

物理 Physics Search 搜查線

第22期

COVER STORY

專案特搜

看世大運學物理——

田徑場投擲項目 p.2



本期刊物電子檔



55301N/E/000000

數位e秘技

遊戲，悄悄改變教育的世界 p.8

專案特搜



看世大運學物理—— 田徑場投擲項目

台中市立大甲高中 / 教師 姚聖威

前言

2017年8月19日世界大學運動會（簡稱世大運）在臺北開幕了。各國大學運動員精銳盡出，齊聚一堂，各個摩拳擦掌準備一較高下，爭取最高榮譽。經過一番龍爭虎鬥，中華代表隊表現可圈可點，贏得多面金牌。其中標槍好手鄭兆村（圖1）以完美的運動技術在決賽中奮力一擲，不但擲出91.36公尺的佳績，把金牌留在臺灣，更刷新亞洲紀錄。

優秀競賽選手除了天生具備的肌力、耐力、爆發力、協調性、心理素質之外，還需搭配生物力學上的理論，進行人體結構、動作及相關器材、

環境之物理力學動力分析，再加以科學化訓練始可達到最高境界。

標槍、鏈球、鐵餅、鉛球同為田徑場上的投擲項目，而投擲是人類最基本的運動形式之一，迷人之處在於它是各種競賽最資深的招牌項目，著名的藝術雕像《擲鐵餅者》（圖2）深刻刻畫出強健的男子在投擲鐵餅過程中，動感與節奏穩定結合的一瞬間。此作品真實呈現人體在追求重心的穩定，軸心的旋轉時運用全身運動機能所展現出的和諧，肩臂像張滿弦的弓，將汗水累積的榮耀奮力一擲，成就空間中凝結的永恆。



▲ 圖1 標槍好手鄭兆村。



▲ 圖2 藝術雕像《擲鐵餅者》。



圖 3 投擲運動的過程。

事實上力學原理與體育運動密不可分，且貫穿於每一項體育運動，它協助人類擺脫各種外力束縛的限制，尤其當選手已接近生理極限，嚴謹的力學知識將是提昇選手跳更高、跑更快、變更強的重要基石。

而產生最大向前作用力，若以投擲者的身體為轉動中心，腳往後旋轉形成射入紙面的角動量，手臂則向上旋轉形成射出紙面的角動量，兩者結合成一個達到穩定平衡的角動量系統（圖 5），增

投擲運動分析

投擲運動由運動形態力學機制上看，過程都須經歷預速（助跑或旋轉）、投擲、飛行三個重要環節（圖 3）。過程中連結著平衡、槓桿、重心、摩擦力、反作用力、結構、拋體、轉動、慣性與流體力學等原理。

一、預速原理

在投擲項目中，經由助跑與旋轉，可使投擲者和拋體獲得一定的預先速度，並在最後階段發揮最大力量和出手速度，創造有利的飛行條件。

當哨音響起，選手向前跨起助跑的步伐，伴隨著內力與外力交錯影響，其中內力是人體各部分之間相互作用下產生的動力來源，也就是肌肉收縮彈力與骨骼力矩（圖 4）產生的作用力；外力的影響則包含重力、摩擦力、空氣阻力及支撐正向力。

人體向前運動時所產生的主要作用力包含摩擦力與重力的合力，及地面對人的正向力（圖 5），且合力的量值與方向決定於投擲者的肌肉與控制能力。再利用符合人體重心結構與摩擦力所形成足夠的傾斜度，以支撐身體達到穩定平衡，

