



人机工程学试验与评价

Human-machine Engineering:
Experiment and Evaluation

应乐安 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

人机工程学试验与评价

Human-machine Engineering:
Experiment and Evaluation

应乐安 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书系统全面地介绍了运用人体生理学和心理学知识来客观化评价机电产品设计和人机工程学的原理和方法。简明扼要地叙述了与人机工程学试验相关的人体生理和心理反应,主要涉及心血管系统、神经系统、感觉器官等;详细介绍了人机工程学中常用的试验及其具体设计方法、设计原则、数据统计分析方法;作者还结合研究工作,通过具体实例讲解了汽车、飞机、电梯等载运工具乘坐舒适性的人体心理生理学评价方法。本书充分体现出医学与工程的交叉,是笔者多年来研究工作的总结。

本书既可供高等工科院校工业工程、机械工程、航空航天、车辆工程等专业的研究生阅读,也可供从事工效学、安全生产管理、劳动与职业卫生等行业的广大科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

人机工程学试验与评价 / 应乐安编著. —上海:

上海交通大学出版社, 2017

ISBN 978 - 7 - 313 - 17992 - 0

I. ①人… II. ①应… III. ①人—机系统 IV.
①TB18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 203680 号

人机工程学试验与评价

编 著: 应乐安

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 苏州市越洋印刷有限公司

开 本: 710 mm × 1000 mm 1/16

字 数: 126 千字

版 次: 2017 年 9 月第 1 版

书 号: ISBN 978 - 7 - 313 - 17992 - 0/TB

定 价: 58.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021 - 64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 8.25

印 次: 2017 年 9 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512 - 68180638

前 言

“人机工程学”也称为“人因工程”或“工效学”，是将工程科学与人体解剖学、生理学、心理学、医学、环境科学等多学科交叉融合的一门科学。它研究人、机器、环境三者之间的相互关系，使设计出来的产品更符合人的生理与心理特点，从而达到健康、舒适、安全、高效的目的。

目前出版的“人机工程学”或“人因工程”书籍大多侧重于人机工程学设计，很少有专门论述人机工程学试验和评价的。本书则立足于人机工程学试验和评价，力求填补这方面的空白。笔者在内容的选择上尽可能避免与同类书籍的不必要重复。

笔者是在上海交通大学与原上海第二医科大学两校合并后，交大机电学院与交大医学院联合培养的博士，同时具备了工程和医学知识。在交大医学院和附属医院的学习、工作过程中，笔者深深地感到，在综合性大学的工科院系中，为工科大学生适当普及一些人体生理学与心理学知识，以便于他们今后深入研究人机工程学是非常必要的。然而应当承认，目前我国高校中对于人机工程学试验与评价的重视程度还不够。

因此，本书的最大特点是充分体现出了医学与工程的交叉。传统的机电产品设计与评价大都局限于产品本身的结构、原理。本书作者结合自己的交叉学科教育背景，提出了结合人的生理和心理反应，通过一系列人体生理和心理试验，来客观化地评价机电产品设计和人机工程学的观点和具体方法。运用人体生理学和心理学知识来指导人机工程学设计和评价，是本书的一大特色和亮点。

本书是笔者多年来研究成果的结晶,不少研究成果在国内具有一定的原创性,主要体现在以下四点:

(1) 率先运用“听觉生理学”来评价电梯乘坐舒适性,结合临床耳科听力学中的纯音测听、声导抗等手段,研究了电梯运行过程中,轿厢内的气压变化对人体听力、中耳腔功能(ECV、MEP 和鼓室图类型)等的影响,并得出了初步结论。

(2) 率先运用“动态心电图”和“脑电图”手段,研究了电梯加速度对人体心率、心率变异性、自主神经系统和脑电近似熵的影响,提出了通过心电和脑电信号来评价电梯舒适性的方法。

(3) 率先将“Spearman 相关系数”“逐步回归法”以及广泛应用于流行病学调查和社会普查中的“Logistic 回归模型”等概念引入人机工程学试验与评价,提出了运用这些数学工具将人体主观舒适感与客观生理指标相对应的舒适性综合评价方法。

