

● 高等学校教材

生理功能的 工程分析

● 黄治焯 郑筱祥 主编

SHENGLI GONGNENG DE
GONGCHENG FENXI



高等教育出版社

高等学校教材

生理功能的工程分析

黄诒焯 郑筱祥 主编
黄诒焯 郑筱祥 雷 蕾 编

2/40112



A0033009

高等教育出版社

1993

(京)112号

内 容 提 要

本书由国家教育委员会高等学校工科生物医学工程与仪器专业教材委员会组织、审定,同意作为高等学校生物医学工程与仪器专业的教材出版。全书包括两部分内容:对生理分系统具有普遍意义的基础内容,以及生理分系统的一些具体问题。运用物理学和工程技术的原理和方法来认识和分析生理功能,着重于模型建立和模拟在理解生理功能中的意义。本书内容可作为生理学基础与生物医学工程专业课程之间的桥梁。

本书也可作为医学有关专业的选修课教学用书,还可作为基础医学研究工作者、医学仪器设计人员及有关专业人员的自学参考书。

责任编辑 姚玉洁
刘阜民

高等学校教材

生理功能的工程分析

黄治焯 郑筱祥 主编

黄治焯 郑筱祥 雷 雷 编

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

河北新华印刷一厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张16.125 字数 410 000

1993年11月第1版 1993年11月第1次印刷

印数 1—1 759

ISBN 7-04-004350-5/Q·208

定价 6.15 元

引 言

国家教育委员会高等学校工科生物医学工程与仪器专业教材委员会于1985年成立后,多次对生物医学工程这样一门新兴的边缘学科的教材建设进行过研究,从本专业的培养目标出发,确定了“生物医学电子学”、“医学仪器”、“生物医学信号处理”、“医学图像处理”、“医学仪器中的微计算机系统”、“计算机软件基础及体系结构”、“定量生理学(现更名为“生理功能的工程分析”)”、“生理学(工科院校用)”等8门课程为第一期教材建设项目,并制定了这些课程的基本要求。

国外有的工科大学所办的生物医学工程专业,由于不是与医学院或理学院合办,需要自己开设有关生物学、生理学等课程,以及开设专业课与这些课程的桥梁课程。为此,有开设名为“定量生理学”或“生命系统的工程分析”、“生命系统的工程模拟”等的课程。这些课程一般包括细胞生物学、人体生理学、神经生物学三大方面的内容,各部分内容大体包括生理的物理和化学基础、生理过程的调节、整合以及生理系统分析中数学模型的应用。强调“定量”或“工程分析和模拟”,并非说近代生理学不讲究定量,实际上19世纪以来生理学研究的特点就是重视实验、定量和模型建立。而上述课程中加重“定量”概念是强调模型建立和模拟(仿真)在生理学研究中的重要性。另一方面,也与60年代受控制论的影响,将物理、工程技术、数学和计算机技术应用用于生命科学的热潮有关。

生物医学工程学是一门工程技术与生命科学相结合、高度综合性的学科。它运用自然科学和工程技术的原理和方法,从工程角度研究人体的生理、病理过程,并从工程角度解决防病治病问题。它把人体各层次的生命过程看作是一个系统的状态变化的过程,把工程学的理论和方法与生物学、医学的理论和方法有机地

结合起来去研究这类系统变化的规律，并在此基础上，应用各种工程技术手段，建立适宜的方法和装置，以最有效的途径，人为地控制这种变化，以达到预期的目的。它既不同于生物医学，也不纯属一门工程学科，而且它涉及到其他工程学科的面也是十分广泛的。因此不同学校开设的生物医学工程专业，在专业内容方面都是有所侧重的，如侧重于人工器官、人工材料或医学仪器，即使侧重在医学仪器方面也还有更具体的重点内容。但不论其侧重点的内容是什么，都会开设生物医学工程学导论课程，使学生对这一门内容广泛的新兴边缘学科有一全面了解，再开设与侧重点内容有关的专业课程。而学习这些课程时还应开设在生理学基础（或医学基础）与专业课程之间的桥梁课程——生理功能的工程分析。这正是本教材的目的以及将暂名为“定量生理学”的课程定名为“生理功能的工程分析”的原因。

