

编者按: 国际知名的生物工程学家、举世公认的生物力学的开创者和奠基人冯元桢先生于2007年获得旨在奖励在工程领域取得杰出学术成就人士的“拉斯奖”, 2009年9月15日又是冯先生的九十华诞。作为对冯先生迟到的祝贺, 本刊特邀中国科学院力学研究所研究员、中国生物医学工程学会原副理事长陶祖莱先生撰文, 介绍他在冯先生实验室当访问学者期间以及此后多次接触中得到冯先生教诲的深切体会, 包括冯先生的治学之道、学者风范和人格魅力, 从中我们可以领悟到冯先生取得辉煌成就的深刻原因, 这些对广大力学工作者而言, 是很有启发意义的。

冯先生的杰出学术成就雄辩地表明, 力学作为具有广泛应用的基础学科, 在它与其它领域有机交叉结合后, 对于科学技术的发展和人类社会的进步将能起到巨大的作用, 这是对广大力学工作者的极大鼓舞, 我们对冯先生表示崇高的敬意。值此, 我们还对冯先生作为本刊特邀编委, 常为本刊撰写文章、关心本刊发展、对本刊质量的提高所起的巨大作用, 表示诚挚的感谢!

《力学进展》编辑部

## 冯元桢简介

冯元桢 (1919年9月15日~), 力学家, 生物力学的创始人和生物工程的奠基人, 并被誉为“现代生物力学之父”和“生物工程之父”。生于中国江苏省武进县, 少年时曾就读于苏州中学, 1937年考入国立中央大学 (1949年更名南京大学) 航空工程系, 1941年获学士学位并留校任教, 1943年获该校硕士学位, 1948年获美国加州理工学院博士学位, 1959年任美国加州理工学院教授, 1966年任美国圣地亚哥加州大学教授, 现是该校荣誉教授, 中国科学院力学研究所名誉研究员。

1966年以前, 冯元桢教授主要从事航空工程和连续介质力学方面的研究并取得卓著成果, 其第一部专著 *Theory of Aero Elasticity* 已成为气动-弹性力学领域的经典著作。1966年以后致力于新兴交叉领域——生物力学的开拓。在这一领域内, 冯元桢和他的实验室取得了3项具有里程碑性质的成就, 即生物软组织本构关系的研究、肺微循环及肺血流动力学规律的研究以及生物组织、器官的应力和生长关系的研究。在此基础上于20世纪80年代提出了以治疗组织、器官不可逆缺损为目的的组织工程的概念, 并迅速成为生物医学工程中的一个新领域, 从而拓宽了再生医学

的广度和深度, 现已成为再生医学研究和发展的主要方向。

他曾出任世界生物力学理事会首任主席并数度连任、美国生物医学工程学会主席。他是美国国家工程院院士 (1979)、美国国家医学研究院院士 (1991)、美国国家科学院院士 (1992) 和中国科学院外籍院士 (1994)。他曾获国际微循环学会最高奖 Landis 奖、国际生物流变学会最高奖 Poiseuille 奖、美国机械工程师学会“百年大奖”(1981)、美国国家工程院“创始人奖”(1998)、美国科学最高荣誉“美国国家科学奖章”(2000) 和学术地位堪比诺贝尔奖媲美的“拉斯奖”(Fritz & Doleres Russ Prize) (2007), 该奖项旨在奖励工程 (包括生物工程) 领域的杰出学术成就及其有功人士等。为表彰冯元桢对科学和科学教育的献身精神, 1986年美国机械工程师学会设置了“冯元桢青年研究工作者奖”, 1999年加州大学为他兴建“生物力学之父冯元桢礼堂”。

冯元桢热爱祖国, 对我国生物力学的建立和发展以及生物医学工程的发展起了巨大作用。他曾帮助国内好几个单位创立生物力学、生物工程方面的学科, 帮助培养研究人员和师资, 并担任名誉研究员或名誉教授。

## “独上高楼,望尽天涯路”

——为冯元桢先生九十华诞作

陶祖莱<sup>†</sup>

中国科学院力学研究所,北京 100190

30 年前的 6 月,王君健(华中理工大学)、吴云鹏、王公瑞(重庆大学)和我借参加世界第三届微循环大会之时,访问了冯元桢先生的实验室,拜识了冯元桢先生。接着,冯先生又来华讲学(武汉、重庆,1979 年 8 月至 9 月),并在华欢度了 60 寿辰,这也是中国生物力学的发轫点。

