

CRC Press
Taylor & Francis Group

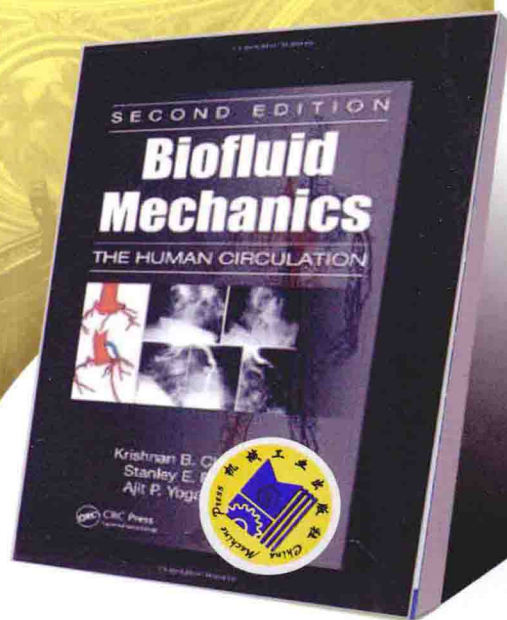
生物流体力学

人体循环系统

翻译版 · 原书第2版

Biofluid Mechanics
The Human Circulation
SECOND EDITION

[美] Krishnan B. Chandran 编著
Stanley E. Rittgers
Ajit P. Yoganathan
邓小燕 孙安强 刘肖 等译



时代教育·国外高校优秀教材精选

生物流体力学

人体循环系统

翻译版·原书第2版

Biofluid Mechanics The Human Circulation
SECOND EDITION



Krishnan B. Chandran

[美] Stanley E. Rittgers 编著

Ajit P. Yoganathan

邓小燕 孙安强 刘 肖 等译



机械工业出版社

Biofluid Mechanics: The Human Circulation by Krishnan B. Chandran,
Stanley E. Rittgers, Ajit P. Yoganathan/ISBN: 9781439845165.

Copyright©2012 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC
Press, part of Taylor & Francis Group LLC, All rights reserved. 本书原版由
Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版,
版权所有, 侵权必究。

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆
地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何
部分。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记图字: 01-2013-8101 号

图书在版编目 (CIP) 数据

生物流体力学: 第2版/ (美) 钱德兰 (Chandran, K. B.), (美) 里特
杰斯 (Rittgers, S. E.), (美) 尤甘纳坦 (Yoganathan, A. P.) 编著; 邓
小燕等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 7

(时代教育·国外高校优秀教材精选)

ISBN 978-7-111-47205-6

I. ①生… II. ①钱…②里…③尤…④邓… III. ①生物流体力学-高
等学校-教材 IV. ①Q66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 141421 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:姜 凤 责任编辑:姜 凤 李 乐

版式设计:霍永明 责任校对:肖 林

封面设计:鞠 杨 责任印制:刘 岚

北京富生印刷厂印刷

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·22 印张·459 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-47205-6

定价:49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

本书主要讲述如何应用流体力学的知识研究人循环系统的问题，宜教易学。

本书分为三个部分。第一部分主要对流体力学和固体力学的基础知识以及后续各章所涉及的心血管生理学作了概述。第二部分讲述了人体循环系统中的流体力学，重点针对动脉系统。第三部分的内容主要涉及植/介人体及心血管系统的一些测量方法。

本书可供生物医学工程专业的高年级本科生或者一年级研究生使用，也可供相关科研与工程技术人员参考。

本书配有习题解答手册，请使用者填写书后的《教学支持申请表》进行申请。本书英文注释版即将出版，敬请关注。

国外高校优秀教材审定委员会

主任委员：

杨叔子

委员（按姓氏笔画为序）：

王先逵	王大康	白峰杉	史荣昌	朱孝禄
陆启韶	张润琦	张策	张三慧	张福润
张延华	吴宗泽	吴麒	宋心琦	李俊峰
余远斌	陈文楷	陈立周	单辉祖	俞正光
赵汝嘉	郭可谦	翁海珊	龚光鲁	章栋恩
黄永畅	谭泽光			

