

閃電計次器之研製

The Development of A Lightning-flash Counter

黃胤年* 陳盛文**

陳英***

Y. N. Huang, S. W. Chen and Anh Tran

ABSTRACT

The theory of lightning and the present status of the lightning-flash counters used in the world, together with their criteria, are briefly reviewed. Based on these, a lightning-flash counter is designed and produced to record the occurrence of the local cloud-to-cloud and cloud-to-ground discharges. This flash counter comprises of two parts: (1) a receiver connected to a 7-m vertical antenna and (2) a register which can record the rate of occurrence of the lightning flashes in two different ways, either by a mechanical counter or by a servo type d. c. voltage pen recorder. Preliminary results are presented to show the normal operation of this counter.

一、導述

雷雨(Thunderstorms)出現率之地理分佈對無線電工程師及電力工程師都是重要之數據。為了估計雷雨帶來之落地閃擊(Ground Stroke)對輸電線之可能災害，電力工程師希望知道雷雨在該輸電線地區產生落地閃擊之或然率(Probability)。無線電工程師則因為閃電(Lightning)會產生無線電雜訊(Radio Noise)而影響無線電通信之信號品質(Signal Quality)，故對雷雨之出現率及地球分佈發

生興趣。閃擊(Stroke of Lightning)可分為雷雨雲與地面間放電所產生之落地閃擊(Ground Stroke)及雲與雲間之放電所產生之雲際閃擊(Clouds Stroke)兩種。兩者均會產生無線電雜訊，故均為無線電工程師之研究對象。對輸電線之災害則只有落地閃擊會產生，故電力工程師之主要興趣集中於落地閃擊。

1960年代以前，雷雨出現日之世界分佈圖，係根據分設在世界各地之測候站(Meteorological Station)利用聽覺觀測(Aural Observation)法求得數據而繪得。用聽覺能聽到雷鳴之日子稱為雷雨

*交通部電信研究所研究策劃室主任，中央大學地球物理研究所兼任教授

**交通部電信研究所研究策劃室崙坪觀測台代理主任

***臺灣大學大氣科學系教授

日*(Thunderstorm Day)。一年中出現雷雨之總日數稱為 I. K. L. (Isokeraunic Level)。由此 I. K. L. 值可間接地推算落地閃擊次數 (Brooks, 1925)。鑑於此用途，I. K. L. 之繪製乃受學者們注意。Brooks 係第一位在 1925 年發表雷雨日之世界分佈圖。臺灣之雷雨觀測始於 1897 年。圖 1 為顏世雄及劉鏡生 (1972) 使用中央氣象局測候所數據繪製之臺灣島 I. K. L. 分佈圖。

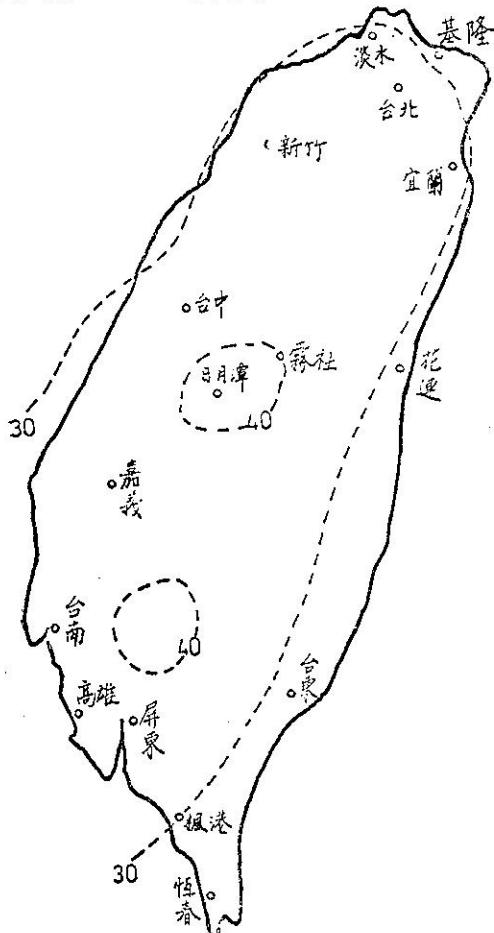


圖 1 臺灣之 I. K. L. 圖

雷雨日與無線電雜訊之間雖然有一些關係之存在，但因有下列缺點，未能被無線電工程師所接受。

- (1)雷雨日無法表示雷雨之日變化。
- (2)雷雨日無法表示雷雨強度 (Intensity of Activity) 及持續時間 (Duration)。
- (3)觀測員之個人特性及測候所環境會影響雷鳴之可聽度 (Audibility of Thunder)，故所得數據缺少客觀性。

(4)雷鳴之可聽距離太小，而測候所分佈又太稀少，因此容易造成雷雨日為世界上大部分地區之稀少現象。

雷雨日之觀測有上述缺點，故對無線電雜訊之研究並無多大幫助。因此必須改進觀測法，利用電子儀等自動記錄雷雨之發生及其活動性，才有助於斯項研究工作。本省至今尚未有人發展電子式閃電計次器 (Electronic Lightning-flash Counter) 以供閃電之觀測及研究。本文旨在發表作者們發展之閃電計次器。

二、閃電之分類及雷雨雲之構造

發生在空氣中長度達數公里之短暫大電流放電 (Transient High Current Discharge) 稱為閃電 (Lightning)。當大氣中之某些區域有電量之累積，因而由此電量所產生之電壓超出空氣之崩潰電壓 (Breakdown Voltage) 時，閃電即發生在該區域。積雨雲 (Cumulonimbus) 或稱雷雨雲 (Thunder Cloud)，為閃電之主要發生源。但是暴風雪 (Snowstorm) 暴風砂 (Sandstorm) 及暴發中之火山上之雲亦會產生閃電，甚至於無雲之晴空中偶而也會產生閃電。本文研究之主要對象為由積雨雲產生之閃電。此種閃電可分為下列四種：

- (一)雲中閃電：雲中放電 (Intracloud Discharge) 而引起之閃電稱之。
- (二)雲際閃電：雷雨雲間產生放電 (Cloud-to-cloud Discharge) 而引起之閃電稱之。
- (三)雲外放電：雲對環繞之空氣放電 (Air Discharge) 而引起之閃電稱之。

- (四)雲對地閃電：雲與地間放電 (Cloud-to-Ground Discharge or Ground Discharge) 而引起之閃電稱之。

圖 2 表示不同大小之雷雨雲。亞熱帶之雷雨雲較小，出現在較低高度，故其溫度均在 0 °C 以上。然而巨型雷雨雲之垂直高度則超出 20 公里高，其底部與頂部之溫度差甚大，頂部之溫度低於零下數十度。一般之雷雨雲高度約在 8~12 公里，以出現之地理地區而異，其積雨雲之何以能成為帶電之雷雨雲，迄今尚無可靠的學說，但一般咸認積雨雲中之水，冰及風在重力場及溫度斜率之影響下互相驟擾作用終於產生帶電區域而成為雷雨雲。在典型的雷雨雲中，其上頂帶正電，下底則帶負電，成為雙極子 (Electric

*本省氣象觀測以能聽到雷聲同時目測到降水的日子作為雷雨日

Dipole)，帶電部份之大小約有數公里半徑。圖 3 表示典型雷雨雲中電量之分佈情況。黑圓點表示有效點電荷 (Effective Point Charge) 之出現點。正電荷 P 及負電荷 N 各約有 40 庫倫 (Coulomb) 之電量。有時候在雷雨雲之基底部份會出現約有 10 庫倫之正電荷 p。

