

· 第2版 ·

# 临床心血管 血流动力学

Cardiovascular Hemodynamics for the Clinician

主编 George A. Stouffer

主译 李宪伦 段军 张海涛



 人民卫生出版社

# 临床心血管血流动力学

## Cardiovascular Hemodynamics for the Clinician

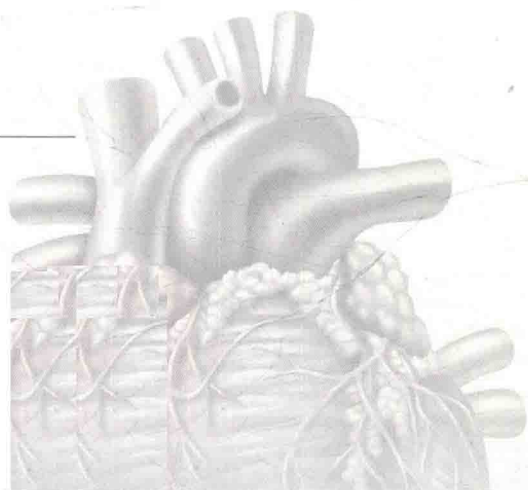
第2版

主 编 George A. Stouffer

副主编 J. Larry Klein David P. McLaughlin

主 译 李宪伦 段 军 张海涛

副主译 姜 红 丛鲁红



### 译者名单 (按姓氏笔画排序)

于洪伟 (中日友好医院心内科)

王 慧 (中日友好医院外科 ICU)

王 冀 (中国医学科学院阜外医院外科 ICU)

付东亮 (中日友好医院心内科)

丛鲁红 (中日友好医院急诊科)

严正兴 (中日友好医院心内科)

杜 雨 (中国医学科学院阜外医院外科 ICU)

李 涛 (中日友好医院外科 ICU)

李 晨 (中日友好医院外科 ICU)

李佳慧 (中日友好医院心内科)

李宪伦 (中日友好医院心内科)

李海威 (中日友好医院心内科)

李喜元 (中国医科大学航空总医院 ICU)

杨 鹏 (中日友好医院心内科)

杨屹云 (中日友好医院心内科)

吴文静 (中日友好医院心内科)

吴亚新 (中日友好医院心内科)

吴依娜 (中日友好医院外科 ICU)

张 祎 (中日友好医院呼吸与危重症医学科)

张永辉 (中国医学科学院阜外医院外科 ICU)

张丽芳 (中日友好医院心内科)

张海涛 (中国医学科学院阜外医院外科 ICU)

陈德生 (中日友好医院外科 ICU)

范书英 (中日友好医院心内科)

罗 荷 (中日友好医院心内科)

周 颖 (中日友好医院心内科)

周宏艳 (中国医学科学院阜外医院外科 ICU)

段 军 (中日友好医院外科 ICU)

姜 红 (中日友好医院心内科)

高 桐 (中日友好医院心内科)

曹芳芳 (中国医学科学院阜外医院外科 ICU)

韩治伟 (中日友好医院心内科)

学术秘书 高 桐

人民卫生出版社

## 图书在版编目 ( CIP ) 数据

临床心血管血流动力学 / (美) 乔治 A. 斯托佛 (George A. Stouffer) 主编; 李宪伦, 段军, 张海涛主译. —北京: 人民卫生出版社, 2018

ISBN 978-7-117-27271-1

I. ①临… II. ①乔…②李…③段…④张… III. ①心血管流体动力学 IV. ①R331.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 191587 号

人卫智网	<a href="http://www.ipmph.com">www.ipmph.com</a>	医学教育、学术、考试、健康, 购书智慧智能综合服务平台
人卫官网	<a href="http://www.pmph.com">www.pmph.com</a>	人卫官方资讯发布平台

版权所有, 侵权必究!

图字: 01-2017-5541

## 临床心血管血流动力学

主 译: 李宪伦 段 军 张海涛

出版发行: 人民卫生出版社 (中继线 010-59780011)

地 址: 北京市朝阳区潘家园南里 19 号

邮 编: 100021

E - mail: [pmph@pmph.com](mailto:pmph@pmph.com)

购书热线: 010-59787592 010-59787584 010-65264830

印 刷: 北京铭成印刷有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 18

字 数: 438 千字

版 次: 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-27271-1

定 价: 198.00 元

打击盗版举报电话: 010-59787491 E-mail: [WQ@pmph.com](mailto:WQ@pmph.com)

(凡属印装质量问题请与本社市场营销中心联系退换)

Cardiovascular Hemodynamics for the Clinician, by George A. Stouffer  
Copyright © 2008, 2017 by John Wiley & Sons Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Cardiovascular Hemodynamics for the Clinician, ISBN 9781119066477, by George A. Stouffer, Published by John Wiley & Sons Ltd. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

