

关于生物力学

中国科学院力学研究所 陶祖莱

一 目的·意义

尽管人类对于宇宙空间和微观世界已有相当深刻的认识，人对生命过程及自身的了解却很不够。许多常见现象不知其所以然。譬如现行测血压方法已有近二百年历史，它基于Korotkoff声。但这种声音是怎样产生的？与血压有什么关系却一直不清楚。

因此用近代物理、化学的理论和方法研究生命现象已成为现代科学的一个重要领域。生物力学就是其中一个分支。

所谓生物力学就是用力学方法定量地、分析地研究生物系统功能和构造的关系。

生物系统极其复杂，其功能与构造的关系是多维的。它取决于系统组成、各组元或子系统的形态、物性及其在控制系统作用下随时间、空间的变化，控制过程本身又决定于系统和它内、外环境的相互作用及系统的动力学特性。生物力学的任务就是研究这些过程的基本规律，从而更深刻地认识生命世界。

认识世界目的在于改造世界。研究生物力学的现实意义在于：

1. 将自然的启示应用于工程技术。二十亿年自然选择形成的种种生物其性能往往比人造机器优越的多。生物系统构造—功能关系的研究为新材料、新技术、新装置的发明及新颖设计思想的产生提供了不竭的源泉。水生动物游泳力学、昆虫、鸟类飞行力学即属此例。

2. 为农业生产服务。如植物体内液体的送运，作物通风与呼吸、光合作用的关系等。

3. 是生理学和医学的理论基础，与人类健康有密切关系。许多事实证明，正确认识并应用生物力学的规律，可以挽救许多患者的生命；而不懂或误用生物力学知识已使不少人死于非命。

例如，第一次世界大战期间流感蔓延，许多人并发肺炎的肺脓肿，于是医生在患者胸壁开孔排脓。这从防感染来讲，无可非议。但它违背了呼吸的力学机理，结果不少人因肺气肿而死亡。

又如，不少国家里车祸是个严重问题。安全措施之一是装安全带，但其作用究竟如何却很可疑。车祸致死重要原因之一是主动脉弓和胸主动脉接头处断裂，其机理可能有二：(i) 胸主动脉因联于横膈膜，而心脉、主动脉弓相对自由，急剧减速时惯性力使

主动脉剪断，(ii) 突然撞击时血管内压力猛增，应力集中引起断裂。若后者为主，则安全带有益；若前者为主则非徒无益，反而有害。

不仅如此，和一切边缘学科一样，生物力学既是力学向生物学、医学的渗透，又是促进力学本身发展的一股动力。历史上，粘性流动理论发轫于J. Poiseuille 血流实验，现今动脉流型分析促进了脉动流稳定性理论的研究。1975年第73届欧洲力学会议上有关粘性流体脉动流的文章都是以生理流动为目标的。又如小管血流异常现象的探索推动了流体力学新分支—微流体动力学的发展。

正因为生物力学具有重大的理论和实践意义，现代技术又提供了必要的手段，六十年代以来这方面有了很大发展。欧、美、日、苏等国都建立了专门研究机构；国际学术活动相当频繁，有一支相当可观的专业队伍，取得了不小进展。1976年国际第十四届理论和应用力学会议上冯元桢——一位国际知名的生物力学家——预言，不久的将来，生物、医学工程将象当年的航空、火箭工程那样吸引大批工程师投身于它。对此，生物力学，就象空气动力学对于飞机制造那样，是必不可少的前提。

二 现状·特点

现代生物力学是个分布很宽的谱。以广度而言，从生物大分子、大分子集合体、细胞到各种动、植物和人，以及整个生物系统和外界环境的相互作用都是生物力学的研究对象。就深度而言，它既包括生物量子力学、生物热力学等高度理论性的分支，也包括创伤力学、医用流变学等实用性很强的亚类。为说明概貌，下面列个简单的表。

