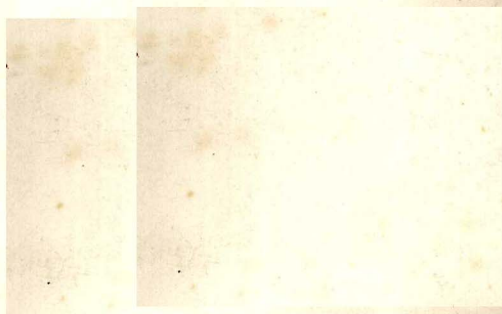


脉图的研究

—汇报材料—

(第三辑)



中国人民解放军九二医院
江西省南昌市第二医院脉图科研协作组

一九七八年十月

目 录

基础理论:

冠脉循环血流动力学的数理分析..... (1)

指示剂在血液循环中混和的原理探讨 (二) (27)

临床应用

左心室总泵力的测定及临床应用..... (34)

心脏功率的测定及临床应用..... (41)

心肌耗氧量的测定及临床应用..... (49)

冠脉必需阻抗的测定及临床应用..... (63)

冠脉外周调节机能的测定及临床应用..... (70)

临床疾病的研究——冠脉循环障碍 (一)

冠脉循环障碍的一般规律..... (77)

缺血性心脏病血流动力学变化的一般规律..... (83)

中医脉象学的研究

中医脉象形成机理的初步探讨 (三) (92)

——细弦脉的血流动力学变化分析

编后的话

$$F(t) = AP(t) - (MT(t) + BT) \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

假定冠状动脉扩张与回缩运动的速度，同介质的阻力的比例系数为 h ，按照牛顿第二定律 ($F = m \cdot a$) 可知：在一次力 (F) 的作用下，管道口径 (A) 变化的微分方程应是：

$$m \frac{d^2 A}{dt^2} = -\frac{1}{E} \cdot A - h \cdot \frac{dA}{dt} \dots\dots\dots \text{式(3)}$$

$$m \frac{d^2 A}{dt^2} + h \cdot \frac{dA}{dt} + \frac{1}{E} \cdot A = 0$$

两端各除以 m 得：

$$\frac{d^2 A}{dt^2} + \frac{h}{m} \times \frac{dA}{dt} + \frac{1}{m \cdot E} \cdot A = 0$$

令 $\frac{h}{m} = 2\delta$ ， $\frac{1}{m \cdot E} = W^2$ 代入式(3) 得：

$$\frac{d^2 A}{dt^2} + 2\delta \frac{dA}{dt} + W^2 \cdot A = 0 \dots\dots\dots \text{式(4)}$$

式(3) 是具有一对共轭根的常系数二阶线性齐次方程，按照欧拉公式 $e^{ix} = \cos x + i \sin x$ 解之得：

$$A = a \cdot \sin(W \cdot t + \phi) \dots\dots\dots \text{式(5)}$$

但作用于管壁的压力不一定是一次力 F 的作用，而是 $F = F(t)$ ，则：

$$m \frac{d^2 A}{dt^2} = F(t) - h \frac{dA}{dt} - \frac{1}{E} \cdot A$$

等式两端除以 m 得：

$$\frac{d^2 A}{dt^2} = \frac{F(t)}{m} - \frac{h}{m} \times \frac{dA}{dt} - \frac{1}{m \cdot E} \cdot A$$

令 $F(t) \div m = \phi(t)$ ， $\frac{h}{m} = 2\delta$ ， $\frac{1}{m \cdot E} = W^2$ ，代入上式得：

$$\frac{d^2 A}{dt^2} + 2\delta \frac{dA}{dt} + W^2 \cdot A = \phi(t) \dots\dots\dots \text{式(6)}$$

式(6) 为一常系数二阶导数线性非齐次方程，它具有强迫阻尼振动曲线的微分方程的形式，即：

$$\ddot{X} + 2\delta \dot{X} + w^2 \cdot X = B \cdot \sin pt \text{ 其通解是:}$$

$$X = a \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\sqrt{W^2 - \delta^2} \cdot t + \phi) + a \cdot \sin(pt + \phi)$$

由通解形式可知，它是由固有振动和外力所致的振动相结合而成。振动开始一段时间之后，固有振动逐渐消失，振动的周期和振幅就是外力的周期和振幅，运动达于稳恒状态，虽然使冠状动脉血管壁发生振动和运动的外力 $F(t)$ ，并不具有一般物理学上常见的振动外力的运动形式， $B \cdot \sin pt$ ，而是一系列特殊的曲线方程，但它仍具有上述规律，即除了在 $F(t)$ 曲线通过原点时，血管壁发生瞬时的固有振动外，其余时间血管运动的轨迹与 $F(t)$ 的轨迹是处于平衡状态之中的。对于一搏期间使血管发生运动和振动的外力 $F(t)$ 的运动周期相比较而言，血管壁固有的阻尼振动的时间是很短的，而且这种固有的阻尼振动，对于外力作用的运动的轨迹的积分值来说是无影响的，可以略而不计（如图 1 所示）所以可以把上述血管口径变化的微分方程简写成如下形式：

$$A(t) = K \cdot F(t) \dots \dots \dots \text{式 (7)}$$

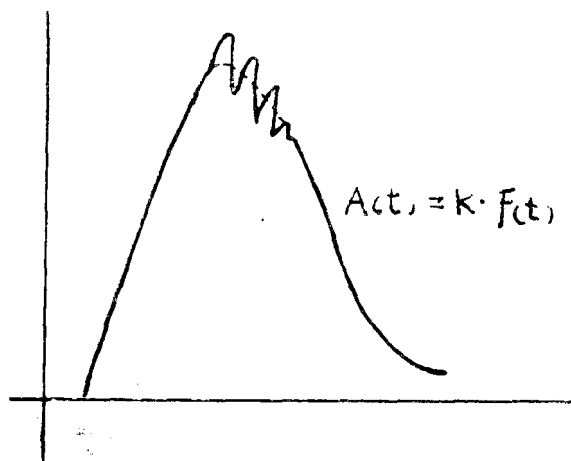


图1 固有阻尼振动, 对于 $A(t) = K \cdot F(t)$ 的积分无影响

将式 (2) 代入式 (7) 得:

$$A(t) = K[Ap(t) - (MT(t) + BT)] \dots \dots \dots \text{式 (8)}$$

式 (7) 中: $Ap(t)$ 在脉图中可以直接测量即;

$$Ap(t) = y(t) \times Ek + pd$$

BT 为常数

K 为血管的弹性模量 E 与血管在介质中运动所遇的阻力 h , 和血管壁单位面积的质量 m 的综合系数。并先假定在同一人一搏期间为常数值。

$$K = \left(\frac{1}{m \cdot E} + \frac{h}{m} \right) \times g$$

K 系数的概念是: 作用于血管壁的每一单位的压力使血管口径增大多少单位的比例系数

$$\text{即: } K = \frac{A}{F}$$

只要求出 $MT(t)$ 的方程及其变化曲线就可以求出冠状动脉口径 $A(t)$ 的变化曲线及其曲线方程式了, 以式 (1) 代入式 (8) 得:

$$A(t) = K[Ap(t) - ds \cdot cp(t) - BT] \dots \dots \dots \text{式 (9)}$$

式 (9) 为冠脉口径 ($A(t)$) 变化的一般曲线方程式, 或总的方程式

(二) 右冠状动脉口径 ($KA(t)$) 的变化曲线及其曲线方程式

由于右心室压力相对的很小, 其室内压的变化与主动脉压力的变化率相比是很小的, 那么 $MT(t)$ 的变化必然更小, 因此, 右冠状动脉口径的变化曲线与主动脉压力的变化曲线的形态必然相似 (图2)。即:

$$RA(t) \approx K \cdot (Ap(t) - BT - \overline{cp}) \dots \dots \dots \text{式 (10)}$$

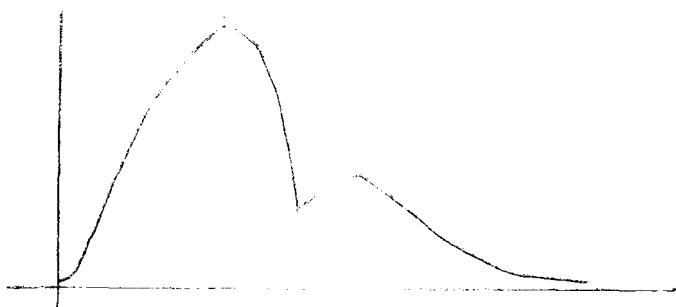


图2 右冠脉口径的变化曲线

(三) 左冠状动脉口径 ($LA(t)$) 的变化曲线及其曲线方程:

1. 喷血前期左冠状动脉口径的变化曲线及其曲线方程式:

在心肌力能变化的数理分析一文中已讨论过, 在喷血前期内左心室内压力的变化曲线为:

$$CP(t) = VP_{(e1)} \cdot (1 - e^{-VWK \cdot t})$$

将上式代入式(1)得:

$$MT(t) = ds \cdot VP_{(e1)} \cdot (1 - e^{-VWK \cdot t}) \dots\dots\dots \text{式(11)}$$

将式(11)代入式(8)得:

$$LA(t) = K \cdot [AP(t) - BT - d_{(s)} \cdot VP_{(e1)} \cdot (1 - e^{-VWK \cdot t})] \\ = K \cdot [AP(t) - d_{(s)} \cdot VP_{(e1)} + d_{(s)} \cdot VP_{(e1)} \cdot e^{-VWK \cdot t} - BT] \dots\dots \text{式(12)}$$

从式(12)中可以看出:

(1) $AP(t)$: 在 $t_{(a)} \rightarrow t_{(b)}$ 的时间间区内为脉图 b 段其变化率很小等于舒张血压 pd 可以成为一个常数 Pd 。

(2) $d_{(s)} \cdot VP_{(e1)}$ 为常数

(3) BT 为常数

(4) $d_{(s)}$ 在内心膜处应等 1, 也即是说心内膜处心肌所承受的压力等于心室内压; 在心外膜 $d_{(s)}$ 应趋近于零, 也就是说心室内压对心外膜下层的影响可以略而不计了。

因此, 此时期内冠状动脉口径变化的轨迹由 $d_{(s)} \cdot VP_{(e1)} \cdot e^{-VWK \cdot t}$ 来决定的, 其半径呈指数曲线随时间而缩小。(图 3)

2. 左心室喷血前冠状动脉口径的变化曲线方程式:

因为在此时期喷血已经开始, 心室内压力 $CP(t) = AP(t)$, 故在 $t = b$

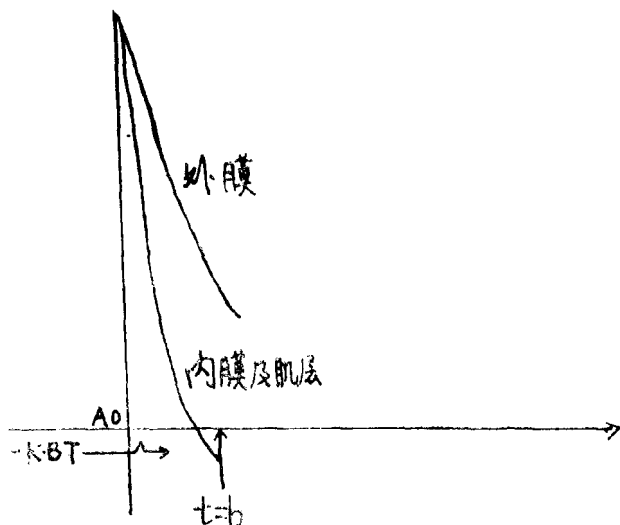


图3 喷血前期左冠脉口径变化曲线

以后直到 $t=t_{e1}$ 的时间内,

$$LA(t) = K \cdot [AP(t) \cdot (1 - d(t)) - BT] \dots \dots \dots \text{式 (13)}$$

心内膜处与心外膜处冠脉口径的变化与 $t = b$ 时相同, 即由 $LA(t) = -K \cdot BT$ 到 $LA(t) = 0$ 到 $LA(t) = K \cdot (AP(t) - BT)$ 的状态, 由心内膜到心外膜依与心内膜的距离(S)的不同而分布着。但是在心肌肌层内其张力应是相等的, 即 $LA(t) = 0$ 。