30 年过去了,冯元桢先生开创的生物力学(biomechanics)已经从“研究生命现象中的力学问题”拓展、深入到从群体(生态系统)、个体、生理系统、器官、组织到细胞、分子等各个层次生命体和活性物质的结构-功能关系中;从地球生物进化到生物大分子自组装(self-assembling)和重建(remodeling)等基本科学问题,从而与生命科学融为一体,力学生物学(mechanobiology)已成为 21 世纪生命科学的一个生长点。与此同时,冯元桢先生所创建的、以医学进步的需求为背景、以生物力学为基础的生物工程(bioengineering)<sup>1)</sup>,其主流也经历了由人工器官→生物人工器官/组织工程(tissue engineering)<sup>[1]</sup>,细胞工程(cellular engineering)→再生医学工程(regeneration medical engineering),疾病诊疗→个体化手术设计(surgery planning)→人类行为工程(health care engineering),而进入到一个在更高层面上以改善人的整体功能、开发潜能为目标的人类健康工程(human performance engineering)的阶段<sup>[2]</sup>,这是一个充满着突破机遇的新领域。而无论是生物力学还是生物工程,在它们创建和发展的半个世纪的历史进程中,无不留下了冯元桢先生的巨人的足迹。2000 年美国授予冯元桢先生国家科

学奖,是对他创建新学科、新领域的一种历史的肯定。

30 年过去了,亲聆冯元桢先生教诲的中国第一代生物力学工作者大都离开了研究工作的第一线。但受过良好的多学科交叉训练的中青年学者,正沿着冯元桢先生倡导的方向,扎扎实实地前进,并在不同的子领域里取得越来越多的国际交流话语权。

全面地阐述、评价冯元桢先生在开创、发展生物力学和生物工程领域中的作用,非我力所能及。这里,仅就我和冯先生的接触和在冯先生身边工作的短暂经历中的一些事,说说我的感受,以见冯先生人格魅力和学者风范之一斑,或可于后来者有所裨益。

### 1 “你的生理学知识不能低于一个大夫”

30 年前 6 月的一个夜晚,在冯先生家用完晚餐,我手端葡萄酒杯,傍着壁炉(装饰性),坐在地毯上大家一起聊天。冯先生问我:“祖莱,你搞生物力学是‘下海’呢,还是当‘票友’”?我问:“下海怎讲?票友又怎么说”?冯说:“票友,就是找几个问题,写几篇好文章。XX(一位有名的流体力学家)就是很好的票友;下海嘛,就要解决实际问题,你的生理学知识就不能低于一个大夫”。这儿句话对于人到中年、满怀希望用手中的力学之斧在生物的原野里开出自己的路的我来说,无异是当头浇了一桶冷水。次日,在会议休息时遇到了钱煦先生,他是生理学出身的生物流变学的开创者之一。当

收稿日期:2009-10-10,修回日期:2009-10-20

<sup>†</sup> E-mail: zulai@imech.ac.cn

1) bioengineering 是不同于 biotechnology 的一个学科领域,其内涵是“工程科学的原理和方法与生命科学的原理和方法相结合,认识生命运动的(定量)规律,以维持和促进人的健康”。

我说到正访问冯先生实验室时，他高兴地说：“你们找对地方了。从工程(科学)过来搞生物的人很多，但在生理上过了关的只有冯”。他的话再一次震动了我，启示我：当你从自己的母领域(A)转向一个新的交叉领域( $C = A * B$ )时，你在新领域(C)能否立足、生存、发展的必要条件是B领域的人能否接受你，并认同你的工作。否则，你很难具备在交叉领域里获得可持续发展的能力。

历史地看，用力学的方法研究生命现象可追溯到伽里略、笛卡尔、牛顿、Young 和 Poiseuille 等，但作为一门独立的分支学科则兴起于 20 世纪 60 年代中后期，其分野则是独特的方法学原则的形成，而冯元桢关于肺微循环的研究正是这一新的方法学原则创立的标志。冯元桢和专门研究肺循环的生理学家 Sobin 合作，以猫为模式生物，从猫肺微血管系统形态学的定量研究入手，提出了关于肺毛细血流的片层流动(sheet flow)模型，

见图 1<sup>[3]</sup>；力学方法和生理学方法相结合，测定了肺毛细血管片层组织的力学性质，见图 2<sup>[4]</sup>；运用流体力学原理分析了肺毛细血流的规律，见图 3。这一研究获得了微循环领域的最高荣誉——Landis 奖(1975)。

