

给小白鼠拍彩照 ——谈谈能谱CT

李默涵

(中国科学院高能物理研究所 100049)

CT即计算机断层成像(computer tomography),是一种利用X射线良好的穿透能力进行工作的无损检测设备。也就是说,它可以在不破坏样品的前提下对其内部的三维结构进行探测。如果你是一位思维敏捷的盲盒爱好者或赌石玩家,我猜你现在也许会有一些激动。不过我还是得说,CT的这一能力主要是服务于临床诊断、工业检测和科学研究等领域。自从1972年Godfrey Hounsfield研制成功首台CT以来,对CT技术的改进就从未停止过。可以说,正是半个多世纪以来CT成像效果的巨大进步奠定了它在诸多领域不可撼动的地位。近年来,CT领域再次迎来了一场变革,这场技术变革将使CT的成像能力发生质的飞跃。为了更好地解释这一点,还需要从CT的工作原理说起。

在CT成像过程中,球管发出的X射线穿透待测样品后被另一侧的探测器接收。穿过物体的X射线在强度上会发生衰减,而衰减的程度与样品的结构密度有关。此外,扫描时球管和探测器还会围绕样品进行旋转(也可以是样品本身进行旋转),就好像是用X射线探测器这个火眼金睛从各个方向来观察物体。探测器采集到的数据会被输入给专门的重建算法,后者会把包含在X射线衰减情况中的样品结构信息恢复出来,并显示成断层图像,这就是CT成像背后的原理(如图1所示)。另一方面,球管产生的X射线有着不同的波长或者说能量,类似于阳光中包含了不同颜色的光。传统CT没有办法识别这些不同能量的X射线成分,就像是用黑白相机来拍摄照片一样。这会导致很多时候传统CT不是对样品内部的不同成分区分不开,就是对采集

者感兴趣的部分探查不清,或者就算看见了也无法判断是什么成分。更糟糕的是,传统CT的图像还受到射束硬化现象的影响,在图像中形成伪影,给阅片带来干扰。这种黑白相机式的工作机制成为了限制CT成像效果的一大瓶颈。为了克服这些问题,相关领域的专家进行了长期的努力。



图1 CT成像原理

其实早在CT被发明后仅仅几年,就有研究人员提出了对X射线的不同成分进行选择性的采集的方案,以提升对物质成分的分辨能力^[1]。这一方案的思路类似于用彩色相机来给样品拍照。奈何当时的技术条件尚不成熟,这一超前想法的优势没能得到充分的发挥。在此后的几十年间,不同的方案被尝试和比较,试图实现这种X射线的彩色相机,比较有代表性的包括双源CT、管电压快速切换和双层探测器等。然而直到近些年,光子计数探测器(photon counting detector)技术的逐渐成熟才让制造

性能优异的彩色CT成为可能^[2]。彩色CT——学名能谱CT——在物质分辨能力、图像质量、辐射剂量等方面都对传统CT形成了降维打击,成为了CT领域发展的大趋势。正如彩色相机取代了黑白相机那样,在未来能谱CT也将取代传统CT的地位。

不难想象的是,基于光子计数探测器的能谱CT(PCCT)近年来已经成为众多医学影像设备厂商竞相追逐的圣杯——相关企业不是满世界高调发布自己的PCCT新产品,就是迫不及待地宣称自己的PCCT正在赶来的路上。从使用情况来看,新一代的能谱CT在图像质量和辐射剂量方面都有着亮眼的表现,在早期癌症、心血管疾病、脑部疾病、肺部疾病和痛风等疾病的诊断,以及治疗效果评估等方面取得了优异的效果^[3,4]。

不仅是在医学领域,针对实验室应用的高端科研仪器领域也开始出现了能谱CT的身影。作为研究实验动物身体结构的利器,小动物CT在生命科学基础研究、临床前研究、新药开发、生物材料研究和仿生学研究等领域一直都有着广泛的应用。传统的黑白CT在动物影像应用中同样存在不少痛点:软组织的对比度不够高,时常没法区分肿瘤和正常组织,要不就是错过了动物体内具有重要生理学意义的棕色脂肪;做增强扫描时难以区分造影剂和骨骼;辐射剂量太大,不利于实验动物的存活;图像质量不好,伪影遮盖了重要的解剖学结构……而

