

靜電產生器設計製作與推廣

曾瑞蓮^{1*} 黃仁偉² 鍾賢² 陳玫岑¹ 許馨月¹ 朱偉齊¹ 洪偉清^{2**}

¹國立科學工藝博物館

²陸軍軍官學校 物理學系

通訊作者：*jessica@mail.nstm.gov.tw、**hung.wc0602@msa.hinet.net

(投稿日期：民國 105 年 10 月 27 日，接受日期：105 年 12 月 06 日)

摘要：以推廣為導向的科學動手做活動設計，應能提供學生增進科學認識、增進解決問題能力，且需具備刺激、好玩、有趣的特性，並可融合真實生活事件，才能有效吸引學者主動學習。本文分析現有靜電產生器的設計與製作方式進行改良，運用生活中易得的材料並簡化其製程，非常適用於動手做科學的活動推廣，是一種讓有興趣的中小學老師們能簡單擁有，國、高中學生樂於操作學習的優質教具。

關鍵詞：靜電產生器、范氏起電器、科學教育、科普推廣、教具設計

壹、前言

在中小學課程中，靜電是一個吸引人的主題，簡單的道具便能製造出令人驚異的效果，不管是塑膠尺摩擦後吸引小紙片、摩擦塑膠半球燙頭髮；摩擦氣球黏身體、吸附頭髮、吸引鋁罐；摩擦 PVC 管製造空中水母、萊頓瓶……等，各式各樣的玩法經由許多創意教師之手，帶給學生有趣又新奇的電學入門體驗。但以上做法常會受到環境濕度及電量的影響有使用限制，如何能在教室中用簡單的道具，創造出不受天候影響保證成功的令人驚異效果，應該是許多中小學老師的夢想。強大的網路搜尋引擎，可以羅列出林林總總的各式小型范氏起電器的做法，但是事實上限於器材或製作步驟的不明確，仿製出一個功能強大的靜電產生器並不容易，更遑論大量推廣。筆者之一曾與萬能科技大學周鑑恆教授合作發展出一款桌上型的靜電產生器（周鑑恆與曾瑞蓮，2012），功能極佳，可惜製作材料之一的大型 PVC 管較不易取得，侷限了其推廣性，本年度配合電磁學系列的教材開發，特別再次進行靜電產生器的設計製作，以配合學校教學需求與推廣便利性為重要設計考量，期待能發展出材料生活化、製程簡單的科學動手做活動，讓有興趣的中小學老師們能簡單擁有，國、高中學生樂於操作學習的優質教具。

貳、科學動手做活動設計要點

針對科學動手做活動的設計，Jensen、Wood 與 Wood（2004）提出應能提供學生增進科學認識、增進解決問題能力，具備刺激、好玩、有趣的特性，並能融合真實生活的事件。Cornman（2013）在發展動手做科學教育評量項目時，也提出以下三個向度：

- 一、教育性：科學理解或課程連結、啟發思考；
- 二、滿意度：過程中的新奇性、與學生本身或既有概念的連結和令人驚訝的結果；
- 三、便利性：說明清楚、直覺使用與時間適中。

Burns、O'Connor 與 Stocklmayer（2003）在大眾科學傳播的探討中，提到好的科學活動應能對參與者帶來覺知改變，讓參與者感到好玩或有相關情緒反應，進而能自發性的參與、提高科學興趣、提高科學理解、形成或改變看法。

彙整以上可知，優質的科學教育動手做活動，除在教育內容上須能增加參與者科學知識（理解）、啟發思考、增進問題解決能力外，刺激、新奇、有趣，與生活或過去知識經驗連結也是必備條件，而在便利性上，包含製作過程所需花費的時間以及直覺式（或簡單的）操作程序也是活動設計的重要考量之一。因此，部分材料的前置加工不可或缺，若是以推廣性為考量進行規劃，除非教具本身已經發展成熟，又具備大量的需求可進行委託量產，發展初期如期待以最少的人力、財力完成前置準備，訂定標準化的作業流程才能有效減少加工人力與時間，同時確保產品製作的成功率。此外，材料取得的便利性與價格低廉也是影響活動是否能順利推展的重要因素。