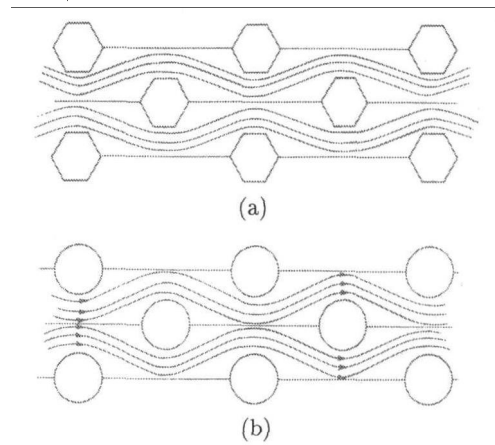


图 1 肺泡 - 毛细血管床中的流动<sup>[3]</sup>

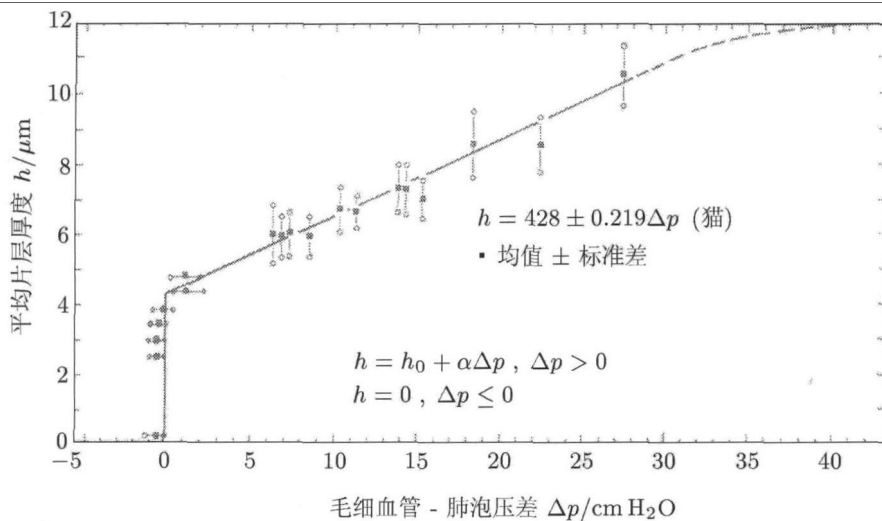


图 2 片层厚度 - 压差关系<sup>[4]</sup>

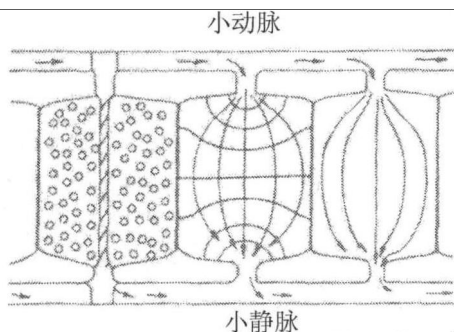


图 3 肺微循环流动理论分析

然而，当冯元桢和 S.Sobin 试图从肺微循环出发寻求肺循环定量规律时，遇到了一个拦路虎：肺微血管床和肺小静脉血管的连接并不像图 3 所示的那么简单，传统组织学的研究没有为此提供基础。必须从建立方法开始从头研究。直到 80 年代初他们才解决了肺毛细血管组织和肺小静脉连接的模式(示例如图 4)和形态学参数问题。并进而测定了它们的力学性质。值得一提的是，1979 年 8 月，在武汉的生物力学培训班上，当时，冯的助手颜荣

次博士特别用一讲的时间, 讲述了他们所遇到的难题, 告诫我们: 不同的生物、不同的器官微循环血管组织往往具有很不一样的形态和结构, 以免我们走弯路. 这个定量形态学问题的解决对于肺循环力学规律的研究是至关重要的. 因而冯元桢就用图 4 作为其专著 *Biodynamics, Circulation* 的封面.

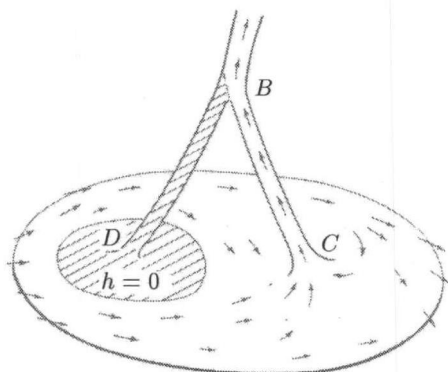


图 4 肺毛细血管床 - 肺小静脉连接模式

在此基础上, 冯元桢和他的实验室解决了正常生理条件下, 肺循环的规律 (定量) 问题, 并为长期困扰肺循环生理学界的“瀑布”现象, 提供了一个理论和实验一致的定量的解释, 见图 5.

