

# 從葉門亞丁機場電扇觸電傷亡事件談 CNS 60335-1家電安規對電器觸電電流量測評估與電扇絕緣結構設計（上）

林昆平／標準檢驗局臺南分局技正

2019年7月葉門機場服務人員觸摸扇網電擊傷亡事件，台灣電視台有播出相關新聞，此影片在YouTube首頁輸入「葉門亞丁機場+電扇」可搜尋到。影片內容顯示服務人員只是好心將電扇調整舒適方向給旅客，卻遭扇網電擊身亡，畫面顯示洛特菲先生右手因被電擊無法動彈，左手尚能揮動求救，但在鄰座未伸出援手下隨即休克身亡（圖1），但疑惑是手為何不抽離？扇網為何帶電？電如何越過電器絕緣來到金屬扇網處？回答這三個問題必須從人體電阻及感電生理、電器接觸電流評估與量測、及電扇絕緣結構設計談起。

筆者有長達十幾年時間服務台電、台塑、泰興工程等國內大型公司電氣部門，解析第一個問題並不難；第二個問題屬家電接觸電流量測，國際有IEC 60990 Methods of Measurement of Touch Current And Protective Conductor Current,1999之人體模擬阻抗電路代替真

人供測試；至於第三個問題涉電扇絕緣結構設計可依CNS 60335-1（103年版）章節包含：馬達繞組與內部配線搭接處之包覆固定（涉22.21節絕緣紙包覆要求/22.32節包覆帶電體套管耐熱絕緣性/23.1節絕緣皮銳邊傷害/23.4節單芯銅線固定絕緣方式/23.5節配線基本絕緣要求/29.3.2節絕緣膠帶包覆層數規定/30節固定用束帶耐熱絕緣性）及馬達殼漆包線帶電部與馬達殼與扇網間絕緣距離要求（29節絕緣距離）等指引。

本文實驗測試繁雜不得不分（上）（下）兩篇文章介紹，（上篇）聚焦在人體電阻與感電生理現象、電器接觸電流之觀念與量測、及重建葉門亞丁機場電扇漏電情境來解析觸電事故，內容適合一般民眾並強調購買貼有經濟部標準檢驗局（下稱本局）合格標識之電器商品重要性。至於（下篇）集中在CNS 60335-1電器絕緣結構設計上，偏向專業人士、安規工程師、電學背景者。



