

電氣比擬法在水利工程上之應用

Method and Application of Electrical Analogy in Hydraulic Engineering

臺灣大學農工系副教授

曹 以 松

Yii-soong Tsao

一、概 論

電氣比擬法 (Electrical Analogy Method) 實亦為模型試驗之一種。模型試驗廣義而言之可分為三類：即(1)幾何相似模型 (Geometrically Similar Models)，(2)變比例模型 (Distorted Scale Models)，(3)不類模型 (Dissimilar Models)。幾何相似模型為最早使用之模型，亦為至今使用最普遍之模型。此種模型最為簡單，其各部之尺寸均依原型 (Prototype) 之相當部分以同一比例縮小或放大而成，故通常在情形許可時應儘量採用此種模型以期可得較精確之結果。但當經濟，實驗場所之空位或實驗裝備有限制時或採用幾何相似之模型將改變現象之性質時，則往往須採取變比例之模型。變比例之形成有多種方法，如以水工模型而言，則約有四種方法：其一為水平方向與垂直方向採用不同之比例尺，其二為變更流量之比例，其三為變更糙率，其四為將模型傾斜以增加其坡度。有一於此即為變比例模型。變比例模型常用於河道或港口之模型，因在此種情形下如採用單一之比例尺則水深往往過淺，因而粘滯力與毛細管影響殊為巨大，導致水流情況與原型中不同，採用變比例模型可避免此項缺點同時往往較為經濟。但變比例模型不能同時適應摩擦力與重力，流速之大小與分配亦往往與原型不同。故使用此種模型時甚易引致謬誤之結論，必須十分審慎判斷始可得出較可靠之結果。不類模型之模型與原模在外表上截然不同，毫無相似之處。然而甚多複雜之工程問題往往可藉此得出正確之答案。而其準確性却凌駕幾何相似模型與變比例模型之上。例如，某一機構上之軸上扭轉應力可從一有適當形狀之肥皂膜上所作之測量而得出，另一機械之振動 (Vibration) 又可自一特殊設計之電路中得出。此種肥皂膜或電路即為不類模型。不類模型與原型之間祇需其基本方程式型式相同而無關外型之相似與否。故電氣現象，流體流動，熱之傳導，機械

振動，結構應力等，雖性質之相差極為懸殊，均能互為模型與原型。不類模型之種類可以其基本方程式之性質而分。亦可以模型之性質而分。後者如電氣比擬法 (Electrical Analogy) 薄膜比擬法 (Membrane Analogy) 沙堆比擬法 (Sand-heap Analogy) 擴散比擬法 (Diffusion Analogy) 等是。其中以電氣比擬法之使用最為普遍，亦最有發展之希望，原因(1)為電氣之各項性質如電流電壓電阻電容等之測量儀器最為準確進步。(2)與各種紀錄儀器以至自動控制設備之連接最為便捷。(3)適用之範圍最廣。故在水利工程中亦以電氣比擬法之用途最廣，將來之發展更不可限量。

二、電氣比擬法及其基本原理

在電學創立之初，往往以水力學之原理解釋電學，如以水頭說明電壓，以水流之流量說明電流，以水頭之損失說明電壓降等，嗣後電學之進步一日千里，而流體力學之進展較為遜色。故晚近之趨勢往往以電學以說明流體力學，以電氣模型以推測流體現象情勢大不相同矣。

根據 Buckingham 氏之定理，一現象或一系統可以下列方程式：

$$\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_n) \quad (1)$$

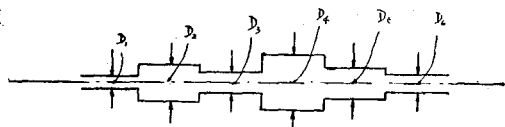
表示之，而另一現象或系統則可以

$$\pi_1' = F(\pi_2', \pi_3', \pi_4', \dots, \pi_n') \quad (2)$$

表示之。在幾何相似模型或變比例模型中，祇須二者之性質相似，所含之函數相同，如為同為銳緣孔口之洩水，則後者即可用作前者之模型，自後者測量所得之結果即可用於推測前者之相當各項，而不必深究其所含函數之性質。故設計此種模型時，祇須使模型中之各個 π 值與原型中之相當 π 值相當即可，亦即 $\pi_1 = \pi_1'$ ，由此關係即可求得所需之結果。