本书包括两部分内容。第一部分为对生理分系统具有一定普遍意义的基础内容，内容有：生物热力学、质量输运过程、神经的兴奋传导和生物组织功能及力学特性。第二部分为生理分系统的一些具体问题，内容有：血液循环动力学、心电、呼吸力学、肾的质量输运、中枢神经系统的信息处理、视听器官的信号接收与信息传递、肌肉运动的控制等。内容的叙述上注意到对生理功能的认识开始于模型（文字、物理、数学），模型一经建立也就面临着被否定或提高的前途，只有如此才能逐步提高认识。

本书是供高年级学生和研究生兼用的教材，所需教学时间为54~90学时，教材中大多数内容是相对独立的，各校可根据具体情况选用并对内容进行增删。

本书是以《医学物理学（生理过程的物理基础）》及《定量生理学》两教材为基础，吸取评阅人和教材委员会讨论的意见整理编写的。前者曾作为西安交通大学、西安医科大学、清华大学、医科院等院校生物医学工程专业和医学有关专业研究生的教材，后者浙江大学多年作为生物医学工程和仪器专业的教材。合编后

的新教材两年来又曾在清华大学、西安交通大学、西安医科大学等校使用。本书的绪论和第一、二、七章由黄诒焯编写，第三、四、八、九、十、十一章由郑筱祥编写，第五、六章由雷蕾编写。

担任本书主审的首都医学院刘曾复教授对本书的指导思想、编写原则提出了宝贵的意见。东南大学欧阳义同老师和首都医学院欧阳楷老师审阅了全稿，提出许多具体的修改意见。浙江大学、上海交通大学、西安交通大学、清华大学、复旦大学、天津大学、东南大学、上海第二医科大学、西安医科大学等校的有关同志参加了本书的审稿会议，以及余钰、王琳等同志对本书提出了许多有益的意见。编者对上述为本教材作出贡献的同志表示深切的谢意。

由于本课程涉及的内容仍在不断发展中，本课程内容的选材目前尚难有统一的看法，编者的水平又有限，因此本书必然还存在不少缺点和错误。请广大读者，尤其是使用本书的教师和学生，批评指正。

编 者

1992.12

目 录

绪论	(1)
第一章 生物热力学	(5)
1-1 前言	(5)
1-2 热力学第一定律	(7)
1-3 基础代谢	(8)
1-4 热力学第二定律——熵	(14)
一、热力学可逆性	(14)
二、熵	(15)
三、熵的统计意义	(17)
四、混合熵	(21)
1-5 自由能最小原理	(23)
一、等温和等容系统——Helmholtz自由能	(23)
二、等压和等温系统——Gibbs 自由能	(25)
三、焓	(27)
1-6 稀溶液的 Gibbs 自由能	(31)
1-7 肌红蛋白和血红蛋白的氧饱和度曲线	(33)
一、肌红蛋白和血红蛋白的功能	(33)
二、肌红蛋白的氧饱和度曲线	(36)
三、血红蛋白的氧饱和度曲线	(39)
1-8 开放系统中的热力学过程	(40)
参考书及文献	(43)
第二章 质量输运过程	(44)
2-1 质量输运的一般概念	(45)
一、流量强度和流量密度	(45)
二、连续性方程	(45)
2-2 分子的随机运动	(47)
2-3 扩散	(50)
一、Fick 扩散定律	(50)

二、均方位移和扩散系数的关系	(53)
三、扩散的暂态过程	(56)
四、在浓度梯度和外力作用下溶质粒子的流动	(61)
2-4 存在浓度差或压强差时通过多孔薄膜的流动和扩散	(64)
一、在压强梯度的影响下通过多孔薄膜的体积流量密度和水渗透率	(65)
二、由浓度梯度引起的通过多孔薄膜的溶质流量密度和薄膜渗透率	(66)
三、溶质流量密度和体积流量密度与薄膜两侧的浓度差和压强差之 间的关系简介及反射系数	(67)
四、薄膜两侧浓度差的均衡时间	(70)
2-5 在压强差和浓度梯度同时存在的条件下溶质和溶剂通 过薄膜的流动——渗透	(72)
一、渗透现象	(73)
二、渗透压的物理来由	(74)
三、渗透压的计算	(78)
四、在液体静压强差和渗透压强差同时作用下溶质和溶剂通过薄膜 的耦合流动——薄膜的三个参量	(80)
五、水和溶质通过生物膜的输运	(84)
(一) 红细胞的渗透率和滤清系数	(84)
(二) 毛细血管壁的渗透率和滤清系数	(86)
2-6 带电粒子的扩散	(90)
一、在浓度梯度和电场力作用下离子的流动	(90)
二、扩散电位	(91)
三、Donnan 平衡	(94)
2-7 溶质的载体输运	(99)
2-8 主动输运	(101)
参考书及文献	(103)
第三章 神经的兴奋传导	(104)
3-1 细胞的静息电位	(104)
3-2 中心导体模型和电缆方程	(110)
3-3 动作电位的产生和传导——Hodgkin-Huxley(H-H) 模型	(127)

