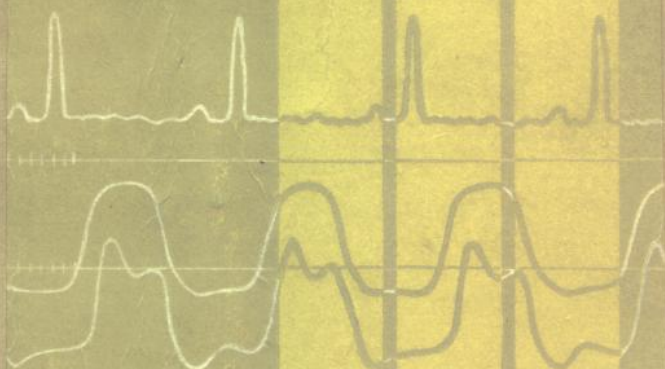


# 动脉中的血液流

D. A. 麦克唐纳 著



科学出版社

# 动脉中的血液流

D. A. 麦克唐纳 著  
柳兆荣 陶明德 等 译

科 学 出 版 社

1 9 8 2

## 内 容 简 介

作者在本书中,对于动脉中的血液流所涉及的问题,既力图建立数学模型以作定量描述,又十分重视实验的检验与临床应用。全书共分十五章,详细讨论了血液的粘性特性、动脉管的弹性特性、血液在动脉中的流动规律、脉搏波的传输和反射、动脉的阻抗、数值分析方法与测试技术,以及在监测人体心输出量中的应用等问题,内容十分丰富。书后还附有该领域较系统的参考文献。

本书对于生理学与医学工作者来说,是一本较深入、系统的读物;对于从事生物医学工程的理、工科研究人员来说,可通过该书了解生物学有关领域的问题与成就。

D. A. McDonald

## BLOOD FLOW IN ARTERIES

Edward Arnold (Publishers) Ltd. 1974

## 动脉中的血液流

D. A. 麦克唐纳 著

柳兆荣 陶明德 等 译

责任编辑 马素卿

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1982年12月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1982年12月第一次印刷 印张: 18 7/8

印数: 0001—5,500 字数: 427,000

统一书号: 14031·44

本社书号: 2902·14

定价: 2.90 元

## 译 者 的 话

本书作者、生理学家D.A.McDonald自五十年代末就开  
始与数学家、物理学家结合,力图用数学、物理学、力学的原理  
与方法来研究动脉中血液的流动规律。本书是作者及其同行  
后来在这个领域中工作的总结。作者在本书中对于动脉中  
血液流所涉及的问题,一方面力图建立适当的数学模型以作  
出定量的描述;另一方面又十分重视实验的检验及临床应用。  
因此,本书对于生理学与医学工作者来说是一本较深入、系统  
的读物;对于理、工科专业从事生物医学工程研究的人员来  
讲,则可了解有关的生物学领域的问题及成就。

正如书名所指明的,本书只研究动脉系统中的血液流动  
规律。对于循环系统中涉及到的其它问题,如心脏动力学、微  
循环学等,则不予讨论。本书作者是一个严谨的生理学家,  
在取材上只限于已经由实验验证过的内容。对于一些近年来  
蓬勃发展起来的、但还未被实验充分验证的数值分析结果,也  
不予介绍。对这些方面的内容有兴趣的读者可参考Bergel主  
编的《心血管流体动力学》(Cardiovascular fluid dynamics,  
Vol. 1, 2, Lond., Academic Press, 1972) Caro等编著的《循  
环力学》(The mechanics of the circulation, Oxford Univ.  
Pr., 1978)及其它有关资料。

为了查阅的方便,译者对每一章中各节的标题按前后次  
数加以编号。原书数学式子笔误较多,翻译时我们尽可能加  
以订正,修改之处不一一指明。

本书由邵倩芳译第一、二、三、四、十五章,陈金娥译第五

章,陶明德译第六、十一、十四章,柳兆荣译第七、十、十二章,徐有恒译第八、九、十三章和附录。全部译稿由柳兆荣与陶明德加以整理,由柳兆荣负责最后校订,曾宪英参加了本书有关生理内容的校订。

