

2022 年【全國科學探究競賽-這樣教我就懂】

高中（職）組 成果報告表單

題目名稱：迷珠競走 - 剛體質點在特斯拉閥中的流動探討

一、摘要：

特斯拉閥是一種讓流體優先沿一個方向流動的模組，且從兩方向流動時流速會有顯著差異。在此探究中，我們以特斯拉閥模型為基礎利用鋼珠取代流體，研究在不同變因下特斯拉閥中鋼珠的兩流動方向的質量流率及其差異。變因包括不同圈數的特斯拉閥與不同鋼珠流入初速。我們主要利用拍攝影片的方式，配合鋼珠通過特斯拉閥的運動紀錄，分析影片中時間軸上鋼珠流動的情況。從實驗結果可得知即使將流動主角換成非流體類的鋼珠，它在特斯拉閥兩端流動方向的質量流率也有顯著的差異，且鋼珠流過特斯拉閥的速度越快，順向與逆向的差異性越顯著。

二、探究題目與動機

某次我們在觀看物理相關影片時，偶然看見特斯拉閥的相關介紹，其無需任何可移動組件便可引導流體優先沿一方向移動的特性讓我們想更深入的了解它。在進一步查詢資料後我們對其未被廣泛使用的事實產生疑問，於是想透過實際操作實驗來了解其箇中原由，並希望能透過數據分析了解特斯拉閥可能的應用。

我們曾用 simflow 軟體進行水在電腦建構的特斯拉閥模組中的流動探討，並分別在順向與逆向流動中了解特斯拉閥結構上對流體的影響。於是初期我們嘗試實際建構模組並垂直擺放，以鋼珠代替流體流動，一次流放 150 克，但發現只能做出質量流率大致趨勢上的差異，所以最後我們將模組與桌面傾斜 20 度角放置來克服摩擦損耗，並大量流放小鋼珠，得到更穩定且近似質量流率定義的結果。

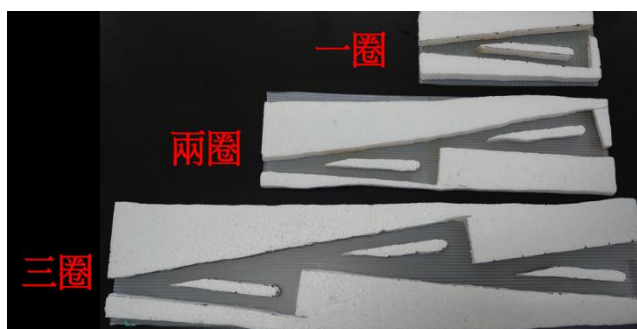
三、探究目的與假設

(一) 特斯拉閥介紹：

1. 流動方向：

特斯拉閥為一可讓流體優先沿一個方向流動的模組，且從兩方向流動時速率會有差異。我們將小鋼珠能大部分從模組中央導管流過的流動方向定義為順向；小鋼珠會流動到模組中央導管與的圈行彎道重新會合並混合的流動方向定義為逆向，並在實驗中針對兩流動方向進行探討。

