

絕緣材料的性質與試驗

(附高壓試驗設備)

劉紹峻編著

大東書局出版

絕緣材料的性質與試驗

(附高壓試驗設備)

劉紹峻編著

大東書局出版

本書分爲兩大編。第一編是高壓試驗設備，內容包括：①高壓電源設備；②高電壓的量度；③示波器分壓器等；④電容器、電阻器與試驗室之裝置。第二編是絕緣材料的性質與試驗，內容包括：①介質常數與極化；②絕緣電阻；③絕緣電阻的量度；④吸收現象與介質損失；⑤介質常數與介質損失的量度；⑥絕緣強度；⑦絕緣強度的試驗；⑧突波試驗；⑨其他電工試驗；⑩絕緣材料的機械物理化學性質；⑪絕緣材料的耐熱性能。本書是從事電氣機器與絕緣材料製造的技術人員、電機電器運行與維護的技術人員、以及從事高壓電絕緣材料與電工材料等課教學的人員、電機工程各專業三年級以上的學生參考閱讀之用。

劉紹峻 編著

*

1954年2月發排·1954年7月上海第一版

1954年12月上海第二次印刷(2001—3500冊)

書號：5143·30''×42''·1/25·328千字·17¹⁷/25印張·定價24,000元

*

大東書局(上海福州路310號)出版發行

上海市書刊出版業營業許可證出○四三號·上海市書刊發行業營業許可證發○六一號

導文印刷所(威海衛路357弄12號)印刷

序 言

近三四年來，電機電器的製造工業，發展很快。在電氣機器製造裏，絕緣材料的性能好壞及絕緣方法是否適當，是很重要的事，因此，在使用絕緣材料之前，必須確知其各種屬性；而成品出廠之前，亦應詳加試驗，判別其是否符合一定的規格。在此情形下，那麼很自然地，許多從事絕緣材料及電氣機器製造的工程師及技術員們，就需要知道一系列的絕緣材料及電氣機器的試驗方法。

電廠及各企業設備，為防止發生事故起見，近來亦實行定期檢修制度，在此也要求工作人員們能掌握某些試驗絕緣情況的方法，

關於試驗絕緣材料及電機電器絕緣性能的方法，國內至今尚無專書介紹。其他參考資料，亦不易得。因此，對於許多工作人員的要求，不能滿足。劉紹峻先生曾在電器製造廠裏工作過，感到有此需要，所以劉先生於授課之餘，即從事收集此項資料，近已編寫成書。我想此書出版後，一定很可以滿足許多工作人員的要求，對於電氣事業的發展，有很大的幫助。

再者，電工材料及高電壓工程，現已為許多電氣專業的必修課程，劉先生此書，作為上兩門課的參考讀物，也是非常相宜的。

朱木美於華中工學院

1954年元月十八日

目 錄

序 言

第一編 高壓試驗設備

第 一 章 高壓電源

| | |
|--------------------------|----|
| 前 言 | 1 |
| (1.1) 電源種類 | 1 |
| (1.2) 低頻高壓試驗變壓器 | 2 |
| (1.3) 變壓器的累接 | 4 |
| (1.4) 電源的容量 | 7 |
| (1.5) 電壓的調節 | 8 |
| (1.6) 高壓直流電源 | 12 |
| (1.7) 高頻電源 | 16 |
| (1.8) 突波的波形 | 21 |
| (1.9) 電容量的放電 | 22 |
| (1.10) 突波發電機的原理 | 27 |
| (1.11) 突波發電機的幾種充電放電的實用線路 | 28 |
| (1.12) 突波發電機的電壓 | 32 |

第 二 章 高電壓的量度

| | |
|---------------|----|
| 前 言 | 34 |
| (2.1) 高電壓計的種類 | 34 |

| | |
|-------------------------|----|
| (2.2) 火花隙 | 35 |
| (2.3) 靜電電壓計 | 45 |
| (2.4) 利用電暈現象來量度高壓 | 50 |
| (2.5) 利用標準電容器上的充電電流來量高壓 | 51 |
| (2.6) 離子風電壓計 | 53 |
| (2.7) 利用電子管上的柵壓控制來量度高壓 | 54 |
| (2.8) 利用氖氣燈的峯值電壓表 | 57 |
| (2.9) 其他量度突波的方法 | 57 |
| (2.10) 利用互感器來量度高壓 | 60 |

