

第四节 回旋流变技术在人类血液系统中的应用： 切变率三角波作用下的滞后环与屈服应力直接测定

本节叙述回旋流变技术在血液系统中的应用：切变率三角波作用下的血液滞后环与屈服应力直接测定。这节属于进入动态流变学测定技术。

1 滞后环技术与揭示物质的触变性与粘弹性不可分隔

物质的触变性源自于希腊文“Thixis”和“Trepo”两字的组合，前者意思是“接触”，后者意思是“变化”，流变科学工作者把之合并为“Thixotropy”作为“触变性”这个新词，并定义为：当一机械外应力把某种物质给以搅动时，该物质会发生等温性地从有序结构向无序结构方向作改变；当这一机械外应力撤销以后，该物质又会有在一定程度上从新产生的无序结构状态又复原为原先的有序结构。因此在外应力与切变率的滞后环上，会出现顺时针形态的环状曲线环，所以通过滞后环的观察可以了解到物质触变性行为。

至于物质的粘弹性，是指某些物质的双重性，即既具有黏性的一面，也具有弹性的一面。黏性是液体的性质，在机械外应力的作用下液体发生了变形并产生了流动，这种变形性也好或流动性也好，当机械外应力撤销以后，是不会使液体回复原来状态的（即俗语所说“泼出去的水是收不回的”）；弹性是固体的性质，在机械外应力的作用下固体发生了变形，当机械外应力撤销以后，固体可以回复原来状态的（如弹簧用手拉长以后，放手后可以缩会原来形状）。而在物质世界中，有很多物质是介于液体与固体之间，既具有黏性又具有弹性，科技工作者称之为粘弹性物质。在外应力与切变率的滞后环上，会出现逆时针形的曲线环，所以通过滞后环也可以了解到物质粘弹性行为。本文根据本课题组以往发表的英文文献[1、2]为基础写出的，企图介绍如何将血液滞后环、触变性与粘弹性的理论与技术对健康人、冠心病与缺血性中风病人的情况作比较。

2 切变率三角波值多水平的设计

力学滞后环的实验条件要有切变率三角波的设计。为了对血液的检测，要进切变率三角波值多水平的试探性预实验，要仪器有多重切变率三角波的设计。

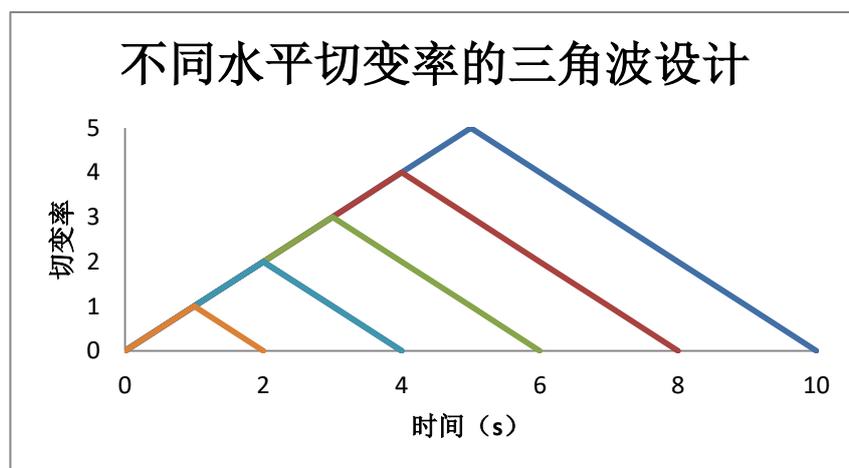


图 1 示多重水平波值的切变率三角波的示意图。纵坐标是切变率三角波的波值（s⁻¹）上下走向，横坐标是波值上下所进行的时间(s)走向。

3 多重水平波峰的切变率三角波及其操作方法

本课题组实验室利用了来自上海航天局新跃仪表厂由矫树魁高级工程师为首研制的 HT、TM 新型流变仪（该仪器的研制成功，曾经在 1986 年获上海市政府科学技术进步一等奖）。该仪器可用计算机软件安排多重波值水平的切变率三角波。

其操作方法为将 0.5 ml 血液样品放入流变仪的外圆筒的测量杯中，测量杯内芯是筒锥型，调节内芯是筒锥尖端与外圆筒平底的规定间隔为 10 微米。处于内芯筒锥与外圆筒之间的血液样品，首先用 80s^{-1} 的切变率转动外圆筒 80s 的时间，然后停止静置 80s 的时间（这一过程称之为正式测定血液样品前的预处理，其目的在于让血液样品忘记过去所经历的轻摇与静放的力学作用历史，而让它仅仅记住刚刚的预处理的力学状态）。然后进行血液滞后环的测定，测定的方法如下：将一个三角单波切变率作用于血液样品上，以 0.625s^{-2} 的速度，在规定的时间内（即 $\text{切变率 } \text{s}^{-1} / 0.625 \text{ s}^{-2}$ ），内由切变率 0s^{-1} 以上述速度的匀速方式增加至切变率的峰值，再以同样的速度负值（ -0.625s^{-2} ）与时间由此峰值下降至 0s^{-1} 的切变率，同时由计算机软件控制采样与记录下时间(s)、切变率 (s^{-1})、切应力(注意： $1 \text{ dyne/cm}^2 = 100 \text{ mPa}$)、温度($^{\circ}\text{C}$)等数值（实时采样的速度为每秒采样 30 点），作后续作图与数据处理。

4 以多重水平的切变率三角波对人体血液滞后环曲线形态的观察

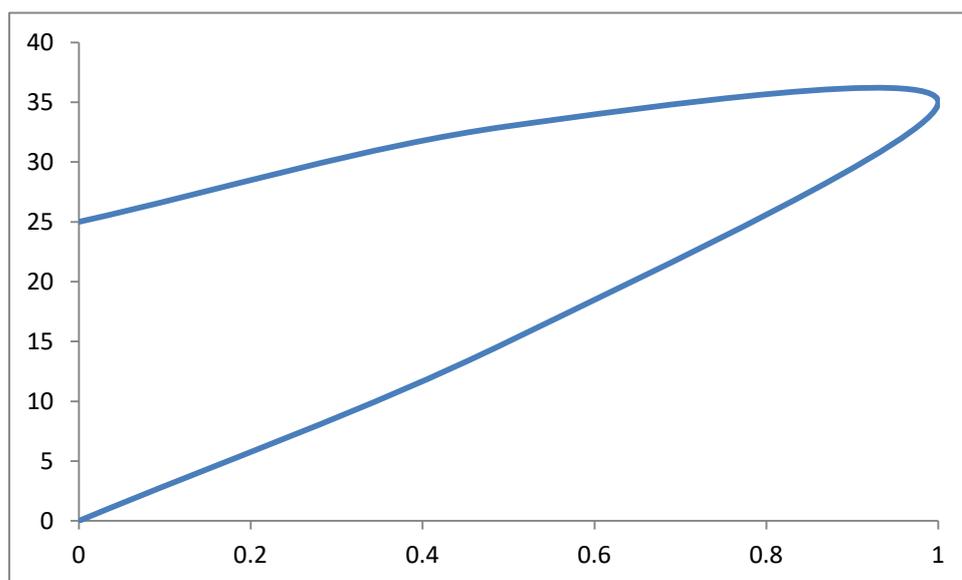


图 2 血液滞后环在三角波 $0-1-0\text{s}^{-1}$ 作用下的曲线形态，是一个逆时针的粘弹性滞后环（横坐标单位为 s^{-1} ，纵坐标单位为 mPa ）。

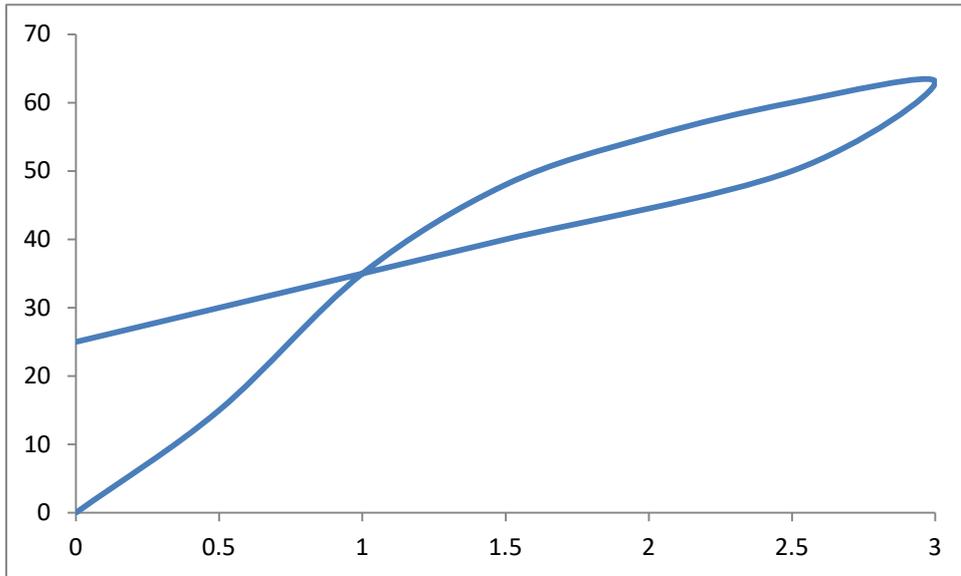


图 3 血液滞后环在三角波 $0-3-0s^{-1}$ 作用下的曲线形态，出现“8”字形的滞后环，靠近原点 0 处的滞后环是一个逆时针的滞后环，示血液具有粘弹性情况；坐标系右上方是一个顺时针的触变性环，示血液具有触变性（横坐标单位为 s^{-1} ，纵坐标单位为 mPa）。

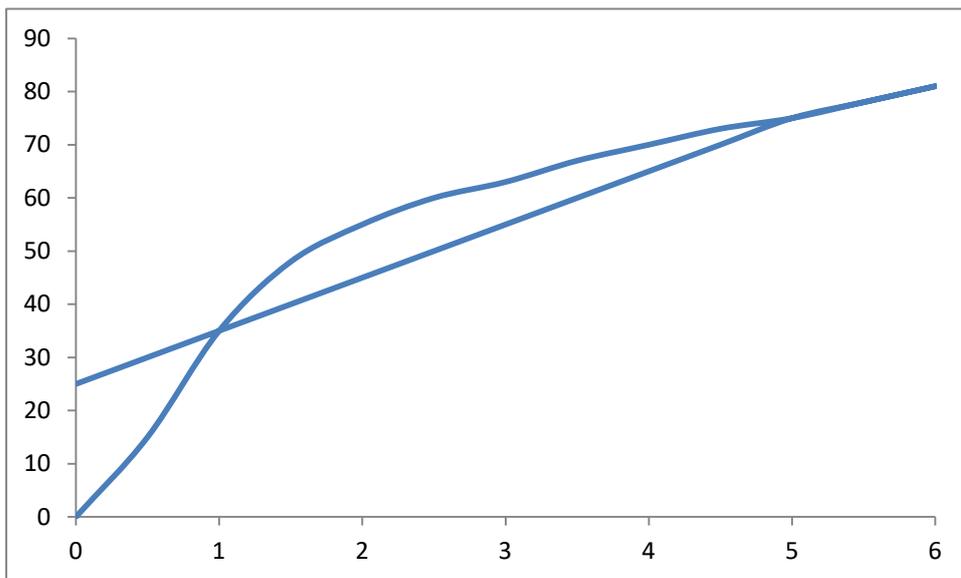


图 4 血液滞后环在三角波 $0-6-0s^{-1}$ 作用下的曲线形态完整示出“8”字形状的滞后环，靠近原点 0 处的滞后环是一个逆时针的滞后环，示血液具有粘弹性情况；坐标系右上方是一个顺时针的触变性环，示血液具有触变性。而且上升线与下降线开始并拢（横坐标单位为 s^{-1} ，纵坐标单位为 mPa）。