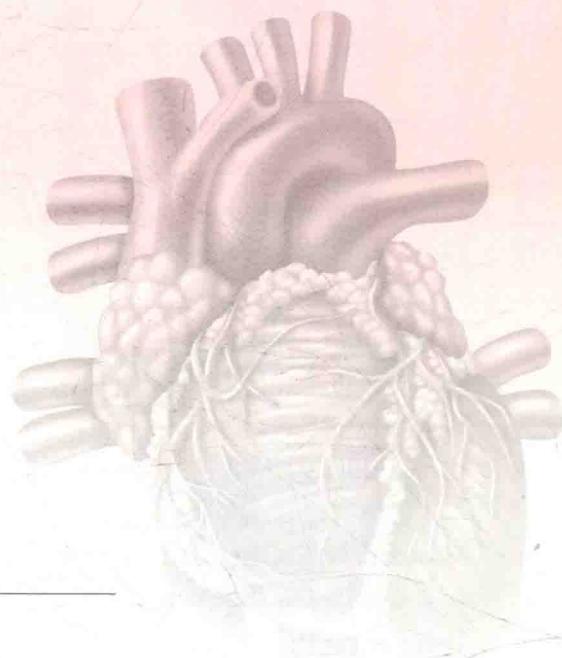
## 敬告

本书的作者、译者及出版者已尽力使书中的知识符合出版当时国内普遍接受的标准。但医学在不断地发展,随着科学研究的不断探索,各种诊断分析程序和临床治疗方案以及药物使用方法都在不断更新。强烈建议读者在使用本书涉及的诊疗仪器或药物时,认真研读使用说明,尤其对于新的产品更应如此。出版者拒绝对因参照本书任何内容而直接或间接导致的事故与损失负责。

需要特别声明的是,本书中提及的一些产品名称(包括注册的专利产品)仅仅是叙述的需要,并不代表作者推荐或倾向于使用这些产品;而对于那些未提及的产品,也仅仅是因为限于篇幅不能一一列举。

本着忠实于原著的精神,译者在翻译时尽量不对原著内容做删节。然而由于著者所在国与我国的国情不同,因此一些问题的处理原则与方法,尤其是涉及宗教信仰、民族政策、伦理道德或法律法规时,仅供读者了解,不能作为法律依据。读者在遇到实际问题时应根据国内相关法律法规和医疗标准进行适当处理。

## 原著作者名单



### 主 编：

**George A. Stouffer MD**

Henry A. Foscue Distinguished Professor of Medicine

Chief of Cardiology

University of North Carolina School of Medicine

Chapel Hill, NC

USA

### 副主编：

**J. Larry Klein MD**

Division of Cardiology

University of North Carolina School of Medicine

Chapel Hill, NC

USA

**David P. McLaughlin MD**

Harrisonburg Medical Associates

Harrisonburg, VA

USA

### 编 者：

**Rodrigo Bolanos MD**

BayCare Medical Group

Winter Haven, FL

**Thomas G. Caranasos MD**

Assistant Professor of Surgery  
University of North Carolina  
Chapel Hill, NC, USA

**Patricia P. Chang MD**

Associate Professor of Medicine  
University of North Carolina  
Chapel Hill, NC, USA

**Mauricio G. Cohen MD**

Associate Professor of Medicine  
University of Miami  
Miami, FL, USA

**Frederick M. Costello MD**

Idaho Cardiology Associates  
Meadowlake Building  
Meridian, ID 83642, USA

**Eric M. Crespo MD, MPH**

Hartford Hospital Cardiology Dept  
Hartford, USA

**Eron D. Crouch MD**

Medical Associates of Navarro County  
Corsicana, UA

**James E. Faber PhD**

Professor of Cell Biology and Physiology  
University of North Carolina  
Chapel Hill NC, USA

**Steven Filby MD**

Reid Heart Center  
Pinehurst, NC, USA

**Daniel Fox MD**

Critical Care, Pulmonary and Sleep  
Associates  
Lakewood, CO, USA

**Chadwick Huggins MD**

Cardiovascular Consultants  
Savannah, GA, USA

**Lukas Jantac MD**

Sanford Cardiology  
Sanford, NC, USA

**Geoffrey T. Jao MD**

Assistant Professor of Medicine  
Division of Cardiology  
Wake Forest Baptist Medical Center  
Medical Center Boulevard  
Winston-Salem, NC, USA

**Paul M. Johnson MD**

Division of Cardiology  
University of North Carolina  
School of Medicine  
Chapel Hill, NC, USA

**Jason N. Katz MD**

Assistant Professor of Medicine  
University of North Carolina  
Chapel Hill, NC, USA