第三章 示波器與分壓器

| | |
|--------------------------|----|
| 前 言 | 62 |
| (3.1) 陰極射線管概說 | 62 |
| (3.2) 射線管的焦聚控制 | 63 |
| (3.3) 充氣射線管與真空射線管的比較 | 66 |
| (3.4) 電子注的偏轉控制 | 67 |
| (3.5) 電子注的隔斷控制 | 69 |
| (3.6) 高速冷陰極射線管 | 70 |
| (3.7) 複演陰極射線管示波器的控制線路 | 73 |
| (3.8) 瞬時不複演陰極射線管示波器的控制線路 | 78 |
| (3.9) 電阻式分壓器 | 81 |
| (3.10) 電容式分壓器 | 82 |
| (3.11) 阻抗配合用於突波量度中的分壓器 | 84 |

第四章 電容器、電阻器、檢流計、與試驗室的裝置

| | |
|-----|----|
| 前 言 | 90 |
|-----|----|

| | |
|---------------------------|-----|
| (4.1) 護衛環與屏蔽 | 90 |
| (4.2) 用在分壓器上與突波發電機上的高壓電容器 | 92 |
| (4.3) 試驗上用的高壓電容器 | 95 |
| (4.4) 高壓電阻器 | 98 |
| (4.5) 轉圈式檢流計 | 100 |
| (4.6) 衝擊檢流計 | 102 |
| (4.7) 亞爾通分流器 | 103 |
| (4.8) 振盪式檢流計 | 104 |
| (4.9) 高壓試驗室的裝置 | 105 |

第二編 絕緣材料的性質與試驗

概 說

第 五 章 極化與介質常數

| | |
|--------------------|-----|
| 前 言 | 113 |
| (5.1) 絕緣質與介質 | 113 |
| (5.2) 介質常數的定義 | 114 |
| (5.3) 位移與極化 | 115 |
| (5.4) 極化學說與極化種類 | 119 |
| (5.5) 影響極化及介質常數的因素 | 126 |
| (5.6) 氣體的介質常數 | 129 |
| (5.7) 液體的介質常數 | 131 |
| (5.8) 固體的介質常數 | 133 |
| (5.9) 介質常數在應用上的意義 | 136 |

第 六 章 絕緣電阻

| | |
|------------------------|-----|
| 前 言..... | 139 |
| (6.1)吸收現象..... | 139 |
| (6.2)體積電阻與表面電阻..... | 141 |
| (6.3)電離子性的導電..... | 143 |
| (6.4)氣體的導電係數與絕緣電阻..... | 145 |
| (6.5)液體的導電係數與絕緣電阻..... | 146 |
| (6.6)固體的導電係數與絕緣電阻..... | 147 |
| (6.7)固體介質的表面電阻..... | 155 |
| (6.8)絕緣電阻在應用上的重要性..... | 158 |

第七章 絕緣電阻的量度

| | |
|---------------------------|-----|
| 前 言..... | 163 |
| (7.1)量度絕緣電阻時記讀數的時間..... | 163 |
| (7.2)用高電阻電壓表量度絕緣電阻法..... | 164 |
| (7.3)用檢流計直接指示絕緣電阻法..... | 165 |
| (7.4)用失去電荷的方法量度絕緣電阻..... | 167 |
| (7.5)利用真空管電壓計來量度絕緣電阻..... | 171 |
| (7.6)試品的裝置與量度時應注意的事項..... | 171 |
| (7.7)液體材料絕緣電阻的量度..... | 178 |
| (7.8)幾種便攜式的絕緣電阻量度器..... | 182 |