但在不類模型時則因模型與原型往往為二種截然不同之現象，故必須使其二者函數性質相同，亦即二

者之基本方程式需有相同之型式，茲舉一例說明之，在圖一中為六個管徑不同水管串聯時之情形。因管中之水流為連續流，故當管中水流之流量為 Q 時，則



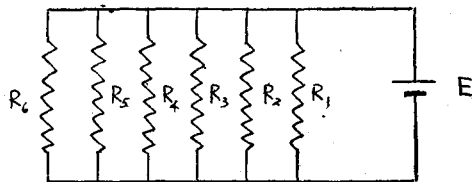
圖一 串聯之不同直徑水管

$$V_i = \frac{Q}{A_i} \quad (3)$$

中 V_i 為 i 管中之流速 $i=1, 2, 3 \dots 6$

A_i 為 i 管之斷面積 $i=1, 2, 3 \dots 6$

(3)式表示出各重要變數間之關係，此式即稱為特性方程式 (Characteristic Equation)，現如欲找出此一現象之不類模型則該模型必須亦有與(3)式形式相同之特性方程式，在電學上吾人可發現歐姆定律 (Ohm's Law) 之形式與(3)式相同即：



圖二 並聯電阻之電路

$$I = E/R \quad (4)$$

推衍之即得圖二之直流電路，六電阻成爲並聯，此時得

$$I_i = E/R_i \quad (5)$$

中 I_i = 電阻 R_i 中之電流 $i=1, 2, 3 \dots 6$

R_i = 第 i 個電阻之電阻 $i=1, 2, 3 \dots 6$

E = 電池之電動勢

比較(3)式與(5)式，得

$$Q = E \quad (6)$$

$$A_i = R_i \quad (7)$$

$$V_i = I_i \quad (8)$$

故如以電表測定電阻 R_i 中之電流即可十分正確地得知 i 管中之水流流速，但用(6)(7)(8)三式以推定管中水流有二缺點即

1. 單位因次不同，電流以安培爲單位，流速以單位時間內所經過之長度爲單位，二者並不相等。

2. E 及 R_i 之值不能自由選擇，增加技術上之困難。

此二缺點可引進二有因次之常數以克服之，其法

如下：

$$\text{設 } E = mQ \quad (9)$$

$$R_i = m'A \quad (10)$$

中 m 及 m' 爲二有因次之常數，在公制中，

m 之因次爲 伏特 / 每秒公方

m' 之因次爲 歐姆 / 平方公尺

因此得

$$V_i = \frac{m'}{m} i_i \quad (11)$$

m 及 m' 之值可自由選擇，故以(11)式建立一模型較(8)式方便多矣，如當 Q 爲 100 C.M.S. 時運用(8)式需有 100 volt 之電動勢，欲得直流之 100 Volt 電動勢頗爲不易。如 Q 爲 零之數字式則欲求相當之 E 即更爲困難矣，如採用(11)式則可採用最方便之 E ，而由 E 及 Q 之值決定 m, R_i 及 A_i 之間亦然，故極其便利也。

