

血流动力学与 心血管人工器官

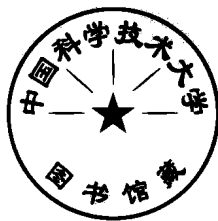
邹盛铨 编著

成都科技大学出版社

血 流 动 力 学 与

心 血 管 人 工 器 官

邹盛铨 编著



成都科技大学出版社

1991年

内 容 提 要

本书系统地阐述了血流动力学所涉及的内容：血液流变学、血管的流变学性质、动脉血流动力学、静脉和可塌陷管流体力学、微循环流体动力学、心脏和心瓣流体力学；还对心血管人工器官（包括人工血液、人工血管、人工心瓣、心脏辅助装置、全人工心脏等）作了介绍，内容丰富、概念清晰。可供从事生物学、医学、力学和生物医学工程学的科技人员阅读，并可作为大专院校有关专业高年级学生或研究生的教科书或参考书。

血 流 动 力 学 与 心 血 管 人 工 器 官

邹盛铨 编著

成都科技大学出版社出版发行

四川省新华书店经销

成都科技大学印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/32 印张：13.0625

1991年3月第1版 1991年3月第1次印刷

字数：283千字 印数：1-600

ISBN 7-5616-0675-0/Q·6

定价：3.54元

序

血流动力学经过最近三、四十年来的探索和发展，在对正常生理的力学解释和分析方面，取得了可喜成就和重大进展。目前的问题是，在继续推进学科发展的同时，如何把已取得的成果应用于病理诊断、治疗和人工器官研制。早在1957年，就有人预言：未来的外科学，不论是器官移植或者使用人工器官，都将进入器官置换的时代，而今这种“换配件医学”的目标已部分变为现实，例如，置换人工心瓣已成为平常的手术。然而，人工器官的发展虽然前途光明，毕竟还是处在幼年阶段，尚无法与天然正常器官相比。但我相信，只要探索者不停住脚步，目前尚不完善的地方总会变得逐渐完善，眼下尚未实现的目标，也一定会逐步变成现实。

邹盛铨同志于80年代初从研究航天科学转向生物力学，在成都科技大学从事心血管流体动力学和人工心瓣研究，为生物流体力学专业研究生讲授“血流动力学”和“人工心瓣流体力学”这两门专业课。本书就是根据他的讲稿整理补充写成的。在内容上既注意到基本概念、理论的系统性和完整性，又以一定篇幅介绍血流动力学在疾病过程和心血管人工器官方面的应用，反映了作者多年来从事有关教学和研究的成果；对读者掌握血流动力学基本理论和分析问题方法，了解与血液相接触的人工器官研究进展和现状，为有关的研究打下一定的基础，都是有幫助的。因而是值得欢迎和赞赏的。

科学技术的发展，既离不开钻研、探索，也需要交流切磋。当然这些都应是建立在实践基础上的。对于生物力学及其分支学科来说，许多发展正是在交流切磋中形成的。开学术讨论会是一种交流方式，出版书刊也是一种交流方式。这都有助于学术界、教育界更加开放的风气形成和发展。因此，在我得知本书出版之际，除对邹盛铨同志教学、研究成果的发表表示祝贺外，也希望生物力学学术界的交流、切磋更加活跃，促使这门学科在我国科技发展的广阔天地里，更加繁荣、茂盛！

康振黄 1990年10月

目 录

第一章	概论	(1)
§1-1	流体流动与生命.....	(1)
§1-2	血流动力学的发展.....	(2)
§1-3	血流动力学研究特点.....	(4)
§1-4	循环系统概述.....	(5)
§1-5	血流动力学与人工器官.....	(6)
第二章	非牛顿流体流动	(3)
§2-1	非牛顿流体的一些奇特的物理现象.....	(8)
§2-2	牛顿流体与非牛顿流体.....	(10)
§2-3	非牛顿流体的流变性状方程.....	(14)
§2-4	血液的 Poiseuille 流动.....	(16)
第三章	血液流变学	(24)
§3-1	血液的功能.....	(24)
§3-2	血液的组成与物理化学特性.....	(25)
§3-3	全血的流变学性质.....	(27)
§3-4	红细胞的流变学性质.....	(44)
§3-5	血液的电性质.....	(50)
§3-6	血液与人工材料的界面现象.....	(55)
第四章	血管的力学性质	(61)
§4-1	研究血管力学性质的意义.....	(61)

