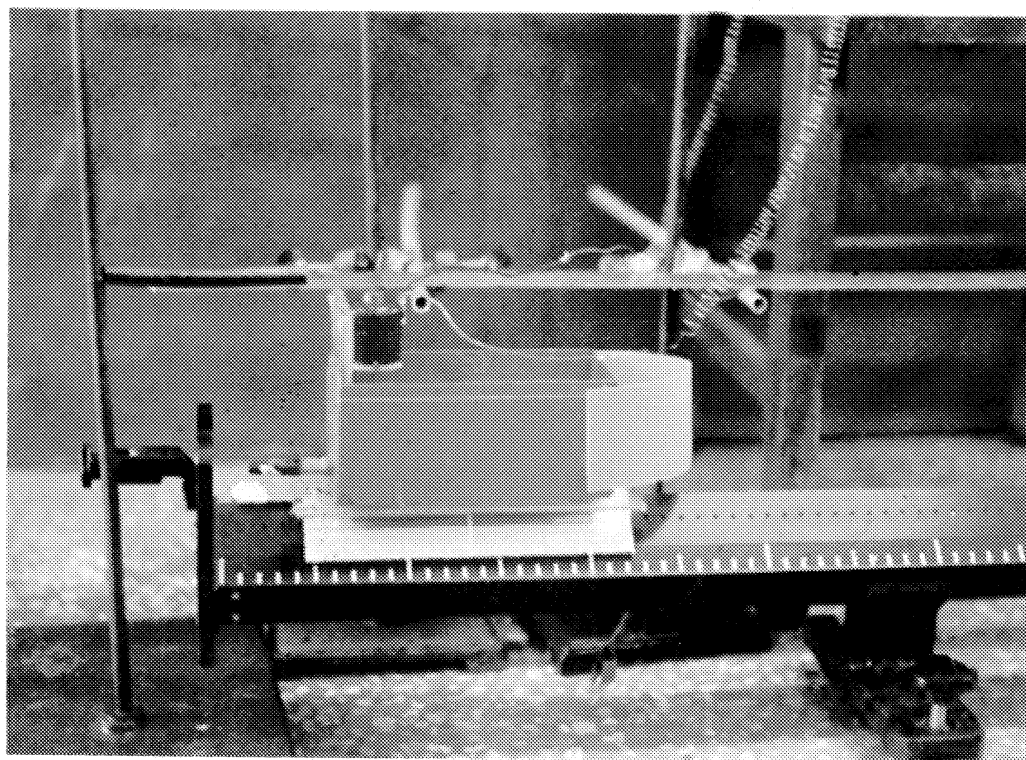


說明火箭原理的模擬實驗

高中教師組物理科第三名

省立板橋高級中學

作者：沈嘉祥



一、研究動機

「動量」是高中物理力學篇的重點之一，有關動量守恒性常以「火箭」為例當作解說，火箭固然是我中國先民的智慧結晶，然因未善加研究方展，反為西方世界所用，令人痛惜。

國內的高中生，甚或大學生，除了在節日慶典能見到娛樂性的火箭之外，就只能在電視、電影裏看看外國火箭的發射記錄片斷，間或有些許學校組織「火箭研究社團」能身歷其境外，鮮少有較實際的體驗，因此常會造成火箭的推進係與空氣間的作用和反作用所造成，與噴射機之飛行概念混淆不清，為了澄清這種誤解，更為了說明上的便利，故而設計這套模擬實驗，以做為示範教學或學生實驗之用。

