

medical
imaging
systems

医学成像系统

[美] A·马科夫斯基 著
曹其智 龙伟丽 译
秦克诚 审校

浙江大學出版社

ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

医学成像系统

Medical Imaging Systems

[美]A·马科夫斯基 著
曹其智 龙伟丽 译
秦克诚 审校

浙江大学出版社

中文版版权归浙江大学出版社独家所有。
浙江省版权局著作权合同登记号:图字:11-2002-58

Published by Zhejiang University Press, Hangzhou
Chinese simplified characters copyright © 2002 by Zhejiang
University Press
Medical Imaging Systems
Albert Macovski
©1983 by Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, N. J. 07632

图书在版编目(CIP)数据

医学成像系统/(美)马科夫斯基著;曹其智,龙伟
丽译. —杭州:浙江大学出版社,2001.6
ISBN 7-308-03009-1

I. 医... II. ①马... ②曹... ③龙... III. 影像诊
断—成像系统 N. R445

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 032965 号

出版发行 浙江大学出版社
(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)
(E-mail:zupress@mail. hz. zj. cn)
(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑 严少洁
排 版 浙江大学出版社电脑排版中心
印 刷 浙江新华印刷集团
开 本 850mm×1168mm 1/32
印 张 9.25
字 数 232千字
版 印 次 2002年7月第1版 2002年7月第1次印刷
印 数 0001—1000
书 号 ISBN 7-308-03009-1/R·105
定 价 18.00元

内容提要

各种医学图像在医生的诊断和治疗中已经成为愈来愈重要的手段。这种趋势还在继续发展。而且随着生命科学和医学科学的发展,还会不断提出获得各种新的医学图像的要求,从而推动新医学成像系统的出现和发展。

《医学成像系统》一书以工程上易于理解和处理的手段与各种成像系统原理的物理过程来分析和理解成像系统的性能。书中对成像过程作了各种简化,如线性化处理,从而达到能用数学方程来描述成像过程。这使得本书与以往仅作定性描述的医学成像技术的书籍不同,能获得各因素对成像过程的定量的概念。

本书着重讨论了X线、CT、核医学以及超声回波成像系统。由于医学成像是发展非常迅速、涉及学科很广的一个领域,因此本书不可能是包罗万象的。尽管如此,本书不失为一本有特色的医学成像系统方面的著作。

作者序

本书的中文版是曹其智博士(我以前的学生和尊敬的同事)、秦克诚先生和龙伟丽女士的劳动成果。只有对这一领域非常熟悉的科学家才能承担这一困难任务。我深深感激他们为此作出重大贡献。

本书是在电机工程系开设的一门研究生课程讲义的基础上不断更新发展而成的。这门课于1973年首次在斯坦福(Stanford)大学讲授,此后每年开一次。

作者同时在电机工程系和放射诊断学系担任教职。在电机工程系,作者是信息系统实验室的成员。

在本书中,我们试图用电机工程师熟悉的术语来描述现有的各种医学成像系统,这些术语包括脉冲响应、传递函数和信噪比。这样的描述使比较复杂的医学成像系统变得更容易理解,设计时的各种权衡考虑也变得更清楚了。

许多实际使用的系统具有不同程度的非线性或者空间变的脉冲响应。这样的系统不能用优雅的卷积形式来表示,也不能在频域中使用传递函数。然而,对每一种情况,我们都作一些合理的近似,便于重新把它们建立为线性不变系统。由此所得的结果完全补偿了在精度方面的轻微损失,这样的结果对于理解医学成像系统及其设计考虑是至关重要的。

本书是为对医学成像有兴趣的科学家、工程师和研究生编写的。读者最好有一些线性系统和傅里叶变换知识的基础。在讲述超声成像的第9章和第10章里,用到了衍射理论。然而,衍射公式是从基本原理出发推导的,因此并不假定读者具有预备知识。作为

成像系统基础的物理机制不是本书的重点,但是,对于每一种成像方式,都叙述了充分的物理学知识,从而系统的模型可以合乎逻辑地建立起来。

本书中所用的数学基本上是在线性系统理论中占主导地位的积分运算。一般对每种成像方式都导出其脉冲响应,然后把它用到迭加积分中。因为内容有关成像,通常要用到多重积分。在估计每一种方式的信噪比时要用到统计知识。这里的统计知识是比较简单的,因为并不要用高阶统计。信噪比只是简单地基于每个图像单元的噪声方差。