三、電氣比擬法形式之變換

在前節中曾提及電流相當於水流之流量，電壓相當於水流之水頭，電壓降相當於水流之損頭等，凡此皆係就其性質而言，在電氣比擬法中並非一定如此，即以前節之例而言以電流比流速，以電壓比流量以電阻比斷面積即非如此也，事實上同一原型可有數種不同之電氣比擬模型，在前節之例中歐姆定律亦可寫作

$$E_i = I R_i \quad (12)$$

$$\text{再加變換得 } E = \frac{I}{\frac{1}{R_i}} \quad (13)$$

與(3)式相比較復加入二有因次常數 n 及 n' 則得

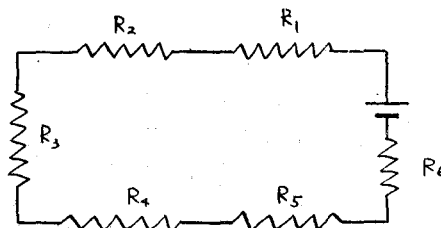
$$= nQ \quad (14)$$

$$\frac{1}{R_i} = n'A_i \quad (15)$$

由(14)(15)得

$$V_i = \frac{n'}{n} I R_i \quad (16)$$

$$\text{即 } V_i = \frac{n'}{n} E_i \quad (17)$$



圖三 串聯電阻之電路

在此情形下第二圖之模型電路顯然已不能適用，現 I 之值為常數故此一情形下之比擬電路 (Analogy Circuit) 應如第三圖所示之串聯電路，此時欲求 i 管中之流速，可測量 R_i 兩端之電位差即 E_i 即可

又如(5)式亦可寫作

$$R_i = \frac{E}{I_i} \quad (18)$$

與(3)式相較復加入二有因次常數 K 及 K' 則得

$$E = KQ \quad (19)$$

$$I_i = K'A_i \quad (20)$$

由此可得

$$V_i = \frac{K'E}{KI_i} \quad (21)$$

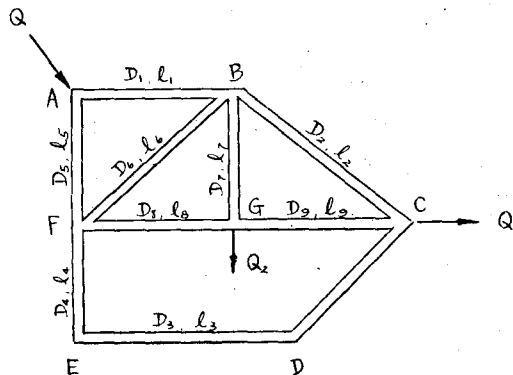
$$\text{即 } V_i = \frac{K'}{K} R_i \quad (22)$$

由(22)式所得之比擬電路為一並聯電路，與第二圖大致相同，但二者在實驗室中之步驟不同，由(8)式或(11)式所得之電路，其各電阻先由(7)式或(10)式決定，然後由測各電阻中之電流求出各管中之流速，由(22)式所得之電路則先由(22)式決定各電阻中電流，當加以電壓 E 後，調整各電阻 (可變電阻) 之大小，直至各電阻中之電流與設計相符為止，由各電阻最後之值即可求出各管中之流速。

事實上，此例中電壓、電流、電阻與水流流量，流速，水管斷面積間，任何二者均可互為比擬。故以此種管中水流而論即可有多種電氣比擬。模型，其間之變換與選擇當視實驗室之設備與便利而定。

四、電比擬法在複雜管路上之應用

前述之電氣比擬法適用於簡單之管路，但用樣之方法亦可應用於複雜之管路。圖四為一水平之給水管網路，該網路中各管之長度及直徑均為已知，A點流



圖四 水管網路

入之水量 Q ，G 點流出之水量 Q_2 ，C 點流出之水量 Q_1 亦為已知則可作一電氣比擬法之不類模型以計算各管中水流流量及各管之損頭。

在此一問題中因情形較為複雜故須有二個特性方程式，其中之一可由白努利方程式求之，現任取該網路中之一段 BC 而寫出其兩端之白努利方程式如下：

$$\frac{P_B}{w} + \frac{V_B^2}{2g} = \frac{P_C}{w} + \frac{V_C^2}{2g} + H_f \quad (23)$$

