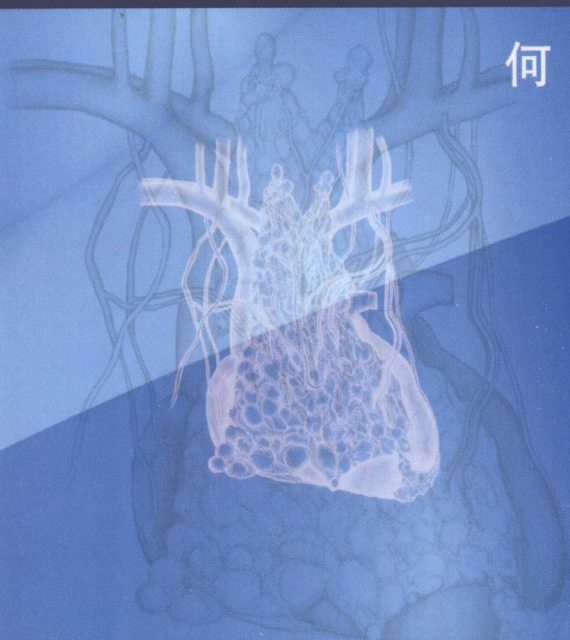


# 心血管动力学参数 测量原理和临床应用

何 为 余传祥 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 心血管动力学参数 测量原理和临床应用

第二版 李国海 主编



科学出版社  
SCIENCE PRESS

# 心血管动力学参数测量 原理和临床应用

何 为 余传祥 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书以表征动脉弹性的心血管动力学参数测量为出发点,详细介绍了临床上应用广泛的典型心血管动力学参数:收缩压、舒张压、平均压、脉压、心率、脉搏波传播速度、大动脉顺应性指数、小动脉顺应性指数、动脉硬化指数和踝臂指数的测量原理和计算方法,并突出了临床应用效果和每个参数的临床诊断特点。为紧跟国际发展趋势,还详细介绍了脑血流测量原理、动脉力学计算数值方法和全身血管的整体模拟方法等新领域的研究成果。

本书对致力于数字化医疗仪器开发和生物医学工程研究的人员、信号测量和处理专业的理工科高年级本科生和研究生、心脑血管内科医务人员及从事医疗设备维护的工程技术人员有一定帮助和参考作用。

### 图书在版编目(CIP)数据

心血管动力学参数测量原理和临床应用/何为,余传祥著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-026281-3

I. 心… II. ①何…②余… III. 心血管流体动力学-研究 IV. R54

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 237307 号

责任编辑:王志欣 孙芳 潘继敏 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencecp.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年1月第一版 开本: B5 (720×1000)

2010年1月第一次印刷 印张: 20 1/4

印数: 1—1 500 字数: 398 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

## 前 言

人体的血液循环系统包括动力系统与管路系统两部分。动力系统为心脏，管路系统为血管。心脏与血管组合成人体心脑血管系统，心脏是此系统的动力器官，其基本作用是推动血液在血管中循环流动。血管是运送血液的管道，血液在心脏和血管中不断流动，循环往复，形成血液循环。血液循环的主要功能是在于保证机体内外环境间和机体各部间的物质交换和运输，以维持新陈代谢的正常进行，它是人体生命的基础。心脏和血管是给人体各器官提供血液以维持生命的不可分割的整体。任何部位的病变、损坏及功能异常都要影响到整体系统，不同程度地会给血液循环造成障碍。

动脉硬化是动脉的一种非炎症性、退行性和增生性的病变，可引起动脉的增厚、变硬和失去弹性。动脉粥样硬化是造成脑出血、脑血栓、心肌梗塞、心绞痛、心力衰竭、早搏等病症的主要原因。据美国心脏学会报告，心脑血管疾病死亡占全球人口死亡构成已从 1992 年的 25% 增至目前的 33%。可以说，动脉硬化导致的疾病已成为人类的第一杀手。

高血压和动脉硬化是引起各种心脑血管疾病的主要原因。然而，这个潜在的危险因素在其早期可以丝毫没有自觉症状，因此，往往会被人们忽视而错过早期治疗的机会。应该说，即使是对最轻微的、未引起任何症状的高血压和动脉硬化进行治疗，也应当被视为一种最有效的预防措施，但关键问题是如何在病人发病初期方便、准确而又无痛苦地检查和诊断出这种无明显症状的动脉硬化病症。

