

创新·严谨·团结·奋进

当前位置：[首页](#) > [科学传播](#) > [力学园地](#) > [释疑解惑](#)

释疑解惑

【释疑解惑】你知道什么是数字心脏技术吗？

发布时间：2024-09-25

《力学园地》编辑部：

听说力学所非线性力学国家重点实验室也有人开始研究数字心脏技术了，能不能给我们介绍介绍？我们对这项新技术很感兴趣但知之甚少。

几个退休的力学所老人

2024年4月15日

你知道什么是数字心脏技术吗？

王超

人类（还有所有的脊椎动物）的体内，都有一个推动血液循环的器官，那就是心脏。人的心脏位于胸腔的中部，稍偏左下方，外形像一个桃子，大小约跟本人拳头相当。心脏的结构非常复杂（参见图1，2），由两个心房、两个心室以及连接心房、心室、主动脉、肺动脉的四个瓣膜组成。心房接纳来自静脉的回心血，心室则将离心血打入动脉。左右心房之间和左右心室之间互不相通，心房与心室之间有瓣膜（房室瓣），这些瓣膜使血液只能由心

房流入心室而不能倒流。类似地，主动脉瓣和肺动脉瓣也是使血液只能流出而不能倒流回心脏。如前所述，心脏的作用是推动血液流动，向器官、组织提供足够的血流量，从而供应氧和各种营养物质，并带走身体代谢的产物，使细胞维持正常的功能。当然，血液循环还会有调节体液、恒定体温等作用，这里就不展开了。血液的循环是依靠心脏“泵浦”作用实现的，用通俗的话来说就是“心跳”——心脏有节律地收缩和舒张所形成的心脏搏动。据说有人做过这样的推算：一个人的心脏一生泵血所作的功，大约相当于将3万公斤重的物体向上举到喜马拉雅山顶峰所作的功。所以，心脏是血液运输的动力器官，它一刻都不能停歇，非常的辛苦。