其中 V_B 與 V_C 因管徑相同而相等，故(23)式即成為：

$$\frac{P_B}{w} - \frac{P_C}{w} = H_f \quad (24)$$

$$\text{根據 Darcy 公式 } H_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (25)$$

$$\text{故 } \frac{P_B}{w} - \frac{P_C}{w} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (26)$$

$$\text{令 } \frac{P_B}{w} - \frac{P_C}{w} = \Delta P \quad (27)$$

$$\text{則 } \Delta P = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (28)$$

$$\text{如為層流則 } \Delta P = \frac{32\mu L}{D^3} V \quad (29)$$

第二個特性方程式則可根據連續流公式得來，即以一交會點而言，其流入之總流量應等於其流出之總流量，以公式表示之則得

$$\sum Q_i = 0 \quad (30)$$

$$\text{或 } \sum A_i V_i = 0 \quad (31)$$

至於模型之特性方程式其中之一可由 Ohm's Law 得來即

$$E = R_i I_i \quad (32)$$

另一特性方程式則為 Kirchoff 定律之一：

$$\sum I_i = 0 \quad (33)$$

比較(31)式與(33)式並加入一有因次常數 C ，得

$$A_i V_i = C I_i \quad (34)$$

以(34)式代入(29)式則得

$$\Delta P = \frac{32\mu L}{D^3} \frac{C}{A} I \quad (35)$$

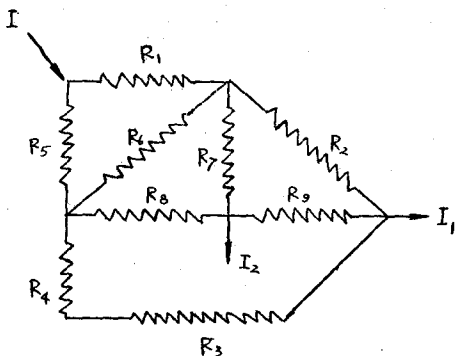
$$= \frac{32\mu L}{D^3} \frac{4C}{\pi D^2} I \quad (36)$$

比較(32)與(36)式得若

$$R = \frac{128\mu L}{\pi D^4} \frac{C}{C'} \quad (37)$$

$$\text{則 } \Delta P = C' E \quad (38)$$

故如將圖四之各管就其位置代以一電阻 (電阻之值可由(37)式計算之) 則得一電氣比擬模型如圖五所示



圖五 相當於圖四之電路

其中C值可自由假定或由(37)式求出之，C'之值則由C值及R值求得。

電氣比擬模型建立後則在模型中任意二點間之電位差即為原型中相當兩點間之損頭，而模型中任意一點所量得之電流即為原型中相當該點處之流量；唯該模型係假定管中水流為層流而得出，若為亂流則(28)式不能化為(29)式故情形較此複雜矣，因 ΔP 將不與V成正比而與 V^n (n值約自1.72至2.0)成正比也。

五、電氣比擬法用以決定流動之形態 (Flow pattern)

在分析流體某一特定之流動情況時，為了決定各點之流速與壓力，常需先決定流動之形態。但此一相當困難之問題，常可利用電氣比擬法以解決之，如U及V分別為x方向及y方向之流速則根據連續流之原理可得

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (39)$$

如 ϕ 為流速函數 (Velocity Potential Function) 則由流速函數之定義知

$$U = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (40)$$

$$V = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (41)$$

$$\text{則得 } \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial x} \quad (42)$$

$$\text{或 } \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (43)$$

(43)式為流速函數存在之條件，故必須在適合(43)式之非旋轉性流中始有流速函數之存在。將(40)式與(41)式代入(39)式則得

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (44)$$

(44)式作為一 Laplace 方程式，Laplace 方程式為 Poisson 方程式之一特殊情形，在物理與工程上之應用甚廣，因其適合多種物理現象，故可利用作為不類模型之特性方程式。Laplace 方程式為一二級偏微分方程式 (Second-order Partial Differential Equation)，由此可知特性方程式初不以代數方程式為限也，事實上更複雜之微分方程式亦可作為不類模型之特性方程式也。

