

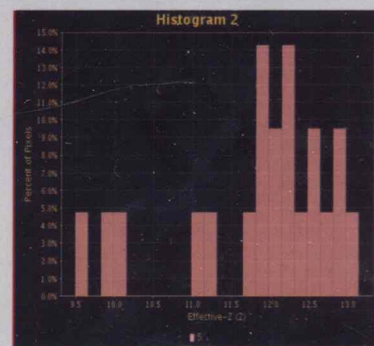
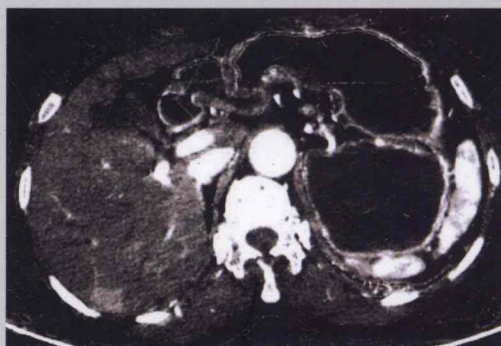
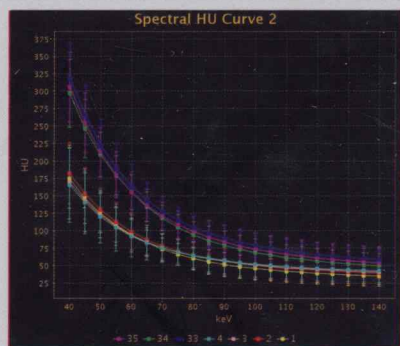


新编胸腹部能谱CT 临床影像学

XINBIAN XIONGFUBU NENGPU CT LINCHUANG YINGXIANGXUE

——病案分析图解
BINGAN FENXI TUJIE

主编 高剑波



 郑州大学出版社

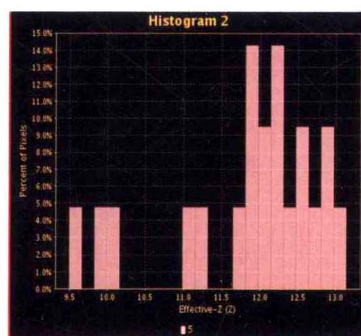
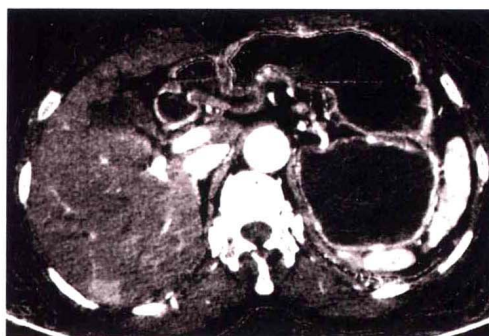
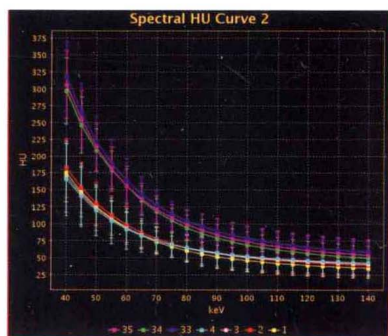


新编胸腹部能谱CT 临床影像学

XINBIAN XIONGFUBU NENGPU CT LINCHUANG YINGXIANGXUE

——病案分析图解
BINGAN FENXI TUJIE

主编 高剑波



 郑州大学出版社
郑 州

图书在版编目(CIP)数据

新编胸腹部能谱 CT 临床影像学——病案分析图解/高剑波主编.
—郑州:郑州大学出版社,2012.10

ISBN 978-7-5645-1152-4

①新… II. ①高… III. ①胸腔疾病-计算机 X 射线扫描体层
摄影-能谱-诊断学-图解②腹腔疾病-计算机 X 射线扫描体层
摄影-能谱-诊断学-图解 IV. ①R816-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 222850 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

河南省瑞光印务股份有限公司印制

开本:890 mm×1 240 mm 1/16

印张:13.25

字数:437 千字

版次:2012 年 10 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2012 年 10 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-1152-4

定价:120.00 元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换

主编简介



高剑波, 郑州大学第一附属医院放射科主任、教授、主任医师、博士生导师, 影像学科带头人。2005 年华中科技大学同济医学院影像学博士毕业, 2006 年被遴选为郑州大学医学影像学博士研究生导师。获河南省优秀专家、河南省优秀青年科技专家、河南省卫生系统先进工作者、河南省优秀中青年骨干教师、河南省自主创新十大杰出青年等荣誉称号。