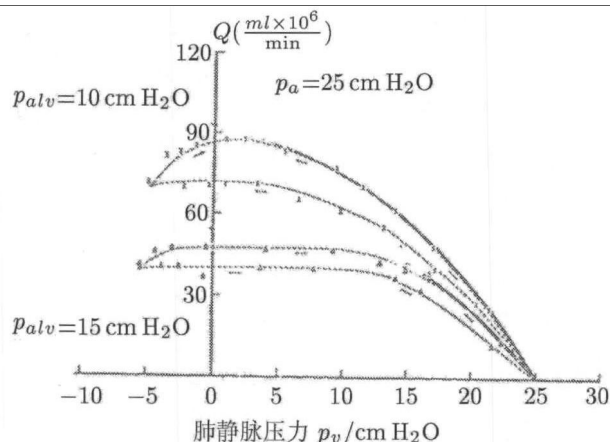


图 5 肺循环“瀑布”现象的理论分析与实验结果比较

显然, 如果不是力学、生理学、解剖学、组织形态学等不同领域的知识在冯的知识结构里的有机结合、融合, 上述问题的解决是不可能的.

还记得 1984 年秋, 冯在洛杉矶一次为多会联合学术会议上报告了上述结果后, 在驱车回加州大学圣地亚哥分校的途中, 十分感慨地对我说了一句话: “15 年哪! 祖莱”. 从中我感悟到 (学科) 交叉的真谛, 领会了交叉学科对从事于它的人的

要求 (苛刻的要求), 明白了他多次告诫我: “定性点” (常州话), “要甘心坐冷板凳” 的良苦用心.

聊可告慰的是 30 年来, 冯元桢先生的这一系列告诫, 我一直铭记于心. 尽管作为中国生物力学的第一代, 我说不上取得了什么成果, 但是, 正是这些教诲使我在转向应力 - 细胞生长、空间生物技术、组织工程等新的研究领域时, 能够把握正确的方向, 并为以细胞 - 应力生长为主题的实验室建设打下了良好的基础.

## 2 要解决实际问题, 不要点辍升平

冯元桢先生每次来华访问时, 总会收到很多单位和个人送来的已发表的论文. 我没听到过具体的评论, 但曾不止一次听他说过: “论文要解决实际问题, 不要点辍升平”. 而且他还告诫过我“解决问题要彻底, 最好不要让人家再来做”. 如果说前者是真正科学论文的标准, 那么后者就是一个更高的要求. 这或许可以用他几个早期生物力学的工作来说明.

20 世纪 60 年代中期, 红细胞的力学行为, 尤其是它的高度可变形性是早期生物力学的一个热点. 尤其是红细胞内、外压力 ( $P_i, P_0$ ) 是否相等 (这涉及膜的受力状态). 当时, 人们做了不少实验, 结果互相矛盾, 莫衷一是. 从等渗条件下测定的红细胞自然形状双凹碟形旋转体出发, 冯<sup>[5]</sup>作了一个简单的理论分析 (取坐标如图 6 所示), 细胞膜所受切向应力为

$$N_{\phi} = \frac{P_i - P_0}{2} \cdot \frac{r}{\sin \phi}$$

在图 6 中 C 点,  $r \neq 0, \phi = 0, \sin \phi = 0$ . 若  $P_i \neq P_0$ , 则 C 点上  $N_{\phi} \rightarrow \infty$ , 这是不可能的, 故结论只能是  $P_i = P_0$ . 矛盾的实验结果是测量方法本身的干扰造成的. 从此, 再无人就此发生争论.

至于红细胞膜超乎寻常的变形能力, 冯只是用他的 *Biomechanics* 一书中的一小段文字, 从微分几何原理出发作了一劳永逸的回答. 自然状态下的红细胞是双凹碟形旋转体, 其膜是可贴合表面 (applicable surface). 这样的表面可以连续地变形为任一可贴合表面, 而表面的内蕴度规张量 (intrinsic metric tensor) 不变, 因而膜应变和膜应力不变.

