

生物医学工程学原理

流体、热和质量传递过程引论

D. O. 库尼 著

科学出版社

内 容 简 介

生物医学工程学是一门新兴的边缘学科,它涉及的面很广,是工程学向生物医学领域渗透的产物。由于篇幅有限,本书作者 David O. Cooney 仅从流体动力学、热传递和质量传递三个方面做了一些基本性的介绍,以作为选修生物医学工程学的三、四年级大学生的参考性教材。作者力求用工程学的原理和方法,描述人体的某些生理和病理现象,试图将量的概念引用到生理学中。

本书在对生物医学历史作了简短的回顾后,即从量的方面对人体的特点进行一番概述,并较为详细地讨论了血液的物理、化学和流变学特性,以及循环系统的流体动力学。从热的产生及其在体内的传递和向体外的消散等方面论述了人体的热系统,介绍了可用于药理学研究的人体方格模型法。在质量传递方面,还讨论了通过细胞膜的传递,并着重分析了人体肾脏和肺的质量传递情况,相应地介绍了人工肾和人工心肺装置的设计原理及其数学模型。为便于加深理解,在各章末尾还附有适当的习题,包括了本书所举的各种主要的和实际应用的概念。

本书可作为生物医学工程专业师生的教学和学习参考书,也可供生物医学工程学方面的科研人员、医生参考。

David O. Cooney
BIOMEDICAL ENGINEERING PRINCIPLES
*An Introduction to Fluid, Heat, and
Mass Transport Processes*
Marcel Dekker, INC. 1976

生物医学工程学原理 流体、热和质量传递过程引论

D. O. 库尼 著

陈厚珩 杨国忠 译

责任编辑 王爱琳

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8月第一版 开本: 787×1092 1/32

1982年8月第一次印刷 印张: 11 3/4

印数: 0001—3,300 字数: 262,000

统一书号: 13031·1975

本社书号: 2681·13—10

定价: 1.85元

序

生物医学工程学仍然是一个比较新的、还没有明确定义的领域。实际上，是否真的成为一门有其独特原理和基础的“新”学科也不清楚。当然，在很大程度上，这完全是生命科学与工程学的混合。是否由于某种原因还不仅限于这些方面的结合，也还是一个有待时间作出回答的问题。新生科研领域，其明确范围和发展方向之获得，惯常是由于大学毕业生就业市场所起的反馈作用。在生物医学工程学方面，由于新毕业生所能获得职位的种类及数目不确定，目前这种需要变化非常大。在越来越关心健康保护和技术日益发展的社会中，毫无疑问，最终会强烈而不断地需要某些类型的生物医学工程师。

关于这方面的一个重要问题是，这类毕业生应当有什么样正规的学术上的训练。显然，包括生物学（特别是生理学和解剖学）、化学和物理学（特别是生物化学和生物物理学），以及基础工程学（特别强调流体动力学、热传递和质量传递）等基本课程的知识是合乎需要的。不很清楚的是，试图综合生命科学和工程学内容（通常叫做“生物医学工程学”课程）的更高级课程应该是什么性质。

本书作者根据以下实际情况的推论，以特殊的方式设计了这一门课程：（1）生物学和生理学向来只不过是汇集大量观察到的事实；（2）工程学包括一套通用的统一的原理和有关的工具；（3）十分需要在生命科学系统中应用工程学的原理和分析方式。

这本书确实可以叫做“定量生理学”教程，它着重使用工程师所最熟悉的一些原理，来描述人体中的传递过程。在应用这些原理描述某些生物医学系统(人工器官)中的传递过程时也考虑到一定的深度。本书内容可供许多生物医学工程师用作一个学期有相当水平的课程，因为这门学科还是在形成阶段，而且内容广泛和多样化，当然会有不少生物医学工程师觉得本书不适合他们的见解或需要。这就更足以说明为什么应当继续出版许多不同的课本，因为并无其他方法能满足生物医学工程学教学所需要的一整套有价值的材料。