2. 此實驗中我們對於特斯拉閥圈數的定義如下圖：

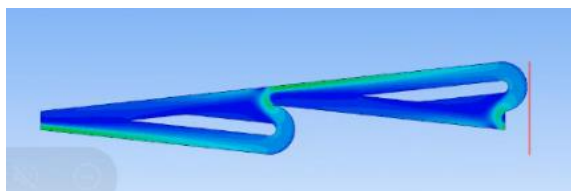


圖二、圈數說明

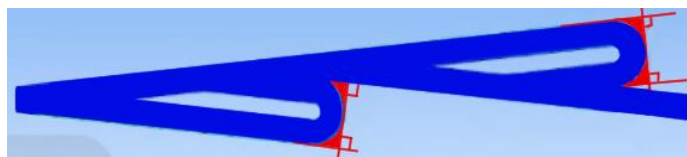


圖一：流動方向說明

3.匯流處形狀：



圖三：特斯拉閥原圖



圖四：特斯拉閥修正圖

原先製作模組時我們將上圖中深藍色部分切除，其餘部分保存以製作特斯拉閥。從流動過程中我們發現不論何種大小的小鋼珠，在經過匯流處彎曲軌道時，會因為給予速度不足，造成鋼珠停滯無法繼續流動，而當有鋼珠卡在匯流軌道時，便會與後流進的鋼珠堆疊，更加無法前進，且若鋼珠堆到一定程度，剩下的小鋼珠就只會從主幹道流通，這便不符合發揮特斯拉閥阻擋流動的特性。更改過後的模組式除了將深藍色部分切除，也另外除去圖中的紅色部分。方式是將邊界延伸，在通過各個圓圈處的最低點，與邊界延長線做垂直兩交點，紅色區域切除後，原先的彎曲匯流軌道變成向下的斜坡，這樣不會讓鋼珠卡在匯流處而能繼續流動，雖然這個設計與原先特斯拉閥樣貌不同，但考慮到我們的流動物質是剛體，相關文獻與網路上也有各種不同設計的特斯拉閥，這樣的變更讓剛體在模組中流動的實驗裡符合特斯拉閥的阻擋特性。

(二)質量流率定義：

當流體在管道中流動時，單位時間流進或流出之質量稱為質量流率，單位為 kg/s ，通常以 \dot{m} 表示。我們將其定義為 $\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta N \times m_0}{\Delta t}$ ， Δt 為單位時間、 Δm 為單位時間內流過特定位置的鋼珠質量、 ΔN 為單位時間內流過特定位置的鋼珠顆數、 m_0 為一顆鋼珠的質量。

我們將小鋼珠取代流體，且因為質量流率的單位為公斤/秒，故實驗時仍以量測鋼珠的質量以及流經的時間來換算鋼珠的質量流率。

透過測量鋼珠流過特斯拉閥的質量流率，我們能更加瞭解其特性，於是我們設計了以下幾個實驗：

- 一、 將鋼珠流過不同圈數的特斯拉閥模組並比較兩流向流出與流入的質量比值的差異
- 二、 更改鋼珠流過特斯拉閥的初速並比較兩流向流出與流入的質量比值的差異
- 三、 推論鋼珠在特斯拉閥中的碰撞情況並比較兩流向與不同初速的差異

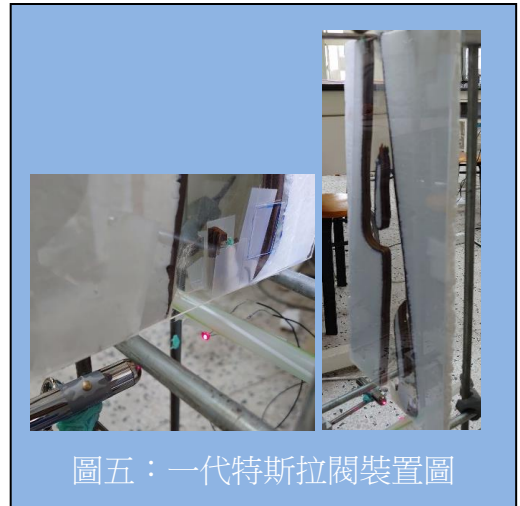
四、探究方法與驗證步驟

(一)製作特斯拉閥模型與實驗裝置

1. 一代特斯拉閥模型與裝置

起初我們認為若要比較不同變因下鋼珠流經特斯拉閥模型的瞬時速率，需求得其時間。但如果用按碼表的方式記錄會造成誤差過大，故在直立擺放的特斯拉閥模型尾端架設一光敏電阻裝置與雷射筆，希望能透過 Arduino 的輔助求時間。

但在實際操作後發現鋼珠通過的速度過快，時長不足以使光敏電阻感測到光源變化，且鋼珠的尺寸較小，較難在流動過程中遮擋住雷射筆的光源使光敏電阻感應，於是我們繼續進行改良。