§4-2	血管的构造与力学性质	(62)
§4-3	血管壁上的力	(64)
§4-4	血管壁中的应力分布	(66)
§4-5	大血管的力学性质	(69)
§4-6	增量化粘弹性理论	(76)
§4-7	非线性理论	(80)
§4-8	准线性理论	(82)
第五章	动脉血流动力学	(87)
§5-1	动脉系统	(87)
§5-2	脉象与脉搏波传播速度	(90)
§5-3	动脉脉搏波的传输特性	(98)
§5-4	动脉中的脉动流	(113)
§5-5	几何非均匀性对动脉血流的影响	(132)
第六章	动脉阻抗	(143)
§6-1	动脉阻抗的一些基本概念	(143)
§6-2	动脉的输入阻抗	(150)
§6-3	心血管疾病和药物对动脉输入阻 抗的影响	(156)
§6-4	肺动脉输入阻抗	(158)
§6-5	输入阻抗的理论模型	(160)
§6-6	动脉输入阻抗的测量技术	(164)
第七章	生物力学在动脉硬化中的作用	(166)
§7-1	动脉粥样硬化与脂质	(166)
§7-2	动脉粥样硬化与血流动力学	(168)
§7-3	内皮损伤与通透性增加	(173)

§7-4	动脉壁中的质量输运.....	(177)
第八章	静脉和可坍陷管流动.....	(190)
§8-1	静脉血流动力学的特点和可坍陷管 流动.....	(190)
§8-2	Starling 流阻器的实验观测.....	(193)
§8-3	可坍陷管流与不可压缩流和明渠水 流的比较.....	(200)
§8-4	管律.....	(205)
§8-5	可坍陷管的一维定常流动.....	(207)
§8-6	可坍陷管流动原理在生理上的例子.....	(223)
第九章	微循环流体动力学.....	(232)
§9-1	微循环流动的特点.....	(234)
§9-2	血浆通过毛细血管的流动.....	(236)
§9-3	毛细血管与组织间流体的交换.....	(245)
§9-4	团流.....	(247)
§9-5	片流.....	(249)
第十章	心脏力学.....	(253)
§10-1	心脏的形状和结构.....	(253)
§10-2	心电系统.....	(258)
§10-3	心脏的动力学过程.....	(261)
§10-4	心脏、血泵功能的肌肉力学基础.....	(265)
§10-5	心脏的流体力学.....	(274)
§10-6	冠脉血流的特点.....	(276)

第十一章 天然心瓣流体动力学	(281)
§11-1 天然心瓣的解剖结构.....	(281)
§11-2 天然心瓣瓣叶的流变学性质.....	(283)
§11-3 窦和窦涡的作用.....	(284)
§11-4 减速度可以比作逆压梯度发生器.....	(286)
§11-5 主动脉瓣关闭的单自由度理论.....	(288)
§11-6 其它有关心瓣关闭的理论.....	(295)
第十二章 人工血液	(299)
§12-1 物理化学方法 (PFC).....	(300)
§12-2 生物化学方法.....	(303)
§12-3 化学合成方法.....	(304)
§12-4 人工红细胞.....	(305)
§12-5 人工血液尚待解决的问题.....	(305)
第十三章 人工血管	(307)
§13-1 人工血管的发展概况.....	(307)
§13-2 合成人工血管的材料.....	(308)
§13-3 人工血管的编织模式.....	(309)
§13-4 人工血管的多孔性.....	(311)
§13-5 人工血管的皱纹.....	(311)
§13-6 人工血管的应用与存在问题.....	(313)
第十四章 人工心瓣	(315)
§14-1 人工心瓣的设计要求.....	(315)
§14-2 人工机械瓣.....	(318)
§14-3 人工生物瓣.....	(349)