本书内容具有概论的性质，主要是为三、四年级的生物医学工程学学生使用，虽然有许多部分也可以作为一年级研究生课程(如果补充一些其他更高级课本中的材料，如E. N. Lightfoot的《传递现象和活的系统》或S. Middleman的《心血管传递现象》)，各种水平的应用生理学者也会发现有些章节提供了一些有趣题目的导言性总论或评论。

凡与流体动力学、热传递和质量传递无直接关系的生物医学工程学的其他领域均未包括在本文中。因此省略了生物控制论和生物力学。电现象(如神经冲动传导)未加讨论，尽管这些确实常涉及质量传递过程。甚至本书原来打算收入的许多题目(例如毛细血管动力学)或一些细节，由于篇幅所限也未发表。因此本书确是一本入门书，如果需要深入了解，则应参考更详细的论著，此点应请读者注意。

本书在简略概述医学的历史发展后，开始从量的方面来基本上说明人体的特点，并详细讨论了血液的物理、化学和流动的性质。这些内容对以后各章都很有用。其次我们考虑人体的液体流动、热传递和质量传递过程的模型(总体的或“分隔”的模型)。重点全部放在工程学原理(例如Bernoulli方程)、相关法(例如用无量纲组合)，和教学模型上。在此之后，

更详细地讨论一般通过生物膜的质量传递，然后特别提出肾和肺。在这几章中，对基本扩散现象进行定量的和模型的研究。最后介绍生物医学工程学的两项主要发明，即人工肾和血氧合器。广泛地探讨了这些装置中质量传递的数学模型。这些比较粗糙的系统，与天然器官大不相同，但它们实际起到的良好作用，真令人惊讶赞叹。

在各章末都有适当数量的习题。这些习题包括了课本中所举的各种重要的和实际应用的概念和方法。总的说来，这些问题的解答不太困难。

David O. 库尼
纽 约

目 录

序.....	ix
第一章 生物医学的历史——一个简单的回顾.....	1
I 十六世纪.....	1
II 十七世纪.....	2
III 十八世纪.....	3
IV 十九世纪.....	4
V 二十世纪.....	5
参考文献.....	6
第二章 人体概述.....	7
I 解剖学(梗概).....	7
A 骨骼系统.....	7
B 动脉和静脉系统.....	9
C 内脏.....	11
II “标准人”.....	19
III 身体的组成.....	21
IV 人体总的质量平衡.....	24
A 水.....	24
B 气体.....	26
C 固体.....	26
V 人的生理变量的相互关系.....	27
习题.....	29
讨论问题.....	30
参考文献.....	30

参考书目	30
第三章 血液的物理、化学和流变学特性	32
I 物理特性	32
II 化学特性	35
III 血液的流变学特性	37
A 粘度的定义和测量	38
B 切变率的作用	40
C 红细胞压积的作用	41
D 温度的影响	42
E 血液蛋白质含量的影响	43
F 血液的屈服应力	44
G Casson 方程	46
H 血液流经管路时管直径的影响	47
I 无细胞边缘层模型	48
J Sigma 效应	50
K 阻滞效应	54
L 屈服应力对血流的影响	54
IV 有关体外血流的问题	55
习题	56
参考文献	57
第四章 循环系统动力学	59
I 一般结构、容积和流率	59
II 毛细血管血流	62
III 循环中的切变率	63
IV 循环系统的压力分布图	64
V 循环中的压力和动能的变换	68
A 狭窄动脉中的动能效应	70
B 动脉瘤的压力升高	70
VI 机械能的平衡	71