(1) 微观生物力学。研究生物大分子、生物大分子集合体、细胞、亚细胞组织、生物膜、生物纤维的构造与力学性状的关系。

(2) 生物材料的力学性质——生物流变学及微流变学。中心问题是建立各种生物材料(液体、软组织、硬组织)的状态方程。并研究宏观流变性质与微观结构的关系。

(3) 肌肉力学。研究各种肌肉收缩—松弛过程的力学规律。

(4) 生物系统结构静力学。不仅包括人体和现存各种动、植物，还包括古生物。

(5) 生物系统运动学。除人和动物外，还涉及微生物的运动。

(6) 生物系统结构动力学。主要研究人和高等动物运动器官、内脏器官的动力学特性、稳定性、破坏机理、以及创伤力学。

(7) 生物系统内部流体动力学，主要研究：

(I) 人和高等动物心血管系统动力学。

(II) 人和高等动物呼吸系统动力学。

(III) 人体器官内部血液流动和物质交换规律。

(IV) 植物和动物体内物质及能量的传输过程，等等。

(8) 生物系统外部流体动力学。包括昆虫、鸟类飞行力学；水生动物游泳力学；植物群通风与呼吸、光合作用的关系；植物根系分布和土壤渗流关系等。

(9) 生物系统控制过程动力学。主要涉及人和高等动物神经控制过程的基本规

律，体内各系统（如循环、呼吸、运动等）功能自动调节的原理、体温、体液等平衡的维持。

(10) 生物热力学。研究生物系统与环境之间的热力学平衡是怎样维持的？生物体从胚芽到成体发育过程中熵的变化等。

显然，全面介绍生物力学非作者力所能及。仅举二例来说明生物力学发展现状和特点

2-1 生物材料的力学性质

生物材料的力学性质是生物力学的基础。这里以软组织（皮肤、肌肉、腱等）为例说明生物材料的一般特性及处理方法。实验表明生物材料的特点是：

1°材料是非线性、非均匀、各向异性的。只有这样才能在不同条件下获得最佳功能。图1说明几种生物材料的非线性特性。

2°应力—应变关系与过程有关。即生物材料是粘弹体。这表现于：

(i) 应力松弛——应变一定，应力随时间变小。示例如图2。

(ii) 蠕变——应力不变，应变随时间增大。示例如图3。

(iii) 应力—应变曲线因应变率而异。周期性变载荷下，出现滞后回线，且每个周期的回线不同。因此，生物材料没有一个唯一的自然状态作为参考。试验时试样必须预调直至反应可重复，否则数据无法比较。

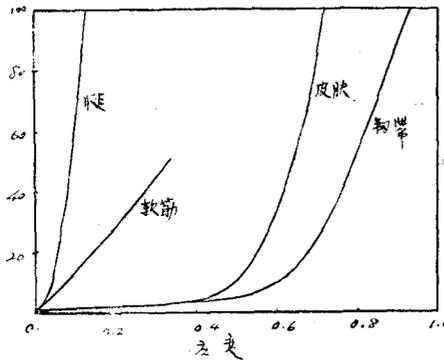


图1

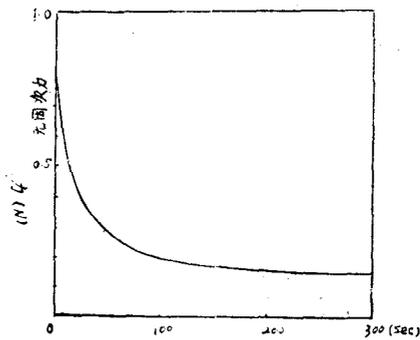


图2 兔关节软骨应力松弛

3°同一组织在体 (in vivo) 和离体 (in vitro) 时性质很不一样。即使在体时，生理状态不同，性质也不同。因为：(i) 在体材料总处于受力状态，试样一旦取下，尺寸改变，即使加载恢复原尺寸，应力状态亦不同。(ii) 组织材料性质和周围组织液的物化特性（尤其PH值）有很大关系。即使试样一取下就泡在同样PH值的溶液中，并在此环境下做试验也不能保证和在体环境一样。