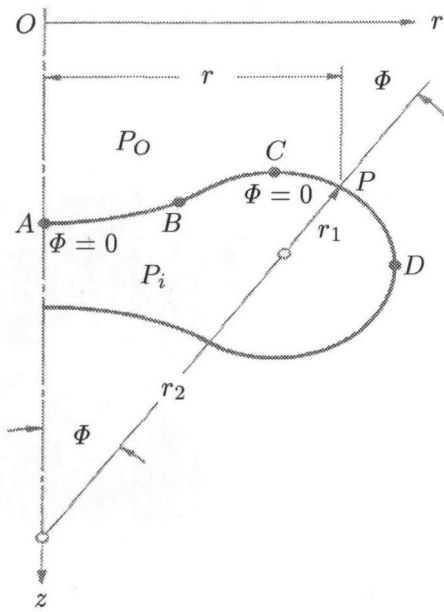


图 6 红细胞子午面, 坐标系

另一个例子是微循环流动中毛细血管网络里红细胞分布很不均匀, 而且随时间而随机变化, 搞微循环的人称为间歇流, 认为这是微循环流动的固有特性, 但不知其所以然. 冯用一个简单的模型, 如图 7 所示, 从理论和实验两方面阐明了造成这种现象的流体力学机理<sup>[6]</sup>. 从此, 微循环血流间歇性一词就成为历史的陈迹, 而这张图亦被冯选作他的巨著 *Biomechanics, Properties of Living Tissue* 的封面.

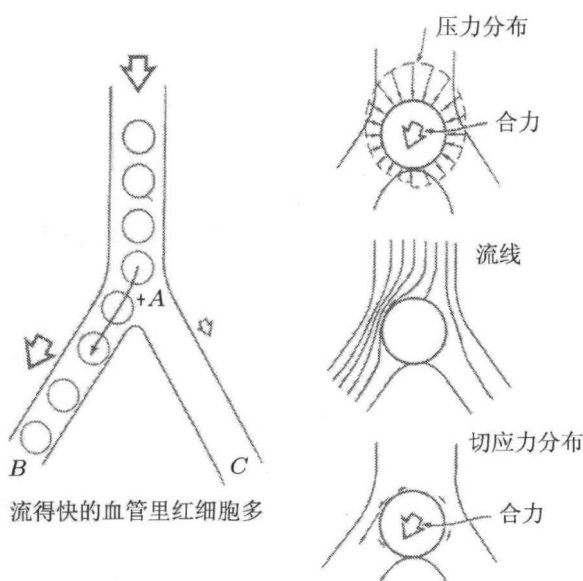


图 7 毛细血管分岔点上红细胞(模型) 受力分布, 红细胞必然流入流得快的毛细血管中

清晰的概念 → 明快的思路 → 简洁的方法

→ 无可争议的结论, 这一切都来源于对问题本质的深刻认识和对本概念和原理的精深把握. 这也是师与匠的本质差异之所在.

### 3 “自然是朴素的”

冯元桢先生和他的实验室在生物力学界的地位是举世公认的, 但 20 世纪 80 年代我在他那里工作时却没有看到什么高精尖的“关键设备”. 唯一有点现代“型”的实验装备就是为测量皮肤力学性能而自行研制的二维拉伸实验台了. 但一提到它, 冯总是摇头, 说: “XX 就是喜欢把东西搞复杂”. 这不仅仅是因为系统越复杂, 环节越多, 可靠性越差; 更为根本的是冯元桢先生坚信: “自然是朴素的”. 研究自然科学就是要揭示现象的本质, 还自然的本来; 因而合理、简捷的途径就是顺自然朴素之本性, 尚简朴而弃繁复. 冯元桢先生对于活体应力 - 生长关系的揭示, 就是一个成功的典范.

受力状态和骨组织生长的关系早已为人所熟知, 但作为生物学的普遍规律, 应力 - 生长关系的发现, 始于冯元桢对血管壁应力分布的深入研究<sup>[5]</sup>. 当时这类工作很多, 不管用什么样的模型(薄壁、厚壁等), 也不论用什么样的本构关系, 都沿用结构力学的假设: 当载荷为零时, 结构内部应力为零(零应力假设). 研究结果亦大同小异, 即血管内壁应力高度集中(与平均应力相比, 有数量级的差别), 而外壁应力很小(比平均应力降低一个数量级), 典型结果如图 8 所示.