出版说明

随着我国加入 WTO，国际间的竞争越来越激烈，而国际间的竞争实际上也就是人才的竞争、教育的竞争。为了加快培养具有国际竞争力的高水平技术人才，加快我国教育改革的步伐，国家教育部出台了一系列倡导高校开展双语教学、引进原版教材的政策。以此为契机，机械工业出版社推出了一系列国外影印版教材，其内容涉及高等学校公共基础课，以及机、电、信息领域的专业基础课和专业课。

引进国外优秀原版教材，在有条件的学校推动开展英语授课或双语教学，自然也引进了先进的教学思想和教学方法，这对提高我国自编教材的水平，加强学生的英语实际应用能力，使我国的高等教育尽快与国际接轨，必将起到积极的推动作用。

为了做好教材的引进工作，机械工业出版社特别成立了由著名专家组成的国外高校优秀教材审定委员会。这些专家对实施双语教学做了深入细致的调查研究，对引进原版教材提出许多建设性意见，并慎重地对每一本将要引进的原版教材一审再审，精选再精选，确认教材本身的质量水平，以及权威性和先进性，以期所引进的原版教材能适应我国学生的外语水平和学习特点。在引进工作中，审定委员会还结合我国高校教学课程体系的设置和要求，对原版教材的教学思想和方法的先进性、科学性严格把关，同时尽量考虑原版教材的系统性和经济性。

这套教材出版后，我们将根据各高校的双语教学计划，及时地将其推荐给各高校选用。希望高校师生在使用教材后及时反馈意见和建议，使我们更好地为教学改革服务。

机械工业出版社
高等教育分社

译者序

血液循环系统动力学（或称为血流动力学）是生物力学的一个重要分支，也是生物医学工程学科的重要基础课程。目前国内外关于血流动力学的图书大多为专著，这些专著要么是与著者研究内容相关的某一血流动力学重要问题的深入探讨，要么是不同研究者研究成果的汇编，前者内容精深，后者体系性差，均不适合做教材。此外，血流动力学的一些内容也会出现在部分生理学教材中，但是这些内容往往过于笼统，无法清晰阐明血流动力学的基本概念和研究内容。本书是一本很好的血流动力学入门图书，既可以作为本科高年级学生和研究生学习血流动力学的教材，也可作为其他专业学生和科研工作者学习血流动力学的参考书。

本书的内容既包含了血液循环系统动力学的基础知识，也概述了目前血液循环系统动力学的研究内容和最新进展。本书首先介绍了血液循环系统动力学中所涉及的流体力学、固体力学和心血管生理学的基础知识，该部分内容可为生物学和医学等学生提供必要的力学知识，也为工程学学生介绍了必要的生理学背景。在此基础上，本书讲解了血液流变学和血流动力学的基础知识和研究问题。然后，本书介绍了植/介入体中涉及的血流动力学问题，这也是目前血流动力学的重点课题。最后，本书简略介绍了血流动力学参数的测量方法和心血管数值计算的基本概念和临床应用。难能可贵的是，本书每章最后都设置有课后习题，这在血流动力学相关图书中是不常见的，这些习题对于理解基本概念大有裨益。

本书由 Krishnan B. Chandran, Stanley E. Rittgers, Ajit P. Yoganathan 三位心血管生物力学专家共同编写。Chandran 目前任美国爱荷华大学生物医学工程学、机械和工业工程学教授，同时也是美国机械工程师学会，美国医学与生物工程院和美国工程教育学会会士。Chandran 的研究方向是心血管生物力学，主要研究血管植/介入体，人工心瓣膜的生物力学，动脉中的血流动力学和物质传输，以及血流动力学与动脉粥样硬化的关系等。Rittgers 是美国阿克伦大学生物医学工程学教授，目前主要关注心血管血流动力学及其无创测量技术，以及血管搭桥术的设计，心血管中的药物传输等。Yoganathan 现为美国佐治亚理工学院生物医学工程学教授，同时担任心血管流体力学实验室主任、转化医学实验室副主任等职，曾获美国机械工程师学会生物医学工程最高奖 H. R. Lissner 奖，目前主要研究领域是心血管血流动力学及其测量技术、心血管手术规划及优化设计，以及心脏瓣膜组织工程等。