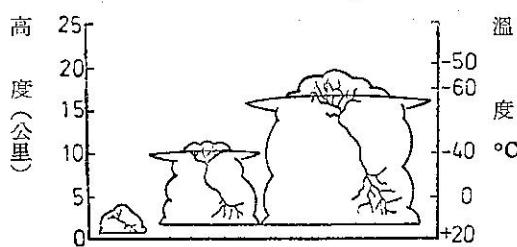


圖 2 不同大小之雷雨雲

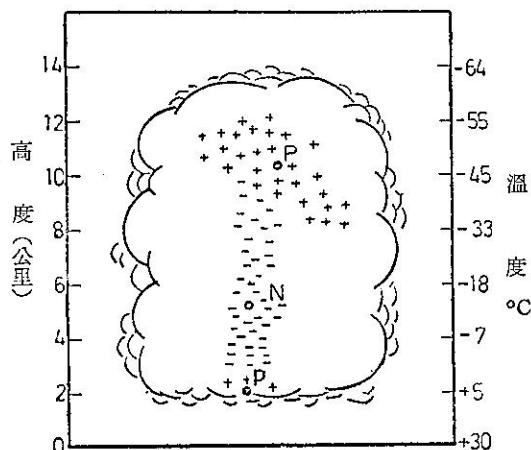


圖 3 典型雷雨雲中電荷之分佈情況

三、閃電之發生機構

雖然雷雨雲之放電並不全以落地閃擊之方式產生，但閃電機構之研究大部份限於雲對地之放電。雲對地之閃電係由一次以上之間歇性的主放電所組成。一次完整的雲地間全放電稱為閃電 (Lightning Flash)，平均由 3 至 4 次主放電所組成。閃電之發生機構相當複雜，根據 Schonland (1956) 之觀察及研究，閃電係先從雷雨雲向地面產生先軀放電 (Predischarge) 開出一條導電通路，然後於地面及雲間產生主放電 (Main discharge)。茲將發生程序概述如下。

當雷雨雲發達至某一程度時，其 N 區域之負電及雲底之 p 正電所產生之電場會到達大氣之崩潰電壓，使原來附着在冰粒及水粒上之電荷移動，以中和雲底之正電而使雲底帶負電。於此聚集在雲底之負電荷會產生強烈的電場，而從雲底向地面方向造出帶負電之導電柱 (Conductive Column) 並且沿此導電柱將負電荷朝地面方向輸送。其輸送速度約每秒 150 公里。送進導電柱之電量約有 5 庫侖，由此引起之電流約有 300 安培 (Ampere)。此導電柱向下發展至某一長度後即會用盡電量而暫告停止發展，以待從雷雨雲底部補充新的負電荷。為補充新電荷而必須休息之時間約有 50 微秒 (Microsecond)。此休息時間過後，導電柱即開始再次向地面放電而伸展。如此向降階梯樣子地，每隔約 50 微秒即重複充電，及向地面伸展兩動作，而終於在雷雨雲與地面之間開出一條帶電通路。每一階梯之導電柱長約 50 公尺，半徑約 1 至 10 公尺，向下伸展之速度約為每秒 150 公里，內含有約 5 庫侖之電荷，由其流動而產生之電流約有 300 安培。導電柱在休息以補充電荷之約 50 微秒時間裡並不發光，但充滿電量開始伸展次一階梯導電柱之約 1 微秒裡會發光。

階梯式導電柱在雲地間穿開導電通路之這一段動作，有人稱為先軀放電 (Predischarge)。先軀放電所需時間約為 1 毫秒 (Millisecond)。當導電柱到達地面時，雲地間即被導電柱連接成一個導電通路，雷雨雲底部之負電荷即在 70 微秒之短暫時間裡向地放電。此放電稱為主放電。

主放電之速度約為每秒 60000 公里，在前數微秒鐘內之電流有 1 萬至 2 萬安培之大，數十微秒後即減為一半，但數毫秒之後仍然有數百安培之電流。由於此強電流之流過，通路中之氣體將被加熱至 30000°K 之高溫而發出強光，此光即是打雷時之閃光，高溫之通路內之氣體會向外膨脹而產生震波 (Shock Wave)，此震波所產生之音波即是雷鳴 (Thunder)。

四、閃電之發生頻度

一閃電與次一閃電間之時間間隔有很大的變動性，故其時間間隔之統計分佈，可以說是一種隨機分佈 (Random Distribution)。然而，若是以每數分鐘平均其發生之時間間隔時，此平均值將以 20 分乃至 60 分之週期顯示增減現象。雷雨雲之閃電區域係散佈在半徑約 10 公里之範圍內，由若干個雷雨胞 (Thunderstorm Cell) 所組成。上述平均發生

間隔之消長與雷雨胞之消長有關，據國外觀測，平均消長時間約為 20 至 60 分，故一個雷雨胞之壽命約有 20 至 60 分。

根據國外觀測，所有閃電中只有約 10~30 % 之閃電之放電能到達地面而成爲落地閃擊 (Ground Stroke)。落地閃擊之主放電能沿同一導電通路重複放電多次。據國外觀測，落地閃擊約 30~70 % 係由 2 次主放電所構成；平均主放電次數為 4 次；最多者有 40 多次之記錄。兩次主放電間之時間間隔分散在 1 微秒至 1 秒，但以 20~50 微秒者佔多數。此數據對閃雷計次器之設計頗有關係，將於第五節再次述及。根據 Brooks (1925) 之報告，赤道上之夏天最容易發生閃電，尤其是墨西哥南部、巴拿馬、中央非洲及爪哇之發生頻度 (Rate of Occurrence) 為世界之冠。日變化則以地方時之 12 點至 17 點之發生頻率最大。

五、閃電之電磁輻射

如上節所述雲對地閃電之主放電會經由同一導電通路重複發生若干次。一次閃電通常係由 3 至 4 次主放電所組成。放電電流係從地面向上流，稱爲負電流。此電流之波形很複雜，但其基本形狀可用下式表示之 (Bruce and Golde, 1944)：

$$I = I_0 \{ \exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t) \} \quad (\text{Amp.}) \quad (1)$$

主放電向雷雨雲上升之速度則可用下式表示之：

$$v = v_0 \exp(-\gamma t) \quad (\text{m/sec}) \quad (2)$$

式中

$$\left. \begin{array}{l} I_0 = 20000 \quad (\text{Amp.}) \\ v_0 = 8 \times 10^7 \quad (\text{m/sec}) \\ \alpha = 4.4 \times 10^4 \quad (\text{sec}^{-1}) \\ \beta = 4.6 \times 10^5 \quad (\text{sec}^{-1}) \\ \gamma = 3 \times 10^4 \quad (\text{sec}^{-1}) \end{array} \right\} \quad (3)$$

此電流 I 會產生下式所示之電矩 (Electric Moment) M

$$M = \int I dl \quad (4)$$

式中 I 為(1)式所示之放電電流； dl 為電流之微分長度 (Differential Length) 與(2)式之 v 有下面之關係

$$dl = \frac{dl}{dt} dt = v dt$$

故得

$$M = \int I v dt \quad (5)$$

在完全導體之平面大地上，此電矩會產生如下式所示之電場：

$$E_r = -\frac{2}{10^7 d} \frac{dM}{dt} \quad (\text{V/m}) \quad (6)$$

$$E_i = -\frac{60 M}{d^2} \quad (\text{V/m}) \quad (7)$$

$$E_e = -\frac{1.8 \times 10^{10}}{d^3} \int M dt \quad (\text{V/m}) \quad (8)$$

式中 E_r ， E_i 及 E_e 各表示由主放電電流產生之輻射電場 (Radiation Field) 強度；感應電場 (Induction Field) 強度及靜電場 (Electrostatic Field) 強度； d 表示距雷雨雲之距離 (單位爲公尺)。若 d 甚大時，因 E_i 及 E_e 遠比 E_r 衰減得快，故僅考慮 E_r 即可。

由主放電所產生之輻射電場含有不同的頻率成份，其頻譜分佈 (Frequency Spectrum) $f(\omega)$ 可用下式將 $\frac{dM}{dt}$ 傅氏變換 (Fourier Transform) 而求得

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (-\frac{dM}{dt}) e^{-j\omega t} dt \quad (9)$$

據 Horner (1958) 之計算， $f(\omega)$ 可用下式表示：

$$f(\omega) = j I_0 V_0 \omega \times \frac{(\beta - \alpha)(\alpha + \beta + \gamma + 2j\omega)}{(\alpha + j\omega)(\beta + j\omega)(\alpha + \gamma + j\omega)(\beta + \gamma + j\omega)} \quad (10)$$