3-4 有髓神经纤维中的兴奋与传导	(147)
参考书及文献	(154)
第四章 生物组织功能及力学特性	(155)
4-1 生物组织的基本成分及力学特性	(155)
一、一般材料的应力-应变特性	(156)
二、生物组织的力学特性	(162)
三、生物组织的热力学分析	(166)
4-2 软组织的力学特性	(169)
一、软组织材料的特性	(169)
二、血管的力学性质	(175)
4-3 肌肉的力学特性	(181)
一、骨骼肌的结构和收缩原理	(181)
二、心肌的力学分析	(187)
三、平滑肌的力学特性	(189)
4-4 骨与软骨的力学特性	(192)
一、骨的力学性质与功能适应性	(192)
二、关节软骨的力学性质	(199)
参考书及文献	(202)
第五章 血液循环动力学	(203)
5-1 循环系统的解剖与生理特点	(203)
5-2 液体流动的基本规律	(206)
一、液体的稳定流动——连续性方程	(206)
二、Bernoulli 方程	(207)
三、牛顿液体的流动	(209)
四、Poiseuille 公式	(211)
五、湍流、Reynolds 数	(213)
5-3 血液的粘度	(214)
5-4 血液在大动脉中的流动	(218)
5-5 微循环	(222)
一、近壁血浆层的出现	(223)
二、Fåhræus 效应	(223)

三、Fanraeus-Lindquist效应	(224)
四、Fanraeus-Lindquist效应的逆转	(224)
5-6 血管的弹性	(225)
5-7 Frank 弹性气室模型	(232)
5-8 脉搏波的形成和传播	(235)
5-9 心脏的功	(238)
参考书及文献	(242)
第六章 心电	(243)
6-1 心肌细胞的兴奋及兴奋的传导	(243)
一、心肌细胞的静息膜电位	(243)
二、Goldman 电位	(244)
三、心肌细胞的动作电位	(247)
(一) 普通心肌细胞	(248)
(二) 自律细胞	(249)
四、兴奋在心肌细胞中的传导	(250)
6-2 偶电层的电位分布	(251)
6-3 心脏的电兴奋	(254)
一、心肌电兴奋特点	(255)
二、心电图向量环	(257)
6-4 心电图	(260)
一、常规心电图导联	(261)
(一) 肢体导联	(261)
(二) 胸前导联	(263)
二、心电图波形	(264)
三、导联向量和导联的校正	(266)
6-5 心电场	(271)
一、体表电位图	(271)
二、心电的理论研究	(273)
(一) 心电场方程	(274)
(二) 心电场定义域模型	(276)
(三) 心电逆问题	(278)

6-6 心脏电起搏	(282)
一、脉冲电流对心肌的刺激	(283)
(一) 以实验为基础的刺激定律	(283)
(二) 刺激定律的理论推导	(286)
(三) 球形电极在心肌中的电场分布	(288)
二、人工心脏电起搏	(292)
参考书及文献	(293)
第七章 呼吸力学	(295)
7-1 肺通气	(295)
一、几个有关的生理学概念	(297)
二、肺通气的动力源	(299)
三、肺泡换气	(301)
7-2 表面张力 表面活性物质 拉普拉斯公式	(305)
7-3 肺的弹性特征	(309)
7-4 肺通气的物理模式	(312)
7-5 呼吸功	(316)
7-6 呼吸气体的交换	(320)
一、肺泡的结构特点	(320)
二、呼吸膜上的气体交换	(321)
三、影响气体交换的因素	(322)
7-7 人工呼吸机	(323)
参考书及文献	(327)
第八章 肾的质量输运	(329)
8-1 肾的组成部分	(329)
8-2 肾的总质量平衡	(331)
8-3 肾小管中水和溶质输运的基本关系	(333)
8-4 肾小球滤过	(336)
8-5 近曲小管的重吸收	(343)
8-6 逆流倍增系统的原理	(345)
8-7 肾对酸碱平衡的调节	(349)
8-8 人工肾的透析	(362)

