

由血流理論看中醫

王唯工 王林玉英 *

中央研究院物理所 * 師大物理系

關鍵語：中國傳統醫學，血液流體力學，共振

摘 要

中醫之理論“氣”為中心，氣行血似乎是氣之基本定義。本文由流體理論，拉維—史脫克方程式探討到沃姆斯來動脈血管中之血流方程式，試將血流理論與中醫做一綜合性研究。

器官對血流之影響為目前血流理論之盲點，而沃氏方程式也無法在動物實驗中證實；似乎暗示著這二者之間的相關性。我們以一些動物之器官及其模擬之實驗，來探討器官對血流之影響，由此而得之理論及數據可以解釋沃氏方程式20餘年來無法與實驗相等之原因，同時也為中醫長久以來的問題“氣”是什麼？找到了答案。

前 言

中醫在醫學工程之研究中，又逐漸受到重視，去年十月初在東京大學舉辦的第一屆遠東醫學工程研討會，就以遠東醫學為主題，而邀集了中、日、韓等地研究中醫之人士共聚一堂討論各方面在中醫研究上之新發現。而就筆者多年研究中醫的心得來看，許多中醫研究中之新發現，常可視為再發現，因為在中醫之古籍中早就有了這些現象的描述，只是我們在認真的做好生理學研究之前，看不懂這些敘述而已。

中醫之理論萌芽甚早，而對心臟、肝、腎、肺等內臟的功能及血液循環的理論，都比西方早了二千年左右，而且大多是正確的。所以許多生理上之知識本已是中西不分了。中醫理論之精華在討論氣血分配原理，所謂“氣行血”一直是中國人的口頭禪，而把脈更是中國人身體檢查的代名詞。

英國醫師(Felix mann)(1)在他所著之各種中醫叢書中，也認為“氣”是中醫之主要理論，而穴道、經絡是氣走動之途徑，把脈是測量“氣”是否平衡之方法。所以本文也打算以“氣”為探索的重點。

血液流體力學 簡介

在探討中醫“氣行血”的理論之前，讓我們先看看血液流體力學的研究。是否有什麼可讓我們借力的地方。中醫是一門三千餘年的診斷與治療法則。文字之記載至少可以溯到周禮。只有三百多歲的血液流體力學當然年輕多了，十七世紀以前西方都接受希臘人的教導認為動脈是吹氣的，因為死人的動脈是中空的，而且充滿了空氣。直到哈維 (Harvey. W) 根據質量不滅原理推出血液循環的道理，較內徑中血液循環之理論慢了二千年左右 (請參看馮元楨先生之畫) (2)

計算血液在彈性血管中流動是非常困難的工作，這不僅是流體力學，還有彈性之固體——血管要一併考慮。但是科學家在各種新式儀器不斷進步之後，逐漸由測量壓力，而進入測量流量及流速，近代之超音波都卜勒流量計，更能測量到動脈中之各層流場。而拉維—史脫克氏 (Navier-Stokes) 方程式也被各種方式求得近似值。可由此公式設計出各種新式飛機、飛彈，但是我們仍然無法估算大動脈中血壓波變化之情形。(Wolmersley)

沃姆斯萊 (Wolmersley) 方程式之介紹

由圓錐坐標來看拉維—史脫克方程式，可得

$$-\frac{dp}{dx} = p \left[\frac{dw}{dt} + \mu \frac{dw}{dr} + w \frac{dw}{dx} \right] - \left[\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \frac{d^2w}{dx^2} \right] \dots\dots\dots(1)$$

$$-\frac{dp}{dx} = p \left[\frac{du}{dt} + \mu \frac{du}{dr} + w \frac{du}{dx} \right] - \left[\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \frac{d^2u}{dx^2} - \frac{\mu}{r^2} \right]$$

式中 P 為壓力，r 為離圓錐中心之距離，X 為離原點之距離(2)

$$\frac{dr}{dt} = \mu \quad \frac{dx}{dt} = w \quad \text{分別為延 } r \text{ 方向及 } X \text{ 方向之速度}$$

P 為流體之密度，r 為黏滯度，

其實拉維—史脫克方程式可視為一個小單位流體的牛頓運動方程式。但是在解析血液在血管中流動時，還要考慮血管之特性，甚至血管外圍各身體組織造成之影響，也就是血管受到外來負載或限制所造成對彈性血管之改變。

沃姆斯萊首先將血液視為層流，且為非壓縮性之牛頓流體，並將血管視為不可壓縮之硬管。因此只剩下 X 方向之流動，因而只需解

$$-\frac{dp}{dx} = p\left(\frac{dw}{dt}\right) - \eta\left(\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dw}{dr}\right) \dots\dots\dots(3)$$