(4) 贯穿本书的一条“红线”就是运用医学、生理学和心理学中的方法、技术来进行人机工程学试验与评价,从而为人机工程学试验与评价提供了一种新的思维和方法。

本书既可供高等工科院校工业工程、载运工具(汽车、飞机、船舶)运用工程、机械工程、航空宇航科学与技术、车辆工程、安全工程等专业的研究生阅读,也可供从事“工效学”“机电产品设计”“安全生产管理”“劳动与职业卫生”等行业的广大科研人员参考。

本书在撰写过程中参考了上海交大学生命质量与机械工程研究所的李增勇、焦昆、戴杜等学长的博士学位论文,在此表示感谢。由于时间仓促、笔者的知识水平有限,对于人机工程学的认识还比较肤浅,完全有可能“只知其一,不知其二”,书中存在的缺点和不足之处,恳请广大读者批评、指正。

目 录

第 1 章 人的生理和心理特性

1

1.1 绪言	1
1.1.1 人机工程学	1
1.1.2 人机工程学试验与评价	2
1.1.3 人体生理学	2
1.1.4 心理学	3
1.2 人体的九大系统	4
1.3 心血管系统	5
1.3.1 心脏的基本结构、体循环和肺循环	5
1.3.2 血管生理	7
1.3.3 评价心功能的常用指标	8
1.3.4 心血管活动的神经和体液调节	9
1.4 神经系统	11
1.4.1 神经系统的组成和功能	11
1.4.2 神经反射	12
1.4.3 脑的解剖生理	13
1.4.4 自主神经系统	17
1.5 人的感觉	18

2 人机工程学试验与评价

1.5.1	概述	18
1.5.2	视觉	18
1.5.3	听觉	21
1.5.4	平衡觉	23
1.5.5	其他感觉	24
1.6	人的心理特性	25
1.6.1	概述	25
1.6.2	感知觉	25
1.6.3	选择性注意	26

第2章 常用的人机工程学试验

28

2.1	心电信号的测量	28
2.1.1	心电信号的产生原理	28
2.1.2	心电图的基本知识	29
2.2	心率变异性及其线性分析方法	32
2.2.1	心率变异性的概念及其应用	32
2.2.2	心率变异性的时域分析和频域分析	34
2.3	脑电信号的测量	38
2.3.1	脑电信号的产生原理	38
2.3.2	脑电信号的测量	40
2.4	脑电和心电信号的非线性分析	40
2.4.1	混沌动力系统的相空间和吸引子	40
2.4.2	描述混沌时间序列的非线性动力学参数	42
2.4.3	脑电和心电信号的非线性分析	47
2.5	动脉血压的测量	48
2.5.1	动脉血压概述	48
2.5.2	动脉血压的测量	49

2.6	能量代谢的测定	50
2.6.1	能量代谢概述	50
2.6.2	能量代谢的测定	51
2.7	心理指标的测试	52
2.7.1	心理过程的测试	52
2.7.2	个性心理的测试	53

第3章 人机工程学试验设计与数据统计分析

55

3.1	试验设计要素和原则	55
3.1.1	试验设计中的“三要素”	55
3.1.2	试验设计原则	56
3.2	常用的试验设计类型	57
3.3	数据统计分析常用指标和软件	59
3.3.1	常用分析指标	59
3.3.2	常用分析软件	61
3.4	数据统计分析方法	63
3.4.1	参数统计和非参数统计	63
3.4.2	t 检验	64
3.4.3	方差分析	66
3.4.4	非参数统计	68
3.4.5	卡方检验	69

第4章 载运工具乘坐舒适性的心理生理学评价

72

4.1	载运工具乘坐舒适性的基本概念	72
4.1.1	舒适的生理学含义	72
4.1.2	载运工具的乘坐舒适性	73

4 人机工程学试验与评价

4.1.3	升降型载运工具的乘坐舒适性	74
4.2	载运工具乘坐舒适性的评价方法	75
4.2.1	主观评价法和客观评价法	75
4.2.2	心理生理学在载运工具乘坐舒适性评价中的应用	75
4.3	听觉生理学用于电梯乘坐舒适性研究	76
4.3.1	纯音测听和声导抗	76
4.3.2	试验设计	77
4.3.3	结论与讨论	78
4.4	动态心电图和脑电图用于电梯乘坐舒适性研究	79
4.4.1	试验设计	79
4.4.2	试验仪器和信号测量	80
4.4.3	结论与讨论	82
4.5	动态心电图用于汽车驾驶疲劳研究	84
4.5.1	汽车振动频率和车速对驾驶员自主神经系统的影响	84
4.5.2	中医学用于缓解汽车驾驶疲劳研究	85
4.6	主观舒适感与客观生理指标之间关系的数学模型	87
4.6.1	问题的提出	87
4.6.2	相关与回归的基本概念	87
4.6.3	主观舒适感与客观生理指标之间的 Spearman 相关系数	88
4.6.4	主观舒适感与客观生理指标之间的 Logistic 回归模型	88
4.6.5	“逐步回归分析”在 Logistic 回归模型求解过程中的应用	90
4.7	未来工作展望	91

