

## 盪鞦韆的奧秘與技巧

江長屹

國立彰化師範大學 物理系  
d2316079@hotmail.com

(投稿日期：民國 105 年 08 月 15 日，接受日期：105 年 09 月 20 日)

**摘要：**理解物理原理的內涵與應用，可以透過生活化實例來達成。好玩的盪鞦韆，其背後的物理原理並不簡單。本文從「功能原理」，先透過系統取定、力圖分析，再探討所有可能作功的力，以釐清盪鞦韆的奧秘。本文探討的鞦韆，侷限於硬式鐵條，但人的姿勢則包含站姿與坐姿兩種。首先，取定[人+椅子]為系統，則重力、摩擦力、正向力三者皆不作功，而空氣阻力會作負功，唯一能夠作正功的力只有張力，為了使張力作正功，人擺盪時的姿勢變化也有玄機。

**關鍵詞：**盪鞦韆、功能原理、概念推理

### 前言

理解物理原理的內涵與應用，可以透過生活化實例來達成，但往往看似理所當然的生活經驗，仔細探討其奧秘，才發現其中的原理並不簡單（張慧貞，2007，PP.110-112）。小時候我們很喜歡盪鞦韆，也都知道盪鞦韆的時候如何越盪越高，只要在鞦韆下降的時候往下蹲（或腳向下擺），上升的時候站起來（或腳向上翹），就能越盪越高。

但是以物理的觀點來看，盪鞦韆的原理真的那麼簡單嗎？盪鞦韆的過程中到底「力學能」守恆還是不守恆呢？如果守恆，還能越盪越高嗎？如果要讓鞦韆越盪越高，顯然「力學能」需要增加，那增加的來源為何呢？我們將透過「作功」來釐清盪鞦韆的原理。

### 原理探討

首先，先選定盪鞦韆時的「系統」，以釐清系統的內力與外力，再來探討力學能增加的來源。以下將分為兩種情況來探討，分別為站姿與坐姿，鞦韆的種類則侷限於硬式鐵擺，如圖 1 與圖 2 所示。



圖1 站立盪鞦韆



圖2 坐著盪鞦韆

### 一、站著盪鞦韆：

#### 1. 系統與力圖分析

首先，以站立在硬繩鞦韆為例，如圖 3 所示。我們先選定「系統」，將「人+座椅」視為系統，並假設繩子的質量可忽略。則系統內力包含 (1)人對椅子與椅子對人的正向力 $\vec{N}$ 、及 (2)人與椅子間的**摩擦力** $\vec{F}_f$ 。而「人+座椅」的 (3)**重力** $\vec{W}$ 、(4)擺繩張力 $\vec{T}$ ，以及 (5)**空氣阻力** $\vec{F}_{air}$ ，皆為系統外力。其力圖分析如圖 4 所示，以下將探討這五個力作功，對力學能的影響。



圖3 盪鞦韆之過程

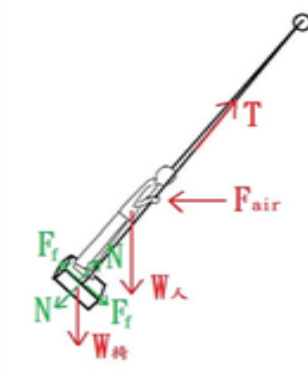


圖4 盪鞦韆之力圖分析

#### 2. 不影響「力學能」的力

上述五種力中，不影響系統「力學能」的力包含三種，其中

- (1) 人與座椅間的**正向力**( $\vec{N}$ )不作功，因為兩者之間的接觸點並無相對位移  
Jewett(2008)定義「作功」( $W = \vec{F} \cdot \vec{S}$ )其中的「位移」( $\vec{S}$ )為施力點的位移，而非物體質心的位移。因此正向力不作功，故不影響系統之能量。
- (2) 人與座椅間的**摩擦力** $\vec{F}_f$ 也不作功，因為此時人的腳與座椅之間並無相對滑動，因此兩者之間的接觸點並無位移( $\vec{S} = 0$ )，所以摩擦力也不作功。值得一提的是，萬一人與座椅之間有相對滑動，則摩擦力將會作負功，消耗力學能使鞦韆越盪越低。因此，「內力」雖然可以在系統內抵銷，但「內力作功」並不一定可以抵銷，所有「非彈性碰撞」，都是摩擦力做負功，能量變化不能抵銷，會損失系統的總力學能。

- (3) 人與座椅所受重力  $\bar{W}_人$ 、 $\bar{W}_椅$  在擺動過程中雖會作功，但每來回一週期的作功總和，將會正負抵銷，作功總和為零。因為重力為「保守力」(conservative force)，「作功」大小與過程無關，只與起點與終點有關，所以當系統完成一個週期(起點=終點)時，此保守力所作的功將為零( $\oint \mathbf{W}=0$ )。