由于本书涉及的专业面较广,许多译名国内还未统一;加上译者水平有限,时间仓促,因此不免有许多不妥的地方,请读者批评指正。

## 序 言

大不列颠和爱尔兰生理协会曾编辑出版了一套丛书，本书直接来源于这套丛书中在 1960 年出版的一本专著《动脉中的血液流》。因此，用句行话来说，也可以把这本书看作是该专著的再版。确实，本书希望达到与原专著同样的目的。因此，本书仍保持原样，作为原作者——一个生理学家的著作，主要想给生理学家和从事心血管医学的医生阅读。另外，本书也希望能使物理科学方面的读者概括地了解生物学领域中的问题及成就。

如同原著志谢中所述，自从我极幸运地遇到有才干的数学家、已故的 John Womersley 后才开始进入这个领域。那时，在解释由狗股动脉所记录的脉动流量曲线和动脉压力波之间的关系上，我感到困难极大。虽然，我们的合作有一年多时间没有什么成就，但在此之后我们的工作有了突破，并且取得了丰硕的成果，直至他的不幸去世才中断。回顾我们以往几年的协作，很明显，第一阶段实际上是必要的准备阶段。在这个阶段他学习了有关生物学方面的基础知识，我学习了足够的数学和物理学，以至能用数学家阐述问题的方法把问题公式化。过去，从事不同学科的人员之间进行合作，有许多尝试都失败了，因为他们不理解必须要有这样一个探索的阶段，以便学习他们同事的科学语言。

恰如其分地说，本书是血液动力学的入门书，确实也曾打算以血液动力学作为这本新书的书名。然而，正如我在最近 (McDonald, 1968 b) 的评论中所指出的，血液动力学这个词

在语言学上的合理性是有怀疑的，因而给这本书起这个名字似乎是含糊的。在评论中，我把血液动力学实际上定义为“心血管生物物理学”，我很乐于用这个定义来描述这本书。但是由于有限的篇幅不允许把起着泵作用的<sup>心脏</sup>功能在物理学分析方面的大量工作都包括进去，因此若仍然以血液动力学作为本书的题目是有点不确切的。“动脉中的血液流”似乎会忽视对内容较多的血管压力的研究。但是，作为一个题目，却强调了在生理学领域中许多方面我的第一个、唯一的老师——已故的 Kenneth Franklin 教授的论断。他指出，“循环的主要目的是对人体器官提供适量的血液，为此所必要的压力则是次要的，循环的基本问题就是从这个事实得出的。但是，测量流量是困难的，而测量压力却是容易的。所以，有关流量的知识一般都是导出的。”（由于 Kenneth Franklin 教授一向谦虚，他把这格言归属于 Karl Ludwig (1816—1895)，但我一直没能查到其出处）。

也许我们最好回顾一下我们目前许多工作中在前一个世纪的先驱者 Stephen Hales, 1733 年他在大作《血液静力学》的一开头曾写道：

“因为动物身体不但由奇妙的固体物质所组成，而且也含有大量的流体，这些流体通过复杂的血管网和其它难以想像的细微管道不断循环和流动；又因为动物的健康，主要在于使这些固体和流体保持正常的平衡，所以从血液循环这一重要的发现问世以来，一直把弄清推动这些流体的力和速度，看作十分值得探讨的事情，并把它当作深入了解动物机构的一种可靠方法。”