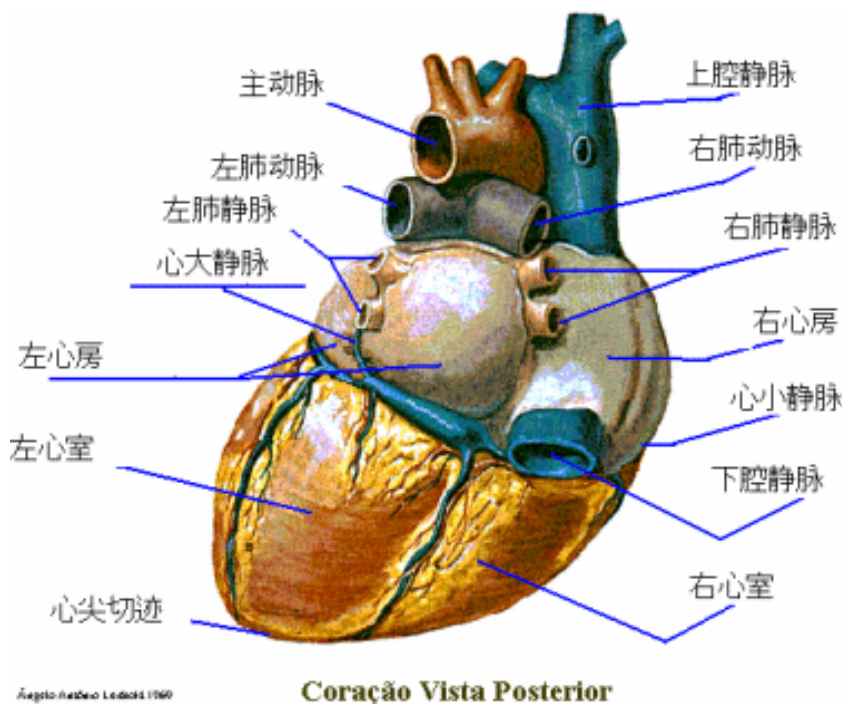


图1 心脏外形结构示意图（图片来源：网络）

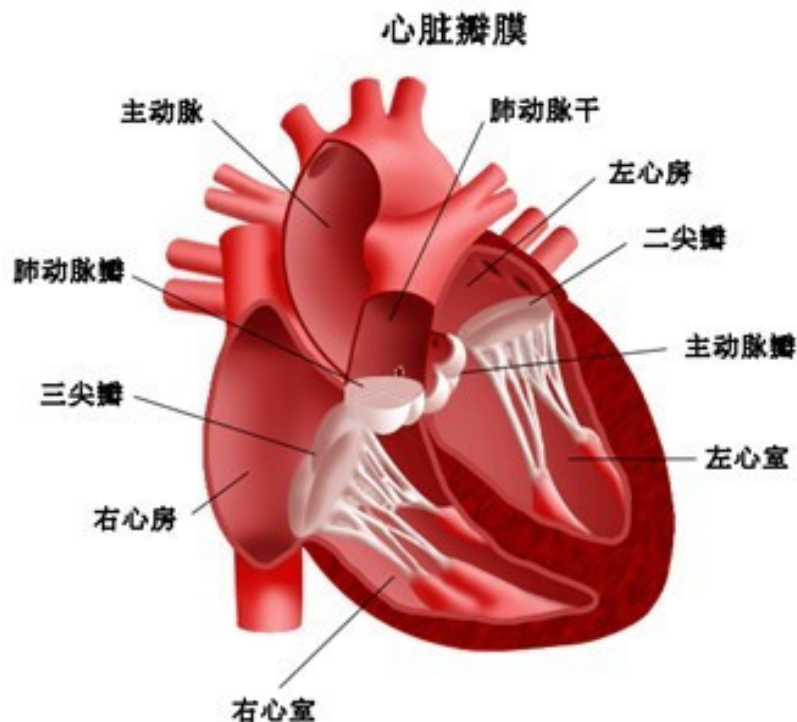


图2 心脏瓣膜结构示意图（图片来源：网络）

那么，心脏的搏动是靠什么实现的呢？原来心脏90%的体积是肌肉，由上亿根心肌纤维以一种高度各向异性的方式组织而成。就是说，不同位置处的心肌纤维取向都不相同，它们会带来力学变形和电传导性能在各个方向上的差异。心肌收缩时，推动血液进入动脉，流向全身；心肌舒张时，血液便由静脉流回心脏。心脏壁内还有一类特殊的心肌纤维组成了传导系统，它们能够按自身固有的规律（即自律性），不断地产生兴奋并将这种电刺激传导给普通心肌细胞，使心房肌和心室肌按照一定的节律收缩。如果用力学术语来描述的话，心脏跳动是一个多物理过程，涉及电驱动心肌变形的力-电耦合以及血液与心肌相互作用的流-固耦合两个基本过程。前者不难理解，心肌收缩与舒张就是变形过程，一定受到了力的作用，这是在电刺激下发生的，所以是一个力-电耦合过程。后者较为专业，这里说明如下：一般液体在管道中流动时，管壁不变形，人们只要从流体力学角度考虑两端压力差便可以确定流动特性。但是，血液在心脏中流动时，作为“管壁”的心肌是在不停地变形，这样血液的流动特性还同时受到固壁变形的影响，力学家称之为“流-固耦合

过程”。此外，从问题所涉及到的几何空间来看，心脏跳动还是一个多尺度问题。它涉及纳米尺度的离子通道、微米尺度的心肌纤维和宏观尺度的心脏变形。所以研究心脏是相当困难的课题。

那么人们干嘛要研究心脏呢？一个最直接的原因是心血管疾病。我国心血管病形势异常严重。根据国家心血管中心的统计[1]，我国心血管病患者人数高达3.3亿，其中瓣膜病2500万，冠心病1100万，心力衰竭890万。我国每年约有260万人死于心血管病，其中猝死人数高达54万——平均每分钟就有一个人猝死。据息，刚刚过去的2023年，我国用于心血管病的医疗费用超过8000亿人民币，相当于制造10艘航母的费用[2]。心血管病已经给我国经济社会发展造成了沉重的负担。