將(3)式之數據代入 (10) 式便能求得頻率波譜，其在 10 KHz 之大小爲

$$f(10 \text{ KHz}) = 14 \times 10^{16}$$

故對應之電場強度 $E(\omega)$ 為

$$\left. \begin{array}{l} E(\omega) = -\frac{2}{10^7 d} \times 14 \times 10^{16} \\ = \frac{2.8}{d} \quad (\text{V/m}) \end{array} \right\} \quad (11)$$

據 Horner (1958) 之計算，此輻射電場通過頻帶寬度 (Frequency Band Width) 為 B 之帶通濾波器 (Band Pass Filter) 後所得脈衝 (Pulse) 之最大幅度 e_m 為

$$e_m = 3.6 B E(\omega) \quad (12)$$

將(12)式代入(1)式即得

$$e_m = \frac{10 B}{d} \quad (\text{mv/m}) \quad (13)$$

式中 d 之單位爲公里， B 之單位爲赫 (Hz)。此公式爲設計閃雷計次器之主要依據。例如發生在 20 公里處之閃電會在頻帶寬度爲 28 KHz 之閃雷計次器附近產生 14 Volt/m 之電場。

閃電所產生電磁波之頻帶範圍甚寬，從超低頻 (Ultra Low Frequency) 至超高頻 (Ultra High Frequency) 均有其能量之存在，但大部分之能量

係集中在 100 KHz 以下之頻帶，尤其是 8 至 20 KHz 之頻帶中，其能量最大。傳播至遠距離之閃電電磁能對頻率之分佈情況則與電波傳播特性有密切的關係。

閃電計次器之主要目的為記錄發生在約 30 公里內之閃電次數，其原理為接收閃電所產生之電磁能，以推動計數器將其發生次數記錄下來。因閃電之主要電磁能係集中於特低頻 (Very Low Frequency) 而在此頻帶內之靜電場及感應電場對距離之衰減較快，故一般係採用特低頻做為觀測閃電用接收頻率。選擇特低頻為接收頻率之另一優點為能避免來自中波及短波廣播電台訊號之干擾。

六、閃電計次器應具備之條件

閃電計次器有甚多類型，例如 Forrest (1943), Davis (1946), Gane and Schonland (1948), Sullivan *et al.* (1954), Sullivan and Wells (1957), Ito *et al.* (1955), Pierce (1956), Horner (1960) 及 Barham (1965, 1967) 等學者分別提出不同類型之閃電計次器。然而現今世界各國最常用之類型不外乎下述兩種：

(1) CIGRE 型

此種閃電計次器係根據 Pierce (1956) 之建議，由英國電氣研究協會 (Electrical Research Association) 負責發展而成。本計次器已被 CIGRE (Conference International Grandes Reseaux Electriques) 之工作小組採納，現今約有 500 部此種計次器分設在各國以收集對電力線之落地閃擊數據。

(2) CCIR 型

此種閃電計次器係根據美國 Florida 大學之設計，由國際無線電諮詢委員會簡稱 CCIR (International Radio Consultative Committee) 之工作小組改進完成，現今有此種計次器約 50 部，分設各國以觀測與無線電雜訊 (Radio Noise) 有關之閃電數據。

閃電計次器係由接收閃電電磁波之接收機及計數脈衝次數用之計數器兩部份而組成。在設計閃電計次器時，必須考慮其接收機之頻率響應 (Frequency Response)，開端電壓 (Threshold Voltage)，時間常數 (Time Constant)、訊號極性 (Polarity)、接收天線及有效觀測界限 (Effective Range) 等特性。茲分別略述於下：

[A] 頻率響應

不同類型之閃電所產生之電磁波能量之頻率波譜及其對距離之衰減情況等均有所不同，故閃電計次器之接收機之頻率響應決定其對不同類型之閃電之接收能力及能接收之最長距離。如果閃電計次器之目的為接收雲對地閃電，則其頻率響應必須低於 10 KHz。CIGRE 型閃電計次器係應此目的而設計，其頻率響應之峯值出現在 900Hz, -3db 之頻帶寬度為 120 Hz 至 2 KHz。使用如此低之接收頻率係考慮接收閃電之靜電場。此電場之衰弱與距離之立方成反比，故能使閃電計次器僅觀測近距離之閃電，其有效觀測範圍之境界線亦較為清楚。

CCIR 型閃電計次器係專為研究閃電所產生之電磁波對無線電通信之影響而設計。因所有類型之閃電所產生之電磁波均會干擾無線電通訊，故 CCIR 型閃電計次器必須能觀測到所有類型之閃電。其所使用之接收機頻帶較高，頻率響應之峯值出現在 10 KHz, -3db 之頻帶寬度為 2 KHz 至 50 KHz。因使用較高頻率，故 CCIR 閃電計次器主要在觀測閃電之輻射電場 (Radiation Field)，此輻射電場與距離成反比地減弱，故其有效觀測範圍之境界線不如 CIGRE 型者清楚。

[B] 開端電壓

閃電計次器開始計數動作，所需要之接收機最低輸入脈衝電壓，稱為閃電計次器之開端電壓 (Threshold Voltage)。如果其他因素均相同時，一部閃電計次器之有效觀測界限，係決定於其開端電壓。故改變開端電壓可改變其有效觀測界限。為經常保持同樣的觀測界限，閃電計次器均備有校正電路，使開端電壓能經常保持定值。通常係利用電容器之充放電代替閃電所發生之電磁脈衝，以校正閃電計次器之開端電壓。

[C] 時間常數

每單位時間內發生之閃電次數稱為閃電之發生頻度 (Rate of Occurrence)。閃電計次器之時間常數，係決定每單位時間內能計次之最大次數 (Maximum Rate of Counting)。此最大次數若小於閃電之最大出現頻度時，一些閃電將未能被閃電計次器記錄，引起漏記現象。一些雲地間放電係沿着同一導電路徑重複放電若干次。對這種重複放電，閃電計數器必須避免重複計次，故其單位時間內能計測之最大次數亦不可以太大。茲舉若干數據以供決定時間常數之用。重複放電之間隔時間約

爲 3 毫秒至 100 毫秒，但大部分係分散在 20 至 50 毫秒之間。一次閃電之持續時間爲 0.2 秒，而閃電之最大發生頻度則甚少大於每秒四次。根據以上數據，將閃電計次器之時間常數定爲 $\frac{1}{2}$ 秒時大致可以避免多餘或遺漏等錯誤計測現象。CCIR 型閃電計次器之時間常數爲 $\frac{1}{2}$ 秒；CIGRE 型則稍長約有 1 秒。

[D]極性

不同之閃電會在閃電計次器之天線上產生不同極性之電場變化。閃電計次器究竟記錄那一極性全決定於其電路設計。因大部份之落地閃擊所產生之電場變化極性爲正，故 CIGRE 閃電計次器只計測正極性。CCIR 型閃電計次器則正負兩極性均予計測。

[E]天線

天線特性直接影響閃電計次器之感度 (Sensitivity) 及其頻率響應，故爲使設在不同地點之閃電計次器之計測結果能互相比較，其所使用之天線特性（包括天線至接收機之電纜）必須給予嚴格的規定。最重要的規格包括：有效高度 (Effective Height)，天線電容 (Antenna Capacitance) 及天線輸出端至接收機輸入端間之並聯電容（例如電纜之電容）等。

[F]有效觀測界限

以閃電計次器爲中心，在某一界限內實際發生之閃電次數與此閃電計次器所記錄之閃電次數相同時，此界限稱爲該閃電計次器之有效觀測界限 (Effective Range)。此界限與閃電種類及極性等有關。例如雲對地閃電之有效觀測界限不一定就是雲際閃電之有效觀測界限。故閃電計次器之有效

觀測界限必須註明對何種閃電求得之界限。

有效觀測界限之實際測定，係使用目測法，先求實際發生閃電之次數，距離及類型，然後與閃電計次器之輸出比較以定其界限。然而這種工作一般都在可視率很差的情況下進行。難免有相當大的誤差，故所得之有效觀測界限不容易使其誤差小到 10 % 以下。又任一閃電計次器雖然專爲記錄某一類型之閃電而設計，但這並不能保證它對其他類型之閃電完全不反應。故任一閃電計次器必須給予一修正因數 (Correction Factor) 使其計測次數能接近欲測類型之閃電次數。例如 CIGRE 型閃電計次器係專爲計測雲對地閃電而設計，其對雲際閃電之感度雖然比較差，但仍然有機會計測其部分之閃電，故必須給予一修正因數以減少因計測部份雲際閃電所帶來之誤差。

