

放射成象

图象形成、检测和处理理论

第二卷

〔美〕H. H. 巴雷特 W. 斯温德尔 著

科学出版社

出版说明

医学成象是生物医学工程的一个重要分支,也是医学、物理学与工程技术三者的立体交叉点。而放射成象又是医学成象领域的热点。首创工程技术用于医疗诊断纪录者当推原始的X射线摄影术,那是1895年11月伦琴发现X射线后不久之事;首开工程师、物理学家获得医学诺贝尔奖的先例者是X-CT扫描装置的奠基人G. H. Hounsfield和A. M. Cormack,那是1979年的事。如此,放射成象领域独揽了近百年来工程界对医学界起革命性影响的两件大事。足见放射成象在生物医学工程发展中的地位和作用。

近二十年来,放射成象装置的发展速度更是令人瞩目。它从初级到高级,从简单到复杂,从单品种到多品种,集中体现在由X-CT发展到单光子发射CT——SPECT和正电子发射CT——PET。它们紧跟计算机技术发展的潮流,充分利用现代物理学的成就,有效地实现了对病变的无伤诊断,并且已从形态学的诊断发展到功能性诊断。尽管如此,放射成象的进展仍方兴未艾,它又在向三维成象和X射线全息图的目标迈进。可是,无论是国内还是国外,系统而全面地反映这一领域的成就并指出其研究前沿的著作几乎付诸阙如。本书的出版无疑填补了这一方面的空白。

与流行的一些介绍有关放射成象的著作相比,本书的最大特点是为各种放射成象装置建立一个简单而实用的模型,而用统一的系统分析的观点把它们贯穿起来。全书第一卷主要介绍基础的系统分析知识和有关数学准备。第二卷则着眼于如何把这些基础理论应用于不同的成象系统。作者作这样的处理可谓高瞻远瞩。因为放射成象发展迅速,一些具体系统会很快过时,只有基本理论才能经久不衰。

本书的另一特点是,它不仅对各种放射成象的理论用统一的

观点作了精辟的论述，还介绍了作者的研究成果和本学科的前沿动向，如编码孔径成象、三维成象等。

值得指出的是本书起点较高，要求读者需要较多的数学知识。前后两卷之间联系紧密，我们建议读者在阅读第一卷的基础上再阅读第二卷的内容，这样效果会更好。

第一卷由郑州大学张万里、王维道翻译；科学出版社王鸣阳校订。第二卷由上海交通大学庄天戈、周颂凯翻译，并由庄天戈统一整理；清华大学杨福生校订。

H. H. 巴雷特教授专为中译本作序，我们对巴雷特教授的支持与鼓励表示深切的谢意。

中 译 本 序

欣悉本书正被译成中文。我为拙作能享有更多的读者所提供的这一机会表示由衷的感谢。深信斯温德尔教授也有同感。

在我 1982 年访问中华人民共和国期间,深深感受到贵国科学工作者和医生对吸收现代科学技术并将它与自己的传统文化相融合所表现的强烈愿望。如果本书能为此作出微薄的贡献,我将万分高兴。

H. H. 巴雷特

1986 年 6 月 20 日于美国亚里桑那州、图森

序 言

本书是作者从 1974 年起在亚利桑那大学光学科学中心讲课的产物。选修这门课程的学生是高年级的研究生，他们大多数主修光学，也有一些主修物理、数学或电子工程学。这门课程力图达到两个目的。第一个，也是最明显的目的，是为学生从事放射成象的研究打下基础；第二个（也许是更重要的）目的是在介绍放射摄影的同时来讲授一般的图象理论，以帮助学生熟练掌握线性系统理论和随机过程理论的基本分析手段，因为这些知识对于任何成象系统，不论是放射成象系统还是其它成象系统，都是适用的。

在本书中，我们尽量保持了原来课程的两个目的。虽然书中只是具体分析了医疗诊断上的特殊系统，但有关的原理却有非常广泛的用途。对于从事象的形成、检测或处理的人员来说，不论对哪种类型的放射，计算调制传递函数，或确定所处理图象的信噪比都是必不可少的技能。