假設軸向水流速度 $w = Ve^{j\omega t}$. 並忽略壓力波有限速度之影響

設壓力梯度 $\frac{dp}{dx} = Ae^{j\omega t}$

由於線性化之假定，可將不同頻率之項目，完全分離而得

$$\frac{d^2o}{dy^2} + \frac{1}{y}\frac{dy}{dy} - j\alpha^2 v = \frac{AR^2}{n} \dots\dots\dots(4)$$

$y = \frac{r}{R}$ α 為沃瓦係數 $\alpha^2 = \frac{R^2\omega p}{n}$, p 為血管半徑, $\omega = 2\pi f$, f 為血液密度, n 為粘滯度)

解開後可得

$$W = \text{Real} \left\{ \frac{Ae^{j\omega t}}{n} \frac{1}{j\alpha^2} \left(1 - \frac{j_0(j^{3/2}\alpha y)}{j_0(j\alpha)} \right) \right\} \dots\dots\dots(5)$$

而通過血管截面積之流量為

$$Q = 2\pi R \int_0^1 Wy dy$$

J 為 Bessel functions

即可求得壓力梯度與流量之關係

如再考彈性之血管。沃氏先假定壓力及血流皆成波狀前進，而且是相同之波速

$$P = P_i \exp[j\omega(t - \frac{x}{c})] \dots\dots\dots(7)$$

$$u = u_i \exp[j\omega(t - \frac{x}{c})] \dots\dots\dots(8)$$

$$W = W_i \exp[j\omega(t - \frac{x}{c})] \dots\dots\dots(9)$$

C : 複數之波行速度，為一未知數，經過一些很複雜而技巧的計算可求出

$$Q = \text{Real} \left\{ \frac{Pe^{j\omega t}}{PC} \pi R^2 \left(1 + \frac{2\Sigma}{R} \right) (1 + NF_{10}) \right\} \dots\dots\dots(10)$$

$$\text{及 } \left(\frac{C_0}{C}\right)_{k \rightarrow \infty}^2 = \frac{1 - \sigma^2}{1 - F_{10}}, \dots\dots\dots(11)$$

$C_0 = \left(\frac{Eh}{2RP}\right)^{\frac{1}{2}}$ 為由 Moen - Korteweg 之彈性管方程式中解出之波速。

σ_2 由 $X = \left(\frac{C_0}{C}\right)^2 \left(\frac{2}{1 - \sigma^2}\right)$ 來定義，X 為新的變數

$$N = \frac{2}{X(F_{10} - 2\sigma)} - \frac{(1 - 2\sigma)}{(F_{10} - 2\sigma)}, \text{ N 亦為新的變數}$$

F_{10} 由 $M_{10}^{ic10} = (1 - F_{10})$ 來定義，而 $M_{10} = (1 - [2J_1(J^{3/2}\alpha) / J^{3/2}\alpha J_0(J^{3/2}\alpha)])$

N. 及 F. 為新定義之函數，K 為血管之厚度，密度，外加質量等之函數，這些解的詳細步驟請參看血液流體力學之教科書 (3) 或是沃姆斯萊先生之原著 (4)

沃姆斯萊方程式與實驗之比較

沃姆斯萊方程式本就有其假設上之先決條件。例如層流，牛頓液體，均勻之圓柱狀血管，進口處之效應，反射波，線性化，血管壁之特性等等，都可能因而與實際之生理現象不符合，所以要證明其實用性，就要在動脈中做實驗。

沃氏方程式是一個數學解，而實驗上我們能測量的項目卻很有限，而且因實驗方法之不同而有不同程度的誤差，一般而言，實驗之誤差約在 5%~10% 之間，實驗上，我們較能測量的是流量及壓力。如果以壓力與流量的看法來定義阻力，則可將阻力

$$Z_L = \left(-\frac{dp}{dx}\right) / Q \quad \text{此與電阻 } Z_L = -(dv/dx) / I \text{ 是相似的。}$$

而 $Z_L = R + j\omega L$ ，可視為電阻 R 之部份，及電抗 L 之部份。

則沃姆斯萊方程式之解可以分別測試 R 及 L 來證實，亦可以更接近實驗所測的數據如 (12) 式來證實

$$-\frac{\Delta p}{\Delta x} = RQ + L \frac{dQ}{dt} \dots\dots\dots(12)$$

在 60 至 70 年代許多科學家如 Ling, Miluor Atabek 等人都 (5) 很認真的從事這方面的測量，並與沃氏方程式之解來比較。

結果發現如果將 α ($\alpha^2 = \frac{R^2 WP}{n P}$ R 為血管半徑, $W=2\pi f$ P 為血液密度, n 為黏滯度)