(a) 觸摸扇網觸電情形



(b) 休克喪失意識而身亡

圖1 擷取YouTube「葉門亞丁機場+電扇」事件照片

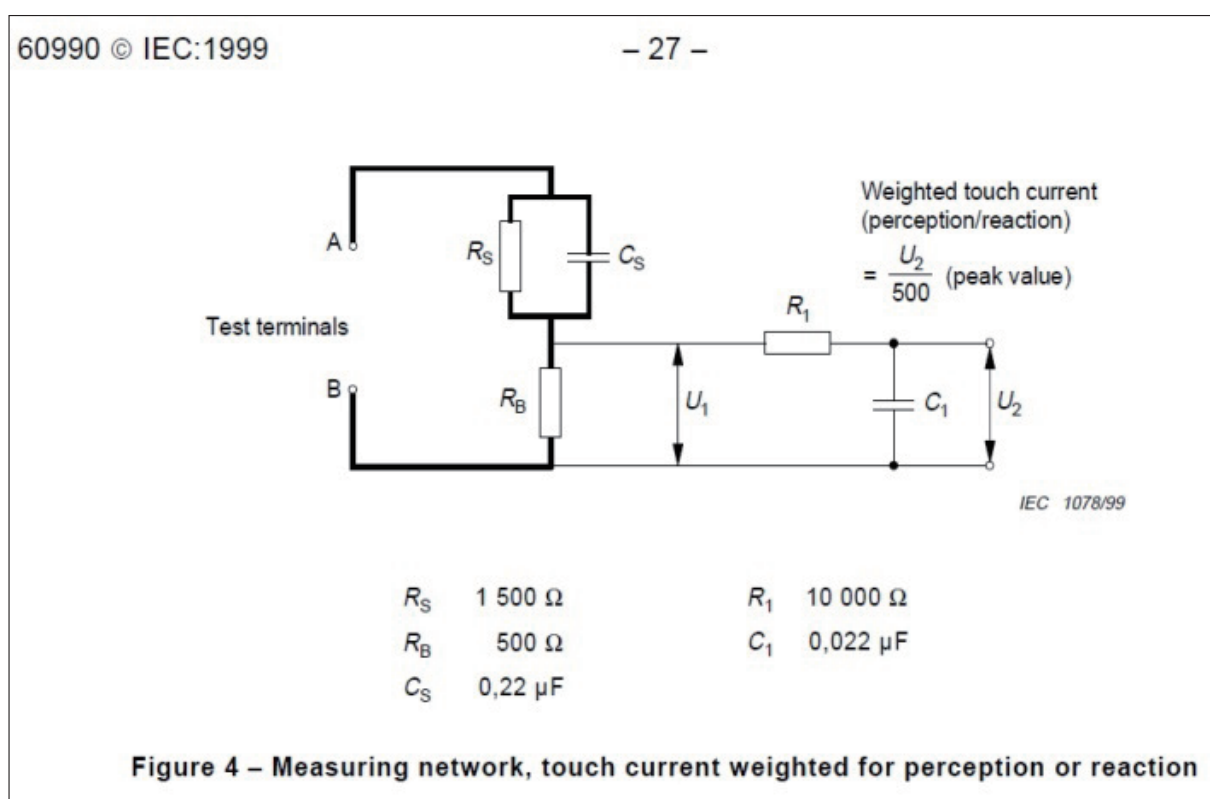


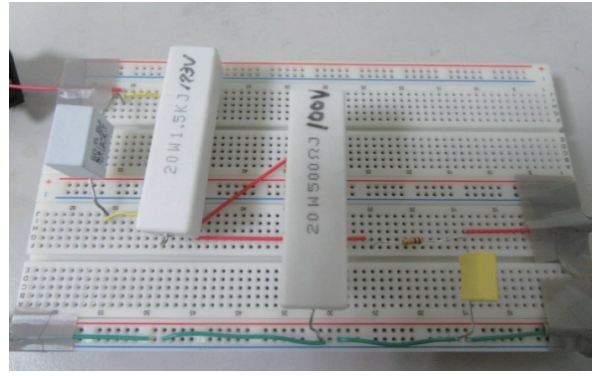
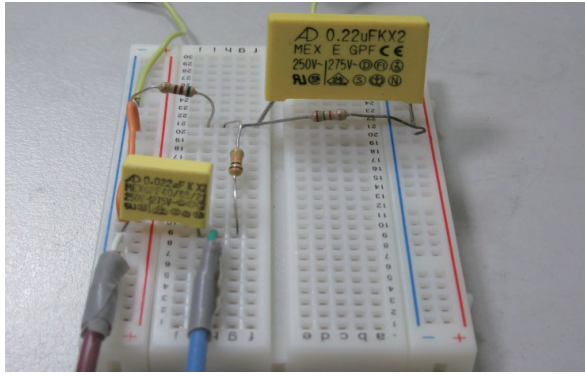
圖2 IEC 60990提供人體接觸電流（反應電流）測試用人體模擬阻抗模型[1]

## 一、人體電阻與感電生理現象

### (一) 人體電阻與人體模擬阻抗圖

人體電阻主要由皮膚、內部組織、手腳筋肉組成，皮膚電阻值約 $10^4 \sim 10^5 \Omega/\text{cm}^2$ 屬最高；內部組織如內臟、血液、

淋巴液等約 $100 \sim 200 \Omega/\text{cm}^2$ 與1%濃度生理食鹽水（NaCl）溶液相當；手腳筋肉電阻值屬中位[2]。國際電工學會制定有標準IEC 60990並提出一個非常受用的人體模擬阻抗模型電路（圖2），以人體皮膚組織等效之電阻 $R_S$ 與電容 $C_S$ ，再串接