**Prashant Kaul MD**

Piedmont Heart Institute  
Atlanta, GA, USA

**Alison Keenon MD**

Assistant Professor of Urology  
University of Wisconsin School of Medicine

Madison, WI, USA

**Robert V. Kelly MD**

Beacon Consultants Concourse  
Dublin, Ireland

**J. Larry Klein MD**

Professor of Medicine  
University of North Carolina  
Chapel Hill, NC, USA

**David P. McLaughlin MD**

Harrisonburg Medical Associates  
Harrisonburg, VA, USA

**Shriti Mehta MD**

Division of Cardiology  
University of North Carolina School of Medicine  
Chapel Hill, NC, USA

**Siva B. Mohan MD**

Southern Heart/Emory  
Riverdale, GA, USA

**Cassandra J. Ramm RN MSN**

Structural Heart Program coordinator  
University of North Carolina  
Chapel Hill, NC, USA

**Lisa J. Rose-Jones MD**

Assistant Professor of Medicine  
Division of Cardiology  
University of North Carolina  
School of Medicine  
Chapel Hill, NC, USA

**Richard A. Santa-Cruz MD**

Agnesian Health Care

Fond du Lac, WI, USA

**Kimberly A. Selzman MD, MPH**

Associate Professor of Medicine  
Division of Cardiology  
University of Utah  
Salt Lake City, UT, USA

**Anand Shah BS**

Duke University School of Medicine  
Durham, NC, USA

**Brett C. Sheridan MD**

Sutter Health  
Palo Alto Medical Foundation  
San Francisco Cardiology  
San Francisco, CA, USA

**Sidney C. Smith, Jr. MD**

Professor of Medicine  
University of North Carolina  
Chapel Hill, NC, USA

**Vickie Strang RN**

University of North Carolina Health Care  
Chapel Hill, NC, USA

**David A. Tate MD**

Associate Professor of Medicine Emeritus  
University of North Carolina  
Chapel Hill, NC, USA

**Jayadeep S. Varanasi MD**

Cone Health Medical Group  
Greensboro, NC, USA

**John P. Vavalle MD**

Assistant Professor of Medicine

University of North Carolina  
Chapel Hill, NC, USA

**Samuel S. Wu MD**

Cardiovascular Associates of Virginia  
Richmond, VA, USA

**Michael Yeung MD**

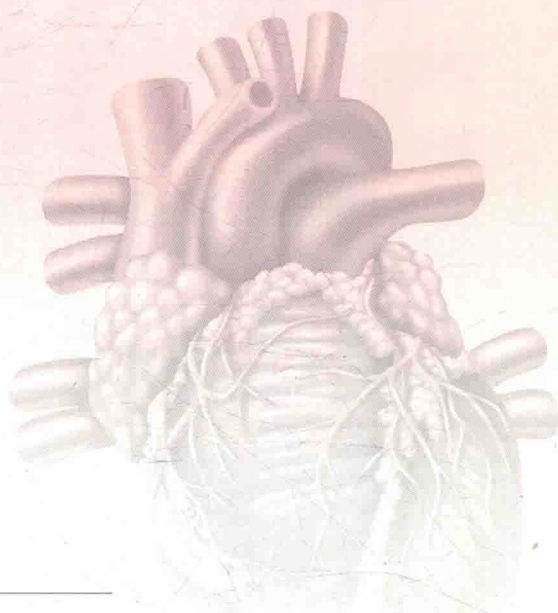
Assistant Professor of Medicine

University of North Carolina  
Chapel Hill, NC, USA

**Cynthia Zhou BS**

Division of Cardiology  
University of North Carolina School of Medicine  
Chapel Hill, NC, USA

# 前 言



心血管血流动力学主要研究血流量、血流阻力、血压及其相互关系,涉及心脏的结构、功能、心血管各部分的压力、流速、血流的形态和阻力等,可为重症患者的诊断及治疗方案的制定提供依据。随着我国重症监护病学及介入心脏病学的蓬勃发展,临床医生对心血管血流动力学知识的需求也越来越迫切,与此同时,很多临床医生对循环管理和心血管血流动力学的认识还不足,国内相关专业书籍也较少,所以翻译此书的目的就是为临床医生提供一本既有完整的血流动力学理论,又能指导临床实践的参考书。