现任中华医学会影像技术学会常委兼 CT 学组组长, 中华医学会放射学会腹部学组副组长, 中国医学装备协会 CT 工程技术委员会副主任委员, 中国医学影像技术研究会放射分会全国委员, 河南省医学会影像技术学会主任委员, 河南省医学会放射学会副主任委员, 河南省放射医师协会副会长。目前担任《中华放射学杂志》、《临床放射学杂志》、《中国医学影像技术》、《实用放射学杂志》等十余种专业期刊常务编委或编委。

高剑波教授从事放射影像工作 27 年, 在消化系肿瘤和肺部疾病的临床影像学研究方面颇有造诣, 先后获得河南省科技进步二等奖 4 项。近年来承担“十一五”国家科技支撑计划重点项目子课题, 主持国家自然科学基金面上项目、河南省杰出青年科学基金项目、河南省重点科技攻关计划项目、河南省消化系统肿瘤影像学诊断与研究创新型科技团队、河南省高校科技创新团队支持计划等 10 余项科研工作, 组建并领导郑州市医学影像技术与诊断重点实验室工作。主编及参编医学影像学专著 10 余部, 发表论文 200 余篇, 其中被 SCI 收录 6 篇, 在《中华放射学杂志》发表 10 余篇。

作者名单

主 编 高剑波

副主编 吕培杰 杨兴华 郭 华 张永高 周志刚

编 委 (以姓氏笔画为序)

万娅敏 王 芳 王小鹏 王天佑 王立峰 田辉英

吕培杰 刘 杰 刘书婷 关牧娟 苏 蕾 李贞旭

李庆龙 杨兴华 张永高 张智栩 岳松伟 周 悦

周志刚 胡丽丽 查开继 高 歌 高剑波 郭 华

耿尚文 梁晓雪 姬丽娟 姬妮娜 董军强 董雷钢

潘元威 魏一娟

内容提要

本书是介绍有关能谱 CT 在临床实际应用的专著。全书共分 4 个部分,主要介绍了能谱 CT 的概念、作用原理、应用价值,以及能谱 CT 在胸部、腹部实质性脏器及心血管系统的临床应用,如从临床病例介绍、扫描方案、病案分析 3 个方面,以图文解说的形式论述了能谱 CT 在肿瘤的定量诊断及鉴别诊断、淋巴结的定性、艾滋病合并肺部病变的鉴别、肺栓塞的检测和随访、冠状动脉支架置入术后的随访、血管的优化成像等方面的临床应用潜力和作用价值。本书可作为医学影像工作者的专业参考书,也可供临床其他学科人员、医学高等院校师生阅读参考。

CT 技术目前是医学影像中进步最快的部分之一。20 世纪 80 年代,CT 发展着重在扫描部位的延伸,90 年代,CT 发展重点在扫描速度的演变,从 2000 年后,CT 发展表现为扫描层/排数“竞赛”,近几年来,CT 发展为能谱成像的“PK”。虽然能量 CT 自 20 世纪 70 年代已经产生,在 80 年代也开展了早期双能量减影的临床研究,但是由于成像技术的原因沉积了多年。近几十年来,随着 CT 成像技术的发展和临床需求的增加,能量 CT 重新成为了研究的热点,2008 年出现的能谱 CT 更为先进的临床应用和研究打开了大门。能量 CT 成像的发展不但是满足临床需求的产物,同时也是 CT 作为一个影像模式更够生存和发展的需要。能量 CT 成像的发展到目前为止经历了双能减影和能谱成像两个阶段。由于成像模式的不一样,能量 CT 成像能够实现的临床功能存在很大的区别。当两组能量信息获取时存在不一致时,我们只能使用两组各自重建的不同能量的图像进行双能减影。这种能量成像对成像要求相对较低,但同时临床应用也有限。但是如果双能量数据信息具有一致性,那么我们就能够进行能量数据空间的解析以获取能谱信息,实现能谱成像以提供更多的成像工具,完成更多的临床应用。能谱 CT 成像就是基于以上原理通过单一球管高低双能(80 kVp 和 140 kVp)的瞬时切换(<0.5 ms 能量时间分辨率)产生时空上完美组合的双能数据,实现数据空间能谱解析。这种方法还使得我们能够在 50 cm 的完整空间内进行能谱成像。