第八章 介質損失

| | |
|----------------------------|-----|
| 前 言..... | 188 |
| (8.1)吸收現象與介質損失..... | 188 |
| (8.2)代表介質常數與介質損失的等值線路..... | 191 |
| (8.3)用複數來代表介質損失與介質常數..... | 195 |

| | |
|-------------------|-----|
| (8.4) 影響介質損失的各種因素 | 196 |
| (8.5) 氣體的介質損失 | 200 |
| (8.6) 液體的介質損失 | 202 |
| (8.7) 固體的介質損失 | 204 |
| (8.8) 介質損失在應用上的意義 | 212 |

第九章 介質常數與介質損失的度量

| | |
|---------------------------|-----|
| 前 言 | 216 |
| (9.1) 介質常數的度量 | 216 |
| (9.2) 用動力式瓦特表量度介質損失法 | 221 |
| (9.3) 用靜電式瓦特表量度介質損失法 | 225 |
| (9.4) 用卡熱表量度介質損失法 | 226 |
| (9.5) 用陰極射線管示波器量度介質損失法 | 231 |
| (9.6) 關於高壓電容電橋的一般討論 | 237 |
| (9.7) 許令電橋 | 238 |
| (9.8) 亞特金生電橋 | 242 |
| (9.9) 高頻共振量度介質電容量與介質損失的方法 | 243 |
| (9.10) 介質滯遲曲線的度量 | 248 |
| (9.11) 固體材料介質損失的度量 | 252 |
| (9.12) 液體材料介質損失的度量 | 253 |
| (9.13) 氣體介質損失的度量 | 256 |

第十章 絕緣材料的介質強度

| | |
|--------------------|-----|
| 前 言 | 259 |
| (10.1) 氣體的打穿現象與學說 | 259 |
| (10.2) 影響氣體介質強度的因素 | 261 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| (10.3)液體的打穿現象與學說····· | 267 |
| (10.4)影響液體介質強度的因素····· | 268 |
| (10.5)常用的幾種氣體液體的絕緣強度····· | 276 |
| (10.6)固體絕緣材料的打穿現象與學說····· | 277 |
| (10.7)影響固體絕緣強度的因素····· | 282 |
| (10.8)多種絕緣材料串聯使用時的介質強度····· | 293 |

第十一章 低頻電壓下的打穿、耐壓與飛弧試驗

| | |
|----------------------------|-----|
| 前 言····· | 296 |
| (11.1)試驗方法····· | 296 |
| (11.2)固體絕緣材料的試品與電極的裝置····· | 299 |
| (11.3)均勻電場的獲得與邊緣作用的消除····· | 302 |
| (11.4)試驗品的預先處理····· | 306 |
| (11.5)硬膠木的試驗規範····· | 307 |
| (11.6)液體絕緣油的打穿試驗····· | 308 |
| (11.7)試驗結果的報告····· | 313 |
| (11.8)氣體的打穿試驗····· | 314 |
| (11.9)瓷絕緣器的打穿與飛弧試驗····· | 317 |

第十二章 突波試驗

| | |
|------------------------------|-----|
| 前 言····· | 326 |
| (12.1)關於突波的幾個名詞····· | 326 |
| (12.2)突波強度試驗中固體試品與電極之裝置····· | 328 |
| (12.3)固體介質的突波強度試驗····· | 334 |
| (12.4)液體與氣體的突波強度試驗····· | 338 |
| (12.5)絕緣器與火花隙的臨界飛弧電壓試驗····· | 342 |

| | |
|-------------------------|-----|
| (12.6) 飛弧電壓的電壓時間曲線····· | 344 |
| (12.7) 電壓升高率與飛弧電壓····· | 347 |
| (12.8) 試驗結果的校正····· | 348 |