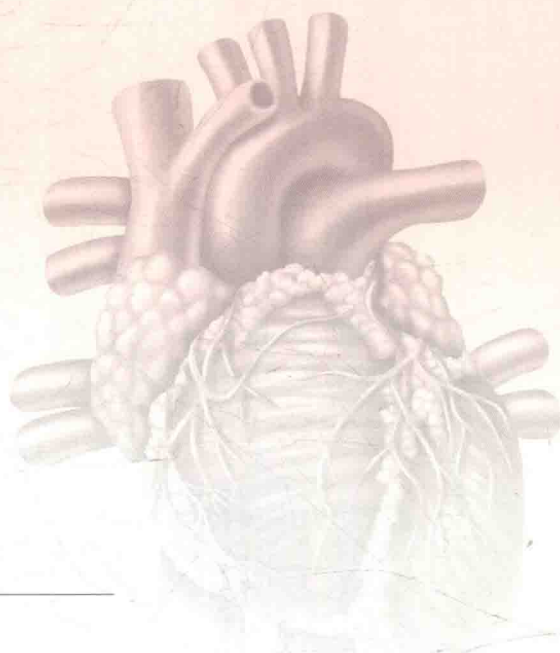
George A. Stouffer 教授编写的《临床心血管血流动力学》是目前国外该领域知名专著。本书从血流动力学基础理论到各种心血管病的血流动力学变化均作了详细的阐述,同时书中采用了大量的图表,以便于读者理解和掌握。此外,每个章节后面附有病例学习和问答,期望能给大家实用的知识。

尽管在翻译过程中力求完善,但由于所涉及内容专业性强,参译人员的理论水平有限,临床经验和体会不一,文字表达和写作风格等诸多方面都难以做到统一、完美,如对本书存在疑问或发现不妥之处,我们真诚希望广大读者提出宝贵意见。

本书由中国医学科学院阜外医院外科 ICU 团队、中日友好医院外科 ICU 团队及心内科团队的医生翻译,他们在患者的床边日夜与病魔奋战,在此,由衷地感谢为此书的出版付出辛勤努力的译审人员。如果本书能在重症监护及各类心脏病诊治方面为更多医生提供参考,则将是译者的荣幸。