在常规 CT 所具备的高空间分辨率和时间分辨率的基础上,能谱 CT 又增加了能量分辨率及理化性质分辨率这两项参数,实现了多参数成像,如基物质成像,单能量成像及有效原子序数测定等,使得组织 CT 值的内部差异得到完全展现,更有利于物质的成分的分析与鉴别。这些都是以往的 CT 无法获得的,并且已经在临床应用上显示出其巨大的潜力和广阔的应用前景。

然而对于这项技术,还有很多医生并不了解,甚至持有疑虑,我本人也是如此,带着诸多问题浏览过高剑波教授主编的这本书。书中的内容为郑大一附院放射科近一年来的临床实践结果,虽然有些篇节的内容不够翔实,有些观点也需要大量的临床病例积累进一步证实,但是我看到的更多的是能谱 CT 作为一项新颖的影像学技术在临床工作和科学研究中所凸显的价值,等待着更多的研究学者去挖掘、研究和论证。它已经展现的和将要被挖掘出的在许多领域的临床价值,不但丰富着影像学的内容,同时还为影像学人才的培养提供着新的

舞台。

在此,我要衷心的祝贺高剑波教授所主编的这本书能够顺利出版,为广大放射学同行了解和使用能谱 CT 提供参考。相信大家阅读完此书后,会对能谱 CT 的原理和临床应用方法有更加深刻的认识,也为它在将来更多领域的应用提供更多的启迪。有鉴于此,欣然应邀作序。

中华医学会放射学分会主任委员
复旦大学副校长



2012 年 8 月 20 日

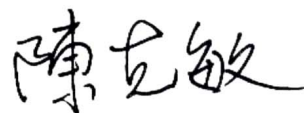
1972年英国科学家 Hounsfield 研制成功的横断面成像 CT 的问世,可以说是医学影像学乃至整个医学界的一个革命,此后几十年中医学影像新技术不断涌现,尤其是 CT 发展非常迅速。它把人体的组织器官通过最直观的图像方式显示出来,将疾病的临床诊治提高到了一个新的阶段。过去的 20 多年 CT 发展的过程中,两项技术使 X 射线 CT 在临床实践中有了突破性的应用。一项技术是螺旋式扫描模式的引入,能够在一次屏气内完成,呈现一个完整器官的图像。另一项技术是多排 CT 的发展,使得我们在任何时间对任何解剖部位都可进行各向同性的空间分辨率成像。近年来的技术革新则是能量和能谱 CT 的诞生。

传统 CT 虽然可以产生很清晰的解剖图像,但当 2 种或多种不同物质呈现相同密度的时候,CT 则有很大的限度,无法将其区分。简而言之,传统 CT 无法对物质成分进行精确定性和定量的分析。但是 CT 所用的 X 射线是一种具有一定能量范围的射线,如果能充分利用这种 X 射线存有的内在特性,CT 就可以对物质成分进行定性和定量的分析。这方面的追求,包括 CT 的创始人 Hounsfield 在内的一代又一代科学家们进行了长达 40 年的 CT 能谱成像的相关研究,当时由于技术的限制未能实现,而如今,能谱 CT 作为一项新的技术呈现在我们面前。通过高低瞬时切换的 X 射线管和材料技术突破的探测器的应用,及一系列成像链的改进,能谱 CT 将传统 X 射线的混合能量分解成为 40 ~ 140 keV 连续不断的 101 个单能量,获得了不同物质的能谱曲线,可在一定程度上进行物质的定性和定量测定。不仅如此,能谱 CT 还可以提供基物质图像、有效原子序数图像等,实现以多参数成像为基础的综合诊断模式,对被检组织的性质和功能状态进行多方位的评价。这项技术的出现和应用,对放射科医生而言,是具有挑战意味的。近期国内、外的能谱 CT 技术应用结果,已经为我们展现了很多的应用前景。但是作为一项新的技术,CT 能谱成像尚未被同行们所熟识,在临床工作中非常需要介绍其原理及临床应用的参考资料和书籍。

郑州大学第一附属医院放射科高剑波主任领导的科研团队凭借医院先进的技术设备和自身深厚的科研实力以及在能谱方面的优势,努力研究,深入探索,总结经验,撰写出了《新编胸腹部能谱 CT 临床影像学——病案分析图解》一书。此书是对关于能谱 CT 在临床应用相关经验的初步总结,同时融入了国内外近期的文献资料和相关经验,对能谱 CT 的原理,及其在胸腹部实质性脏器及心血管系统的临床应用价值进行了较为详细的介绍。此书贯彻了理论与实践相结