第十三章 其他電工試驗與其試驗儀器

| | |
|------------------------------------|-----|
| 前 言····· | 353 |
| (13.1) 空隙內絕緣強度恢復速度的試驗····· | 353 |
| (13.2) 液體材料打穿前電流的量度····· | 354 |
| (13.3) 指示游擊作用開始的設備····· | 357 |
| (13.4) 快速記錄的交流電橋····· | 362 |
| (13.5) 絕緣材料的抗電火花性與抗電弧性····· | 367 |
| (13.6) 絕緣器的特種電工試驗與量度····· | 369 |
| (13.7) 石材板面金屬脈絡的測定與雲母品質的火花試驗法····· | 371 |
| (13.8) 在高溫高濕中絕緣材料對金屬的腐蝕作用····· | 373 |

第十四章 絕緣材料的化學物理機械性質

| | |
|------------------------------|-----|
| 前 言····· | 377 |
| (14.1) 固體絕緣材料的化學性質····· | 377 |
| (14.2) 固體絕緣材料的熱性質····· | 381 |
| (14.3) 固體絕緣材料的機械性質及其他性質····· | 385 |
| (14.4) 液體絕緣材料的化學性質····· | 387 |
| (14.5) 液體絕緣材料的物理性質····· | 390 |
| (14.6) 液體絕緣材料的熱性質····· | 392 |
| (14.7) 氣體絕緣材料的化學物理性質····· | 394 |

第十五章 絕緣材料的耐熱性能與壽命

| | |
|--------------------------|-----|
| 前 言 | 398 |
| (15.1) 固體絕緣材料的分級及其最高使用溫度 | 398 |
| (15.2) 絕緣材料在實用中損壞的情形 | 398 |
| (15.3) 纖維材料的機械壽命的試驗 | 400 |
| (15.4) 樹脂與絕緣漆膜的熱壽命試驗 | 402 |
| (15.5) A 級材料的熱壽命與絕緣電阻 | 402 |
| (15.6) A 級材料的壽命試驗(一) | 404 |
| (15.7) A 級材料的壽命試驗(二) | 407 |
| (15.8) A 級材料的壽命試驗(三) | 409 |
| (15.9) B 級材料的壽命與壽命試驗 | 411 |
| (15.10) H 級材料的壽命與壽命試驗 | 414 |
| (15.11) 關於絕緣材料分級標準的討論 | 415 |
| (15.12) 礦物油的衰老 | 417 |

第一章 高壓電源

前言

絕緣材料的試驗，是高壓試驗的一部份；故在講材料的試驗方法之先，對於高壓試驗設備，應有初步的了解。本章所介紹的各種高壓電源，不只限用於絕緣材料的試驗上，亦可用於一般高壓實驗上。

(1.1) 電源種類

作高壓絕緣試驗的電源，以其頻率與波形分，可有下列數種：(1) 低頻交流，(2) 高頻交流，(3) 直流，(4) 突波。這幾種電源，在應用上，雖各有不同；但在絕緣材料的研究與試驗上，都是要用的。

低頻交流電源的頻率，為 50 週波或 60 週波。其電壓為 2—3 千伏者，多用於電器的正規絕緣試驗；電壓為 50 千伏者，多用於一般絕緣材料的絕緣強度及介質損失試驗。試驗變壓器和各種絕緣瓷器的絕緣性質時，約需電壓 15 萬伏；而試驗懸式絕緣串，以及作他種研究工作時，則電源電壓，有時要高到 150 萬伏。一般地說，實驗室的電壓是越高越好；不過選用電壓時，還要考慮到設備費的問題。

直流電源主要是用來試驗電纜裝置後的絕緣性質的。在這種時候，電纜很長，電容量大。如用交流電源來作試驗，則電源設備的容量就要很大。用直流時，因為沒有電容性電流；故所需電源容量要小的多，使用起來也方便些。直流電源也用在絕緣材料的研究試驗中。

高頻電源主要是用來試驗電訊上用的絕緣器材的。因為在電源類

率變高後，材料的絕緣強度及介質損失等性質，都可能發生變化；故有時在低頻試驗中，絕緣性質很好的材料，用在高頻電器上時，其性能就不能達到低頻試驗的標準。其次，在絕緣材料性質的研究中，高頻電源也是很重要的。