(a) 人體模擬阻抗電路機板（小功率規格） (b) 人體模擬阻抗電路機板（大功率規格）

圖3 人體模擬阻抗電路實作

人體肌肉等效之電阻 $R_B$ 構成，右邊為自肌肉點抽出的量測電路由 $R_1$ 與 $C_1$ 構成，量測 $C_1$ 電壓再除以500即為人體觸電電流（式1）[1]。

人體模擬阻抗圖另一層物理含意是皮膚接觸電器漏電壓過大會先遭破壞，電蝕進入內部組織因充滿血液與組織液有如儲電桶快速吸引電流通過，最終尋找肌肉導地點流出。圖3為筆者根據圖2製作簡易人體模擬阻抗電路實體，圖3（a）採用零組件額定功率較小規格適用家電絕緣佳者；圖3（b）採用零組件額定功率較大規格適用絕緣崩潰電器者，電路電阻元件1500  $\Omega$ 需20 W  $\uparrow$ 及500  $\Omega$ 需10 W  $\uparrow$ 來避免燒壞，故只能採用水泥電阻；電容元件額定電壓250 V  $\uparrow$ ，整個電路可適用110 V及220 V供電系統，圖3（a）與圖3（b）除元件功率不同外，電阻值與電容值都相同。

$$I_{\text{TOUCH CURRENT}} = \frac{U_2}{500} \text{ (A)} \quad (1)$$

## （二）感電生理現象

人體觸電約略0.5 mA會有麻麻感覺，稱最小感知電流（Perception Current）；當電流達10 mA~16 mA稱人體可脫離電流（Let-Go Current），此時肌肉痙攣伸縮但仍可藉意志控制神經脫離；電流升高至16 mA~23 mA稱膠著電流（Freezing-Current），手掌肌肉極度收縮無法張開進入危險觸電期；當電流越過23 mA稱休克電流，呼吸困難、心博降低及休克；一旦電流達100 mA稱心臟麻痺電流，人體終止心跳與呼吸。感電生理實驗早在60年前由美國Charles Dalziel（1904-1986）教授執行過，當時70名實驗者手握銅棒通入交流電壓，逐漸加大電壓並記錄生理狀況，還描繪出圖4脫離電流曲線，實驗顯示大部份可逃脫電流在16 mA以下。

至於人體可觸及安全電壓範圍各國規定不同如表1[2]，台灣依CNS 60335-1

第8.1.4節規定是30 V (R.M.S)，表2則顯示Dalziel記錄的觸電生理反應[3]。

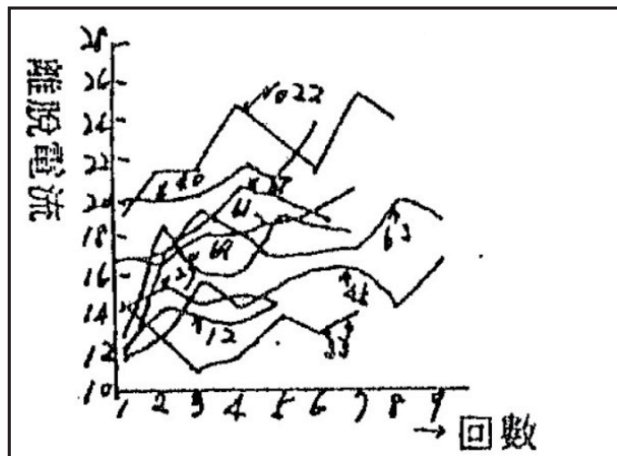


圖4 脫離電流實驗[3]

表1 各國可觸及安全電壓

|     |           |
|-----|-----------|
| 瑞士  | 36 V (交流) |
| 比利時 | 35 V (交流) |
| 日本  | 35 V (交流) |
| 德國  | 24 V (交流) |
| 荷蘭  | 50 V (交流) |
| 捷克  | 20 V (交流) |
| 法國  | 24 V (交流) |

