

投球機之設計與製作

學校名稱：南台科技大學電機系

隊伍名稱：老爹隊

指導老師：黎靖

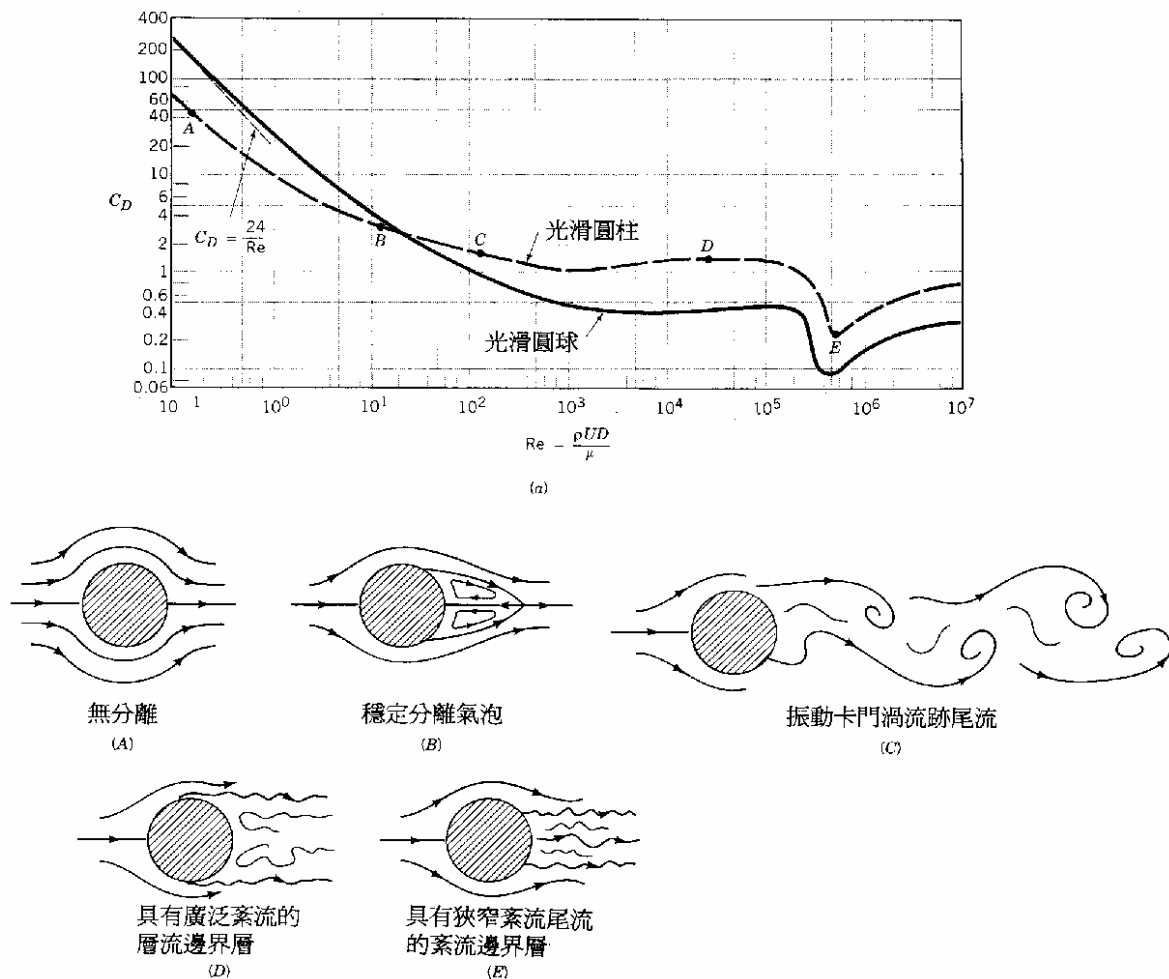
參賽學生：范姜宗霖、林政宏、陳銘耀

一、問題敘述

本次比賽的題目可敘述成：將一個直徑 38mm 的乒乓球精準的傳送至 3.5m 外的目標區。基本上，傳送的方法可分成機構導引及空中飛行兩種方式。機構導引是利用機構的方式將球送至目標區或是目標區的附近，再將球置入目標區；空中飛行方式則是在投籃區直接將球投射，球經由飛行的方式到達目標區。由於本隊採用的是空中飛行方式，因此以下將只針對空中飛行方式所面對的問題(為便於敘述，稱之為乒乓球飛行問題)提出探討。