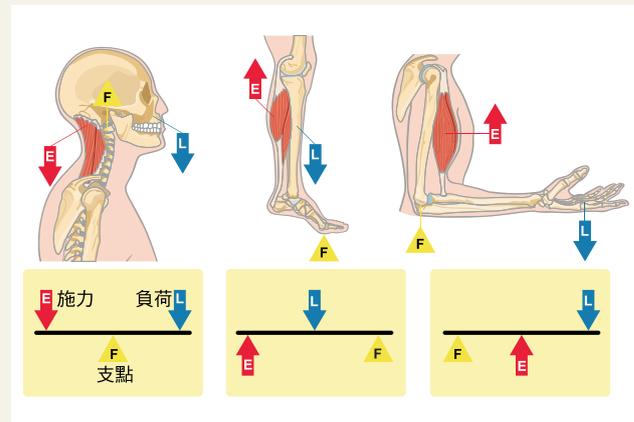


圖 4 人體肌肉收縮彈力與骨骼力矩。

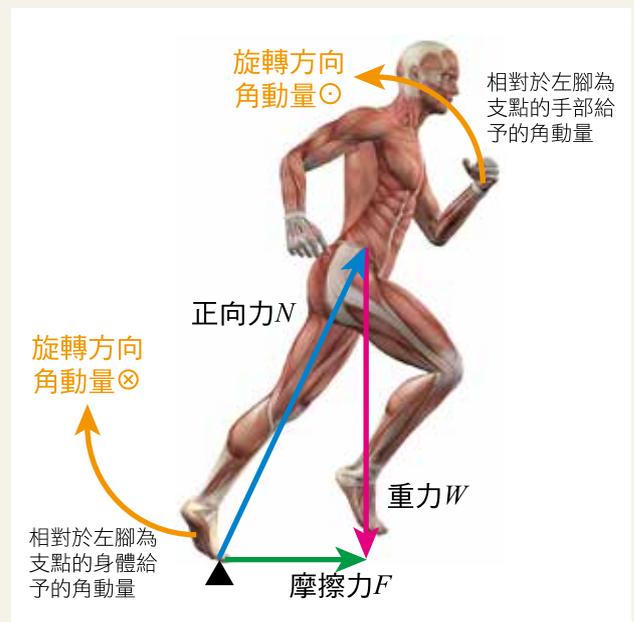


圖 5 投擲者的施力與角動量分析。

加身體傾斜度的同時，也增加更多向前動量，配合力與人體之間的傳遞、轉移等，綜合以上效果，加以維持最後出手的連貫性，以減少速度的損失。

而旋轉則是利用身體通過連續的加速，增加轉動角速率 (ω)，以慣性切線速度 ($v=r\omega$) 拋出拋體之運動，旋轉好壞決定最後拋體速度。將身體與拋體視為一個系統時，可將此轉動看成陀螺進動 (圖 6)，視角由上方觀察拋體軌跡，隨著旋轉動作，每旋轉一圈，切線速度也隨之增加，使得手臂必須提供更大向心力與切線力 (圖 7)，且身體需更靈活地調整人與器材的共同重心落於轉動的慣性軸上，才能在穩定狀態下有效對拋體傳遞速度。

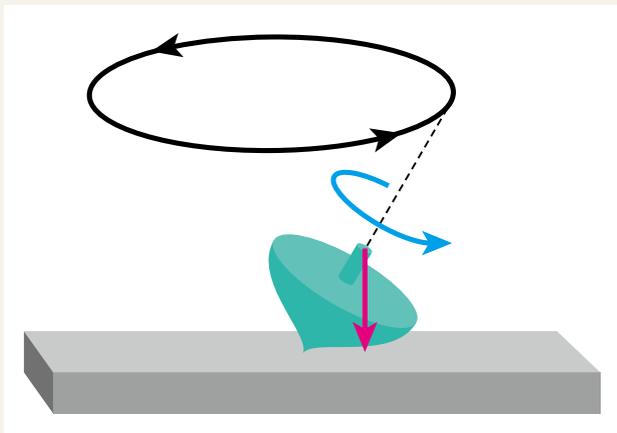


圖 6 陀螺進動。

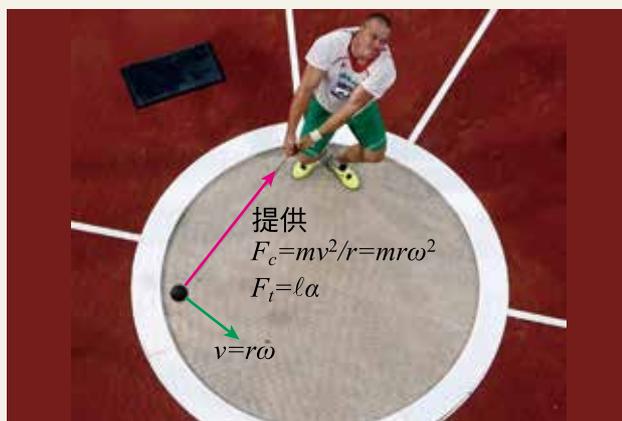


圖 7 投擲者旋轉拋出拋體。

二、投擲分析

投擲決定飛行，而投擲成效來自於力量轉換動量傳遞、投擲角度、投擲高度與流體作用四個部分。要提高投擲距離，出手速度絕對是一個重要因素，類似抽鞭子原理產生肌肉扭力與動力，將拋體衝量提高到最大，由衝量定理可知， $mv = F\Delta t + mv_0$ 。