当 $t = t_c$ 以后, 由于 $\frac{dv_p}{dt} < \frac{dy}{dt}$ 所以心室内压开始逐渐下降, 心肌张力开始下降, 对于左心内膜和肌层来说, 固然仍是 $AP(t) = cp(t)$, $A(t) = -K \cdot BT$ 的状态, 但对于心外膜来说, 由于 $\frac{dv_p}{dt} < \frac{dy}{dt}$ 则使 $A(t)$ 逐渐扩大 (如图4所示)

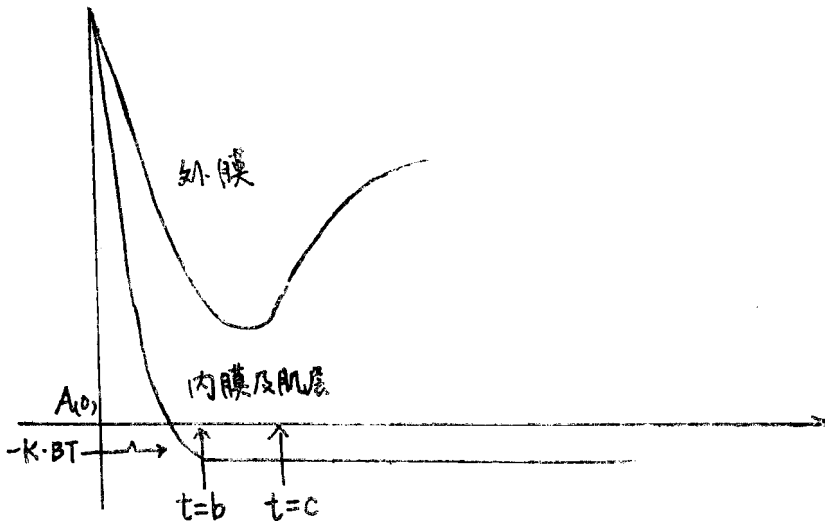


图4 喷血期左心内膜肌层及外膜的 $A(t)$ 曲线

3. 在主动膜瓣关闭前期冠状动脉口径的变化曲线及其曲线方程:

在 $t_{e1} \rightarrow t_{e2}$ 时间内, 由于心室舒张心室腔容积 ($VV(t)$) 依照 $VV(t) = VV(t_0) \cdot (1 - e^{-VWK \cdot t})$ 的方程式所规定的轨迹而扩大, 同时又发生主动脉血向左心室的返流, 自至主动膜瓣完全关闭为止, 此时, 左心室内压与主动脉压力之差的变化曲线, 正好是左心室开始喷血, 主动膜瓣开放过程中动脉压变化曲线的倒相。(如图5、图6所示, 此时左冠状动脉口径的变化曲线又正好是心室与主动膜压力差的曲线的倒相, 即与脉图 b_i 段曲线相同 (如图7所示)。(详见第四辑)

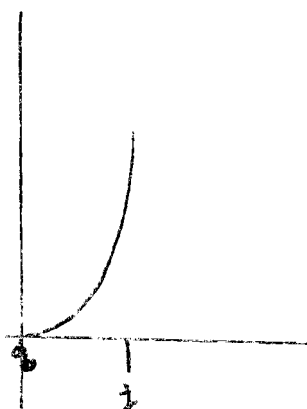


图5 脉图 b_j 段曲线

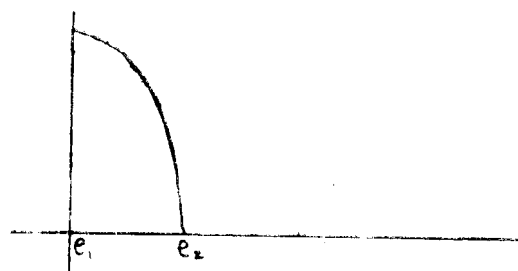


图6 $t=e_1-e_2$ 时左心室压力变化曲线。

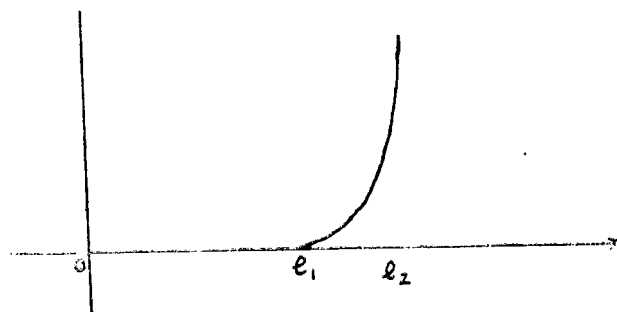


图7 $t=e_1 \rightarrow e_2$ 时间内 $A(t)$ 变化曲线

$$A(t) = K \cdot [AP(t) - d(t) \cdot AP(e_1) \cdot \frac{VWK}{VWk - Bk \cdot e^{-XK \cdot t}} \cdot (e^{-BK \cdot (e - XK \cdot t)} \cdot t - e^{-VWK \cdot t}) - BT] \dots \text{式 (14)}$$

4. 等容舒张期冠状动脉口径变化曲线及其曲线方程式:

在 $t_{e2} \rightarrow t_f$ 的时间内主动脉瓣已关闭, 房室瓣尚未开放, 此时, 左心室内压按此曲线下降:

$$CP(t) = CP(e_2) \cdot e^{-VWK \cdot t}$$

则:

$$LA(t) = K \cdot [AP(t) - d(t) \cdot CP(e_2) \cdot e^{-VWK \cdot t} - BT]$$

若令 $AP(t) = x(t) + d(t) \cdot CP(e_2)$, 从脉图中可以看出: 在 $t_{e2} \rightarrow t_f$ 的时间内, 主动脉压下降很小, 所以此时的冠状动脉口径的变化曲线近似于如下曲线方程的轨迹:

$$d(t) \cdot CP(e_2) \cdot (1 - e^{-VWK \cdot t})$$

所以:

$$LA(t) = K \cdot [d(t) \cdot CP(e_2) \cdot (1 - e^{-VWK \cdot t}) - BT - (x_{e2} - x(t))] \dots \text{式 (15)}$$