3. 會影響「力學能」的力

- (1) 「人+座椅」系統所涉及的力，除了上述三種不影響力學能的力之外，其餘兩種將會影響力學能的大小。首先是「空氣阻力  $\bar{F}_{air}$ 」，在擺盪的過程中會對系統作負功(阻力與速度反向)，所以會減小系統的動能，使鞦韆越擺越低。但是其作功大小遠小於系統之力學能，因此可忽略其空氣阻力所損失的能量(Hesketh,1975)。
- (2) 最後，系統只剩下繩子「張力」( $\bar{T}$ )，「張力作功」就是鞦韆能越盪越高的能量來源了。Hesketh(1975)也提到，盪鞦韆的過程中，其餘的力皆不做功或是作功可忽略(空氣阻力)，因此只須考慮繩子張力( $\bar{T}$ )對系統所作的功，且張力( $\bar{T}$ )與系統質心位移並不互相垂直，使得張力會對系統作功。所以，若能證明張力  $\bar{T}$  對系統作正功即可成立。

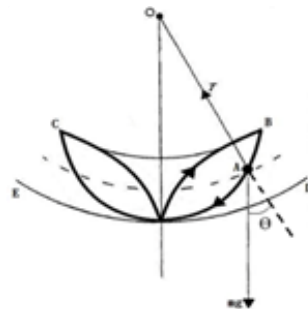


圖5 系統質心軌跡

以站立盪鞦韆為例，當人在擺盪過程中有蹲下與站立的動作(如圖3所示)，因此[人+座椅]系統之質心位移，已經不是固定半徑之圓弧軌跡，而是呈現8字形的曲線(如圖5所示)(Hesketh,1975)。這樣的路徑包含了兩項特徵：(1)鞦韆在最高點時，人會站直，因此質心在曲線的最高點。而鞦韆在最低點時，人的姿勢必蹲下，因此質心位置在曲線最低點。(2)鞦韆擺盪的過程，系統的質心轉換並非為平均的蹲下或站立，而是在下降與上升過程中，兩者的前半段時間皆快速進行動作，而後段過程則近乎維持靜止。過程中位移的**不對稱性**，將對系統力學能的增加，產生關鍵性的影響。

張力在下降與上升過程中作功之情形究竟為何？首先，忽略過程中人上下運動的加速度，則向心力公式應為：

$$F_c = \frac{mv^2}{r} = T - mg \cos \theta \quad (1)$$

可得知，當鞦韆在低點位置時， $\theta$ 角越小， $\cos \theta$ 值越大，且速率 $v$ 越大，因此越低處之張力( $\bar{T}$ )越大。

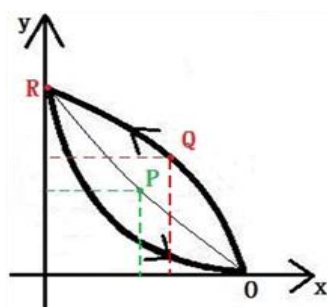


圖6 上下位移關係圖

同時，因上升過程中，越接近最低點的地方，垂直的位移越多（如圖 6 所示）。就整段路徑的前半段來比較，質心若為平均上升之情形則為 **OP** 線段，質心若為快速上升之情形則為 **OQ** 線段，由此可知，在垂直位移上，上升過程越接近最低點位移越多，越靠近最高點則越小。相同地，下降過程中，越接近最高點附近位移越大，越靠近最低點則越小。因為上升與下降的不均勻，會使得張力( $\bar{T}$ )在上升過程與下降過程中所作的功，其大小不盡相同。

接著，根據圖 5，因為質心路徑並非圓周軌跡，使得張力( $\bar{T}$ )與質心位移方向，彼此不會互相垂直，因此必做功。綜合以上三點，得知張力會對系統作正功與負功，再根據功能原理之公式，可以將整段過程可以區分為二：(1)當張力方向與系統質心位移方向相反(下降時)，張力作負功。(2)當鞦韆上升時，則張力會作正功。

但是，正、負功的大小並不相等，使得總和不完全抵銷，而是正功多於負功。因為張力作負功(下降)時，位移集中在最高點附近，而作正功(上升)的時候，位移集中在最低點的附近。兩段「張力作功」絕對值大小如圖 7 所示，紅色面積為上升過程所作的正功，而綠色面積則為下降時所作的負功。因此正功數值大於負功大小。所以整段擺盪過程中，張力( $\bar{T}$ )做功總合為正，因此系統力學能會越盪越多。

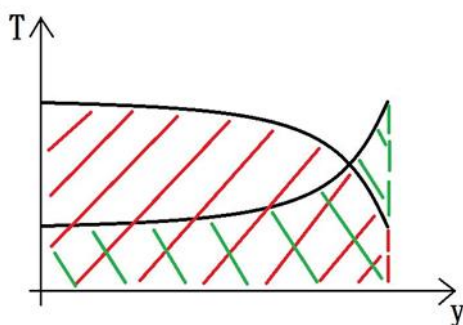


圖7 張力作功關係圖

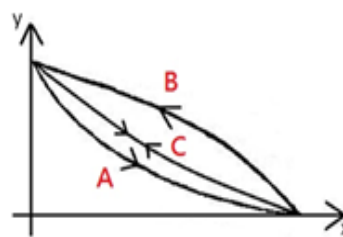


圖8 質心位移路徑

此外，若是下降過程與上升過程的質心位移皆為同一路徑時，是否可以同樣造成力學能增加之結果？如圖 8 所示，正確的盪法為，下降過程快速蹲下（如 **A** 路徑），上升過程快速站起（如 **B** 路徑），兩個路徑並不對稱。但若是下降與上升過程皆為 **C** 路徑（軌跡重複），