在大部 Laplace 方程式適用之問題中，往往有一共軛函數存在，此一函數 $\psi(x, y)$ 亦合乎 Laplace 方程式，即：

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (45)$$

在流體力學中此一共軛函數 (Conjugate Function) 即為流線函數 (Stream Function)。設

$$U = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (46)$$

則為適合連續流方程式必須

$$V = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (47)$$

$$\text{代入(39)式得 } \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (48)$$

(48)式亦適合 Laplace 方程式，惟因為無(43)式之限制，故不僅適合非旋轉性流亦適合於旋轉性流，如令 $\phi(x, y) = c$ 並以x及y之值代入則可得一等壓線 (Equipotential Line)。該線上任一點之流向必垂直於此線，如令 $\psi(x, y) = C$ 則可得一系列之流線 (Streamline)。流線之方向在任一點均與該點之流向一致，即與通過該點之等壓線相交，二相鄰之流線間，以二度空間而言即為一流管 (Stream Tube)。

在流體力學中 Laplace 方程式適合於非旋轉性流，如堰上水流小孔洩水，或通過孔隙性物質之水流如填下滲流，地下水之流動等，在其他現象則適用於結構之應力場、電場、磁場及熱之傳導等其中以用電場作為不類模型最為簡便。

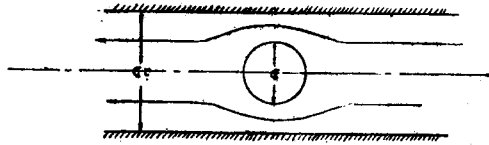
在一均質平面導體中之電流情況與此相似。其電位V相當於 ϕ 而其在x及y方向之電場強度相當於U及V故得

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (49)$$

$$E_x = \frac{\partial V}{\partial x} \quad (50)$$

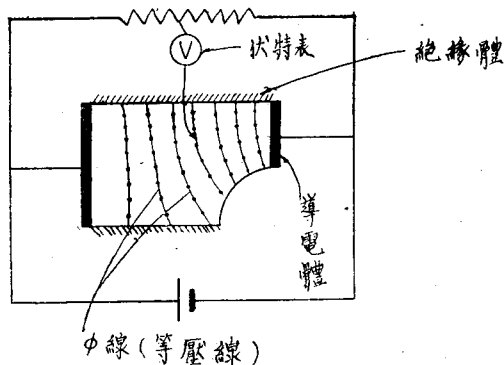
$$E_y = \frac{\partial V}{\partial y} \quad (51)$$

一片導體或一薄層之導電液體如其形狀做成與水流之相同形式則即可作為此水流之不類模型。在圖六



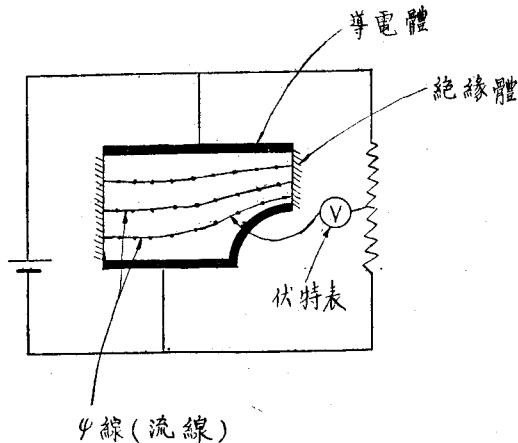
圖六 非旋轉性流道—平行壁間之圓柱體

中為一非旋轉性流通過一直徑為 D 之圓柱體時，此圓柱體位於二平行牆之間。二牆間之距離為 $2D$ ，因此時流動之情況上下左右均依圓柱體之軸而對稱。故作不類模型時祇須取原型之 $\frac{1}{4}$ 即可。如圖七所示。如以導體作進口與出口，而以一伏特計連接一測針(圖七)



圖七 圖六之電氣比擬模型(中線)