第5章 劳动与职业卫生、机电产品的绿色评价

93

5.1	劳动与职业卫生概述	93
5.2	气压变化对人体健康和工效的影响	95
5.2.1	气压变化对人体血液和骨关节组织的影响	95

5.2.2	气压变化对人体鼻窦的影响	96
5.2.3	气压变化对人体肺脏的影响	96
5.2.4	气压变化对人体胃脏和牙齿的影响	97
5.2.5	气压变化对人体耳朵的影响	98
5.2.6	高原地区低气压对人体的生理反应	101
5.3	重力加速度(超重和失重)对人体健康和工效的影响	102
5.3.1	超重和失重对人体的生理影响理论分析	102
5.3.2	重力生理学的相关研究	103
5.4	机电产品的绿色评价	104
5.4.1	机电产品绿色评价的含义	104
5.4.2	机电产品绿色评价的产生背景	105
5.4.3	机电产品的生命周期	107
5.4.4	机电产品对人体健康的影响评价	107
5.4.5	机电产品对环境、能源和经济性的影响评价	108

参 考 文 献

 111

索 引

 119

第1章 人的生理和心理特性

人的生理和心理特性是人机工程学这门学科的理论基础。对于人机工程学试验与评价而言,更需要了解并掌握人的生理和心理特性。本章主要介绍人的心血管系统、神经系统、感觉器官以及普通心理学的基本知识。

1.1 绪言

1.1.1 人机工程学

“人机工程学(human-machine engineering)”也称为“人因工程(human factors)”“工效学(ergonomics)”或“工程心理学(engineering psychology)”,是将工程技术与人体解剖学、生理学、心理学、医学、环境科学等多学科交叉融合的一门科学。它研究人、机器、环境三者之间的相互关系,使设计出来的产品更符合人的生理与心理特点,从而达到健康、舒适、安全、高效的目的^[1,2]。

一方面,“人机工程学”这门学科的发展具有一定的必然性。任何机电产品都不是一个孤立的实体,都处于“人-机-环境”的大系统之中。传统机械设计把设计思维集中在产品的功能实现和行为分析上,现代机械设计则要求设计者同时考虑人的因素和环境因素,把“人-机-环境”三者融为一体,构成完整的“人-机-环境”大系统观,以系统的观点统一处理设计中的问题。在“人-机-环境”大系统运作过程中,人的参与包括人的“生理参与”和“心理参与”两个重要方面。因此,人的生理和心理因素成为现代机械设计中必须考虑的重要内容。在现代机电产品的设计和研发时,必须充分考虑人的生

理因素和心理因素,确立人在产品“人-机-环境”大系统中的地位和作用,才能使设计出来的产品更好地满足人的需求,并使人们更健康、舒适、安全地使用该产品^[3]。

另一方面,社会的发展和医学模式的改变也为“人机工程学”的发展奠定了一定的基础。21 世纪的医学模式已经从传统的“生物医学”模式转变成“生物-心理-社会-环境-工程”模式。倡导“医工结合”,将医学、生命科学与工程科学相结合,进行多学科的交叉研究,是学科发展的必然要求。

1.1.2 人机工程学试验与评价

设计出来的产品是否真的达到了健康、舒适的目的,这需要通过试验和科学数据进行评价。然而,传统的人机工程学教材大多侧重于“设计”的角度。例如,“手工工具的设计”“显示器与控制器的设计和布置排列”“作业空间的设计”“人机界面设计”“人机系统设计”“作业环境设计”等,对于如何进行人机工程学试验和试验数据统计分析却很少涉及。其实,人机工程学试验与一般的工程学试验有很大的不同:工程学试验大多以“机电产品”“机器”“零部件”为试验对象,而人机工程学试验却以“人”为试验对象,因此试验设计时必须充分考虑到人的生理和心理特点,遵循特定的试验设计原则。本书与其他同类教材的不同点就在于以人机工程学试验和评价为主要内容,包括“人机工程学中常用的生理和心理试验”“人机工程学试验设计和数据统计分析”“载运交通工具的乘坐舒适性试验”以及“机电产品的绿色化评价”等方面。