A	心脏的功率	71
B	循环中的摩擦损耗	73
C	循环的流体静力学	73
习题	.....	75
参考文献	.....	77
第五章	人体的热系统	78
I	热的产生	78
II	消化的生物化学简述	82
III	向周围环境的散热	86
A	身体的辐射热损失	87
B	身体的对流热损失	89
C	身体的蒸发热损失	94
D	由水通过皮肤扩散造成的热损失	94
E	由汗分泌造成的热损失	95
F	与呼吸有关的热损失	97
G	直接向物体的传导	99
H	通过衣服的热传导	100
I	身体表面总的热损失	101
IV	积极和消极的功	102
V	体内的热传递	103
A	血液循环在内部热传递中的作用	104
B	核心与皮肤之间传热的简单模型	106
C	核心与皮肤之间传热的更为详细的模型	108
D	人臂径向温度分布的 Pennes 模型	112
E	肢体轴向温度分布的模型	116
F	Wissler 的人整体模型	120
习题	.....	123
参考文献	.....	126
参考书目	.....	128

第六章	用方格、源和流建立人体模型	129
I	工艺流程图模型	129
II	药物动力学模型的基本方式	132
III	药物动力学模型举例.....	134
IV	大型多格系统模型	139
V	固体形药物的溶解	144
VI	体液及组织方格的分布及可达性	145
VII	生物系统中零级和一级化学动力特性的基础 ..	147
VIII	简单方格系统中浓度-时间特性	149
A	单格开式模型	149
B	用单格模型分析数据: $k_1 > k_2$ 例证	150
C	对于持续释放的药物应用单格模型	153
D	静脉内注射的特殊情形	156
E	静脉内连续输注的特殊情形	156
F	双格开式模型	157
G	静脉内注射例证	159
H	关于单格与双格模型的评论	167
IX	血液-组织模型(局部模型).....	167
A	假定平衡的双格局部模型	167
B	假定一种有限质量传递阻抗的双格局部模型	169
C	假定血液-组织平衡的平行方格模型	170
D	通用的双格局部模型	176
E	向大的组织区域的稳态传递	178
F	到有限组织区域的非稳态传递	178
G	假定平衡和轴向扩散的模型	179
X	用指示剂测定区域血容积和血流率.....	181
	习题	183
	参考文献	185
	参考书目	187

第七章 通过细胞膜的运输	188
I 膜结构、组成及渗透性	189
II 溶剂穿过膜的运动：渗透作用	196
A 渗透力及张力	198
B 渗透流量的定量表示	199
C 溶质活性的修正	200
D 红细胞的渗透性皱缩及破裂	202
III 非电解质的被动扩散	203
IV 电解质的被动扩散	204
A 零净流例	205
B 普通 Nernst 方程求导	206
C 神经细胞中的休止膜电位	207
D Gibbs-Donnan 平衡	207
V 压力扩散	209
VI 简便输送	209
VII 血红蛋白溶液中氧的简便扩散	211
VIII 主动运输	214
IX 胞饮作用	216
习题	217
参考文献	218
第八章 人体肾	219
I 结构及一般工作特点	219
II 肾小管中的运输机理	224
III 肾小球簇微孔模型	230
IV 大鼠的肾小球过滤模型	231
V 尿形成的对流机理	234
VI 肾单位功能的模型	237
VII 亨勒氏祥的分析模型	238

习题	241
参考文献	243
参考书目	243
第九章 人工肾装置	244
I 人工清除废物的基本方法	244
II 血液透析	247
A 平板型透析器	248
B 盘管型透析器	249
C 空心纤维装置	254
III 透析器中质量传递的分析	256
A 总质量传递率的表达式	257
B 透析率、清除率和提取比的表达式	259
C 实验性质量传递阻抗值	262
IV 建立病人与人工肾系统的模型	268
A 预计治疗需要的时间	269
B Babb双方格模型	270
习题	272
参考文献	273
参考书目	274
第十章 人体肺	275
I 呼吸系统的结构和可见的运转特点	275
II 肺的简单质量平衡	281
III 肺部气体运输机制	283
IV 血液中的氧运输	287
V 血中二氧化碳的运输	291
VI 氧和二氧化碳从组织传递	293
VII 呼吸系统的质量传递阻抗	294
VIII θV_c 的测定	298