李宪伦

2018年5月



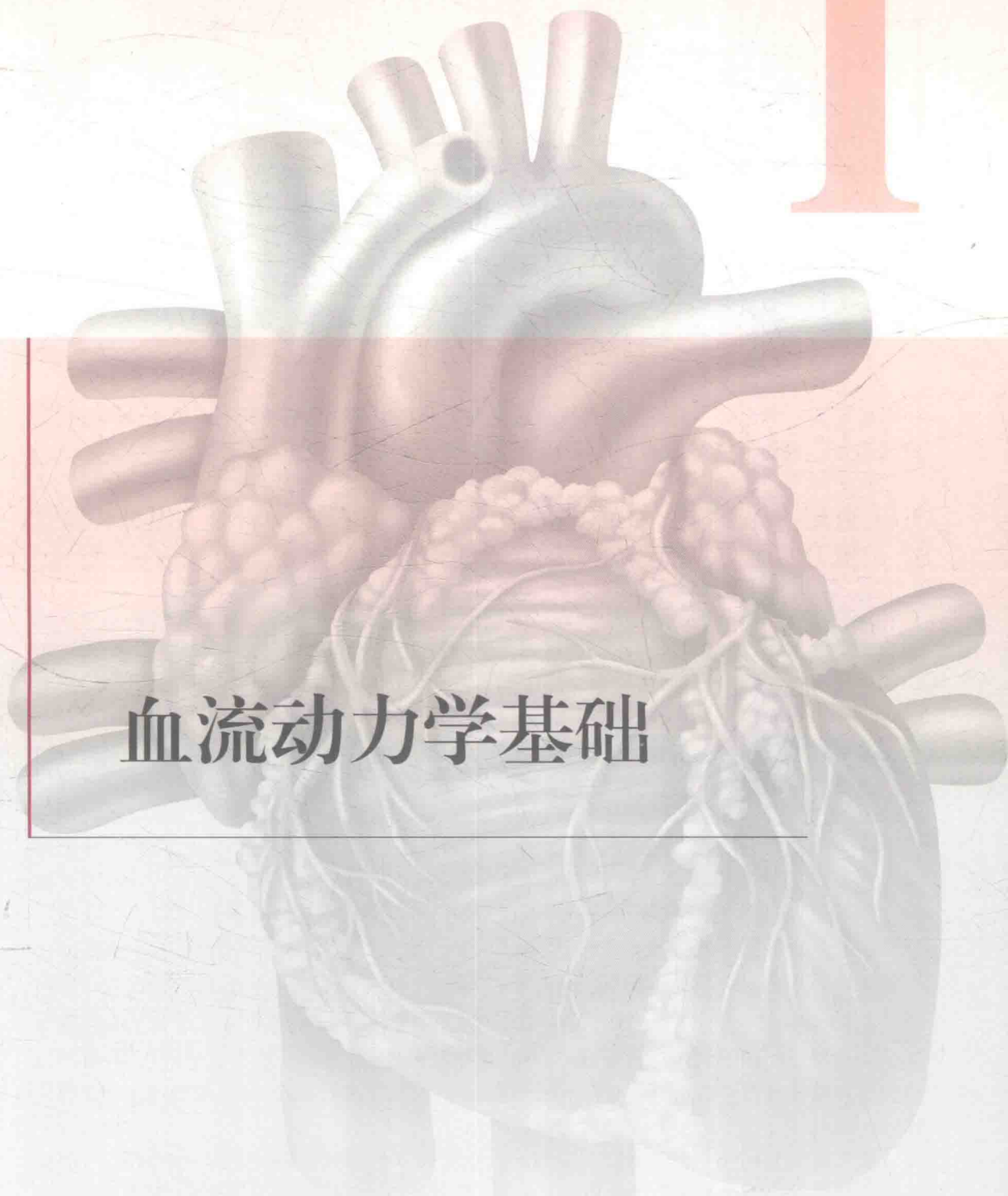
# 目 录

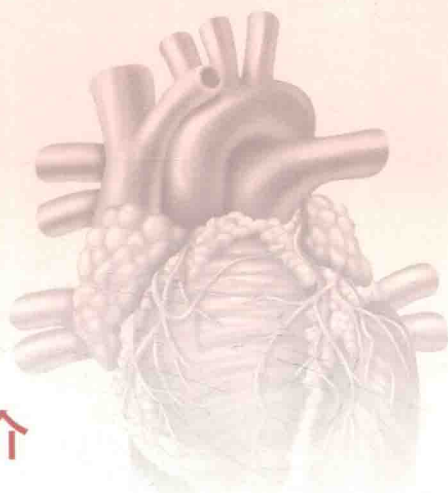
<b>I 血流动力学基础</b> .....	1
1 血流动力学基本原理简介 .....	2
2 右心导管术和肺动脉导管植入术的要点 .....	12
3 正常血流动力学 .....	27
4 动脉血压 .....	43
5 心房波形 .....	54
6 心输出量 .....	64
7 心内分流的检测、定位及定量 .....	70
<b>II 心脏瓣膜病</b> .....	77
8 主动脉瓣狭窄 .....	78
9 经导管主动脉瓣置换和外科主动脉瓣置换的血流动力学 .....	91
10 二尖瓣狭窄 .....	98
11 主动脉瓣关闭不全 .....	109
12 二尖瓣关闭不全 .....	118
13 三尖瓣 .....	126
14 肺动脉疾病中的血流动力学特点 .....	133
<b>III 心肌病</b> .....	143
15 肥厚型心肌病 .....	144

16 心力衰竭	154
17 限制型心肌病	163
<b>IV 心包疾病</b>	<b>169</b>
18 缩窄性心包炎	170
19 心脏压塞	180
20 渗出 - 缩窄性心包炎	191
<b>V 血流动力学支持</b>	<b>195</b>
21 主动脉内球囊反搏血流动力学	196
22 左心室辅助装置植入术的血流动力学	205
<b>VI 冠状动脉血流动力学</b>	<b>213</b>
23 冠状动脉血流动力学	214
24 血流储备指数	221
<b>VII 其他</b>	<b>231</b>
25 右心室心肌梗死	232
26 肺动脉高压	239
27 心律失常和起搏器的血流动力学	247
28 血流动力学的系统性评价	264

# I

## 血流动力学基础





# 1 血流动力学基本原理简介

血流动力学是研究人体控制血压及血流的机械和生理特点的学科。本书不会详细讨论血流动力学的原理,本章仅做简单概述,便于理解血流动力学的基本原理。

## 1.1 血流的能量以三种可以相互转化的形式存在:源自心输出量和血管阻力的压力,来源于重力的静水压和血流的动能

丹尼尔·伯努利(Daniel Beroulli)是18世纪的生理学家、数学家。他有广泛的科学兴趣并因为天文学、物理学等多方面的成就获得10次巴黎学院大奖。他的一个理论是,在直管中理想流体(指不受黏滞或摩擦能量损失的流体)的能量可以以三种可互换的形式存在:垂直压力(施加在垂直于流体的管壁上的力;势能的一种),流动液体的动能以及由重力引起的压力。垂直压力通过心脏泵功能和血管弹性转移到血液和血管壁,随着心输出量和血管阻力的变化而变化。

$$\text{总能量} = \text{势能} + \text{动能}$$

$$\text{总能量} = (\text{垂直压力} + \text{重力压力}) + \text{动能}$$

$$\text{总能量} = (P_{\text{per}} + P_{\text{grav}}) + 1/2\rho V^2 (V \text{ 为血流速度; } \rho \text{ 为血液密度})$$

$$\text{总能量} = P_{\text{per}} + (\rho \times h \times g) + 1/2\rho V^2 (g \text{ 为重力常数; } h \text{ 为流体的高度})$$