測出模型中電壓相等之點而加以連接，即得 ϕ 線(等壓線)之分佈情形，反之在模型中相當平行牆之位置置以導體而在相當進口處及出口處置以絕緣體如圖八所示則以伏特計及測針所測得之等壓之點即為流線



圖八 圖六之電氣比擬模型(ψ 線)

(ψ 線)之分佈狀況。

美國太陽科學儀器公司(Sunshine Scientific

Instrument) 現有一種電氣比擬儀(Analogy Field Plotter) 出售，該儀器利用導電紙及導電漆，可顯示各種場(Field)之形態包括流體在內，此一儀器不但可分別顯示流線及等壓線且可同時將此二種情形一併顯示，同時其準確性甚高，在一 $23'' \times 31''$ 之標示板上其每點之誤差最大不超過百分之一英寸，此一儀器在邊周界複雜之問題時尚可以電阻將電壓均勻區分以減少其誤差，故此一儀器在實用方面實極為簡單方便而又準確明瞭也。

Laplace 方程式常可用數字分析法(Numerical Analysis) 求解答，在求非旋轉性水流之形態(Pattern) 時亦可應用此種方法，其中最常用者為放鬆法(Relaxation Method)，此法將流場(Flow Field) 分為甚多之方格然後逐步修正假定之數值，直至各點之差誤為零或接近於零為止。此法之計算甚為煩復費時如利用電氣比擬法則可節省甚多之時間。其法將電阻連成方格如放鬆法之小格一般，除靠近周界部份之電阻因形狀並非方格須視其角度而定外其餘之電阻數值均為相同。模型做成後當一電位差加於相當於水流進口與出口之處，則每一電阻之交會點處之電位即為原型相當該點處之壓力，由壓力坡度即可求出各處之流速，較之放鬆法省事多矣。

此外在流體力學中有甚多之問題亦可利用電氣比擬法解答之，例如渦流在流體力學中為一相當複雜之問題但因其特性與電磁學中之現象相似，故可利用電磁作此一問題之不類模型。在此一比擬中，渦流之渦流線(Vortex Filament) 相當於一電路，渦流之強度相當於該電路之電流，渦流之流速相當於磁力之強度。由此得此因渦流所引起之流速公式與電磁學中 Biot 及 Savart 氏電流之磁效應公式確切相當，進一步之觀察，尚可發現渦流之水源(Sources) 及出口(Sinks) 相當於磁極之正負二極。故利用鐵粉置於一磁場中，可觀察渦流之現象，且較觀察渦流之本身更為清晰明瞭也。

六、電氣比擬法在水文上之應用

電氣比擬法在水文上之應用可以洪流演算(Flood Routing) 作為一例以說明之，在洪流演算中最重要者厥為河谷蓄水。河谷蓄水可分為二部即棱形蓄水(Prism Storage) 及楔形蓄水(Wedge Storage) 棱形蓄水常可以出流處作一平行於河底之線而得，因此線與河底間之水量即棱形蓄水，楔形蓄水則為此線與實際水面間所包含之水量，棱形蓄水恒為

正值，楔形蓄水則有正有負。漲水時實際水面在出口水位所作平行河底之線以上其值為正。退水時則由出口水位所作平行河底之線在實際水面之上，故其值為負，通常簡單之洪流演算在計算河谷蓄水時往往僅憑流出口之流量，而不問流入之流量即僅計入楔形蓄水而不計楔形蓄水，在水位變化急劇時，楔形蓄水之數值頗大，故用此種方法所得之結果謬誤甚鉅，故在要求較高之洪流演算中必須將楔形蓄水計算在內。此時之一般公式可以下式示之

$$S = -\frac{b}{a} [X I^{m/n} + (1-X) O^{m/n}] \quad (52)$$

中 S 為河谷蓄水， I 為進入該河段之流量， O 為流出該河段之流量， X 為進流對於河谷蓄水之重要性，亦即楔形蓄水對於整個河谷蓄水之重要性。在一等速流之河道中，進流與出流佔同等之重要性，此時定 $X=0.5$ 在一簡單之蓄水池中，蓄水全由出流量決，故 $X=0$ ，一般河流之值普通在 0.1 至 0.3 之間其平均值約為 0.2 ， a ， b ， m ， n 則由下列二式定之