本书由王振泽（第1、2章）、刘肖（第3章）、范振敏（第4章）、任长辉（第5、6章）、刘明（第7章）、孙安强（第8章）、赵萍（第9章）、薛燕（第10章）、张鹏（第11章）等共同翻译，由康红艳和邓小燕校对并最后统稿。

译者
2014年7月

前 言

在过去的 20 年里, 生物医学工程学科发展迅速, 各类本科生和研究生课程如雨后春笋般在世界各地大学纷纷开展起来。随着学生人数的增多, 对合适教材的需求日益迫切。本书的编纂旨在为将流体力学应用于人体循环系统研究的相关课程提供教材。需要说明的是, 本书是一本人体循环系统流体力学的入门教材, 它较适用的读者人群主要集中在生物医学工程专业的高年级本科生或者一年级研究生。根据我们在心血管流体力学课程教学中积累的经验, 我们对本书的各个章节进行了编排。下面简要地对本书的结构框架和主要内容作一概述。

本书分为三个部分。第一部分包含了 3 个章节, 主要对流体力学和固体力学的基础知识以及后边各个章节所涉及的心血管生理学进行了概述。具体来讲, 第 1 章和第 2 章分别对流体力学和固体力学的基础知识作了简要介绍, 对那些事先并未接触过力学课程的学生无疑是雪中送炭。同理, 第 3 章中, 我们介绍了心血管生理学的背景知识, 并针对动脉粥样硬化这一心血管系统的“头号杀手”, 讲解了其相关的基本概念。当然, 对于已经具备流体力学、变形力学, 以及人体生理学背景知识的学生, 第一部分简单地温习一下便可。

第二部分讲述了人体循环系统中的流体力学, 重点针对动脉系统。第 4 章讨论了全血的黏度及其流变学特征。与此同时, 本章还对动脉壁在跨壁压作用下的固体力学作了简要讨论。第 5 章中, 我们通过使用稳定流动模型导出了一些有用的诊断参数如血管阻力, 并应用戈尔林方程来描述血流通过心脏瓣膜的时间平均流动特征。第 6 章主要描述了非稳定流动的 Windkessel 模型, 进一步地, 讲述了用于描述人体循环系统中脉动流的 Moens - Korteweg 及 Womersley 模型。第 6 章的后半部分, 给出了流动对管壁产生的应力与动脉粥样硬化发生、发展的关系, 对弯曲血管、血管分支、分叉及狭窄血管、动脉瘤中的非稳定流动特性作了定性描述。第 7 章阐述了血流通过天然心瓣及心室的流动特征。

第三部分的内容主要涉及心血管植/介入体及心血管系统的一些测量方法。第 8 章详细讨论了人工心瓣的设计及其相关的流体力学评估。第 9 章针对人造血管及血管支架植入后的流体力学变化作了详细介绍。第 10 章重点讨论了血流速度、血压、阻抗的测量方法, 并对各种离体 (in vitro) 或在体 (in vivo) 流体力学测量方法作了精细阐述, 以此来表征人体循环系统中依赖时间的复杂三维流动。在第 1 版的基础上, 我们加上了第 11 章, 用以描述心血管相关疾病或诊疗的计算模拟方法。

需要补充说明的是, 本书作为讲述人体循环系统中流体力学的入门教材, 其

知识点主要集中在描述心脏和动脉系统中的血流动力学,至于人体其他器官系统(如肺、肾脏、脑及微循环系统)中的血流特性,本书并未涉及。另外,本书中的插图均选自相关领域杰出研究者们已发表的文献,图片的出处在图题中已注明,并事先获得了作者许可。为了避免在阅读过程中打断读者,本书中所涉及的参考文献并未在文中标出,而是在每个章节的末尾处一并列出。学生也可参阅相关领域的主导杂志(如 *the Annals of Biomedical Engineering*; *the Journal of Biomedical Engineering*; *the Journal of Biomechanics*; *Medical Engineering and Physics*; *Atherosclerosis*; *Circulation*; *Circulation Research*; *the Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*; *the Journal of Cardiovascular Engineering and Technology*; *the Annals of Thoracic Surgery*) 或通过其他信息来源了解该学科的发展动态。