能谱CT则可以很好地解决上述问题。

软组织分辨一直是传统CT的短板。前面说过,CT成像利用了X射线良好的穿透能力。但理想的CT扫描也不能一味地追求穿透,还需要让X射线对不同部位的穿透效果有所差异,这才能够在断层图像上对其进行分辨。然而软组织在X射线面前实在是不堪一击,无论你是肌肉、脂肪还是腺体、肿块,在X射线的照射下统统被打得透亮,互相之间看不出什么区别。如果你无法利用实验室里仅有的传统CT获得更高的软组织对比度,你无需怀疑自己的操作水平,因为别人也不行。但假如你有一台能谱CT,情况就会很不一样。能谱CT可以识别出对软组织区域来说对比度更高的那部分X射线信号,并加以有效利用,从而更好地对不同的软组织进行区分(如图2所示)。

增强扫描是小动物CT成像经常用到的技术,其原理和医院里的X射线钡餐造影一样。普通的X射线透视检查难以看清消化道的结构,要想检查消化道的病变需要病人事先喝下硫酸钡混悬液。这些混悬液会附着在消化道的内壁上,并在X射线透视图像上显现出明显的信号,从而实现了对消化道部位的增强。为了了解实验动物的血管结构和血流分布情况,也可以将造影剂注射到动物的血管中再进行CT扫描。这种方式虽然能够让血管在图像中清晰地予以展现,但对于传统CT来说,很难有效

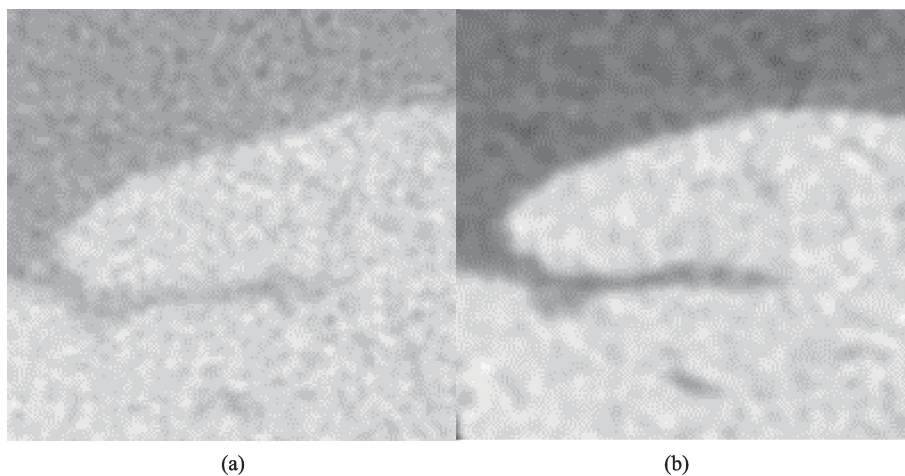


图2 CT软组织成像效果对比 (a) 传统CT;(b) 能谱CT

地把经过造影剂增强的血管和附近的骨骼区分开来,这无疑会对后期的研究带来干扰。所以CT血管造影一般会在注射造影剂前后各做一次扫描,并用增强后的图像减去增强前的图像。因为两组图像中动物的解剖结构相同,这么一减之后,剩下的可不就是造影剂的分布了吗?然而事情没那么简单。两次扫描之间动物的身体往往不会完全静止不动。临床诊断中做CT血管造影的病人尚且不能保证姿态不变,何况是对那些处于麻醉状态,没有任何依从性可言的实验动物来说呢。此外,两次扫描就意味着双倍的辐射剂量和更长的麻醉时间,这些都不利于实验动物的存活。而能谱CT则省掉了这些麻烦。借助其特有的物质分解技术,能谱CT可以通过一次扫描便区分出造影剂和骨骼,既排除了后者的干扰,也很好避免了位置匹配问题和动物存活问题。在许多情况下,能谱CT还可以捕捉到造影剂的元素指纹信息,从而更好地排除其他杂质所带来的干扰。图3所展示的便是能谱CT对实验动物进行增强成像的效果。用作造影剂的钆元素能够在CT图像上产生明显的信号。将其注入动