文內提及之「火箭」實際上若以「水箭」名之應更為妥切，但為了方便，仍沿用「火箭」之名。

二、研究目的

- (一)探討「火箭」推進時推力受何變因的影響。
- (二)探討「火箭」的加速度受何變因的影響。

三、研究設備器材

(一)思考及設計過程：

1 噴料的選擇：

在方便性及安全性的原則下，選擇了最容易取得的液體——水。

2 噴水裝置的設計：

為了尋求強勁有力的噴水裝置，由最初的「壓擠式」設計起，進而有「螺旋槳式」，到目前本實驗所用的「渦輪式」。

3 電源供應的設計：

為了減輕起始質量 M_0 ，由最初的「電池式」，進而「電聯車式」，到目前的「手提隨行式」。

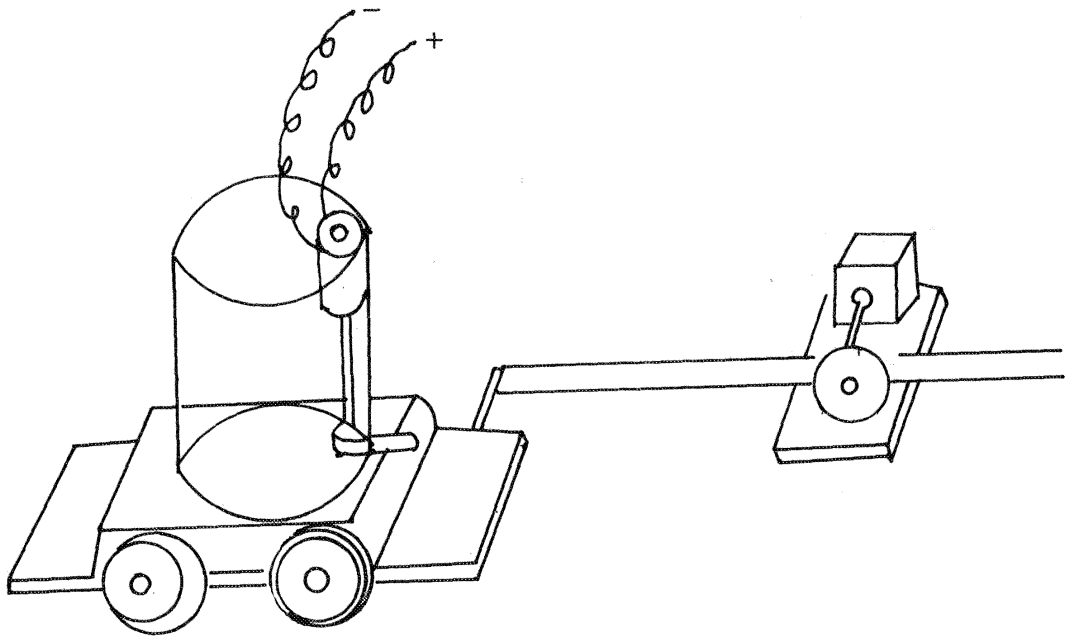
(二)所需設備器材：

玩具車、塑膠盒(罐)，9~12V馬達，海棉、橡皮管、滴管、原子筆心筆管、鐵絲、力學滑走台全套裝置、電源供應器、壓克力板、漆包線、量筒、米尺、紙帶、複寫紙、導線、電動計時器、瞬間接着劑、強力膠。