从科学技术角度来看，目前心血管领域至少存在三方面基本问题：（1）很多心血管病的发病机理不清楚，临床医生主要依靠个人经验进行诊断和治疗，缺乏定量的科学指导；（2）在临床上，无法进行手术治疗前的预演。具体说，就是无法通过预演找出最优方案之后再进行临床治疗；（3）没有技术手段对医疗器械进行充分的个性化设计，导致医疗器械和患者心脏的适配性差。这些问题导致了心血管病的诊断和治疗效率低、效果差。而且，对于心脏医学这一特殊领域，由于伦理方面的限制，无法使用患者或活人的心脏进行实验。心脏医学专家只能通过动物实验（猪、猴子等）来开展研究，但是动物实验的难度大、时间长、花费高，例如购买一只猴子的费用就高达人民币20万元，这是普通科研人员无法承受的。另外，由于生命体的复杂性，很多时候动物实验无法达到预期目标。

然而，令人鼓舞的是，得益于计算力学方法以及计算机软硬件的巨大进步，特别是近年来大规模计算、图形处理（GPU）软件以及深度学习技术的飞速发展，专业研究人员将计算力学方法、计算机模拟技术与心脏医学相结合，逐步成为一个新的前沿领域——数字心脏技术。针对临床上不能直接用

患者进行实验研究这一伦理规定，人们可以基于患者心脏的各种临床检测数据，建立与之相对应的个性化数字心脏，用数字心脏来模拟患者真实心脏的基本力学、物理、生理特征，从而研究其发病机理、进行治疗前的预演或者进行医疗器械的个性化设计。数字心脏技术通过医学和力学的跨学科结合，把相关医学问题转化成计算力学问题，为心血管病的研究和诊疗提供新手段。由于绝大多数心血管疾病是由心脏多个部位、多个功能之间的失配引发，只有个性化全心脏数字模型才能全面、深刻地模拟患者的真实心脏行为，从而研究上述三方面基本问题，满足心血管疾病在教学、培训、科研、临床等多方面的实际需要。图3给出全心脏数字模型的示意，一般而言，全心脏系统至少需要包括几何构型、心肌纤维分布、导电网络分布等三个分系统（参见图4）。