圖五：一代特斯拉閥裝置圖

2. 二代特斯拉閥模型與裝置

我們將光敏電阻拆除並架設手機錄影，希望能透過拍攝影片的方式，事後利用 Tracker 進行影片分析以求得定量鋼珠流過特斯拉閥裝置的時間。

但在嘗試此方式過後，我們發現這項方法只能求得鋼珠流過特斯拉閥的平均速率，而非瞬時速率，故繼續進行改良。

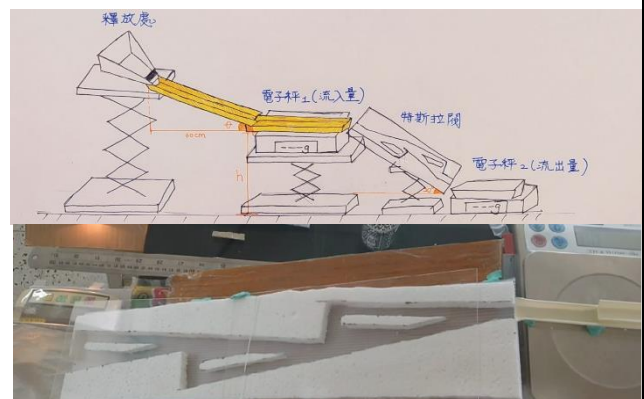


圖六：二代特斯拉閥裝置圖

3. 三代特斯拉閥模型與裝置

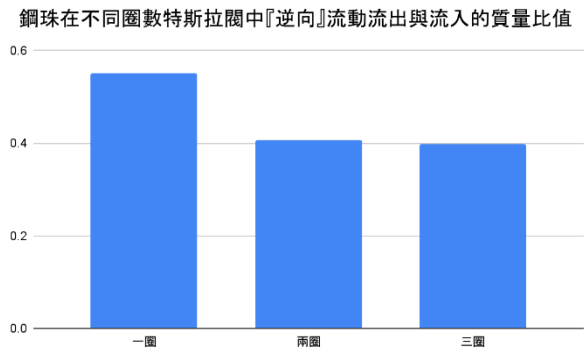
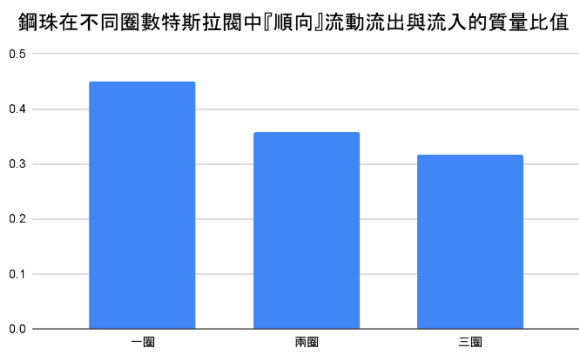
最終我們將手機架高，特斯拉閥裝置傾斜 20 度以確保鋼珠以正確的流向流動，且前後各放置一台電子秤。利用手機拍攝影片以得知每瞬間流進與流出特斯拉閥裝置的鋼珠質量。

此方式不僅能較精確的測量其瞬時速率，也能使鋼珠以穩定的初速流入，故在之後的實驗皆使用此特斯拉閥模型與裝置。



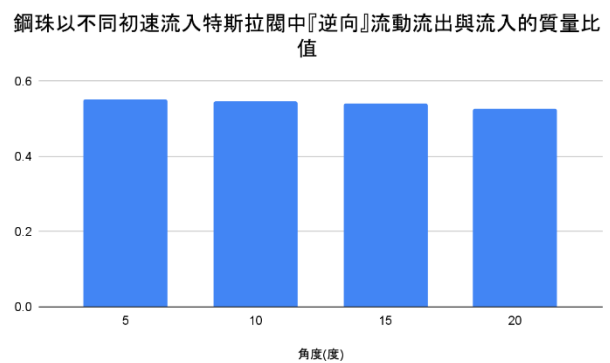
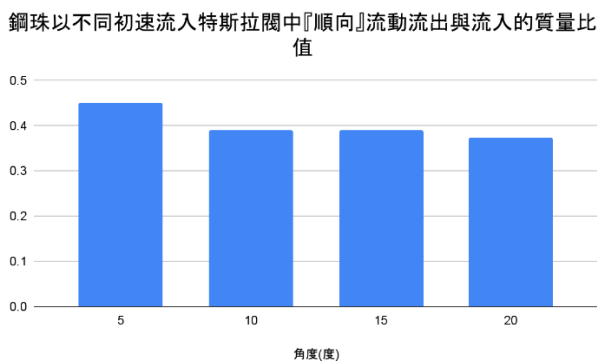
圖七：三代特斯拉閥裝置圖