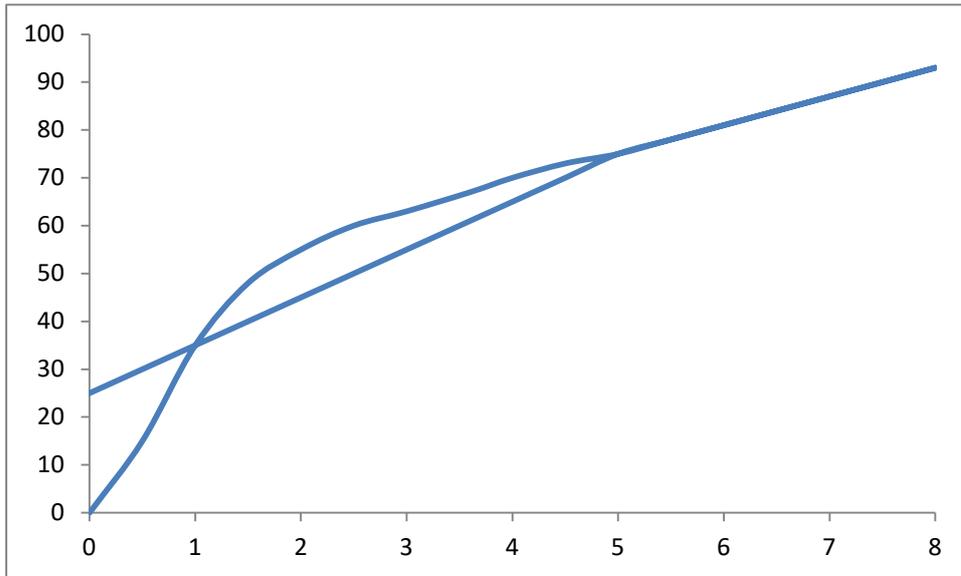


图 5 血液滞后环在三角波 $0-8-0s^{-1}$ 作用下的曲线形态，示曲线形态不仅完整示出“8”字形状的滞后环，靠近原点 0 处的滞后环是一个逆时针的滞后环，示血液具有粘弹性情况；坐标系右上方是一个顺时针的触变性环，示血液具有触变性，而且上升线与下降线已经进一步并拢，滞后环已经不再出现（横坐标单位为 s^{-1} ，纵坐标单位为 mPa ）

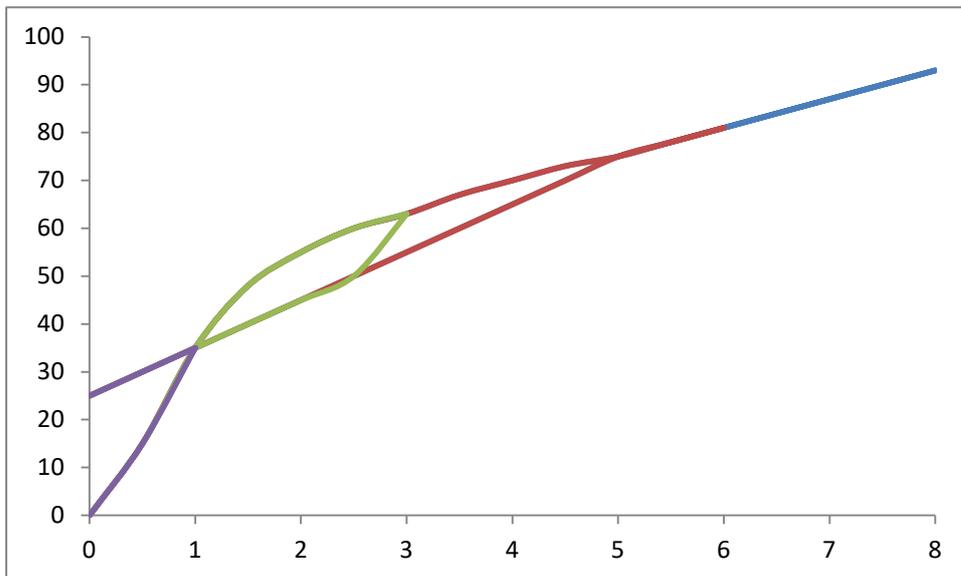


图 6 将图 2 ~ 5 合并为一的情景（横坐标单位为 s^{-1} ，纵坐标单位为 mPa ）

从图 2 至图 6 的情况说明，在很低的切变率 $1 s^{-1}$ 或以下出现逆时针包围的粘弹性滞后环，在切变率 1 至 $5s^{-1}$ 出现顺时针包围的触变性滞后环， $5s^{-1}$ 以上即出现滞后环消失，变成上下线重叠的无滞后环，此时已经显示类似牛顿流体性质，从图 2 ~ 6 可以说明要获得完整的滞后环应该选择 $0-5-0s^{-1}$ 的三角波水平为优。本文就采用这建议研究了健康人、冠心病病人、缺血性中风病人的血液滞后环的实验研究。

5 对人体血液滞后环曲线一般形态与特征数值做分析：

5.1 一般人体血液滞后环曲线形态：

如图 7 所示，是一个“8”字形状的血液滞后环。

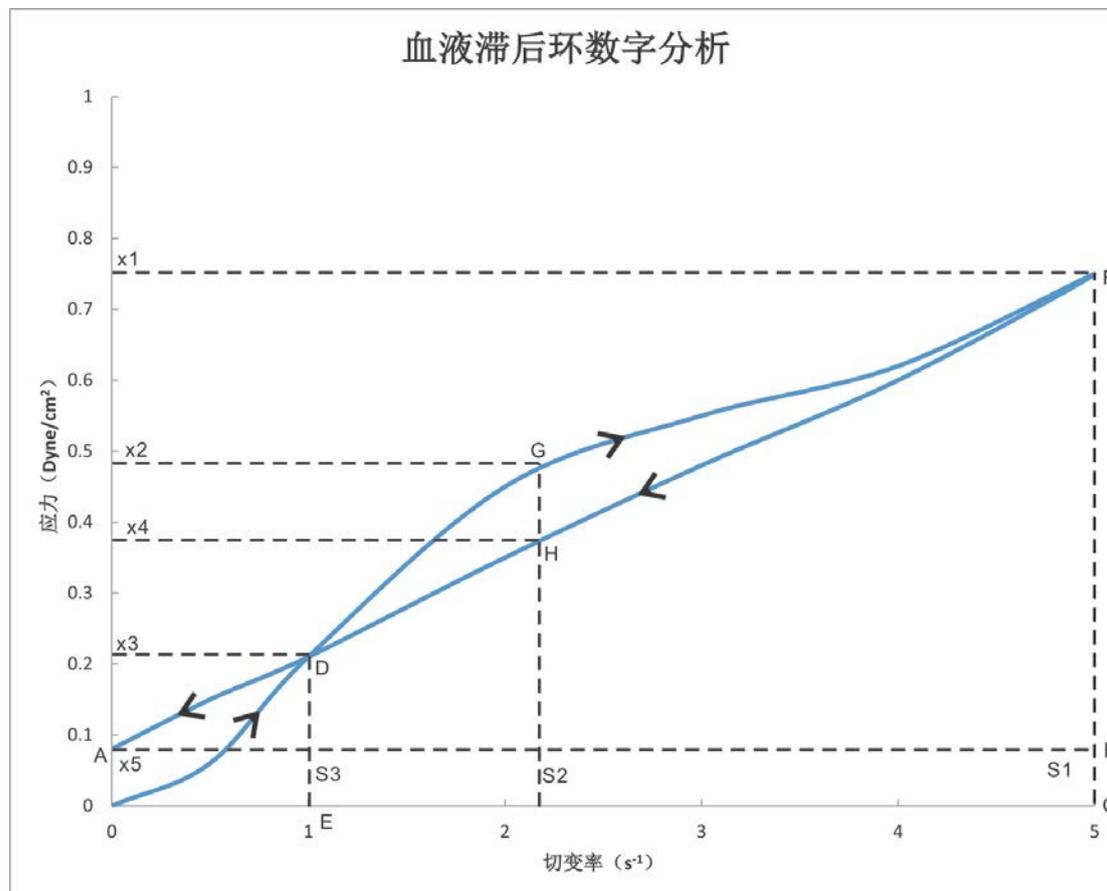


图 7 在三角波切变率为 $0-5-0 \text{ s}^{-1}$ 控制下一般血液滞后环曲线形态与特征数值分析见下文（横坐标为切变率，单位为 s^{-1} ；纵坐标为应力，单位为： dyne/cm^2 ）。

根据该仪器的主设计者矫树魁高级工程师的计算机软件执行的内容如下：

5.1.1 滞后环数目与名称：“8”字形的环有上、下各一个环：

上环：靠近坐标系的右上方，曲线走向是顺时针转的，根据流变力学理论，属于触变性环，血液消耗外应力提供的能量，将血液的缢钱体结构驱散为单个红细胞或较小的缢钱体块的行为表达。

下环：靠近坐标系的原点 0 处，曲线走向是逆时针转的，根据流变力学理论，属于粘弹性环，血液将驱散的的缢钱体红细胞重新形成较大的缢钱体结构，而且吸收与保存了外应力提供的能量（静止后将以热能的形式释放于环境中）。

5.1.2 特征切变率(s^{-1})数值有：

S1：三角波切变率到达的峰值(5s^{-1})。

S2：触变性环上升与下降曲线之间切应力差值最大时的切变率数值（每样品据实际数据确定的）。

S3：粘弹性环与触变性环交界点的切变率（即上升线与下降线交点的切变率，每个样品根据实际数据确定的）。

5.1.3 特征切应力(dyne/cm^2)数值有:

X1: 三角波切变率的峰值 (S_1) 时的血液所产生的切应力峰值。

X2: 切变率 S_2 处的触变性环上升曲线的切应力值。

X3: 粘弹性环与触变性环交界点切变率 (S_3) 处的切应力数值。

X4: 切变率 S_2 处的触变性环下降曲线的切应力值。

X5: 滞后环下降线回复至切变率为 0s^{-1} 时的切应力(即为直接测定屈服应力数值)。

5.1.4 滞后环曲线所围的面积(示能量的功率密度, 单位为 erg/s/cm^3)数值有:

E(T): OADO 血液触变性环所围的面积, 示外应力如何驱散红细胞缢钱体为单个红细胞或较小的缢钱体时, 所耗散能量的功率密度。

E(E): DGFHD 血液粘弹性环所围的面积, 示在低切变率下驱散的单个红细胞或较小缢钱体又重新形成缢钱体储存能量的功率密度(说明: 此储存能量的功率密度在实验结束后静止过程中以热能的形式散发在环境中)。

E(G): OCFHDAO 血液转动总消耗能量面积。它包含两块面积: 一块是 OCBAO 矩形面积和另一块 ABFHDA 的接近三角形面积。前者是保持血液具有流动性所必需的维持能量的功率密度, 后者是血液运动时所消耗能量的功率密度(主要是服血液内磨擦力能量的功率密度)。

6 血液的采集与供血者的组织与分组

6.1 血液采集、抗凝剂与完成实验时间: 用肝素溶液(312.5 u./ml)作为抗凝剂与全血体积的比例为 1:10。静脉采血后, 放入试管中, 轻轻摇匀, 在 4 小时内在 25°C 完成血液滞后环的实验。

6.2 供血者的组织与分组:

健康人组: 30 例男性(平均 47 岁, 标准差 11, 在 25~69 之间)与 14 例女性(平均 48 岁, 标准差 9, 在 30~66 之间), 为本大学的职工, 均排除患有高血压、中风、冠心病、糖尿病、肿瘤或其他的重要疾病者。

冠心病病人组: 27 例男性(平均 57 岁, 标准差 7 在 50~74 之间)与 19 例女性(平均 59 岁, 标准差 8 在 49~76 之间)。来自本大学华山医院与中山医院急诊室, 均为临床症状证实属于冠心病患者。

缺血性中风病人组: 25 例男性(平均 70 岁, 标准差 8, 在 55~82 之间)与 17 例女性(平均 67 岁, 标准差 16, 在 48~83 之间), 来自本大学华山医院与中山医院急诊室, 均为头颅 CT 与临床症状证实为缺血性中风病人。