再加上种类差异，个体差异，三维应力试验的困难，要准确测定生物材料（尤其人体材料）的力学性质几乎是不可能的。目前处理方法有三种：

(1) 根据各种组织应力实验结果，提出合理的粘弹性模型，建立半经验状态方程。这种方法用于生物力学边值问题，这以冯元桢为代表。

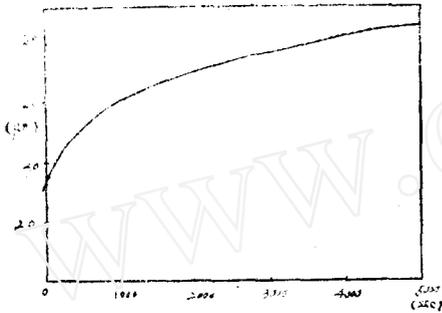


图3 人关节软骨蠕变

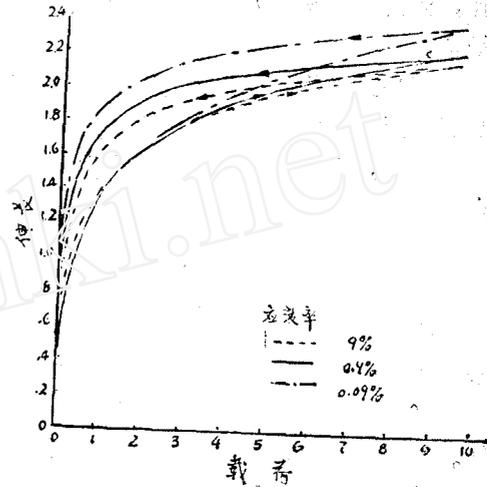


图4 兔右心室乳头肌

(2) 把生物材料力学性质和其组元—各种生物纤维、生物大分子及其集合体的性质、形态结合起来, 提出模型, 建立状态方程, J.T.Apter的工作即为一例。

(3) 通过理论分析, 建立某组织的模拟模型。给实体和模型输入同一信号, 调节模型某组元的参数使实体和模型输出信号一样, 由模型组元的参数估算该组织的某一物性。此即所谓参数估计法, 其前提是: (i) 可调节的模型组元的参数与该组织的物性是一一对应的; (ii) 实体中输出信号的变异完全是由所求组织物性改变引起的。显然, 这样所得结果很难说是组织的物性, 充其量只是组织物性的某种反映。

2-2 心血管系统动力学

这是现代生物力学最重要的分支之一。这里仅提纲式地列出它研究些什么, 有什么意义和目前水平。

(一) 血液流变学

血液是循环系统的工质, 是由血浆和多种细胞组成的多相系统。把它看作连续介质, 其状态方程是心血管系统动力学的基础。

理论上, 可以建立细胞运动的统计方程, 若已知血浆与细胞相对运动的流场, 则可由此导出血液状态方程。但由于 (i) 细胞膜弹性未知, (ii) 细胞—血浆相对运动涉及的水力—弹性问题高度非线性。现尚无法从理论上导出准确的血液状态方程。只有一些半经验方程, 应用较广的是Casson方程。

当前血液流变学研究集中于三大问题: (a) 宏观流变性质与细胞形态、运动的定量关系, (b) 红细胞膜的粘弹性, (c) 探索可应用于临床的血液流变学指标, 尤其是用以预报高血压、冠心病患者血栓形成的血象指标。