本书通过对心血管系统理论知识和长期的实验研究，以作者和合作单位研制的国产动脉硬化检测仪 YF/XGYD 采集的肱和桡动脉脉搏波为基准，根据示波法原理和弹性腔理论建立了动脉血管模型，利用脉搏波曲线与袖带压之间的关系，总结了心血管动力学参数测量计算方法，主要为收缩压 (SBP)、舒张压 (DBP)、平均压 (mean arterial pressure, MAP)、脉压 (PP)、心率 (HR)、脉搏波传播速度 (pulse wave velocity, PWV)、大动脉顺应性指数 ( $C_1$ )、小动脉顺应性指数 ( $C_2$ )、动脉硬化指数 (arterial stiffness index, ASI) 和踝臂指数 (ankle-brachial index, ABI) 等，并且通过大量病例分析和临床测试，证实了各算法的有效性和可靠性。其次，除了心血管，脑血管循环系统也是不可忽略的。本书详细介绍了作者应用电阻抗原理测量脑血流的理论、仪器和临床研究，希望读者关注动脉弹性的发展要以心脑血管作为整体考虑。为了让读者了解最新的动脉弹性研究进展，本书还对国际上心血管系统整体仿真研究进行了介绍，特别是

应用电路和电网络模型进行的血管流体的仿真研究，相信不久的将来新的心血管动力学参数的测量会是系统的，而非孤立的单点测量或者两点间测量。第12章和第13章介绍的方法虽然还没有应用于临床，但下一代动脉弹性分析仪器必定会引入这些新的研究成果，使动脉弹性测量更加准确和更具临床指导意义。

本书特点为：打破了过去研究型书籍把理论、技术和临床三个过程完全分割的写法，尝试尽量简化生涩理论，加强完整系统设计的介绍和临床验证。由于本书的研究内容坚持了产、学、研的全过程，基础理论研究深入，技术设计完善，临床持续时间长，研究的内容已经进行了成功的产品转化，在2004年就获得国家食品药品监督管理局的产品许可，内容大多数来源于作者的第一手资料，其成熟性和可参考性均很强，特别是过程完整详尽，对致力于数字化医疗仪器开发和生物医学工程研究的科研人员和工程技术人员有一定帮助和参考作用。相信本书的出版将对推动我国在动脉弹性测量的临床研究和仪器开发具有一定的指导意义。

参与本书研究工作的还有肖汉光、全晓莉和姚建阁等；临床上应用了重庆医科大学罗开良教授的临床测量结果；四川宇峰科技发展有限公司提供了所有动脉硬化检测仪器。在此向上述人员和单位表示由衷的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

2009年10月于重庆大学

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 血压测量技术的研究现状 .....	2
1.2 动脉弹性测量技术的研究现状 .....	5
1.3 其他心血管动力学参数检测的意义 .....	6
1.4 本书的主要研究内容和临床意义 .....	7
1.4.1 动脉硬化形成的病理过程和临床意义 .....	7
1.4.2 本书研究的主要心血管动力学参数 .....	10
<b>第 2 章 脉搏波传播特性和血管弹性腔理论</b> .....	15
2.1 脉搏波传播特性.....	15
2.1.1 脉搏波的基本特征 .....	15
2.1.2 脉搏波传播理论 .....	18
2.1.3 脉搏波信号特点 .....	24
2.2 弹性腔模型理论.....	25
2.3 示波法原理.....	28
2.4 电阻抗波动原理和电阻抗波动法.....	30
<b>第 3 章 心血管动力学参数测量仪器设计</b> .....	33
3.1 硬件系统的总体设计.....	33
3.1.1 模拟信号的检测 .....	34
3.1.2 模拟信号处理电路的设计.....	36
3.1.3 数字电路和电机的充放气回路的设计 .....	43
3.2 软件系统的总体设计.....	46
3.2.1 LabVIEW 开发软件简介 .....	46
3.2.2 系统软件的总体方案 .....	47
3.2.3 系统软件的界面设计 .....	48
3.2.4 数据库 .....	53
<b>第 4 章 脉搏波信号处理和特征提取</b> .....	56
4.1 常用信号处理方法.....	56
4.2 脉搏波的处理.....	60
4.2.1 滑动平均滤波处理 .....	60
4.2.2 巴特沃思滤波 .....	62