6.3 健康人组的实验结果

如图 8、9 和表 1、2 所示, 从男、女两组健康人实验结果作比较, 可见其曲线的形态似乎是接近的, 但是仔细分析曲线的位子和所有的指标, 女性组要比男性组低下一些, 如 X1~X5, S_2 与 S_3 , E(G)、E(T) 与 E(E) 的数值均女性组要比男性组低下。其原因在于健康人女性组的平均年龄为 48 岁, 标准差 9, 在 30~66 之间, 其中不少属于生育年龄, 具有月经, 根据本文统计结果血细胞压积(Hct)要比男性低 7%, 这是影响血液滞后环曲线形态的重要因素, 产生的差别在于此。

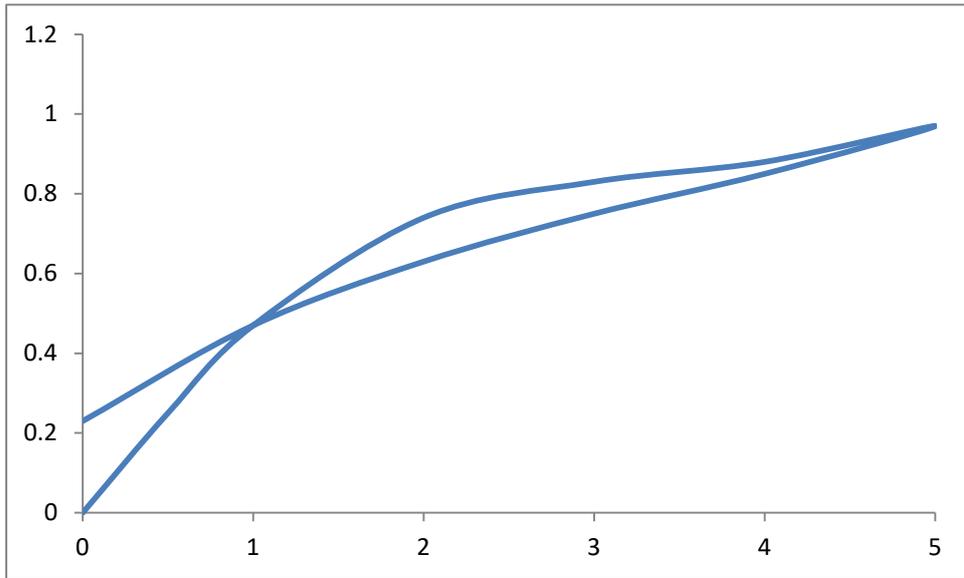


图 8 正常男性 30 例血液滞后环平均值曲线图。

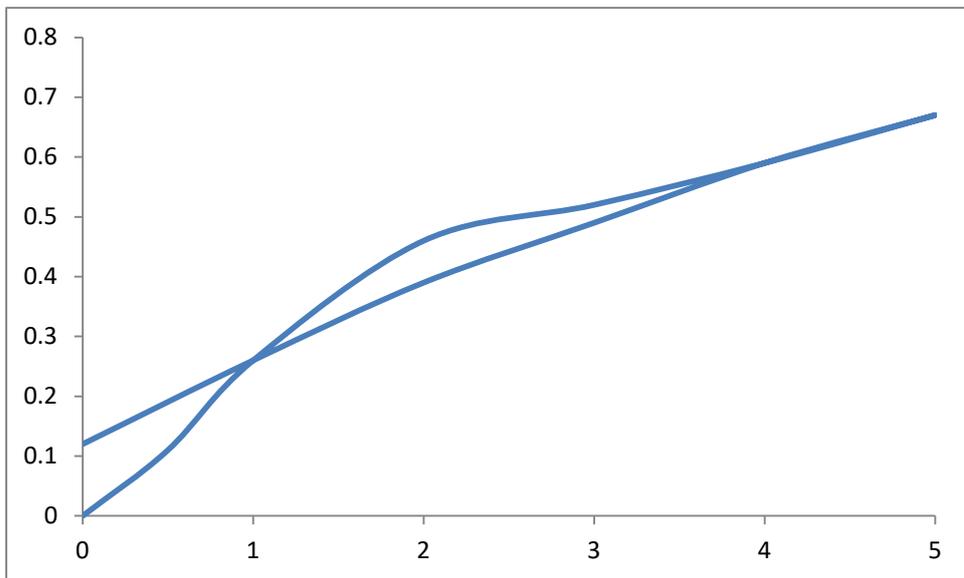


图 9 正常女性 14 例血液滞后环平均值曲线图。

表 1 30 例正常男性血液滞后环、触变性与粘弹性资料分析

NO.	Hct (%)	S1 (s ⁻¹)	S2 (s ⁻¹)	S3 (s ⁻¹)	X1(dyn e/cm ²)	X2(dyn e/cm ²)	X3(dyn e/cm ²)	X4(dyn e/cm ²)	X5(dyn e/cm ²)	E(G)(erg/s /cm ³)	E(T)(erg/s /cm ³)	E(E)(erg/s /cm ³)
1	49	5	1.98	0.95	0.86	0.61	0.32	0.47	0.16	2.63	0.22	0.09
2	49	5	1.98	0.95	0.85	0.63	0.31	0.48	0.13	2.58	0.23	0.10
3	49	5	1.73	1.08	0.92	0.67	0.47	0.58	0.23	3.15	0.14	0.17
4	51	5	1.98	1.23	0.93	0.75	0.54	0.67	0.34	3.40	0.11	0.25
5	50	5	1.98	1.08	0.90	0.68	0.42	0.56	0.19	2.95	0.17	0.14
6	41	5	2.50	1.33	0.79	0.58	0.38	0.52	0.16	2.50	0.08	0.11
7	48	5	1.98	1.15	0.95	0.73	0.51	0.64	0.27	3.30	0.14	0.18
8	45	5	1.73	1.00	0.93	0.63	0.41	0.52	0.17	2.95	0.15	0.12
9	48	5	1.73	1.15	1.04	0.73	0.55	0.65	0.26	3.53	0.13	0.19
10	42	5	1.98	1.25	0.87	0.68	0.47	0.57	0.23	2.95	0.11	0.18
11	50	5	2.50	0.95	0.85	0.66	0.32	0.55	0.12	2.63	0.18	0.08
12	46	5	4.15	1.35	0.85	0.83	0.47	0.76	0.26	2.90	0.13	0.13
13	46	5	2.23	1.38	0.90	0.70	0.52	0.64	0.26	3.15	0.10	0.20
14	48	5	1.73	1.28	0.97	0.68	0.55	0.63	0.28	3.38	0.08	0.23
15	47	5	2.73	1.43	1.26	1.12	0.82	1.03	0.42	4.65	0.14	0.25
16	55	5	2.23	0.93	0.92	0.71	0.38	0.60	0.19	2.98	0.18	0.10
17	44	5	1.98	1.35	1.65	1.22	0.98	1.12	0.54	5.83	0.14	0.36
18	47	5	1.98	1.33	0.98	0.82	0.63	0.73	0.33	3.63	0.11	0.24
19	49	5	1.73	1.15	0.88	0.55	0.41	0.50	0.19	2.85	0.07	0.14
20	50	5	1.98	1.00	1.01	0.71	0.41	0.58	0.16	3.15	0.20	0.13
21	45	5	1.98	1.25	1.11	0.78	0.59	0.71	0.31	3.78	0.11	0.24
22	45	5	1.73	1.05	0.95	0.61	0.40	0.51	0.19	2.98	0.14	0.13
23	50	5	1.73	1.13	0.92	0.59	0.41	0.51	0.19	2.93	0.11	0.14
34	44	5	1.98	0.88	0.83	0.56	0.32	0.47	0.14	2.58	0.17	0.08
25	50	5	1.73	0.88	1.02	0.73	0.41	0.58	0.19	3.25	0.24	0.12
26	40	5	1.96	1.18	0.93	0.73	0.51	0.64	0.25	3.15	0.14	0.14
27	51	5	1.98	1.33	1.14	0.84	0.65	0.76	0.33	3.98	0.11	0.25
28	51	5	1.73	0.90	0.90	0.73	0.42	0.55	0.20	3.00	0.29	0.13
29	43	5	1.98	1.10	0.85	0.61	0.37	0.47	0.16	2.65	0.21	0.12
30	47	5	2.75	1.60	1.15	0.96	0.76	0.88	0.38	4.13	0.12	0.33
M	47	5	2.10	1.15	0.97	0.73	0.49	0.63	0.25	3.25	0.15	0.17
SD	3.4	0	0.58	0.19	0.17	0.15	0.16	0.16	0.11	0.69	0.05	0.07

说明：M 示平均值，SD 示标准差

表 2 14 例正常女性血液滞后环、触变性与粘弹性资料分析

NO.	Hct (%)	S1 (s ⁻¹)	S2 (s ⁻¹)	S3 (s ⁻¹)	X1(dyn e/cm ²)	X2(dyn e/cm ²)	X3(dyn e/cm ²)	X4(dyn e/cm ²)	X5(dyn e/cm ²)	E(G)(erg/s /cm ³)	E(T)(erg/s /cm ³)	E(E)(erg/s /cm ³)
1	41	5	1.468	0.98	1.03	0.70	0.50	0.58	0.20	3.45	0.16	0.21
2	42	5	1.75	1.13	0.64	0.45	0.30	0.36	0.15	2.08	0.11	0.11
3	44	5	1.98	0.78	0.79	0.53	0.22	0.40	0.08	2.25	0.22	0.05
4	38	5	1.73	0.93	0.49	0.34	0.17	0.25	0.07	1.48	0.12	0.05
5	40	5	1.73	1.03	0.61	0.42	0.25	0.32	0.09	1.88	0.13	0.09
6	36	5	1.73	0.80	0.50	0.35	0.17	0.25	0.07	1.50	0.14	0.05
7	38	5	1.73	0.80	0.51	0.34	0.17	0.26	0.07	1.53	0.13	0.04
8	37	5	1.98	1.03	0.51	0.33	0.20	0.28	0.09	1.55	0.08	0.05
9	46	5	1.73	0.88	0.79	0.56	0.30	0.43	0.16	2.58	0.20	0.12
10	38	5	1.73	0.93	0.68	0.36	0.19	0.28	0.08	1.90	0.11	0.06
11	40	5	1.73	1.08	0.63	0.42	0.26	0.33	0.11	1.95	0.14	0.10
12	38	5	1.73	1.05	0.69	0.50	0.32	0.40	0.16	2.25	0.15	0.12
13	43	5	1.73	0.75	0.69	0.53	0.32	0.36	0.11	2.13	0.26	0.06
14	39	5	1.98	1.23	0.82	0.60	0.39	0.49	0.18	2.65	0.16	0.18
M	40	5	1.77	0.96	0.67	0.46	0.26	0.36	0.12	2.08	0.15	0.09
SD	2.9	0	0.13	0.14	0.15	0.11	0.09	0.10	0.06	0.55	0.05	0.05

说明：M 示平均值，SD 示标准差

6.4 冠心病病人组的实验结果

如图 10~11 和表 3、4 所示。从中可以看出不论男性病人组或女性病人组的滞后环的曲线位子和所有的指标，冠心病病人组要比健康人组明显高一些，如 $X1 \sim X5$, $S2$ 与 $S3$, $E(G)$ 、 $E(T)$ 与 $E(E)$ 的数值均病人组要比健康人组明显地高。其中图 12 所示的一位女性心肌梗塞病尤其突出。