要有效的處理乒乓球飛行問題，必須對光滑圓球的流體力學有一些基本的認識。下圖是光滑圓柱與圓球的雷諾數與阻力係數的關係及流場示意圖。由圖可知，隨著雷諾數的改變，阻力會有所不同。特別是雷諾數在 100 左右，球的後方有卡門渦流系統，將會導致圓球的不穩定而有擺動的現象(乒乓球由於質量小更容易受到影響)；此外，在 $10^5 < Re < 10^6$ 範圍阻力係數出現急遽的變化，由於光滑圓球在空中飛行時，受到阻力的影響會減速，如果它的雷諾數恰在 $10^5 < Re < 10^6$ 範圍，將會因飛行期間速度的改變而有很大的阻力變化，從控制的觀點來看，這也不是我們所欲見到的；在 $10^3 < Re < 10^5$ 範圍，有一個阻力係數非常平坦的區域，因此我們應該將球速控制在這個範圍內，即球速在 0.4m/s 至 40m/s 之間。

另一個值得關注的問題是球體旋轉的影響，球體旋轉會使得球的行進方向上飄或下沉，同樣會導致控制上的困擾，所以也必須避開。



圖一、光滑圓柱與圓球的雷諾數與阻力係數的關係及流場示意圖

(from : Fundamentals of Fluid Mechanics, Munson, Young, and Okiishi)

由上述的分析可以瞭解，解決乒乓球飛行問題的最佳策略是：在球速 0.4m/s 至 40m/s 間，讓乒乓球以最快且不旋轉的方式飛行。

二、投球機系統的設計

我們設計的投球機系統可分成三部份：角架、投球機、及瞄準器。

2.1 角架

好的角架至少應該有 4 個自由度：高低的調整、及 roll、pitch、yaw 三旋轉軸的調整。除此之外，角架必須具有穩固性。當投球機在投球時產生之震動或後座力，角架必須加以吸收並保持系統的方位不受影響。由於角架的良窳對系統的可靠性及投球的準確性有很大的影響，因此設計一個穩固而且姿態容易調整的角架是非常重要的。

基於上述的考量，我們採用大型像機的角架作為投球機的角架，角架如照片一所示。



照片一：投球機系統

2.2 投球機

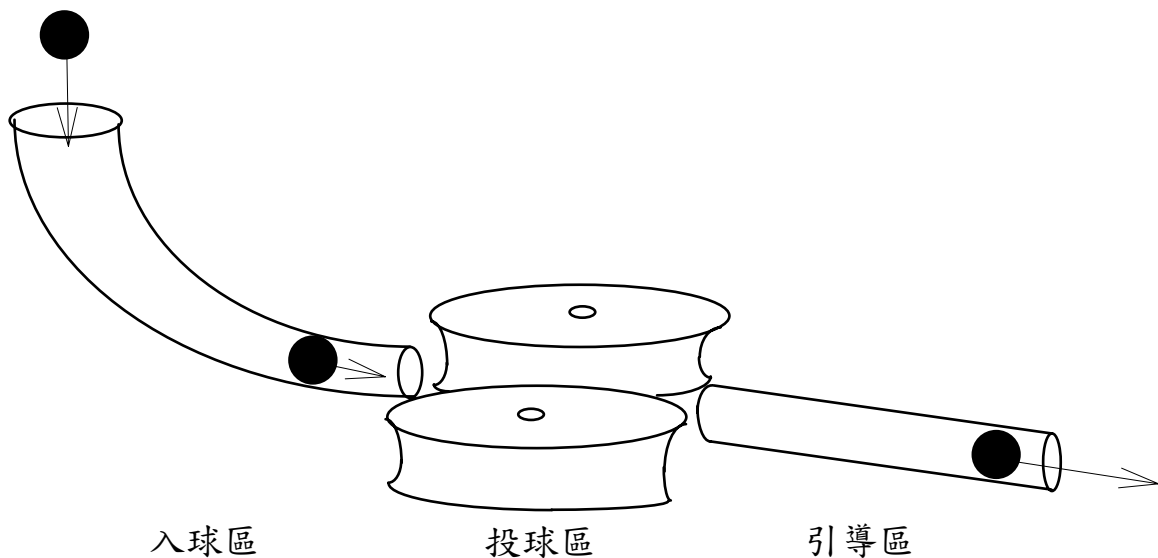
投射乒乓球的方式非常多，例如：打高爾夫球的方式、撞擊彈珠的方式、氣壓推送的方式、.....，不同專長背景的人就會有不同的方式。本隊經過慎密的思考及比較，並參考自身的專長，認為採用如照片二所示之磨擦輪投擲方式，不但結構簡單、容易製作，而且最能符合「快、穩、準」的要求。