为了使本书能适用于更多的读者，我们添加了原来课程中未正式讲授的一些导引性内容。附录 A 和 B 中的狄拉克 δ 函数和傅里叶变换等数学内容，相对说来，是主修光学的多数研究生所熟知的，收集在这里仅供参考。同样，附录 C 中有关辐射物理的大部分材料，往往也已经在为大学生开设的现代物理课程中讲授过了。第二、三两章介绍了在本书后面将要用到的基本数学工具。修完线性系统大学课程的读者可以跳过第二章。如果学过随机过程课程，那么第三章的大部分内容也可略去不读；不过，这章中关于泊松过程的内容还是仔细加以阅读为好，因为它是放射成象的基础，而在通常的随机过程大学课程中往往未能给予足够重视。

作为本书主要内容的放射成象系统分析，是从第四章开始的。这一章的目的是建立一个简单而又合理的实际模型，以描述各种

• v •

类型的成象系统。

第五章讨论放射成象检测器。这方面的内容很容易写成象本书两卷这样多的篇幅,为了将它压缩到适当的比例,我们只选取了两种检测器加以详细讨论,即X射线胶片(包括胶片-屏系统)和Anger闪烁照相机。它们不仅是诊断放射学和核医学中最重要的检测器,而且通过讨论这两种检测器,便可对一般影象检测器的重要特性有个大致的了解。

第六章到第九章,我们研究三维或断层成象的各方面问题,其中第七章是计算机断层成象术,它无疑在临床实践中是最重要的。第六章包括了对所谓经典断层成象术的简要讨论,这主要是考虑到它的历史意义。第八章中论述复用成象,即编码孔径成象,它是本书作者之一极为感兴趣的课题。尽管这种成象方法在临床上的应用还有争论,但作为一种教学手段的价值却无疑议。分析一个编码孔径系统虽然不是临床实践所必需的,但知道如何去分析它还是很有益处的。同样,第九章中我们还介绍了各种各样的系统,这些系统目前还处于研究阶段或是正在经历初期的临床实验。这一章介绍了放射成象研究的最新进展,即努力去寻求新的、更好地提取三维信息的各种方法。为了避免发生很快就过时的情况,本章中侧重于基本的数学原理,仅略微涉及体现这些原理的具体系统。

在第十章中,对于几乎总是受到泊松噪声限制的放射摄影图象,我们指出了如何去分析它们的统计性质。同时还十分简要地讨论了检测时的心理物理学因素,以及它们对图象噪声物理测量所产生的影响。尽管我们认识到观测者作为成象系统的一部分,至少与探测器同等重要,然而由于篇幅的限制和我们自己学识的局限,对心理物理学我们还不能进行更深入的讨论。我们对心理物理学所作的有限论述,足以表明这一章前面部分就计算信噪比所作的工作并非无用,大的信噪比是对一个优秀观测者工作的切合实际的要求。

第十一章讨论散射放射及其对影象质量的影响。其实这是两

个问题,即如何去分析散射问题和如何去消除散射的影响。

写这本书时一项最困难的工作就是保持符号的前后一致和准确无误。我们感到,这项工作恐怕还没有真正做好,因为上标、下标、加饰号和特殊印刷符号用得太多了。因此我们下面特别说明一下使用符号的一些规则,希望对于读者有所帮助。

通常,我们用黑正体字母代表二维矢量,用白斜体字母代表标量。有时有必要将三维矢量与二维矢量区别开来,这时就使用黑花体。白花体字母则用来表示三维矢量的标量值。对随机变量或随机函数,不论它是矢量还是标量,都印成匀粗黑体字母,并用相应的白斜体字母来表示随机过程的抽样函数。

对傅里叶变换使用了两条符号规定。用小写字母表示函数 $f(\mathbf{r})$, 它的傅里叶变换采用相应的大写字母 $F(\boldsymbol{\rho})$ 表示。有时也用到傅里叶算子 $\mathcal{F}_2$, 因此有 $F(\boldsymbol{\rho}) = \mathcal{F}_2\{f(\mathbf{r})\}$ 和 $f(\mathbf{r}) = \mathcal{F}_2^{-1} \cdot F(\boldsymbol{\rho})$ 。下标 2 表示是二维变换。频域变量用希腊字母 $\rho, \sigma, \xi, \eta, \zeta, \nu$ 等表示,而空域变量则用拉丁字母表示。