七、閃電計次器之研製

根據以上數節中有關閃電之諸特性，吾人可設計一種閃電計次器以計測閃電之次數。因閃電之主要電磁能量集中於 8 KHz，故本閃電計次器特將接收機之頻帶寬度選定在 3 KHz 至 30 KHz。將最低頻率選在 3 KHz 之主要原因在於使接收機能接收閃電之感應電場 (Induction Field)。因感應電場對距離之衰減甚爲迅速，故將接收機設計成能接收感應電場，則能獲得較爲明確的有效觀測界限。又爲使本閃電計次器亦能接收雲間閃電，特將最高頻率選定在 30-KHz。因每一閃電所產生電磁波波譜並不完全相同，故採用 3 KHz 至 30 KHz 之寬頻帶寬度時可以掩蓋所有可能之不同波譜，使閃電計次器能忠實地計測所有的閃電而不致於漏測。

圖 4 表示本閃電計次器之方塊圖。此閃電計次器

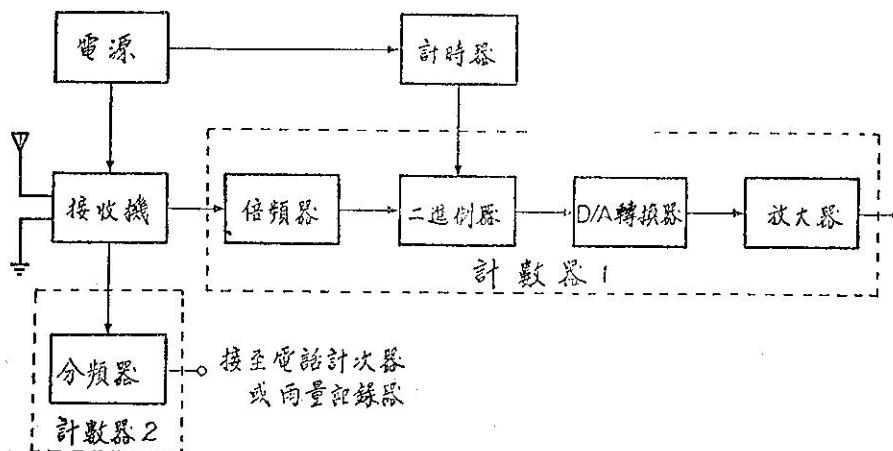


圖 4 閃電計次器方塊圖

主要由接收機及計數器兩部份組成。接收機之功用為使用高度為 7 公尺之垂直天線接收閃電所引起之電磁波脈衝，經檢波放大改為直流脈衝，以推動下一級之計數器。計數器之功用為接受接收機之輸出直流脈衝，以計測其發生次數。閃電次數之顯示採用兩種方式：一為利用二進制計數器 (Binary Counter) 計測脈衝次數，經類比轉換器 (Digital to Analog Converter)，轉換成直流電壓後用直流電壓筆記錄器 (DC Voltage Pen Recorder) 記錄其次數。為使本閃電計次器對任何狀況下之閃電發生頻度，均能圓滿地達成計次任務，特設有倍頻器 (Frequency Multiplier) 使筆記錄器之滿標 (Full Scale) 能顯示三種不同的數值，可任意挑選其中之一種。另一種輸出方式為利用接收機之直流脈衝輸出以推動繼電器，然後藉繼電器接點之關閉推動機械式計數器 (Mechanical Counter)，例如電話計次用計數器或記錄雨量所用的自記電接計數器等。因此種機械式計數器之反應速度較慢 (約 $\frac{1}{2}$ 秒)，故對發生頻度太快之閃電會有漏計現象。為避免此種誤差本計數器設有 $\frac{1}{2}$ 及 $\frac{1}{3}$ 之分頻器 (Frequency Divider)，以使每累積 2 次或 3 次閃電後才計測一次之特殊設備。圖中計時器 (Clock) 之主要功能為產生分信號，10 分信號或小時信號脈衝，使筆記錄器顯示出時刻標誌 (Time Mark)。茲將各部門之線路圖及動作原理概述如下：

[A] 接收機

圖 5 為接收機線路圖，閃電所發生之電磁波，自 7 公尺高垂直天線輸進接收機。為保護接收機，在天線輸出端特設有 300V 避雷器。C₁ 為同軸電纜之輸出電容。輸入端之電容 C₁、C₂ 及 C₃ 及電阻 R₁、R₂ 及 R₃ 構成帶通濾波器 (Band Pass Filter)，其實測 -3db 頻帶寬度為 3 KHz 至 30 KHz (後述)。通過濾波器之正向閃電信號經

由 T₁ 及 T₂ 放大及 D₁ 檢波後輸出至 T₅；負向閃電信號則經由 T₃ 及 T₄ 放大及 D₂ 檢波後同樣輸出至 T₅。兩者均以正脈衝輸出至 T₅。T₆ 及 T₇ 組成單邊穩定器 (Monostable Multivibrator)。T₅ 之基極 (Base) 接有 3 伏特之水銀電池。當經由 D₁ 或 D₂ 檢波後輸至 T₅ 基極之正脈衝電壓超過 3.3 或 3.6 Volt 時，T₅ 即導電以激發單邊穩定器 T₆ 及 T₇，使其保持 0.15 秒之導電狀態。此導電狀態將使 T₈ 導電以輸出正脈衝至下一級之計數器。

一次閃電之持續時間約為 0.01 秒至 2 秒，代表性之持續時間為 0.2 秒。為避免閃電計次器將一次閃電計為 2 次以上之閃電，必須設有適當電路，使計次器記錄一次閃電後有短暫的壓住時間 (Holdoff Time) 停止對其他任何脈衝發生作用。由 R₁₆ 及 C₇ 所構成之電路即是為此壓住作用而設。閃電脈衝來臨之前 T₅、T₆、T₇ 及 T₈ 均在斷路 (Cutoff) 狀態。此時 C₆ 經由 R₁₆ 充電，保持約為 9 Volt 電壓。C₇ 之一端經由反極性之 D₈ 接至 T₅ 之基極，故只要是來自 D₁ 或 D₂ 之閃電脈衝超出 3.6 伏特時，即能激勵單邊穩定器，將脈衝輸出至計數器。當閃電脈衝進入 T₅ 之基極時，T₅、T₆ 及 T₇ 即刻導電，儲蓄在 C₇ 之電量即由 R₂₂、D₅ 及 T₇ 放電使其兩端電壓降至約 0.9 伏特 (導電中 T₇ 之 V_{ce} 加 D₅ 之降壓)。約過 0.15 秒後單邊穩定器自動恢復原狀，使 T₈ 斷路完成一次計數。此時 T₅ 之基極電壓已降至 0.9 伏特，比射極之 3 伏特電壓低，故即使另有一閃電脈衝輸至 T₅ 之基極，其能量也頂多用以充電 C₇，其電壓增加不多，不致於激勵 T₅，T₅ 被保持在壓住狀態，對任何新來脈衝均不起作用。此狀態一直持續至 C₇ 經由 R₁₆ 再次充電至 3 伏特才解除，