照片二、投球機

2.2.1 投球機的原始設計

本隊最初設計的投球機包括入球區、投球區、及引導區三部分，說明如下：



圖二、投球機的原始設計

- 1. 入球區：**入球區是利用塑膠彎管製造而成，出口區的直徑為 40mm(i.e. 乒乓球的外徑為 38mm)，入口區經擴孔程序使直徑約為 42mm，方便置入乒乓球。
- 2. 投球區：**由可調整轉速的直流馬達、帶輪、及橡皮磨擦輪機構構成，是整個系統的核心。直流馬達的轉動經由圓形皮帶輪傳遞至主動磨擦輪，主動磨擦輪與從動磨擦輪間以交叉皮帶傳動，使兩輪的轉速相同但旋轉方向相反，乒乓球由兩磨擦輪的中間經由磨擦力投射出去。由於乒乓球的表皮既硬又薄，因此磨擦輪面採用具彈性的橡皮製成向內凹陷的弧型供乒乓球通過，兩輪凹陷區的最大距離略小於乒乓球的外徑。兩輪凹陷區的距離應恰到好處，若太大，則摩擦力可能不夠；若太小，則橡皮變形所蓄積之能量會在乒乓球脫離磨擦輪時釋放出來，造成彈射，而引起極大的誤差。直流馬達的最高轉速為 1800 rpm，可以使乒乓球以約 20 m/s 的初速度投射出去。

3. 引導區：為了讓乒乓球能夠準確的擊中目標，我們仿照來福槍的設計，利用內徑 40mm 的圓管製作了引導區。

2.2.2 投球機原始設計的缺點

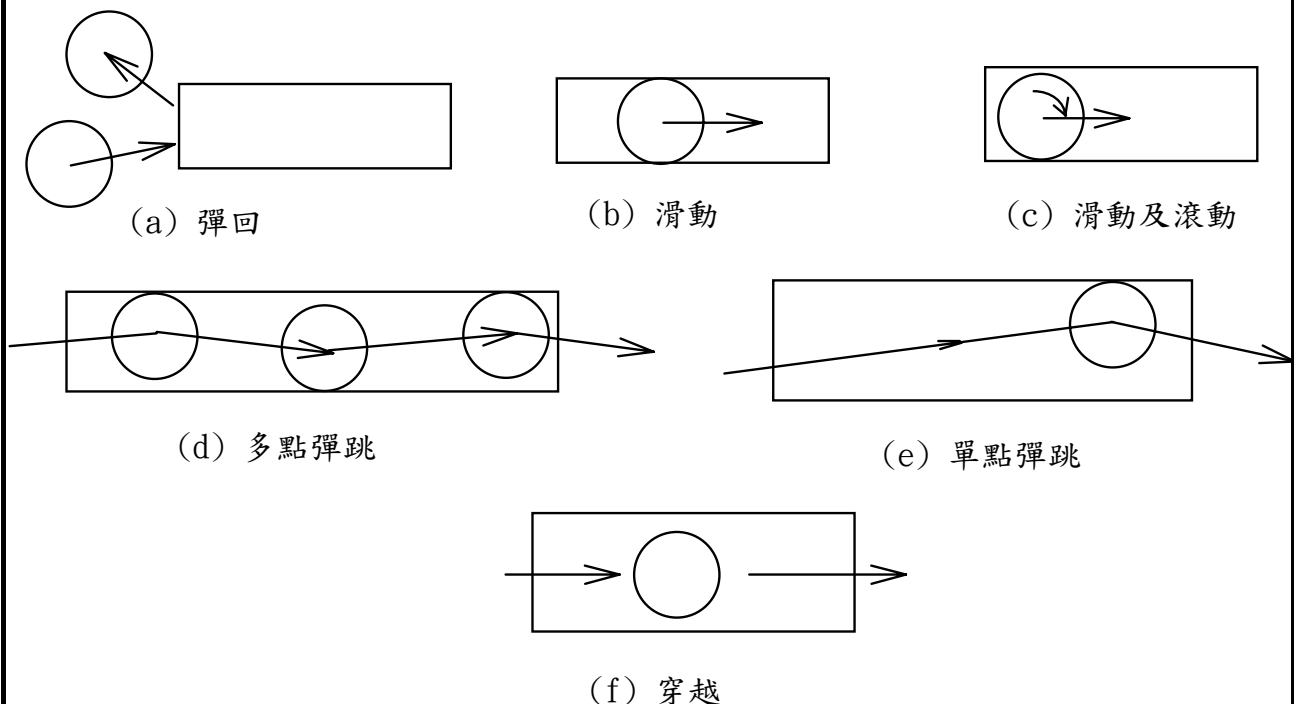
直覺上，原始的設計看起來非常合理，然而實際測試的結果卻不理想。經過詳細的實驗觀察，我們發現原設計有下列的缺點：