大之電阻 R 與電抗 L 皆能符合之參數代入, 則當 α 小時, 其 R 值, 與實驗所得相差 4 至 8 倍 (400% ~ 800%) 不等。

沃姆斯萊先生於解出此方程式不久就不幸去世。所以他没有更進一步的繼續研究這些 60 年代以後發生的困惑, 而他的主要合作人麥克唐納先生 (McDonald, DA) 也於他的書“動脈中之血液流”將完成之時去世。(約 1974 年)

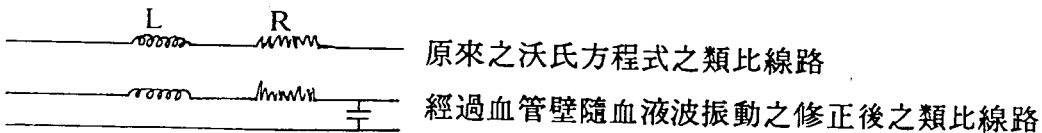
於是這個令人困惑的疑問就由許多其他的科學家來試著找尋答案了。由前面所提之沃氏方程式成立之假設條件來看, 大家就在進口效應, 線性化, 血管往下游時有逐漸變窄的趨勢等方向研究。尤其是線性化上是大家最努力探討的問題 (層流, 或牛頓液體對血流而言, 大體上是對的, 而血管特性的問題太困難, 不論理論或實驗都難下手)。但是這些額外考慮的現象, 都只能提供幾個百分點之修正。

就拿線性之性質來說吧, 在正常的生理條件下, 動物之血循環系統, 至少有 90% 是線性的, 這個 10% 左右的非線性現象並不能說明 400% 的誤差。在上面所談的沃氏方程式之實數與虛數部份, 可分別為 R 與 L,

$$-\frac{\Delta p}{\Delta x} = RQ + L \frac{dQ}{dt}$$

但在電學中, 我們也知道, 電抗中有 L 也有電容 C, 何以此處不見電容呢? 其實在沃氏之論文中也談到因為忽略了血管壁之半徑隨著血壓波之振動, 可能使求得之血流速度產生誤差, 而此誤差可能有 11% (此係就 frist hanmanics 而言, 理論上對高頻之影響可能更大),

有些電線之模擬系統就考慮了這個血管壁隨血液波振動之效果, 而在此對等線路上, 加了一個電容器



其實這個類比線路的想法在沃氏方程式之前, Landes 就已經提出, 而由 Noorder graaf 將之嚴格的導出來。

但是此類比線路, 會使高頻 (α 大) 之電阻變大, 並不能把我們從原有的困境中脫困出來。(何況, 其產生之變化也僅在 10% 左右)

以上所述的這些方程式，都在解釋液體在一條彈性管中之流動情形，原則上他們都忽略了分支管，即使考慮了分支管，也是將分支管看成另外一支彈性管，而以處理二個分別的彈性管，外加一個接頭來看待。而且多用壓力波之前進及反射等方式來處理。

事實上，在動物體內除了有大動脈及分支血管之外，每個分支管又都連接到不同的器官。這種分支管連結到器官的結構，其對血壓波之影響，是很少被科學家考慮的。

在台灣中醫研究現況

中醫之理論一再強調由脈波之波形可以探得“九臟之動”認為由體表動脈波中之波形可以了解器官之健康情形。由上述之近代血流理論，要在其中找中醫理論，不異求泥菩薩背你過江，難怪台灣近年來之中醫研究是良導絡等與電磁相關的方向了。

近年來電針及由電阻原理設計的穴道找尋工具更加強了大家的信心。所以當德國醫生 Qr Voll 提出之電針理論，又發明了電針之新工具之後，受到許多受過西醫訓練而又相信中醫療效的有志之士推崇。