如上所述，考虑到前人的论断，我们将把本书限定为“关于推动这些流体的力和速度的探讨”。它的根本的目的是，某些探讨至少能使我们“对动物机构有相当深入的了解”。经过

分析判断,可以把它作为对人体循环失调的一种认识。

本书的编排与第一版大体相似。第二章分析了定常流的特性,第三章简述了有关血液粘滞性的大量工作。第四章推广到非稳定流情况,如血液循环中的湍流。接着,第五、六章叙述了应用于脉搏流的流体动力学方程及其简化形式。接下去的三章考虑到本书后半部要叙述实验工作,所以先介绍傅里叶分析、血压计和流量计的使用技术问题。为了阐明脉搏波传播的理论分析,第十章通过介绍弹性理论,概述了管壁弹性特性的现有数据。第十一章讨论了无反射波的传播。第十二章概述了反射的作用及其证据。随后的两章较详细地描述了有关动脉的阻抗、波速和阻尼的实验工作。在临床上需要监测心脏连续搏动时的心输出量,所有上述工作应用于这一重要的临床需要就是本书最后一章的主题。

鉴于自1960年以来,在所有这些领域中实验工作的增加,为了防止本书内容过于庞大,这次删去了原书脉动流型这一章。在这个时期,发生的最明显的变化或许是普遍地使用了优质流量计,所以象原来那样单纯地描述就不必要了。在老版本中有关心血管声音的产生这一节,现在已缩减成简单地提一提这一专门课题的某些重要贡献。

长期以来,许多朋友给了我帮助、合作和具有促进作用的讨论,我对他们十分感激。

(下略)

D. A. 麦克唐纳

# 志 谢

(第一版重印时)

虽然,本书仅以我个人名义出版,但如果没有主要的协作者 John Womersley 和 Michael Taylor 的大力帮助,本书绝然无法写成,因为我并没有多少有价值的东西可写。

我对目前这个课题的兴趣,是由于偶然观察到家兔基底动脉中的流线型流动(图 4.2)所引起的。当时我与 Potter 博士一起对大脑放射性血管造影术中的一些问题进行着严格的“实际”研究。我们用高速的电影摄影术来测量基底动脉中的流速,这是我们能想到的唯一方法。当时,我想把研究脉动流的技术应用于其它血管系统的动脉。可以说,把这种技术用于直至椎动脉的循环生理,这将是很有意思的。

1949年和 1951 年,我有幸在苏黎世(Zürich)同 Hess 教授一起工作(关于神经生理学问题),虽然很多年以前他就对循环物理学作出了很大的贡献,但在这个领域中他仍给了我极鼓舞人心的帮助,对于他的不断鼓励和帮助,我深为感激。

收集动脉中脉动流速的记录是有意义的,但实际上并不理想,因为没有定量分析方法,对其作出解释是困难的。但是我很幸运的是,我的这些问题引起了著名的数学家,现在已故的 J. R. Womersley 的兴趣。只有在这时,这个工作才取得了进展。

Charles Darwin 先生在讣告(1958 年 5 月 3 日)中对 Womersley 先生的经历已讲得很清楚,我不用多说了。除此以外,他在应用数学的许多领域中都有很丰富的经验,他也非常

熟悉这类工作所必要的实验方法。除了他所作的最有价值的分析和他个人对我友好的帮助之外，我们合作的三年还积累了与不同学科领域的人一起工作的极宝贵经验。当时，我还不能用物理观念详细阐述生理学问题，故在我们协作的最初十八个月中（在此期间只占用了 Wormersley 的业余时间），进行长期的讨论是必要的。相当时间以后，他对循环生理学才真正有了足够的了解。一旦看清了该领域中的主攻方向，其工作的进展就很快。特别是医学研究联合会以个人拨款方式支持他，使他能在这个研究部门渡过了整整一年时间（1954,6—1955,6）。我感到，除非研究物理学的同事愿意用比较长的时间学一点生理学，不然，这种协作的效果总是有限的。在这个领域里有才干的数学家作出了有关循环现象的抽象分析，但这种抽象的分析用处不大，因为他们没有接触生理学实践。如果只是简短的磋商，那么我自己的经验表明，作为生理学家，我们首先应把问题转化成数学的语言形式，可以说，我们的同事作为一个翻译者，十分精通我们自己不能流利掌握的语言。数学处理就是根据这些基本假设来进行的。