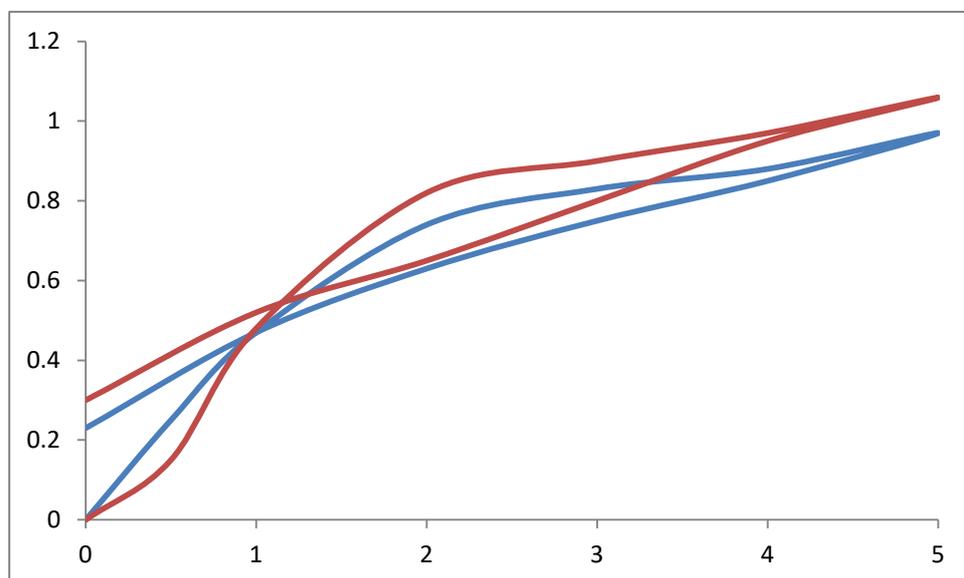


图 10 冠心病病人男性 27 例血液滞后环平均值曲线图与健康男性平均值曲线图的比较。说明：红色曲线（上方）示病人组，蓝色曲线（下方）示健康人组。图示冠心病病人组要比健康人组的滞后环曲线明显地抬高一些，弹性环与触变性环大一些。

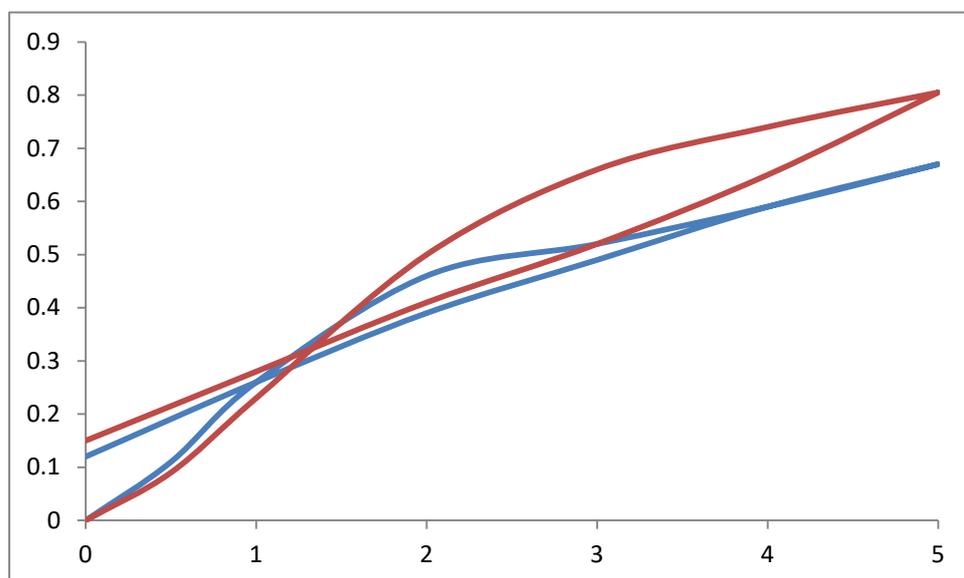


图 11 冠心病病人女性 19 例血液滞后环平均值曲线图与健康女性平均值曲线图的比较。说明：红色曲线（上方）示病人组，蓝色曲线（下方）示健康人组。图示冠心病病人组要比健康人组的滞后环曲线明显地抬高一些，弹性环与触变性环大一些。

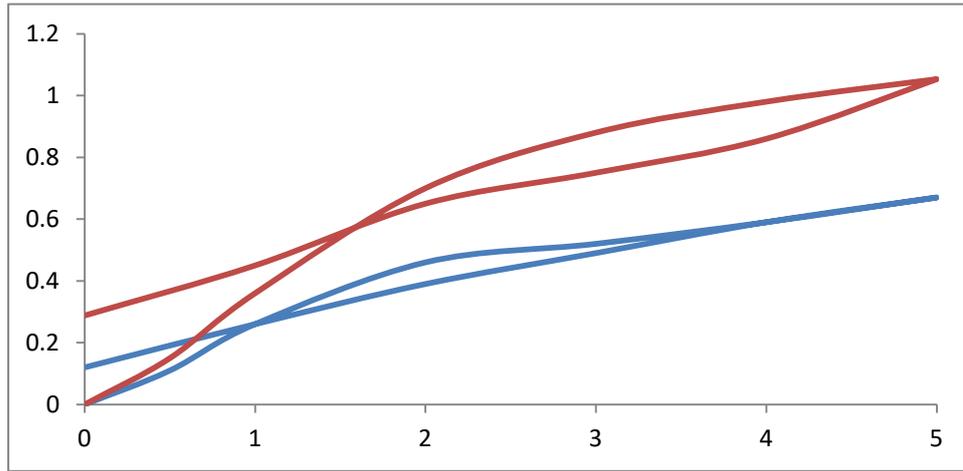


图 12 冠心病女性 1 例（表 4 中 11 号心肌梗塞病例）血液滞后环曲线图与健康女性平均值曲线图的比较。说明：红色曲线（上方）示病人，兰色曲线（下方）示健康人组。图示此心肌梗塞病人要比健康人组的滞后环曲线明显地抬高，弹性环与触变性环也增大。

表 3 27 例男性冠性病病人血液滞后环、触变性与粘弹性资料分析

NO.	Hct (%)	S1 (s ⁻¹)	S2 (s ⁻¹)	S3 (s ⁻¹)	X1(dyn e/cm ²)	X2(dyn e/cm ²)	X3(dyn e/cm ²)	X4(dyn e/cm ²)	X5(dyn e/cm ²)	E(G)(erg/s/cm ²)	E(T)(erg/s/cm ³)	E(E)(erg/s/cm ³)
1	37.	5	2.425	0.650	0.800	0.604	0.200	0.377	0.094	1.875	0.272	0.068
2	48	5	2.175	1.475	1.095	0.918	0.697	0.762	0.334	3.601	0.074	0.330
3	49	5	2.175	1.175	1.040	0.796	0.457	0.581	0.196	3.088	0.175	0.164
4	48	5	1.925	0.975	0.904	0.690	0.346	0.469	0.116	2.650	0.186	0.105
5	43	5	3.700	1.525	1.082	0.964	0.622	0.780	0.321	3.530	0.218	0.302
6	51	5	2.675	1.600	1.279	0.950	0.665	0.783	0.324	3.780	0.143	0.306
7	42	5	2.175	1.250	1.050	0.792	0.500	0.604	0.284	3.199	0.116	0.179
8	41	5	4.700	1.575	1.022	0.974	0.551	0.823	0.317	3.169	0.073	0.258
9	44	5	2.425	1.200	0.872	0.676	0.388	0.500	0.197	2.555	0.136	0.152
10	49	5	2.175	0.875	0.922	0.675	0.265	0.410	0.092	2.327	0.320	0.097
11	40	5	4.925	1.475	0.883	0.826	0.462	0.696	0.265	2.775	0.035	0.241
12	47	5	3.675	1.725	1.326	1.117	0.849	1.056	0.473	4.439	0.110	0.394
13	47	5	2.175	1.175	1.225	0.941	0.569	0.705	0.275	3.723	0.236	0.210
14	49	5	1.925	0.850	1.172	0.778	0.373	0.537	0.148	3.007	0.255	0.103
16	47	5	2.425	1.300	1.241	0.942	0.546	0.692	0.273	3.498	0.266	0.244
16	52	5	2.175	1.325	1.101	0.878	0.572	0.679	0.201	3.479	0.133	0.227
17	51	5	2.175	0.975	1.029	0.798	0.376	0.530	0.123	2.868	0.278	0.105
18	46	5	2.175	1.225	1.054	0.828	0.474	0.592	0.217	3.212	0.191	0.179
19	51	5	2.175	1.325	1.306	1.016	0.708	0.828	0.395	4.368	0.123	0.304
20	50	5	2.675	1.450	1.112	0.863	0.517	0.660	0.224	3.215	0.162	0.239
21	50	5	2.175	1.050	1.504	1.150	0.609	0.848	0.246	4.444	0.293	0.248
22	53	5	2.425	1.150	1.142	0.852	0.438	0.627	0.149	3.215	0.183	0.196
23	48	5	2.425	1.175	0.979	0.741	0.398	0.535	0.194	2.742	0.162	0.154
24	40	5	2.175	1.000	0.728	0.526	0.205	0.313	0.068	1.891	0.158	0.096
25	42	5	2.925	1.450	0.88	0.754	0.387	0.507	0.184	2.458	0.229	0.222
26	49	5	2.175	0.775	0.808	0.569	0.217	0.364	0.079	2.175	0.166	0.082
27	46	5	2.000	1.075	1.052	0.703	0.373	0.489	0.126	2.720	0.170	0.150
M	49	5	2.569	1.215	1.059	0.827	0.473	0.620	0.219	3.111	0.180	0.198
SD	4.1	0	0.78	0.27	0.18	0.15	0.16	0.17	0.10	0.697	0.072	0.085
男 健 康 组												
M	47	5	2.10	1.15	0.97	0.73	0.49	0.63	0.25	3.25	0.15	0.17
SD	3.4	0	0.58	0.19	0.17	0.15	0.16	0.16	0.11	0.69	0.05	0.07
U			2.553	1.072	1.913	2.44	0.401	0.228	1.114	0.755	1.808	1.35
P			<0.01	<0.05	<0.05	<0.01	>0.5	>0.5	<0.1	<0.2	<0.05	<0.1

说明：M 示平均值，SD 示标准差，U 示统计学上的 U 检验值，P 是统计学显著性检验值。

表 4 19 例女性冠心病病人血液滞后环、触变性与粘弹性资料分析

NO.	Hct (%)	S1 (s ⁻¹)	S2 (s ⁻¹)	S3 (s ⁻¹)	X1(dyn e/cm ²)	X2(dyn e/cm ²)	X3(dyn e/cm ²)	X4(dyn e/cm ²)	X5(dyn e/cm ²)	E(G)(erg/s/cm ³)	E(T)(erg/s/cm ³)	E(E)(erg/s/cm ³)
1	41	5	1.675	0.825	0.686	0.425	0.203	0.293	0.107	1.718	0.158	0.083
2	44	5	1.975	1.200	0.864	0.659	0.427	0.541	0.193	2.677	0.211	0.157
3	49	5	1.975	1.075	0.987	0.637	0.348	0.475	0.133	2.522	0.294	0.132
4	36	5	1.725	0.850	0.51	0.285	0.114	0.181	0.063	1.189	0.210	0.068
5	37	5	1.975	1.000	0.623	0.401	0.18	0.272	0.082	1.542	0.271	0.108
6	40	5	1.725	1.175	0.853	0.586	0.417	0.483	0.227	2.488	0.216	0.156
7	41	5	1.975	1.050	0.772	0.545	0.301	0.409	0.138	2.289	0.242	0.123
8	40	5	0.750	0.850	0.447	0.330	0.151	0.224	0.069	1.256	0.189	0.071
9	45	5	1.975	1.325	0.812	0.544	0.377	0.453	0.114	2.342	0.183	0.165
10	39	5	1.975	0.975	0.615	0.189	0.182	0.274	0.055	1.463	0.237	0.070
11	45	5	2.225	1.373	1.053	0.826	0.593	0.695	0.288	3.314	0.246	0.234
12	43	5	2.000	1.300	0.727	0.471	0.318	0.365	0.127	1.820	0.150	0.140
13	38	5	1.725	1.225	0.425	0.230	0.147	0.172	0.076	0.910	0.110	0.066
14	38	5	2.5	2.075	0.751	0.524	0.460	0.475	0.236	2.275	0.116	0.220
16	46	5	2.225	1.175	1.063	0.768	0.450	0.608	0.199	3.003	0.344	0.100
16	48	5	2.225	0.800	1.268	0.974	0.398	0.680	0.172	3.385	0.742	0.180
17	34	5	2.225	1.550	0.842	0.535	0.389	0.459	0.180	2.385	0.143	0.165
18	40	5	2.225	1.500	1.055	0.708	0.508	0.607	0.194	2.994	0.164	0.137
19	36	5	1.975	1.150	0.939	0.645	0.392	0.495	0.174	2.744	0.258	0.138
M	41	5	2.003	1.183	0.805	0.553	0.334	0.430	0.149	2.227	0.235	0.132
SD	4.2	0	0.22	0.31	0.23	0.19	0.14	0.16	0.07	0.731	0.136	0.049
女 健 康 组												
M	40	5	1.77	0.96	0.67	0.46	0.25	0.36	0.12	208	0.15	0.09
SD	3	0	0.13	0.14	0.15	0.11	0.09	0.10	0.06	0.55	0.05	0.05
U			3.802	2.775	2.037	1.769	1.844	1.542	1.242	0.659	2.500	1.830
P	0.5	0.5	<0.001	<0.005	<0.05	<0.05	<0.05	<0.1	<0.1	<0.5	<0.01	<0.05