虽然血液不是“理想流体”(牛顿意义上),但伯努利的理论是有帮助的。血压是三个组分的总和:侧向压力,重力和动能(也称为冲击压力或停止流体所需的压力)。压力是施加于某一表面单位面积的力。在血管或心脏中,跨壁压(即跨过血管壁或心室壁的压力)等于血管内压力减去血管外的压力。血管内压力导致跨壁压(即血管膨胀)和血液通过血管的纵向输送。

重力在站立的人身上很重要。重力牵拉引起脚部的动脉压将超过胸主动脉压。同样,头部的动脉压也会小于胸主动脉压。类似地,重力在静脉系统中也是重要的,因为当一个人

站立时,血液将会在腿部聚积。降低心室充盈压导致心输出量下降,解释了为什么从坐位或仰卧位突然起立时人会感到头晕。相比之下,当一个人平躺时,重力对动脉压或静脉压的影响可以忽略不计。重力压力等于某一血柱的高度  $\times$  引力常数  $\times$  流体密度。为了床旁计算静水压(mmHg),以毫米(mm)为单位测量感兴趣点(例如心脏和脚部)之间的距离,并除以13(汞比水密度高13倍)。

升主动脉处的动能最大,因为速度最快,但它导致的等效压力不高于5mmHg。

## 1.2 血流由压力梯度和阻力决定

流体(或气体)的特征之一是从较高压力区(例如,左心室)流向较低压力区(例如右心房,图1-1)。在临床实践中,患者被假定为处于仰卧位(抵消重力压力)和休息状态。就像已经提到的,与正常心输出量的血压相比,动能是可忽略的,因此使用压力梯度和阻力来估计血流量。

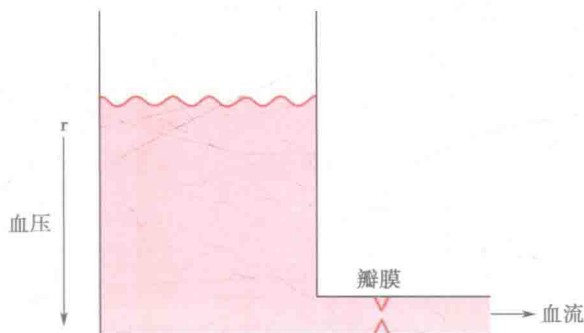


图1-1 液体从高压容器流向低压容器的简化液体系统

注意:流体的容积会被局部阻力影响(如瓣膜)

临床医学中用于描述全身血流的主要参数是心输出量,其是心室每分钟泵出的血液的总体积(通常以L/min表示)。心输出量等于从每个心脏周期的左心室(left ventricular, LV)喷射到主动脉中的血液总体积(即搏出量)乘以心率。这个公式在实验上是重要的,但临床使用有限,因为搏出量难以测量。心脏输出通常使用Fick方程或通过热稀释技术测量,这将在第6章中讨论。

为了比较不同大小个体之间的心输出量,使用心脏指数(心输出量除以体表面积)。把心输出量用体表面积标准化是重要的,因为它可以适当地解释数据,而不依赖于患者的大小[例如,心输出量在260lb(磅,1lb=0.4536kg)男性和100lb的女性之间显然会有很大差异]。体表面积的指数化也用于其他测量,如主动脉瓣面积。

血流量、阻力和压力之间的关系可以使用电路中电流的欧姆定律来表示:

$$\text{血流}(Q) = \text{压力梯度}(\Delta P) / \text{阻力}(R)$$

这里  $\Delta P$  是系统中近端和远端之间的压力差,  $R$  是近端与远端之间血流阻力。

一个基于欧姆定律的有用临床等式是:

平均动脉压 (MAP) 中心静脉压 (CVP) = 心输出量 (CO) × 全身血管阻力 (SVR)  
 (MAP=mean arterial pressure; CVP=central venous pressure; CO=cardiac output;  
 SVR=systemic vascular resistance)

使用这个方程,在知道心输出量、中心静脉压和动脉压时我们可以计算全身血管阻力。MAP 是随时间的平均动脉压,通常使用以下公式估计:

$$\text{MAP} = (1/3 \text{ 主动脉收缩压}) + (2/3 \text{ 主动脉舒张压})$$

该公式是针对心率为 60 次 / 分 (在此心率时心脏舒张是心脏收缩的两倍长) 而开发的,并随心率增加而逐渐变得不正确。在休克的患者 (即低血压和组织灌注受损) 中,CO 的测量和 SVR 的计算可以帮助确定病因 (例如,脓毒性休克具有高 CO+ 低 SVR 或心源性休克具有低 CO+ 高 SVR)。