參、靜電與生活

靜電無所不在，幾乎所有的物質都可能產生靜電，在冬天常見的尼龍衣服吸附身體、梳頭髮時的劈啪聲、手摸門把感到電擊、螢光幕容易吸附灰塵，自然界中的雷、電皆為靜電現象（Ballou，1954；Lunn 和 Evans，1977）。在現代生活用品中也有很多靜電的應用，像影印機、靜電除塵器、靜電噴漆等。可以發現的是，一般常見的靜電產生主要來自兩種不同物質的接觸和分離（例如走路時，鞋底與地板的接觸與分離便會產生靜電），且在兩種物質中，至少需要有一個是非導體（國際靜電放電學會，2013），非導體是產生靜電和保留電荷的優良材料。

然而，幾世紀以來，靜電一直是嚴重的工業問題，製程設備或產品摩擦會產生靜電，若靜電持續累積，即可能會發生靜電放電，造成人員電擊或引燃周圍的易燃物質，發生火災或爆炸等事故（勞動部勞工安全衛生研究所，網路資料）。常見在載運易燃物的貨車尾端繫有一條接地金屬線（鍊），便於把積蓄的電荷傳導到地面，避免靜電放電的火花引致火災。靜電與生活的關聯性極高，認識靜電可以使我們避免可能帶來的生命或財產危險，而靜電也是中小學電學入門的重要課程主題，開發靜電主題活動符應學校課程與日常生活需求。

靜電起源於一般物質原子中的電子，可能因機械、熱、或化學等因素離開原子，造成正負離子的產生（McCarty 和 Whitesides，2008），大致可歸類為摩擦起電（triboelectric charging）

和感應起電（induction charging）。前者指的是當兩種物質摩擦時，摩擦的過程提供能量，會使物體表面上一部分的電子轉移到另一個物體上，使該物體帶有靜電。後者為物體內部的電荷，受到物體以外的電荷影響，形成重新分布的狀態，稱為感應起電。遠從古希臘時期，就有人發現以絲綢或法蘭絨摩擦琥珀之後，便能吸引較輕小的物質，摩擦帶電序列（Triboelectric Series）就是依據物質摩擦後產生正負電所排成之順序，表 1 為以常見物質為基準，進一步簡化後的範例，當兩種物質摩擦時，位在表中上方者會帶正電，位在下方者帶負電。

表 1：摩擦帶電序列

容易帶正電的物質（容易失去電子的物質）
空氣（Air）
兔毛（Rabbit fur）
玻璃（Glass）
人髮（Human hair）
尼龍（Nylon）
羊毛（Wool）
絲綢（Silk）
紙（Paper）
棉花（作為參考物質）
木頭（Wood）
氣球（Rubber Balloon）
保麗龍（Styrofoam）
壓克力（Acrylic）
透明膠帶（Cellophane Tape）
聚氯乙烯（Polyvinylchloride），即常見的 PVC
容易帶負電的物質（容易獲得電子的物質）

肆、靜電產生器設計特色

范氏起電器（Van de Graaff generator）是一種用來產生靜電的裝置，於 1929 年由荷蘭裔美國物理學家羅伯特·傑米森·范德格拉夫（Robert Jemison Van de Graaff）發明。本裝置特色為易於獲得非常高的電壓，現代大型的范氏起電器，電壓可達 500 萬伏特（引自維基百科）。其基本構造如下圖 1 所示，作用原理是利用摩擦起電的方式，當皮帶與滾輪摩擦時，皮帶因摩擦帶電並將電荷往上帶，藉由電刷與導線將電荷導出；而下方電刷接地，則可將滾輪上的負電荷帶走。