说明：M 示平均值，SD 示标准差，U 示统计学上的 U 检验值，P 是统计学显著性检验值。

6.5 缺血性中风病人组的实验结果

如图 13~18 以及表 5、6 所示。从中可见如同上述对冠心病病人组与健康人组的情况有所类似，即不论男性病人组或女性病人组的滞后环的曲线位子和所有的指标缺血性中风病人组要比健康人组明显地高一些，有如 X1~X5，S2 与 S3，E(G)、E(T) 与 E(E) 的数值均病人组要比健康人组明显地高。其中图 16~18 所示的 4 个病例与健康人的曲线图形相比尤其具有各自特点的明显差别。

如图 15 的这位女性缺血性中风病人与健康人相比，其异常高的程度要比正常人高出的 10~20 倍，如果临床医生能够通过补液把这种异常曲线回归至正常人的附近，不论病人的症状有否好转，临床医生在校正血液滞后环异常性上，是一个非常好的疗效证明。

又如图 16 的这位男性缺血性中风病人与健康人相比，其血液滞后环曲线图形与健康人相似，但是其触变性环的面积，以及滞后环曲线下的面积大大地超出正常人数倍，对于临床医生考虑发病原因与血液滞后环异常的关系，以及临床医生如何通过补液把这种异常曲线回归至正常状态是有指导价值的。

又如图 17 的这位男性缺血性中风病人与健康人相比，其粘弹性环的面积，大大地超出正常人近 10 倍，也对于临床医生考虑发病原因与血液滞后环异常的关系，以及如何通过补液把这种异常曲线回归至正常状态是也有指导价值的。

又如图 18 的这位男性缺血性中风病人与健康人相比，其粘弹性环与触变性环的面积与健康人相似，但是上升线与下降线下的面积大大地比正常人大得多，这意味着血液在上升线与下降线两次旋转的过程中，所需要的能量功率密度大大地增大。对于人体而言在血液流动中的能量功率密度就是由心脏的搏动所提供的，也就是说人体心脏搏动付出的能量的功率密度大大地增大了，这种异常意味着在多消耗人体心脏的负荷，因此如何及早通过临床补液把这种异常曲线回归至正常状态是有启发作用的。

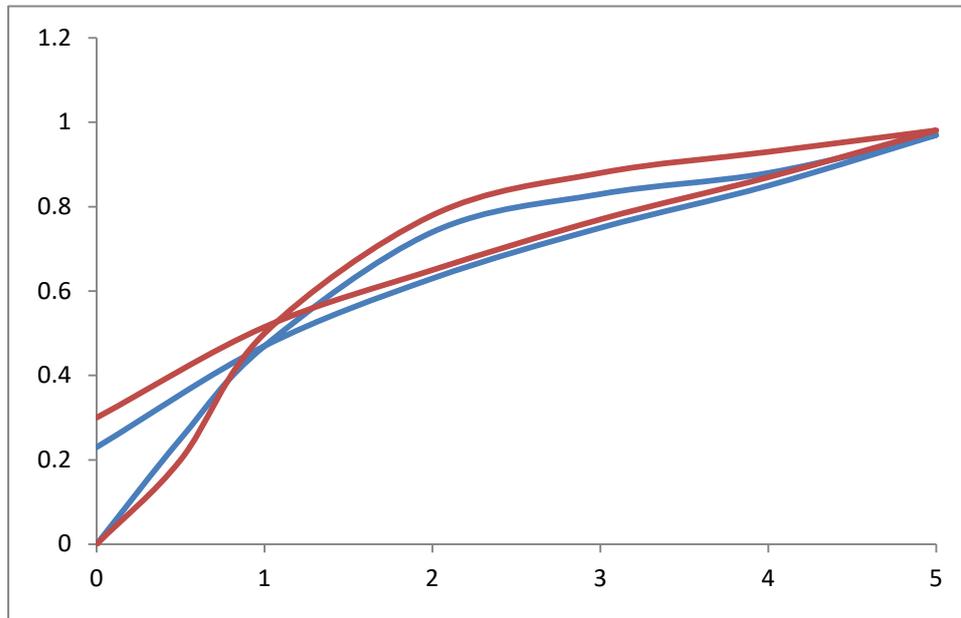


图 13 缺血性中风病人男性 25 例血液滞后环平均值曲线图与健康男性平均值曲线图的比较。说明：红色曲线（上方）示病人组，蓝色曲线（下方）示健康人组。

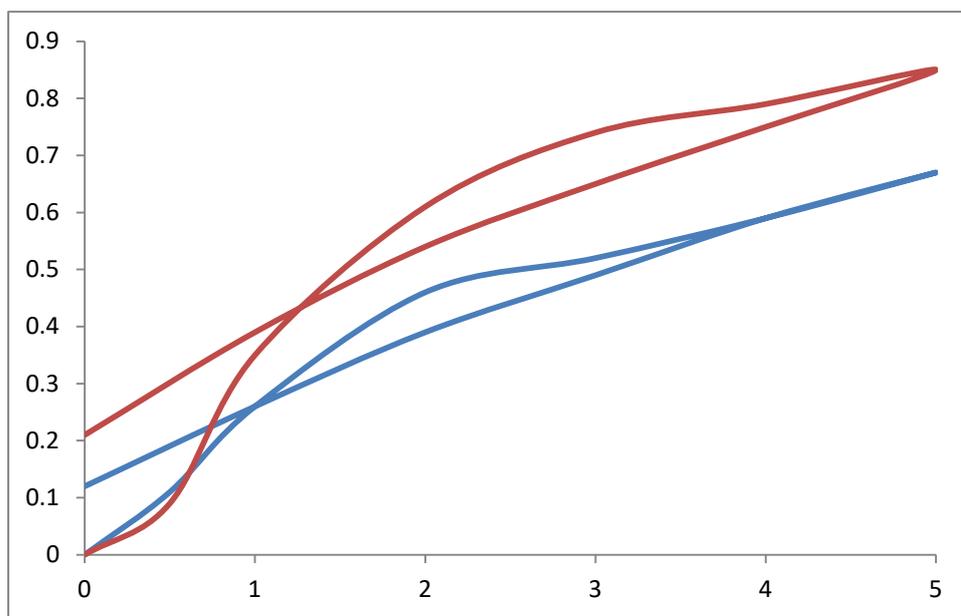


图 14 缺血性中风病人女性 17 例血液滞后环平均值曲线图与健康女性平均值曲线图的比较。说明：红色曲线（上方）示病人组，蓝色曲线（下方）示健康人组。

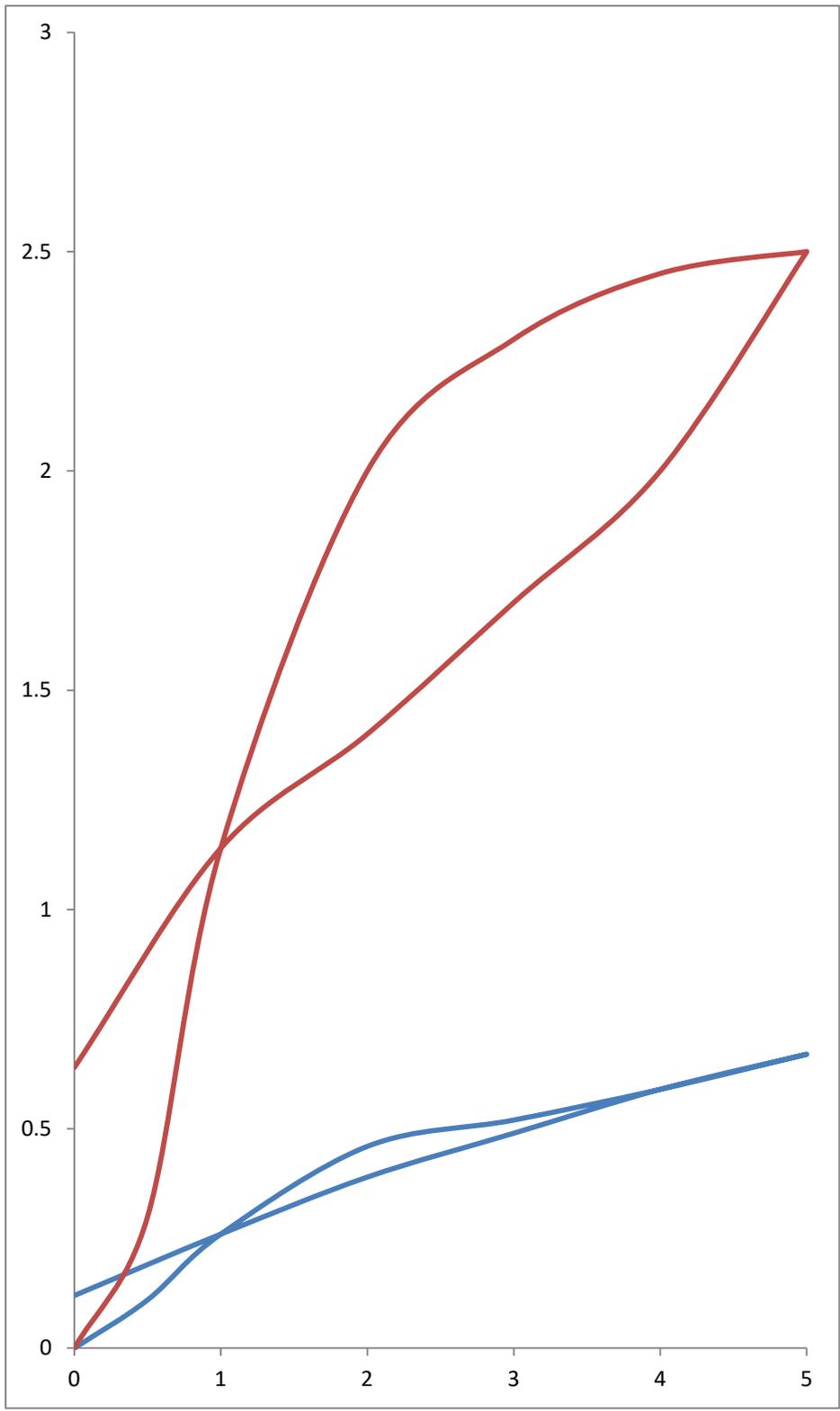


图 15 缺血性中风病人女性 1 例（表 6 第 10 例）血液滞后环曲线图与健康女性平均值曲线图的比较。说明：红色曲线（上方）示病人，兰色曲线（下方）示健康人组。