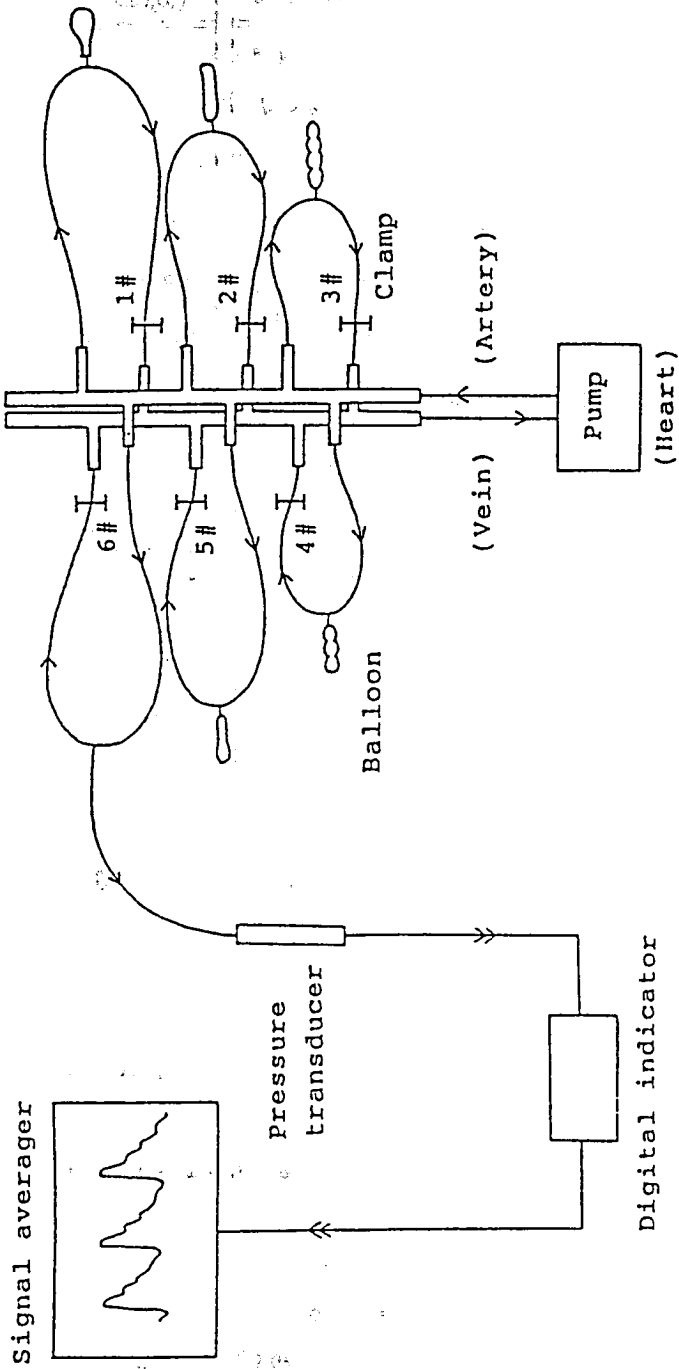
中醫人士在無法找到科學基礎的情形下，只好念著這位遠來的“和尚” Qr Voll 的“經”。這門學問全名是 Electro-Acuquncture according to Qr Voll 簡稱 EAV。

最近流行的“秦”值儀等國產品，皆為此儀器之改良品，本質上為一個電流計（或電阻計）。以一定之電壓加在身體上之二點，以測量這二點間通過人體之電阻。一個長久以來一直沒有客觀操作型定義之中醫診斷，總算找到了數據。由電腦打出來的數據，而其測量點恰好又是穴道。

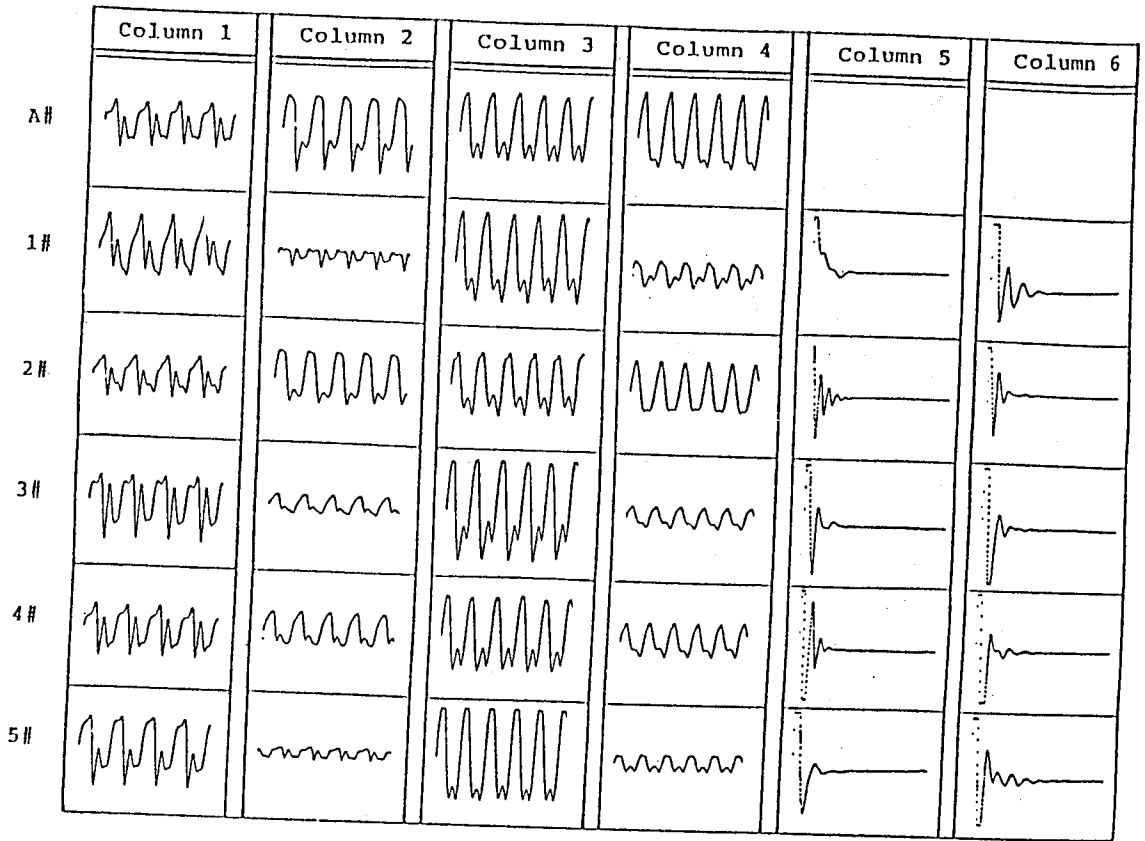
Qr Voll 的 EAV 儀器，後來又結合了一些電磁學的現象，而與同類療法 (Homoeopathy) 整合。在台灣則與氣功中之一些遙感或超距力之研究混合，造成了國人近年來在生物電磁研究的熱潮，以後如有機會再詳細介紹。