若不考慮空氣流體影響，而以理想真空狀態下簡單斜拋體來分析討論，結合助跑和旋轉所提供的預速 v_0 ，再加上最後用力所提供的加速度，假設最後總速為 v ，以地面觀察者探討以下問題：

1. 就拋射點高度與助跑速度這兩個因素分析其對斜向拋射之水平射程的影響。
2. 投擲者應該以何種拋射仰角，才可以使水平射程達到最大？

假設拋體重心的速度方向與水平夾角為 θ ，若拋出點高度為 H ，則拋出至落地時間 T 為 (圖 8)：

$$T = \frac{v \sin \theta + \sqrt{v^2 \sin^2 \theta + 2gH}}{g}$$

而拋體的水平射程 R 即為 $v \cos \theta T$ ，將上述 T 的結果代入後得到

$$R = \frac{v^2 \sin \theta \cos \theta + v \cos \theta \sqrt{v^2 \sin^2 \theta + 2gH}}{g}$$

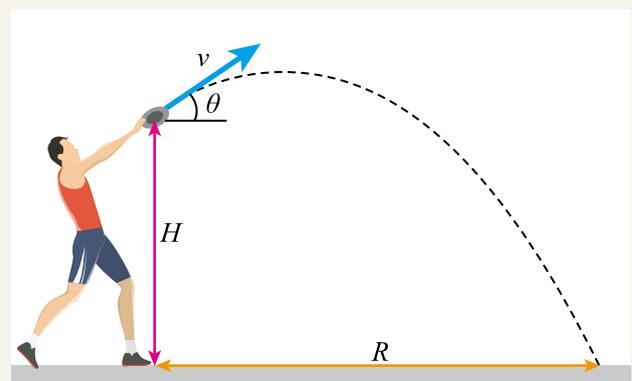


圖 8 拋體的軌跡。



若無拋點高度， $H=0$ ，而得到

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

，則當仰角 $\theta = 45^\circ$ 時，水平射程為最大 $R_{max} = \frac{v^2}{g}$ 。
 若是考慮拋點高度時，將投擲者投擲速度設為 $8\text{m/s} \sim 14\text{m/s}$ 之間，出手高度 $1.7\text{m} \sim 2\text{m}$ ，利用分析曲線（圖 9）可大約推得如下結果：（若想得準確角，可利用對 $R(\theta)$ 微分令 $\frac{dR(\theta)}{d\theta} = 0$ 推得）

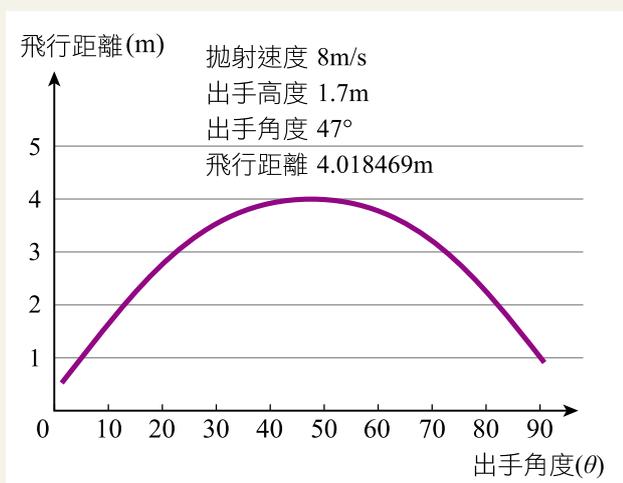


圖 9 拋體的分析曲線。

拋射速度越大，出手高度越高，拋射角大約為 $46^\circ \sim 47^\circ$ 附近時能讓拋體飛行達到最遠射程，且當拋射速度越小，拋射角需越高，才能提高飛行時間。不過當拋體被奮力一推，遨遊天際時，卻無法忽略空氣阻力的因素，將是飛行表現的關鍵。