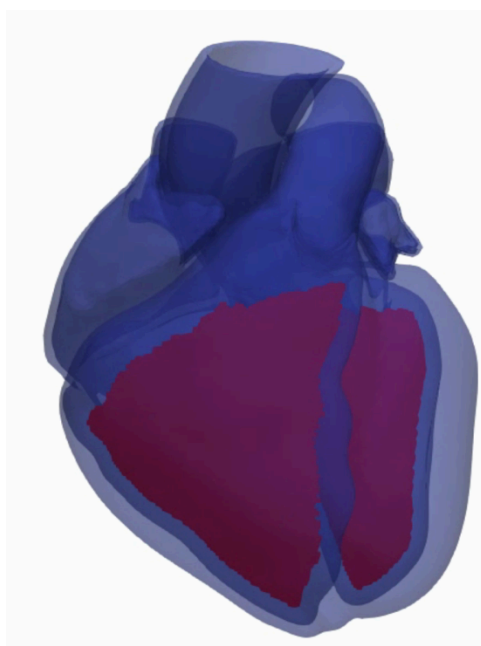


图3 全心脏数字模型（图片来源：作者自制）

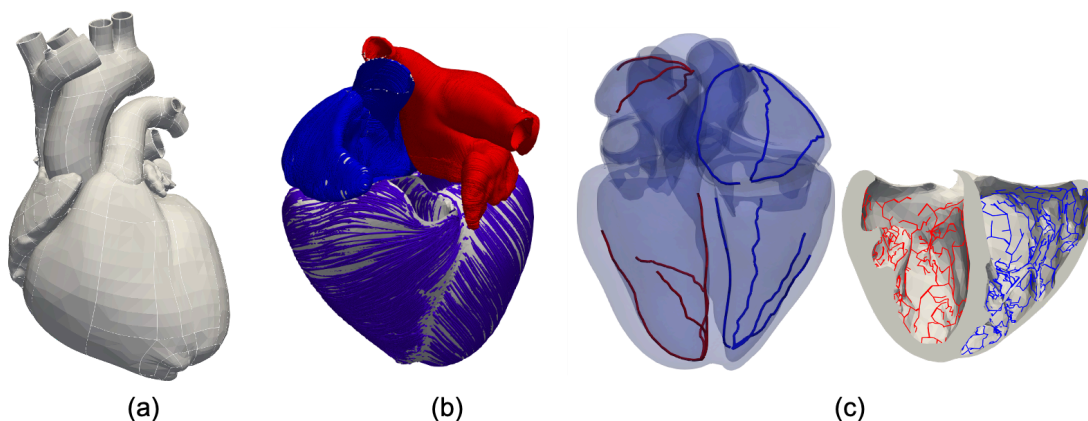


图4 全心脏系统基本构成：几何构型（a），心肌纤维分布（b），导电网络分布（c）

（图片来源：作者自制）

全心脏数字模型只有十多年的发展历史，这个数字模型需要依据心脏肌肉本构（即心脏肌肉在外载作用下的变形规律）、心脏结构与功能来建立。在学术研究方面，美国斯坦福大学[3]、日本东京大学[4]、德国[5]、西班牙[6]、意大利[7]五个国家的研究人员已经建立了全心脏数字模型，并且发展了相应的计算机软件系统。在商业应用方面，法国达索公司开发了世界上第一个数字心脏模拟软件，并发布了商业版本。我国在数字心脏领域的研究人员非常少，目前有哈尔滨工业大学王宽全教授[8]、浙江大学夏灵教授[9]、北京大学谭文长教授[10]，但是这些研究工作要么只是针对心脏部分结构（如左心室），要么只针对心脏部分功能（如电物理，且不考虑心脏变形），至今我国还没有一个能够模拟心脏所有主要功能的全心脏数字模型。

如前所说，心脏是一个非常复杂而且十分“辛苦”的器官。它有四个腔室、四个瓣膜，还有遍布室壁的电传导系统；它要实现血液的三个循环：体循环、肺循环、心脏循环，每天跳动约10万次，泵血约5000升；它的心肌纤维超过1亿根，心肌细胞有各种离子通道（如钠通道、钾通道、钙通道和氯通道等），这些离子通道是一种跨细胞膜蛋白质分子组成的特殊通道，选择性允许一些离子通过，通道的开放和关闭受电压门控或者化学门控。全心脏数字模型的建立，要基于力学原理，包括固体非线性大变形力学、力电耦合、血液流体力学、流固耦合、接触力学等。图5便是利用全心脏数字模型给出的一个心脏跳动周期内，心脏变形和电势分布图。基于这些原理建立的全心脏数字模型，不但可以模拟再现心脏的多种行为，使其“看着像”真实心脏，更为重要和独特的是，该数字心脏模型可用于心脏病相关的科学研究，即可以研究并给出心脏在特定条件下的演化行为，揭示心脏发病机理，给出诊疗建议。这是已有的一切心脏系统所不具备的优势。