由流體力學著手，研究氣

在研究了中醫的一些古文獻，如內經，難經之後，我們發現古人強調，內臟器官與心臟之共振特性，因此器官之大小，彈性及分室等情形就會影響其與脈搏共振之狀況，而這些器官之特性也回過頭來影響脈波之波形。既然在血液流體力學文獻中找不到有效之資料，我們只好自己來做一些流體的實驗，第一個實驗 (6)



圖一：循環系統模型圖，箭頭為液體流動方向，雙箭頭則為電訊號方向。



圖二：由圖一所示之循環系統模型中所記錄之波動形狀，及流動型式改變後之效果。

A#：流動型式改變前之參考波形

column 1:所有側支管路皆開時，每次關掉一個從1#至5#夾子時，對應流動型式之改變。

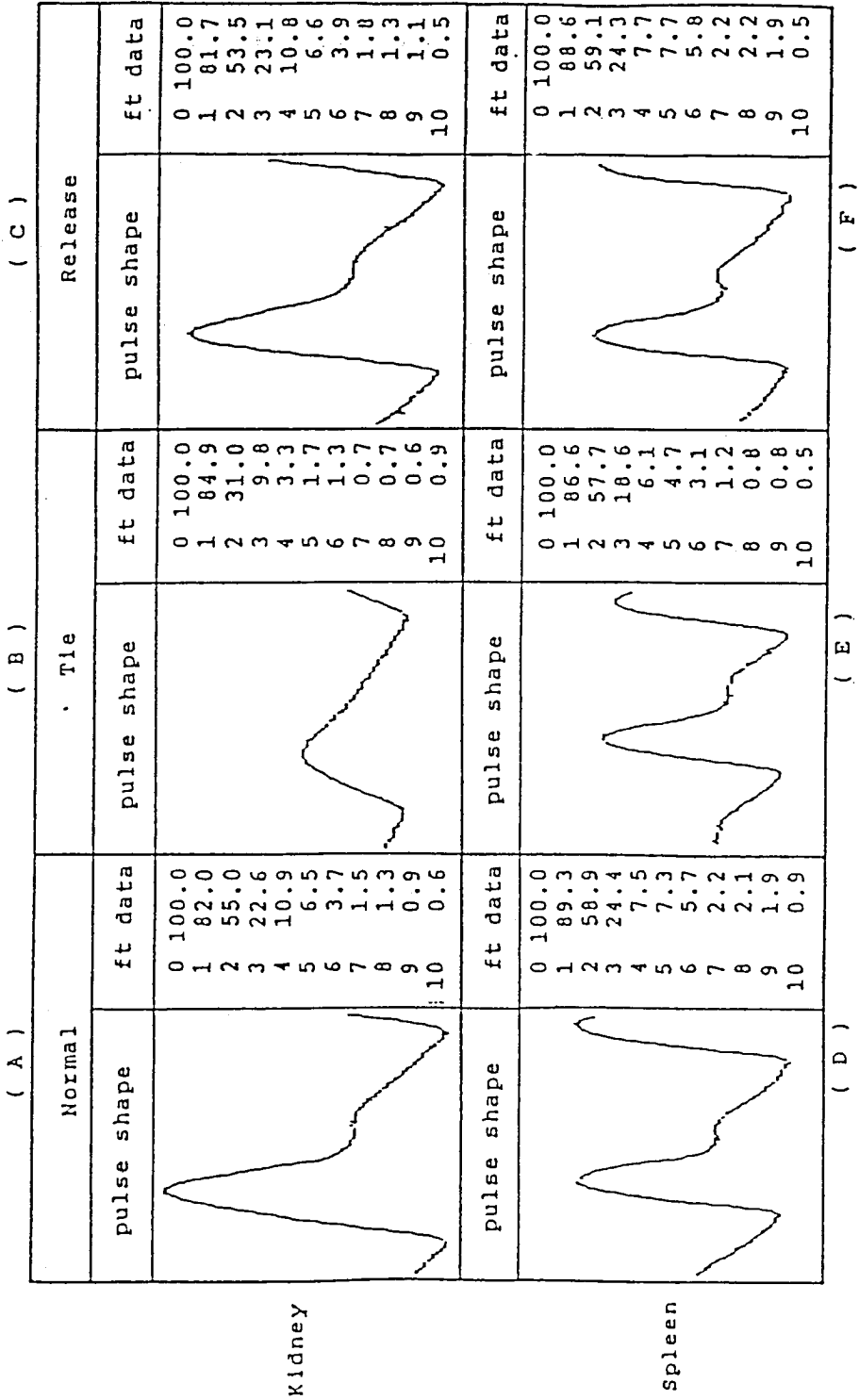
column 2:所有側支管路皆閉合時，每次開一個從1#至5#夾子時，對應流動型式之改變。