为实时反映人体循环系统流体力学领域取得的最新研究进展,我们在第1版的基础上,对本书作了大量修改和完善。例如,对图片质量的提高,以及在文章或习题中加入更多新鲜的例子(主要体现在第1、2、4、5、6及10章)。此外,我们还额外编写了一个全新的章节(第11章),该章详细介绍了人体循环的计算流体力学(computational fluid dynamic, CFD)分析,旨在让学生对计算仿真这一新兴技术手段在科学研究或临床应用中的快速发展有所了解。

本书配有习题解答手册,请使用者填写书后的《教学支持申请表》进行申请。

在此,我们想对为本书第2版诞生给予无私帮助的人们表示衷心感谢!感谢爱荷华大学的 H. S. Udaykumar 及 Sarah Vigmostad 教授为第11章的编写提供了宝贵的材料及修改意见。感谢爱荷华大学的 Raghavan 教授为每个章节提供了大量新颖的习题,同时为本书部分图片质量的提高作出了杰出贡献。同时感谢 Chandran 教授实验室的两名研究生: Vijay Govindarajan 及 Kesha Venkat Chivikula, 在第11章中对泊肃叶流(Poiseuille flow)、动脉狭窄段及动脉瘤中流动的计算模拟给予的无私帮助。

我们同时感谢 Taylor & Francis Group 的 Michael Slaughter 及 Marsha Pronin 对本书编纂工作的大力支持,使得本书圆满完成!

符 号 表

英文字母

A	横截面面积 (第 6 章)
B_0	磁场强度 (第 10 章)
C	顺应性
C_i	物质的量浓度 (指定项 i)
c	波速
D, d	直径
D_i	扩散系数 (第 3 章); 扩张系数 (第 6 章)
D_L	可膨胀性
E	弹性模量 (杨氏模量)
E_{inc}	增量弹性模量
E_p	压力 - 应变模量
E, F, G	对流通量 (第 11 章)
E_v, F_v, G_v	黏性通量 (第 11 章)
G	切变模量
g	重力加速度
H	“总头” [⊖] , 单位体积的总能量, 水头损失
H, H_{ct}	压积
J	雅可比 (第 11 章)
J_ν	第一类 ν 阶贝塞尔函数
K	稠度系数
K_D	溶解系数
K_s	刚度系数
k	体积模量
l_0	初始长度
l	变形后长度
M'_t	模量 (第 6 章)
N_D	Dean 数
N_i	物质 i 的摩尔通量
p	静水压力
p_s	收缩压
p_d	舒张压

⊖ 流体力学中总头是指单位重量流体的总能量, 其单位是长度的单位。而此处的“总头”是指单位体积流体的总能量, 其单位是压力的单位, 故加上引号以示区别。——编辑注

P, F	轴向加载, 力
Q	流量 (第 11 章)
R	半径
$r, \theta, z; r, \varphi, z$	圆柱坐标系参量
r, θ, φ	球坐标系参量
Re	雷诺数
R_s	阻力
SA node	窦房结
T	扭矩; 截断误差 (第 11 章)
u, v, w	速度分量
V	体积
V_0	初始体积
x, y, z	笛卡儿坐标系参量
Z	阻抗
Z_0	特征阻抗
1D (2D, 3D)	一维 (二维, 三维)
希腊字母	
α	沃姆斯莱数
γ	切应变
$\dot{\gamma}$	切应变率, 速度梯度
δ	长度增量
ε	正应变
ε_i	相位角 (第 6 章)
ε_t	真实应变
$\dot{\varepsilon}$	正应变率
ξ, η, ζ	广义坐标系参量 (第 11 章)
η, ζ, ξ	管壁在 r, θ, z 方向的位移 (第 6 章)
ρ	密度
μ	[动力] 黏度
μ_{app}	表观黏度
μ_p	血浆黏度
ν	泊松比 (固体), 运动黏度 (μ/ρ , 流体)
σ	正应力
σ_{ult}	极限应力
σ_y	屈服应力
Γ	对角矩阵 (第 11 章)
τ	切应力
ω, Ω	角速度