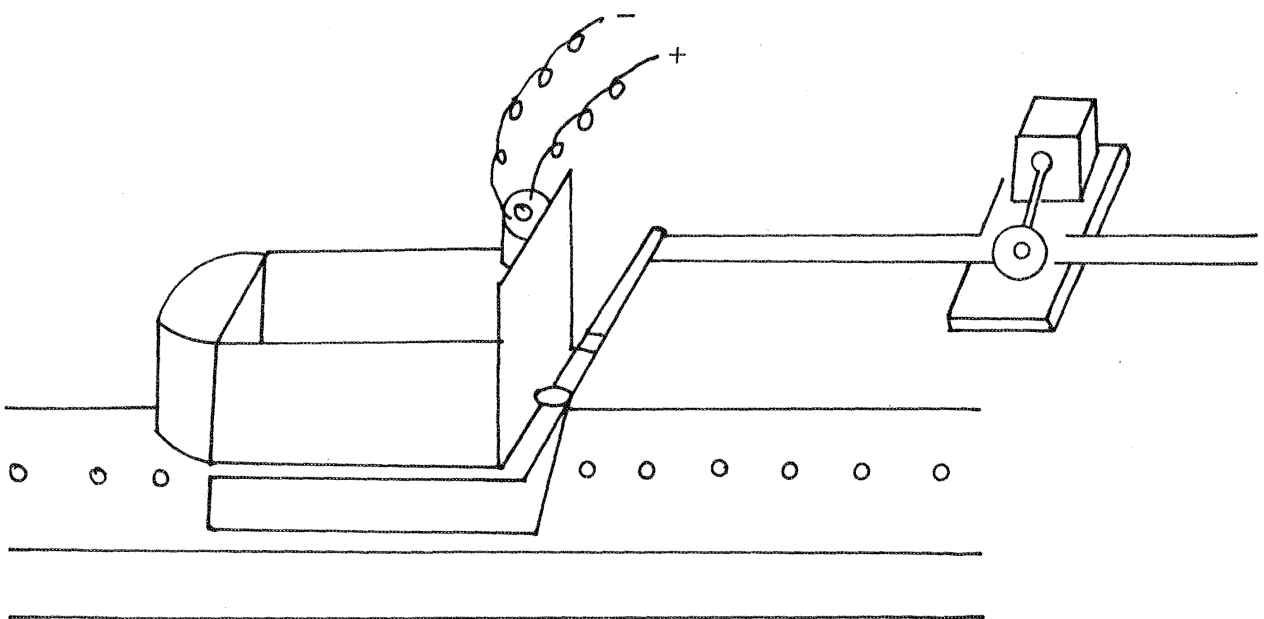
(三)裝置：

1 平移式

(1)車輪式

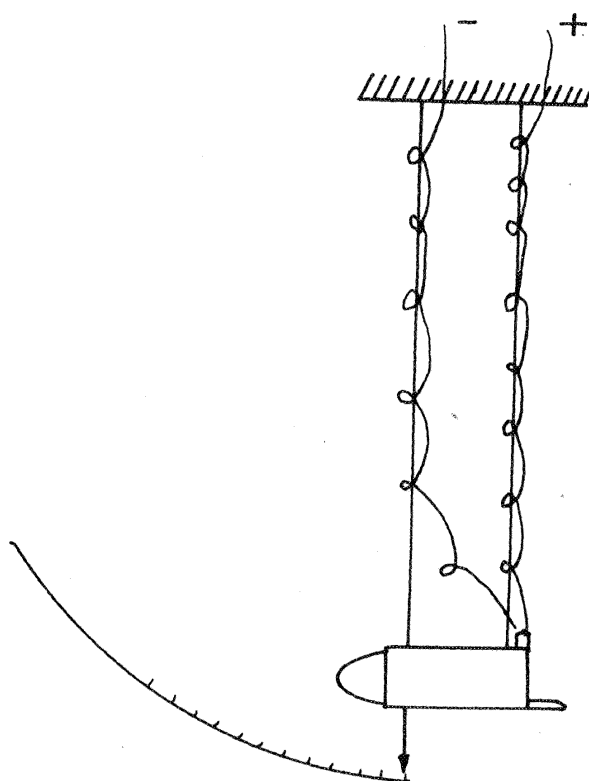


(2)氣墊式

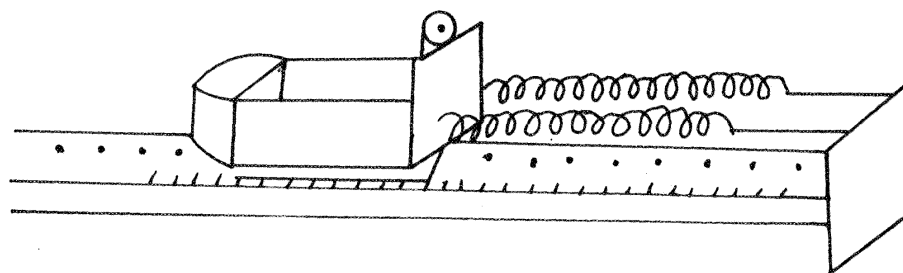


2 靜態式

(1) 擺式



(2) 平衡式



四、研究過程

(一) 預備實驗

- 1 測量「火箭」的 $\frac{\Delta m}{\Delta t}$
- 2 測量噴料——水的噴出速度。
- 3 改變電源電壓，尋求最適合實驗的電壓。

(二) 動態實驗

- 1 測電動計時器之頻率。

2. 測「火箭」淨質量及水之密度。
3. 加水、通電、測單位時間之噴水量。
4. 量噴嘴口徑，並求出噴水之出口速度。
5. 接上紙帶，加水、通電、噴水，利用打點計時器測「火箭」之運動狀況。
6. 分析紙帶，將數據列表，並作 $S-t$ 、 $v-t$ 、 $a-t$ 、 $a-m$ 之關係圖。