### 1.3 用泊肃叶定律估计血流阻力

血液不是一种“理想流体”,因为流动的血液遇到阻力时会消耗能量 (和压力)。在没有任何局部阻塞 (血流的阻力也会来自像动脉粥样硬化疾病所形成的局部阻塞) 的情况下,血流阻力由血黏滞度、血管半径和血管长度决定。这种关系被称为泊肃叶定律 (有时称为 Poiseuille-Hagen 定律),由以下等式描述:

$$\text{阻力} = 8 \times \text{黏滞度} \times \text{长度} / \pi \times \text{半径}^4$$

$$\text{因为, 血流} = \text{压力差} / \text{阻力}$$

$$\text{血流} = \pi \times \text{半径}^4 \times \text{压力差} / 8 \times \text{黏滞度} \times \text{长度}$$

由于半径被提高到 4 次方,因此其在确定阻力方面至关重要。如果所有其他变量不变,半径增加 20% 会导致流量加倍。或者,作为另一个例子,直径为 2mm 的冠状动脉 (例如远侧钝角边缘支) 的阻力比直径为 4mm 的冠状动脉 (例如左前降支近段) 的阻力高 16 倍。

黏滞度 (通常缩写为  $\eta$ , 单位为泊 =  $\text{dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ ) 在决定阻力时也很重要。它很难直接测量,因此通常相对于水报告。血浆黏滞度为  $1.7 \times$  水黏滞度,血液黏滞度为 3~4 倍水黏滞度,差异在于血细胞比例,即血细胞比容。

要注意,当用于血管时泊肃叶定律仅能计算阻力的近似值。该方程推导的四个重要假设是:①流体的黏滞度不随时间或空间改变;②管是刚性和圆柱形的;③管的长度大大超过直径;④流动是稳定的,非搏动的且非湍流的。当这个方程应用于身体血流时,这些假设中的许多受妨碍。然而,泊肃叶定律是重要的,因为它指出了血流阻力的决定因素。

在哺乳动物的循环中,小动脉水平的阻力最大。虽然典型毛细血管的半径 (如  $2.5 \mu\text{m}$ ) 小于最小小动脉的半径 (如  $4 \mu\text{m}$ ),但是毛细血管的数量远远超过了小动脉的数量,因此有效面积要大得多。同样重要的是可以调节小动脉阻力 (毛细血管没有平滑肌,因此阻力不能在该水平被调节;然而,周细胞可以在某些特殊结构如肾脏的肾小球中收缩毛细血管)。这使得血管阻力的快速变化可维持血压 (例如在低血容量休克时),并且还能够调节流向各器官的血液 (即自动调节)。一般原则是,减少组织中的小动脉阻力可以降低 SVR,导致心输出量

增加,同时降低近端小动脉的压力并增加小动脉远端的压力。

## 1.4 雷诺数决定是层流还是湍流

正如在任何液压系统中,血管中的血流通通常是平滑有序的,因为流体分离成无数个同心层,中心的速度最高而靠近血管壁的速度最低。当流体(如血液)流过固体表面(如血管壁)时,会在摩擦力阻止流体运动的表面附近形成薄层(图 1-2)。在与固体表面接触的流体和中心的流体之间就存在摩擦阻力(因此速度)的梯度。如果流体元素沿着有序的非接触层行进,则称为层流。层流中的流动阻力完全归因于流体的黏性阻力和流体与固定壁之间的相互作用。在层流中,流体的平均速度是中心的最大速度的一半。

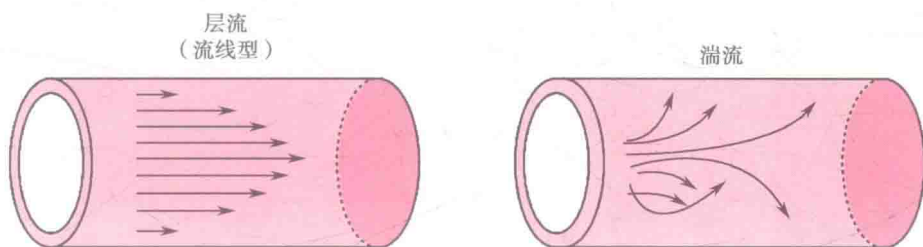


图 1-2 层流及湍流示意图

相反,当相邻层的流体元素变得混合时,会发生湍流。由于能量损失(这些损失被称为惯性阻力),湍流是混沌的,效率较低。在湍流中,压差和流量之间的关系不再是线性的,因为管中的阻力随着流量的增加而增加。因此,需要较大的压力差来维持流量。湍流和狭窄半径相关的能量损失,是导致严重狭窄远端发生压力下降的两个主要原因。

湍流因为几个原因很重要,其中之一是产生噪声(例如,在流速高的管道中),这是一些心脏杂音和 Korotkoff 声音(用于测量血压,图 1-3)的原因。另一个原因是湍流改变了流量和灌注压之间的关系,如前所述。由于与湍流相关的能量损失增加,灌注压和血流量之间的关系不再是线性的(如 Poiseuille 关系所描述的),而是需要更大的压力来保持足够的流量(图 1-4)。