本案靜電產生器的設計，依據推廣性科學動手做活動的設計要素，除了內容與執行過程必備的教育性、趣味性與驚奇性外，為達成材料價格低廉、便利取得，以及最簡便的前置加工以及製作成功率提高，本案歷經多次的實驗試作，最終成品有以下的设计特點：

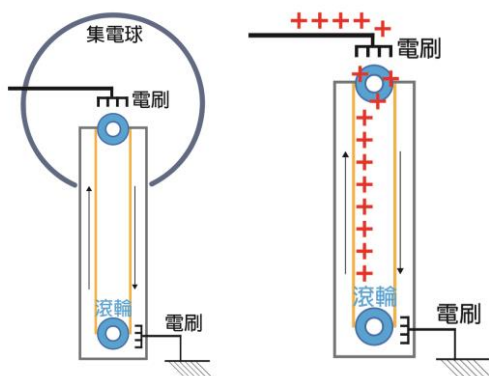


圖 1：范氏起電器基本構造圖

一、運用材料特色設定標準化製程

配合支架的需求，選用市面常見的 495cc 果汁瓶（高密度聚乙烯，HDPE），雖然有透明度不高的缺點，卻具有易加工、不易破裂的特性，挖洞後的強度比一般寶特瓶高，側邊的容量標示位置與瓶頸的螺紋可成為設定尺度和方位的標準，藉此確認皮帶最佳化的尺寸長度，而能有效減少後續因皮帶鬆緊度和轉動方向造成的故障排除時間，也可使前置加工的溝通需求與誤差降至最低。

二、以攪拌棒延伸馬達轉軸，解決長久困擾

直流小馬達轉軸的延長材料一直是教具開發的一項困擾，長軸馬達的單價過高，一般會在馬達軸心上纏膠帶，再套上使用完原子筆內的塑膠管來延長，一來容易鬆脫，二來無法大量取得。本次採用小學課程中使用的攪拌棒，其接頭原本即設計符合馬達運用，切除尾端後，下轉軸採單邊懸空設計，剛好能使皮帶與轉軸接觸，而能產生轉動與摩擦。同時，也因下轉軸塑料的彈性，而使得上、下軸距與皮帶長度搭配有了裕度而容易達成。

三、善用不同寬度膠帶，減少加工複雜度

為使皮帶運轉時能維持在定位，下轉子部分會特意製成紡錘狀，讓皮帶能自然包覆住轉子而不易脫落，往往在製作過程中會發生溝通的障礙並耗時良久，本案利用較厚的寬布膠帶為底，繞黏約十圈即可達下轉子所需厚度，並在中央位置利用與皮帶寬度相仿的電工膠帶再繞黏約十圈左右，即可達成讓皮帶不亂跑的效果，製作容易且迅速。

四、扇形花瓣狀電刷製作，維持皮帶運轉順暢

一般電刷處理會將多蕊導線的絕緣皮剝開後，將裸線分開成扇狀即可，但若位置放置不當時，多而尖細的導線頭常會影響皮帶的運作且容易變形。本案將剝線完成的多蕊導線反折扭緊後，再行撥開呈扇形花瓣狀。此設計可使電刷具有彈性且不易變形，有效增大電刷與皮帶對應面積，而能更快速將電荷導出，達到正負電荷分離的作用，而能有效率地產生靜電，同時有效避免減低對皮帶的干擾，使運轉順暢。