三、飛行影響

若拋體飛行於空氣流體裡（圖 10），拋體的形狀、重心、表面（粗糙程度）、接觸面積、空氣密度、空氣黏滯性，空氣相對於運動物體的速度等影響下，所產生升力、阻力等都直接影響拋體的速度、精確度和穩定性，飛行距離的關鍵，也直接左右選手成績。

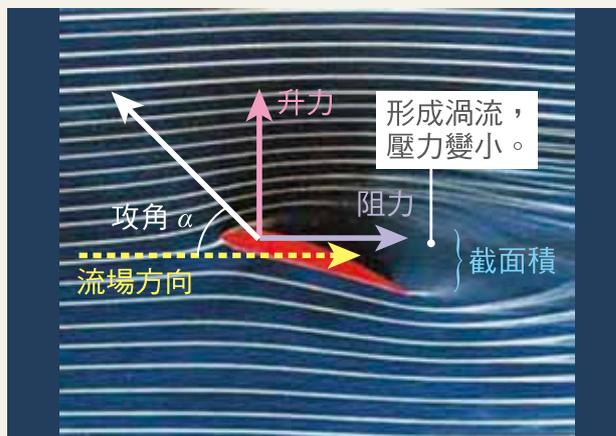


圖 10 流場力分析。

當拋體運動所受阻力方向為平行於空氣流場，所受之阻力大概可分為摩擦拉力與截面拉力兩種。其中摩擦拉力又稱表面摩擦力，當運動物體的方向與流體流動方向相反時，流體會流經表面產生摩擦力，形成一股沿著物體表面作用的向後拉力。另一個截面拉力也可稱為形狀阻力，當流體滑過拋體時，拋體上方壓力變大，造成浮力下降，使得拋體迅速失速落下，造成阻止拋體向前飛行的作用力。阻力的公式為 $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A$ ， ρ 為流體密度， v 為流體相對物體的速度， A 為截面積， C_D 為阻力係數。

表 11 各種流場的截面拉力與摩擦拉力。

| 形狀及流場 | 截面拉力 | 摩擦拉力 |
|-------|------|------|
| | 0% | 100% |
| | ~10% | ~90% |
| | ~90% | ~10% |
| | 100% | 0% |

升力則當空氣流過拋體表面時，被一分為二，經過拋體上方速的空氣沿著表面曲線形狀運動，速度加快，使得下方表面壓力相對較高，這就是升力的由來，其方向與流體流向垂直。升力公式為： $F_L = \frac{1}{2} \rho v^2 C_L A$ ，其中， ρ 指空氣密度， v 指速度， C_L 指升力係數， A 是截面積，而影響升力和阻力係數之因素也包含物體形狀、面積及攻角等。由阻力與升力公式得知，升力、阻力都與飛行相對流體速度的平方成正比，拋體相對流體速度越大，升力、阻力越大。

而調整升力和阻力的最關鍵來自於攻角（圖 12）的大小，因為升力係數和阻力係數的大小會隨著攻角而改變（ $C_L = C_{L0} + C_{L\alpha} \alpha$ ， $C_D = C_{D0} + C_{D\alpha} \alpha^2$ ），而攻角是指拋體面與氣流間的夾角（圖 13）。在飛行速度相同的情況下，得到最大升力的攻角，叫做臨界攻角。若於臨界攻角範圍內加大攻角，升力也跟著增大，但超過臨界攻角時，氣流不再貼著拋體上下側平穩流過而造成氣流剝離，形成擾流，造成失速現象，拋體會減少飛行距離而瞬間墜落。