IX	红细胞摄取氧的理论模型	300
X	D_L 的测定	308
XI	D'_M 的测定	309
XII	用屏息法测定一氧化碳的 D_L	311
XIII	制作肺毛细血管摄取氧的模型	313
XIV	肺毛细血管摄取的惰性气体	316
	习题	317
	讨论题	319
	参考文献	319
	参考书目	320
第十一章	人工心肺装置	321
I	用病人的肺作气体交换	322
II	理想的心肺装置	323
III	天然肺和人工肺的比较	324
IV	氧合器的基本类型	325
	A 鼓泡式氧合器	327
	B 薄层式氧合器	328
	C 膜式氧合器	330
	D 氧合器的比较	331
V	温度的保持	332
VI	人工肺需要的气流率	333
VII	膜式氧合器需要的面积	334
VIII	血氧合的理论模型	337
	A 血液-气体反应的前进边界理论	337
	B 前进边界的更精确的处理	339
	C 可逆反应的理论	341
	D 血红蛋白的扩散	343
IX	膜式氧合器中气体输送的分析	344

X 管中氧合作用的前进边界分析	351
习题	353
参考文献	354
参考书目	355
附录	356
习题答案	358

第一章 生物医学的历史—— 一个简单的回顾

现代的学生应当知道，“非生物学”的科学和工程学的原理应用于生理学和医学领域并不是什么新的现象。虽然生物医学工程目前正在大大地流行，但其根源仍可追溯到许多世纪以前。这里，我们想简单地回顾一下医学的历史，着重说明工程师、化学家和物理学家们所做的贡献。

I 十六世纪

十六世纪，这个近代医学的黎明时期，我们首先从 Leonardo da Vinci(1452—1518)谈起。在较早的中古时代和更为遥远的过去，医学的发展非常缓慢，并且以 Galen (公元 130—200年) 的理论的影响占据着主导地位。他认为，所有有生命物质的活性与三种类型的精神有关：天然的、有活力的以及动物的（分别产生于肝、心和脑）。Da Vinci 是一位艺术家、工程师和科学家。他主要创立了解剖学这门科学，并且十分详细地研究了骨和肌肉的活动原理。后来，Vesalius (1514—1564) 于 1543 年创作了一部论述人体解剖学的伟大论著，从而有力地激发了医学中新的科学活动，改变了外科的实践。

在文艺复兴精神的激励下，自然科学活动的兴起开始对医学产生了影响。Sanctorius (1561—1636) 将新的测量技术应用于人体，并且通过仔细称量身体的输入和输出，可以表明

有“感觉不到的排汗现象”发生。这就为研究代谢奠定了基础。Sanctorius 还曾研制了一个粗糙的发热体温计和一种测定脉率的简陋装置。

生理学这门科学也是在这同一时期开始开花成长的。伟大的英国生理学家 William Harvey(1578—1657)发现,在循环系统中,血液是由于心肌收缩而被抽取的,并指出血液在动脉和静脉中的流动方向也有所不同。法国的哲学科学家 René Descartes (1596—1650)写出了第一部真正的生理学书籍“关于人”(De homine)。尽管在许多方面有错误(例如,他否定了 Harvey 的实验,并主张心脏是通过热膨胀来推动血液的),但该书正确地强调了神经系统的重要性及其在协调身体活动中的作用。

I 十七世纪

十七世纪时,出现了有关人体是如何工作的新理论。三个重要的理论是,“医学物理”、“医学化学”和“生机论”。意大利的Borelli(1608—1679)提出了在机械学基础上解释动物活动的第一种观点。其他像荷兰的Sylvius (1614—1672),试图在严格的化学基础上阐明身体的活动(医学化学)。在Sylvius 的实验室中,获得了许多有关各种体液(如唾液、消化液)的化学特性的知识。Stahl(1660—1734),一位德国人,与此不同,他认为身体不是机器,也不是受物理学或化学定律支配的,而是受一种“敏感的灵魂”所驱使,在此,化学过程只不过是些手段而已,这种观点叫做“生机论”。