本书同许多关于放射学和超声物理学方面的书籍的一个不同之处在于,本书通过各个物理参数给出了所成像的一个解析式子。我们不是用言词来描述不同参数的作用,而是给出了一个形式的数学结构。这对于有志于作进一步更详尽分析的读者将会是有用的。

作者感谢许多同事和研究生的支持,特别是 William Brody 教授及 Robert Alvarez, Bruno Strul, Steve Norton, Leonard Lehmann, Dwight Nishimura 和叶本秀诸位博士。

作者在此也表示对 Pat Krokkel 女士的谢意,感谢她不倦的支持和鼓励,是她打印了本书的手稿。

在本书的下一版中将会增加一章,其内容是对磁共振成像的详细讨论。在着手写这本书时,这一领域还刚刚开始,但现在已成为一种主要的医学成像手段。

A. M.

审校者的话

20世纪50年代以来,医学成像系统取得了很大的进展。1979年 A. M. Cormack 和 G. N. Hounsfield 由于发明计算机断层 X 射线成像(CT)获得诺贝尔生理学医学奖,是医学成像系统卓越成就的一个标志。除此之外,还涌现出多种新型的成像方式,如核医学、超声、核磁共振成像、正电子成像等。医学成像系统的发展是当前尖端科技的一个侧面,是医学物理、电子技术和计算机等多种学科成果的综合。其内容之丰富和诊断效果之佳都是空前的。医学成像技术也已引入我国。在大城市中,B超已是人们熟悉的一种检查和诊断方法。一些有眼光的科技工作者已经在我国开展了这个领域内的研究工作。

本书作者马科夫斯基是医用电子学领域内的一位有名望的专家。他早年从事彩色电视方面的工作,后来专攻医用电子学。他有丰硕的研究成果,在期刊上共发表过近 200 篇论文,并有 110 项以上专利。他领导的斯坦福大学医学成像研究室是美国在这一领域最大的研究集体之一,有 15 名博士研究生和 3 名研究员从事以核磁共振成像为主的多种成像方式的研究。本书是美国各大学广泛使用的电机工程系的研究生教材,对于医学成像系统的理论基础、设计考虑和应用情况均作了简明而深入的叙述。书中的部分内容取自该研究室的研究成果。

两位译者都在这一领域内有丰富的知识和经验。曹其智是斯坦福大学电机工程系博士,她修过马科夫斯基教授以本书为教材的课程,并在他的研究室内做过两年研究工作。龙伟丽从北京大学物理系毕业后,长期在北京医疗仪器厂和北京市医药总公司担任

技术和领导工作。翻译的分工是：龙伟丽译第8、9、10 三章，其他各章均由曹其智译出。我则负责全书的审校。

我们希望，本书中译本的出版将有助于我国有关的科技工作者了解国外医学成像系统的现状，以促进在我国开展这一领域的研究、开发和教学工作。对于译文中的错误之处，请读者不吝指出，当然，对此审校者要负更大的责任。

秦克诚

1989 年 1 月 6 日

目 录

第 1 章 引 言	(1)
1.1 历 史	(1)
1.2 医学成像的方式	(2)
1.3 电磁能的透射	(2)
1.4 超声成像	(4)
1.5 X 射线和超声的比较	(5)
1.6 核医学	(6)
第 2 章 线性系统	(8)
2.1 线性的定义	(8)
2.2 迭加积分、 δ 函数和脉冲响应	(9)
2.3 空间不变性	(11)
2.4 放 大	(11)
2.5 二维傅里叶变换	(13)
2.6 存在条件	(14)
2.7 傅里叶变换关系	(15)
线 性	(15)
放 大	(16)
位 移	(16)
卷 积	(16)
互相关	(16)
可分离性	(17)
2.8 经常遇到的函数及其变换	(18)

2.9 抽 样	(19)
2.10 概率方法初步	(22)
习 题	(24)
第 3 章 投影放射照相术的物理学	(26)
3.1 平行几何条件	(26)
3.2 衰减关系	(27)
3.3 源 谱	(28)
3.4 衰减系数	(30)
3.5 衰减系数的解析表示式	(35)
习 题	(38)
第 4 章 放射照相术成像中源的考虑	(40)
4.1 点源的几何关系	(40)
4.2 和深度有关的放大率	(43)
4.3 点源几何关系的例子	(44)
4.4 扩展源	(49)
4.5 平面源成像分析	(50)
4.6 使用平面物的另一种分析方法	(53)
源尺寸的影响	(54)
4.7 用立体物时的简化关系	(55)
4.8 非平行源分布	(59)
4.9 物运动的影响	(62)
4.10 有代表性的源布局	(64)
习 题	(66)
第 5 章 记录器分辨率的考虑	(71)
5.1 屏-底片系统	(71)