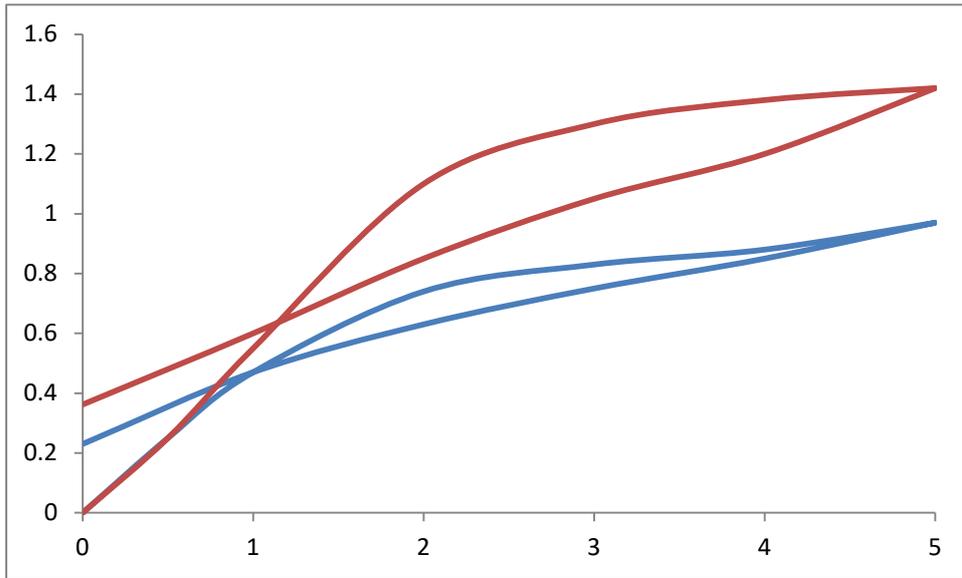


图 16 缺血性中风病人男性 1 例（表 5 第 23 号）血液滞后环曲线图与健康男性平均值曲线图的比较。说明：红色曲线（上方）示病人，兰色曲线（下方）示健康人组。

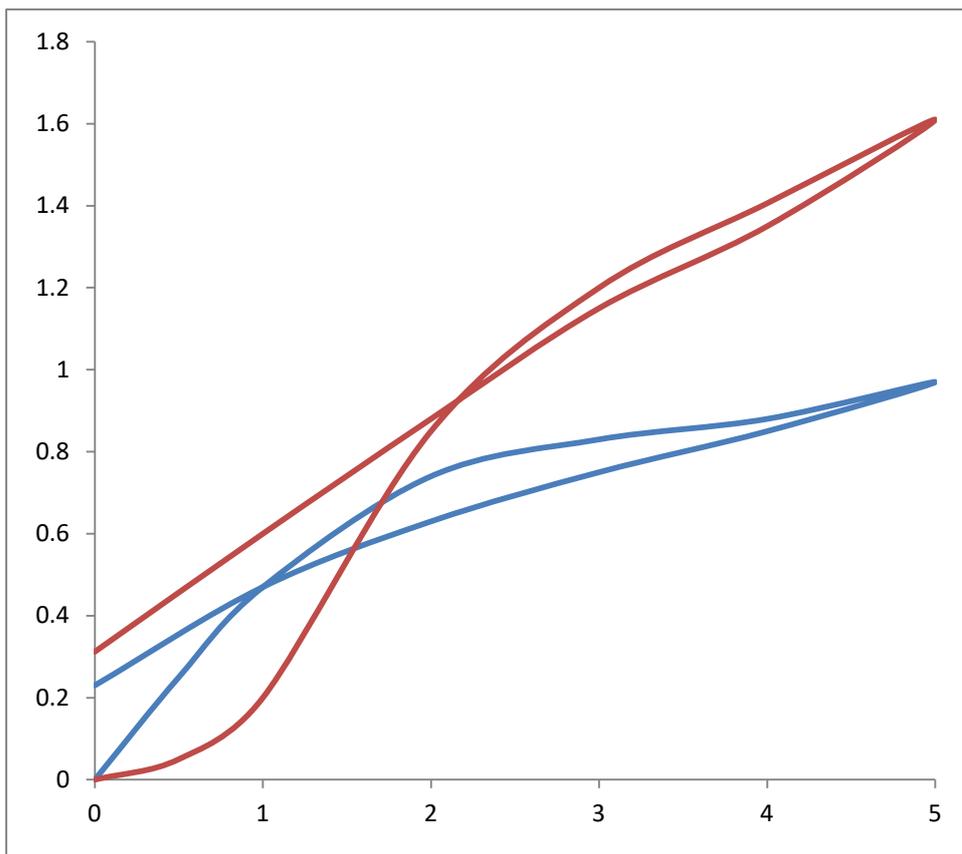


图 17 缺血性中风病人男性 1 例（表 5 第 5 号）血液滞后环曲线图与健康男性平均值曲线图的比较。说明：红色曲线（上方）示病人，兰色曲线（下方）示健康人组。

表 5 25 例男性缺血性中风病人血液滞后环、触变性与粘弹性资料分析

NO.	Hct (%)	S1 (s ⁻¹)	S2 (s ⁻¹)	S3 (s ⁻¹)	X1(dyn e/cm ²)	X2(dyn e/cm ²)	X3(dyn e/cm ²)	X4(dyn e/cm ²)	X5(dyn e/cm ²)	E(G)(erg/s/cm ³)	E(T)(erg/s/cm ³)	E(E)(erg/s/cm ³)
1	34	5	4.75	2.13	0.973	0.937	0.674	0.907	0.393	3.83	0	0.332
2	48	5	2.00	0.93	0.857	0.610	0.323	0.426	0.182	3.19	0.071	0.064
3	53	5	3.23	1.48	1.173	0.971	0.674	0.901	0.360	5.17	0.179	0.237
4	53	5	2.23	1.05	1.158	0.935	0.456	0.712	0.144	3.84	0.563	0.204
5	36	5	4.25	1.90	1.608	1.406	0.861	1.325	0.312	5.50	0.192	0.671
6	35	5	3.25	2.40	1.247	0.980	0.851	0.895	0.384	4.28	0.192	0.696
7	47	5	2.23	1.25	0.783	0.533	0.357	0.419	0.180	2.78	0.446	0.192
8	48	5	1.98	1.25	1.384	0.946	0.678	0.809	0.338	4.31	0.607	0.544
9	50	5	3.23	1.78	1.117	0.996	0.672	0.862	0.353	4.44	0.320	0.626
10	48	5	2.20	0.93	0.794	0.563	0.279	0.452	0.114	2.71	0.511	0.192
11	34	5	2.23	1.15	0.573	0.404	0.254	0.350	0.125	1.85	0.319	0.192
12	52	5	2.25	1.10	0.683	0.587	0.294	0.398	0.158	2.56	0.544	0.275
13	60	5	2.23	1.10	1.093	0.885	0.487	0.658	0.221	3.86	0.544	0.384
14	50	5	4.75	4.60	0.859	0.853	0.806	0.820	0.342	3.84	0	1.087
16	54	5	1.98	1.13	0.992	0.679	0.440	0.564	0.211	3.25	0.574	0.511
16	61	5	2.23	1.25	1.001	0.751	0.483	0.606	0.259	2.88	0.767	0.511
17	48	5	2.48	1.18	0.935	0.672	0.380	0.547	0.151	3.32	0.575	0.256
18	54	5	2.00	1.31	1.110	0.756	0.541	0.670	0.267	3.58	0.271	0.511
19	38	5	2.50	1.28	0.739	0.572	0.373	0.488	0.175	2.36	0.415	0.319
20	34	5	2.35	1.20	0.462	0.378	0.230	0.316	0.286	1.86	0.319	0.192
21	36	5	2.48	0.88	0.554	0.361	0.056	0.275	0.264	1.54	0.575	0.192
22	38	5	2.23	1.10	0.672	0.534	0.283	0.404	0.158	2.42	0.544	0.192
23	50	5	2.73	1.88	1.416	1.088	0.837	1.000	0.362	5.00	0.511	0.667
24	43	5	0.88	0.51	0.730	0.515	0.330	0.461	0.292	2.81	0.415	0.192
25	58	5	1.45	1.25	1.800	1.716	0.150	1.555	0.562	7.45	0.544	0.569
M	47	5	2.57	1.43	0.981	0.785	0.515	0.673	0.264	3.55	0.400	0.392
SD	9	0	0.98	0.81	0.331	0.318	0.251	0.314	0.108	1.32	0.204	0.239
P			<.001	<.001	<0.05	<.001	<0.01	<.001	<0.01	<0.001	<0.001	<.001
t			16	13	2.02	6.2	3.3	4.8	3.3	7.8	48	35

男 健 康 组

M	47	5	2.10	1.15	0.970	0.730	0.490	0.630	0.250	3.25	0.150	0.170
SD	3	0	0.58	0.19	0.170	0.150	0.160	0.160	0.110	0.69	0.050	0.070

说明：M 示平均值，SD 示标准差，t 示统计学上的 t 检验值，P 是统计学显著性检验值。

表 6 17 例女性缺血性中风病人血液滞后环、触变性与粘弹性资料分析

NO.	Hct (%)	S1 (s ⁻¹)	S2 (s ⁻¹)	S3 (s ⁻¹)	X1(dyn e/cm ²)	X2(dyn e/cm ²)	X3(dyn e/cm ²)	X4(dyn e/cm ²)	X5(dyn e/cm ²)	E(G)(erg/s/cm ³)	E(T)(erg/s/cm ³)	E(E)(erg/s/cm ³)
1	46	5	2.75	1.5	0.921	0.788	0.526	0.644	0.346	3.05	0.218	0.293
2	48	5	1.98	1.23	0.600	0.404	0.274	0.317	0.104	2.53	0.213	0.096
3	43	5	2.45	1.20	0.799	0.643	0.374	0.526	0.132	2.94	0.320	0.117
4	46	5	1.98	1.38	0.629	0.449	0.338	0.397	0.210	2.63	0.181	0.181
5	48	5	2.00	1.18	0.593	0.419	0.271	0.330	0.134	1.78	0.192	0.128
6	58	5	2.22	1.20	0.870	0.679	0.427	0.565	0.214	3.05	0.362	0.197
7	40	5	4.75	4.63	0.792	0.770	0.751	0.759	0.323	2.76	0	0.479
8	50	5	2.23	1.35	0.784	0.578	0.412	0.506	0.222	3.02	0.197	0.192
9	49	5	1.98	1.13	0.724	0.503	0.324	0.421	0.172	2.56	0.075	0.096
10	50	5	3.50	0.95	2.400	2.345	1.140	1.667	0.634	8.90	1.950	0.649
11	38	5	2.23	1.25	0.625	0.472	2.810	0.379	0.120	2.58	0.075	0.064
12	43	5	1.98	0.93	0.617	0.445	0.212	0.325	0.095	1.92	0.122	0.053
13	41	5	2.00	0.98	0.574	0.414	0.222	0.287	0.124	1.73	0.085	0.068
14	54	5	1.78	1.35	0.925	0.550	0.416	0.466	0.181	3.23	0.138	0.175
16	43	5	2.23	1.55	0.845	0.569	0.433	0.520	0.174	2.86	0.085	0.133
16	43	5	1.98	0.98	0.629	0.420	0.212	0.312	0.083	1.82	0.127	0.096
17	55	5	2.23	1.15	1.032	0.768	0.528	0.636	0.253	3.25	0.479	0.293
M	47	5	2.37	1.41	0.845	0.660	0.420	0.533	0.207	2.97	0.283	0.194
SD	8	0	0.73	0.85	0.424	0.454	0.231	0.322	0.133	1.60	0.205	0.158
P			<0.01	<.001	<.001	<.001	<.001	<.001	<.001	<0.05	<0.05	<0.05
t			3.03	10	3.5	4.7	13	9.7	11.3	2.02	2.36	2.3

女 健 康 组

M	40	5	1.77	0.96	0.670	0.460	0.250	0.360	0.120	2.08	0.150	0.090
SD	3	0	0.13	0.14	0.150	0.110	0.090	0.110	0.060	0.55	0.550	0.050