column 3:與Column 1相同，但在不同之波動頻率

column 4:與column 2相同，但在不同之波動頻率

column 5:所有側管皆打開，但關閉馬達，而分別輕擊1#至5#之氣球時之波形。

column 6:與column 2:相同，但關閉馬達，而輕擊開放管路上之氣球。

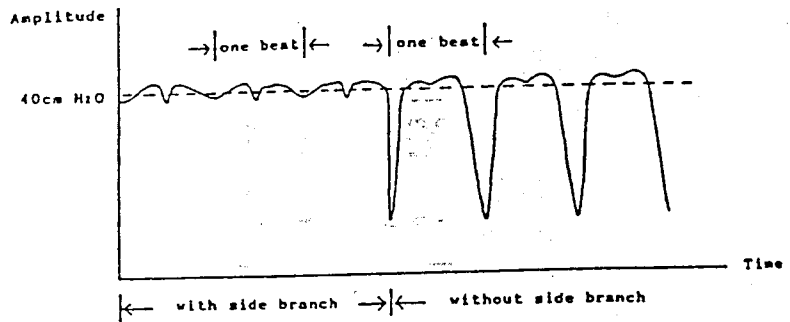


圖三：脈博壓力波隨時間改變之形狀，右側為其正規化傅利葉轉換值。以零頻之振幅為 100% 之基線值，資料以各頻振幅與零頻振幅相比之百分比表示。

表一：壓力波各諧振波比例差值；前五列為老鼠左腎動脈在夾前與被夾時之差值，最後一列為氣球在距離 X=10cm 時側支管打開與被夾時之差值。

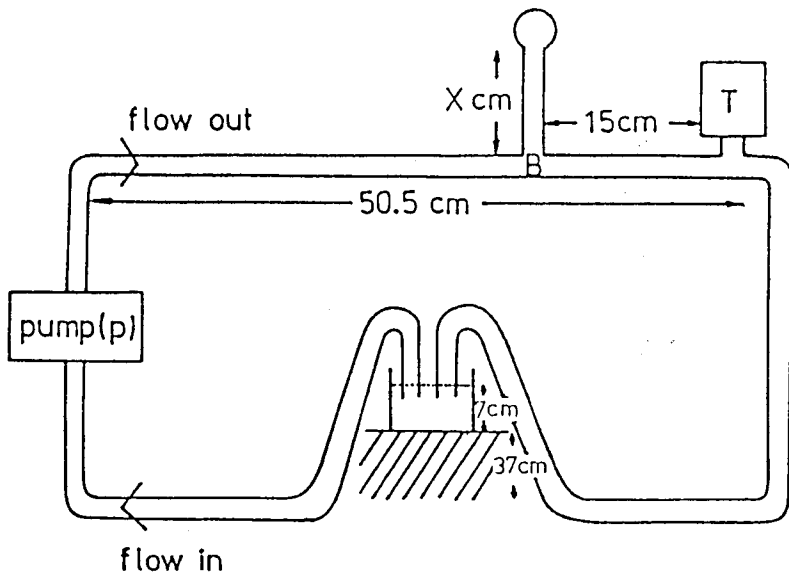
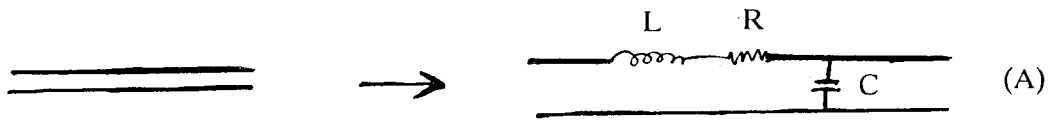
harmonic number	Rat 1	Rat 2	Rat 3	Rat 4	Rat 5	Balloon
	Difference of C_n^*					
1	3.7	3.5	-4.5	0.5	0.9	-5.5
2	-49.4	-43.5	-45.0	-36.8	-12.2	-48.7
3	-64.9	-56.5	-52.5	-40.5	-21.2	-49.3
4	-77.9	-70.1	-73.2	-56.9	-25.6	-65.5
5	-82.2	-74.4	-73.9	-58.0	-22.7	-77.8
6	-81.6	-63.8	-62.8	-42.1	-32.0	-85.9
7	-80.9	-49.1	-55.7	-23.6	-5.7	-93.2
8	-71.4	-45.3	-53.6	-58.5	13.5	-98.1
9	-58.4	-32.7	-49.0	-42.5	0.5	-91.0
10	-73.6	62.8	28.4	-31.9	96.3	-95.5