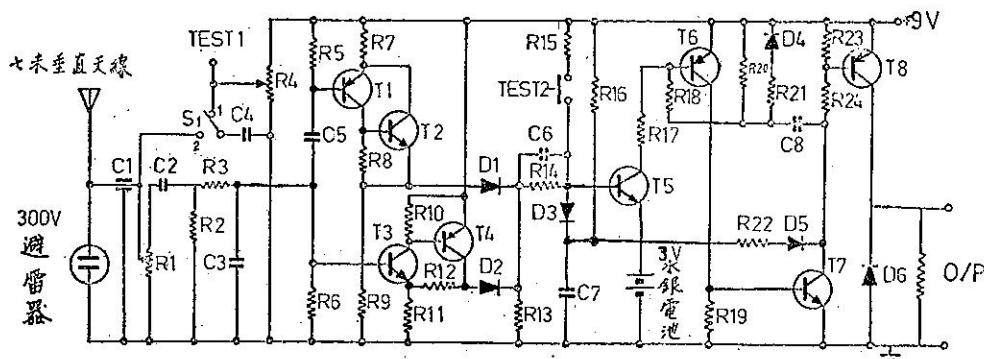


圖 5 接收機線路圖

使 T_5 能再次正常作用，接收新來之閃電脈衝。此壓住時間之長短決定於串聯 R_{16} 與 C_7 所得之間常數 τ 。壓住時間 (Holdoff time) T 與 τ 之間有如下關係：

$$T = \tau \ln \left(\frac{9-3}{9} \right) = 0.406\tau \text{ (秒)} \quad \dots \dots \dots (14)$$

壓住時間決定閃電計次器之時間常數，本閃電計次器之時間常數定為 0.5 秒，將此值代入 T 即得

$$\tau = 1.32 \text{ (秒)}$$

如圖 5 所示，選擇 $P_{16} = 220\text{K}\Omega$, $C_7 = 6\mu\text{F}$ 時可獲得此一時間常數。閃電計次器之時間常數可根據實際觀測數據，先明瞭閃電之出現頻度後，調整 C_7 之大小而更改。本閃電計次器之實測時間常數為 0.55 秒。

可變電阻 R_1 係用以改變計次器之開端電壓 (Threshold Voltage)。利用 C_4 之充放電可模擬閃電脈衝以校正開端電壓之大小。先將開關 S_1 置於接點 1；測試點 TEST1 接上直流電壓錶；調整可變電阻 R_4 使 TEST1 指示所需之開端電壓。若將開關 S 倒置於接點 2 時， C_4 內之電量即經由 R_1 放電，產生人為的閃電脈衝。此人為閃電脈衝電壓經 R_1 分壓後輸至 T_3 。此電壓能否起動 T_1 全視經 R_1 分壓之後之電壓是否足夠使 T_1 道電。

調整 R_1 使經其分壓後之電壓輸出剛好有足夠電壓起動 T_1 時，此閃電計次器即已調至所需之開端電壓。

開端電壓之大小，決定閃電計次器之有效觀測界限，故適當調整可變電阻 R_1 ，便能使閃電計次器獲得所需之有效觀測界限，其方法如下：設所需之有效觀測界限為 D 公里，音速 V 為每秒 0.34 公里，則可測之最遠閃電須經下式所示之時間 t 後才能聽到其雷鳴（Thunders）

發生在有效觀測界限內之其他閃電則以更短之時間內可以聽到雷鳴；相反地有效觀測界限外之閃電則必須經過更長之時間才能聽到其雷鳴。利用此性質；調節 R_1 ，使閃電計次器每記錄一次閃電後至聽到其雷鳴所經過之時間均小於或等於 t 時，此閃電計次器之有效觀測界限已調整至預先所定之大小。於此必須言明的是：用此法求得之有效觀測界限係指包括雲對地放電及雲際放電所產生之所有閃電在內。

測試點 TEST 2 係用以測試單邊穩壓器之正常工作，每短路一次， T_8 輸出一個方形波，以推動下一級之計數器。

圖 6 表示此閃電計次器之頻率響應 (Fre-

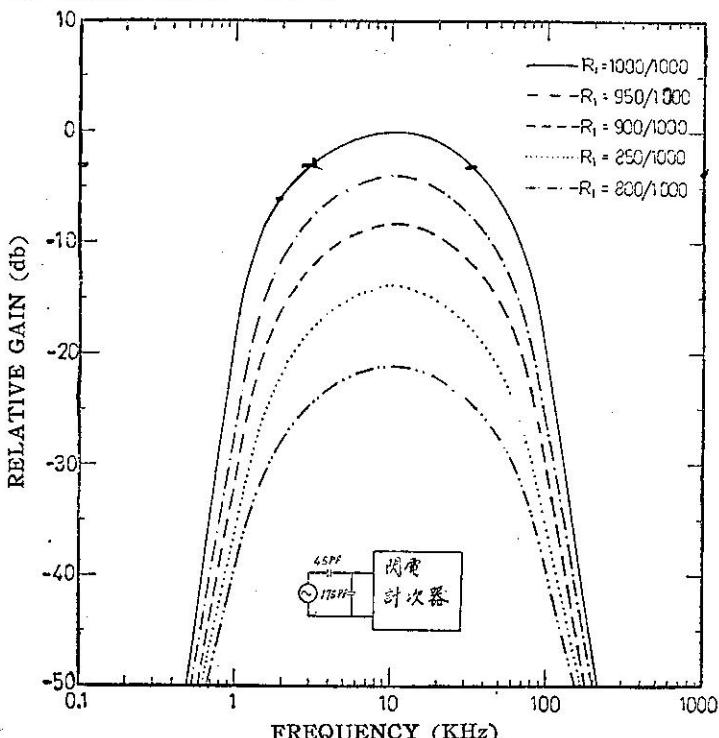


圖 6 接收機頻率響應特性

quency Response), 係利用信號產生器 (Signal Generator) 將不同的頻率經等值天線電容 (45pf) 及電纜電容 (175pf) 輸入接收機，在 D_1 及 D_2 之輸出點測其輸出電壓，然後計算其增益繪得此曲線。不同曲線表示調整 R_1 在不同之分壓下求得之曲線。由此頻率響應曲線可知：

- (i) 變更 R_1 之分壓比例時，頻率響應曲線之形狀並無顯著變化。
- (ii) 頻率響應之最大值出現在 10 KHz。其 -3db 之頻帶寬度為 3 KHz 至 30 KHz，合乎原設計要求。

圖 7 表示可變電阻 R_1 之分壓比與閃電計次器開端電壓間之關係。

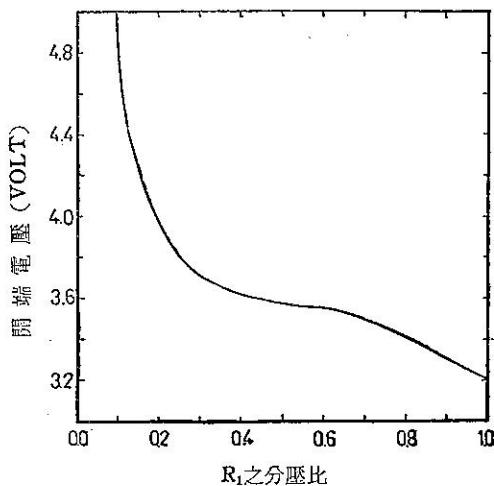


圖 7 R_1 之分壓比與開端電壓之關係

[B] 分頻器

接收機之輸出脈衝可接至兩種不同之計數器，計數其脈衝次數。其中一種係利用輸出脈衝起動繼電器，藉繼電器接點之關閉作用推動電話計次用計數器及自記電接計數器。每一脈衝之輸進會使自記電接計數器之筆針向上移動一格，其滿標為 100 格。筆針滿標後會自動降回原點，從零點開始再次往上計次。此種計數器利用繼電器動作，故其反應速度較慢，如果閃電頻度太快時，可能會漏記其中一部份之閃電次數。為彌補此一缺點，本計數器特設有分頻器，將脈衝頻度變換為 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{1}{3}$ ，使計數器有充裕的時間準確的記錄高頻度之閃電次數。圖 8 表示此分頻器之線路圖，係由三個 SN 7473 正反器 (Flip-Flop) 所組成。由輸出選鈕 S_2 可以任意選出經過 1, $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{1}{3}$ 分頻之脈衝輸出。簡言之，將選鈕置於 1 時，每一脈衝之輸入會產生一脈衝之輸出；但是將選鈕置於 $\frac{1}{2}$ 時，每二次脈衝才有一次脈衝之輸出；置於 $\frac{1}{3}$ 時，每三次輸入才有一次的輸出。分頻器之每一輸出脈衝，即刻使 T_9 導電以關閉繼電器接點。繼電器之二接點分別接至電話計次器及自記電接計數器以使兩者各記一次。經此分頻器計數時，計數器之讀值必須按選扭 S_2 之接點位置為 1, $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{1}{3}$ 分別乘以 1, 2 或 3。