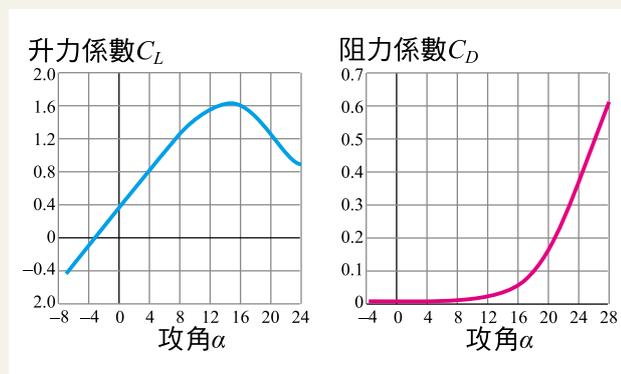


圖 12 升力係數、阻力係數與攻角關係。

由上述得知，所以衡量一拋體的飛行動力性能，不能單從追求升力一個方面來看，必須分析如何調整升力和阻力之間的對比關係，所以這關係就是升阻比，升阻比越大，拋體的空氣動力性能越好。利用前述公式推得升阻比 $= \frac{F_L}{F_D} = \frac{C_L}{C_D}$ ，而攻角角度大小又直接影響升力與阻力係數，所以攻角也直接影響升阻比。若要投擲出好成績，

如何調整出手的角度，讓整個飛行過程中拋體都能保持一個適當的正攻角，從而延長了滑翔的時間，增加投擲距離。

若要找到一個準確的出手角度，根據牛頓第二運動定律，拋體質心運動方程式為：

x 方向加速度：

$$ma_x = \frac{1}{2} \rho v^2 C_L A \sin(\beta - \alpha) - \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \cos(\beta - \alpha)$$

y 方向加速度：

$$ma_y = \frac{1}{2} \rho v^2 C_L A \cos(\beta - \alpha) - \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \sin(\beta - \alpha) - mg$$

若給定初始條件，利用數學方法或電腦模擬即可得到拋體質心的運動軌跡（篇幅不夠，本文不討論）。

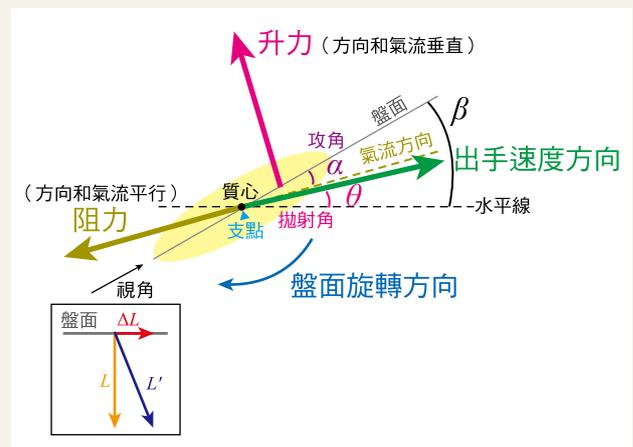


圖 13 鐵餅受力示意圖。

最後的關鍵點，就是飛行的穩定性。當拋體旋轉（圖 13）時會與氣動力矩產生密切作用，實際上一般氣動力矩不是作用於重心位置上，而是作用於拋體前緣，對拋體產生一力矩，造成攻角過高，形成翻轉，以致拋體失速，最終拋體只會像落葉一樣飄向地面，不能形成穩定且長距離的飛行。所以投擲者若以右手拋出必定會給拋體一順時針轉動，利用陀螺效應，讓拋體產生一個角動量（ $L = rP = I\omega$ ，角動量越大越不容易改變其運動狀態），抵抗上升力所產生的力矩，進而可抑



制攻角增大和翻轉，使拋體可平穩飛行，雖然轉速越大所產生角動量越大，越能使旋轉的拋體穩定進動，能讓拋體穩定飛行增長距離，但如果出手過分追求大轉速，會導致拋體飛行速度下降反而降低投擲成績。

若不考慮受空氣流體影響，拋體的重量與形狀，單純藉由理想拋體分析，最佳飛行距離的拋射仰角為 $46^\circ \sim 47^\circ$ ，但若將空氣流體考慮進去後投擲運動最佳飛行距離的拋射仰角，鐵餅約為 $30^\circ \sim 35^\circ$ ，標槍大概為 $28^\circ \sim 33^\circ$ ，而鏈球為 $42^\circ \sim 44^\circ$ 。所以由數據比較可看出，當拋體越輕，面積越大時，出手角度便要越小。