一个稍微有些特别的数学符号是带有下标 ∞ 的积分符号,它表示积分是对积分变量的全部无限域进行的,例如,

$$\int_{\infty} d^2r = \int_0^{\infty} r dr \int_0^{2\pi} d\theta = \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy.$$

我们还大量使用了加饰符号。 $\hat{f}(\mathbf{r})$ 中加了上波线,它表示函数 $f(\mathbf{r})$ 的标量。加饰上横线代表某种平均,例如 $\bar{x}$ 可能是随机变量 $\mathbf{x}$ 的统计期望值。必要时角括号 $\langle \rangle$ 也代表平均值,除统计平均外,它也能代表对空间或时间的平均。字母上的尖角号,特别是它冠于随机变量上时,有时用来表示对该量的估计值,例如 $\hat{\mu}$ 就是 μ 的一个估计值。这个尖角号也可以用来表示单位矢量。剑号表示某个函数经滤波后的形式,例如 $f^{\dagger}(t)$ 就是 $f(t)$ 与某个滤波器函数的卷积。上标星号代表复共轭;而位于两个函数之间的星号则表示卷积,如 $f(x) * q(x)$ 。 $f(\mathbf{r}) ** g(\mathbf{r})$ 中的双星号用来表示二维卷积。“撇”号有多种用途,最重要的一个用途是代表通用模型中的不同平面,这个通用模型是在第四章中建立起来的,在

第八章至第十章中也曾用过。关于这个通用模型的符号规则在第四章中有详细的说明。

本书中给出的参考文献并未包括有关放射摄影成象的全部文献,但基本上已列出了我们编写本书时所用到的文献,特别是那些综述性文章、书籍和研究报告,以供读者作更深入的钻研。其中也尽可能给出了一些新近的参考文献,以作为阅读当前文献的入门。此外,还列出有几篇具有历史趣味的参考资料。我们并未有意按时间的顺序对文献进行选择,也不能以我们对文献的选取来判断有关工作的价值。我们只希望有助于读者,而毫无评价某位研究者或某个研究团体的意思。但愿我们列出的文献能符合初衷,而不致无意中含有褒贬。

(下面是对出版本书有关人员的感谢话,从略。)

目 录

出版说明

中译本序

序言

第二卷目录

第一章 临床设备	1
1.1 常规X射线	1
1.2 计算机断层成象术	10
1.3 核成象	14
1.4 超声波	24
第二章 线性系统理论	30
2.1 引言	30
2.2 脉冲响应	32
2.3 频域	38
2.4 线性滤波器	44
2.5 取样	53
2.6 锐度的另两种测量方法	64
第三章 随机过程理论	66
3.1 基本概念	66
3.2 高斯随机变量	81
3.3 泊松随机过程	88
3.4 伯努利分布	103
3.5 噪声信号的滤波	114
第四章 线性系统理论在放射成象中的应用	129
4.1 通用模型	129
4.2 针孔成象	136

4.3	透射放射照相	146
4.4	扫描仪	153
4.5	闪烁照相机准直器	175
4.6	更复杂的情形	195
第五章	检测器	210
5.1	引言	210
5.2	胶片检测器	213
5.3	胶片-荧光屏系统	247
5.4	伽玛射线照相机	283
5.5	检测器中的非泊松噪声	311
附录 A	狄拉克 δ 函数	318
A.1	δ 函数的定义	318
A.2	δ 函数的性质	319
A.3	δ 函数的导数	321
A.4	梳状 (comb) 函数	321
A.5	二维和三维的 δ 函数	322
A.6	环状 δ 函数	323
附录 B	傅里叶变换	325
B.1	一维傅里叶变换及其逆变换	325
B.2	一维傅里叶变换的各种性质	326
B.3	某些特殊函数及其傅里叶变换	328
B.4	卷积和相关	333
B.5	变标度卷积	335
B.6	傅里叶级数	337
B.7	二维傅里叶变换	339
B.8	Hankel 变换	340
B.9	某些特殊函数及其在二维空间中的傅里叶变换	341
附录 C	光子与物质的相互作用	344
C.1	衰减、散射和吸收	344
C.2	光电吸收	346