1. 入球區的問題

在原始的設計，表面上只要將球由入口處投入即可，看起來很理想，實際上卻會引入嚴重的誤差。第一個問題是筆因於管的內徑必須大於球的外徑，如此球才不會被卡住，但如此一來，球由入球區的出口出來時的位置每次都不同，因此橡皮磨擦輪夾住球的位置也不一樣。由於橡皮磨擦輪的表面為向內凹陷的弧型，當乒乓球沒有被正確的夾在橡皮磨擦輪的中心位置時，乒乓球表面受到不均勻的應力，同時磨擦輪與乒乓球的橡皮接面也會蓄積不均勻也不對稱的彈性能，當乒乓球脫離橡皮磨擦輪時，此彈性能釋放出來，會導致乒乓球射球失準，我們稱之為彈射現象。第二個問題是球從入口處進入至由出口處離開所需的時間，跟球在入球區內的運動方式有關，這個時間並不是固定值，由於目標物是隨著時間而改變，因此這個時間不能正確確定的延遲極可能會造成很大的誤差。

2. 引導區的問題

球在引導管內有六種可能的運動情況(如圖三所示)，分別說明如下：



圖三、球在引導管內六種可能的運動情況

(a) 彈回：當球的行徑與引導管間存在較大的夾角或引導管的直徑太小時，球可能無法進入引導管，而被彈回。

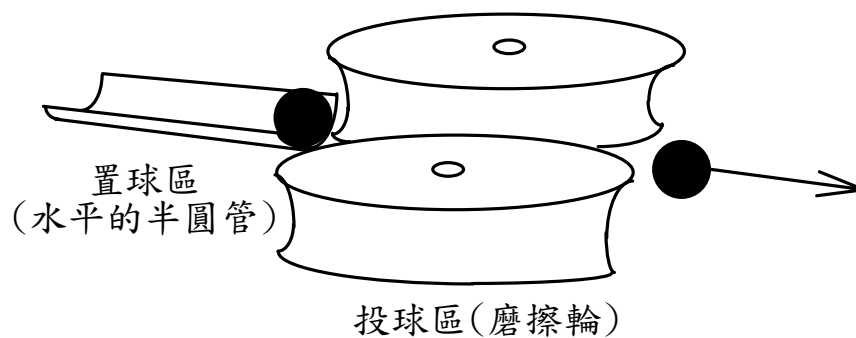
(b) 滑動：當球的直徑恰等於引導管的管徑時，球會在管內滑動，由於滑動磨擦很大，球會被嚴重減速，最後導致球速過慢。

- (c) 滑動及滾動並存：在引導管的管徑大於球的直徑時，可能發生滑動及滾動並存的運動方式。與情況(b)相同，球會被嚴重減速，最後導致球速過慢，此外，球的滾動會導致球的行徑飄移。
- (d) 多點彈跳：在引導管的管徑略大於球的直徑或引導管的長度較長時，極可能發生多點彈跳的現象。同樣的，多點彈跳會造成球速減慢及行徑飄移的不利影響。
- (e) 單點彈跳：在管徑大於球的直徑且引導管的長度較短時，很容易發生單點彈跳。單點彈跳最主要的缺點是造成球的行徑方向錯誤。
- (f) 穿透：最理想的情況是球穿透引導管。但如果真能如此，就代表引導管並未發生引導的作用，那又何必安裝引導管？

經由上述的分析可以瞭解到，引導管實際上並沒有存在的必要。

2.2.3 改良後的投球機之設計

針對原始設計的缺點，我們重新改良了我們的投球機，如圖四所示。引導區已被去除，入球區也改成由水平半圓管構成之置球區。乒乓球被小心的放在置球區的前緣，用手擋住，當要投球時，將手放開，不斷旋轉的磨擦輪使得中間的通道形成低壓區，因此乒乓球會被吸入通道中，利用這種方式可以確保乒乓球每次進入投球區的位置都相同，而且都是在磨擦輪的凹陷中央的位置。實測的結果顯示，改良後的投球機精準度大幅提昇。



