 制作材料准备

材料汇总：

制作项目	种类	规格/L	数量/个	种类	规格/L	数量
箭身	醒目（瓶）	1.250	4	农夫山泉（瓶）	0.550	1
	怡宝（瓶）	0.555	2	健力宝（瓶）	0.560	1

制作项目	种类	规格	数量	种类	规格	数量
头椎	硬质纸	0.5m*0.85m	1	橡皮泥(配重)	500g	1
	硬币	一角	10	屈臣氏（盖）	\	1
尾翼	硬质纸	0.5m*0.85m	1	AB 胶	\	2
	胶带	\	2			

2.2 火箭制作成果相关参数及制作过程

2.2.1 大、小火箭相关参数测量值

项目	火箭一	火箭二
质量/kg	0.09	0.125
体积/L	0.56	1.25
体长/cm	44	40
半径/cm	6	8.5
翼长/cm	7.3	4.7
重心/cm	24.5	24.5
长径比	6	6
翼径比	1	0.7

2.2.2 具体制作过程

第一代水火箭，如图 1，由于当时未查询相关专业资料，我们按网上的制作流程完成了第一个火箭，由于尾翼过大，未经试飞就更改尾翼，改进成第二代水火箭，如图 3。

第二代火箭：箭身为一个大醒目瓶作为动力装置，一个剪开的醒目瓶作为火箭头部，连接处用 AB 胶和胶带。尾翼沿箭身呈 45 度倾斜，如图 4，头椎部装有一个硬纸卷和少量橡皮泥作为配重，套上屈臣氏蒸馏水的瓶盖，整体箭身线条流畅，在第一次试飞过程中为几个火箭中最好成绩。



图 3 二代水火箭

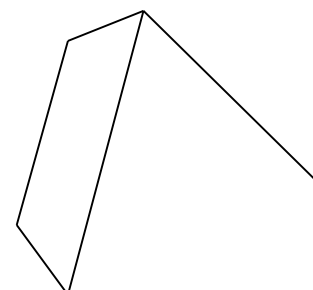


图 4 二代水火箭尾翼

第四代火箭：如图 5，箭身采用 0.56L 健力宝瓶。头椎采用较硬书皮纸卷成，内加橡皮泥作为配重，如图 6。尾翼紧贴瓶体后部，分别采用直角和后掠圆弧形形状，火箭整体比较轻盈，线条简洁，在二次试飞过程中均取得较好成绩。

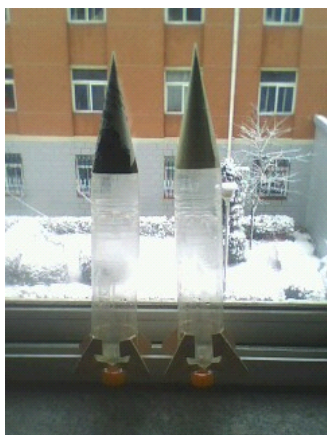


图 5 四代火箭



图 6 头椎



图 7 尾翼

第三代火箭：采用的是两个大醒目瓶剪开，并用 AB 胶连接，由于强度不够，在第二次试飞中损坏。

2.3 “水”火箭优化分析

2.3.1 理论原理和公式推导

向水火箭注入适量体积 V 的水作为燃料，将水火箭放置在发射架上，向水火箭注入 4 个表压，根据理想气体状态方程：

$$P = P_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^k$$

可以推算出火箭发射口的气压 P 。火箭在飞行过程中满足动量定理：

$$\sum \mathbf{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho \mathbf{v} d\tau + \int_{CS} \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A}$$

其中左端合力包括重力 $\mathbf{F}_g = -M\mathbf{g} = -(M - m_e)\mathbf{g}$ 和惯性力 $\mathbf{F}_1 = -aM = -a(M - m_e t)$ ，流量 $\dot{m}_e = \rho \mathbf{v}_e \cdot \mathbf{A}_e$ ；右端第一项为控制体积内每单位时间动量在 y 方向相对于控制体积，考虑到未燃燃料与火箭结构相对于火箭 并无动量变化，而正在燃烧的燃料所引起的动量变化也极小，因之，可近似的认为