表2 通過人體電流大小與人體生理反應程度

| 人體反應與其他                   | A.C (r.m.s) |         |
|---------------------------|-------------|---------|
|                           | 60 Hz       |         |
|                           | 男子          | 女子      |
| (1) 最小感知電流，麻麻感            | 0.5 mA      | 0.3 mA  |
| (2) 稍感陣陣刺激                | 1.1 mA      | 0.7 mA  |
| (3) 無痛苦，筋肉尚能自由伸縮          | 1.8 mA      | 1.2 mA  |
| (4) 感覺痛苦，筋肉仍可自由伸縮         | 9 mA        | 6 mA    |
| (5) 不可脫離電流，筋肉已無法自由伸縮      | 16 mA       | 10.5 mA |
| (6) 休克電流發生，十分痛苦，筋肉收縮，呼吸困難 | 23 mA       | 15 mA   |
| (7) 心臟麻痺電流發生，心室痙攣，呼吸停止    | 100 mA      | 100 mA  |

## 二、電器接觸電流觀念與量測

電器接觸電流 (Touch Current) 指當接觸產品部位時，流過人體的電流，當電器絕緣結構崩潰，電器外殼會傳導

出漏電壓，人體一旦觸及會產生很大的接觸電流 (或俗稱觸電電流)，在IEC 60990標準中有提出「人體接觸電流」的評估方式，並給出一個很受用的人體模擬阻抗電路模型提供分析用。

## （一）電器外殼接觸電壓產生原因

電器插頭只要插在電源插座，電器內部配線就能傳遞電源電壓，如果這時候電器帶電體的絕緣結構出了問題，電器外殼會有漏電壓使接觸者產生接觸電流。電器內部藉套管、絕緣膠帶、空氣層、中介塑膠板/殼等包覆帶電部形成絕緣層，帶電部與外殼間絕緣層可設計單層、雙層或多層，一旦絕緣層絕緣性降低，內部電壓就有滲漏至外殼的可能，導致電器絕緣性降低原因可能是空氣濕度、內部灰塵、內部耦合元件（如變壓器與電容）、電器長期運轉溫升磨損與振動磨損所降低絕緣層絕緣距離等因素；這就如同水壩不時承受水壓衝擊，一旦水壩內插入大型虹吸管、垂入吸濕布、因地震出現隙縫等因素，都會使水壩外殼滲漏水的道理一樣。

## （二）電器外殼接觸電流行走途徑

當人體接觸漏電電器而產生接觸電流時，接觸電流行走途徑為何？要了解這個問題需先對建築物供電系統有初步的觀念，圖5顯示IEC 60990之圖2所提供建築物用戶使用電器的其中一種供電系統圖；在建築物地下室通常會設置一個變電站，變電站內會設計一台變壓器T1以接受電力公司的高壓供電（22800 V或11400 V），再於變壓器二次側降成低電

壓380 V，380 V是一個Y接三相系統，Y的中心點會拉出一個N相並接地，如此每一相對中性點都是220 V，接著為平均用戶負載分佈，燈與插座回路用隔離變壓器T2並其二次側中間繞組抽頭成110 V迴路供燈插座用，220 V二次側全繞組則供冷氣機使用，從圖5供電系統中可以觀察出：接地符號G⊖，對每棟建築物而言指的就是挖地基時埋入建築物底下土壤內的接地網，接地網是以數十支接地棒打入地面1.5 M深，再將接地棒以裸銅線焊接連接在一起形成的網狀結構（詳IEEE Std 80-1986），用意是提供一個比供電系統阻抗更低的接地阻抗R<sub>g</sub>，以便讓建築物內用戶負載使用不平衡下產生的不平衡電流流入地面，確保中性點N'電壓不浮動，以免造成用戶110 V與220 V電壓的不穩定性，因此當不平衡電流進入接地網後便會產生接地電壓，所以供電系統中性點電壓不會等於零（即V<sub>N'-G</sub> ≠ 0），用戶插座端N相孔會帶有電壓而不是零，一旦人體觸及漏電的電器EUT外殼，若鞋子絕緣不佳，接觸電流即流經人體並由E'流往接地網導地G。