5.2	临界角的考虑	(77)
5.3	能谱的考虑	(78)
5.4	构成记录器系统的另一些方法	(79)
5.5	总的系统响应	(81)
	习 题	(82)
第 6 章 放射照相术和荧光透视术中的噪声考虑 (84)		
6.1	信噪比的分辨率考虑	(89)
6.2	记录器的统计性能	(90)
6.3	荧光透视术	(93)
6.4	像增强器	(94)
6.5	相加噪声	(97)
6.6	线积分的信噪比	(99)
6.7	散 射	(101)
6.8	散射分析	(102)
6.9	通过间隔减小散射	(106)
6.10	用栅格结构减小散射	(107)
6.11	直线探测器阵列	(114)
	习 题	(115)
第 7 章 断层成像术 (120)		
7.1	运动断层成像	(120)
	圆运动	(125)
	多重放射照相层析术;层析综合	(126)
7.2	编码源断层成像	(127)
7.3	计算机断层成像	(128)
7.4	重建的数学——迭代方法	(129)
7.5	直接重建方法——傅里叶变换法	(133)

7.6	用傅里叶变换法的例子	(138)
7.7	另一种直接重现方法——倒投影	(139)
7.8	滤波倒投影重建系统	(142)
7.9	卷积—倒投影	(144)
7.10	衰减系数的重建	(147)
7.11	扫描方式	(150)
7.12	计算机断层成像中的噪声考虑	(151)
	习 题	(160)
第 8 章	核医学	(161)
8.1	扫描探测器	(165)
8.2	γ 射线照相机的成像考虑	(166)
8.3	Anger 照相机	(168)
8.4	针孔成像结构	(173)
8.5	平行孔准直器	(177)
8.6	噪声考虑	(184)
8.7	编码孔径系统	(185)
8.8	用断层成像方法的放射源成像	(188)
8.9	正电子成像	(189)
	习 题	(192)
第 9 章	超声成像初步	(195)
9.1	反射成像的基本原理	(196)
9.2	衰减校正	(198)
9.3	A 扫描	(199)
9.4	M 模式	(200)
9.5	截面成像或 B 模式	(201)
9.6	衍射表述	(204)

9.7	衍射表述的稳态近似	(207)
9.8	菲涅耳近似	(209)
9.9	夫琅和费近似	(212)
9.10	声聚焦	(215)
9.11	宽带衍射	(216)
9.12	组织的超声特性	(222)
	衰 减	(222)
	速 度	(223)
	反 射 率	(224)
9.13	镜面界面用的复合扫描	(226)
9.14	噪声考虑	(227)
9.15	散斑噪声	(229)
	习 题	(230)
第 10 章	使用换能器阵列的超声成像	(233)
10.1	成像阵列	(233)
10.2	成像阵列的局限性	(236)
10.3	电子偏转和聚焦	(237)
10.4	直线阵列	(237)
10.5	带偏转的直线阵列	(241)
10.6	带聚焦的直线阵列	(243)
10.7	直线阵列的宽带响应	(245)
10.8	二维阵列系统	(249)
10.9	矩形阵列	(249)
10.10	同心环阵列	(249)
10.11	空心环阵列发送器	(251)
10.12	θ 阵列	(252)
	习 题	(253)

第 11 章 医学成像选题	(255)
11.1 核磁共振	(255)
11.2 数字相减放射照相术	(262)
11.3 能量选择成像	(265)
11.4 三维放射照相术和超声成像中的新型数据 采集和处理系统	(269)
11.5 线积分超声重建系统	(271)
11.6 放射照相术参数的直接采集	(272)
11.7 受激正电子辐射	(274)
参考文献	(275)

第 1 章 引 言

本书主要着眼于一个三维物体内的结构成像。尽管所研究的对象是人体,由此引出的知识可以应用于多种非医学领域,譬如非破坏性测试。

人体组织和器官主要由水、骨和气体构成,其中水是最主要的成分。在人体中也存在着多种微量元素,如甲状腺内的碘、肝脏中的磷以及血中的铁。这些元素在医学成像中居次要地位。随着计算机层析术的发明,这种情况已开始变化。然而,用各种类型的辐射方法探测人体以产生图像,成败与否仍主要地依赖于水、骨和空气。