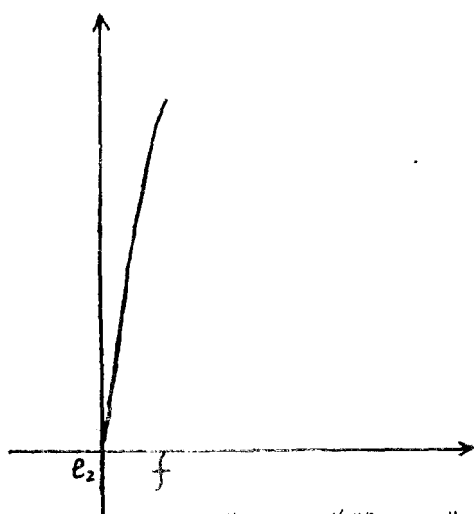


图8: 等容舒张期 $A(t)$ 曲线

5. 左心室快速充盈期冠状动脉口径的变化曲线方程式:

此左心室一方面舒张减压, 一方面左房血液的流入其室内压的变化为:

$$CP(t) = LAPX \times \left[1 - \frac{VWK}{VWK - AK(1 - AK)} \right. \\ \left. (e^{-AK(1-AK) \cdot t} - e^{-VWK \cdot t}) \right] \dots\dots\dots \text{式(16)}$$

(请参阅《脉图的研究》第四辑, “左心室压力、容量、流量变化的数理分析”一文)

与左心室内压力降低的同时, 主动脉压出 f_{gl} 高峰, 因此, 此时冠状动脉口径的变化曲线是 f_{gl} 曲线与 $cp(t)$ 曲线之和, 即将式 (16) 代入式 (19) 得:

$$LA(t) = K \cdot \left\{ AP(t) - d(t) \cdot LAPX \left[1 - \frac{VWK}{VWK - AK(1 - AK)} \right. \right. \\ \left. \left. (e^{-AK(1-AK) \cdot t} - e^{-VWK \cdot t}) - BT \right] \right\} \dots\dots\dots \text{式(17)}$$

6. 左心室缓慢充盈期冠状动脉口径变化曲线及其曲线方程式:

当心室舒张停止房室压力达到相等左心室的压力可以看成是常数, 因肺静脉引流的量是很小的, 所以, 此时, 冠状动脉口径的变化曲线与脉图 $L-a$ 段相同。其曲线方程式如下:

$$LA(t) = K \cdot \left[y(t) e^{-\frac{BK}{1-EtK} \cdot t} - d(t) VDP - BT \right] \dots\dots\dots \text{式(18)}$$

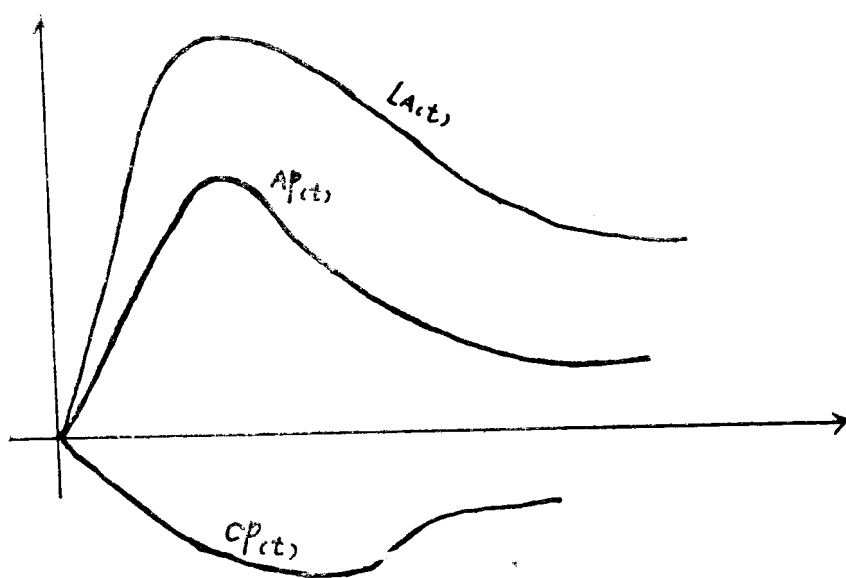


图9 快速充盈及缓慢充盈期的 $LA(t)$ 、 $AP(t)$ 及 $CP(t)$ 曲线

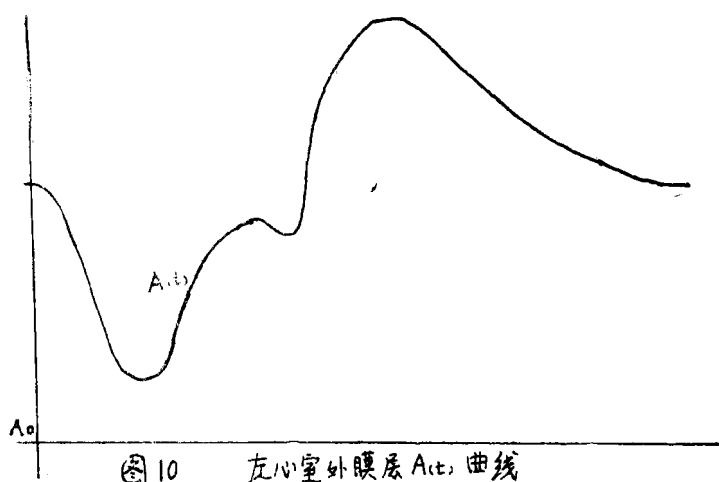


图10 左心室外膜层 $A(t)$ 曲线

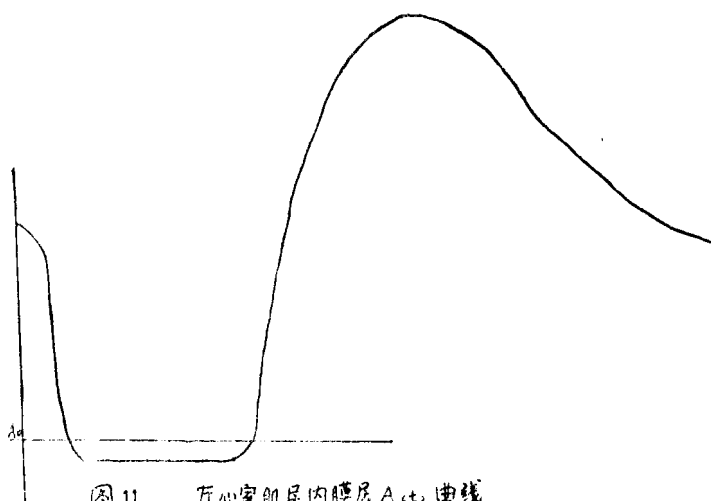


图 11 左心室肌层内 A. (t) 曲线

二、冠状动脉流量变化曲线及其曲线方程式

(一) 冠状动脉血流量曲线方程式的推导:

冠状动脉血流量的变化与其他一切粘滞流体在管道中流动一样, 是服从于一个普遍的规律的, 即 *Poisuille* 氏所阐明的定律:

$$Q = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot (P_1 - P_2)}{8 \cdot \eta \cdot L}$$

式中: Q 为流量

π 为圆周率

$p_1 - p_2$ 为管道两端压力差, 这里 p_1 代表升主动脉压。

p_2 为右心房压力

r 为管道半径

L 为管道长度

η 为血液粘滞性

在人体冠状动脉循环中, Q 、 r 、 P_1 、 P_2 均是变量, η 、 L 在成年个体可以看成常量, 但在不同个体不同时间仍是变量, 在血液粘滞系数发生改变的病理情况, η 仍是必需测定的量。 L 与心脏体积大小有关, 因此 *Pisueue* 公式可以写成:

$$Q(t) = \frac{\pi \cdot r(t)^4 \cdot (p_1(t) - p_2(t))}{8 \eta \cdot L} \dots \dots \dots \text{式 (18)}$$

因为:

$$\textcircled{1} \quad \pi r^4 = \frac{\pi^2 \cdot r^4}{\pi} = \frac{A^2}{\pi} \dots \dots \dots \text{式 (19)}$$

② 通常情况下, 右心房压力很低, 变动量很小。

所以:

$$p_1 - p_2 \approx \Delta p(t)$$

式 (18) 只有在血管外压力等于零时才适用, 在人体冠状动脉处于心肌张力 $MT_{(t)}$ 及血管自身收缩力 BT 作用的情况下, 其压力 $(P_1 - P_2)$ 应改为 $F_{(t)}$

③在 $F_{(t)}$ 作用于冠状动脉口径自身扩大了 $K \cdot F_{(t)}$, 那么, 血管床容积的扩大就反过来成为减压因素。

因此:

$$(P_1 - P_2) = F_{(t)} - K \cdot F_{(t)} = F_{(t)} \times (1 - K) \dots \dots \dots \text{式 (20)}$$

④在 $F_{(t)}$ 的力作用下, 血管口径增大了 $A_{(t)}$, 必需加入上式 (18)。

因此: 式 (18) 改写为:

$$\begin{aligned} Q_{(t)} &= \frac{A_{(t)}^2 \times (AP_{(t)} - d_{(s)} \cdot cp_{(t)} - BT) \times (1 - K)}{\pi \cdot 8\eta \cdot L} \\ &+ \frac{A_{(t)} \times (AP_{(t)} - d_{(s)} \cdot cp_{(t)} - BT) \times (1 - K)}{8\eta \cdot L} \\ &= \frac{(A_{(t)}^2 + A_{(t)}) \times (1 - K) \times (AP_{(t)} - d_{(s)} \cdot cp_{(t)} - BT)}{\pi \cdot 8\eta \cdot L} \dots \dots \text{式 (21)} \end{aligned}$$

由于 $A_{(t)}$ 与 $F_{(t)}$ 是同向的, 与 $KF_{(t)}$ 是反向的, K 值很小, 而且 $\frac{dA_{(t)}}{dt}$ 与 $A_{(t)}$ 相比较, $K \cdot \frac{dF_{(t)}}{dt}$ 与 $F_{(t)}$ 相比较, 前者很小很小, 可以忽略。将 $A_{(t)}^2 \div \pi \cdot 8 \cdot \eta \cdot L$ 定为常数 C , 则具有与 $A_{(t)} = K \cdot F_{(t)}$ 相同的形式:

$$Q_{(t)} \simeq C \cdot F_{(t)}$$

因此, 冠状动脉血流量, 在不同部位 (左右心室、内膜层, 肌层与心外膜层) 不同时间的时相变化, 其曲线、形态与前述冠脉口径变化曲线类同。将各心动周期时相的 $AP_{(t)}$ 及 $cp_{(t)}$ 值代入式 (21), 即得冠状动脉血流量时相性变化的曲线方程组:

1. 左冠状动脉血流量的曲线方程式:

(1) 喷血前期:

$$Q_{(t)} = \frac{A_{(t)}^2 \times [pd - d_{(s)} VP_{(s)} (1 - e^{-VWK \cdot t}) - BT]}{\pi \cdot 8\eta \cdot L} \dots \dots \dots \text{式 (22)}$$

(2) 喷血期:

$$Q_{(t)} = \frac{A_{(t)}^2 \times [AP_{(t)} \cdot (1 - d_{(s)}) - BT]}{\pi \cdot 8\eta \cdot L} \dots \dots \dots \text{式 (23)}$$

当 $AP_{(t)} = cp_{(t)}$, $d_{(s)} = 1$ 时, $Q_{(t)} =$ 负值出现冠状动脉血液返流。

当 $AP_{(t)} (1 - d_{(s)}) = BT$ 时, $F_{(t)} = 0$, 则 $A_{(t)} = 0$, $A_{(t)} = 0$, 血流量 $Q_{(t)} = 0$

(3) 主动脉瓣关闭前期:

$$Q_{(t)} =$$

$$\frac{A_{(t)}^2 \times \left\{ AP_{(t)} - d_{(s)} \cdot cp_{(t)} \left[1 - \frac{VWK}{VWK - BK} \cdot e^{-XK \cdot t} (e^{-EK} - (e^{-XK \cdot t}) \cdot t - e^{-VWK \cdot t}) \right] \right\}}{\pi \cdot 8\eta \cdot L} \dots \dots \dots \text{式 (24)}$$