$$V_{NG} = \text{接地網接地電壓 } V_{N-G} \quad (V_{E'-G})$$

$$V_{LG} = V_{LN} + V_{N-G}$$

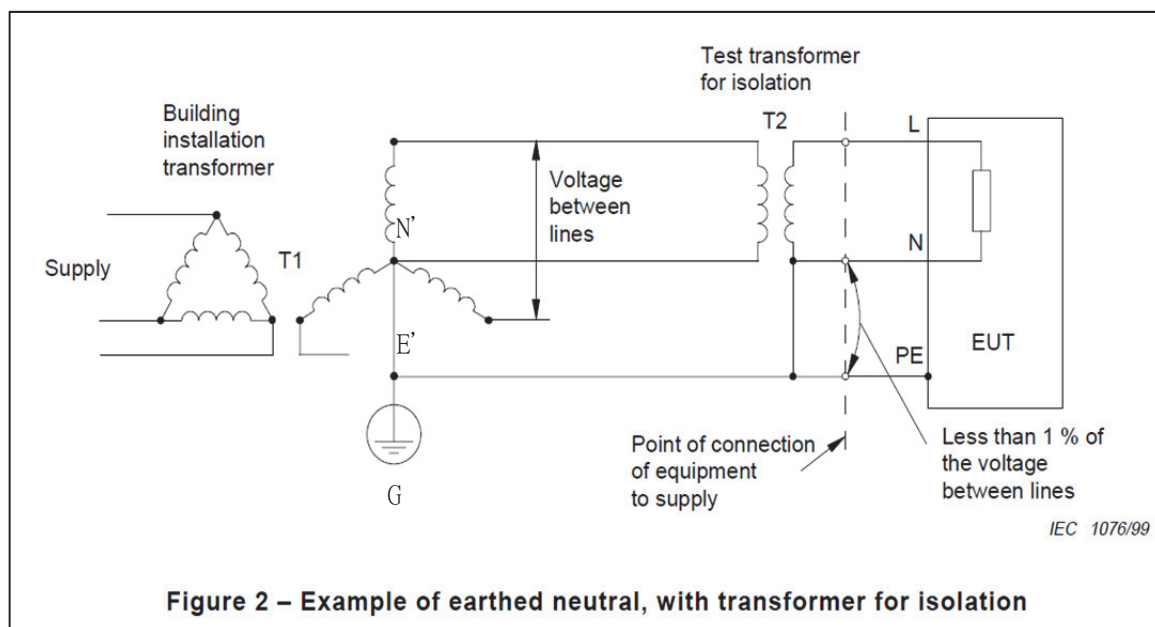


圖5 IEC 60990之圖2-用戶供電系統圖

### 三、洛特菲先生觸電情境分析與現場重建量測

在建立用戶供電系統圖觀念後，解析「葉門亞丁機場電扇漏電傷亡事件」變得可能，洛特菲先生明顯已觸電，使用人體模擬阻抗電路量測接觸電流會有一定精確性。

#### (一) 觸電情境分析

對影片再詳細觀察：圖6 (a) 顯示辦公場似有隔區水泥矮牆作個人辦公區隔；圖6 (b) 洛特菲先生穿著短褲，裸露大小腿，穿有白色襪子，應有穿鞋，但大腿已碰觸接地水泥矮牆；圖6 (c) 手指已伸入金屬扇網縫隙內；圖6 (d) 與圖6 (c) 扇葉位置比照其透明塑膠扇片並未轉動；圖6 (e) 當他被推離時，