圖二、改良後的投球機

2.3 瞄準器

為了能夠在投球前就讓操控者知道正確的落球點，我們利用雷射筆指示出落球點的位置，當然雷射筆的安裝位置及姿態必須經過正確的校正，才能達到要求。

三、投球機系統的誤差校正

由於每隊都只有六顆乒乓球，因此每顆球都很重要，不能將之浪費在負回授的測試上。換言之，拿高分有賴於設計出高準度的開迴路系統。不過，在這之前，

必須先找出誤差的來源，才能對症下藥。誤差的主要來源有四：時間延遲導致的誤差、投球機的姿態誤差、震動、及溫度對馬達轉速的影響，以下將分別說明並提出解決的方法。

3.1 時間延遲導致的誤差

總延遲時間包括人對事物反應的時間延遲(稱為**反應時間**，約 0.25 秒)及乒乓球由發射至到達籃框所需的時間延遲(稱為**飛行時間**)。時間延遲的影響有三方面：首先是重力會造成乒乓球在垂直方向的偏移，垂直偏移量與飛行時間的平方成正比；其次是目標區會隨著時間的不同而改變(部分高分的籃框是做旋轉運動)，因此會造成水平的誤差，此誤差與總延遲時間有關。第三個影響是外界氣流對乒乓球的影響，球速愈快或延遲時間愈小，外界氣流的影響也愈小。

由於我們設計之乒乓球速約 20m/s，投球區至籃框的距離約 3.5m，所以飛行時間約為 0.18 秒，如果乒乓球沿水平方向投射，則重力造成之垂直偏移約為 16cm。此外，由於籃框以 6 rpm 的轉速旋轉，所以總時間延遲(0.43s)造成之角度誤差為 15 度，換算成水平誤差相當於 3cm。

由於這兩項誤差都可以事先預估，因此可以利用前饋控制予以修正。

3.2 投球機姿態的誤差與校正

投球機的姿態直接影響到乒乓球的落點，因此投球機姿態的正確與否可說是決定勝負的關鍵。為此，我們必須設計出一套有系統而且每一步驟都很明確的校正方法，以確保每一次都可以將投球機的姿態調到正確位置。我們採用之校正步驟如下：

1. 將角架的腳拉伸至最長的位置。
2. 讓角架的三個支撐點形成邊長 1m 之倒正三角形，前方的邊與投球線重合。
3. 調整投球機的出口高度為 171cm(i.e. 目標中心點離地面高 155cm，加上重力造成之垂直誤差 16cm)。
4. 利用水平儀調整投射機的滾動角(roll angle)及俯仰角(pitch angle)，使保持水平。
5. 利用雷射筆調整投球機的偏移角(yaw angle)，使之為 0。
6. 投射 10 枚乒乓球，紀錄落點位置，分析誤差後，微調投球機的姿態。重複此步驟，直到完全正確為止。
7. 固定雷射筆使光點指向乒乓球的落點。
8. 微調投球機的偏移角(yaw angle)以修正因時間延遲造成之 3cm 水平誤差。
9. 試射。若仍有誤差，回到步驟 6。

3.3 震動與避震

投球機的馬達與皮帶輪的旋轉無可避免的會帶來震動，震動會影響投球機的姿態，從而使投射失準。為了避震，我們在投球機與角架間加入三根板彈簧，這三根板彈簧除了可以減震之外，還可以幫忙支撐投球機的重量，減輕角架平台之

負擔。

3.4 溫度對馬達轉速的影響

馬達如果散熱不良，會導致馬達的溫度上升，線圈的電阻因而增加，馬達電流下降，使馬達的速度下降，最後導致乒乓球的出口速度減慢，因而增加乒乓球的飛行時間，從而使時間延遲誤差。為了避免馬達過熱，我們在馬達邊安裝了一個風扇，以強化馬達的散熱能力。

四、作品特色

我們應用工程設計及分析的方法設計了一個結構精簡但投球準確的機器，這個機器的外表雖然簡單，但實際上卻是結合了流體力學、機電整合學、熱傳學、震動及結構力學、誤差分析、及儀器校正等多方面的知識才得以完成。