合,专业性与通俗性相结合的原则,图文并茂地介绍了能谱 CT 的相关应用价值,力求做到通俗、易懂。目前专门介绍能谱 CT 应用的书籍尚少,作为一本能谱 CT 在临床实际应用经验总结的专著,必然会对该项技术在临床的推广起到积极的作用,促使相关专业人员更多地探索其潜在的临床应用价值,使得更多的医生和患者从中获益。相信本书的出版会对能谱 CT 的临床科研和临床应用起到非常十分有益的的作用。

上海交通大学医学院医学影像系主任
上海交通大学医学院附属瑞金医院教授



2012 年 8 月 20 日

前言

CT 自 1969 年在英国诞生以来,已经走过了 40 多年的风风雨雨,随着计算机技术、探测器技术及球管技术的不断进步,科学家们逐渐研制出了单排螺旋 CT、双排、4 排、16 排、64 排乃至数百排,经历了“平移-旋转”、“旋转-旋转”、“单排螺旋”、“多排螺旋”、“能谱成像”5 个发展阶段,为医学做出了巨大的贡献。在后多排时代,CT 不再是单纯排数持续延伸,而是要突破“排”和“层”的限制,进行全面的革新,而能谱 CT 的出现或许可以实现这一点。能谱 CT 技术创造了影像学界的里程碑,不但可以提供高分辨率下的低剂量图像和能谱成像,还给临床带来了诸多前所未有的突破。CT 对能量的研究经历了能量减影和能谱的革命,从科研到临床的变革。虽然双能量 CT 成像早在 CT 发明的初期就已经被人们所提及,但是由于当时 CT 硬件设备和软件的限制,无法真正应用于临床。在随后的时间里,大家都专注于 CT 排数的发展,通过增加 CT 探测器的排数,扩大探测器单位时间内覆盖的范围,以获取更快的 CT 扫描速度。直到近几年技术的发展,能谱 CT 成像技术才得以实现。

能谱成像新技术使能谱 CT 成像由原来的能量减影跃变为能谱成像,并突破常规 CT 依靠 CT 值的单参数成像诊断模式,把 CT 成像推向了 5 维空间(x, y, z , 时间和能量)的多参数成像的新诊断模式。能谱 CT 不但能够观察人体解剖形态学信息,而且通过能谱成像技术,利用单能量图像、基物质密度图像及有效原子序数图像等,可以观察分析人体的组织病理学信息,并能够对其进行定性和定量分析,使影像诊断进入了一个更加前沿的领域,拓宽 CT 临床应用和科学研究的应用平台,由此,能谱 CT 已成为后多排 CT 时代的一个新的发展方向。能谱 CT 这种多参数成像的诊断模式打破了以往的常规的思维习惯和 workflows。在临床应用中,特别是在物质分离和定量分析方面具有重要的潜力和价值。但是作为一项新颖的影像学技术,能谱 CT 在临床上如何应用及应用的原理如何,很多放射学者并不了解。因此,临床上非常需要有相关的参考书和资料。

我们总结了最近 1 年多来关于能谱 CT 使用的心得和体会,并参考国内外最新的医学文献和相关资料编写了此书。本书主要阐述了能谱 CT 的原理及其在胸腹部实质性脏器及心血管系统 3 个方面应用的知识,第一部分概述了能谱 CT 的发展简史,概念,作用原理及临床应用价值等;第二部分胸部方面的应用价值包括胸部肿块的定性,胸水的定性,淋巴结的定性及艾滋病合并肺炎的鉴别等;第三部分腹部方面的应用价值包括小病灶的检测,肿瘤的定性,虚拟平扫,肾结石的定性,胆囊阴性结石的检出等;而第四部分心血管系统方面的应用价值则

包括血管优化成像,斑块成分检出及支架伪影去除等,从能谱 CT 的扫描技术及应用原理等方面分析介绍,理论与实践相结合,深入浅出,有利于读者能够深层次的了解 CT 能谱成像在各个领域的应用价值。

在本书的编写过程中,得到了中华医学会放射学分会主任委员、复旦大学副校长冯晓源教授和上海交通大学医学院医学影像系主任、上海交通大学医学院附属瑞金医院陈克敏教授的大力支持,并在百忙之中为本书作序,在此表示由衷地感谢。

虽然我们使用能谱 CT 的时间还不够长,此书涉及的领域也不够全面,但是参与编撰此书的全体人员展现了极大的热忱和认真仔细的态度。希望通过此书的出版,能为拓展能谱 CT 的科学研究和临床应用提供借鉴和帮助。限于编写者的认识和经验,书中某些观点和想法不一定全面和恰当,或许还会有一些不妥之处,敬请广大同行专家及读者不吝批评和指正。