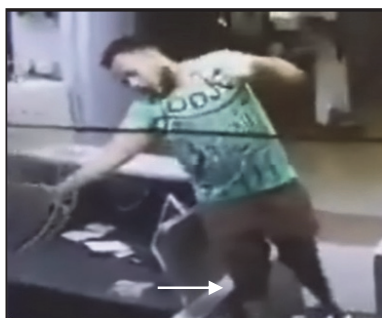
金屬扇葉產生負載脫離突波火花，故觸電電流應相當大。

再分析其觸電生理反應：圖6 (b) 影片第10秒~16秒，右手無法抽離、身體僵硬斜靠右無法扭動、但左手尚可揮動求救、表情驚慌，漏電流應從右手皮膚穿入經身軀再由右大腿觸地流入地面，此時電流應落在16 mA~23 mA間；圖6 (c) 影片第17秒~25秒，表情轉為痛苦嘴巴張開，身軀似也逐漸痙攣，左臂漸無法動作，比照表2觸電電流應落在23 mA附近；圖6 (d) 影片第26秒~28秒，隨著電擊時間拉長，身軀已倒向桌面，大腿碰地處卻未因姿勢改變而脫離觸地點，證明電流穿過大腿皮膚後流入矮牆接地面。

再觀察扇網結構：圖6 (c) 右手兩



(a) 現場有隔區水泥矮牆  
(影片第10-16秒)



(b) 觸摸漏電扇葉，大腿  
碰觸水泥牆導地是致死關  
鍵 (影片第17-25秒)



(c) 兩根手指似乎插入網縫



(d) 28秒證明扇葉從頭到尾都  
未轉動 (影片第26-28秒)



(e) 推離時，扇網產生大量火花足證通過人體電  
流相當大 (影片第29秒)

圖6 觸電影片分析

根手指竟可伸入扇網，這台風扇明顯不符合國際標準IEC 60335-1家電安全規範第20.2節「具危險轉動機構的電器應備有遮蔽圍籬，圍籬縫隙不得使使用者手指伸入受傷」，更遑論標準內還有其他重要章節諸如：防電擊、絕緣耐電壓、機械強度、零組件、異常防護、機構危險、內外部配線、構造、螺釘與連接、絕緣距離等安全要求。葉門商品檢驗制度如何筆者不得而知，但葉門屬中東地區，配電系統採用220 V供電，是台灣家用電壓110 V兩倍，人員觸電更顯致命。

## (二) 電扇漏電絕緣結構分析

影片確認該電扇正處於絕緣崩潰情況，金屬扇網已帶有漏電壓，圖7 (a) 顯示扇頭結構，世界各國設計交流電扇的結構大致相同，圖7 (c) 馬達絕緣結構設計主要聚焦馬達漆包線與內部配線搭接處的絕緣包覆，及繞組與馬達殼間的距離是否足夠避免爬電現象發生，圖7 (b) 顯示金屬扇網以螺釘固鎖在馬達殼上，因此馬達殼與繞組間若絕緣崩潰就會使金屬扇網帶電，而造成絕緣崩潰原因可能是下列情況：

1.馬達漆包線與內部配線帶電銅芯搭接

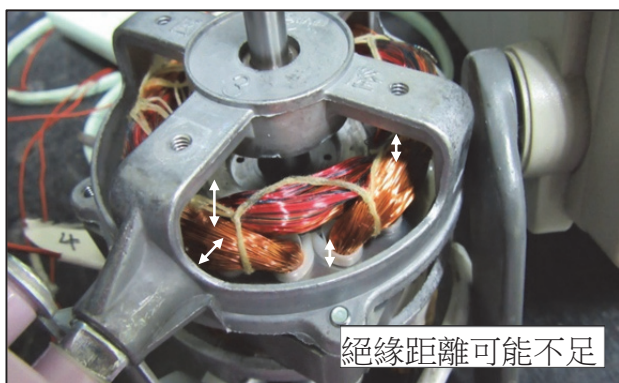
線處，因包覆固定束帶不符耐熱標準而碎裂鬆脫翹起碰觸馬達殼。

- 2.馬達漆包線與內部配線帶電銅芯接線處之包覆紙，因絕緣紙層數不符合標準規定或長期馬達運轉振動割破而露出帶電銅芯碰觸馬達殼。
- 3.馬達漆包線與內部配線帶電銅芯接線處之包覆塑膠套管，不符抗老化測試而裂化致帶電部碰觸馬達殼。
- 4.馬達漆包線與馬達殼金屬間距離不