§14-4 生物瓣钙化的机理和应力.....	(367)
第十五章 人工心脏.....	(375)
§15-1 人工心脏的研究概况.....	(375)
§15-2 心脏辅助装置.....	(378)
§15-3 全人工心脏.....	(387)
参考文献.....	(398)

第一章 概论

§1-1 流体流动与生命

流体流动是宇宙间存在的一种非常普遍的物理和生理现象，所有的生物体都生活在流体的环境中。因此，生物体和环境之间的关系，如运动、质量交换和能量交换等均受流体流动的影响。一方面生物体不断从外界环境吸取同化作用所需的原料，排除异化作用产生的废物；另一方面生物体内的一些生物学过程都含有流体的流动。细胞是由细胞核、细胞质和细胞膜构成的，细胞质时刻都在流动，为新陈代谢活动的正常进行创造条件。生物体内的物质交换和输运往往是以流体运动的形式进行的。例如血液循环为人体组织输送和分配基本物质，排除代谢产物，保持体内系统平衡，输运体液，调节氧气和养分的供应等。

据估计，流体重量占人体体重的70%，5升血液中3升是血浆，2升是血细胞（内部又有细胞内液），其它细胞也有细胞内液、细胞间液（淋巴、脑脊液、眼泪、胸膜液、心包液、关节滑液、汗液、消化液、精液等）。全身细胞内液占体重的50%，血液占5%，其余占15%，分布于组织间隙内。

研究非生命的流动现象，形成了流体力学学科；研究与生命运动有关的流动过程，形成了生物流体力学，血流动力学是生物流体力学的一个重要分支。McDonald (1968) 曾建议，血流动力学可以定义为：对流动的血液和血液所流经

的所有固体边界的物理学研究。Patel (1980) 定义：血流动力学是对循环系统物理行为的研究。他们使用“物理”这个词，意味着把血流动力学从生理学中微妙地分离出来。但是，如不考虑血液和血管的物性，仅仅把已有的流体力学理论推广到心血管流动中是不够的。康振黄指出：血流动力学是研究心血管系统中血液的物性和动性的学科。在血流动力学的研究中，把物性考虑进去是一大进步。

§1-2 血流动力学的发展

血流动力学是随着人类整个科学的进步而发展起来的。作为文明古国的中国，《黄帝内经》中就提出了反映血流脉动和血管变形的脉象与脉诊。3000年前古罗马人就知道了心瓣的单向阀作用，认为血液象潮水一样来回流动。公元前280年，Erasistratos 观察到距心脏最远处的脉搏似乎滞后于靠近心脏处的脉搏，这被认为是将脉搏看成波传播的最早认识。

Leonardo da Vinci (1513) 正确地描述了心房收缩和心室收缩的顺序和动脉波的传播。

William Harvey (1628) 首次明确了血液循环的概念，认识到血液是在人体内一个封闭回路中连续不断地流动。他被誉为中心血管生理学之父。

Hales (1677-1761) 首次测量了血压，定量测定了心输出量、动脉尺寸和血液流速，他第一次引进了外周阻力的概念，并弄清了这个阻力主要来自微血管，因此 Hales 被誉为血流动力学之父。

Harvey 和 Hales 的定量工作偏重几何量和运动学量方面。第一篇用数学方法分析血液流动的论文是由 Leonhard

Euler (1775) 作出的。他推导出弹性管中不可压缩无粘性流体的一维方程（包括质量方程和运动方程），提出了血管内任一点的压力与其截面积有关的非线性的数学模型。