郑州大学第一附属医院放射科主任,教授



2012 年 6 月

目 录

1 绪论	1
1.1 概念	1
1.2 能谱成像的原理	2
1.3 能谱成像的临床应用	6
1.3.1 物质分离	6
1.3.2 单能量图像	7
1.3.3 能谱曲线	8
1.3.4 有效原子序数	9
1.3.5 低剂量高清图像	10
1.4 展望	12
2 胸部	14
2.1 肺结节性质的鉴别	14
2.2 肺肿瘤边缘的确认	18
2.3 肺癌转移至纵隔内淋巴结的评估	21
2.4 肺癌粒子伪影去除及疗效评估	24
2.5 放射性肺炎的评估	26
2.6 气胸压缩肺组织的评估	28
2.7 艾滋病合并肺部病变的研究	30
2.8 食管癌转移至纵隔内淋巴结的评估	40
2.9 纵隔内肿瘤的鉴别	46
2.10 不同类型胸水的鉴别诊断	49
3 腹部	52
3.1 腹盆解剖结构的显示	52
3.1.1 腹膜结构的显示	52
3.1.2 胃肠道结构的显示	53
3.1.3 胆胰系统结构的显示	55
3.1.4 结肠肠壁结构的显示	57
3.2 肝癌的检出	58
3.3 小肝癌和小血管瘤的鉴别	62
3.4 单能融合图像	64

3.5 肝门区病灶的鉴别 66

3.6 胆囊阴性结石的检出 69

3.7 胆总管内可疑占位的鉴别 71

3.8 胰头癌伴转移的诊断与鉴别诊断 74

3.9 胰头癌与胰腺实性假乳头状瘤的鉴别诊断 79

3.10 胰腺胰岛细胞瘤的检出 84

3.11 肾上腺出血性囊肿和肾上腺良性肿瘤的鉴别 87

3.12 肾上腺良恶性病灶的诊断和鉴别诊断 90

3.13 肾脏出血性囊肿和肿瘤的鉴别 101

3.14 虚拟平扫 104

3.15 泌尿系结石的成分分析 107

3.16 胃癌化疗疗效评估 109

3.17 胃肿瘤鉴别 115

3.18 直肠炎与直肠肿瘤的鉴别 125

3.19 膀胱肿瘤的浸润范围测定 130

3.20 膀胱癌转移性淋巴结与非转移性淋巴结的鉴别 132

3.21 实质性脏器碘钙分离的应用 134

3.22 含脂肪病变的确定 137

4 心血管 140

4.1 复杂型先天性心脏病的低剂量成像 140

4.2 冠状动脉支架术后再狭窄的评估 144

4.3 冠状动脉造影低剂量成像 146

4.4 肺动脉 CTA 优化成像 148

4.5 肺栓塞的检测和随访 152

4.6 门静脉系统 CT 血管成像 156

4.7 肝门静脉血栓与癌栓的鉴别 159

4.8 布加综合征 163

4.8.1 布加综合征血管优化成像 163

4.8.2 布加综合征治疗前后血管评估 167

4.8.3 布加综合征门静脉血管显示 168

4.9 胃周动脉血管评估 171

4.10 腹部动脉血管及与肿瘤关系的优化显示 174

4.11 血管斑块的检出及成分分析 179

4.12 血管钙化斑块与对比剂分离 185

4.13 血管支架伪影去除 187

4.14 直肠占位与血管的关系 190

中英文对照索引 193

1

绪论

能量 CT (energy computed tomography, energy CT) 是利用物质在不同 X 射线能量下产生的不同的吸收来提供比常规 CT 更多的影像信息。能量 CT 成像的概念在 20 世纪 70 年代 CT 诞生时就被提出。从 70 年代到 80 年代能量 CT 的物理基础得到很好的研究。在 80 年代就已有早期双能减影的临床研究报告,之后由于成像技术限制的原因沉寂了多年。近十几年来随着 CT 技术在硬件和软件上整体发展和临床需求的增加,能量 CT 重新成为研究的热点。2000 年中期出现的双能减影使得 CT 能够实现基本的物质分离,2008 年能谱 CT 成像的出现为物质分离提供了定量分析、单能量成像和能谱曲线分析的功能,为临床应用和研究提供了更为先进的手段和工具。能量 CT 成像是 CT 发展的一个历史趋势。