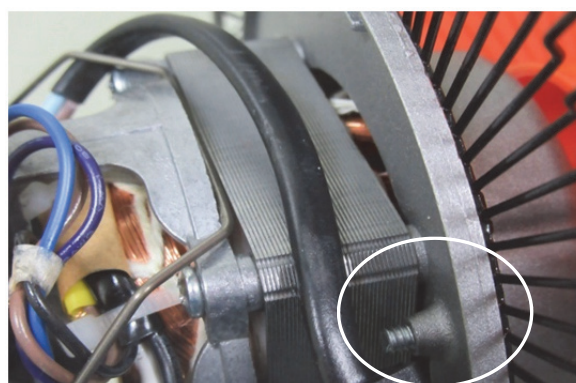
夠，致嚴重漏電至馬達殼上。

### (三) 洛特菲先生觸電現場重建與量測

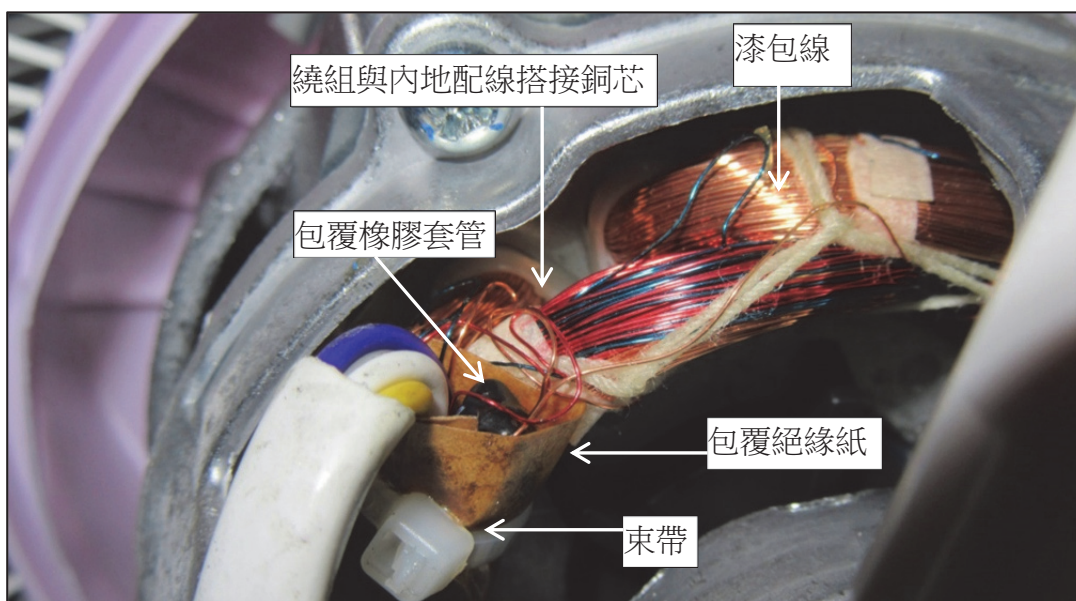
考慮前述(1)~(4)絕緣崩潰情況都可能使馬達殼帶電，故直接將供電系統220V L相電壓以接線引至扇網(圖8(a)白色插頭左邊接線及扇網上的紅色夾子)，人體模擬阻抗A點也引接線至扇網金屬箔上(圖8(a)扇網上黃色