参考书及文献	(368)
第九章 中枢神经系统的信息处理	(370)
9-1 突触分类及其传递特性	(371)
一、电传递突触	(373)
二、化学传递突触	(377)
9-2 神经元与神经网络	(394)
9-3 中枢神经系统的信息处理与控制	(402)
参考书及文献	(408)
第十章 视听器官的信号接收与信息传递	(409)
10-1 神经元的功能及其模型	(410)
一、不计时间特性的模型	(410)
二、计时间特性的模型	(413)
10-2 视网膜的信息处理	(415)
一、侧抑制和对比度的检测	(416)
二、色觉的信息处理	(429)
10-3 大脑视区的信息处理	(431)
一、视区神经元的感受野	(431)
二、特征提取机制模型	(436)
10-4 听觉神经系统中的信息处理	(442)
一、基底膜的液体力学	(445)
二、听觉神经系统中的信息处理	(451)
参考书及文献	(456)
第十一章 肌肉的收缩力学与肌肉运动的控制	(457)
11-1 肌肉收缩的力学	(459)
一、收缩单元的集总参数模型	(460)
二、横桥力学模型	(462)
11-2 肌梭的作用及骨骼肌伺服控制系统	(466)
11-3 前庭器官对姿势和运动的作用	(475)
一、前庭器官的结构	(475)
二、前庭器官的感受性毛细胞	(477)
三、椭圆囊和球囊	(480)

四、半规管的扭转摆动模型	(483)
11-4 肢体运动及其控制	(485)
11-5 眼球的运动控制	(491)
一、视觉固定系统的空间结构	(492)
二、眼球运动的一般形式	(494)
参考书及文献	(499)

绪 论

随着人类对生命现象认识的逐步深入,生命科学已经从宏观形态的研究进入到微观机制的探讨,从细胞水平进入到分子水平,从定性的描述进入到定量的分析。现代医学特征的重要方面,是运用自然科学和工程技术的原理和方法,从工程角度了解人的生理、病理过程,并从工程角度解决防病治病问题。

人体是个十分复杂的系统。对于人脑的结构和功能,即使是目前最大的超级电子计算机也无法比拟。甚至对于像单个红细胞这样一个小系统,也不可能仅从物理、化学和物质性质或行为来充分解释。而具有2 000种左右代谢反应的一个红细胞,比正在繁殖、分裂的细胞或具有排泄或收缩功能的细胞,还要简单得多。

目前人们已充分掌握细胞生物学、生物化学和生理学的基础知识,因而可对这些知识实际综合运用。然而,为了更好地综合这些知识,进一步了解细胞、组织、器官和整个人体的构造和功能,了解人体和其他生物系统,研究人-机-环境的相互关系,并将结果变为有效的治疗方法和保健手段,还需要更多的信息,特别是需要更多的有关组织成分及其相互关系的数据,有关组织、细胞、亚显微结构物理、生物和化学方面的数据及有关调节、输运和通信机制(激素、感受器及神经刺激)的数据。

以定量表示的方式进行信息综合,可通过系统的物理模型和数学模型来检验其总体效果。建立模型的任何假设都需要用观察结果加以论证。

模拟是人们研究自然界的一种方法,这种方法不是直接研究某个现象或过程本身,而是先设计一个物理模型或数学模型,然后通过模型来间接地研究这个现象或过程,这种研究自然界的方法叫做模拟方法,简称模拟。19世纪著名的物理学家 Kelvin(开

尔文)曾说过:“我永远不满足自己,直到我能对一事物作出它的物理模型为止,如果我能作出它的数学模型,我就能通晓它了”。

有些模型涉及物理现象,但它可能与研究的事物完全无关。物理模型可以模拟原来实体的某些功能和性质,或者模拟其中之一。例如,用电流代表血液流动的模型常用于研究人体的循环系统;用电压 U 和电流 I 来研究血压 p 和血液流量 $\dot{Q}$ 的关系,这种电流模型可很好地模拟心血管系统的很多现象。