(二) 心脏动力学

总血流量决定于全身机体的需求, 出口压力取决于整个血管系统的阻抗, 每搏排血

量则与静脉回流量有关。故作为动力源，心脏的输出功率是由负载决定的。心脏动力学所研究的是心脏效率。它包括：

1. 心肌力学—用肌肉力学的方法研究全心收缩的规律以便从心腔压力和容量估计心脏的收缩能力。

2. 心脏血液动力学—研究 (i) 心腔内部血流流场及内阻抗 (ii) 瓣膜血液流场。

3. 心脏本身的血循环，冠脉输入阻抗、血流分布及心肌氧耗。

4. 心脏功能自动调节。

目前心脏动力学的研究还处于初始阶段。

(三) 血管血液动力学

人体血管管径变化很大，主动脉内径约2.5cm，毛细血管仅 $3\sim 8\mu\text{m}$ 。流速差异也很大，从25cm/sec到0.1cm/sec。雷诺数则从 $10^3\sim 10^{-3}$ 。故整个循环系统中流动特性很不一样，可分大血管流，小血管流，毛细血流三个亚区。这里仅涉及大血管和小血管流动。其共同特点是：血液可看作连续介质，血管看作纯导管。这样血管血液动力学问题本质上就是研究：粘弹性管系中非牛顿流体脉冲运动的规律。主要研究三大问题。

1. 大血管中血流压力—流量关系及脉冲波传播

除了生理学意义外，此问题的实用意义在于寻求循环系统功能变异的无创检测方法。现有诊断手段只有在病变相当严重时才能显示出来。若能在病变初期作出诊断，无疑将大大加强战胜心血管病的能力。对此，有二途可循：

(a) 测量主动脉口输入阻抗频谱以此评价动脉系统功能。

(b) 测量人工激发的高频小幅波的传播特性，以此作为血管弹性的指标。

二者均以粘弹性管中脉冲血流理论为基础。这方面国外已做了不少工作。值得一提的是美国Stanford大学研究小组和法国巴黎大学生物流变和生理流体力学实验室，他们设想首先建立理论模型，然后用模型或动物实验验证、改善理论，最后寻求体外测定脉冲波速的方法。工作正在进行中。

2. 动脉中扰动流型和局部流场分析

主要以动脉粥样硬化病理机制为目标，病理解剖表明病变都发生于血管分枝和弯曲处。可以推断，斑块形成、发展的内因固然在于血液和血管内各种生化过程，但形成发展的条件则是流场的动力学特性。但具体什么因素起作用？众说纷纭。Fry等认为是局部高剪应力损伤血管壁内皮膜，血小板凝集形成血栓所致，据此，病变应和流动局部加速、局部湍流等有关。相反，Caro等认为斑块最初发生于低剪切率区，那里流速低，扰动大，血脂易于沉积，血小板也易于凝集。故病变和流动分离、驻点及死水区等有关。冈小天则认为血流高压将加强脂类对血管壁的渗滤、扩散等等。目前工作基本上限于模型观测和生物实验。Smith等对分支流场、弯曲部流场作了初步理论分析。

3. 小管血液动力学

内径小于1mm的血管内红细胞个性将直接影响血液流动。这表现为红细胞向管心迁移，壁面附近形成一无细胞血浆层，而管心区细胞浓集，速度剖面变平，形成一个塞子。此现象对流体力学理论有意义。目前的分析限于刚性管，有三种方法：

(a) 半经验理论。把管心区看作某种非牛顿流体，壁面区为牛顿流体，分别处理，适当衔接，血浆层厚度的估计是经验的。

(b) 两相流理论。关键是红细胞模型。现有各种形状的刚性颗粒模型和液滴模型，都能模拟红细胞的部分行为，但不可能完全相似。需要建立一种充满粘性液体的大变形薄壳颗粒模型。主要障碍是细胞膜弹性未知。

(c) 微连续介质 (microcontinuum) 理论。把血液看作具有微结构的连续介质，宏观速度场是微元素速度的某种平均。宏观场的旋度和应变率与微元素角速度及应变率有差异，应力张量不对称。因此描述这种流体的运动除连续方程、动量方程外，还需要动量矩方程。问题是引进了一系列难于测定的常数。且边界条件不易确定。