4.2.3	合理检查去除奇异波处理	64
4.3	脉搏波特征主要提取方法	65
4.3.1	波峰和波谷的提取	66
4.3.2	起跳点的提取	66
<b>第5章</b>	<b>常规心血管动力学参数计算</b>	<b>68</b>
5.1	血压	68
5.1.1	平均压	69
5.1.2	收缩压和舒张压	70
5.1.3	脉压	75
5.2	心率	76
5.3	左心室收缩时间	77
5.4	心输出量与每搏输出量	77
5.4.1	有创检测方法	78
5.4.2	无创检测方法	79
5.4.3	Kubicek改进方法	82
5.4.4	三种方法检测每搏输出量的对比分析	84
5.5	外周阻力的计算	85
5.6	临床测试结果统计和分析	87
5.6.1	统计方法	87
5.6.2	血压与心率测试结果的分析	88
5.6.3	每搏输出量 Meeb-Rubner 公式法和胸阻抗法测量对比实验	89
5.6.4	每搏输出量测试结果的分析	90
5.6.5	外周阻力与血压测试数据的对比分析	92
<b>第6章</b>	<b>PWV 参数检测及临床研究</b>	<b>94</b>
6.1	PWV 的形成机理及临床意义	94
6.2	PWV 算法的提取	95
6.3	影响 PWV 的因素	104
6.4	临床测试结果统计和分析	107
6.4.1	相关分析	108
6.4.2	分组平均数分析	111
6.4.3	线性回归分析	113
6.4.4	重复性分析	114
<b>第7章</b>	<b>ASI 参数检测及临床研究</b>	<b>116</b>
7.1	ASI 的评价原理	116
7.2	ASI 算法的提取	119
7.3	影响 ASI 的因素和 ASI 的修正	121



7.4	ASI 临床测试 .....	123
<b>第 8 章</b>	<b>动脉顺应性指数的数学模型和计算方法研究</b> .....	<b>136</b>
8.1	动脉顺应性指数的数学模型 .....	136
8.1.1	双弹性腔模型 .....	136
8.1.2	模型的解析解 .....	138
8.1.3	$C_1$ 和 $C_2$ 的算法公式 .....	140
8.2	动脉顺应性指数算法实现 .....	141
8.2.1	奇异波去除 .....	142
8.2.2	小波检波 .....	143
8.2.3	确定舒张期位置 .....	147
8.2.4	参数初值估计方法及实现 .....	148
8.2.5	LM 曲线拟合求取模型参数 .....	150
8.3	动脉顺应性指数的临床研究 .....	154
8.3.1	实验对象和方法 .....	154
8.3.2	动脉顺应性指数测试结果及分析 .....	154
8.3.3	动脉顺应性指数和其他参数的相关性结果及分析 .....	158
8.3.4	临床分析结论 .....	160
<b>第 9 章</b>	<b>基于四肢脉搏波的 ABI 测量和临床应用</b> .....	<b>161</b>
9.1	ABI 的定义和临床意义 .....	161
9.1.1	ABI 的定义 .....	161
9.1.2	ABI 的临床意义 .....	163
9.2	ABI 的动力学物理模型 .....	164
9.3	ABI 测量仪器研制和临床分析 .....	167
9.4	部分外周动脉血管病变测量方法与 ABI 比较研究 .....	172
9.5	ABI 的临床应用研究综述 .....	177
<b>第 10 章</b>	<b>心血管动力学参数与超声影像学比较研究</b> .....	<b>181</b>
10.1	超声技术评价动脉结构和弹性 .....	181
10.1.1	超声物理特性及测量基本原理 .....	181
10.1.2	超声技术对动脉功能的临床评价 .....	182
10.2	ASI 与颈动脉 IMT、斑块和肱动脉 FMD 的关系 .....	187
10.2.1	研究对象 .....	187
10.2.2	研究方法 .....	187
10.2.3	ASI 与超声检测对比结果 .....	191
10.3	其余心血管动力学参数与超声对比研究 .....	196
<b>第 11 章</b>	<b>脑血管血流检测与研究</b> .....	<b>200</b>
11.1	脑血流的基本特性 .....	200