Thomas Young (1908) 首次推导出血流中的脉搏波传播速度。到19世纪中叶，人们对循环系统有了更详细的定量认识，Moens 和 Korteweg、Lamb 等用不同方法导出了脉搏波的波速方程。

Poiseuille (1840) 用水、酒精和汞精确地测定了玻璃管内的压力降。

Neumann 和 Hagen (1985) 得到了 Poiseuille 方程的解析解。

Fahraeus 和 Lindqvist (1913) 发现，在毛细血管中血细胞压积比在大血管中的压积小，当管径从 $500\mu\text{m}$ 下降到 $40\mu\text{m}$ 时，血液表现粘度下降。

Otto Frank (1895) 提出了著名的弹性腔 (Windkessel) 理论，他把动脉系统看作一个弹性腔，微循环作为一个恒定阻力。

Womersley 和 McDonald 在本世纪50年代以后，把整个动脉系统看作由有规则地重复心搏所产生的稳态振荡来处理，把压力脉搏波描述为谐波或付立叶级数决定的各种频率的正弦波所构成的组合波。

Taylor (1957) 用电波传输中的标准电报方程在水力学模型之间建立了等效的电路模拟——传输线理论。

60年代以后，冯元祯、Skalak, Shapiro 等许多著名的学者在这方面作了很大的贡献。血流动力学的发展导致了心血管人工器官的发展和应用。

§1-3 血流动力学的研究特点

血流动力学所研究的流体介质和管壁边界情况，与一般工程流体和固壁边界有所不同，它有以下特点：

一、流体介质的复杂性

血液是由多种细胞（红血球、白血球和血小板等充液、大变形薄壳粒子）与血浆组成的两相流，其运动特性比一般悬浮液复杂得多。血液根据切变率的大小、血球压积的大小和血管直径的大小，可以当作牛顿流或非牛顿流处理。在血流动力学研究中必须考虑血液的流变学性质。

二、可变形和具有通透性的管壁

由于血管是可变形的，血液流动和管壁运动相互耦合。血管有两种受力状态，当内压高于外压时，血管膨胀，管壁周向受拉，管截面积增大但形状不变，叫可膨胀管；当内压低于外压时，周向受压，内外压差超过临界值后，血管被压坍，面积和形状均发生改变，管壁的力学性质对血流和脉波传播产生显著的影响。血管壁是非均匀各向异性的非线性的粘弹性体，管壁具有通透性，管内外有物质运输。静压差引起通过孔隙的迁移流动，渗透压能引起扩散流。

三、血管的多级分支和尺寸变化

动脉系统有 20-30 级分支，最后被分成数十亿股 (10^2-10^9)。血管具有锥削效应，流场尺度从 $3\mu\text{m}$ 到 $3 \times 10^5 \mu\text{m}$ 。当血管内径大于 1mm 时血液尚可看成连续介质。当血管内径从小于 1mm 到大于 $3 \times 10^5 \mu\text{m}$ 时，不能再将血液看成均质连续介质。

四、宽广的雷诺数范围和特殊的脉动性

心血管系统中，血流的雷诺数从 10^3-10^{-3} ，高雷诺数与

低雷诺数同时存在。高雷诺数时层流边界层发展较慢，入口段较长，主动脉和大动脉中的血流几乎都是发展中的流动。低雷诺数下，流动与血液流变学密切相关。心血管系统中血流由于心脏的间隙性射血而具有脉动性，低频分量较大，付立叶展开式头几级谐波和时均运动同量级，因而各分量之间的相互作用相当强，传统的小扰动理论在此不适用。