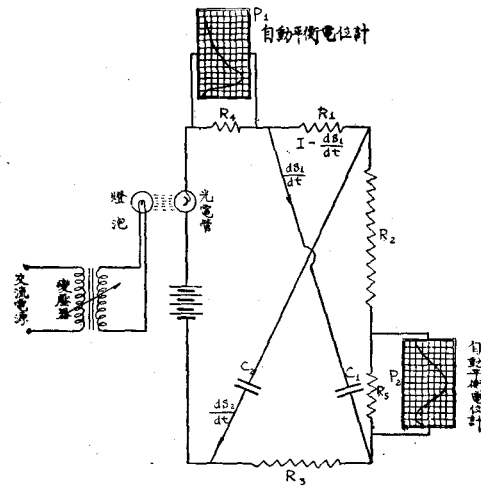
$$q = ag^n \quad (53)$$

$$S = bg^m \quad (54)$$

中 q 為該河段之流量， g 為上下二断面水位之平均值， a ， b ， m ， n 為常數視該河段之性質而定。在等速矩形渠道中，流量隨水位之 $5/3$ 次方而變，而河谷蓄水則與水位成正比，故 m/n 之值約為 0.6 ，但在天然河道中 m/n 之值較此為大，通常為簡單起見，假定 $m/n=1$ ，而 $\frac{b}{a}$ 通常均以 K 表示之， K 稱為蓄水常數 (Storage Constant)， K 值為蓄水與流量之比，亦為蓄水流量曲線上之坡度，由因次分析可知 K 為含有時間因次之常數。其單位為日或秒係視流量及河谷蓄水所用之單位而定。 K 值之大小可示出洪流通過該河段所需之時間。徑簡化後 (54) 式即成為下式：

$$S = K [X I + (1-X) O] \quad (55)$$

美國氣象局之電子洪流演算儀即為利用 (55) 式而製成之電氣比擬模型。當洪流演算之初，河段之進流量及出流量均為已知，模型中自動平衡電位器 P_1 及 P_2 中之電流 I 及 O 即相當於此二流量而該模型中其他電路中之電流則如圖九所示。流入二電容器之電流等於其電容之變化即 $\frac{dS}{dt}$ ，電阻 R_1 與 R_3 之值與 R_1 ， R_2 ， R_3 相較甚為微小，故可略而不計。而二電容器任何時間之電容須視該電容器二端當時之電壓降而定故得：



圖九 電子洪流演算儀

$$S_1 = [(I - \frac{dS_1}{dt}) R_1 + O R_2] C_1 \quad (56)$$

及 $S_2 = [(O + \frac{dS_1}{dt}) R_3 + O R_2] C_2 \quad (57)$

故總電容為

$$S = I R_1 C_1 + O R_2 C_1 + O R_2 C_2 + O R_3 C_2 - C_1 R_1 \frac{dS_1}{dt} + C_2 R_3 \frac{dS_1}{dt} \quad (58)$$

設計時使 $C_1 = C_2$ ， $R_2 = R_3$ 則得

$$S = R_1 C_1 (O + I) + 2 R_2 C_1 O \quad (59)$$

在穩定流狀態時 $I = O$ 故 (59) 可進一步簡化為

$$S = 2 (R_1 C_1 + R_2 C_1) I \quad (60)$$

(55) 式在穩定流狀態時簡化為 $S = KI$ (60) 比較 (59) 式與 (60) 式可知在該電氣比擬模型中之 K 值

為：

$$K = 2 (R_1 C_1 + R_2 C_1) \quad (61)$$

將 (61) 式及 (58) 式分別代入 (55) 式得

$$R_1 C_1 (O + I) + 2 R_2 C_1 O = 2 (R_1 C_1 + R_2 C_1) [X I + (1-X) O] \quad (62)$$