五、其他材料運用上的創意

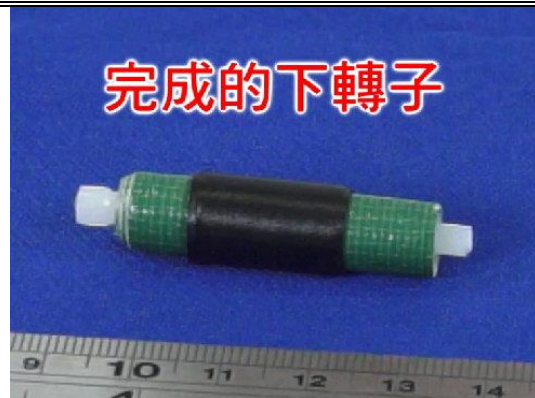
配合大量推廣的需求，本案以鋁箔蒸蛋杯取代鋁罐為集電設備，除容易大量購得外，也有容易塑型的好處，在固定和造型變化上有明顯效益。在上轉軸設計上也為方便材料準備，將鐵絲更改由竹籤取代，可減少鐵絲變形的調整工時，也具有容易剪裁的特性。另外，利用面紙（衛生紙）製作集電杯上的水母，創新簡化的製程，使靜電效果明顯並易於與觀眾互動。

伍、靜電產生器製作程序

製作過程所需花費的時間與製作技術需求（加工難易度）、工具使用的複雜度與安全性也是動手做活動設計時須審慎考量的因素。一般而言，是否能成功完成作品，往往是活動參加者滿意度的重要評估基準。因此，本案發展出一套標準化的前置作業流程，可視對象需求與活動時間來調整是否進行前置作業或決定前置加工的程度。針對一般高中生及成人團體教學，進行靜電產生器的組裝與靜電水母的製作，約可在 1.5 小時內完成並進行後續實驗；若想要從零開始學習完整製作流程，則需要 2.5 小時。不過由於組裝過程的步驟亦不少，須提供完整的圖文對照文案或有較多的協助人力，才能確保活動參與者能順利跟上進度，完成作品。詳細製作程序分述於下：

一、前置作業

	<p>(一) 皮帶製作：將長型氣球沿長軸剪開，頭尾剪掉，保留總長 28cm。將兩端交疊 1cm，內側以雙面膠黏貼固定，確認圓環狀皮帶鋪平長度為 13.5cm。</p>
	<p>(二) 上轉子製作：24mm 寬的布膠帶取 20cm 長，繞貼在氣球桿上，布膠兩側各保留約 2mm 氣球桿，其餘剪掉。（長度能放入瓶口即可）</p>



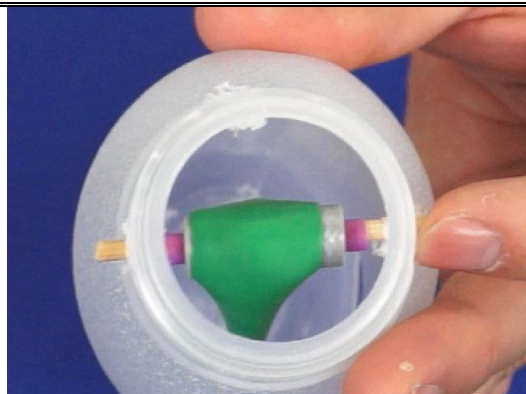
(三) 下轉子製作：36mm 布膠帶取 20cm 長，繞貼在距離攪拌棒粗端 5mm 處。布膠帶兩側各保留約 5mm 攪拌棒，其餘剪掉。電工膠帶取 20cm 長，繞貼在布膠帶正中央位置。