通过计算雷诺数可以预测从层流到湍流的过渡,即惯性力( $V\eta$ )与黏性力( $\rho/L$ )的比值:

$$R = \text{直径} \times \text{速度} \times \text{密度} / \text{黏滞度}$$

其中,血液在 37°C 下的黏度( $\eta$ )为 0.0035 Pa·s(帕斯卡·秒;3.5 厘泊),血液的密度( $\rho$ )约为 1060 kg/m<sup>3</sup>,血液速度( $V$ )为 m/s,管的直径为米。雷诺数是无量纲的。

在给定的液压系统中,存在临界的雷诺数,低于该数的流动是层流。在靠近这个临界数的雷诺数中,存在一个过渡区,其中流动既不完全是层流也不是湍流。较高的雷诺数与湍流有关。在长直且无分支的管中的非搏动流体,如果  $R < 2000$  一般是层流,如果  $R > 2000$  则一般是湍流。重要的是要注意,雷诺数取决于精确的流体构型,必须通过实验确定。

在主动脉中,从层流到湍流的过渡通常在雷诺数 2000~2500 之间发生。在粥样硬化动脉和 / 或分支点,临界雷诺数低得多,即使在正常的生理流速下也可能有湍流。在严重的狭

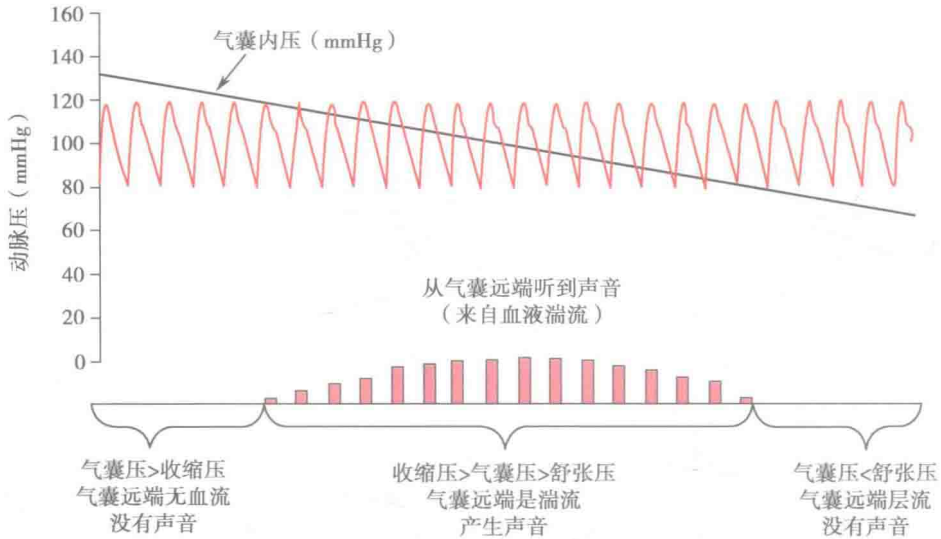


图 1-3 利用从层流到湍流的转换来测量血压示意图

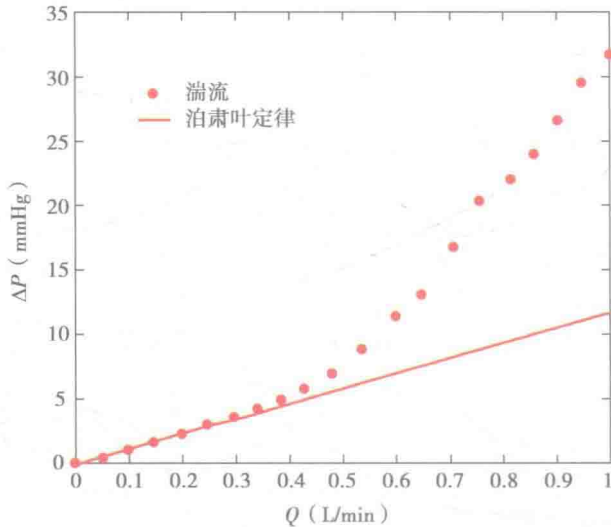


图 1-4 从层流到湍流的转换

注意: 当流体从层流转换到湍流时增加流量所需的压力梯度明显增加

窄处, 湍流发生的雷诺数, 比理论上的直管小一个数量级。

雷诺方程是重要的, 因为指明了决定是层流还是湍流的重要变量。从该简化版方程式可知, 在高速(例如狭窄动脉)和大直径的情况下很难保持层流。血管直径是双重重要的, 因为它不仅是方程的直接变量, 而且影响速度。由于连续性方程(见下文原则九), 我们知道速度随着直径的减小而增加。因此, 血管直径对雷诺数的影响被放大。因为微循环中的速度和直径都减小, 所以血流趋向于层流。