说明：M 示平均值，SD 示标准差，t 示统计学上的 t 检验值，P 是统计学显著性检验值。

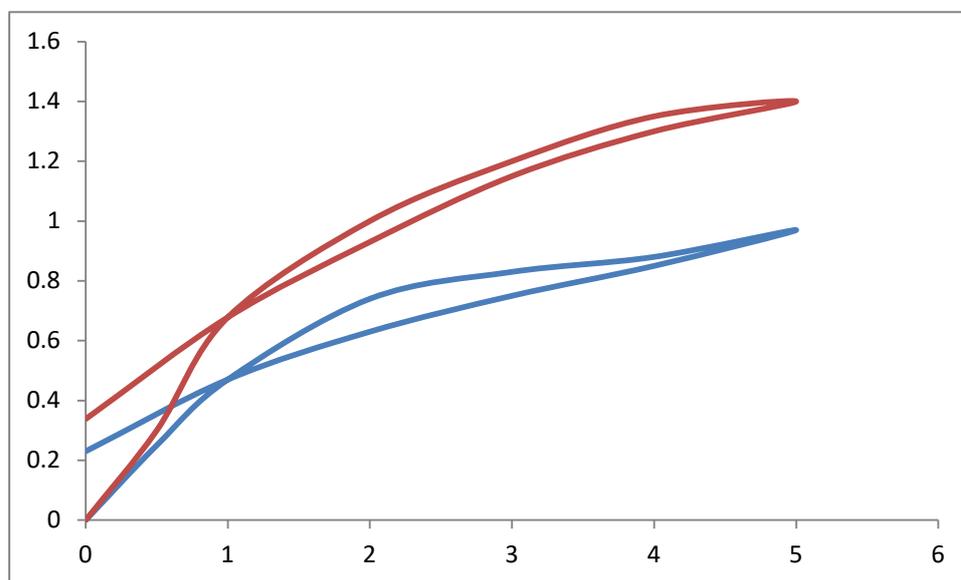


图 18 缺血性中风病人男性 1 例（表 5 第 8 号）血液滞后环曲线图与健康男性平均值曲线图的比较。说明：红色曲线（上方）示病人组，蓝色曲线（下方）示健康人组。

6.6. 人体血液滞后环测定的临床医学意义

6.6.1 要求仪器的精度与可靠性：本文所用的流变仪是由上海航天局新跃仪表厂由矫树魁高级工程师为首研制的 HT 流变仪，切应力可以精确地测定至 0.0001 dyne/cm^2 (即 0.01 mPa)，切变率可以精确地给出至 0.001 s^{-1} 。为了保证达到以上高精度，仪器有两个轴承装置：即仪器上部有专门感应内芯筒锥转子产生扭动切应力的无磨擦力干扰的、与最小惯性的空气轴承；又仪器下部有专门设计控制外转筒产生切变率的高精度的负反馈的、无齿轮的、无级差的、无杂音的伺服马达（说明：一般的流变仪只有一个轴承，它既要控制切变率，又要感受转子给出的剪切应力，如此仪器的精度会受影响，而本文使用的是双轴承，将仪器的两个感觉功能分别由各自的轴承来完成，如此就提高了仪器的精度与可靠性）。

此外内芯筒锥转子与外筒底部的间隙调节是自动地进行，达到其间隙为 10 微米。仪器的标准液校正采用纯水（说明：国际上在 $4\sim 95^\circ\text{C}$ 的纯水有公认黏度值和相应的应力数值，而纯水来源丰富、价廉、化学性质稳定，一般的流变仪要用特殊的硅油，硅油的稳定是具有时间性的）。该仪器提供有自动化消除杂音电脑软件，该软件能够把杂音消除，形成光滑平稳的滞后环曲线。测量样品仅 0.5ml，而且测定以后可回收供给别的研究项目使用。

以上特点大大地满足了医学生物学的研究需要，因为医学生物学的样品来源精贵，所采用的切变率要很低（说明：过大的切变率就会破坏生物样品中的蛋白质、核酸、细胞膜的结构，达到负面影响）。根据以上所述。本文所获得的数据是可靠的、可重复的。对于仪器设计及其原理的详细介绍，需要参考以矫树魁高级工程师为首的工作组所写的资料。

6.6.2 滞后环测定前的预处理：很多生物物质对于受力作用的过程与历史具有记忆性，特别是对最近的力学作用过程记忆更深刻，因此消除其以往的记忆，在一个崭新的“起跑点”来做滞后环的实验，对于医学生物学样品来说是非常重要的。为此本文在做每一个样品以前，用 80 s^{-1} 的切变率作 80s 时间的剪切，然后在静放 80s 的时间，让每一个生物样品“新鲜地记住”这一“即刻力学状态”做出的“滞后环”的实验结果才是统一的、可信的和可靠的结果。

6.6.3 本文如上所列滞后环特征数值[X1、X2、X3、X4、X5、S2、S3、E(G)、E(T)与E(E)]在健康人、冠心病与缺血性中风病人组间的比较：如上项目各将男、女两个系列，以正常人组值为 1.00 (作为无量纲数)，进行合并与统计，来计算冠心病病人组与缺血性中风病人组偏离 1.00 数值进行比较，结果如表 7 与图 19、20 所示。从中可以看出，以正常人值为 1.00 (即 100%)，从滞后环、触变性、粘弹性 12 个项目总体平均来看，冠心病病人组偏离正常人组 23% (但是冠心病病人组的心肌梗塞病例则高些)，而缺血性中风病人组偏离正常人组 58%。从上文图 1~12 来看，冠心病病人组与缺血性中风病人组的滞后环曲线，与正常人相比曲线的位子是往上、往右方向提高，触变性环与粘弹性环普遍地面积增大了，在程度上当然是缺血性中风组高于冠心病组。从物理学、力学、流变学的角度来看，冠心病病人组与缺血性中风病人组的血液流动消耗的功率密度，要比正常人组大得多，也就是说心脏与血管的负荷的功率密度的消耗要比正常人组大，从力学的角度支持了本文发现血液的滞后环、触变性、粘弹性的异常，与冠心病与缺血性中风病的发病原因存在着相关性。

表 7 各组男女合并平均, 以正常人组为 1.00, 两组病人组偏离 1.00 的数值

序号	项目名称与说明(详见上文“研究方法”)	正常组	冠心病组	中风组
1	Hct:血细胞压积	1.00	1.00	1.01
2	S2: 触变环上升线与下降线之差最大时的切变率数值	1.00	0.98	1.28
3	S3 粘弹性环与触变性环交界点的切变率值	1.00	1.09	1.36
4	X1 三角波切变率峰值 (s1) 时血液所产生的切应力值	1.00	1.06	1.14
5	X2 切变率为 S2 处的触变性环上升曲线的切应力值	1.00	1.04	1.26
6	X3 粘弹性环与触变性环交界点切变率为 S2 处的切应力数值	1.00	1.19	1.37
7	X4 切变率为 S2 处的触变性环下降曲线的切应力值	1.00	1.11	1.27
8	X2-X4 本表第 5 项目与第 7 项目之差值	1.00	1.65	1.14
9	X5 滞后环下降线回复至切变率为 $0s^{-1}$ 的切应力	1.00	1.19	1.39
10	E(G) 血液转动总消耗能量的面积	1.00	1.06	1.26
11	E(T) 血液触变性环所围的面积	1.00	1.20	2.28
12	E(E) 血液粘弹性环所围的面积	1.00	1.16	2.23
	平均值	1.00	1.23	1.58

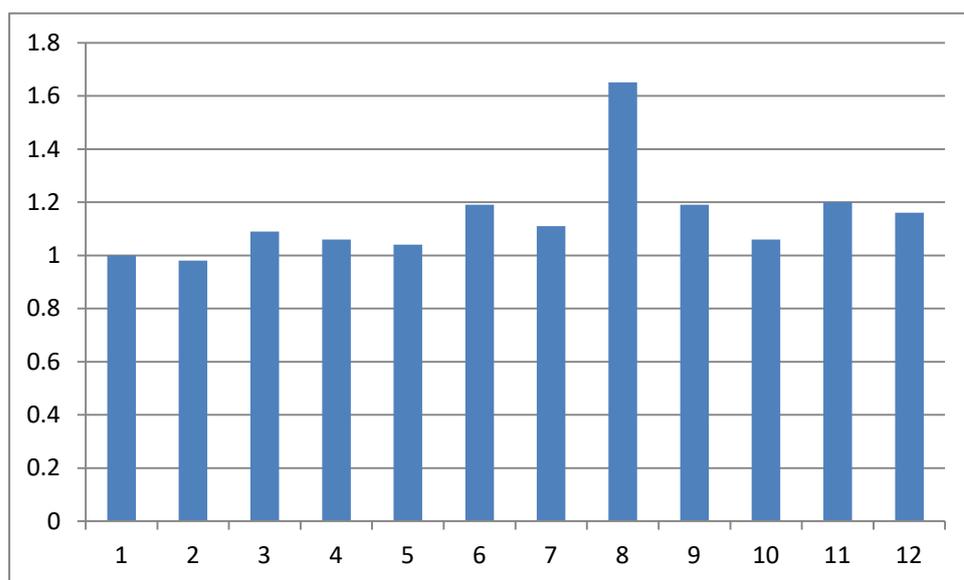


图 19 冠心病组的各个 1~12 个项目数值偏离正常人 1.00 的情况, 下表表示图中横坐标的项目编号与其名称及有关说明

序号	项目名称与说明
1	Hct:血细胞压积
2	S2: 触变环上升线与下降线之差最大时的切变率数值
3	S3 粘弹性环与触变性环交界点的切变率值
4	X1 三角波切变率峰值 (s1) 时血液所产生的切应力值
5	X2 切变率为 S2 处的触变性环上升曲线的切应力值
6	X3 粘弹性环与触变性环交界点切变率为 S2 处的切应力数值
7	X4 切变率为 S2 处的触变性环下降曲线的切应力值
8	X2-X4 本表第 5 项目与第 7 项目之差值
9	X5 滞后环下降线回复至切变率为 $0s^{-1}$ 时的切应力
10	E(G) 血液转动总消耗能量的面积
11	E(T) 血液触变性环所围的面积
12	E(E) 血液粘弹性环所围的面积

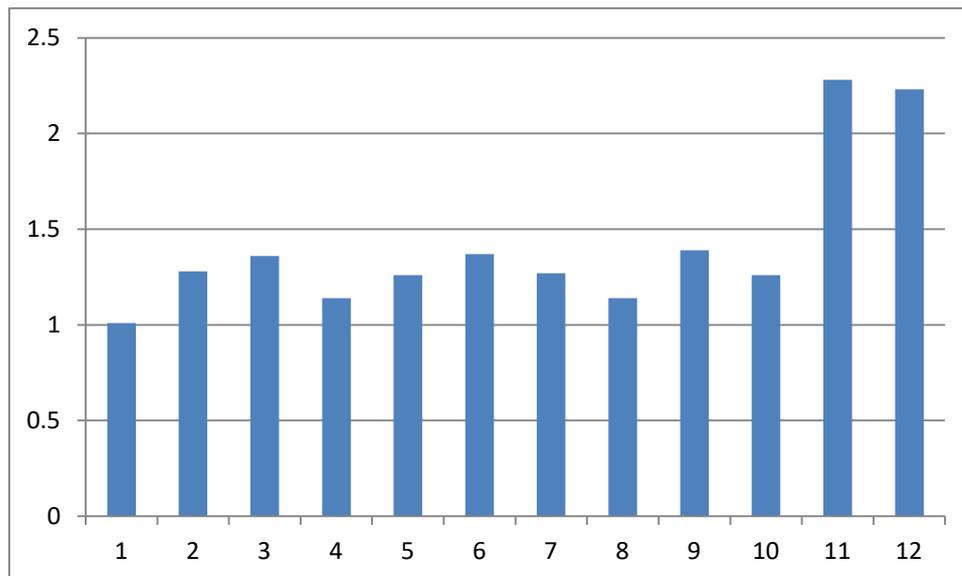


图 20 缺血性中风组的 1~12 个项目数值偏离正常人 1.00 的情况，下表表示图中横坐标的项目编号与其名称及有关说明

序号	项目名称与说明
1	Hct:血细胞压积
2	S2: 触变环上升线与下降线之差最大时的切变率数值
3	S3 粘弹性环与触变性环交界点的切变率值
4	X1 三角波切变率峰值 (s1) 时血液所产生的切应力值
5	X2 切变率为 S2 处的触变性环上升曲线的切应力值
6	X3 粘弹性环与触变性环交界点切变率为 S2 处的切应力数值
7	X4 切变率为 S2 处的触变性环下降曲线的切应力值
8	X2-X4 本表第 5 项目与第 7 项目之差值
9	X5 滞后环下降线回复至切变率为 $0s^{-1}$ 时的切应力
10	E(G) 血液转动总消耗能量的面积
11	E(T) 血液触变性环所围的面积
12	E(E) 血液粘弹性环所围的面积