幸运得很，Wormersley 在 1955 年到美国去的前六个月，有一天 Michael Taylor 博士来了（未说明来自阿德莱德），他请求在 C. J. Martin 国际研究会员任职期间，是否可以在 Bart's 工作一年。这样，在 John Womersley 离开前，Michael Taylor 博士同他协作了几个月。当他在英国时，我同有经验的数学家协作是不成问题的。Taylor 在医学上和生理学上颇有素养，同时又热衷于数学，因此，在这些领域中，他的技术水平同许多专业人员是可以并驾齐驱的。他在工作中所作出的贡献，我难以在这里表达对他的赞美和感激，这是因为有人规劝我们，只能赞美已故的人，对一个活着的人，特别是亲近的朋友过多赞美，这就会被认为是虚伪的（或者至少不合英国人的

习俗)。可以毫不夸张地说，关于波的反射和动脉输入阻抗(本书的后面几章)的观点组织，几乎全部是和他一起讨论的。另外，本书全部由他评论和审阅过。——但我也必须向他表示歉意，我并没有始终接受他更严密的建议(用数学观点)。物理学家所发现本书的任何不严密之处，当然几乎都是由于我为了简易起见，所做的省略而引起的。

Franklin 教授，二十多年来对我的教导和鼓励，是我难以忘怀的。John Potter, Peter Helps 和 John Hale，在过去的十年中，他们均是我极有帮助的同事。我感谢目前正在这里工作的 Derek Bergel。我也十分感谢 Mary Morse 小姐花了许多功夫为本书打印了许多版本，以及 D. C. Moore 先生为图表注释，并把图表拍成照片。

John Hadland 及其有经验的小组进行了高速的电影摄影，几年来的资金是医学研究联合会拨款提供的(他们也购置了基本设备)；最粗略地浏览一下，就可知道这样的支持对这些研究工作多么重要。伦敦大学中心研究基金管理机构慷慨地提供了摄影装置，伦敦大学医学院的研究基金管理机构提供了精密的数字式记时计。

我要阐述的重要内容(然而相对而言)是 1956 年后半年我在美国访问期间，同美国朋友进行的大量的讨论。这次旅行应归功于最慷慨的洛克菲勒基金会联谊会。我十分感谢他们，特别要感谢 Pomerat 博士。当时，在所有帮助过我的生理学家和物理学家中，他们或是提供了补充材料，或是进行了活跃的学术讨论，在此我只能简单地提一下。可是，我必须感谢 Johns Hopkins 大学的 Sam Talbot 博士，他在 1956 年 10 月—11 月仔细地阅读了本书的第一稿，并提出了不少建议。尽管本书是纯理论性的研究，在美国不但引起物理学部门和生理学部门的兴趣，而且也经常引起医学部门的兴趣。这

一点是特别令人鼓舞的。

我也非常感谢 Farsons 博士、Bayliss 博士和 H. Barcroft 教授，他们对我的最后一稿提出了极有帮助的建议。

我还应感谢《生理学杂志》和《医学生物物理学》的编辑，因为他们允许使用他们出版的图表。

最后，我要感谢我使用过他们资料的所有的人，因为不管在正文或是图表形式中，往往事先未征得同意就予以引用。在引用的图表中，他们的名字在相应的图表说明中加以注明。而对于那些没有注明归属的图表，则是属于我自己的。

1960.2

# 前 言

Donald Arthur McDonald 于 1973 年 5 月 24 日在亚拉巴马州的伯明翰去世。在他去世的时候，还没有来得及完成对本书第二版校样的修改。余下的任务和版面校样的最后编辑工作就由他的女儿 Alison McDonald 小姐，他以前的学生与协作者 Wilmer W. Nichols 博士和我来承担。我们和其他许多人一样继续爱戴和钦佩这样的一位科学家，因为他出色的工作是不言而喻的。