因此期 $F_{(t)}$ 很小, $A_{(t)} = 0$, A 由 $0 \rightarrow A_{(t)}$ 所以 $Q_{(t)}$ 量很小, 则 $\frac{dQ}{dt}$ 更小

(4) 等容舒张期:

$$Q_{(t)} = \frac{A_{(0)}^2 \times (AP_{(t)} - d_{(0)} \cdot AP_{(0)} e^{-VWK \cdot t} - BT)}{\pi \cdot 8\eta \cdot L} \dots\dots\dots \text{式 (25)}$$

(5) 快速充盈期:

$$Q_{(t)} =$$

$$\frac{A_{(0)}^2 \times \left\{ AP_{(t)} - d_{(0)} \times LAPX \left[1 - \frac{VWK}{VWK - AK(1 - AK)} (e^{-AK(1 - AK) \cdot t} - e^{-VWK \cdot t}) - BT \right] \right\}}{\pi \cdot 8\eta \cdot L}$$

\dots\dots\dots \text{式 (26)}

(6) 缓慢充盈期:

$$Q_{(t)} = \frac{A_{(0)}^2 (AP_{(t)} - d_{(0)} \cdot VDP - BT)}{\pi \cdot 8\eta \cdot L} \dots\dots\dots \text{式 (27)}$$

左冠状动脉灌流量曲线与左冠脉口径 ($A_{(t)}$) 曲线图10相似。

2. 右冠状动脉血流变化曲线方程式:

由于右心室压力很低, 其变化率与主动脉压力相比是微不足道的, 可以把它看成一个常数 (右室压均值 $\bar{c}p$)。

$$Q_{(t)} = \frac{A_{(0)}^2 \times (AP_{(t)} - d_{(0)} \cdot \bar{c}p_{(t)} - BT)}{\pi \cdot 8\eta \cdot L} \dots\dots\dots \text{式 (28)}$$

因此: 右冠状动脉血流变化曲线与主动脉血压变化曲线类同:

(二) 冠状动脉血流量计算方程式及冠状动脉阻抗的分析

1. 冠状动脉灌流量计算式的推导:

冠状动脉流量系定义为每分钟冠状动脉灌流量, 即每搏期间冠脉灌流量 (Q) $\times$ 心率 (HK)。

假定: 当 $AP_{(t)} - d_{(0)} \cdot \bar{c}p_{(t)} = BT$ 时, 冠状动脉的口径为 $A_{(0)}$, $Q = Q_{(0)}$ 。在某一时间 $t + dt$ 时,

$$AP_{(t)} - d_{(0)} \cdot \bar{c}p_{(t)} - BT = dF$$

从而, 使冠脉口径发生 $A_{(0)} \pm dA$ 的变化, $dA = KdF = df$, 由于管道的扩张所产生的张力, 就是管道内液体的压力在管壁中的贮存, 因管道扩大一个 dA , 就等于管内液压减小一个 df , 即 $dA = -df$ 。因此式 (21) 可以改写成:

$$Q_{(0)} + dQ = \frac{(A_{(0)} + dA)^2 \cdot (F_{(t)} - df)}{\pi \cdot 8\eta \cdot L} \dots\dots\dots \text{式 (29)}$$

从每搏期间 $Q_{(t)}$ 的积分值来看: 冠状动脉口径从 $A_{(0)}$ 增至 $A_{(\infty)}$, 又从 $A_{(\infty)}$ 减至 $A_{(0)}$, 呈周期性和时相性的变化着。假定, 在 $A_{(t)} = A_{(\infty)}$ 时, $t = \bar{t}''$, 当 $A_{(t)}$ 由 $A_{(\infty)}$ 又降呈 $A_{(0)}$ 的时间为 x , 则 $\int_0^{\bar{t}''} dA + \int_{\bar{t}''}^x (-dA) = 0$ 同理, $\int_0^{\bar{t}'} df + \int_{\bar{t}'}^x (-df) = 0$; 假定一搏期间的冠状动脉血流量为 $Q = Q_{(0)} \cdot t + \int_{Q_{(0)}}^x$

$$Q = \frac{A_{(0)}^2 \cdot \int F_{(t)} dt}{\pi \cdot 8\eta \cdot L}$$

将 $F(t)$ 代入上式得:

$$Q = \frac{A(t)^2 \cdot [\int AP(t) dt - ds \int cp(t) dt - BT]}{\pi \cdot 8\eta \cdot L} \dots\dots\dots \text{式 (30)}$$

2. 冠状动脉阻抗的分析:

将式 (30) 进行移项得:

$$\frac{8\eta \cdot L \cdot \pi}{A(t)^2} = \frac{\int AP(t) \cdot dt}{Q} - \frac{d(t) \int cp(t) dt}{Q} - \frac{BT}{Q} \dots\dots\dots \text{式 (31)}$$

再将式 (31) 移项得:

$$\frac{8\eta \cdot \pi \cdot L}{A(t)^2} + \frac{BT}{Q} = \frac{\int AP(t) dt}{Q} - \frac{d(t) \int cp(t) dt}{Q} \dots\dots\dots \text{式 (32)}$$

等式左端为冠状动脉自身的状况所决定的, 并且依据阻抗 = $\frac{\text{压力}}{\text{流量}}$ 的公式可知, 等式左端为阻抗, 称为冠脉内固有阻抗 (CPR)。

再将式 (32) 移项并将 CPR 代入得:

$$CPR + \frac{d(t) \cdot \int cp(t) dt}{Q} = \frac{\int AP(t) dt}{Q} \dots\dots\dots \text{式 (33)}$$

已知: $\int AP(t) \cdot dt$ 是主动脉内压力的积分式, 即所谓冠状动脉灌注压力的积分。若令冠状动脉的总阻抗为 CRT 的则:

$$CRT = \frac{\int AP(t) dt}{Q} \dots\dots\dots \text{式 (34)}$$

将式 (33) 代入式 (34) 得:

$$CRT = CPR + \frac{d(t) \int cp(t) dt}{Q} \dots\dots\dots \text{式 (35)}$$

可见: $\frac{d(t) \cdot \int cp(t) dt}{Q}$ 也是一种阻抗, 它是由左心室内压所决定的, 是冠状动脉血管之外的因素, 称之为冠脉外阻抗 ECK。