(四) 瓶身加工：

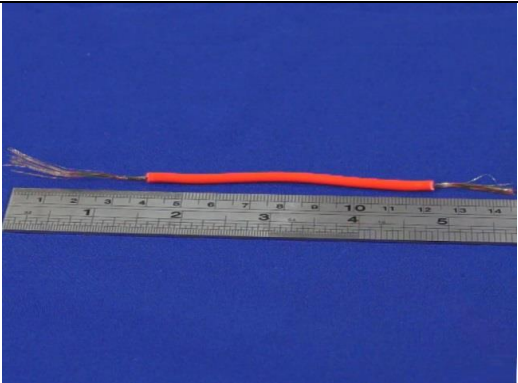
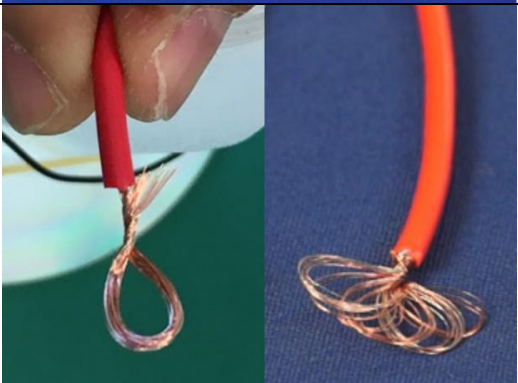

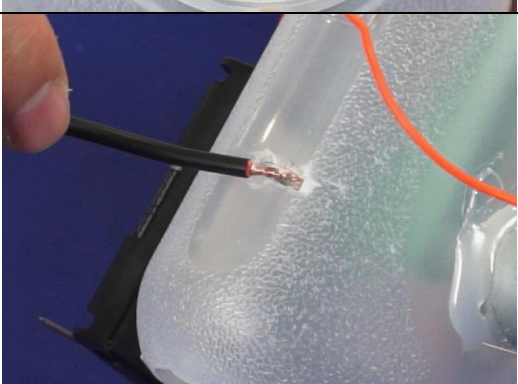
1. 瓶身寬邊面對操作者，左側為容量標示處，取寬邊正中央，底部往上 4cm 處為中心點，用旋轉尖頭剪刀的方式挖洞，洞的大小約與馬達內圈相同（ ϕ 約 1.6cm）。
2. 馬達洞中心垂直向上（約 12.5cm），在瓶口最下方螺旋中央處鑽一小孔，在對側相對位置也鑽一小孔，能穿過竹籤即可。
3. 在瓶口正右側由下往上第二層螺旋中央鑽一小孔。
4. 馬達洞口左側邊標示 100cc 處，鑽一小孔，並將小孔橫向剪開長約 1cm。

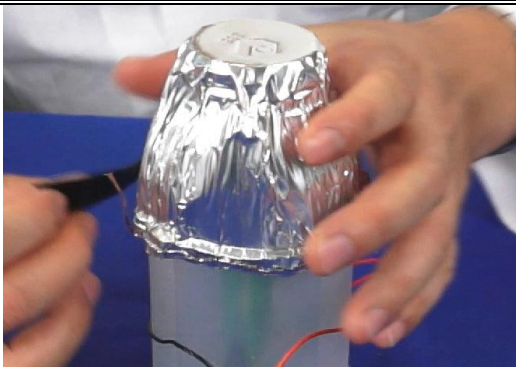
二、主體安裝製作



(一) 上轉子套入皮帶中，放進瓶子，竹籤由瓶口外側，穿過瓶口下緣的小孔後，穿過上轉子，再穿過對側小孔固定。

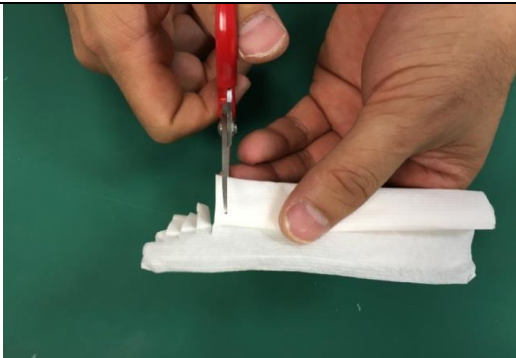
	<p>(二) 下轉子（攪拌棒粗端）安裝於馬達軸心壓緊，穿入瓶身大洞，置於皮帶內側。</p>
	<p>(三) 以熱熔膠固定馬達和上轉子的竹籤轉軸。</p>
	<p>(四) 將電池盒以泡棉膠固定於馬達對側瓶身中央齊底處。（整體能維持平衡即可）</p>
	<p>(五) 電池盒的紅線連接馬達上的正極、黑線連接負極，通電後，檢測皮帶是否正常運轉。（接點旁有圓圈者為正極）</p>