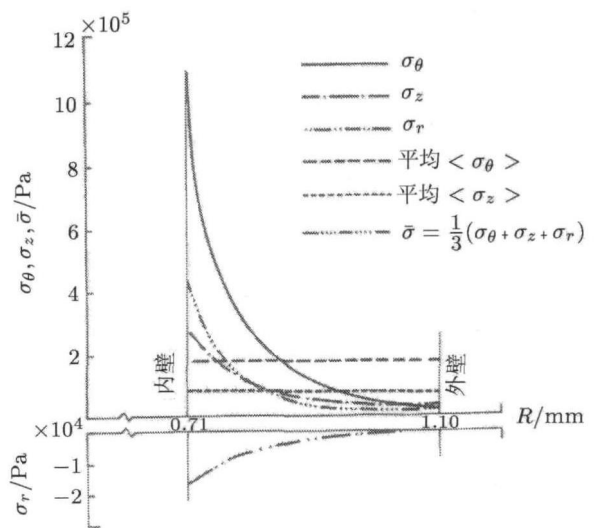


图 8 兔主动脉血管壁内应力分布. 管外负荷 0, 管内压力 120 mmHg. 轴向拉伸比为 1.691

显然,这不符合生物学的普遍规律——适应性原理(adaption principle),它告诉我们:经进化而生存于地球上的所有物种,都具有与其生存环境相适应的(最佳)结构和功能.问题出在哪里?冯坚信:自然是朴素的,适应性原理是普适的,毛病在于零应力假设上.尽管它在工程分析中是通用的,但对像血管这样的生物组织来说,当血管壁内、外压力相等,血管壁负荷为零时,血管壁内应力也可能不等于零,即存在残余应力.为验证这一假设,冯元桢和他的学生用了一个最简单直观而又可靠的方法,从实验动物身上取出一段动脉血管,泡在生理盐水中,管内外压力相等.在保持其活性的条件下,沿血管纵轴方向剪开.若壁内存在残余应力,则切口就会移动,并达到一个平衡位置(真正的零应力),形成一定的张开角( $\alpha$ ).图9所示的实验结果表明,当血管内外压力相等时确实

存在残余应力.而冯元桢和他的学生计算了血管壁的应力场,测得的张开角为零应力状态.结果表明血管壁内应力分布趋于均匀,如图10所示.这符合生物力学的普遍规律——适应性原理.

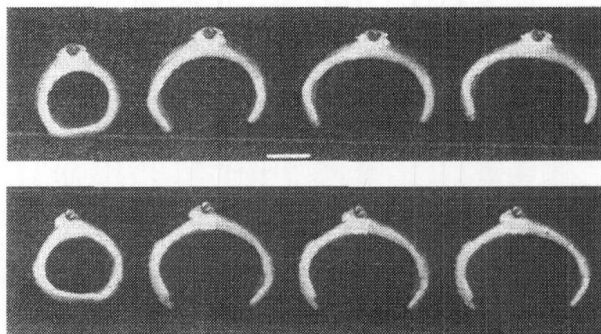


图9 猫胸主动脉血管横切面形状<sup>[7]</sup>. 两种不同的溶液,自左至右,(1)切开前(2)切开15s(3)切开15min(4)切开30min

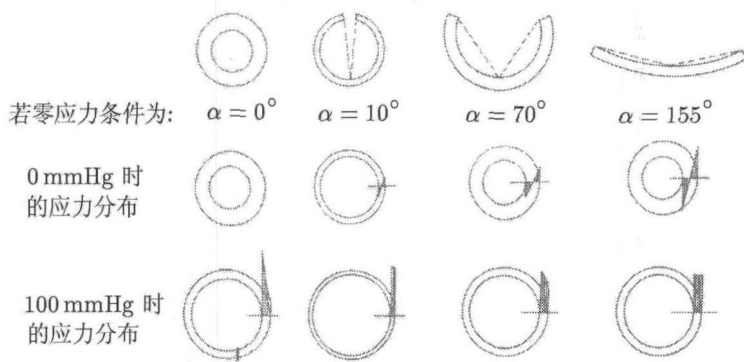


图10 说明残余应力对血管壁内周向应力分布的影响

大量实验表明,残余应力在心脏、肺、肌肉、骨骼等器官和组织中是普遍存在的<sup>[7,8]</sup>.而残余应力是怎样产生的?Harris等的实验证明,在细胞生长、增殖过程中会产生力从而改变基底膜的应力分布<sup>[9]</sup>,而且这种力会诱导原胶原分子排列有序化.这表明组织内残余应力的产生提供了细胞水

平的实验支持.

据此,冯元桢<sup>[10]</sup>提出了关于活组织和器官应力-生长关系的假说:在正常生理条件下活组织和器官内的应力分布应满足其功能优化的需要,而这一过程符合如图11所示的规律.

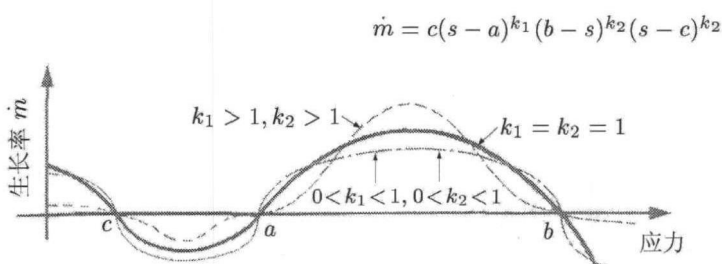


图11 关于组织、器官应力、生长关系的冯元桢假说的示意图

按照这一假说, 如果条件异常 (如病理状态), 那么组织器官必将发生重建 (remodeling), 以实现其生理功能. 图 12 是当人为结扎使主动脉血压提高后, 不同时间、主动脉不同位置上血管切片张开角及血管壁厚度的 (零应力状态) 的改变<sup>[11]</sup>. 它为上述假说提供了一个有力的实验支持 (据假说设计的可证伪的实验而又不被证伪). 这一实验结果被冯选作其巨著 *Biomechanics, Motion, Flow, Stress, and Growth* 的封面.