(二) 實驗一：將鋼珠流過不同圈數的特斯拉閥模組並比較單位時間內兩流向流出與流入的質量比值的差異(傾斜 5 度)

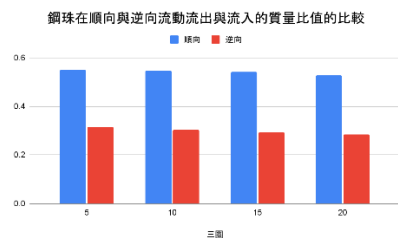
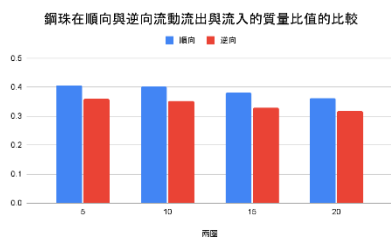
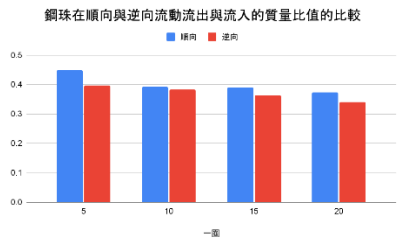


從左圖可知當特斯拉閥的圈數越多，順向流出與流入的流出與流入的質量比值由 0.4 下降至 0.3，顯示圈數越多，順向流動流出與流入的質量比值越小；從右圖可知當特斯拉閥的圈數越多，逆向流出與流入的質量流率比值由 0.5 下降至 0.4，顯示圈數越多順向流出與流入的質量比值越小。

(三) 實驗二：更改鋼珠流過特斯拉閥的初速並比較兩流向質量流率的差異(一圈特斯拉閥)



從上圖可知當通過特斯拉閥的鋼珠初速越快，順向流出與流入的比值由 0.4 下降至 0.3，顯示流入速度越快順向流出與流入的質量比值越小；從上圖可知當通過特斯拉閥的鋼珠初速越快，逆向流出與流入的比值皆接近 0.5，但比值有略為遞減的趨勢，顯示流入速度越快順向流出與流入的質量比值越小。



從上面三張圖可知，無論是一圈、兩圈、三圈的特斯拉閥，當流入的初速越大，其順向與逆向的流入與流出比值差異越大，阻擋效果越好。

五、結論與生活應用

- 一、在不同特斯拉閥圈數與初速下，小鋼珠的流出與流入量比值皆為順向大於逆向
- 二、當給予鋼珠的初速越快，鋼珠反彈後的速度越快，流出與流入量比值越小
- 三、鋼珠在不同圈數特斯拉閥中以相同初速流入的順向與逆向流動流入與流出的質量比值皆隨著圈數越多，比值越小

我們認為特斯拉閥在逆向流向時的阻擋特性可以被運用在運輸燃料等物質，此構造不但能防止流動物質逆流，也不需像其他繁複構造一樣需要定期保養以免部件磨損等，相較於其他單向閥，特斯拉閥是一個較符合經濟效益且有效的方式。

參考資料

- 一、馮朝剛(2002)。質量流率 mass flow rate。國家教育研究院。檢自 <https://terms.naer.edu.tw/detail/1328641/>
- 二、simFlow CFD software (2012 - 2022)。檢自 <https://help.sim-flow.com/tutorials/tesla-valve> (April.13,2021)
- 三、University of Colorado Boulder(2021 年 1 月 31 日)。Collision Lab_碰撞實驗室。檢自 https://phet.colorado.edu/sims/html/collision-lab/latest/collision-lab_zh_TW.html
- 四、K. Keizer(October, 2016). Determination whether a large scale Tesla valve could be applicable as a fish passage.