(四) 微循环动力学

生命的基本运动形式是细胞新陈代谢，其前提是：不断供给 O_2 及养料，不断清除 CO_2 和废料。这主要靠毛细血循环完成。据研究，细胞离毛细血管距离超过 $1/1000$ 时就无法维持其生命。可以说，不了解微循环规律就不可能对人体生命过程有完整、科学的认识。目前研究集中于两个问题：

1. 毛细血流压力、速度关系及红血球分布。问题关键是红细胞弹性。
2. 通过毛细血管壁的物质交换。关键是壁渗透性。

(五) 系统分析和控制

心脏—动脉系—毛细血管组织—静脉系构成一闭环系统，各环节相互影响，因此整体功能不等于各部分的简单迭加；各部分的功能必须在整体中考察也有意义。这使问题大大复杂化。用传统的流体力学方法分析整个循环系统的血流规律是极其困难的，必须将问题大大简化—模型化。同一循环系统的模型因目的而异。例如研究血压、流量、外周阻力关系时，可用图5所示简单的“风箱”模型；研究整个动脉系的输入阻抗特性，可用图6所示不等臂T形管模型，配以适当的终端阻抗。研究恒定血容量下，闭环系统心脏输出与静脉回流等关系可用图7所示模型。此外Beneken, Guyton, Synder等用模拟计算机或数值计算机模拟整个循环系统，作了分析。

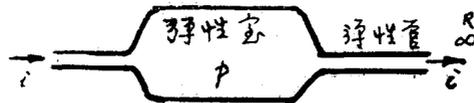


图5

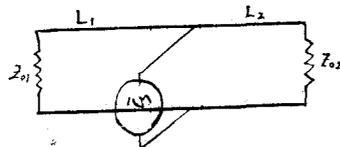


图6

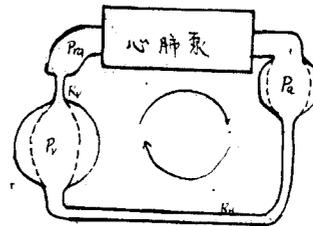


图7

不仅如此，循环系统功能受神经系统控制的。对此研究得很不够，Guyton等用经典控制论（传递函数频率特性等）作了初步分析，应用状态空间和分级控制理论于心血管系统尚有待探索。

综上所述，生物力学有四个特点：

1.生物材料物性不确定。实用中待求的往往正是组织物性的变异。故生物力学中反问题很多，即通过分析运动规律来推断组织物性变化。

2.生物系统很复杂，无论理论分析还是实验（活体或非活体）研究都必须模型化。而同一生物系统为解决不同问题，可建立不同的模型。故提出生物力学模型之前首先要明确规定其目的。

3.生物系统是多维的，系统各部分、诸因素之间的相互影响很强烈，当一个因素（或组元）改变时无法保持其他因素不变。故研究时必须综合、分析并重。单靠传统的力学方法是不够的，需探索新的途径。如应用控制论最优化理论等。

4.生物力学是边缘科学，需要力学、生物学、医学、生理学等各方面专业人员密切配合，通力协作。尤其需要经常性的学术交流和探讨。

三 看法·设想

生物力学这个学科正在发展之中，而我国还是空白，应当迅速填补。怎样填补并实现赶超？谈几点粗浅的看法。

一、结合我国具体情况创立具有中国特色的生物力学流派。

基础薄弱、测量技术差，人力、物力有限固然是我们的弱点，但也有特有的有利条件——积累数千年的丰富的中医遗产对生物力学提出了新问题，也为它提供了宽广的用武之地。

例如脉诊是中医传统诊断手段之一，我们的祖先在这方面有丰富的经验。据不完全统计，国内现存古籍就有169种之多。尽管传统脉学瑕瑜互见，尽管同样条件下对同一病人，大夫切脉结果有差异，古今实践证明脉象是客观存在的，脉诊是行之有效的。但原理何在？一直是个谜。