6.6.4 临床应用的可能前景: 上述 12 项指标实际上在物理学与力学意义上相互之间是有重叠的, 该仪器研制组主工程师矫树魁从工程角度指出, 用不着这么多的指标, 经过筛选后他认为, 如上指标中曲线的形状与位于健康人与病人之间的比较是关键, 只需看两者间的相近或离远就可确定被测者的血液在循环系统中的运行正常或异常如何。

此外上述 12 项指标中, 最后 3 项目面积 E(G)、E(T)、E(E) 是关键项目 (说明: E(G) 面积是代表着血液在测量杯中剪切转动总消耗能量的功率密度, E(T) 面积为血液触变性环所围的面积代表着血液流动剪切过程中红细胞缢钱体被剪切应力驱散为单个红细胞或较小缢钱体块所消耗能量的功率密度, E(E) 面积代表着血液粘弹性环所围的面积, 示血液缢钱体形成的吸收外应力所提供的能量的功率密度, 展示缢钱体的牢固性)。认为如同临床医生看 X 光摄片一样, 只需看仪器所打印的滞后环曲线图就可以知道病人的血液循环状态并制定治疗方案。

要使测试结果在指导预防作用来说：如对于一位无症状的人，如果被发现有明显的血液滞后环的异常，应给以预防性治疗，让其血液滞后环的异常性作尽可能的消除。对于某些病人来说（如本文所列的冠心病或缺血性中风病人各种各样的异常滞后环曲线图），应给以治疗校正，让其血液滞后环的异常性尽量地消除，尽管由于病人的临床症状不能同时消除（因为如同心肌梗塞与缺血性中风的后遗症是短时间恢复不了的），也应该认为具有治疗效果的。在推广应用上要用如上的这些明朗的容易懂得物理数值与图像让临床医生彻底了解才好，如果应用本构方程的多种参数，虽然不少理论工作者报道了他们的研究成果[3、4、5、11]，临床医生理解有困难，推广是有难度的，还是按照如上矫树魁制定的软件建议用图像与有关建议项目有利于在临床的推广较好。此外要达到临床的应用，前提必须有足够的仪器货源，给受货单位的科技人员做技术培训与指导，即使遇到仪器有问题，供货单位必须也及时给以维护与修正。

6.6.5 仪器的标准化与仪器多样性：作为卫生系统管理部门认为某些流变仪器存在的问题而指出影响临床医疗工作，并且增加患者的经济负担，甚至损害卫生系统声誉[7]。本文认为标准化的关键在于切变率与切应力值是否正确，应该支持检测部门或关心标准化的专家对仪器的切变率与切应力值的正确性进行鉴定。对于医学生物学样品的仪器，切变率与切应力值是比较低的，其标准液可以采用纯水。本文所用的 HT 流变仪主设计者矫树魁高级工程师是这样提议的，他认为纯水来源丰富，而且性质稳定，是国际公认的最好的测定医学生物学样品仪器的（虽然市场上有多种硅油标准液，其化学稳定性也是有时间性的，时间长了化学与物理学性质就改变了，而纯水是极其持久而又稳定的，而且来源丰富容易获得）。只要仪器具有标准化，应该支持各个单位使用不同类型的流变仪。由于各个单位的财力、物力、经费条件与研究目的有所不同，可以自己决定使用何种仪器。如法国泊肃叶临床医生，在 1840 年代为了研究血液黏度采用毛细管黏度计与秒表计时，发明了著名的泊肃叶定律，至今认为是生物流变学的先驱者。又如澳大利亚著名的血液流变学专家，丁坦法思在 1986 年发表论文说，因为血浆的黏度值是很低的，用一般的回旋黏度计来测是难以测准的，他建议还是用奥氏毛细管黏度计和计时器为好[8]。

6.6.6 滞后环的多样性：血液的或其他生物物质的滞后环可以有多样性，原因在于三角波切变率真正的最低的起点和终点的数值来确定。本文的起点和终点是 $0.000s^{-1}$ 开始，其相邻的一点是 $0.001s^{-1}$ 的。可以说是真正的从 $0.000s^{-1}$ 开始进入了起点和最后回归终点 $0.000s^{-1}$ ，因此获得具有粘弹性和触变性双环的“8”字形曲线图。如果如图 21 所示的从直线 AB 切变率约为 $1s^{-1}$ 作为三角波的起点和终点，那么就只能获得触变性单环的滞后环曲线而没有粘弹性环；如果如图 21 所示的从直线 CD 切变率约为 $2s^{-1}$ 作为三角波的起点和终点，那么就只能获得开口环的、不闭合的触变性滞后环曲线；如果如图 21 所示的从直线 EF 切变率约为 $5s^{-1}$ 或 $5s^{-1}$ 以上作为三角波的起点和终点，那么就不能够获得滞后环曲线，而是上升线与下降线合并的单线。可以认为如上的实验结果都是正确地与可以信赖的，只不过是实验的条件不同而已。

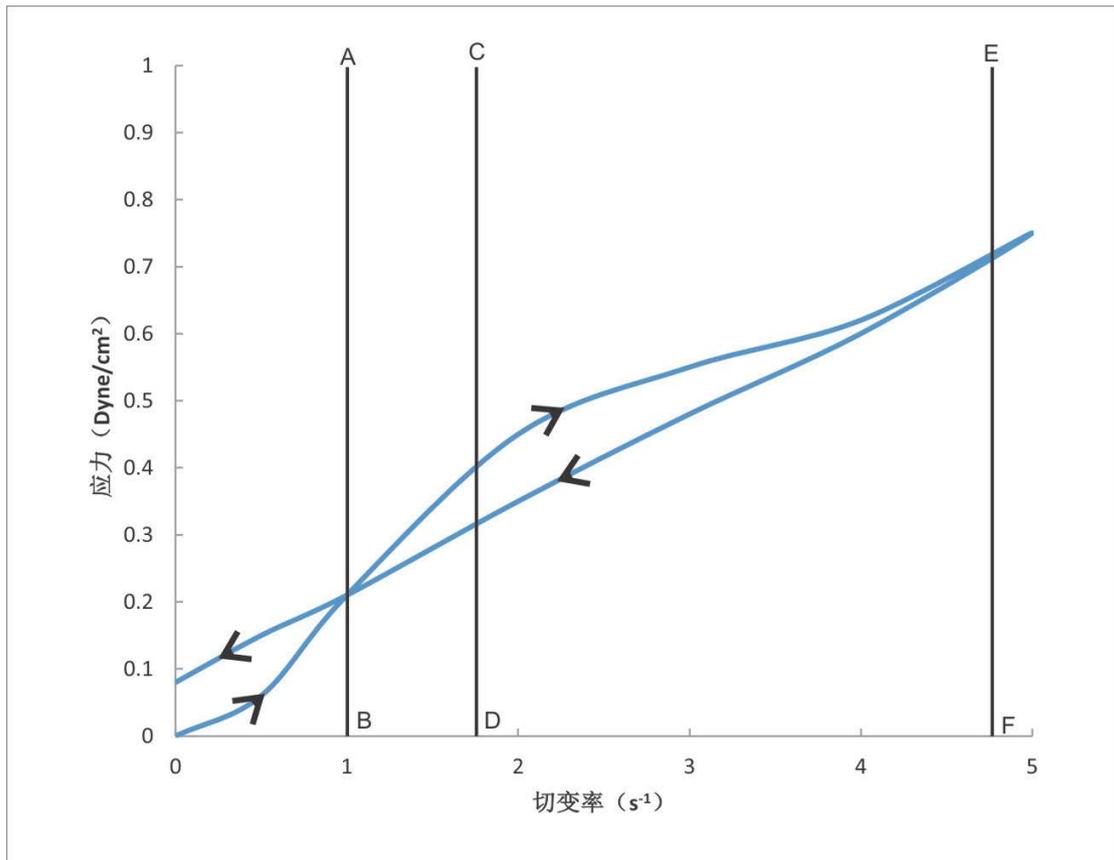


图 21 血液滞后环的多样性（来自于三角波切变率真正的最低起点和终点）。

本文的 HT 新型流变仪，能够完整地把血液在极低切变率下粘弹性的逆时针环、继之又显示了血液的触变性的顺时针环、最后显示了三角波上升线与下降线合并的单曲线展示血液在较高切变率下的近牛顿性流体的行为，如此完整地把血液在不同切变率下显示出，是这仪器对血液循环系统中的理论与实验的新贡献。其次本文对健康人、冠心病、缺血性中风病人三组合计 132 例，进行了比较。认为其中两组病人某些病例的发病与血液滞后环、触变性、粘弹性某种相关性。如对于人群中预先测出具有明显的滞后环异常者，有提示预防性治疗价值；如对于已发病病人（如心肌梗塞、缺血性中风）根据滞后环的曲线图形和特征数据的异常性，具有指导治疗的价值。以上关于以上血液滞后环、触变性和粘弹性请见参考文献[1、2、3]，其他还有较多报道在参考文献[4-6，9-12]还可查阅到。由于矩形波作用下本课题组没有做这方面的工作，而且国内国际报道也少，因此本书没有记载这方面的资料，请读者原谅。

参考文献

- [1] Shi Yong-de: Thixotropy, Visco-elasticity and Hysteresis Loops in Blood System. In HORIZONS IN HEMORHEOLOGY (PART I. BASIC CONCEPTS), Chapter 7. Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1990, ., pp67-81.
- [2] Xing Wei-jun, Fang Min, Bu Yan-fang, Shi Yong-de: Studies on Blood Hysteresis Loops, Visco-elasticity and Thixotropy for Patients with Coronary Heart Diseases. Journal of Applied Biomechanics, 10 (SUPPLEMENT): 76-85, 1995

- [3] 施永德 (译): 健康人、冠心病与缺血性中风病人的血液滞后环、触变性与粘弹性的研究。中国血液流变学杂志, 33(3):405-417, 2023
- [4] Huang CR: A Thermodynamic Approach to Generalized Rheological Equation of State for Time Dependent and Time-independent non-Newtonian Fluid. Chem. Eng. J. 3:100-104,1971
- [5] Huang CR and Fabisiak W: A Rheological Equation Characterizing both the time Dependent and Steady Viscosity of Whole Human Blood. Aich Symposium Series,74(182):19-21, 1978.
- [6] 施伟、矫树魁、杨景文、乐忠庆、施永德: 非线性血液滞后环曲线的连续反应动力学数值解。中国血液流变学杂志, 26 (4): 289~396, 2016。
- [7] 茅福成: 血液流变学检测现状调查及对策的思考。上海医学检验杂志, 第14卷第5期, 第306~307页, 1999。
- [8] Ditenfass L.: Relationship between Blood Viscosity Factors and Diseases or Fitness: Some pitfalls and Some New Opportunities. Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine. 10(1): 7~19, 1986
- [9] Shi Yong-de: Constitutive Equation Characterizing Whole blood System under Dynamic Shearing. In HORIZONS IN HEMORHEOLOGY (PART III. CONSTITUTIVE CONCEPTS AND THEIR UTILIZATION IN MEDICINE). Chapter 4, Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1995., pp 73-89.
- [10] Yang Jingwen, Luo Zhongqing, Xu Jiming, Ling Jie, Zhao Meijin: Study on Hemorheology, Visco-elasticity, and Thixotropy for 70 cases of Cerebral Thrombosis. In: HEMORHEOLOGY IN CEREBRAL DISORDERS. MEDICAL BIOPHYSICS, ISSUE 2, 1991, EDITORS: Shi Yong-de (China), Ernst E (Austria), SYMPOSIUM OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEMORHEOLOGY IN CEREBRAL VASCULAR DISORDERS (ICHCV), JUNE 24-28, 1991, SHANGHAI, CHINA, SHANGHAI SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL LITERATURE PUBLISHING HOUSE., pp263~268, 1991
- [11] 陈叔奇、梁子钧: 人体血液滞后环以及 Huang 方程表征血液触变性的研究。流变学进展, 主编: 陈文芳、袁龙蔚、许元泽, pp492~499, 1986, 北京学术期刊出版社。
- [12] 陈叔奇、梁子钧: 红细胞聚集过程的触变性研究。流变学进展, 主编: 陈文芳、袁龙蔚、许元泽, pp499~505, 1986, 北京学术期刊出版社。