1.1.3 人体生理学

“生理学(physiology)”是研究生物机体的生命现象及其功能的科学。根据研究对象的不同,它可以分为“人体生理学”“动物生理学”“植物生理学”和“细胞生理学”等。“人体生理学(human physiology)”简称生理学,是研究人体的生命现象及其规律的科学,包括人体内部各组织、系统和器官的功能,以及人与外部环境之间的相互作用、相互影响、相互制约和相互协调。

正如“汽车构造”研究的是汽车发动机、底盘等各系统和零部件的构造,而

“汽车理论”研究汽车动力性、经济性、平顺性等各种性能,人体解剖学和人体生理学之间的关系也是“结构”与“功能”之间的关系。解剖学研究人的形态、结构,生理学研究人的功能、机制。与医学院学生不同,工科大学的学生在从事人机工程学试验和评价工作中,更需要关注的是人的各种生理反应而不是解剖结构。

人体生理学又包括“细胞和分子水平”“器官和系统水平”“整体水平”这3个不同的研究水平^[4]。医学科研工作者往往侧重于细胞和分子水平的研究,如基因、蛋白、DNA等,而人机工程学试验和评价更多地着眼于整体水平的研究,如研究劳动作业过程中或者汽车、飞机等交通工具乘坐过程中人的生理反应。

一般认为,人体的四大生命体征是心率(或脉搏)、血压、呼吸和体温。在人机工程学试验中,经常测量的人体生理指标包括心率(或脉搏)、血压、呼吸、心电、脑电、肌电和皮肤电等。

1.1.4 心理学

“心理学(psychology)”是研究人的心理现象及其规律的科学。不仅人有心理活动,动物也有心理活动。我们研究的是人的心理现象,它又可分为“心理过程”和“个性心理”两个方面。两者相比较而言,心理过程是动态变化的,而个性心理是相对稳定的。“心理过程”又包括认识过程、情感过程和意志过程,而“个性心理”又包括个性倾向性和个性心理特征两个方面。心理过程和个性心理是相互联系、密不可分的。个性心理既以心理过程为基础,同时也制约着心理过程并通过心理过程予以表现^[5]。关于心理过程和个性心理更具体的描述,见本章1.6节。

心理学的分支很多,包括:“普通心理学”“实验心理学”“教育心理学”“发展心理学”“认知心理学”“心理统计与心理测量”“医学心理学”“心理咨询与心理治疗”“消费心理学”“社会心理学”和“犯罪心理学”等。“生理心理学”和“心理生理学”都是生理学和心理学之间的交叉学科,但两者的含义却不同,详见本书第4章。“人机工程学”有时也称为“工程心理学”,它立足于工业和工程技术,把“普通心理学”中的基本理论运用于工程领域,同时结合了“实验心理

学”“认知心理学”和“心理统计与心理测量”中的一些原理和方法手段,从而使“人-机”系统之间达到最佳匹配。

1.2 人体的九大系统

人体共有九大系统,它们分别是:运动系统、脉管系统、呼吸系统、消化系统、泌尿系统、感觉器官、神经系统、内分泌系统和生殖系统^[6]。

(1) 运动系统:包括骨、关节和骨骼肌。成人共有 206 块骨,可分为颅骨、躯干骨和四肢骨 3 部分。骨借关节连接而成的骨支架支持体重,赋予了人体基本的形态。此外,骨骼还有保护内脏的作用,颅骨保护脑部,胸骨和肋骨保护心、肺。骨骼肌附着在骨上,执行运动功能。

(2) 脉管系统:包括心血管系统和淋巴系统。心血管系统由心脏和血管组成。血管又可分为动脉、静脉和毛细血管。脉管系统将氧气和营养物质运送到全身各组织和器官,同时将组织器官的代谢产物和二氧化碳运送到肾脏、肺和皮肤,通过尿液、呼吸和出汗排出体外。除了物质运输的功能外,脉管系统还有重要的内分泌功能。

(3) 呼吸系统:包括呼吸道和肺。上呼吸道包括鼻、咽、喉,下呼吸道包括气管和支气管。左肺分为上、下两叶,右肺分为上、中、下 3 叶。呼吸系统的基本功能是气体交换,吸入氧气,呼出二氧化碳。