11.2	脑血流测量和研究方法	201
11.2.1	脑血流测量方法	201
11.2.2	研究模型	204
11.2.3	生物电阻抗检测方法	206
11.3	基于生物电阻抗的脑血流测量系统	214
11.3.1	硬件系统设计	215
11.3.2	脑血流信号检测与处理	226
11.3.3	数据处理系统设计	235
11.3.4	临床应用实验	235
<b>第 12 章</b>	<b>动脉流体力学数值计算方法和动物模型</b>	<b>245</b>
12.1	一维血液流体力学模型	245
12.1.1	一维流体动力学模型	245
12.1.2	一维流体动力学仿真	248
12.2	三维血液动力学模型	251
12.2.1	三维 Navier-Stokes 方程和边界条件	251
12.2.2	变分方程	252
12.2.3	离散四面体单元	253
12.2.4	变分方程有限元分析	255
12.2.5	三维血液动力学仿真	258
12.3	动物模型	267
12.3.1	动脉硬化模型	267
12.3.2	高血压动物模型	271
12.3.3	颈动脉狭窄动物模型	273
12.3.4	卒中动物模型	274
<b>第 13 章</b>	<b>心血管系统整体数学模型及仿真研究</b>	<b>276</b>
13.1	心血管系统的结构和生理功能	276
13.2	心血管系统的电网络模型	278
13.2.1	集总参数电网络模型	278
13.2.2	分布式输电线网络模型	299
13.2.3	混合模型	303
13.3	物理模型	305
13.3.1	体循环模拟装置	305
13.3.2	微循环模拟装置	310
13.3.3	硅胶管流动腔系统装置	311
<b>参考文献</b>		<b>313</b>

## 第 1 章 绪 论

随着人口年龄结构的老龄化,心血管疾病(CVD)已经成为当前最常见的疾病之一。在美国,因疾病致死的人群中有一半是由心血管疾病引起的,它是当今发达国家死亡率最高的重要疾病,在我国也是死亡率较高的一类疾病,世界卫生组织已将其列为 21 世纪危害人类健康的头号杀手。心血管疾病是心脏病的主要原因,可表现为多种病症,包括高血压、冠状动脉疾病(CAD)、周围动脉病、动脉硬化、动脉瘤、中风、肾病和视网膜病。根据美国心脏协会的报告,美国有 5800 万人患有心血管疾病,其中尤以高血压患者所占比率最高,现象最为普遍。全世界死亡人数中,约有 1/3 死于此类疾病,很多病人由于没能及时发现病变延误了治疗。因此,如何防治这类疾病,对心血管疾病的检测诊断正确与否,直接关系到测量者的生命和预后,已成为世界各国迫切需要解决的一项重大课题。

人体的血液循环系统包括动力系统与管路系统两部分。动力系统为心脏,管路系统为血管。心脏与血管组合成人体心血管系统,心脏是此系统的动力器官,它的基本作用是推动血液在血管中循环流动;血管是运送血液的管道,血液在心脏和血管中不断流动,循环往复,形成血液循环。血液循环的主要功能是保证机体内外环境间和机体各部分间的物质交换和运输,以维持新陈代谢的正常进行,它是人体生命的基础。心脏和血管是给人体各器官提供血液以维持生命的不可分割的整体。任何部位的病变、损坏及功能异常都要影响到整体系统,不同程度地给血液循环造成障碍。然而,心血管系统具有非常出色的调节与代谢功能,致使患有疾病的人可以长时间地耐受由于某处病变而引起的功能紊乱。

动脉血压(一般也简称为血压)与许多心血管疾病密切相关,是测定心血管性能特征的定量指标,它表示血液在动脉血管内流动时对血管壁所施加的压力。动脉血压在循环系统中占有重要地位,它能促使血液克服阻力向前流动。血压过低,则不能维持血液有效循环,以保证供应各器官组织的需要,特别是位置比心脏高的头部组织(如脑组织等),一旦它们得不到足够的血液供应,就会影响其正常生理活动;血压过高,则会增加心脏和血管的负荷,心脏必须加强收缩才能完成射血任务,严重时可引起心室扩大,心输出量(cardiac output, CO)减少,使循环功能发生障碍,还可导致血管破裂,严重时影响生命。因此,动脉血压不能过低也不能过高,维持一定相对稳定的水平才能维持人体组织的正常功能。所以,心脏的泵血功能、心率、周围血管的阻力、主动脉和大动脉的弹性及血液的物理状态等都反映在血压的指标中。美国 1978 年开始历时近 9 年对 8300 多人进行检查和随访研究的资料显