另一方面, 动脉粥样硬化的流体力学机理的研究, 揭示了流体动力学因素对血管内皮细胞生长及相关基因调控、表达的作用. 从而, 应力 - 生长关系成为细胞生物学的一个新生长点 —— 力学细胞生物学 (mechano cytobiology). 正如冯元桢先生所说: “应力 - 生长关系是生物力学的活的灵魂”. 它揭示了地球上最简单的物质运动形式机械运动和最高级的生命运动的内在联系. 从而使生物力学与生命科学融为一体. 用冯元桢的话来说: “生物力学是生物结构 - 功能关系的 ‘中名’ ”

(“Biomechanics is the middle name of biological structure and function”)(1998). 生物的结构功能关系是多层次的, 从生物大分子、细胞、组织、器官、系列到个体, 故生物力学涵盖了生命科学的各个层次, 从而为生命科学别开新生面 —— 力学生物学 (mechanobiology); 而对于生物工程 (bioengineering) 来说, 应力 - 生长关系是细胞工程、组织工程和再生医学工程、健康工程 (health care engineering) 乃至人类行为工程的重要基石.

毋庸置疑, 活体研究是 20 世纪生物力学的根本性突破, 而实现这一突破的主要工具 (“关键技术装备”) 却是一把手术剪刀, 外加生理盐水和培养皿, 简单得不能再简单了. “自然是朴素的”! 无论是原创的发现, 方法学的原创, 原理性的突破等等, 均源于原创的思维和对问题本质的真正凝炼, 对基本原理的精深把握以及与之相适应的方法学的创建, 而方法学的创新与高精尖的仪器设备还是两个概念. 再好的工具, 代替不了思维的原创; 只有在原创的思维指导下, “器” 才能彰显其利!

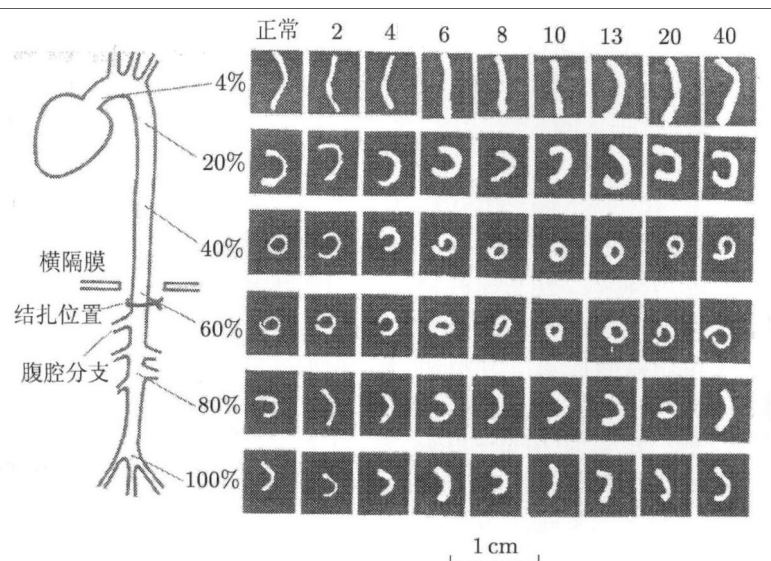


图 12 主动脉血管结扎造成血压升高后不同时间且不同位置上血管张开角的变化

#### 4 “医疗费用是全社会的负担”

1978 年冬我国生物医学工程起步伊始, 涌现了一阵 “全植入人工心脏” 之热, 试图以此为龙头推动中国生物医学工程的发展. 1979 年 6 月访问加州大学圣地亚哥分校时, 我在和冯先生聊天时提及此事. 冯当即严肃地指出: 此事决不可行, 原因不在于技术上的难度, 而在于医疗费用负担不

起. 当时我很傻, 说: “那没关系, 我们有公费医疗”! 冯笑笑对我说: “不管是公费医疗, 还是社会医疗保险, 医疗费用是全社会的负担. 社会的承受能力是有限的”; 而且还告诉我: “工程本身就有经济的内涵, 即以最低的成本实现预定的工程目标. 美、欧等国之所以倡导生物医学工程 (biomechanical engineering), 初衷之一就是要控制医疗费用, 而不仅仅是为了医学的进步”. 这一席启示录式的谈