(4) 消化系统:包括消化管和消化腺。消化管包括口腔、咽、食管、胃、小肠和大肠等。消化系统的基本功能是摄取食物,进行消化和吸收,并把食物残渣排出体外。

(5) 泌尿系统:包括肾脏、输尿管、膀胱和尿道 4 部分。泌尿系统的基本功能是把新陈代谢过程中的废物和多余的水排出体外,以保持机体内环境的稳定。此外,肾脏还有内分泌功能。

(6) 感觉器官:包括视觉器官、听觉器官、嗅觉器官、味觉器官等。感觉器官的基本功能是感受机体内、外的各种刺激,把它转变为神经冲动或兴奋,通过感觉传导通路传递给中枢,经中枢的整合加工后,产生相应的感觉。

(7) 神经系统:包括中枢神经系统和周围神经系统。神经系统的基本功

能是协调人体内部各组织和器官的活动,并使人体与外界环境相适应。

(8) 内分泌系统:包括垂体、甲状腺、甲状旁腺、肾上腺、松果体、胸腺和胰岛等。内分泌系统是神经系统以外的又一个重要的生理功能调节系统,它分泌激素,调节机体的新陈代谢、生长发育和生殖,保持机体内环境的稳定。

(9) 生殖系统:生殖系统的基本功能是繁殖后代,形成并保持第二性征。

本章重点介绍与人机工程学试验与评价有着密切关系的“心血管系统”“神经系统”和“感觉器官”这三大系统。

1.3 心血管系统

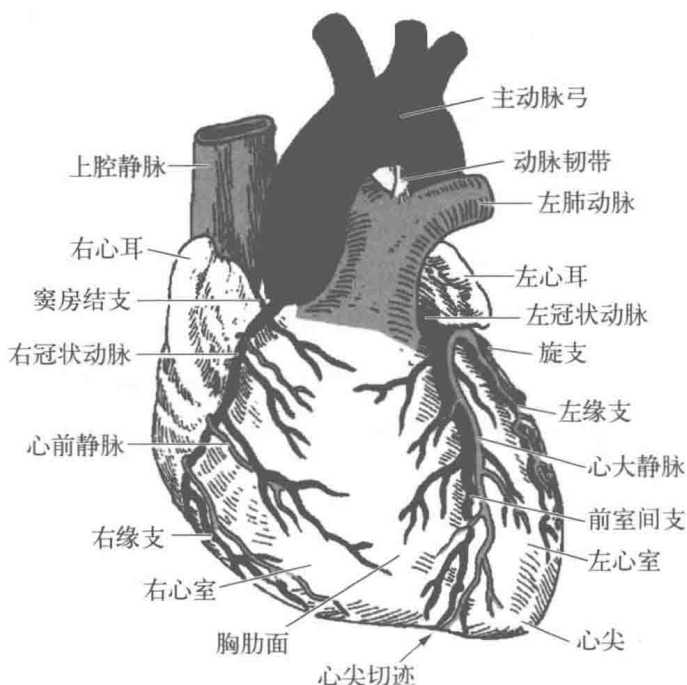
1.3.1 心脏的基本结构、体循环和肺循环

心血管系统(cardiovascular system)由心脏和血管组成。心脏(heart)是推动血液循环的动力器官,其主要功能是泵血功能。心脏通过不间断的收缩和舒张活动,把血液泵入动脉,实现泵血功能。

如图1-1所示,人体心脏共有4个腔:左心房、左心室、右心房和右心室。左、右心房间及左、右心室间均不相通。但左心房与左心室之间、右心房与右心室之间均借房室瓣相通,左心是二尖瓣,右心是三尖瓣。二尖瓣和三尖瓣的作用是使血液只能单向地从心房流入心室,而不能倒流。心房前方突出的部位称为心耳。整个心脏的形状像倒置的圆锥体,稍大于本人的拳头。

心脏传导系(cardiac conduction system)位于心壁内,能够产生兴奋并传导冲动,从而维持心脏收缩和舒张的正常节律。心脏传导系包括:窦房结、房室结、房室束及其分支。窦房结位于右心耳处,是心脏自动节律性兴奋的发源地,即心脏的正常起搏点。由窦房结发出的冲动传导到心房肌,使得心房收缩,同时将冲动也传到房室结和心室,由此形成的心脏节律称为“窦性心律”。