W. R. 米尔诺

美国马里兰州巴尔的摩城

1973 年 10 月

# 目 录

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| 前言 .....                         | viii |
| 序言 .....                         | ix   |
| 志谢(第一版重印时) .....                 | xiii |
| 第 一 章 绪论 .....                   | 1    |
| §1. 血液动力学作为一门科学的发展 .....         | 3    |
| §2. 血液动力学发展中的历史里程碑 .....         | 5    |
| §3. 关于动脉弹性和波速的研究 .....           | 11   |
| 第 二 章 在圆管中的液体定常流 .....           | 22   |
| §1. 粘性液体中的层流 .....               | 23   |
| §2. Poiseuille 方程在循环系统中的应用 ..... | 36   |
| §3. 湍流 .....                     | 40   |
| §4. Bernoulli 定理 .....           | 47   |
| §5. 血管床大小变化的影响 .....             | 49   |
| §6. 外周阻力的测量 .....                | 54   |
| §7. 动脉树的大小 .....                 | 60   |
| 第 三 章 血液的粘性特性 .....              | 71   |
| §1. 可变粘度的定义 .....                | 73   |
| §2. 血浆的粘度 .....                  | 78   |
| §3. 血液的粘性特性 .....                | 78   |
| §4. 低切变率的影响 .....                | 80   |
| §5. 较高切变率时管子大小的影响 .....          | 82   |
| §6. 表观粘度减小的原因 .....              | 85   |
| §7. 管壁上无细胞区域的起因 .....            | 86   |
| §8. 振荡流中血液的粘度 .....              | 89   |
| 第 四 章 循环系统中的湍流和扰动流型 .....        | 92   |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| §1. 脉动流的稳定性 .....                 | 96  |
| §2. 循环系统中的雷诺数 .....               | 106 |
| §3. 血液的混合 .....                   | 108 |
| §4. 管的弯曲 .....                    | 115 |
| §5. 在接点处的流动 .....                 | 118 |
| §6. 瓣膜与凸出物的影响 .....               | 122 |
| §7. 主动脉和大动脉 .....                 | 125 |
| <b>第 五 章 脉动流的速度剖面</b> .....       | 129 |
| §1. 入口长度 .....                    | 139 |
| §2. 速度剖面的实验测量 .....               | 145 |
| <b>第 六 章 脉动压力和流量之间的关系</b> .....   | 150 |
| §1. 流量与振荡压力梯度之间的关系 .....          | 155 |
| §2. 从压力梯度计算流量 .....               | 159 |
| §3. 动脉的粗细对流动图案的影响 .....           | 164 |
| §4. 在血液循环系统中的 $\alpha$ 值 .....    | 166 |
| §5. 压力梯度与压力时间导数之间的关系 .....        | 167 |
| §6. Womersley 方程应用于动脉时的有效程度 ..... | 171 |
| §7. 主动脉中压力-流量关系的 Fry 解 .....      | 174 |
| <b>第 七 章 脉搏波形的数值分析</b> .....      | 182 |
| §1. 计算流量曲线的程序 .....               | 192 |
| §2. 流量分量的计算 .....                 | 193 |
| §3. 傅里叶分析的要求和限制 .....             | 200 |
| §4. 流量与压力脉搏波的有效意义谐波项 .....        | 201 |
| §5. 傅里叶分析在循环分析中的有效程度 .....        | 204 |
| §6. 功率谱 .....                     | 205 |
| §7. 线性 .....                      | 209 |
| §8. 合成的误差 .....                   | 213 |
| <b>第 八 章 压力计的设计</b> .....         | 215 |
| §1. 压力计特性的理论 .....                | 216 |
| §2. 压力计设计中的实际问题 .....             | 225 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| §3. 当今使用的压力计的类型 .....              | 228        |
| §4. 放大器与记录器 .....                  | 238        |
| §5. 应变式压力计的性能 .....                | 241        |