从物理上看，脉象是在不同外加扰动（浮、中、沉取脉）作用下，挠骨动脉血液流动、管壁脉动、脉冲波传播的综合反应。这种反应产生的信息通过人手指上许许多多超敏传感器输入高性能的计算机——有经验的大夫的大脑，经过综合分析就形成脉象的概念。掌握动脉血流，管壁运动及波传播规律，弄清它们和各种边界条件（人体各器管、组织）变异的关系，就有可能阐明脉象的物理（不是病理）机制；就有可能把脉象的传统的唯象描述变为若干物理量的定量分析，建立脉象的客观标准。这样就能去伪存真，去粗取精，由表及里，为认识脉象的病理原理创造条件，并在此基础上实现脉诊仪表化。这本身就是一种独特的、多用途无创检测法。

又如气血运行说是中医的基础理论之一，活血化瘀是其中一大治则，实践证明卓有成效。中医研究院西苑医院研制的“活血化瘀冠心病Ⅰ号方”治疗血栓，成功率达60%以

上,上海某医院用活血化瘀法治疗周期性精神分裂症效果极好。但要经验上升为理论,必须弄清何谓“瘀”?怎样“化”?有什么客观指征和规律?这些问题和血液流变—微流变性质、微循环等有密切关系。上海第一医学院生物物理教研室已有着手进行研究。

举此二例目的在于说明:在我国开展生物力学研究具有特殊意义——为创立中国的新医学奠基。而且有可能独树一帜,为人类做出独特的贡献。

二、根据生物系统的特点从一开始就注重综合与分析相结合,在用传统力学方法分析问题的同时,探索新途径。目前国外的研究分析较多,综合不足。

三、注意基础着眼赶超。生物材料物性是生物力学的基石,生物热力学具有基本理论意义,国外也刚刚开头。我们应及早开展这两方面的研究。只要协力协作,坚持不懈,经过努力,在本世纪内赶上世界先进水平是完全可能的。

参 考 文 献

- [1] 冯元桢编, Biomechanics Its Foundations and Objects (1972) .
- [2] Begel, Cardiovascular Fluid Dynamics Vol. I, I (1972) .
- [3] 冯元桢编, Biomechanics ASME (1973) .
- [4] McDonald, D.A., Blood Flow in Arteries (1974) .
- [5] Wetlerer, E., Kenner, T., Grundlagen der Dynamik des Arterienhulses (1968) .
- [6] Dintenfass, L., Blood Micro rheology (1971) .
- [7] Taylor, M.G., Hemodynamics Ann. Rev. physiol Vol. 35 (1973) .
- [8] Attinger, E.O., Attinger, F.M., Frequency Dynamics of Peripheral Vascular Blood Flow Ann Rev Biophys & Bioeng Vol. 2 (1973) .
- [9] Goldsmith, H.L., Skalak, R., Hemodynamics, Ann. Rev. Fluid Mechanics Vol. 7 (1975) .
- [10] 冯元桢, Biomechanics, «Theoretical and Applied Mechanics», IUTAM 14th Congress (1976) .
- [11] Canny, M.J., Flow and Transport in Plants, Ann. Rev. Fluid Mech Vol. 9 (1977) .
- [12] 冯元桢, Biomechanics, A Survey of the Blood Flow Problem, Advances in Appl. Mech. Vol. 11 (1971) .
- [13] Brocher, E., Oscillatory Flow in Ducts, A Report on Euromech 73, J. Fluid Mech. Vol. 79. Part I (1977) .
- [14] 冈小天, Present status of Hemorheology Theory Biorheology, Vol. 12. No 3/4 (1975) .
- [15] Flaud, P., et al, Ecoulements Pulse's dans les tuyaux viscoelastiques application a l'etude de la circulation sanguine J. de physique Tome 35. No 11 (1974) .
- [16] Kenedi, R.M., et al, Tissue Mechanics, Phys. in Med. & Biology, Vol. 20, No 5 (1975) .
- [17] 中医研究西苑医院, 活血化瘀冠心病 II 号方药及有关资料汇编 (1976.2) .
- [18] 上海第一医学院活血化瘀专题研究组, 血液流变学与活血化瘀 (1975) .