C.3	康普顿散射	350
C.4	正负电子对的产生	360
C.5	总衰减系数	360
C.6	其他问题	362
C.7	混合物与化合物	364
附录 D	放射的各种物理量	365
D.1	照射量和散射剂量	365
D.2	国际放射单位委员会	366
D.3	各种定义	366
D.4	单色放射情况下 1 伦琴照射量的能流和光子流 ...	370
D.5	从照射量求剂量	372
D.6	放射性强度	378

目 录

第六章 经典断层成象术	379
6.1 经典断层成象术原理	379
6.2 经典运动断层成象术中的点扩展函数 (PSF)	382
6.3 断层成象术的演变	385
6.4 核医学中的方法	391
第七章 计算机断层成象术	395
7.1 引言	395
7.2 从投影重建图象的解析理论	397
7.3 实际问题	429
7.4 发射计算机断层成象术	468
第八章 复用断层成象法	487
8.1 引言	487
8.2 圆环	494
8.3 斐涅耳波带片	512
8.4 针孔阵	540
8.5 时间调制编码孔径	547
第九章 三维成象	558
9.1 引言	558
9.2 数学准备	560
9.3 用反投影和累加进行重建	562
9.4 坐标变换	571
9.5 多孔径系统	577
第十章 放射摄影图象中的噪声	590
10.1 引言	590
10.2 基本原理概要	591

10.3	核医学	595
10.4	透射成象	613
10.5	计算机断层成象术	628
10.6	编码孔径	642
10.7	噪声与图象质量	651
第十一章	散射放射	662
11.1	引言	662
11.2	散射问题的分析方法	663
11.3	散射放射的重要性	680
11.4	散射放射的控制	687
11.5	散射放射的用途	696
参考文献		699
重要符号表		709
定义函数		715
汉英名词对照索引		716

第一章 临床设备

X射线、 γ 射线和超声波是医疗诊断成象中最常用的三种放射形式。它们都能深入检测人体内部，为放射学工作者提供各种信息。X射线影象图其实就是X射线的衰减系数图，它在很大程度上依赖于衰减介质的化学成分和物理状态，因此从X射线影象得到的主要是形态信息。超声波影象反映的是人体组织机械性能的差异，所以，提供的主要也是形态信息。它与X射线影象与其说是竞争，倒不如说两者互为补充。

此外还有核医学影象，它能显示出放射性物质在人体内部的循环、扩散和随后的聚集过程。这种影象直接反映着生理功能，由于它能观察功能是否正常，因而在医疗诊断上很有用处。本章将介绍一些临床应用情况，并概述每一种成象技术的物理和工程原理。为了反映现代放射学的全面情况，在概述中还涉及到了本书其它部分不讨论的超声波。

1.1 常规X射线

差不多每个人都用X射线做过胸部透视、断肢检查或者牙齿拍片。这种技术之所以能帮助诊断，是因为受检查的组织能显示出适当的放射影象对比度。骨骼能强烈地吸收X射线，因而骨折部位或是龋齿可以立即被显示出来（见图1.1）。正常的充满空气的肺叶易于透过X射线，而肺炎病人的充满积液的病灶部位则不易透过X射线。

如果放射影象的对比度太小，则可以用好几种造影方法使它增强。例如向血管中注射含碘溶液，就可以使血管在放射影象上清晰可见，如图1.2所示。这种技术称血管造影术，其原理是原子



图 1.1 骨骼强烈地吸收X射线,所以无需使用造影剂便能
显示得很清楚(K. Haber 提供)