| §6. 压力计的校正 .....                   | 242        |
| §7. 在压力记录中的人为误差 .....              | 252        |
| <b>第九章 测量脉动流的流量计 .....</b>         | <b>260</b> |
| §1. 电磁流量计 .....                    | 261        |
| §2. 超声波流量计 .....                   | 270        |
| §3. 热量法 .....                      | 277        |
| §4. 血管内流量计 .....                   | 279        |
| §5. Bernoulli 流量计 .....            | 289        |
| §6. Castelli 水力摆式流量计和“鬃毛”流量计 ..... | 293        |
| §7. 高速摄影技术 .....                   | 295        |
| §8. 从压力梯度计算时相流量 .....              | 295        |
| <b>第十章 动脉管壁的弹性特性 .....</b>         | <b>297</b> |
| §1. 弹性体的物理常数 .....                 | 298        |
| §2. 膨胀压作用下弹性管的性能 .....             | 305        |
| §3. 弹性材料的动态性能 .....                | 309        |
| §4. 弹性管中的传播速度 .....                | 315        |
| §5. 波传播的其它模式 .....                 | 318        |
| §6. 实验研究 .....                     | 319        |
| §7. 动脉壁的结构 .....                   | 327        |
| §8. 组分的弹性特性 .....                  | 328        |
| §9. 动脉壁的成分 .....                   | 329        |
| §10. 动脉壁弹性参数的测量 .....              | 331        |
| §11. 管壁的纵向运动 纵向弹性模量 .....          | 341        |
| §12. 管壁的各向异性 .....                 | 343        |
| §13. 平滑肌在动脉管壁中的作用 .....            | 344        |
| <b>第十一章 弹性管中的脉动流 .....</b>         | <b>352</b> |
| §1. 外部约束的影响 固连和受载的管子 .....         | 370        |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| §2. 在粘弹性管中的波速和衰减 .....           | 375 |
| §3. 在粘弹性管中的波速 .....              | 377 |
| §4. 动脉中波速和衰减对频率的依赖关系 .....       | 379 |
| <b>第十二章 波的反射</b> .....           | 382 |
| §1. 瞬态脉冲的反射 .....                | 383 |
| §2. 稳态振荡中的反射波 .....              | 387 |
| §3. 在传输线中的反射 .....               | 390 |
| §4. 单个动脉接点的反射 .....              | 397 |
| §5. 弹性特性连续变化的反射 .....            | 403 |
| §6. 活动物中波反射的分析 .....             | 405 |
| §7. 脉搏波谐波分量振幅的变化 .....           | 416 |
| §8. 存在阻尼时弹性非均匀的作用 .....          | 421 |
| §9. 体循环动脉中压力的分布 .....            | 425 |
| §10. 反射波在心脏处的第二次反射 .....         | 427 |
| <b>第十三章 动脉阻抗</b> .....           | 431 |
| §1. 输入阻抗的模量与相位的变化 .....          | 433 |
| §2. 在动脉树各部分中压力波与流量波之间的关系 .....   | 436 |
| §3. 主动脉阻抗曲线的解释 .....             | 458 |
| §4. 输入阻抗及其与心脏工作负荷及外功率输出的关系 ..... | 469 |
| <b>第十四章 波速和衰减</b> .....          | 475 |
| §1. 利用瞬变激励来测量波速 .....            | 489 |
| §2. 流速与压力波波速的关系 .....            | 494 |
| §3. 轴向的和扭转的波速 .....              | 497 |
| §4. 动脉中波的衰减 .....                | 498 |
| §5. 粘弹性管壁中粘性分量的性质 .....          | 503 |
| <b>第十五章 监测人体心输出量的方法</b> .....    | 511 |
| §1. 对使用方法精度的评价 .....             | 513 |
| §2. 脉搏波轮廓或弹性腔模型 .....            | 514 |
| §3. “水锤”公式的使用 .....              | 519 |
| §4. 压力梯度法 .....                  | 526 |