(三)靜態實驗

1. 將「火箭」用細長繩吊起，下端黏一指針，測噴水過程中指針對應的角度，可分為固定質量及變化質量二種方式。
2. 將「火箭」以串聯彈簧拉住，測其噴水時彈簧之伸長量，藉以求噴力，可分為固定質量及變化質量二種方式。

五、實驗結果 (略)

六、討論

(一)設某瞬間火箭質量為 M ，在極短時間 Δt 內，以 V_e 的出口速度噴出質量 Δm 的噴料，而獲得速度變化量 ΔV 。

則 $M \cdot \Delta V = \Delta m \cdot V_e$

$$\Rightarrow M \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot V_e$$

$$\text{當 } \Delta t \rightarrow 0, \text{ 設 } V_m = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow M \cdot a = V_m \cdot V_e$$

$$\text{又 } V_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\pi r^2 \cdot \rho \cdot \Delta x}{\Delta t} = \pi r^2 \rho V_e$$

$$\Rightarrow M a = \pi r^2 \rho (V_e)^2$$

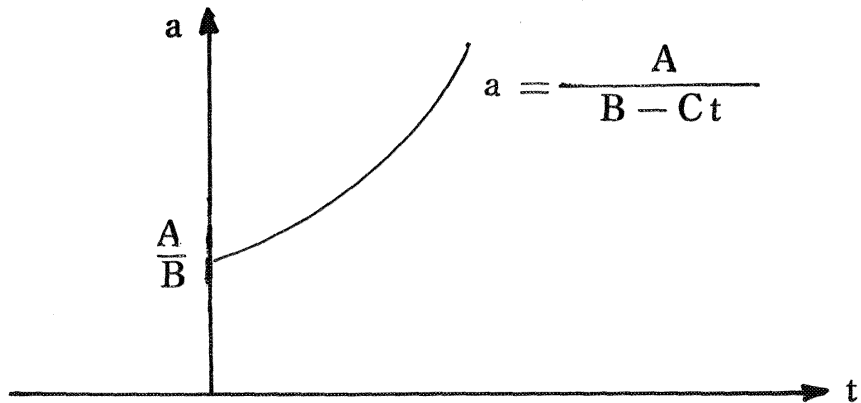
若噴口半徑 r ，噴料密度 ρ 為定值，則

$$F = Ma = K(Ve)^2 \quad K = \pi r^2 \rho$$

1. 推進力 F 與出口速度 Ve 的平方成正比。
2. 若 M 維持定值，則 $a \propto Ve^2$
3. 若 $M = M_0 - (Vm)t$ ，且 Ve 維持定值，則

$$a = \frac{K(Ve)^2}{M_0 - (Vm)t} = \frac{A}{B - Ct} \quad A, B, C \text{ 爲常數}$$

即加速度 a 與時間 t 的關係圖線爲雙曲線。



$$4. a = \frac{A}{B - Ct} = \frac{KVe^2}{M_0 - Vm t} \quad K = \pi r^2 \rho$$

$$\int_0^t a dt = \int_0^t \frac{A}{B - Ct} dt$$

$$V - V_0 = -\frac{A}{C} \ln(B - Ct) \Big|_0^t = -\frac{A}{C} [\ln(B - Ct) - \ln B]$$

設 $V_0 = 0$

$$V = -\frac{A}{C} \ln \frac{B - Ct}{B} = -\frac{A}{C} \ln \left(1 - \frac{C}{B} t \right)$$

代 $A = KVe^2 = \pi r^2 \rho Ve^2$ ， $B = M_0$ ， $C = \pi r^2 \rho Ve$

$$\Rightarrow V = -Ve \ln \frac{M_0 - \pi r^2 \rho Vet}{M_0}$$

$$= -V_e \ln \frac{M}{M_0}$$

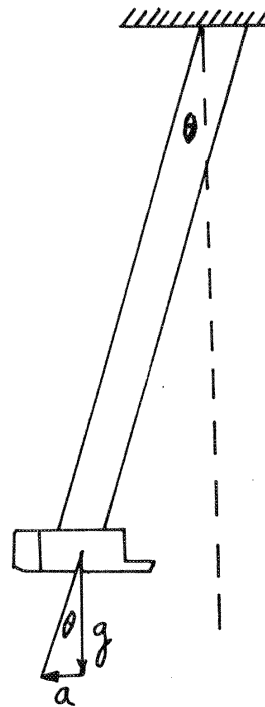
$$\Rightarrow \frac{V}{V_e} = \ln \frac{M_0}{M}$$