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho \mathbf{v} d\tau \cong 0$$

右边第二项为通过控制体积表面的净动量变化

$$\int_{CS} \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} = -\dot{m}_e \cdot \mathbf{v}_e$$

其中， \mathbf{v}_e 为牵连速度，其大小可通过伯努利方程

$$\frac{P'}{\rho} + gz + \frac{v^2}{2} = \frac{v_e^2}{2}$$

求得。通过推到可得加速度 $\mathbf{a} = \frac{\dot{m}_e \cdot \mathbf{v}_e}{(1-\alpha)V\rho + M} - g\sin\alpha$ 。又有燃料（水）的质量变化

$$\Delta m = \Delta\alpha \cdot V \cdot \rho$$

和时间变化

$$\Delta t = \frac{\Delta m}{\dot{m}_e}$$

最终可推得速度 v 。

公式推导：

状态方程： $P = P_0 \left(\frac{V_0}{V}\right)^k$ ，其中 $P_0 = P_{\text{表}} + P_{\text{atm}}$ ， $P_{\text{表}} = 400\text{kPa}$

由伯努利方程 $\frac{P'}{\rho} + gz + \frac{v^2}{2} = \frac{v_e^2}{2}$ 得： $v_e = \sqrt{\frac{2P'}{\rho}}$ 其中 $P' = P - P_{\text{atm}}$

流量： $\dot{m}_e = \rho v_e \cdot A_e$ 其中 $A_e = \frac{\pi d^2}{4}$ ， $d = 0.0085\text{m}$

水质量变化： $\Delta m = \Delta\alpha \cdot V \cdot \rho$ 其中 $\Delta\alpha = 0.02$ ， V ：火箭体积

时间变化： $\Delta t = \frac{\Delta m}{\dot{m}_e}$

加速度： $\mathbf{a} = \frac{\dot{m}_e \cdot \mathbf{v}_e}{(1-\alpha)V\rho + M} - g\sin\alpha$ 其中 M ：火箭质量， $\alpha = 48^\circ$ （一般取 $50^\circ \sim 55^\circ$ ）

速度： $\mathbf{v}_n = \mathbf{v}_{n-1} + \mathbf{a} \cdot \Delta t$

2.3.2 “水”火箭优化过程

使用 Excel 进行迭代计算，计算出水射尽时，即 $\alpha = 1$ 时速度值最大对应的空气比 α ，得出最优空气比和对应速度，如下表所示，为最有空气比对应的计算过程。

[illegible]

空气比重为0.6时， 最优解在空气比重 0.6左右。	耗时0.172767s。	最佳注水质量0.34kg
----------------------------------	--------------	--------------

结论与感受

结论：

由理论计算，大火箭空气比重为 0.64 时，可得最优解，最佳注水质量 0.45kg，对应速度为 31.716m/s。小火箭最优解在空气比重 0.6 左右，最佳注水质量 0.34kg，对应速度为 25.35m/s。理论计算中未考虑空气阻力影响，因此在实际情况中，空气比应比理论值大一些，空气比应为 0.7~0.8。

感受：

水火箭的发射和飞行过程中都包含着丰富的物理原理和流体力学原理，然而其趣味性和可操作性极强，备受青少年朋友喜爱。笔者在童年时期也曾亲自制作并成功发射水火箭。当时虽然设备简单，却玩的不亦乐乎。而作为一名大学生，在思考如何设计水火箭的同时也要从整体上把握水火箭的发射和飞行原理。这就需要有扎实的理论基础。同时，这些理论基础也是我们这些立志搞科研的青年人所必备的素质。

在制作和优化水火箭的过程中，我们可以深刻的体会到系统问题的复杂性，我们必须建立从感性到理性、从定性到定量综合集成的思想，充分发挥人的主观能动性，从提出问题、分析问题到解决问题始终保持清晰的思路，充分利用现有文献，不断提升水火箭的制作水准。

参 考 文 献

- [1] 严宗毅等. 流体力学[M]. 高等教育出版社.
- [2] 辛贵书. 提高水“火箭”效果之措施[DB]. 沧州师范专科学校物理系.
- [3] Model_Rocket_Design_Manual[DB].