[C] 倍頻器

接收機輸出脈衝之另一種計數方式係利用二進制計數器 (Binary Counter) 計測脈衝次數後，經

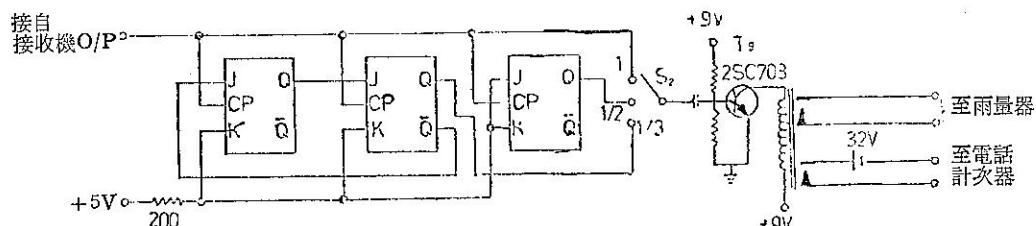


圖 8 分頻器

由類比轉換器 (Digital to Analog Converter) 將二進制數轉換成與其成正比之直流電壓，然後使用直流電壓筆記錄器記錄其計測之次數。本記錄方式之優點為可以獲得分解度 (Resolution) 較高之記錄，故能適用於高出現頻度地區。本記錄方式係由二進制計數器及 D/A 轉換器兩部份組成。

為提高記錄之分解度，在二進制計數器之前段特設有倍頻器，使筆記錄器之滿標能記錄 10 次，

20 次或 30 次等三種不同之數值，任使用者按實際需要選其中之一。茲先述倍頻器，二進制計數器及 D/A 轉換器則分別敘述於 [D] 及 [E]。

圖 9 表示此倍頻器之線路圖，係由 5 個單邊穩定器 (Monostable Multivibrator) 及若干個或閘 (OR Gate) 所組成。其功用為對每一輸入脈衝。自動產生一個、二個或三個脈衝。開關 S_3 之位置 (1, 2 或 3) 決定輸出脈衝之個數。本倍

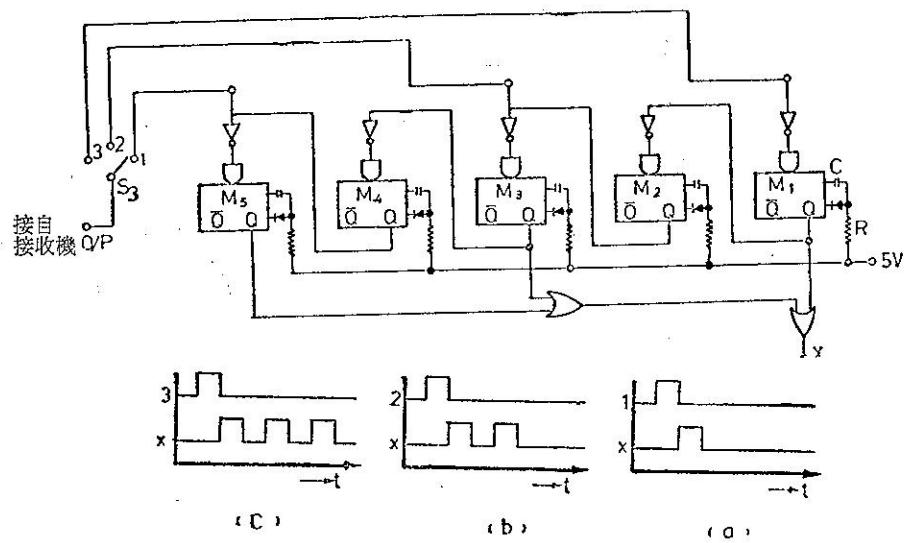


圖 9 倍 頻 器

頻器係採用 SN 74123 積體電路中兩個特製單邊穩定器而組成。茲先說明此特殊單邊穩定器之功能。圖 10 表 SN 74123 中兩個單邊穩定器中之一個。第 9 及第 5 腳各為輸入及輸出端。本單邊穩定器之特徵為：輸入端之脈衝從高位 (High) 轉移至低位 (Low) 時，(本文中將稱為脈衝負端) 會

受到激勵而在輸出端輸出正脈衝。輸出脈衝之寬度則決定於第 6 及第 7 脚之 RC 電路。此脈衝寬度 t_w 可用下式求得

式中 t_w , R 及 C 之單位各為 10^{-12} 秒 (ns), $K\Omega$ 及 10^{-12} 法 (PF)。圖 10 下方表示輸入脈衝與輸出脈衝之關係。本倍頻器中作者選擇

$$R = 10 \text{ k}\Omega$$

$$C = 2 \mu F$$

而獲得脈衝寬度為 6 毫秒，因寬度比起閃電之發生間隔甚小，故即使倍頻後亦不致於影響觀測之準確性。

倍頻器之動作原理如下：圖 9 中 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 及 M_5 各表示 SN74123 中之 1 個單邊穩定器，假設開關 S_3 在接點 1，則來自接收機之脈衝負端 (Negative Edge) 將激勵 M_5 而使其產生寬度為 6 毫秒之脈衝，經兩個或閘在 X 端輸出。圖 9(a) 表示輸入脈衝與輸出脈衝之關係，每一輸入脈衝僅能產生一個輸出脈衝，脈衝頻率並無變化。然而，將開關 S_3 接至接點 2 時，來自接收機之脈衝負端即激勵 M_3 ，產生 6 毫秒之脈衝經由或閘輸出在 X 端。 M_3 之輸出端係接至 M_4 之輸入端，故經 6 毫秒後， M_3 產生之脈衝負端即激勵 M_4 ， M_4 之輸出端未接至或閘故此 6 毫秒中 X 端並無輸出，但再過 6 毫秒後 M_4 產生之脈衝負端即能激勵 M_5 而使其產生 6 毫秒脈衝經由或閘輸出在 X 端。圖 9(b) 表示輸入脈衝與輸出脈