缩 略 语 表

AAA	腹主动脉瘤
ALE	任意拉格朗日 - 欧拉 (第 11 章)
AV	房室瓣 (第 3 章)
AVF	动静脉瘘
bpm	每分钟心跳次数
CDFM	彩色多普勒血流成像
CFD	计算流体力学
CO	心输出量
CT	计算机断层扫描
CVP	中心静脉压
CW	连续波
CX	冠状动脉回旋支
DVT	深静脉血栓
EC	内皮细胞
ECG	心电图
EDV	舒张末期容积
EF	射血分数
EMF	电磁流量计
e - PTFE	膨体聚四氟乙烯
ESV	收缩末期容积
FSI	流固耦合
HDL	高密度脂蛋白
HR	心率
IH	内膜增生
IMA	胸廓内动脉
LAD	左降冠状动脉
LDA	激光多普勒测风雷达
LDL	低密度脂蛋白
LDV	激光多普勒测速仪
MAP	平均动脉压
MRI	核磁共振成像
PET	聚对苯二甲酸乙二醇酯

PIV	粒子图像测速仪
PRF	脉冲重复频率
PRU	外周阻力单位
PTA	经皮腔内血管成形术
PTCA	经皮腔内冠状动脉成形术
PTFE	聚四氟乙烯
RF	射频脉冲
RMS	均方根
RV	反流体积
SG	比重 [⊖]
SMC	平滑肌细胞
SVC, IVC	上、下腔静脉
SVG	隐静脉桥
SVHD	单心室缺陷病
TEE	经食管超声心动图
WSR	壁面切应变率
WSS	壁面切应力
WSSG	壁面切应力梯度
ZCC/ZCD	零计数器/零相交检测器

⊖ 按 GB 3102.3—1993 规定,此量应称相对密度。——编辑注

单位换算系数、常用的常量与方程

单位换算

长度	$1\text{ft} = 12\text{in} = 30.48\text{cm} = 0.3048\text{m}$ $1\text{cm} = 0.394\text{in} = 0.03280\text{ft}$
体积	$1\text{L} = 1000\text{cm}^3 (\text{cc}) = 0.001\text{m}^3$ $1\text{ft}^3 = 0.028317\text{m}^3$
压力	$1\text{mmHg} = 133.3\text{N/m}^2 = 1333\text{dyn/cm}^2$ $1\text{atm} = 14.696\text{lbf/in}^2 = 760\text{mmHg}$
功率	$1\text{hp} = 550\text{ft} \cdot \text{lbf/s} = 745.7\text{W}$
密度	$1\text{lb/ft}^3 = 16.018\text{kg/m}^3 = 0.016018\text{g/cm}^3$
黏度	$1\text{centi Poise (cP)} = 10^{-2}\text{Poise (P)}$ $1\text{P} = 1\text{dyn} \cdot \text{s/cm}^2 = 1\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}) = 0.1\text{N} \cdot \text{s/m}^2 = 0.1\text{Pa} \cdot \text{s}$

流体参数

密度 (ρ):	$\rho_{\text{水}} = 999\text{kg/m}^3 \approx 1\text{g/cm}^3$ $\rho_{\text{空气}} = 1.22\text{kg/m}^3$ (在标准大气温度和压力下) $\rho_{\text{血液}} = 1060\text{kg/m}^3 = 1.06\text{g/cm}^3$; $\rho_{\text{血浆}} = 1035\text{kg/m}^3 = 1.035\text{g/cm}^3$
黏度 (μ):	$\mu_{\text{水}} = 1.0\text{cP}$ $\mu_{\text{血浆}} = 1.2\text{cP}$; $\mu_{\text{血液}} = 3.5\text{cP}$ (在切应变率 $> 100\text{s}^{-1}$)

流体力学控制方程

流体本构关系:

牛顿流体: $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$

卡森流体: $\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_y} + k_c \sqrt{\dot{\gamma}}$

幂律流体:

$$\tau = K_{pl} \dot{\gamma}^n (n \neq 1)$$

运动方程 (不可压缩, 牛顿流体)