心房和心室不间断地进行有规律的、协调的收缩和舒张活动,是心脏实现

图 1-1 心脏的基本结构^[6]

泵血功能、推动血液循环的必要条件。心房或心室每收缩和舒张一次,称为一个“心动周期(cardiac cycle)”。心动周期的长短与心率有关。正常成年人的平均心率为 75 次/分,每一个心动周期平均为 0.8 s。其中,心房收缩期约为 0.1 s,心房舒张期约为 0.7 s;心室收缩期约为 0.3 s,心室舒张期约为 0.5 s。心房和心室各自按一定的时程和先后顺序交替地进行收缩和舒张,左右两侧心房和心室的活动几乎是同步的。

血液从左心室射出,射入主动脉及其分支到达全身毛细血管,与周围的组织、细胞进行物质和气体交换,再由静脉流回右心房,其中上半身的血液通过上腔静脉流回右心房、下半身的血液通过下腔静脉流回右心房,这一血液循环途径称为“体循环”,也称为“大循环”。由右心室射出的、带有二氧化碳的静脉血经肺动脉到肺泡周围的毛细血管网进行气体交换,变为带有氧气的动脉血,经肺静脉注入左心房,这一血液循环途径称为“肺循环”,也称为“小循环”。图 1-2 为血液循环示意图。体循环和肺循环是同时进行的。体循环的路径较长,以动脉血供给全身各处,而肺循环的路径较短,主要是将含二氧化碳丰富的静脉血变为含氧气丰富的动脉血。

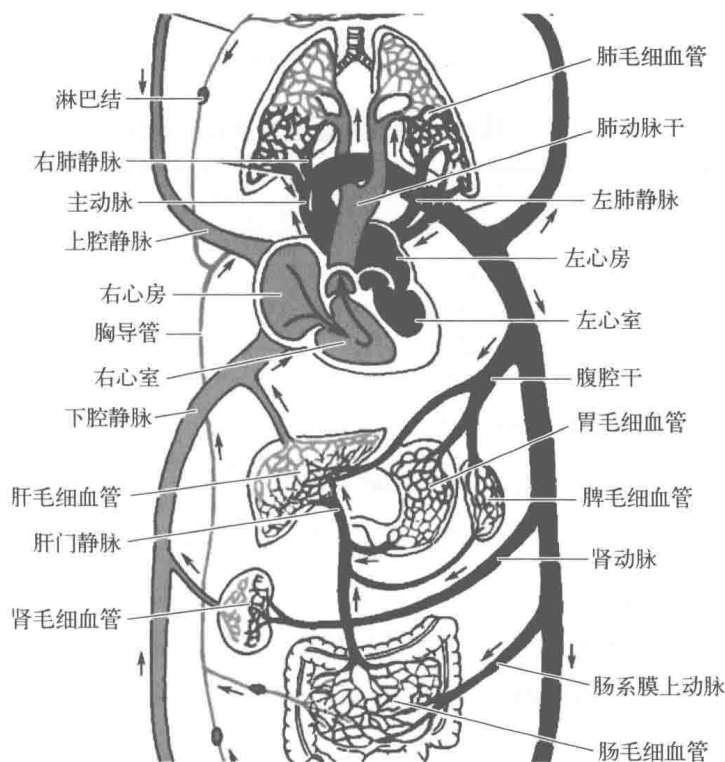


图 1-2 血液循环^[4]

1.3.2 血管生理

血管可分为动脉(artery)、静脉(vein)和毛细血管(capillary)。动脉运送血液离开心脏。由左心室发出的主动脉及其分支运送动脉血;由右心室发出的肺动脉及其分支运送静脉血。动脉在血液循环的行程中不断分支,越分越细,最后移行为毛细血管。毛细血管连接动脉和静脉末梢。毛细血管遍布全身各处,管内血流速度很慢,是血液与组织液进行物质交换的场所。静脉引导血液流回心脏。起源于毛细血管的小静脉逐步汇合成中静脉和大静脉,并注入心房。

就血流速度而言,主动脉中的血流速度最快,毛细血管中的血流速度最慢。表 1-1 列举了动脉、静脉和毛细血管之间的区别。小血管(小动脉和微动脉)是产生血流阻力的主要部位。一般认为,心血管系统的“中心”部分就是