能量 CT 成像的发展到目前为止经历了双能减影 (dual energy subtraction) 和能谱成像 (spectral imaging) 2 个阶段,前者为图像空间处理,后者为原始数据空间,或称投影数据空间处理。根据成像方法能量 CT 成像可分为以下几种:①单球管高低电压两处扫描以实现双能减影(双扫描);②双球管高低电压不同向扫描以实现双能减影(双球管);③单球管双能瞬时切换以实现能谱成像。双球管和双扫描的方式虽然可以实现能量 CT 成像的研究,但是由于这两种成像模式均不具备足够的能量时间分辨率 (energy temporal resolution),双能量数据不具有 consistency,因而只能实现双能减影。然而双能减影也存在潜在的问题,其中一个问题是由于能量时间分辨率不足所引起的运动伪影 (motion artifacts)。这种伪影不但出现于心脏等快速运动的器官中,也会出现在器官的蠕动和呼吸中。减影的效果使得这种运动伪影更加突出。另一个问题是硬化效应 (hardening effect),硬化效应是 CT 与生俱来的问题,是一个非线性的问题。由于减影图像是由低电压和高电压的图像组合而成,而低电压的图像往往带有较严重的硬化效应,这样使得组合的减影图像也存在硬化效应。由于运动伪影和硬化效应的干扰,图像空间的双能减影图像中存在诸多不准确性和不确定性,在临床应用中受到很多限制。而能谱 CT 成像的诞生可以有效地弥补双能减影的这些不足。

1.1 概念

能谱 CT 成像 (spectral CT imaging) 是指通过单球管高低双能 (80 kVp 和 140 kVp) 的瞬时切换 (<0.5 ms 能量时间分辨率) 获得时空上完美匹配的双能量数据,在原始数据空间实现能谱解析。

能谱 CT 通过进行高能量与低能量两组数据的瞬时同时采样,能够完全冻结患者的运动;通过单源瞬时同向 (三同:同时、同向、同源) 双能采集获得的双能数据实现数据空间能量解析,能够消除硬化伪影带来的 CT 值“漂移”;能够根据 X 射线在物质中的衰减系数转变为相应的图像,有利于特异性的组织鉴别。高能和低能采集的剂量均在美国放射学会 (ACR) 推荐的剂量安全范围内,保证患者能够在最低的剂量下完成扫描。通过应用能谱成像的重建/后处理引擎与宝石能谱成像 (gemstone spectral imaging, GSI) 浏览器,能谱 CT 可以为用户提供多参数成像:常规的混合能量图像 (polychromatic energy image) (kVp, peak kilovoltage)、基物质图像 (material decomposition image)、单能量图像 (monochromatic energy image) (keV, kiloelectron volts) 及有效原子序数图像。GSI 浏览器还能临床医生提供许多可视

化的分析工具,为进一步准确性,快速诊断提供更多的信息。

(吕培杰 高剑波)

1.2 能谱成像的原理

能谱成像^[1]的实现首先是基于坚实的物理基础。CT 是通过测量 X 射线在穿透物体中的吸收来进行成像的。X 射线通过物质的衰减能够客观反映 X 射线的能量,X 射线经过物质后产生的光电效应(photoelectric effect)与康普顿效应(compton effect)^[2]共同决定了物质的衰减曲线(图 1.1)。因此任何物体对 X 射线光子的质量吸收系数(mass absorption coefficient)[$\mu(E)$]可以用以下的公式表达:

$$\mu(E) = af_{pe}(E) + bf_c(E) \tag{1.1}$$

其中 $f_{pe}(E)$ 和 $f_c(E)$ 分别为质量吸收函数中光电效应和康普顿散射的贡献;a 和 b 为常量。

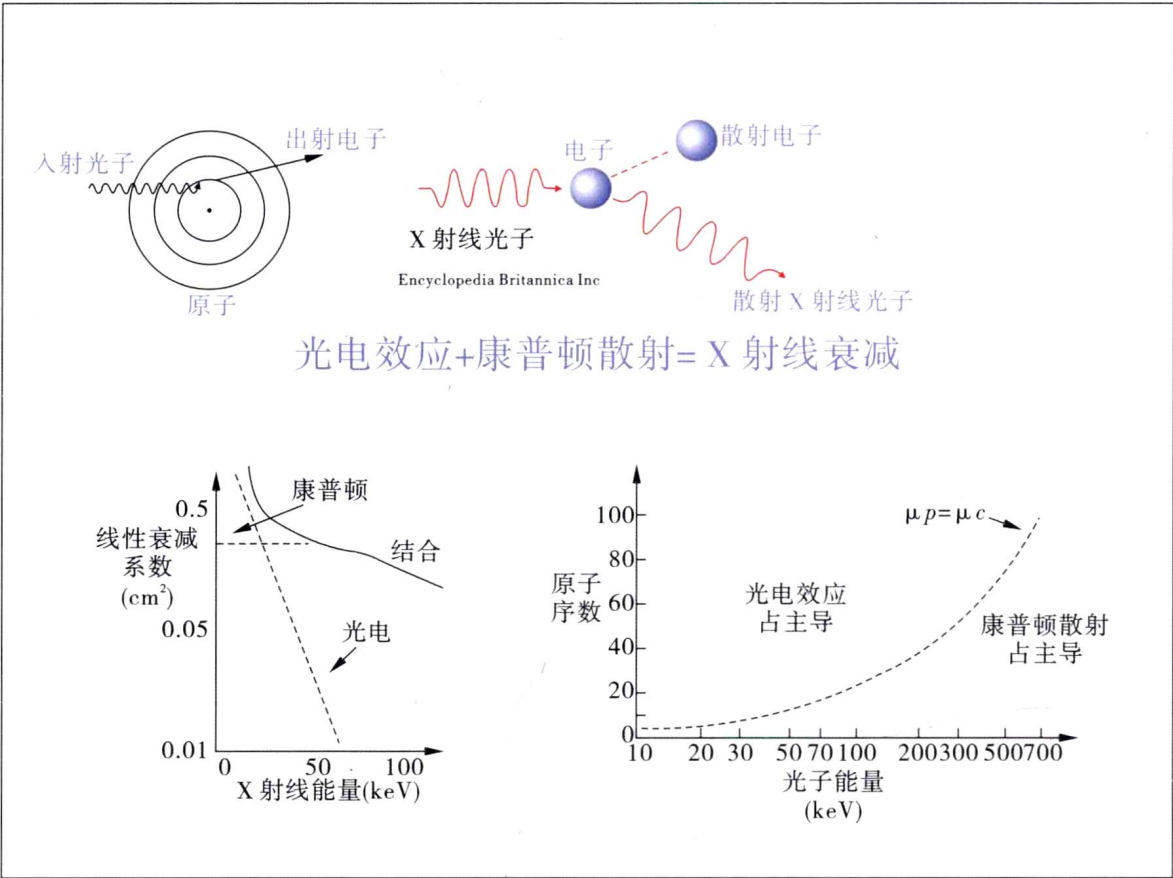


图 1.1 物质的衰减原理

注解:入射光子的能量除一次透射射线外,还包括散射和吸收。散射是指仅使射线的传播方向发生改变的过程,包括康普顿散射与瑞利散射。吸收是一种能量的转换过程,包括光电效应等。由于射线穿透物质时,与物质发生这些相互作用而导致强度减弱。X 射线通过物体后所产生的衰减曲线则是由光电效应和康普顿散射所决定的。

从这个公式出发,经过简单的数学转换我们即可得出以下的公式:

$$\mu(E) = c_1\mu_1(E) + c_2\mu_2(E) \tag{1.2}$$

其中 $\mu_1(E)$ 和 $\mu_2(E)$ 分别是 2 个物质的质量吸收系数。也就是说,任何一个物质的质量吸收系数可以用任何 2 个物质(基物质)的质量吸收系数来表达^[3]。比如说,骨的衰减曲线可以由碘和水的曲线来代