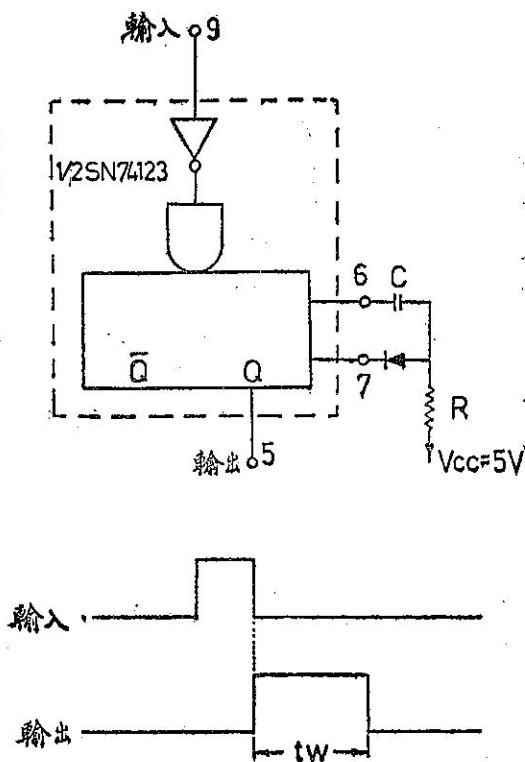


圖 10 SN 74123 中之單邊穩定器

衡之關係，每一脈衝之輸入會引發兩個脈衝之輸出，故其頻率增為二倍。同理將開關 S_3 接點 3 便能獲得三個脈衝之輸出，圖 9(c) 表示其輸入及輸出脈衝間關係。

[D]二進制計數器

輸自接收機之閃電脈衝數，經倍頻器乘以 1 倍，兩倍或三倍後，即送入二進制計數器 (Binary Counter) 計數其脈衝數。如圖 11 之線路圖所示

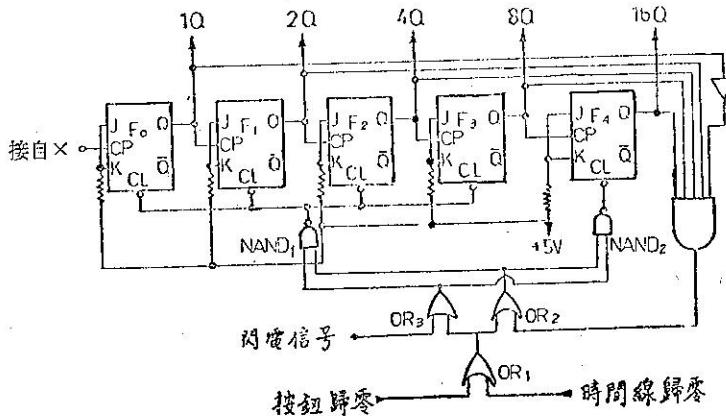


圖 11 二進制計數器

4Q, 8Q 及 16Q 線 (Q 為 0 或 1)，其相當之十進位數為：

$$1Q + 2Q + 4Q + 8Q + 16Q$$

為使後述筆記錄器之滿標值能等於 10 之整數倍（即 10, 20 或 30），本計數器設有特殊線路，使計數器計數到 31 時才從 30（即 11110）變為 1（即 00001），茲將其動作原理敘述於下。

F_1 、 F_2 、 F_3 及 F_4 之 Q 輸出線皆直接接至及閘，只有 F_0 之 Q 輸出線經由反向器 (Inverter) 接至及閘。因此，當計數器計數至 30（即 11110）時及閘之輸入為 11111，故其輸出為 1，能使或閘 OR_2 產生 1 而輸出至反及閘， $NAND_1$ 及 $NAND_2$ ；但此時之反及閘之另一輸入線為 0，故不致於清除正反器使其歸零（即 00000），必須等待另一脈衝經由或閘 OR_3 輸出 1 至兩個反及閘

，本計數器係由 5 個 JK 正反器 (JK Flip-Flop)，1 個及閘，二個反及閘及三個或閘所組成之五單元 (Bite) 二進制計數器。正反器 F_0 、 F_1 、 F_2 及 F_3 係使用 SN 7493； F_4 則使用 SN 7473，兩者均由脈衝負端引起反位作用。圖中 CP 表示計脈衝 (Clock Pulse) 輸入線；CL 表示清除線 (Clear Line)。倍頻器之輸出脈衝係接至 F_0 之 CP 線，計數後之二進制數則顯示在 1Q, 2Q,

之另一輸入線時，清除線才起作用使計數器歸零，接著再由此脈衝之負端使 F_0 計數 1。此為計數器計數到 31 時自動從 30 變為 1 之道理。如果接收機之閃電脈衝經過三倍頻後輸進本計數器時，因輸進計數器之脈衝數為接收機實際接收到之閃電次數之 3 倍，故筆記錄器滿標所表示之實際閃電次數為 10；同理經 2 倍頻後輸進本計數器時，筆記錄器之滿標等於 20 次閃電；經 1 倍頻後輸進則等於 30 次閃電。

為使筆記錄器能出現時間線，本計數器增設或閘 OR_1 ，將來自計時器之時刻脈衝輸進或閘 OR_1 便能清除正反器使讀值歸零，因而在筆記錄器上繪出時刻線。或閘 OR_1 之另一輸入線則接一按鈕，掀此按鈕亦能使正反器歸零而繪出一條線。

[E]類比轉換器

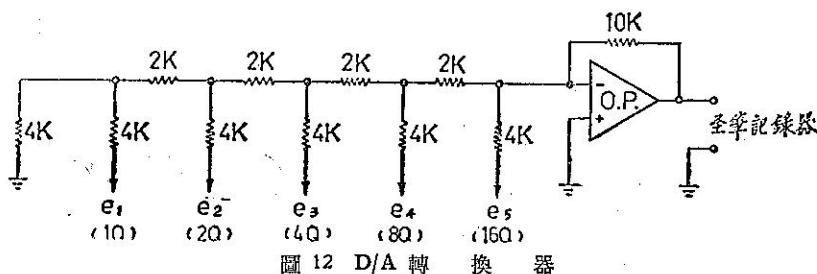


圖 12 D/A 轉換器

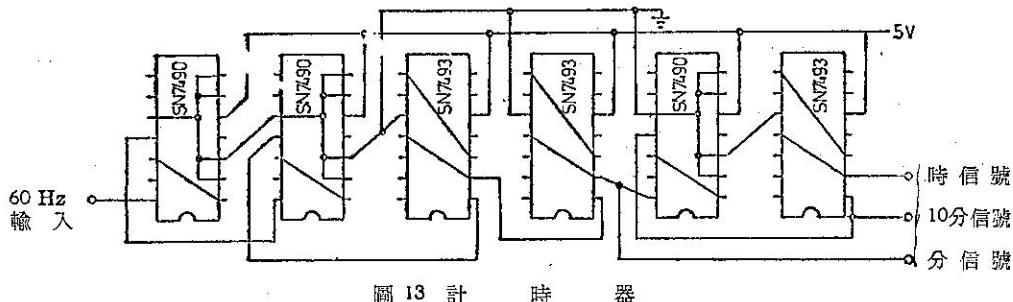


圖 13 計時器

二進制計數器之二進位數必須經類比轉換器 (Digital to Analog Counter) 轉換成與其數目大小成正比之直流電壓才能推動筆記錄器 (Pen Recorder)。圖 12 表示此類比轉換器之線路圖。其原理為利用電阻之梯形網路將二進制數變成類比電壓，經運算放大器 (Operational Amplifier) SN 72747 放大後輸進筆記錄器。設運算放大器之放大增益為常數；輸出端電壓為 e_0 ；五常元二進制計數器之輸出線 $1Q, 2Q, 4Q, 8Q$ 及 $16Q$ 之輸出 (1 或 0) 為 e_1, e_2, e_3, e_4 及 e_5 。則下式關係能成立：

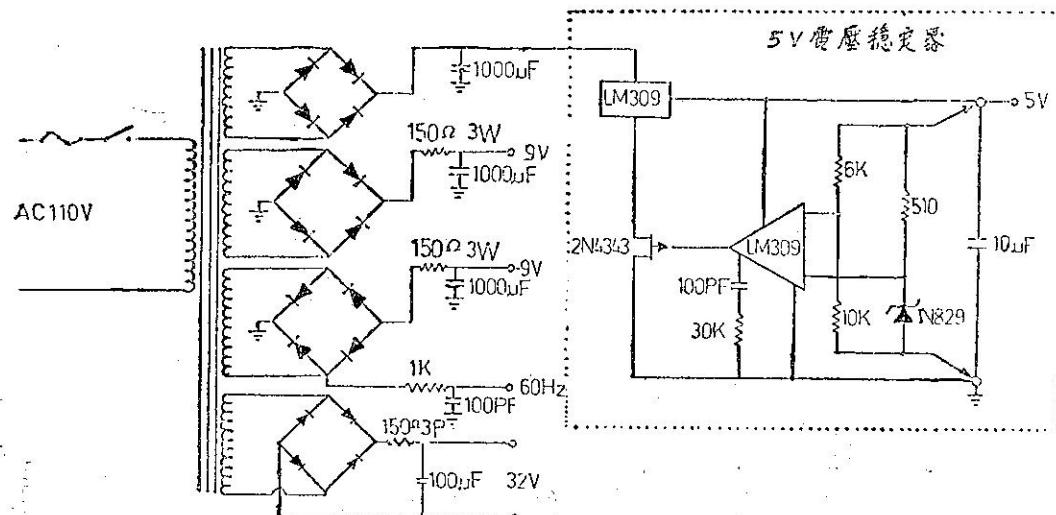
V_R 為輸出邏輯 1 時之電壓。由(7)式得知運算放大器之輸出電壓與二進制數成正比，故有類比轉換作用。

(ii) 式係假設輸出沒有負載之下求得之公式，故為獲得準確之 D/A 轉換器，接在輸出端之直流電壓筆記錄器之輸入阻抗 (Input Impedance) 必須甚大 (1 至 2 M Ω)。