故 $R_1 C_1 (O + I) + 2 R_2 C_1 O = 2 R_1 C_1 X I + 2 R_1 C_1 O - 2 R_1 C_1 O X + 2 R_2 C_1 X I + 2 R_2 C_1 O - 2 R_2 C_1 O X$ (63)

$$R_1 C_1 (O + I) + 2 R_2 C_1 O - 2 R_1 C_1 O - 2 R_2 C_1 O = 2 X (R_1 C_1 I - R_1 C_1 O + R_2 C_1 I - R_2 C_1 O) \quad (64)$$

簡化解 X 得

$$X = \frac{R_1 C_1 (I - O)}{2 [R_1 C_1 (I - O) + R_2 C_1 (I - O)]} \quad (65)$$

故 $X = \frac{R_1 C_1}{2 (R_1 C_1 + R_2 C_1)}$ (66)

由(61)式及(66)式可計算得 K 及 X 。由於 K 之單位為時間故為自動記錄器之轉速及記錄紙時間刻度之函數。如二電容器為固定者則不同之 K 值及 X 值可由調整 R_1 , R_2 及 R_3 之值而得來。光源之變化影響光電管所產生之進流 I , 由 P_1 所繪出之曲線即相當於河段上游之流量過程線。此時在另一自動平衡電位器上即自動繪出另一曲線即為所求之河段下游之流量過程線。

由上法可知利用電氣比擬法與作洪流前進演算可節省甚多之時間, 因而在洪流到達之前可有較多時間之準備。且其結果亦往往較為準確也。

七、結 論

電氣比擬法在水利工程中已有甚廣之應用, 將來此方面之發展更屬未可限量, 諸如各中牽涉較多或計算過於繁複之問題, 均可設法利用電氣比擬法以解決之。電氣比擬法之優點為

(1) 電學測量儀器是現代各種儀器中堪稱最為進步準確故由電氣比擬模型所得之結果亦較為準確。

(2) 與各種自記儀器及遙控設備之連接最為便捷。

(3) 適合於水工模型所不能或不易解決之問題, 如地下水之流動, 埧底滲流等。

(4) 所需之場地極小, 所需之設備亦較水工試驗廉宜甚多。

(5) 每次試驗所需之時間往往甚短, 省時省事。

目前臺灣水工模型試驗已有長足之發展, 結構模型試驗亦在嘗試之中, 而電氣比擬模型則尚未有先例, 今後水利界似應在此方面加以發展也。

參 考 文 獻

1. Murphy, Glenn, *Similitude in Engineering*, Ronald Press, New York, 1950.
2. Rouse, Hunter, *Advanced Mechanics of Fluids*, 1959.
3. Vallentine, H. R. *Applied Hydrodynamics*, 1959.
4. Linsley R. K., Kohler, Max A., and Paulhus, J. L. H., *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1949.
5. McNown, J. S. Hsu, E-Y., and Yih, C.-S., "Application of the Relaxation Technique in Fluid Mechanics" *Transactions, A. S. C. E.*, Vol. 120, 1955.
6. *Divids Engineering Hydraulics*, Wiley, 1950
7. Chow, V. T., *Open-Channed Hydraulics*, 1959
8. Kohler, M. A. *Application of Electronic Flow Routing Analogy*, *Transactions, A. S. C.E.*, Vol. 118, 1953.

Synopsis

Dissimilar models are very unlike their prototype in appearance, yet such analogy methods are extremely useful tool in solving Complex engineering problems. They usually can get result quicker, acculater, easier, and cheaper than ordinary model tests. Among these analogy methods the electrical analogy method in the most favored especially in hydraulic engineering problems.

In this paper, the fundamental principles of electrical analogy method are explained, its merits are discussed, and Various examples of applications in hydraulic engineering problems are illustrated.