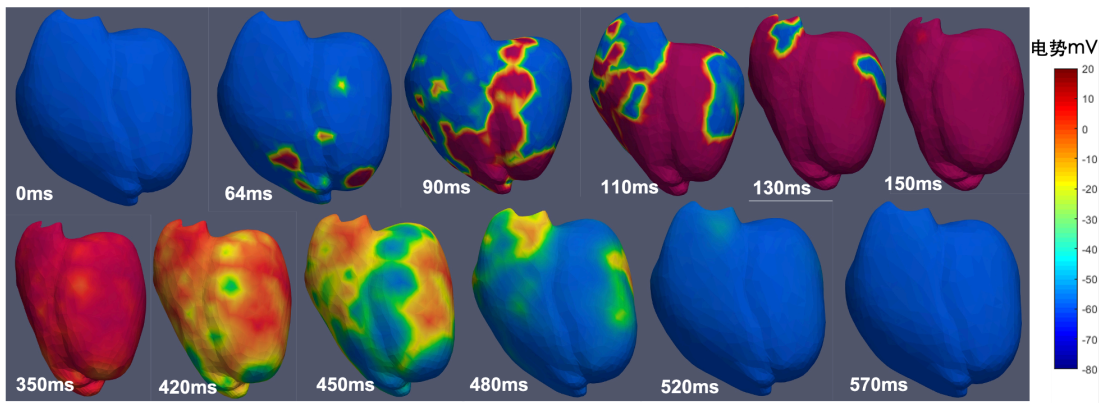


图5 全心脏的力-电耦合变形（图片来源：作者自制）

所以，不难理解，发展一个真正意义上的个性化全心脏数字模型系统，即包含心房、心室、瓣膜、血液等心脏所有主要结构，并同时考虑电传导激发心肌变形的力电耦合机制、血液心肌流固耦合机制以及心脏相邻部分之间接触作用的全心脏模型，是十分必要的。这个模型还应当同时将更多个性化因素如患者的年龄、性别、血压、心率等纳入，形成个性化数字心脏模型。力学工作者可以进一步将基于GPU深度学习技术，根本性的提升数字心脏系统的响应速度，实现秒量级的响应时间，满足临床对计算效率的需求。这样的全心脏模型不但可以最大程度的模拟再现心脏的真实运行状况，提供一个从心脏整体的视角研究各种心血管病发病机理的方法，更重要的是通过提升响应速度为将数字心脏技术真正用于临床奠定技术基础。我们相信，这将为心血管病的医治提供重要的科学支撑，从而对我国经济社会发展做出贡献。

参考文献：

- [1] 国家心血管病中心,中国心血管健康与疾病报告2020, 科学出版社.
- [2] 张毓辉, 柴培培, 翟铁民, 万泉, 2017年我国心脑血管疾病治疗费用核算与分析, 中国循环杂志, 2020, 35(9), 859-865.
- [3] B. Baillargeon, N. Rebelo, D.D. Fox, R.L. Taylor, E. Kuhl, The living heart project: A robust and integrative simulator for human heart function, European Journal of Mechanics, 2014, A/Solids. 48, 38–47.

- [4] Okada J, Washio T, Sugiura S, Hisada T. Clinical and pharmacological application of multiscale multiphysics heart simulator, UT-Heart. *Korean J Physiol Pharmacol.* 2019, 23(5), 295-303.
- [5] Gerach T, Schuler S, Fröhlich J, Lindner L, Kovacheva E, Moss R, Wülfers EM, Seemann G, Wieners C, Loewe A, Electro-mechanical whole-heart digital twins: a fully coupled multi-physics approach. *Mathematics* 2021, 9, 1247.
- [6] Santiago A, Aguado-Sierra J, Zavala-Aké M, et al. Fully coupled fluid-electro-mechanical model of the human heart for supercomputers. *Int J Numer Meth Biomed Engng*, 2018, 34, e3140.
- [7] M. Fedele, R. Piersanti, F. Regazzoni et al. A comprehensive and biophysically detailed computational model of the whole human heart electromechanics, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2023, 410, 115983.
- [8] 王宽全, 袁永峰, 虚拟心脏建模与可视化技术, 2014, 哈尔滨工业大学出版社.
- [9] D. Deng, P. Jiao, X. Ye, L. Xia, An image-based model of the whole human heart with detailed anatomical structure and fiber orientation, 2012, *Computational Mathematical Methods in Medicine*, 891070,1-16.
- [10] Z. Yin, W. Zhang, D. Zhao, F. Sulejmani, Y. Feng, Y. Huo, W. Tan, Cardiac wall mechanics analysis in hypertension-induced heart failure rats with preserved ejection fraction, 2020, *Journal of Biomechanics*,98,109428.

下一篇：[【释疑解惑】从太空过生日点蜡烛说起](#)

版权所有 © 2024 中国科学院力学研究所 京ICP备05002803号-1 京公网安备110402500049
地址：北京市北四环西路15号 邮政编码：100190