(二)本實驗中擺式的靜態實驗之理論依據如下：

$$Ma = \frac{\Delta m}{\Delta t} V_e = V_m \cdot V_e$$

$$a = g \tan \theta = \frac{V_m \cdot V_e}{M}$$

$$\Rightarrow \tan \theta = \frac{V_m \cdot V_e}{Mg}$$



1. 若 V_m , V_e , M 均為定值，則 $\tan \theta$ 亦為定值。
2. 若 V_m , V_e 為定值，則 $\tan \theta$ 與 M 成反比，但 $M \tan \theta$ 與 $V_m \cdot V_e$ 成正比。

七、結論

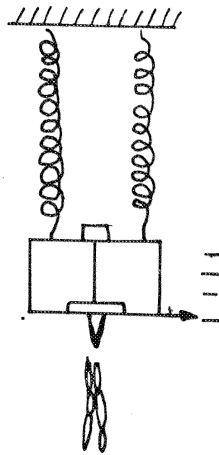
- (一)火箭是遵循「動量守恒原理」，藉著與噴料間的「作用和反作用」而向前推進的。
- (二)本實驗中「動態」部份，係 $F = Ma = \text{定值}$ ，即定力作用，但因 M 漸減，故火箭的推進是 a 漸增的變加速運動。
- (三)靜態實驗部份，若維持 M 為定值時，則見 a 亦為定值，是屬於定力作用的情況。若 M 漸小，亦見 a 漸增。
- (四)靜態實驗是本實驗的精心設計，因其屬於半靜態狀態，故極適合從事 M 為定值或變質的實驗，又因受到摩擦力與空氣阻力極微，故實驗結果甚能符合理論推導。
- (五)動態實驗若以「車輪式」在地面操作，因受摩擦力，空氣阻力、地面不夠平坦等因素影響，實驗結果相當不準，然因所需設

備最少，費用最低廉，仍不失為一演示現象的好辦法，尤其學生們目睹其愈跑愈快，會留下極為深刻的印象。

(六)動態實驗若以「氣墊式」操作，受到之摩擦力較小，並且不會有運動面不平坦之苦，實驗數據較準，但仍受有空氣阻力無法克服，而且運動範圍有限（本校之氣墊軌約長2米），所需設備較昂貴，是其缺點。然亦極適合示範現象。

(七)靜態實驗是最值得推廣的，因其所需道具最易取得，最為簡便，同時並綜合有靜力平衡的觀念在內，最適於驗證理論。但事前準備很費時。

(八)本實驗另設計有向下噴射的型式，藉重量之減輕來推算噴力及所產生之加速度，是今後發展之一項方針：



(九)本實驗「動態」部份的測時裝置仍採用學校的現成設備——電動計時器，紙帶的摩擦，尤其是被噴濕後影響更鉅，故設計為側面拉動，若能改為光電計時的話，應能提高準確度，不過在分析時只能得數組資料，似乎可利用快速閃光攝影以分析，惜本校尚未購有此設備。

(十)若欲將諸項摩擦、空氣阻力、地面不平坦等因素之影響減至最低，噴水裝置似可改以功率更高的交流電小馬達，使噴出強勁有力的水柱，單位時間的出水量又多，即推進力更大，如此應更能提高準確度，此亦為今後發展的方向之一。

八、參考資料及其他

(一) Halliday . Resnick Physics 物理學第三冊

東華書局五十七年三月臺二版

(二) 高級中學科學課程試用教材：物理 I 上册修訂本

國立台灣師範大學科學教育中心編印

(三) 高中物理上册

東華書局七十年六月三版

評語：利用簡單材料完成實驗裝置，以「噴水」代替「噴氣」模擬火箭原理，設計合理可合教學使用，研究過程完整，製作中克服若干困難，研究精神可嘉。