(a) 交流電扇馬達結構



(b) 金屬扇網固鎖在馬達殼情境



(c) 漆包線與內部配線搭接處

圖7 電扇絕緣結構分析

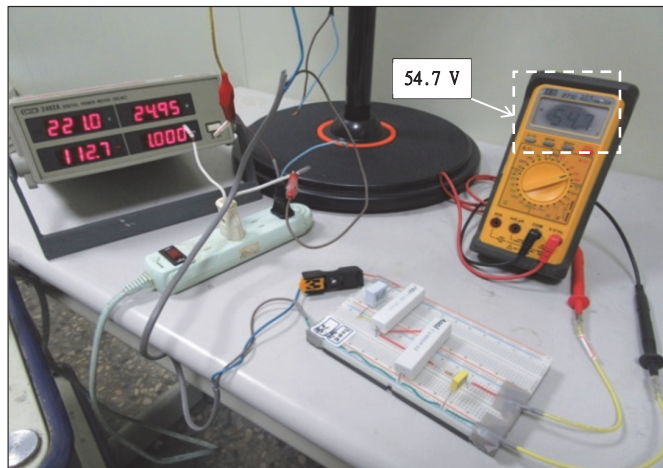


夾子)，再將人體模擬阻抗B點接線夾到供電系統220 V N相電壓處（圖8（a）白色插頭右邊紅色夾子），則圖8（b）人體模擬阻抗輸出側量測到人體對地電壓是54.7 V，代入式1計算接觸電流為109.4 mA；實際電力表顯示通過人體模擬阻抗的功率24.95 W與電流112.7 mA，與前述公式計算109.4 mA相差不多。再將供

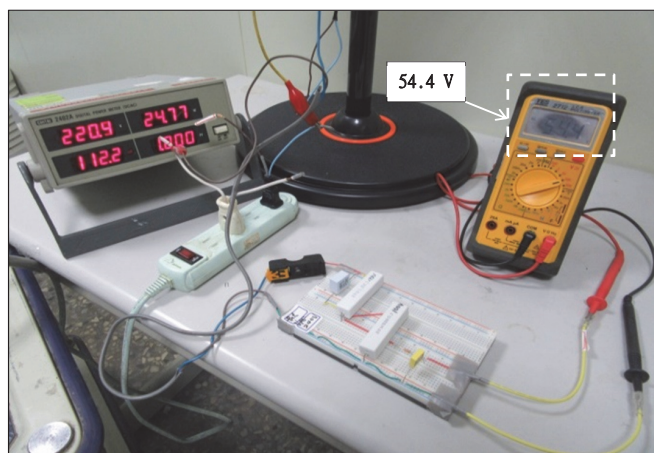
電系統220 V N相電壓接線引至扇網重測一次，數據如圖8（c）是112.2 mA。透過上述測試，可以得到以下結論：「不管是馬達繞組漆包線N相或L相碰觸馬達殼，都會引起電扇絕緣崩潰，造成洛特菲先生身體導入約112 mA的觸電電流，引發心臟麻痺」。



(a) 扇網直接通L相或N相電壓（葉門電壓220 V），人體接觸電流測試情形



(b) L相人對地電壓54.7 V；實測接觸電流112.7 mA



(c) N相人對地電壓54.4 V；實測接觸電流112.2 mA

圖8 洛特菲觸電情景重建與實測結果

## 四、結論

葉門電扇電擊事故若發生在台灣110 V供電系統，電流雖減半但仍有55.2 mA的危險性，不過台灣普遍存著助人為樂的民俗風情，再加上台灣有經濟部標準檢驗局對電器商品嚴格把關，要發生這種不合格電扇致死事故不太可能，洛特菲先生要是能在台灣生活，其命不該如此不幸。另洛特菲先生最大的錯誤就是穿短褲，並讓大腿碰觸到區隔牆接地面，同個時間他又觸摸絕緣崩潰的電扇，恰好形成一個無法脫離的電流回路，只能說運氣真的不好，至於電扇絕緣結構設計，依CNS 60335-1各適用章節將有更精彩的實務展現，將再（下篇）與讀者相逢，但需要點實驗時間。

## 五、參考文獻

1. IEC 60990 : 1999, Methods of Measurement of Touch Current And Protective Conductor Current, IEC。
2. 台塑員工電氣訓練教材，78。
3. Dalziel, Charles F., The Effects of Electric Shock on Man, Washington, D.C., 1956。
4. 林昆平，84，工業配電諧波電流抑制，國立台灣大學，電機工程碩士論文。
5. Lin, Kun-Ping., 1998, An Advanced Computer Code For Single-Tuned Harmonic Filter Design, IEEE Transation on Industry Application, 34, 640-648。
6. 林昆平，92，電機電子產品共振問題探討，標準與檢驗月刊，57，56-61。