示,血压水平与心肌梗塞、心脏性猝死及动脉粥样硬化脑血栓等心血管疾病的发病率有着非常显著的相关性。随着血压水平的提高,心血管疾病的发病率也大幅度地增加。

动脉硬化是动脉的一种非炎症性、退行性和增生性的病变,可引起动脉增厚、变硬,失去弹性,其包括动脉粥样硬化、动脉中层钙化和小动脉硬化三种类型,其中,动脉粥样硬化是动脉硬化病中常见且最重要的一种。动脉硬化现代细胞和分子生物学技术显示,动脉粥样硬化病变都具有平滑肌细胞增生,大量胶原纤维、弹力纤维和蛋白多糖等结缔组织基质形成,以及细胞内外脂质积聚的特点。动脉粥样硬化可能通过以下机制导致血管壁弹性减退:①内膜斑块,特别是纤维性斑块和钙化斑块直接导致血管壁变僵硬,血管弹性下降;②内膜斑块形成增加了血管壁的厚度,致使弹性下降;③广泛内膜增厚及斑块阻断了营养成分从管腔向管壁弥散,使管壁坏死、纤维化,进一步降低血管弹性。同时研究表明,动脉粥样硬化是造成脑出血、脑血栓、心肌梗塞、心绞痛、心力衰竭、早搏等病症的主要原因。据美国心脏学会报告,心血管疾病死亡占全球人口死亡构成已从1992年的25%增至目前的33%。可以说,动脉硬化导致的疾病已成为人类的第一杀手。

高血压和动脉硬化是引起各种心血管疾病的主要原因。然而,这个潜在的危险因素在其早期可以丝毫没有自觉症状,因此,往往会被人们忽视而错过早期治疗的机会。应该说,即使是对最轻型的未引起任何症状的高血压和动脉硬化进行治疗,也应当被视为一种最有效的预防措施;但关键问题是如何在病人发病初期方便、准确而又无痛苦地检查和诊断出这种无明显症状的动脉硬化病症,这是一个棘手的问题。近年大量研究工作发现,高血压和动脉硬化的初期阶段,虽然还没有自觉症状,但血压、血管弹性和血管阻力等一系列心血管血流参数实际上已开始发生变化。如果能及时检查出这些血流参数的变化,并对血流特征进行分析,就可能在还没有自觉症状的情况下对高血压和动脉硬化这两个最重要的心血管疾病潜在危险因素及早诊断出来,从而为心血管疾病的预防和治疗争取到宝贵时间。

## 1.1 血压测量技术的研究现状

在心血管动力学参数的检测中,血压参数的检测是发展较早、应用较广的检测技术。血液在血液循环的动力由心脏收缩来完成,心脏周期性收缩和舒张所产生的压差迫使血液在全身流通。心脏收缩时所达到的最高压力称为收缩压,它把血液推进到主动脉,并维持全身循环。心脏扩张时所达到的最低压力称为舒张压,它使血液能回流到右心房。心脏的泵血功能、冠状动脉的血液供应情况、周围血管的阻力和弹性、全身的血容量及血液的物理状态等因素都反映在血压的指标中,所以,血压可以称为心血管系统状态的指示器。对于健康成年人,心血管系统中不同

部位的血压值各不相同,通常取左上臂动脉处的血压值为参考值,正常血压值为:收缩压一般在 95 ~ 140mmHg (12.67 ~ 18.67kPa),平均为 110 ~ 120mmHg (14.67 ~ 16kPa);舒张压一般在 60 ~ 90mmHg (8 ~ 12kPa),平均为 80mmHg (10.67kPa)。一般情况下,血压用分数形式来表示,如 120/80(分子代表收缩压,分母代表舒张压)。通常,血压高于正常范围称为高血压;反之,血压低于正常范围则称为低血压。此外,根据 Johns Hopkins 的高血压白皮书,定义血压略高于 130/85mmHg 为“高正常血压”,又称为“边界高血压”。达到高正常血压的人患上高血压和心血管疾病的危险很高。事实上,心血管系统疾病大多数都归因于高正常血压。

血压测量技术的研究可以追溯到一个世纪以前。一百多年来,各种血压算法相互继承,相互作用,已经形成了一套完整的血压测量技术体系,该测量技术通常可以分为直接法和间接法两种。

直接法血压测量是将一根导管插入欲测部位的血管或心脏内,通过导管内的液柱同放在体外的应变式传感器、线性可变电感式差动变送器、电容式传感器等相连,从而测出导管端部的压力。此外,也可以通过把传感器放在导管的末端,直接测出端部所在点的血压值。这种方法的优点是测量准确,并能进行连续测量;但它必须经皮肤将导管插入血管内,所以是一种创伤性的方法。