物血管后再利用能谱CT进行成像,可以分别得到动物的骨骼、软组织和造影剂的分布。从钆的分布情况可以看出,造影剂集中的位置正好是心脏和肝脏这两个血流丰富的器官。

传统CT所能分辨的是物质的密度,所以在其图像中骨骼最亮,肌肉就暗一些,空气则是黑色。然而很多时候研究人员不光想要了解样品的密度分布情况,还想更进一步,知道物质的具体成分。传统CT在面对这一需求时总是束手无策,毕竟不同种类的物质具有相似密度的情况太多了。而能谱CT这部彩色相机既可以获得样品的密度信息,还可以凭借专门的算法计算出样品各处的有效原子序数(effective atomic number)和电子密度,从而更好地推测物质的种类。图4是利用动物离体标本进行有效原子序数与电子密度成像的结果。通过能谱CT的扫描,动物的骨骼和肌肉等不同组织在两幅图像中呈现出不同的变化规律,并且这些规律单凭密度是无法推测的。也就是说,能谱CT获得了比传统CT更加丰富的物质种类信息。这一能力无论对结石成像、尿酸结晶成像、脂肪肝评估、肿瘤成像,还

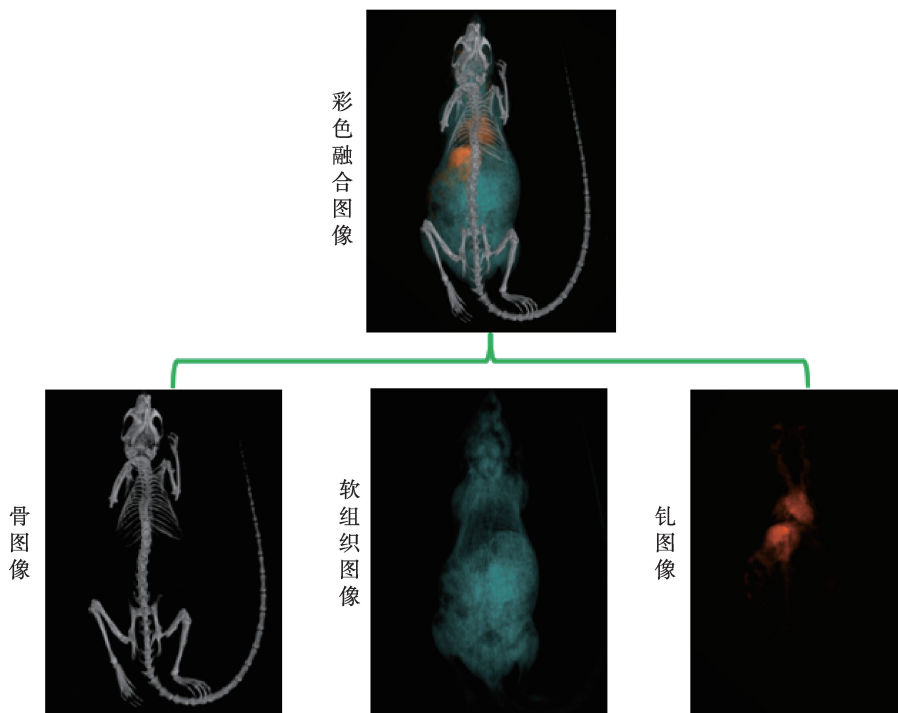


图3 能谱CT钆造影剂增强成像

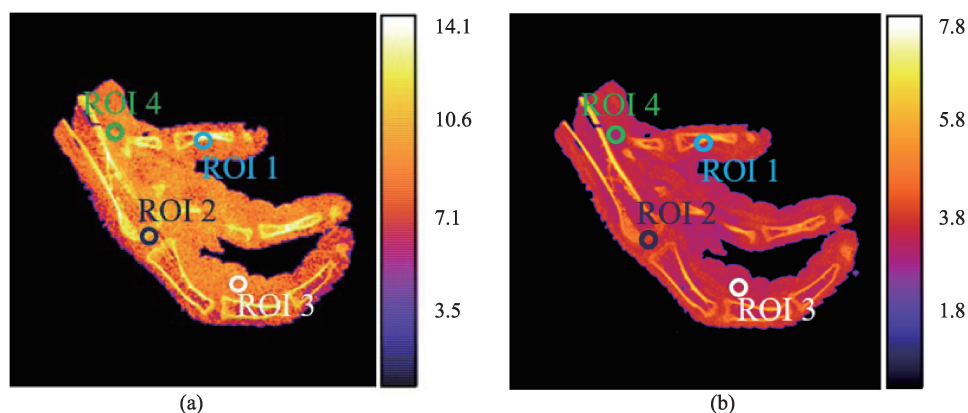


图4 动物离体标本能谱CT成像 (a)有效原子序数图;(b)电子密度图

是其他具有隐匿性的病灶成像都是有效的武器。

看完上面的例子,想必你一定对采集这些图像的设备感到好奇。事实上,这些案例全都来自中国科学院高能物理研究所(简称高能所)研制的小动物能谱CT(图5)。高能所CT研制团队在自己的领域里耕耘多年,有着丰富的设备开发经验。制造的各类CT设备被用于生命科学、芯片检测、精密机械检测、文物研究和古生物化石研究等领域,在高校、科研院所和企业都能看到它们的身影。能谱CT作为CT发展的大趋势,很早就引起了高能所CT研发团队的注意,并成为团队重点攻克的目标。经过多年的不断努力,项目团队研制出了全球首台针对小型实验动物活体显微成像的能谱CT。这台设备不仅让外国企业在相关市场上的垄断在很短的时间内就成为明日黄花,更是在多项主要性能指标上超越



图5 高能所研制的小动物能谱CT

了竞争对手。研制人员认真分析了生命科学研究者在使用小动物CT时所面临的种种不便,如物质分辨能力不足(怎么才能证明这些高亮的区域是我

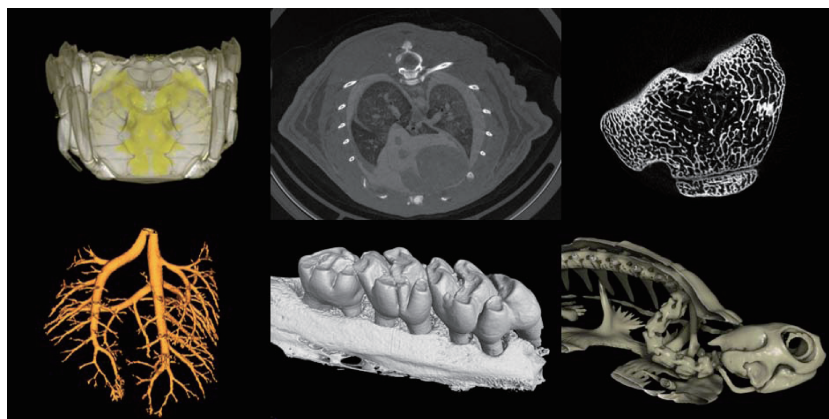


图6 小动物能谱CT成像案例