突波電源是用來研究材料對於突波電壓的絕緣性質的。一般電器，均有受閃電襲擊的可能，閃電就是一種自然發生的突波。爲了試驗研究電器及材料對閃電的絕緣性，爲了研究試驗閃電的性質及其破壞能力，常用一種人製的突波發電機，產生和閃電性質相近的突波，作爲試驗電源。其次在許多高壓線路中，由於開關的操作，也可以產生突波，使電路上的瞬時電壓，高出於正常使用電壓數倍。故突波電壓下的絕緣性質，對於電工絕緣材料來說，是相當重要的。

(1.2) 低頻高壓試驗變壓器

此種變壓器，爲高壓試驗設備中的主要部份。由於過去關於高壓方面的研究，以及一些變壓器的損壞與使用經驗的累積，提高了高壓變壓器方面的設計理論與製造技術：知道了如何使電位梯度均勻分佈，如何在油中消滅電暈，如何阻止表面的爬電，以及如何使端部線圈能抵抗突波的襲擊等等。早先設計的變壓器是使高壓線圈的中心點接地。這樣在使用時，高壓線圈的兩個出線頭 a 、 b (圖 1.1) 對地來說，有相等的電壓；因之對於油箱及鐵心等說，出線頭僅需要相當於變壓器額定電壓的一半的絕緣能力。用這樣設計的變壓器爲試驗電源時，必須使試品完全與地絕緣，需要另外一套使試品絕緣的設備。這種接線方法，與高壓電器在實用時的情形不相符合，故目前已不用這樣的變壓器。現在，在高壓試驗中，試驗品的一端，都是接地的，因之試驗變壓器的一端也應該接地；故變壓器高壓線圈的另一端，就需要有相當於試驗電壓的絕

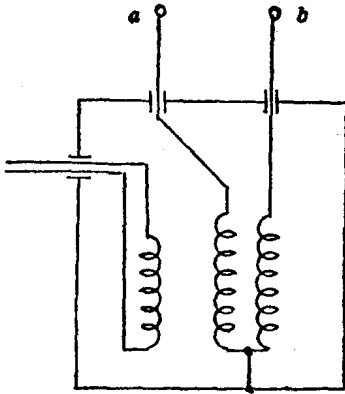


圖 1.1 試驗變壓器，次級線圈中點接地

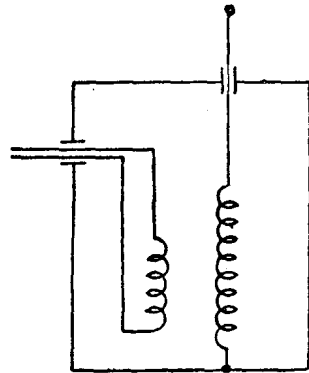


圖 1.2 試驗變壓器，次級線圈一端接地

線力量(圖 1.2)。在過去幾十年中，這種一端的絕緣電壓，隨着製造技術的進步，一步一步地加高。現在，在某些國家，一只單獨變壓器的電壓，已可達一百萬伏，其容量可到 1000 千伏安。但變壓器的製造費用與維持費用，約言之，是與電壓的三次乘方成比例的，即電源電壓增加一倍，則費用要增加八倍；故電壓太高了，製成一隻單獨的變壓器，就費用來說，是不合算的。目前單隻變壓器的最高電壓，在實例中僅約為 50 萬伏。

我國在解放後，對於高壓試驗變壓器，已開始自行製造，據華東工業部上海電機廠的報導，每隻變壓器的電壓，已可達到 10 萬伏。下面畧述上海電機廠出品高壓試驗變壓器的構造要點：

變壓器的變壓線圈，採用費歇爾式的絕緣，一端接地。各層線圈繞成同心圓筒，層間絕緣因電壓漸低而漸次低減，並使層與層間的電容量儘量保持相同；因之當突波加於高壓端時，不致因電壓分佈不均勻，而使絕緣遭受損壞。為了使線圈的真空處理有完美的效果，層間均有