间接法是利用脉管内压力与血液阻断和开通时刻所表现的血流变化间的关系,从体表测出相应的压力值。主要是利用袖带充放气进行血压检测,其测量过程是:先充气加压阻断动脉,随后缓慢放气,在袖带下或动脉的远端检测脉搏的变化或血流的变化作为收缩压和舒张压的判据;也可把袖带内压力波动的变化形式作为判据。基于这些方法,人们开发了许多自动及半自动的血压间接测量系统,即各种类型的数字血压计。目前,国内外成熟的血压测量仪器可以测定收缩压、平均压、舒张压和心率等参数。虽然间接法测量精度较低,难以准确测定心脏、静脉系统的压力,但是,这种方法不需要剖切的外科手术,同时测量简便,所以,在临床上得到了广泛的应用。目前,间接式血压测量的具体实施方法有很多,主要包括柯氏音法、示波法(oscillometric method)、超声法、双袖带法和脉搏延时法等多种方法。

(1) 柯氏音法。柯氏音法(即听诊法)是 1905 年苏联医生 Kopomkob 提出的一种血压测量方法。Kopomkob 指出:在正常的情况下,完全受压的动脉并不产生任何声响,只有当动脉不完全受阻时才会出现声音,因此,可用声音来确定人体的血压。测量工具由血压计袖带和听诊器组成。测量工作过程是:先通过充气球给袖带充气,当袖带内压力超过动脉收缩压时,动脉血管封闭,血流不通;然后打开针形阀使袖带缓慢放气,使汞柱逐渐下降。注意监听,依据柯氏音的判定方法,测得收缩压和舒张压。

柯氏音法是目前最普遍采用的血压测量方法,也是医生最普遍采用的临床方

式,具有测量简单的优点。该方法的缺点主要表现在以下几个方面:①依赖人的听觉、视觉及协调程度,有一定的主观性,并难以标准化;②电子仪器完全模拟人的行为比较困难,且血压测量值易受环境噪声干扰;③无法直接测量出动脉平均压,只能用近似公式进行估算。

(2) 示波法。20世纪70年代后,随着微处理芯片及集成压力传感器的出现,示波法逐渐得到了广泛的临床应用。该方法也需要用袖带阻断动脉血流,但在放气过程中,不是检测柯氏音,而是检测袖带内气体的振荡波。这些振荡波起源于血管壁的搏动,理论计算和实践均已经证明此振荡波与动脉收缩压、平均压及舒张压有一定函数关系。

示波法的优点是:①排除了操作者主观因素影响,亦不受环境噪声干扰;②可以精确测量出动脉平均压,示波法是血压无创测量方法中唯一能测量平均压的方法;③重复性、一致性比较好,准确性比较高。

其主要缺点是:①易受外界振动的影响,如人为的振动袖带、气管的振动和人的身体运动等;②易受放气速度和气管的刚性度影响。

目前,示波法已成为一种被广泛接受和有效的自动无创血压检测方法。本书对血压的测量也采用了示波法技术,并对其进行了改进,这将在第2章和第5章给予介绍。

(3) 超声法。超声法也需要用袖带阻断动脉血流,其原理是利用超声波对血流和血管壁运动的多普勒效应来检测收缩压和舒张压。在测量过程中,在上臂袖带下安放一个超声传感器(传感器8MHz的振荡源加到发送晶片,由此产生8MHz的超声波),传感器发出的超声波遇到运动着的血管壁时,其回波发生频移,回波由超声传感器接收晶片接收后,经放大和鉴频电路检波得到正比于频偏的信号,它与血管壁运动速度和血流速度成正比,此值再由声频放大器放大,最后得到一个声频输出。

在血管被阻断期间,血管壁静止不动,所以无频移产生,这时,无声频输出。反之,当血管未被阻断时,由于血流和血管壁运动大,会产生较大的频移信号,因而能检测出声频输出。

超声法的优点是:适用范围广,既适用于成人,也适用于婴儿和低血压患者,同时还可以用于噪声很强的环境。缺点是:在测量过程中,哪怕是受试者不自觉的身体活动也会引起传感器和血管之间超声波途径的变化,从而影响测量结果。

(4) 双袖带法。双袖带法是由Dobbeleer于1965年提出的,基本原理是:当血液流过一根被部分阻断的动脉时,其流速与动脉被阻断的程度有关。当动脉被充气袖带阻断于收缩压时,流速最慢;当袖带内压力接近舒张压时,其流速最快。这样,在收缩压状态下,流经袖带下血管的血流在两袖带中就会有一定的时间差,据此就可测出血压的数值。