* C_n ：第 n 項諧振波振幅與 C_0 之比值



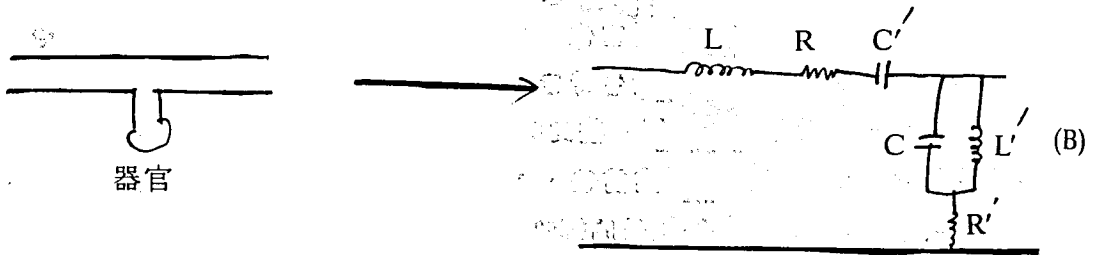
是將一些管子連結，並在各分支上結上大小不同的氣球（如圖一），結果發現，當通往某一氣球之通道被紮住時，波形之改變，可在另一條獨立之水管中被測量到（如圖二），這就證明了如果器官像一個氣球（彈性容器），則器官之病變的確可在體表另一條獨立之動脈中產生特定的波形改變。現在進一步的問題是器官真的像一個氣球嗎？於是我們做了一些比較，在老鼠之實驗中(6)(7)，我們結紮通往腎臟之腎動脈，觀察腎動脈被夾前後，尾動脈血壓波之變改（圖三）。而在彈性管模擬實驗中(8)，我們以一枝長的彈性管在中間以一小分支管連結一氣球。以夾通往氣球之分支管來模擬夾腎動脈，（圖四）同樣分析被夾前後在長彈性管末端測得之壓力波頻譜之改變，發現氣球的確可以模擬腎臟對血壓波(Table1)之影響。因而提出大動脈與器官協同振動之理論(Coupled Oscillation)，如以其類比電子線路來解釋，此協同振動之作用，可以共振線路來模擬。

如將一個彈性管以類比線路表示，則

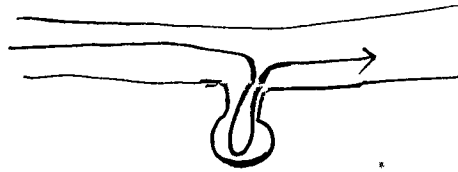


圖四：一截動脈系統之物理模型；主彈性管 (ID:0.8cm, OD=1.1cm) 與支管氣球 (B) (氣球體積 = 1.5cm³, 硬管 ID=0.25cm, OD=0.4cm) 可產生協同共振效應，水由一脈動馬達 (P) 由高於管路系流 37cm 之水盆中抽出 (水深 = 7cm)，側支長度在 2 至 100cm 間變化相對應之壓力波形則由一距側管 (B)15cm 或距馬達 50.5cm 處之壓力轉換器 (T) 測得