油槽，使空氣不致停留於層間以增加線圈的絕緣能力，並消滅電暈現象。

在此變壓器中，尚有數處有消滅電暈現象的設備：(1)高壓線圈，(2)高壓線頭，(3)高壓接線。高壓線圈的內層及外層，用內外電屏蔽各一隻，使可能來自外方的突波電壓，分佈均勻；並在外電屏的兩邊，加半導體的滅暈材料，使線圈上電位梯度最高的地方能避免放電。同心線層間，均有絕緣紙及槽。二者配合適當，使不致因油槽過小，將電壓大部集中在油槽下部的薄層上而致發生電暈。高壓出線頭至瓷瓶下端，須包紮充份的絕緣帶及紙。引線的直徑要大，使其表面的電位梯度減少。在瓷瓶導桿下端裝有銅球，以減少電暈及電橋放電。導桿上端裝有滅暈罩。高壓接線，均用紫銅管。在線上，要避免能產生過高的電位梯度的銳角、毛頭，及半徑甚小的圓角等。此變壓器之電壓，主要地是受了絕緣出線套絕緣能力的限制。假使能將出線套的絕緣電壓提高，則變壓器的電壓，還可能要高些。

(1.3) 變壓器的累接

當試驗電壓過高時，若製成單獨變壓器來供給電源，則設備費太貴；故高壓低頻電源中，多採用累接線路，即將電壓較低的幾個變壓器累接，以得到所需要的試驗電壓。這種辦法，可使單隻變壓器的出線電壓減低，減少設備及維持費用。同時尚有一個好處，即在某隻變壓器損壞後，不會損壞全體。未受損的變壓器，在其容許的容量內，尚可設法利用。下面介紹幾種累接線路。

圖 1.3 為高壓變壓器的一種累接線路。在此線路中，每隻變壓器的出線與變壓器鐵壳間的絕緣，為總電壓的三分之一。第二隻變壓器與第三隻鐵壳對地的絕緣電壓，各為總電壓的三分之一及三分之二。

爲了供給第二隻及第三隻變壓器的初級線圈，尚須加用數隻電壓變換率爲1:1的變壓器。這些變壓器的出線與壳間，以及壳與地間，均須有適當的絕緣能力。在這種線路中，因爲須多用幾隻供給第二隻及第三隻變壓器初級線圈的變壓器，以致費用太大，採用者不多。

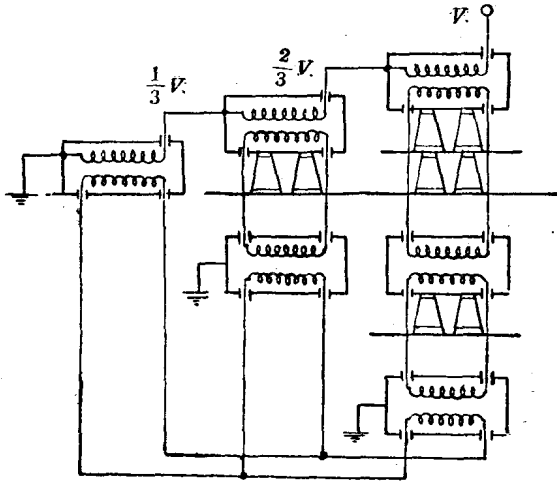


圖 1.3 高壓試驗變壓器累接法之一

圖 1.4 示另一種高壓變壓器的累接線路，這是應用較廣的一種線路。如圖第二隻變壓器及第三隻變壓器的初級電源，各由其前面一隻

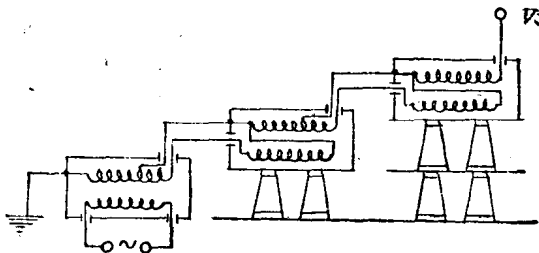


圖 1.4 高壓試驗變壓器累接法之二