随着科学技术的发展,人们所研究的对象越来越复杂,利用物理模型会遇到很多困难,因此又发展了数学模型。数学模型是指在数量特性方面的模型,它不求与客观实体的几何结构或物理结构类似,但求较好地刻划其内在的数量联系,以期当人们探索客观实体的数量规律时,能以数学模型取代之。例如,一个 RLC 电路和一个弹簧力作用下作阻尼振动的重物,尽管它们是不同性质的现象,都可用一个二阶常系数线性微分方程来描述,这个方程就是它们的数学模型。数学模型是真实系统的高度抽象,它是以数学的语言形式描述系统的行为和功能。

对于研究人体循环系统的电流模型,如果我们找到了血压 p 和血液流量 $\dot{Q}$ 之间的数学表达式,那么就可以用解方程的方法研究血压和血液流量的关系,这叫做数学模拟。例如,主动脉压 p_A 与血液流量 $\dot{Q}$ 和血管外周阻力 R 呈 $p_A = \dot{Q}R$ 的关系,这与 Ohm (欧姆)定律类似,它可算是最简单的数学模型。

当我们用一个适宜的数学模型来刻划客观实体各参数间内在的联系时,方程式中的某些参数反映了客观实体的某些状态,如果令这些参数的数量有所改变,相应地可以计算出其他参数数量的大小,这就相当于改变客观实体的局部去观察整体的行为。模型和模拟是紧密联系的两个概念,无论是物理模型还是数学模型的建立都不是一次成功的,都要经过模型—模拟—模型的反复过程,直至模拟的结果与实物上的实验结果相符合。

不论是数学模型还是物理模型,都不是实物的简单放大和缩

小，都是在忽略了一些次要因素（对实验者要研究的问题而言）的条件下，通过实验或理论分析提出描述该系统主要变量之间的关系之后建立起来的。换句话说，模型不是实物的复制而是实物的简化，这种简化对于研究工作是必要的，因为它可以使研究者的注意力集中到更关心的问题上去。正因为如此，任何一个模型都附有一定的应用条件，使用时需要特别注意。如血液由血细胞和血浆组成，血细胞在血液中所占的百分比（血细胞的比容或压积值），随着血液流向肢端时而有所变化，这个现象用电流模型就无法模拟。

模型的方法或者模拟的方法已成为生命科学和医学的重要研究手段，由于人体生理和病理现象的极端复杂性，现代医学研究借助于工程技术常对某一现象建立一个虽可能和它在物理、化学本质上很不相同，但在行为和功能上表现出某种相似性的模型。这样，就可通过对模型的分析来研究并逐步掌握该现象的规律，从而使问题得以简化并易于解决。此外，由于人体组织各个不同层次的内在机制的复杂性，很可能有许多我们暂时还不清楚的地方，对此可以相应地在模型中导入各种假设，而把根据这些模型从理论上所作的推论与实验结果进行比较，从而有助于进一步理解其内在机制。

生理过程，特别是用模型表示的生理过程，在生物医学工程领域的潜在应用十分宽广。关于力、压强、应变等力学因素和动能、势能、熵或温度对生理功能的影响的研究成果，大大地推动了生物医学工程在医学应用上的进展。例如，了解流体作用力与动脉壁内皮细胞间的相互作用，对于解决动脉粥样硬化有重要作用。

本课程与近几年国内外有的“生命系统的工程分析和模拟”、“定量生理学”、“医学物理学”等课程，名称不一，内容各有侧重，但亦有其共同点。它们都可作为生物医学工程专业课和医学或生理学之间的一门桥梁课程，是一门理工科知识与生理学知识互相

渗透和交叉的边缘学科。本书主要是从定量的、综合的角度来研究和分析生理系统中活体的特性和控制调节过程及其动态特性和物理机理，其中以研究功能模型为目标。然而生命现象是自然现象中属于复杂、高级的物质运动形态，数学、物理、化学、控制论等虽然是理解人体生理功能的基础，但还不能完全说明生理现象，可是应用这些理工知识从量的方面来分析理解生理功能的特点是有意义的。另外，还应指出，由于人体生理过程的复杂性，许多问题还不能达到完全定量化，离建立较完善的物理模型或数学模型还有很大的距离。书中介绍的内容只是提供一些分析的思路。