	<p>(六) 將紅、黑色導線的絕緣皮一端剝開 2cm，另一端剝開 4cm。</p>
	<p>(七) 分別將紅、黑導線 4cm 裸線端對折後扭轉固定，前端保留為圓圈，再將其均勻撥開形成扇形花瓣狀電刷。</p>
	<p>(八) 將紅色導線由瓶口內側穿出小孔，調整扇形電刷位置於皮帶正上方，再以熱熔膠固定。</p>
	<p>(九) 將黑色導線的扇形花瓣狀電刷穿進馬達左側的橫向小孔，調整至皮帶正下方，再以熱熔膠固定。</p>



(十) 將鋁箔杯套在瓶口加壓塑型，再將導線反折，並以電工膠帶黏貼固定。(裸線需與鋁杯緊密接觸)

三、靜電水母製作



(一) 從長端將單層面紙對折，由折線處輕輕往上捲(頂端約保留 1cm 不捲也不剪開)，以剪刀剪成寬約 3mm 細條狀。



(二) 將捲曲處稍微撥開後，手掌握住面紙兩端未剪開處，輕輕抖動向兩側拉開。



(三) 將面紙兩端未剪開處捲起，完成後再將兩端捲緊。

	<p>(四) 取 8cm x 8cm 的鋁箔將面紙的一端包覆捲起成條狀，再將另一端剪開，呈現分散長條狀。</p>
	<p>(五) 將捲起的鋁箔彎成 L 形，以電工膠帶黏貼在靜電產生器上方的鋁箔杯上。</p>
	<p>(六) 通電後，一隻手壓著接地線，觀察靜電水母的表現形態。</p>

陸、推廣的策略與建議

以推廣為目標的靜電產生器設計在 105 年 3 月完成第一代模組改良，並於 4 月 7 日辦理一場中學自然領域教師研習，由於第一代的製作技術需求較高，程序也較複雜，雖然出動多位專業人力協助調整、解決問題，參加活動老師在 2.5 小時內成功製作完成者約 50%，造成現場的忙亂並影響參與者的滿意程度。團隊為解決此狀況，依據活動辦理發生的問題，積極進行改良作業，替換多樣材料，並設定前置加工標準化流程，完成第二代模組開發。後續便執行較大規模的推廣作業，對象包含國小學童和國、高中生、各地區科普推廣團隊志工、大學相關科系學生與現職中小學教師，並於 2016 物理教育聯合會議進行科普示範教學，及至 8 月底止，推廣人數已逾千人。在短短 1.5 小時的研習時間裡，學員製作成功率達九成以上，並可進行靜電水母的造型實驗比較，甚至能進行輔助的靜電轉軸、靜電魔鏡延伸應用，其有

趣、明顯的靜電效果，博得參與學員一致的讚賞。

而在靜電產生器的體驗應用部分，國立科學工藝博物館辦理「105 年輔助偏遠地區學校行動科學實驗站科技扎根活動」，與陸軍軍官學校合作辦理「軍官與小玩子－電磁波宣導體驗活動」、「社區親子科學體驗營－夢想起飛活動」，總計近 40 場活動，超過一萬人次體驗感受其神奇的靜電效果，現場學童、親子們一開始往往怯怯地遠遠伸出手掌在旁邊游移，後來便放心大膽的將手指伸入水母的觸鬚中，開心地看手指頭被完整包覆起來。這個龐大的使用量，僅運用約 10 組靜電產生器便完美達成，可見其耐用程度亦經得起考驗。