此時張力( $\vec{T}$ )雖仍作正負功。但是下降(負功)與上升(正功)過程中,兩者因位移軌跡相同,且張力變化量也一致,由此張力所作的正功與負功大小相等,總和恰好抵銷。因此,盪鞦韆時,站起與蹲低動作若隨來回的路徑一致,則一樣無法越盪越高。所以,下降過程需要快速蹲下,上升時需要快速站立,才能達到越盪越高之效果。

## 二、坐著盪鞦韆：

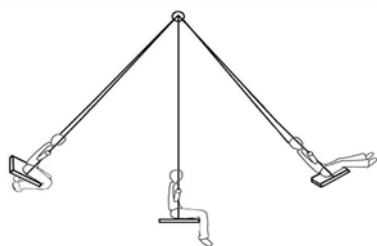


圖9 坐著盪鞦韆

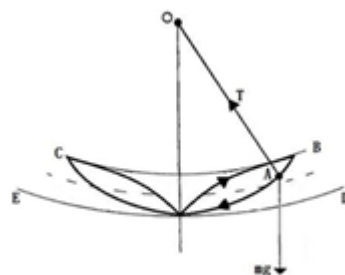


圖10 坐立擺盪之質心路徑

接著,再將站立改成坐著盪鞦韆,在擺盪過程中,兩者的動作皆可改變系統質心的垂直位置,坐著盪時,會利用腳的上提與下彎,則仍能達到如圖 5 的 8 字形軌跡(如圖 9 與圖 10 所示),再搭配上提與下彎的不對稱移動,也可以將鞦韆擺盪越高,但因系統質心上下位移的幅度,會比站姿情況還小,所以每一趟來回所能增加的力學能會較少。

## 結論

以上透過「功能原理」,根據「力圖分析」及「力的作功」探討了鞦韆可以越盪越高的來龍去脈。過程中「鞦韆+人」所增加的「力學能」是來自於擺繩的「張力作功」而得,無論是鞦韆的擺繩是可玩的還是硬式的都是。而為了能夠使鞦韆越盪越高,也就是「鞦韆+人」的力學能越來越多,盪的過程中,身體的上上下下移動需要迅速,上升時接近最低點快速站立,下降時接近最高點快速蹲下,才能使「張力作功」的效果達到最大。

本文雖然以「功能原理」為主軸,但在探討力的作功影響力學能之前,還需要掌握「系統取定」,以及「力圖分析」的概念與技能,並理解「保守力」的意義。因此,需要統整力學的多項重要概念,才能順利推得其中的奧秘。

雖然玩盪鞦韆的孩童可能多數並不懂得其中的奧秘,卻還是能享受其中的快樂。透過本文探討之後,讀者是否更進一步了解盪鞦韆的物理原理與技巧呢?看似簡單的遊戲,原來隱藏著這麼多的奧秘。然而,本文僅討論硬式擺條的鞦韆,尚未探討「軟式擺繩」所可能涉及的影響。換句話說,當擺繩可以隨著擺者的用力,使擺繩在擺盪時彎折,則是否可以“加強”鞦韆越盪越高的效果呢?這個問題還有待後續進一步來探討。

江長屹

## 致謝

感謝彰師大物理所物理教育組碩士生張逸偉協助繪圖。

## 參考文獻

1. 張慧貞(2007)，創新物理教材教法：理論與錦囊。台中：逢甲大學出版社，敦煌書局經銷。
2. Hesketh, R. V. (1975). How to make a swing go. *Physics Education*, 10(5), 367.
3. Jewett Jr, J. W. (2008). Energy and the confused student I: Work. *The Physics Teacher*, 46(1), 38-43.

## **Conceptual Explanation of the Physics Principles and Tricks of Swings**

**Chang-Yi Jiang**

National Changhua University of Education  
d2316079@hotmail.com

### **Abstract**

Understanding the conceptions and applications of physics principles can be obtained through exploring the mysteries of everyday life examples. Playing on a swing may be simple, but the physics principles underlying it are profound. This paper analyzes the physics principles based on the Work-Energy Theorem selection of valid systems, and force diagram analysis to clarify the mystery of swings. Both of the standing up and sitting postures on hard rope swings are discussed. This paper reveals that only work done by the tension of the ropes can do positive work to the swing, and tricks for successfully playing on swings are also discussed.

**Key words:** swing, work-energy theorem, conceptual explanation

江長屹