結論

如何讓選手的動作完美，準確地掌握投擲力道和角度，跑得比別人快、跳得比別人高的關鍵，除了投入時間與精神做技術訓練之外，若能夠更聰明、更精準地利用與結合科學的原理（圖 14）並深入解析，必定能協助運動員超越極限、登峰造極，成為世界頂尖運動員。採用物理學原理及應用科學的聲、光、電、磁...等理論與研發出的技術，已是提升選手能力不可或缺的科學力量，這股力量也是選手突破瓶頸重要的契機，更是推升選手運動技術水準和成績的樞紐。期待在物理學及力學的支援之下，我們將能欣賞到更多令人振奮、大快人心、改寫紀錄的完美賽事。



圖 14 運動員的技術訓練。

圖片來源

圖 1：<http://www.peoplenews.tw/news/a82f9301-d139-40b0-86a9-650c50c1c342>

圖 2：shutterstock 提供

圖 3：shutterstock 提供

圖 4：shutterstock 提供

圖 5：shutterstock 提供

圖 6：<https://www.wukong.com/question/6366099468177113345/>

圖 7：<http://www.athletics.idv.tw/archives/4137>

圖 8：shutterstock 提供

圖 10：https://www.mhi.com/products/detail/flow_visualization_wind_tunnel.html

表 11：維基百科

圖 12：<http://slideplayer.com/slide/6283702/>

圖 14：<http://sportsagentblog.com/2009/11/11/pete-parise-receives-biomechanical-analysis/>

數位 e 秘技



遊戲，悄悄改變教育的世界

教師 巫昶昕

桃園市立大溪高中化學科

前言

現在的科技進步飛快，「天生數位化」的孩子愈來愈多，生活中他們能輕易的接觸到遊戲或複雜的虛擬情境，並渴望用一種前人不曾體驗的方式進行學習，筆者發現考試領導教學的授課方式，除了讓學生痛苦，也無法真正體會學科的有趣之處，爲了改善學習氛圍，嘗試將資訊與遊戲融入自己的課堂之中。遊戲式學習 (Game-Based Learning, GBL)，一直以來有許多專家學者的資料顯示其有助於學生學習，隨著教育近年鼓吹翻轉的浪潮下，未來 GBL 的影響力會愈來愈大，漸漸也有不少教師表示有興趣將遊戲應用於教學中，而本篇目的在於希望幫助教師們能順利展開。

教育遊戲設計的第一步

教育遊戲的重點在遊戲，因此得先學會玩，不管是數位遊戲、桌遊或其他不插電遊戲，必須盡情的體驗遊戲所帶來的樂趣及感受，遊戲對教師或任何人而言都是屬於新穎且複合型的領域，其中除了遊戲內容的設置之外，還必須融入說故事的元素，以及美編的美感設計，才能造就遊戲的流暢感，身爲教師的我們必須充分地去體驗遊戲中的每一項元素與環節，才能開始將我們的學科專業融入遊戲內容之中。

筆者在個人的教學領域已有數種教育遊戲作品，包含簡單的卡牌遊戲、數位桌遊¹、實體補救教具桌遊²以及接下來要與龍騰合作推出的教育桌遊，並規畫每年持續設計新的遊戲式學習教材，而爲了破除普遍認爲「遊戲是不務正業」的



思維及模式推廣，長久與臺科大侯惠澤教授合作，針對每種遊戲教材設計進行研究與分析，在理論的支持下用數據去證實確實能有效幫助學生學習，以及教材的合適性，而108新課綱的到來，正好給了我們很好的機會去發揮，行動研究則有機會再與大家分享。

對於想要著手進行設計的新手教師們，相信都會冒出一個關鍵問題，該從哪部分開始？接下來筆者會將範圍先鎖定在**卡牌遊戲**（初階）及**教育桌遊**（進階），並跟各位分享這幾年做中學的摸索經驗。



圖 1 卡牌遊戲設計



圖 2 數位桌遊操作畫面



圖 3 實體補救教具桌遊學習

設計時的重要原則

既然要設計一款教育遊戲，首先，一定要好玩，才能夠吸引學生來玩，其次才是讓使用者在遊戲中不知不覺地學會裡面的知識與技能，進而產生流暢、完整且有效的教學，這一切端看教師如何去設計與操作，接下來筆者將針對**遊戲性**與**學習性**的設計，分別說明。