质量守恒方程 (连续性方程): $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$

动量方程: $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{V}$

流体静力学关系: $\Delta p = \rho g h$

一维流动

质量守恒方程, 不可压缩流体 (密度 ρ 为常量): $V_1 A_1 = V_2 A_2$

伯努利方程 (能量守恒方程) —— 定常流 —— 非黏性流动:

$$p + \frac{\rho V^2}{2} + \rho gh = H(\text{常数})$$

泊肃叶方程（充分发展的稳态流动，牛顿流体）：

$$V_z(r) = \left[\frac{\Delta p R^2}{4\mu L} \right] \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] = V_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

$$Q = \frac{\pi \Delta p R^4}{8\mu L} = \frac{\pi \Delta p d^4}{128\mu L}$$

圆柱管的壁面切应力：

$$\tau_w = -\frac{d}{4} \frac{\Delta p}{L}$$

泊肃叶流体的壁面切应力：

$$|\tau_w| = \frac{4\mu Q}{\pi R^3}$$

雷诺数：

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$

入口长度（层流）：

$$L_e = 0.06 d Re$$

泊肃叶流体的沃姆斯莱（Womersley）数： $\alpha = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\rho \omega}{\mu}}$

固体力学方程

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

胡克材料的应力-应变关系： $\sigma = E\varepsilon; \tau = G\gamma$

泊松比：

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{lateral}}}{\varepsilon_{\text{axial}}}$$

真实应变：

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon)$$

薄壁弹性管：

$$\varepsilon_\theta = \frac{\Delta R}{R}; \quad \sigma_\theta = \frac{pR}{t}$$

厚壁弹性管： $E = \left\{ \frac{p_1 R_1^2 (1 + \nu) (1 - 2\nu)}{(R_2^2 - R_1^2)} \frac{r}{u} \right\} + \left\{ \frac{p_1 R_1^2 R_2^2 (1 + \nu)}{(R_2^2 - R_1^2) r^2} \frac{r}{u} \right\}$

动脉血流力学关系

血液的卡森方程： $\sqrt{\frac{\tau}{\mu_{\text{plasma}}}} = 1.53 \sqrt{\gamma} + 2.0$

动脉血管壁的弹性模量：

薄壁圆管的弹性模量： $E_\theta = \frac{pR^2}{t\Delta R}$

厚壁圆管的弹性模量（Bergel） $E_{\text{inc}} = \frac{2(1 - \nu^2) R_1^2 R_2}{(R_2^2 - R_1^2)} \frac{\Delta p}{\Delta R_2}$

流阻：

$$R = \frac{\Delta p}{Q}$$

阻抗（轴向）：

$$|Z_s|_n = \frac{|p|_n}{|Q|_n}$$

动脉血管壁的顺应性：

$$C = \frac{\Delta V/V}{\Delta p}$$

XX 生物流体力学

Gorlin 方程 (瓣膜开口的有效面积):
$$A = \frac{Q_{\text{mean}}}{C_d} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

压力波的速度 (Moens - Kortweg 关系):
$$C_0 = \sqrt{\frac{hE}{2R\rho}}$$

血液的沃姆斯莱 (Womersley) 数关系:

$$V_z = \frac{AR^2}{i\mu\alpha^2} \left[1 - \frac{J_0(\alpha r' i^{3/2})}{J_0(\alpha i^{3/2})} \right] e^{i\omega t}$$

$$Q = \frac{A\pi R^4 e^{i\omega t}}{i\mu\omega} \left[1 - \frac{2J_1(\alpha i^{3/2})}{i^{3/2}\alpha J_0(\alpha i^{3/2})} \right]$$

目 录

译者序

前言

符号表

缩略语表

单位换算系数、常用的常量与方程

第一部分 流体力学、固体力学与心血管生理学

第1章 流体力学原理	1
1.1 引言	1
1.2 流体的固有属性	1
1.2.1 密度	1
1.2.2 黏度	4
1.2.3 可压缩性	5
1.2.4 表面张力	5
1.3 流体静力学	6
1.4 质量和动量的宏观平衡	7
1.4.1 质量守恒	7
1.4.2 动量守恒	9
1.5 质量和动量的微观平衡	11
1.5.1 质量守恒	11
1.5.2 动量守恒	13
1.5.3 数学解	17
1.6 伯努利方程	21
1.7 无量纲分析	24
1.8 直管中的流体力学	26
1.8.1 流动稳定性及相关特性	26
1.8.2 流动脉动的影响	30
1.9 边界层分离	32
习题	33
参考文献	33
第2章 固体力学简介	34
2.1 材料力学简介	34