双袖带法的优点是不受外界噪声的影响,缺点则是测量过程较为复杂,血压特征点的标定一致性较差。

(5) 脉搏延时法。脉搏延时法是利用血管内压力超过袖带压力时所产生的脉搏波滞后于心电图 R 波的原理,测量出 R 波和脉搏波之间的时间间隔  $T$ ,找出  $T$  的特征点,从而求出欲测的收缩压和舒张压数值。这一方法是 Geddes 等在 1981 年提出的,它克服了用柯氏音法难于提供明确的舒张压辨识点的缺点。

脉搏延时法血压数值的辨别采用放气过程中的袖带压曲线、脉搏波波形及心电图波形。随着袖带压的降低,R 波和脉搏波之间的时间间隔  $T$  将随袖带内压力而变,即随袖带压的降低,间隔  $T$  逐渐减小。 $T$  间隔最大时所对应的袖带压为收缩压,而最小  $T$  值对应的袖带压为舒张压。采用脉搏延时法测量血压,特征点容易识别,测量精度也比较好。缺点为:测量过程复杂,需要较强的专业知识。

## 1.2 动脉弹性测量技术的研究现状

动脉硬化是发生心血管疾病的基本病理变化,而动脉硬化的早期改变表现为动脉弹性功能降低。动脉弹性主要反映动脉舒张功能的状态,它取决于动脉腔径大小和管壁硬度(stiffness)或可扩张性(distensibility)。动脉弹性的异常表现为以下几个方面:①动脉的扩张性降低;②动脉壁增厚及硬度增加;③动脉顺应性的下降;④动脉内的斑块形成等。近年来,对于动脉血管硬化程度的诊断、治疗问题,国内外都进行了大量的研究,也形成了几种较为完善的测量技术。

(1) PWV 法。通过脉搏波形图与心电图的图形对照或者测在血管两处同一脉搏波的时间距离差来得到 PWV,由此来判定血管硬化程度并推导各项心血管系统参数值。

(2) 波形分析法。根据分析脉搏波得到的经验,用计算公式拟合脉搏波曲线,通过得到的公式参数值判断血管的硬化程度。

(3) 体积描记法。利用测到的胸阻抗值和描记的脉搏波图形来计算动脉血管硬度、动脉顺应性等各项心血管系统参数值。

(4) 超声多普勒技术。利用超声技术测定血管直径在脉搏波动时的变化情况和血管壁的厚度,由此计算各项心血管系统参数值,此方法精度较其他方法高,同时,仪器的技术要求和造价也最高。

(5) 弹性腔模型法。通过对心血管系统建立弹性腔模型来推导运算公式,得到包括动脉顺应性在内的心血管系统参数值。

各种测量方法采用的仪器精度、造价要求不同,提取的生物信号也有差别,因此,得到的数据有的比较精确,有的略为粗糙,但都能说明一定的心血管系统状况方面的问题,都有值得学习借鉴的地方。另外,各种方法并非完全独立,都有一些

相似的理论基础和一定的联系,例如,它们都运用了脉搏波理论,通过对血管中脉搏波的分析来获取所需要的心血管状态信息。

在国外,由各类方法研制的测量仪器都是近几年才问世的,主要包括以下一些设备:①美国制作的 CVProfilor DO-2020 动脉功能测定仪是通过无创同步检测肱动脉血压和桡动脉压力波形,从而得到大、小动脉顺应性指数;②美国 IMDP 公司研制的 CardioVision MS-2000 系统是通过无创地检测肱动脉血管获得动脉弹性功能参数,用 ASI 来量化;③日本 Colin 公司(现为欧姆龙)研制的动脉硬化检测装置 VP-1000 结合了 ABI 和 PWV 两种方法计算血管硬化程度,其优点是一台仪器能同时无创地检测 ABI 与 PWV 两种敏感指数;④法国康普乐动脉硬化检测装置主要检测三个节段 PWV 和体重指数。在国内,更多的是通过定性分析脉搏波信号,对动脉硬化程度给出大致的判断,或者通过建立心血管壁模型来研究判定动脉硬化程度。国产动脉弹性检测仪器的研制才刚刚起步,主要有重庆大学和四川宇峰科技发展有限公司共同研制的 YF/XGYD 动脉硬化检测仪。