五、强烈的非线性、系统的整体性与可调性

血流脉动的非线性，管壁材料性质的非线性，血管形状和分支的非线性，管壁变形的非线性，使得心血管系统血流动力学的研究非常困难，故目前血流动力学多偏重于单个环节的研究。心脏——动脉系统——毛细血管——静脉系统，构成了一个闭环系统，每一环节均以前一环节为输入条件，以下一环节为负载条件。各部分间存在着强烈的相互影响，整体性能不等于各部分的迭加。生命系统特点之一就是其功能有高度的自调性，为适应人体的复杂调节功能，血液并不是以恒定的速度流经周围各器官的，而是依据各器官不同时间、不同条件的特定需要，随时调节其流速或流量。

以上这些特点，都是一般工程流体力学研究中不曾处理过的。研究这些问题，正是心血管血流动力学的任务。

§1-4 循环系统概述

高等动物的心血管系统是由心脏——动脉——毛细血管——静脉以及所含的血液共同组成的完整的统一体。血管遍布全身，心脏则是这个系统的动力站，血液是这个系统的工作介质。当左心室收缩时，将新鲜血液注入主动脉，经动脉输运到全身各组织的毛细血管中，在那里进行物质交换，供给氧和养料，带走 CO_2 和废物，再经静脉系统回到右心

房；由右心室泵入肺动脉，在肺内进行气体交换，吸进氧，放出 CO_2 ，新鲜血流入左心房，再通过二尖瓣进入左心室。

从左心室到右心房，称为体循环；从右心室到左心房称为肺循环。前者又称为大循环，后者又称为小循环。

从小动脉经毛细血管到小静脉，称为微循环；从直接流向肝脏的肝动脉和来自消化器官胃、脾、胰、胆、肠的血液馈送给肝脏，称为门静脉循环。心脏本身的血液循环称为冠脉循环，左右冠状动脉从主动脉窦左右两侧分出，再逐渐分支，深入到心肌内形成毛细血管网，然后汇集成静脉把血液送到心房。

心血管系统是人体中最重要的系统之一。系统中各组成部分相互协调、制约和依存，在中枢神经系统控制下，完成血液循环作用。

§1-5 血流动力学 与心血管人工器官

研究血流动力学的目的，是用力学的概念、理论、方法去了解

和确定血液及心血管器官的流变学性质和流动规律；结合生物学、力学和医学方法去研究心血管系统的力学特性与功能特性之间的联系，研究心血管的血流动力学和流变学表现与生理、病理效应，建立用于诊病、治病和护理等方面的方法；用血流动力学的原理指导设计心血

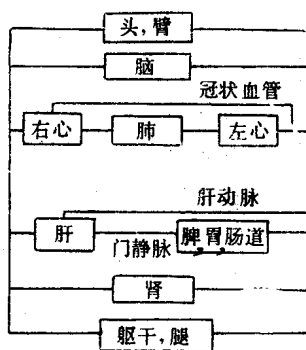


图 1-1 血液循环途径框图

管人工器官—人工血液、人工血管、人工心瓣和人工心脏。

人工器官，作为一种方法来说，是对人体脏器机能的一种模拟。对治疗无望的器官彻底更换以挽救生命的技术称为置换外科；用与病废器官同样的生物器官来置换，称为器官移植；用人工材料和技术研制的装置来代替器官的功能称为人工器官置换。生物医学工程从20世纪向21世纪发展，将进入器官置换的时代，和人体血管一样柔韧的人工血管已经造出，人工心瓣置换已是常规措施。心脏辅助装置已经应用过数百例，全人工心脏也已积累了5例的经验。数以千计的人通过血液本身的临时更换而使生命转危为安。一种氟碳混合液可以代替血液，直到骨髓使人体失去的红血球恢复正常时为止。尽管目前人工血液的特性还不尽如人意，但将来也许可造出比天然血液更好的代血液。因为有病的人体血液载有可诱发疾病的有机体，有促使动脉粥样硬化和引起心脏病突发的物质，而人造血液则可按一定配方制成，并与人体自身血液混合，使药物在血液中运输，防止上述问题出现。血流动力学将在心血管人工器官设计方面发挥重要作用，本书将在最后四章中讨论与此有关的问题。