Ⅱ 十八世纪

在伟大的十七世纪以后，在化学和物理学的进展以及显微镜研制成功的激励下，涌现出大量的知识，研究工作似乎暂时告一段落而进入巩固阶段。新的重点放到了教学上。Boerhaave (1668—1738) 通过将医学教学引入可以直接观察病人的临床医院，从而使医学教育发生了革命性的转变。Albrecht von Haller (1708—1777)，Boerhaave 的学生，作为一名生理学家，也成为十八世纪的伟大人物。在呼吸、骨的形成、胚胎学以及消化方面的工作，显示出他的始终一贯的逻辑性和合理性。Hales (1677—1761)，英国的生理学家，通过将导管接到动物的动、静脉内，从不同点测其压力来研究循环系统的动力学。Hales 还测量了循环次数和速度。

十八世纪使有关消化过程生理知识取得进展的其他杰出人物是 Réaumer (1683—1757)、Spallanzani (1729—1799) 和 Prout (1785—1850)。对体内电现象进行研究的人有 Galvani (1737—1798) 和 Volta (1745—1827)。譬如，此二人曾指出应用外界电流可使肌肉收缩。十八世纪的后半叶，Black (1728—1799)、Priestley (1733—1804) 和 Lavoisier (1743—1794) 使得呼吸生理学取得重要进展。这些科学家们指明了植物和动物是如何消耗与产生二氧化碳和氧的。

在整个这一时代，临床医学受助于第一台良好的“脉搏表”、第一个安全可靠的温度计的研制，也得到了 Laënnec 于 1819 年发明的听诊器（最初仅是一个纸卷）的助益。十八世纪，由于土木工程的进步，城市的公共卫生条件也大有改善，诸如覆盖了污水暗沟系统，对开阔的湿地也进行了排水除湿。大约就在这同一时期，还出现了一场建立许多改进的医院的

强大运动。1796年 Jenner(1749—1823)采用了疫苗接种。

IV 十九世纪

这个时期的标志是,在法国人 Claude Bernard 和几位德国人(Müller、von Liebig 以及 Ludwig)的引导下,在生理学方面取得的巨大进展。对脑和整个神经系统有了新的认识。1840年左右,建立了生命物质根本的细胞性质的思想。Albrecht von Kölliker(1817—1905)使研究组织的组织学提高到一个独立的科学水平。

法国生理学家 Poiseuille (1799—1869)对血液流体动力学进行了广泛的研究,并且是第一个得出层流定律的人。这个定律就是以他的名字命名的。他也是第一个研究血液粘度特性的人。另一位生活在这一整个时期,并且同样推导出一项物理学基本定律的著名的生理学家是德国的 Adolf Fick (1829—1901)。他是液体扩散定律的发现者。

疾病可由特殊病菌引起的这一概念乃是十九世纪时的一大飞跃。Pasteur(1822—1895)及其他人指出,某些疾病是由微生物引起的,这些病不会自发产生,而只能从一种同样种类的微生物所引起。Koch (1843—1910)是第一个发展细菌用的固体培养基的人。不久就分离出产生疾病(例如麻疯和结核病)的特殊的生物。于是,细菌学成为一门独立的新的科学。为了产生对各种疾病的免疫性,发展和应用了为获得接种用的弱病毒的方法(1888年抗伤寒、1894年抗白喉)。

这个时期医学进展中另外的重要一步是,1846年全身麻醉(乙醚和氯仿)的发现。对抗菌剂(杀菌剂)和麻醉剂的新的了解,使外科学有了一个全新的立足点。此外,1895年伦琴发现X射线和1898年居里夫妇发现镭,使诊断和治疗有了