综上所述, 冠状动脉阻抗可分为三种类型:

(1) 冠脉总阻抗:

$$CRT = \frac{\int AP(t) dt}{Q} \dots\dots\dots \text{式 (36)}$$

(2) 冠脉外阻抗:

$$ECK = \frac{\int cp(t) dt \cdot d(t)}{Q} \dots\dots\dots \text{式 (37)}$$

(3) 冠脉内固有阻抗:

$$CPR = \frac{8\eta \cdot \pi \cdot L}{A(t)} + \frac{BT}{Q} = CRT - ECK \dots\dots\dots \text{式 (38)}$$

(三) 讨论:

1959年 Gregg·D·E⁽²⁾ 用口径测量计, 所测得的左右冠脉不同的流量曲线, (图13) 与本文对冠状循环进行数理分析所得出的冠状动脉口径变化, 与冠脉流量变化的理论曲线是相同的。其左冠脉流量曲线, 是左心室外膜的流量曲线, 同心内膜和深部肌层的流量曲线相合

而成，喷血期出现的峰形曲线是外膜部位的血流量所造成。其右冠状动脉血流量曲线，类似主动脉压力曲线。*gregg·D·E*的实验，直接证实了本文对冠脉流量及冠脉口径变化的数理分析。反之，对冠状动脉血管口径变化曲线及灌流量变化曲线的分析，和使用它的基本方程，式(9)就可以解释*gregg·D·E*氏在动物实验中所测得的冠脉流量曲线，为什么在同一主动脉压力曲线的作用下，左右冠状动脉血液流量曲线完全不同？其根本原因是由心室内压和心肌张力的不同所决定的。在喷血前期，由于左心室内压由低于主动脉内压，到等于主动脉内压时，左心室心肌（特别是中层及内膜层心肌）的张力及冠脉平滑肌的张力之和，大于主动脉的灌注压力，则该层左冠状动脉受挤压，被动闭塞，不仅血流停止，而且将冠脉血管床中的血液挤空，所以出现该层左冠脉流量急剧下降，直至出现逆流现象，而左室外膜层的冠脉血管床，由于受心室内压的影响较肌层小，故喷血前期血流量下降的程度比肌层小。在整个喷血期，左心室肌层内膜冠脉血流均是停止的，在 $t=c$ 以后，由于心肌收缩速度 dv/dt 小于心内压，减压速度 $-\frac{dcb}{dt}$ 故左心室外膜层冠脉血管口径渐渐增大，血流也逐渐增加，但它并非由于“喷血后期主动脉压增高的结果”，因喷血后期，（在 $t=c$ 以后）主动膜压不是上升而是下降，只不过此时的 $VK \cdot V(t) < BK \cdot V(t)$ 罢了。由于在收缩期，右心室内压的增高比较小，且永远低于主动脉压，故右冠状动脉灌流曲线以变化率较小于主动脉压的形态与主动脉压力曲线近似的出现灌流的高峰，在舒张期，由于左室减压的变化率 $(-\frac{dcb}{dt})$ 比右心室大得多，故左心室灌流曲线比右心室的上升速度要大得多。

表面上看来，左右冠状动脉血流量曲线不同，实际上，它是由主动脉压与心室内压这对矛盾的力的变化曲线所决定的，因此，从解剖上看：

①左心室后壁的基底部分及室间隔的后1/3部的血液供应，纵然来自右冠状动脉，但该部位冠脉血液灌流量的变化规律必然与左冠状动脉所分布的左心室前壁、侧壁与室中隔前2/3部的冠脉血液灌流量的变化规律相同。

②左心室内膜层，肌层与外膜层同是受左冠状动脉所支配，但其冠脉血流灌注量的变化规律却不相同，这就是为什么在临床上除了栓塞外，右心室不发生心肌梗塞，而左心室后壁及后中隔却可以发生心肌梗塞，其原因就在于此。