將〔D〕中敍述之五單元二進制計數器之輸出接入此 D/A 轉換器，則閃電脈衝信號將呈階梯狀地記錄在筆記錄器之記錄紙上，容易判讀又可增加閃電次數及記錄時間之分解度（Resolution）。

[E]計時器

圖 13 所示為計時器之線路圖，由6組 JK 正反器組成，其功能為產生分信號，10分信號及小時信號脈衝，將此等信號輸進二進制計數器 OR₃ 或閘，使正反器歸零以使記錄器恢復零的狀態而記下時刻線 (Time Mark)。本器利用電源 60Hz 當做計時之標準信號源。先以二個 SN 7490 JK 正反器各除以 10，再以另二個 SN 7493 各除以 6，取得分信號，然後分別再以一個 SN 7490 及一個 SN 7493 各除以 10 及 6 而得 10 分及小時信號。



14 雷 源

[G]電 源

圖 14 表示電源線路圖。本電源係利用商用 110 伏特交流電源經變壓，整流、濾波及電壓穩定後取得供給 (a) 接收機用之 9 伏特直流電源；(b) 運算放大器用之 9 伏特直流電源；(c) 各積體電路用

之 5 伏特電源及 (d) 激勵電話計次器及自計電接計數器用繼電器所需 32 伏特直流電源。同時將 60 Hz 交流電源信號經 1000Ω 電阻及 100 PF 電容構成之積分電路取出 60 Hz 信號做為計時器之信號源。

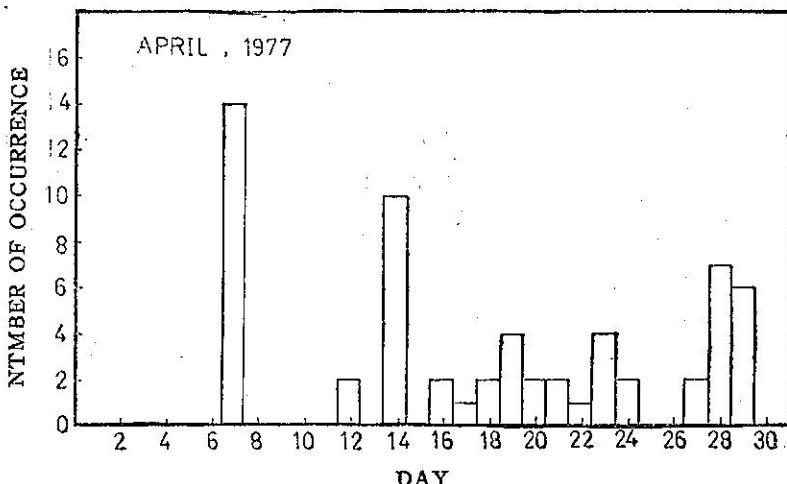


圖 15 發生在 1977 年 4 月之閃電次數

八、結 語

本文目的在設計一可在臺灣地區使用的閃電計次器。此計次器主要由接收機及計數器兩部份構成。接收機之前連接一 7 公尺長之垂直天線。當閃電產生時，接收到的信號不論極性為何皆先經一帶通濾波器，然後再放大及檢波變為一直流脈衝。若此脈衝大於某一預定之電壓，便可激發一單邊穩定器在導電狀態，使此脈衝輸入下一級之計數器。接收機的帶寬定於 3 KHz 至 30 KHz 之間，目的在接收雲對地和雲際兩種閃電，同時避免受到中波及短波通信之影響。

當接收機輸出的脈衝輸入計數器後，可以記錄閃電發生的頻度。記錄的方法有兩種。第一種是利用此直流脈衝起動一繼電器，並經此繼電器之開關作用推動一機械式計數器，如電話計次器或記錄雨量所使用的自記電接計數器。由於此類計數器反應較慢，為免遺漏，特在接收機與計數器之間加一分頻器，使每接收一次，二次或三次閃電時記錄一次。另一種記錄法是利用二進制計數器計測接收到的脈衝次數，然後經一類比轉換器轉變成一與脈衝次數成正比的直流電壓，再使用直流電壓筆記錄器記錄下所測得的次數。為了更進一步提高此計數器之分解度，另在計數器與接收機之間加入一倍頻器，使筆記錄器可記錄滿標為 10-

次，20 次或 30 次之閃電。此外尚有一計時器連接二進制計數器，以作為時刻標誌之用。

上述之閃電計次器於設計及製造完成後分別裝置於交通部電信研究所崙坪觀測台（中壢）及臺大大氣科學系觀測場（臺北）以試測其接收效果。圖 15 係 1977 年 4 月在崙坪觀測台所測得的閃電發生頻度。在七日及十四日，閃電發生的次數最多而且至少十次。氣象局新竹測候所及空軍桃園氣象中心的資料皆顯示在七日有雷雨，十七日則惟獨後者有記錄。表一所列係在較大雷雨時所測得的閃電發生頻度。至於本計

表 1. 較大雷雨時閃電計次器所測得的次數

日 期	閃電發生頻度(次)	測 站
1977-5-20	162	臺 大
1977-5-21	262	臺 大
1977-5-31	145	臺 崙 大
1977-6- 2	87	臺 崙 大
1977-6-14	442	臺 大
1977-6-15	412	臺 大
1977-6-23	124	臺 大

次器所能測得的最遠距離，利用聽覺方法所得結果為 17 公里，亦即接收到閃電的信號 49 後秒才聽到雷

聲。

由上面初步測試結果可知此閃電計次器的接收效果良好。因計次器為電子自動裝置，對閃電資料的蒐集較客觀準確，製造簡單，維護容易，而且氣象工作人員，電訊工程師，電力工程師及大氣電學研究者對所測得的資料皆可加以利用，因此頗值得廣泛應用。

誌謝：本文係在國科會66年度研究計劃 NSC-66M-0202-01 (06) 補助下完成

參考文獻

Braham, R. A. (1967): The transistorized total-lightning-flash counter, Electronics Letters, 3, p. 225.

Braham, R. A. (1965): Transistorized lightning flash counter, Electronics Letters, 1, p. 173.

Brookes, C. E. P. (1925): Distribution of thunderstorms over the globe, Meteorological Office Geophysical Memoirs and Professional Notes, No. 24.

Bruce G. E. R. and Golde, R. H. (1941): The Lightning Discharges, Jour. I. E. E., 88, Part 2, p. 487.

Davis, R. (1946): High voltage research at the National Physical Laboratory, Journal I. E. E., 93, Part 1, p. 177.

Forrest, J. S. (1943): The determination of the location and frequency of thunderstorms by a radio method, Quar. Jour. Roy. Meteor. Soc., 69, p. 33.

Gane, P. G. and Schonland, B. F. J. (1948) The ceraunometer, Weather, 3, p. 174.

Horner, F. (1960): The design and use of instruments for counting local lightning flashes, Proc. I. E. E., 107 p. 321.

Horner, F. (1958): The relationship between atmospheric radio noise and lightning phenomena, Jour. Atmos. Terr. Phys., 13, p. 140.

Ito, K., Kato, T. and Iwai, A. (1955): Local lightning flash counter within 20 km, Proc. Res. Inst. Atmos., Nagoya Univ., 3, p. 69.

Pierce, E. T. (1956): Field changes and lightning flash counters, Archiv fur Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, 9, p. 78.

Schonland, B. F. J. (1956): The lightning discharge, Vol. 22, "Gas Discharges, II" in "Encyclopedia of Physics, Springer Verlag, Berlin.

Sullivan, A. W., Well, J. D. and Dinger, H. E. (1954): Radio receiver counts lightning strokes, Electronics, October, 27, p. 158.

Sullivan, A. W. and Wells, J. D. (1957): A lightning stroke counter, Bull. Amer. Meteor. Soc., 38, p. 291.

顏世雄、劉鏡生 (1972) 臺灣的雷分佈，電工季刊三月份，p. 53。

作者通訊處：

黃胤年，陳盛文：中壢郵政信箱 71 號

陳英：臺北市國立臺灣大學大氣科學系

保密防諜 ·

人人有責 ·

匪諜自首 ·

既往不究 ·