序数较大的元素能强烈地吸收X射线。同理,让患者吞服钡化物,则可以显示出上胃肠道。在气脑造影术中,这个原理被反过来加以运用:将空气注射到脊髓腔中取代脑脊髓液,从而使脑室得以显现(见图 1.3)。虽然这种情况下不是原子序数起作用,而是利用物理密度的不同,但效果一样。两者都能使所检查的结构与其周围组织之间对X射线透射的差异得到增强。

绝大多数X射线研究工作中,都采用配有荧光屏的照相胶片

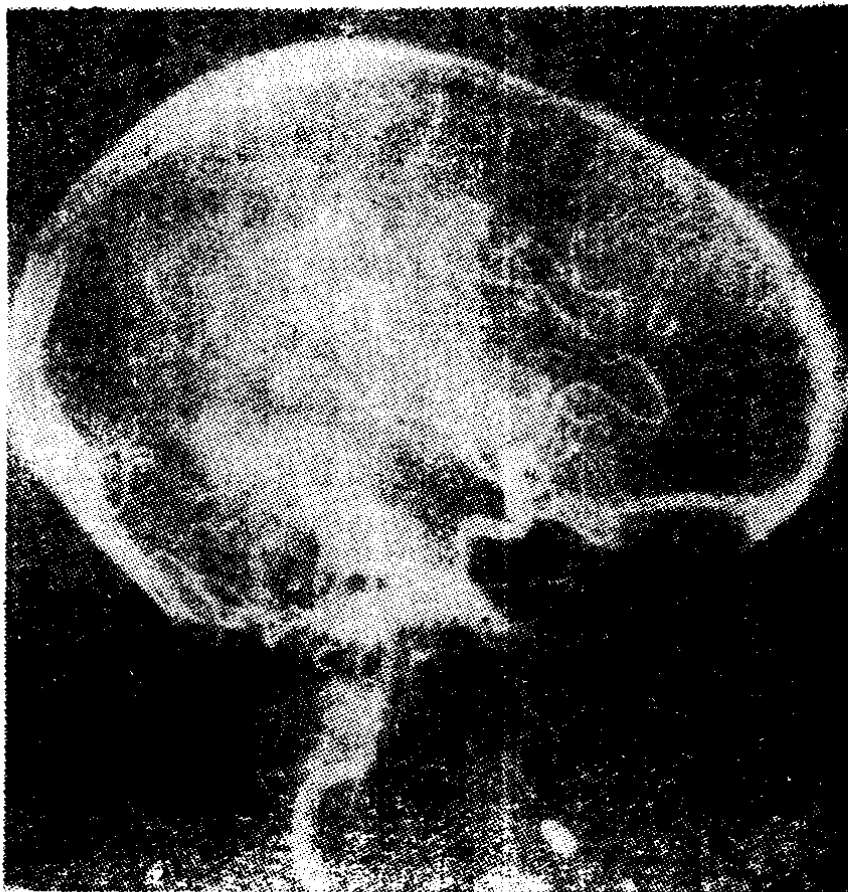


图 1.2 脑血管图。血管中注射了较强烈吸收 X 射线的碘化物
(B. Hillman 提供)



图 1.3 气脑造影图。空气注入脑室以提高放射影象的对比度

作为检测器。但有些研究,改用别的检测器效果会更好。例如,让影象由电视摄象之前,先进入X射线影象增强器,就可以把影象数据输入到数字计算机中。这样,我们便能在计算机中对影象作预处理,然后再让它显示出来。甚至只作简单的相减技术处理也可以获得非常满意的效果,如图 1.4 所示。

还有一种检测器,其原理与普通复印机相似,这就是X射线静电复印术,又称静电放射摄影术。这种检测器具有非常好的细节成象能力,用于诊断乳腺癌有突出的效果(见图 1.5)。

图 1.6 是透射成象系统的示意图,它包括一个X射线源、被放射摄影的物体和一个检测器。当高能电子束聚焦到阳极的一个小焦斑上时,便产生出X射线。进入金属阳极的电子在被急速减速的过程中,会产生出宽阔的连续X射线谱。这个过程称为韧致辐射。电子也可能使阳极中的原子电离,在其内电子壳层上形成空位。这种空位很快就被由外层跃迁来的电子所填补。这种跃迁过程所产