而一彈性管加一分支器官則其類比線路可視為一橫管與一直管之線性組合，而得。



由類比線路(B)可知當壓力波由左向右經過器官時，由器官感應一個電器 C' 在原有之 L, R 線路上。當 $W_1 = \frac{1}{\sqrt{LC'}}$ 及 $W_2 = \frac{1}{\sqrt{L'C}}$ 時，阻力最小，這是一個共振線路。而當 $W < \frac{1}{\sqrt{LC'}}$ (一般而言 $W_2 < W_1$)， C' 相當於一個大電阻，電流係以滲漏方式(leakage current)流過 C' ，而其在流體中之對應流動情形則為



換言之，低頻之壓力波必須推進進入器官後再推出，才能回到主血管繼續向下推進，因而低頻壓力波之阻力就大大的增加。由共振現象所發現之血液波前進情形，同時也找到了沃氏方程式三十年來未能與實驗相符的原因。

由於這個共振性質之新發現，我們就為中醫之基礎理論找到了生理學上之根據。“器官的確隨著血液波振動，尤其與其中某些頻率共振”。

未能與實驗
未來展望

由以上所述可知，中醫之研究，不僅可以對中醫基礎理論增加了解，在血液循環之理論中，也可能有新發現。其實這個新領域才剛開始，中醫中許多經驗，如針灸、氣功、氣與精神、情緒間之關係，甚至許多中藥之原理，氣血分配之原則等等都是不可限量的寶藏；而共振理論正是打開寶庫的鑰匙，讓我們群起合作大家一起來為發揚中華民族之光輝文化傳統共同努力，也為世界人類之健康幸福盡我們的心力。

參 考 文 獻

- [1] M. Felix, "Acupuncture, How it works and how it is used today." Pan Books (William Heinemann Medical Books Ltd.), 1985.
- [2] Y. C. Fung, *Biodynamics*, Springer Verlag, N. Y. 1984.
- [3] W. R. Milnor *Hemodynamics*, William & Wilkins, Baltimore., 1982.
- [4] J. R. Womersley, "Method for calculation of velocity, rate of flow and viscous drag in arteries when the pressure gradient is known." *J. Physiol.*, Vol. 127, pp: 553-563, 1955.
- J. R. Womersley, "Oscillatory motions of a viscous liquid in a thin-walled elastic tube. I. The linear approximation for long waves.." *Phil. Mag*, Vol. 46, pp. 199-221, 1955.
- J. R. Womersley, "Oscillatory flow in arteries: The constrained elastic tube as a model of arterial flow and pulse transmission." *Phys. Med. Biol.* Vol. 2, pp. 178-187, 1957.
- [5] S. C. Ling, H. B. Atabek, W. G. Letzing and D. J. Patel, "Non-linear analysis of aortic flow in living dogs." *Circ. Res.* Vol. 33, pp. 198-212, 1973.
- W. R. Milnor and C. D. Bertram, "The relation between arterial viscoelasticity and wave propagation in the canine femoral arterial in vivo." *Circ. Res.* Vol. 43, pp. 870-879, 1978.
- H. B. Atabek, S. C. Ling and D. J. Patel, "Analysis of coronary flow field in thoracotomized dogs." *Circ. Res.* Vol. 37, pp. 752-761, 1975.
- [6] W. K. Wang, Y. Y. Lo, Y. Chieng, T. L. Hsu and Y. Y. Lin Wang, "Resonance of Organs with the heart." in *Biomedical Engineering, an International Symposium*, Hemisphere, Editor W. J. Young, pp. 259-297, 1989.
- [7] S. T. Young, W. K. Wang, L. S. Chang and T. S. Kao, "Specific frequency properties of renal and superior mesenteric arterial beds in rats." *Cardiovascular Res.* Vol. 23, pp. 465-467, 1989.
- [8] Y. Y. Lin Wang, S. L. Chang, Y. E. Wu, T. L. Hsu and W. K. Wang, "Resonance-The missing phenomenon in hemodynamics." *Circ. Res.* (in press).

From Hemodynamics to Chinese Medicine

*Wei Kung Wang Yuh Ying L. Wang**

Biophysics Lab. Institute of Physics
Academia Sinica
*Dept. of Physics
National Taiwan Normal Univ.

Key Words: Traditional Chinese Medicine, Hemodynamics, Resonance.

ABSTRACT

Started from Navier-Stokes equation, Wolmersley had derived the equation of blood flow in artery. We followed his solution and try to understand the pushing force - Chi (氣) in hemodynamics. (The "Chi" is defined in Chinese Medicine as the vital force that irrigate blood into organs.)

The effect of organ on blood flow has not been studied in hemodynamics and Wolmersley's equation can not fully predict the experimental data in animal; some connections seem to be here. We did some experiments on organ and its simulation. We can explain the paradox of Wolmersley's equation which have puzzled us for more than 20 years and we may have answered the long inquired question in Chinese medicine "What is Chi ?" as well.