1.1 历 史

我们不打算耗费精力去勾画一部完整的医学成像编年史。然而,我们将试图极为简要地点明物理学家和工程师们在历史进程中的作用。

这类技术的最早应用要追溯到 1895 年伦琴发现 X 射线。对放射成像作出贡献的许多主要系统,如增强屏、断层成像术(特定平面的成像)以及旋转阳极管都是在其后的 10 到 20 年中出现的。从 1930 年起,在放射成像术方面的多数工作都是致力于改进元件而不是改进系统。

但在此后一个时期中,是临床医师而不是物理学家或者工程师的创造性工作对疾病过程的体内造影作出了长足的改进,发展了许多操作方法,使一些区域有选择地变成不透明。这些方法包括

静脉输液、导管插入以及口服染剂。因此，在功能有限的仪器面前，放射学家们设计了多种通常对人体是侵入性的方法，以设法显现本来不可见的器官。

诊断仪器系统的革命纪元始于 20 世纪 50 年代，在 70 年代中期达到一个高峰。新系统的构想和发展都是为了用非侵入的方式显现人体解剖结构和疾病的演化过程。在这里，物理学家和工程师起了主要作用，而临床医师则为形势所迫，急起直追，以跟上新涌现出来的以大量令人振奋的数据为特征的新形势。

这场革命始于核医学以及超声，这两种方法尽管有严重的成像限制，却提供了非侵入式地显现本来不可见的疾病演化过程的手段。20 世纪 70 年代初期，随着计算机断层成像术的引入，这场革命达到高潮，它获得的精致的断层像可与外科探查所得的信息相匹敌。这些仪器迅速推广，成为多种处理方法中的标准技术。

这一革命进程还在继续，不仅这些系统本身有长足的改进，而且还初步研究了更新的、尚不成熟的成像方式。这些方式包括微波和核磁共振的应用。

1.2 医学成像的方式

现有的临床应用的医学成像系统由三种基本技术组成：

1. 测量 X 射线在人体内的透射。
 2. 测量传入人体的超声波的反射。
 3. 测量有选择地摄入人体的放射性药物所发射的 γ 射线。
- 我们简明地讨论每一种技术。

1.3 电磁能的透射

考察一下整个电磁辐射谱，从直流(DC)到宇宙射线中的光子，对于找到适合于对人体内部成像的谱区是有指导意义的。可以用两个参量来评价相对适用性，即分辨率和衰减率。从分辨率角度

考虑,为得到有用的图像,射线在人体中的波长必须小于 1.0 cm。此外,射线在通过人体时应当适度地衰减。如果衰减太厉害,则噪声的存在使得透射测量简直不可能;如果几乎是全透射而无衰减,则测量也达不到足够的有意义的精度。衰减可由吸收或者由多次散射造成。

图 1-1 绘出了电磁谱中适合于人体成像的比较大的区域。在左边的长波区,能看到除了波长很长的射线之外衰减都过大,而波长很长又由于分辨率而不能。这里,通过软组织的透射率可以近似为 $\exp(-20l/\lambda)$, l 是程长。

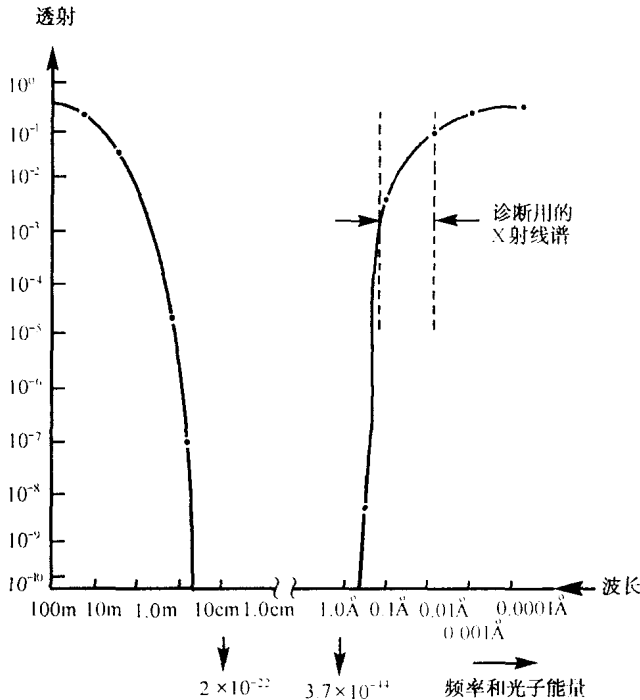


图 1-1 电磁波通过 25 cm 的软组织的透射