表(图 1.2)。

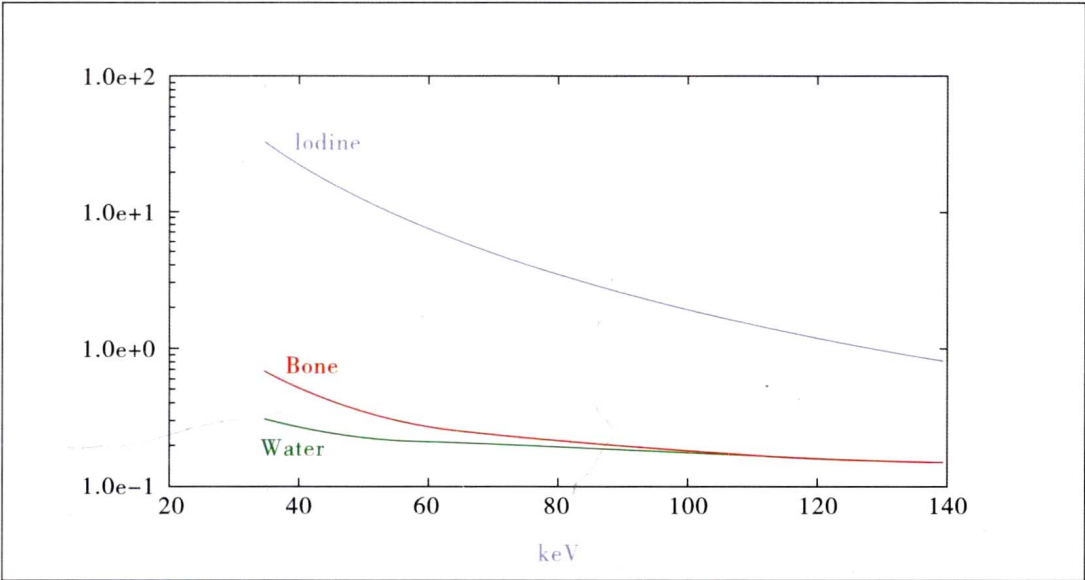


图 1.2 常见的物质衰减曲线

注解:将水(Water)和碘(Iodine)选择作为基物质对,计算水和碘的质量吸收系数随能量变化的关系,经过数学转换,可计算出感兴趣物质(Bone)在各个能量点中对 X 射线的吸收。

常规的 CT 成像中,我们得到的是通过物体后衰减的 X 射线光束,通常用 kVp(千伏电压)的峰值(图 1.3),来表示最大的光子能量,比如 80 kVp 或 140 kVp 来定义 X 射线束的能量。当 X 射线光束经过人体时,能量较低的 X 射线容易吸收,而能量较高的 X 射线较易穿透,在射线传播过程中,平均能量变高,射线逐渐变硬,从而产生线束硬化伪影(beam hardening artifact)。硬化伪影会产生物质 CT 值的“漂移”,这种漂移可以出现在一个病人的同一个扫描野中,也会出现在不同病人之间。

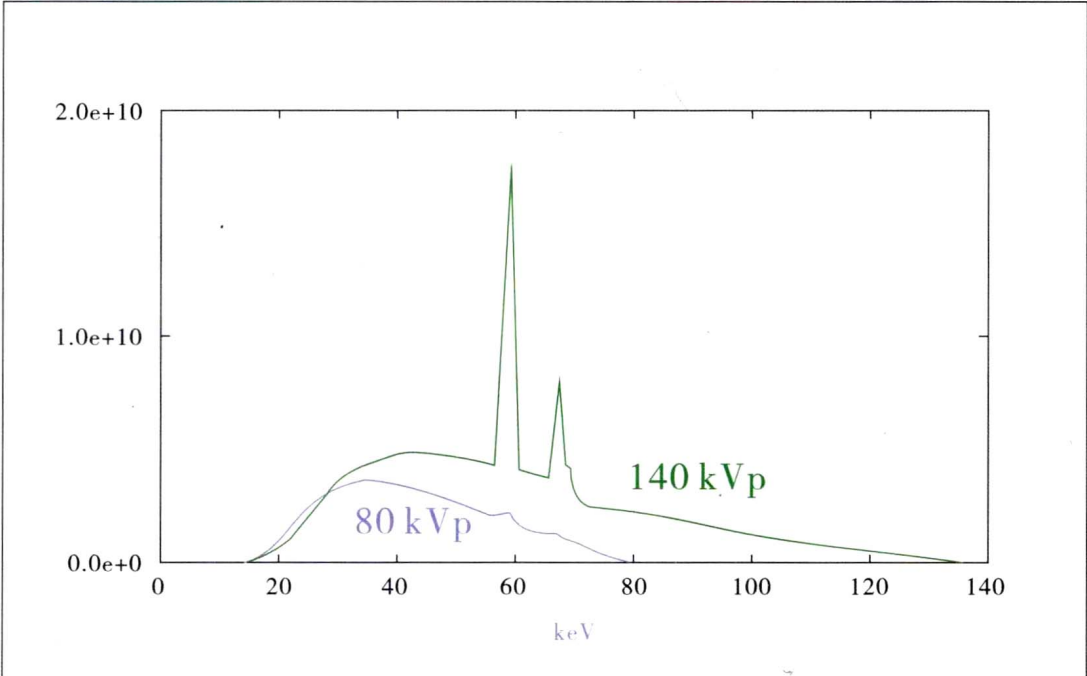


图 1.3 常见的 X 射线束质量的定义(kVp:千伏电压的峰值,表示最大的光子能量)

注解:80 kVp 和 140 kVp 指包含一组单光子能量光束的混合能量光束。

X 射线通过物质的衰减能够客观反映 X 射线的能量;X 射线经过物质时产生的光电效应与康普顿