遊戲性

遊戲的玩法千變萬化，要好玩具吸引力，可引入市場上常見的桌遊機制類型，如**建設、偽裝、談判、交易、計算、收集及競速**等二、三十種多元機制，我們在挑選使用的機制時，可以先從自己喜愛的部分下手，例如筆者喜歡**收集**東西，則使用此機制去尋找合適的教學單元，或者可以考量我們想要設計的主題在學習上有什麼樣的特性，例如想要的主題為化學分析，則可選擇**計算**的機制。當然，並非只能選用一種機制，也可以多種搭配使用，這會使得遊戲更豐富及多變化，但設計上仍需考慮課堂上能夠使用的時間，高中一節課為 50 分鐘，因此設計出來最合適的遊戲時間為 15 ~ 30 分鐘，加上考量大腦的認知負荷，建議使用 2 ~ 3 種組合較佳。

設計後可先找幾位夥伴或認真學生進行內部測試，檢測是否有掌握遊戲設計的核心要素，包



圖 4 桌遊多元機制



含**新奇感**、**自由度**、**控制感**、**不確定性**及**成就感**³。其中**新奇感**包含遊戲機制的簡單有趣、故事元素及美編設計；**自由度**與**控制感**包含遊戲內容與操作必須彈性且自主性高；**不確定性**在於自主行動後的部分隨機性、團隊助力與阻力；**成就感**在於目標達成的回饋。以上五項必須充分體現才足夠好玩及吸引力，而要讓遊戲的流暢度再提升，裡面還有許多的細節可以討論。

筆者觀察市場桌遊，發現牌卡占了很高的比例，這與牌卡有兩面可用、成本低及彈性大的特性有關，給了設計者很寬敞的創想空間，而新手在設計尚無法到達桌遊的複雜層次時，可先以卡牌進行簡單遊戲開發，並採用**配對**、**排序**、**交換**、**組合**、**選擇**或**書寫**等簡單的機制。

學習性

教育桌遊拆成兩部分來看，**教育**是希望以學生為中心且兼顧差異化的學習，而**桌遊**是一款使用者能夠自己玩且清楚勝負的遊戲。因此，教育桌遊應該是一款學生能夠自己揪團玩並自主**即時診斷**的學習教材，但學生卻難以對學科專業的東西進行診斷，往往都需要由老師們來判斷，這部分的确會讓教師們在設計上面臨較高門檻的挑戰。從筆者的經驗來看，除了遊戲過程中要能隨時診斷之外，設計時還必須掌握幾項認知要素，包括**遊戲目標**、**情境脈絡**、**鷹架探索**、**協作討論**及**心流投入**⁴。

設計的首務是要讓**遊戲目標**等於學習目標，才能讓樂趣與學習同步；**脈絡情境**在於讓學生有如身歷其境，自己當英雄的主動學習，關鍵在故事的包裝；**鷹架探索**是在遊戲的機制或配件上巧妙設計讓學生探索去完成短期目標，也在過程中學會周邊相關知識或技能；**協作討論**在設計上可讓學生有陣營的感覺，可討論合作，不至於陷入學習焦慮；**心流投入**與否可檢視教材的合適性，本篇暫不討論。

團隊合作更能有效優化設計

如同前述所提，一款優質的教育遊戲，除了有好的遊戲內容之外，在故事包裝與產品美編上必然做過一番努力，而教師並非全能，團隊合作各展專業才能激盪出更棒的遊戲教材，筆者是個在遊戲中長大的教師，希望自身經驗能有所用途，也開始在桃園及周邊經營社群，今年也在社群教師的設計中建議多種機制玩法，學科內容則由同科教師把關，用這樣的模式產出了不少遊戲教材，期盼更多有興趣的夥伴來共創與共好，歡迎透過龍騰或 FB 社群⁵來加入。



圖 5 教師社群運作

參考資料

1. 數位桌遊平台 (<http://61.216.137.189/Ebg/>)
2. 桌遊操作歷程分析說明 (<https://flipedu.parenting.com.tw/article/2796>)
3. 臺科大侯惠澤教授，微翻轉模式，遊戲核心元素。
4. 臺科大侯惠澤教授，微翻轉模式，認知分析要素。
5. # 教育桌遊及數位遊戲發展教師社群；# 巫魚子的海洋

圖片來源

圖 1、2、3、5：巫昶昕老師提供。

圖 4：中華民國圖板推廣協會主任講師，劉力君老師提供。



p11p12廣告部份編輯說從他那邊直接請廠商拼