话, 对我近 30 年来的学术生涯影响深远, 可以说改变了轨道。

1984 年 6 月至 1985 年 9 月, 随冯先生工作期间, 最享受的或许是双周五下午 3 点后和冯先生的交谈, 工作讨论往往很简单, 更多的是漫谈。在诸多话题中, 有一条线就是 1979 年 6 月的那一段对话的延伸。他使我明白了一个真正的科学工作者/学者/科学家的社会责任, 明白了自然科学、工程科学和工程技术的差异和关系, 明白了全世界对赤脚医生高度评价的原因, 也明白了作为中国生物医学工程先行者的义不容辞的责任。因此, 20 世纪 80 年代末我参与了中国生物医学工程学会学术工作委员会发起的关于中国生物医学工程的发展战略的民间探索, 并在当时中国医学科学院院长顾方舟的大力支持下, 提出了“发展省钱的生物医学工程”的设想。1990 年中国生物医学工程学术讨论会上, 由顾方舟教授作了大会报告。冯元桢先生恰好来华, 听了报告后立即起来作了这样的评价: “这个报告题目把‘中国’二字改为‘世界’完全适用”, 并强调指出: “要做就要做世界第一”。为此, 冯元桢先生多次强调, 无论是生物力学, 还是生物工程, 都应当“发明与发现并重”。这不仅是社会需要, 也是工程科学的内在特性所决定的。

民初国学大师王国维在《人间词话》中曾以 3 小节宋词来况喻做学问的 3 种境界。其中第 3 小节曰: “独上了高楼, 望尽天涯路”。以此况喻冯元桢先生的学术、思想境界和豁达胸怀是十分贴切的。而冯先生之所以能臻此至高之境, 除了禀赋颖悟, 治学勤奋, 学风严谨, 学识渊博, 胆识过人 (例如, 年过不惑, 弃已获卓著成果的气动弹性力学领域, 敢为天下先, 开拓生物力学这一大跨度交叉的新领域) 外, 丰厚的文化 (中国传统文化) 底蕴和淳厚的道德修养也是重要的因素。

从冯先生身上, 我明白了专家和科学家的差别。作为科学家, 不仅要有深厚的学术积累, 还要有哲学的高度, 历史的眼光, 道德的风范和强烈的社会责任感。

从冯先生那里, 我感悟到真正的科学家是人做的。做人是当科学家的根基, 而人之本色在于他有一根竖直的脊梁, 敢于直面事实、直面风险, 敢于承担责任。20 世纪七八十年代, 冯元桢先生曾多次在国际学术会议的讲坛上宣称: “我是中国人”, 这不仅是胸怀爱国、报国之心, 不仅是民族的自豪, 更为根本的是人格的尊严。

30 年过去了! 星移物换, 春去秋来。值此金秋圆月之际, 谨向冯元桢先生、喻娴士先生致以学生的问候: “但愿人长久, 万里共婵娟!”。

#### 参 考 文 献

- 1 冯元桢. 生物力学. 北京: 科学出版社, 1984
- 2 NSF & U.S. Converging Technologies: To Improving Human Performance. 2002.1
- 3 Fung Y C, Sobin S S. Theory of sheet flow in lung alveoli. *J Appl Physiol*, 1969, 26: 472~488
- 4 Fung Y C, Sobin S S. Elasticity of the pulmonary alveolar sheet. *Circ Res*, 1972, 30: 451~469
- 5 Chuong C J, Fung Y C. *J Biomechanical Eng*, 1983, 105: 268
- 6 Fung Y C. Stochastic flow in capillary blood vessels. *Microvasc Res*, 1973, 5: 34~49
- 7 Fung Y C. *Biodynamics Circulation*. German: Springer-Verlag, 1984
- 8 Fung Y C. *Biomechanics Motion, Flow, Stress, and Growth*. German: Springer-Verlag, 1990
- 9 Harris A K, Wild P, Stopak D. Silicone rubber substrata: a new wrinkle in the cell locomotion. *Science*, 1980, 208: 177~179
- 10 Yen R T, Fung Y C, et al. *Biomechanics in China, Japan and USA*. Beijing: Chinese Scientific Press, 1983
- 11 Liu S Q, Fung Y C. Relationship between hypertension, hypertrophy and opening angle of zero-stress state of arteries following aortic constriction. *J Biomech Eng*, 1989, 111: 325~335