### 1.3 其他心血管动力学参数检测的意义

人体所必需的营养是通过血液循环于毛细血管处进行物质交换获得的。血液在心血管中周流不息,循环不止,通过检测和研究反映血液在心血管中流动规律的心血管动力学参数及其变化规律,就可以了解心血管的状态,从而得到判断其健康状况的有价值的信息。血管包括动脉、毛细血管与静脉。动脉是将血液从心脏输送到毛细血管的中间管段,也是血管中活动特征最显著的管段,本书所介绍的心血管动力学参数就是针对心脏和动脉血管而言的。

目前,越来越多的高血压研究专家们认为,在许多高血压病例中,损伤的血管顺应性伴随着血管硬化程度的增加是心血管疾病的关键因素,是导致致命心血管疾病的第一步。也就是说,在症状通过血压升高表现出来之前,血管的病变就可能已经开始,而高血压只是血管病变的表现和标志,血管硬化程度即动脉弹性的检测已经被认为是比血压更好的预测。因此,除血压参数外,还需要检测能反映心血管疾病早期征兆的动脉硬化程度指数和各项心血管动力学参数,得到有关动脉硬化及心血管健康状况比较全面的信息。例如,心输出量和心脏每搏输出量(stroke volume, SV)、外周阻力、PWV、大动脉顺应性指数、小动脉顺应性指数、ASI 和 ABI 等参数均是诊断心血管疾病和血液动力学的重要参数,是评价心脏和血管基本状况的重要指标。通过分析这些指标所蕴含的心血管信息,可以在临床症状出现之前就进行治疗,对患者和医生来说,其意义重大。如果没有进行这样的分析,没有患者有关动脉硬化可能性的信息,医院只能对一项或者更多危险值的怀疑患有心血管疾病的人进行治疗,如高血压,甚至有可能这些受检者并没有患上这种病



症;而有些已患有动脉硬化的病人或其他病人,若不显示出高血压或高胆固醇,就不会得到合理的治疗。

## 1.4 本书的主要研究内容和临床意义

血管性疾病是目前全世界范围致死和致残的主要疾病之一。高脂、高糖、高盐的饮食习惯、安静少动的生活方式和紧张的工作压力是导致心血管疾病发病的主要原因。有关数据显示,在我国每年死于心肌梗死、缺血及出血性脑卒中等心血管疾病的人数有300多万,占我国每年总死亡人数的50%,而幸存下来的患者约有75%不同程度地丧失了劳动能力,更多患者留有精神心理障碍,影响生活质量。更令人担忧的是,目前我国特别是大城市急性心肌梗死患者在40~55岁人群中占有相当比例,30岁即突发心肌梗死也不少见。而20世纪末期及以后出生的人群,从少年时起即受不健康工作、生活方式影响,因此,医学专家预测我国心血管疾病发生年龄还会提前。

无论是心绞痛、心肌梗死还是脑卒中,都是人体血管病变发展至终末期的表现,而血管病变的发展是一个漫长的过程。从最初的动脉内皮功能障碍、动脉僵硬度的增加,到动脉壁出现肉眼可见的脂质条纹,在体内炎症因子的复杂作用下脂质条纹逐渐发展为动脉粥样斑块,最后粥样斑块造成血管狭窄甚至斑块破裂或脱落导致血管腔完全闭塞引起上述急性心血管事件,大约需要十几年至数十年的时间,这就为早期发现亚临床血管病变提供了机会。本书总结重庆大学近10年对动脉弹性测量的研究成果,特别是总结作者在动脉硬化检测仪的硬件、软件、临床及核心计算方法等方面的经验,内容翔实,可以为动脉弹性研究的科学工作者和临床动脉硬化诊断提供参考。

### 1.4.1 动脉硬化形成的病理过程和临床意义

人的循环系统的一个显著特征是其几何形状十分复杂,血液流经的血管会出现弯曲、分叉、锥削和局部狭窄。在动脉的一些部位(如动脉管的分叉与弯曲部位),由于某种原因产生的血管内皮的异常增生,将造成动脉管的局部狭窄。例如,动脉粥样硬化斑块的形成与发展就常造成动脉管的局部狭窄。动脉的局部狭窄对血液的循环会产生一系列的不良后果,这主要表现在:①增加了血液流动的阻力,从而减少了血液的流量;②增大了血管完全闭塞的危险性;③局部狭窄邻近的细胞异常增生,进而增大了狭窄的严重程度;④血管组织的损伤将导致狭窄后的扩张。因此,动脉狭窄对人体是十分有害的,尤其是动脉粥样硬化引起的心血管疾病对人体健康的威胁就更为严重。

动脉特别是大动脉管壁中含有丰富的弹性纤维、胶原纤维和平滑肌,具有一定