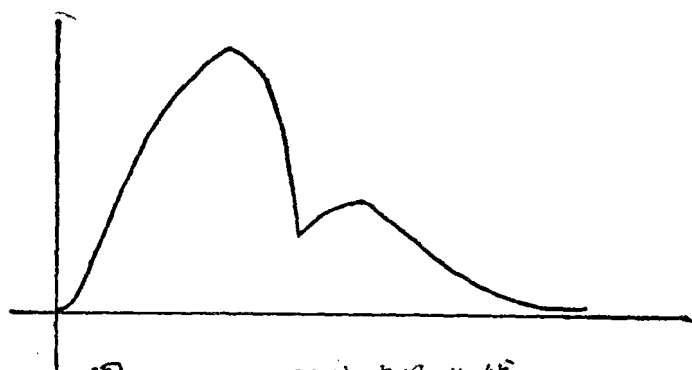


图12. 右冠脉流量曲线

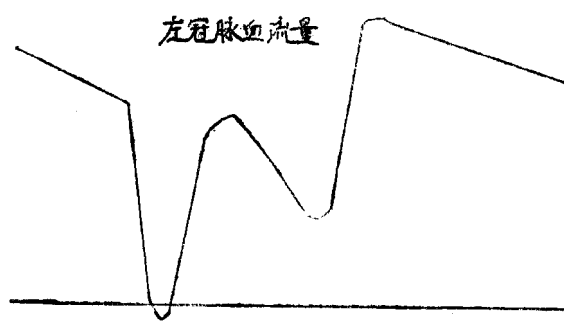


图12 A

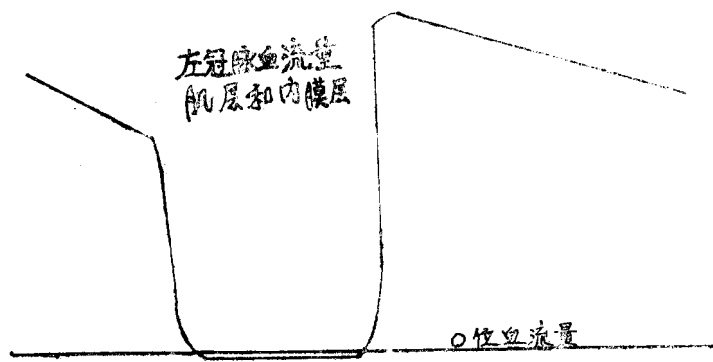


图12 B

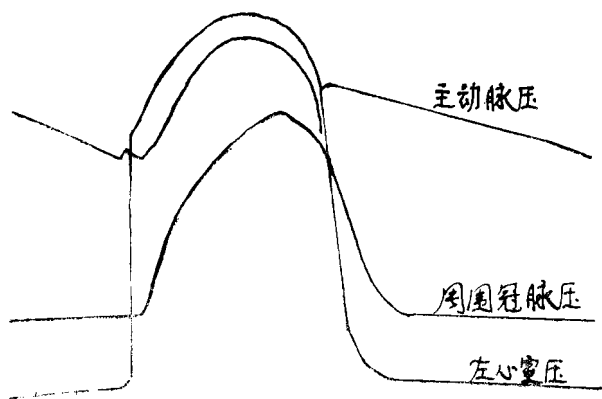


图12 C



图 12 D

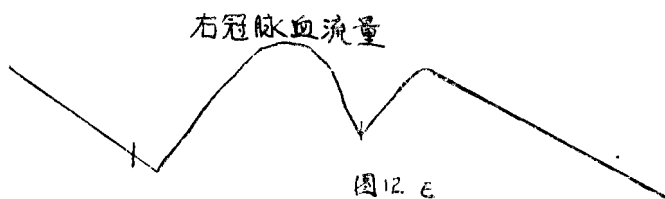


图 12 E

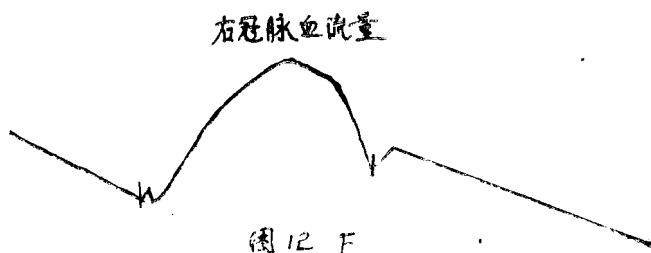


图 12 F

图12 左右冠脉血流量的时相性变化，与主动脉压、心室压和周围冠脉压力的关系曲线

(引自“医学生理学基础”——〔美〕C.H.倍斯脱 N.B.泰勒 主编P341页)

三、冠状动脉循环的血流动力学数控方程体系

维持心肌需氧量需血量和冠状动脉灌流量之间，严密精确的动态平衡是冠状动脉循环功能调节的中心任务。这种极其严密精确的生理功能的调节，实际上是一种生物学的极其精确的数控关系，本文是从血流动力学角度，去研究冠状动脉循环的生理功能调节自动控制的数控方程体系，作为定量的循环生理的基础，至于像神经体液等其他系统怎样定量调节血流动力学诸因素的向量。（即该因素变化的方向——正或负，以及它的变化率 $\frac{dy}{dt}$ ）的方程体系，则是神经、体液功能动力学的研究任务了。

本文所用的符号及其方程式如下：

VDV：左室舒张末期容量：

$$VDV = Cf \times VR \cdots \cdots \cdots \text{式 (39)}$$

Cf: 每搏心输出量:

$$Cf = BK \times \int_b^{b'} y_{(t)} \cdot dt \times r (= \{A \times EK \times BK \times r\}) \dots\dots\dots \text{式 (40)}$$

VR: 左心室喷血阻抗:

$$VR = (1 - BK) \div [(1 + EtK) \times BK] \dots\dots\dots \text{式 (41)}$$

EtK: 动脉血管床弹性扩张系数:

$$EtK = \left(\int_b^{b'} y_{(t)} \cdot dt \times (1 - BK) - \int_b^{e_1} y_{(t)} \cdot dt \right) \div \int_b^{e_1} y_{(t)} \cdot dt \dots\dots \text{式 (42)}$$

BK: 主动脉排空系数:

$$BK = \left[\int_b^{b'} y_{(t)} \cdot dt \times e_1 \times 1 \div \left[\int_b^{b'} y_{(t)} \cdot dt \times e_1 \times 1 + \int_b^{e_1} y_{(t)} \cdot dt \times \int_{e_1}^{b'} y_{(t)} \cdot dt \right] \right] \dots\dots\dots \text{式 (43)}$$

PK: 毛细前动脉括约肌压力梯度系数:

$$PK = Pd \div PPM \dots\dots\dots \text{式 (44)}$$

PR: 毛细前动脉括约肌阻抗:

$$PR = PK + 1 \dots\dots\dots \text{式 (45)}$$

PPm: 动脉平均脉压:

$$PPm = \int_b^{b'} y_{(t)} \cdot dt \div bb' \dots\dots\dots \text{式 (46)}$$

RB: 动阻抗:

$$RB = 1 \div BK \dots\dots\dots \text{式 (47)}$$

RT: 总阻抗:

$$RT = PR \times RB \dots\dots\dots \text{式 (48)}$$

Cm_o: 心肌耗氧量:

$$Cm_o = CF_m \times p_{s_m} \times (1 + WRK) \times \frac{e}{EWK} \dots\dots\dots \text{式 (49)}$$

CmB: 心肌需血量:

$$CmB = Cmo \times K \dots\dots\dots \text{式 (50)}$$

Psm: 平均收缩压:

$$\int_b^{e_1} y_{(t)} \cdot dt \div be_1 + pd \dots\dots\dots \text{式 (51)}$$

EWK: 心肌能量有效利用率:

$$EWK = 1 \div (VR + 1) \dots\dots\dots \text{式 (52)}$$

VWK: 心肌有效作功力变化系数:

(从略)

DVP舒张期左室内压:

$$DVP = VRV \div (VWK \times 1.154) + LAPX \cdot \left(\frac{1}{1 - AK} - \frac{1}{VWK} \right) \dots\dots\dots \text{式 (53)}$$

PdV: 压力梯度容量:

$$PdV = PR \times cf \dots\dots\dots \text{式 (54)}$$