過去由筆者與周鑑恆教授合作開發的桌上型的靜電產生器，能提供大量的電力，使得在富蘭克林輪、摩亞馬達的教具研發上，開啟了新的可能，促成了長跨距的富蘭克林鐘與靜電球跑操場等教具的開發（周鑑恆與曾瑞蓮，2012），新一代更輕薄短小的靜電產生器，目前已通過推廣性和耐用性的考驗，後續將測試發展其應用項目，增添其使用方法與樂趣，創造更新奇的效果，使中小學老師能一機在手、變化無窮，成為基礎電學入門的教學好幫手。

致謝

感謝教育部國民及學前教育署委辦 105 年科學教育資源推廣計畫、國家通訊傳播委員會補助電磁波體驗宣導與行動寬頻生活推廣合作計畫，以及科技部補助科普活動計畫：創意科學 FUN 一夏。

參考文獻

1. 勞動部勞動及職業安全衛生研究所（2016 年 5 月 25 日）**SDSE015T0018－靜電消除設備**。取自 <http://www.ilosh.gov.tw/menu/1188/1204/sdse015t0018-靜電消除設備>
2. 國際靜電放電協會（2013）**靜電放電概論**。取自 <https://www.esda.org/assets/Uploads/documents/Fundamentals-Part-1-TraditionalChinese.pdf>
3. 周鑑恆與曾瑞蓮（2012）。靜電產生器。**科學教育月刊**，**350**，37-42。
4. 范德格拉夫起電機（2016 年 10 月 8 日）取自維基百科，自由的百科全書 <https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%8C%83%E5%BE%B7%E6%A0%BC%E6%8B%89%E5%A4%AB%E8%B5%B7%E7%94%B5%E6%9C%BA&oldid=41738950>
5. Ballou, J. W. (1954). Static electricity in textiles. *Textile Research Journal*, 24(2), 146-155.
6. Burns, T. W., O'Connor, D. J., & Stocklmayer, S. M. (2003). Science communication: a contemporary definition. *Public understanding of science*, 12(2), 183-202.
7. Cornman, S. (2013). *Developing an Evaluation Rubric for Hands-on Science Education Activities* (Doctoral dissertation, CSIRO).
8. Jensen, D., Wood, J., & Wood, K. (2004, June). A design methodology for hands-on classroom experiences. In *Proceedings of the ASEE Annual Conference and Exposition*.
9. Lunn, A. C., & Evans, R. E. (1977). The electrostatic properties of human hair. *J. Soc. Cosmet. Chem*, 28(9), 549.
10. McCarty, L. S., & Whitesides, G. M. (2008). Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: contact electrification of ionic electrets. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(12), 2188-2207.

曾瑞蓮、黃仁偉、鍾 賢、陳玫岑、許馨月、朱偉齊、洪偉清

Introduction on Design of a Static Electricity Generator for Educational Promotion

**Jui-Lien Tseng^{1*}, Jen-Wei Huang², Hsien Chung², Mei-Tsen Chen¹, Hsin-Yueh Hsu¹,
Wei-Chi Chu¹, and Wei-Chin Hung^{2**}**

¹ National Science and Technology Museum

² Department of Physics, R.O.C. Military Academy

Corresponding author: *jessica@mail.nstm.gov.tw, **hung.wc0602@msa.hinet.net

Abstract

Promotion-oriented DIY science activities are designed to enhance students' scientific understandings and problem-solving skills. These kinds of activities need to be stimulating, fun, and interesting in order to increase learner's motivation in science activities. It would be more efficient if these activities also integrate real-life experience in the meantime. The purpose of this study is to investigate the different versions of Van de Graaff generators, and to analysis the materials and procedures. Furthermore, the proposed design would support middle and primary school teachers conducting educational promotion as teaching aids. Through step-by-step instruction, the learners can be easier to make a static electricity generator by themselves. As a result, it is more efficient in training educators for educational promotion.

Key words: static electricity generator, Van de Graaff generator, science education, science popularization, teaching aids design