注射的造影剂,而不是别的干扰物质?)、空间分辨率不够(老鼠的牙齿就够小的了,但我还想看见老鼠牙齿上的洞~)、实验动物难以存活(辐射剂量太大,把我的老鼠照死了,要是每次成像都死一只老鼠,我的整个试验都可能会泡汤……)等。在此基础上,他们为生命科学研究的动物成像工作量身打造了这样一台小动物能谱CT,着重解决上述问题。自从其研制成功以来,在整机销售和承接对外检测服务两个业务上都取得了令人满意的成绩。无论你研究的是活体动物还是离体标本,无论样品是小白鼠还是大闸蟹,无论用途是生理学研究还是仿生学研究,都可以从这台新型能谱CT上获得与传统CT不一样的结果(图6)。2021年,中国体视学学会将当年度的科技进步一等奖颁发给了高能所

的CT研制团队,以表彰他们在小动物能谱CT研制中所取得的成绩。

参考文献

- [1] Robert E. Alvarez, Albert Macovski. Energy-selective Reconstructions in X-ray Computerized Tomography [J]. Physics in Medicine and Biology, 1976, 21(5): 733-744.
- [2] Prabhakar Rajiah, Anushri Parakh, Fernando Kay, et al. Update on Multienergy CT: Physics, Principles, and Applications [J]. Radio Graphics, 2020, 40(5): 1284-1308.
- [3] Thomas Flohr, Martin Petersilka, Andre Henning, et al. Photon-counting CT review [J]. Physica Medica, 2020, 79: 126-136.
- [4] Cynthia H. McCollough, Kristen Boedeker, Dianna Cody, et al. Principles and applications of multienergy CT: Report of AAPM Task Group 291 [J]. Medical Physics, 2020, 47(7): e881-e912.



她用物理的情趣,引我们科苑揽胜;
她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

科技创新、科学普及是实现创新发展的两翼。《现代物理知识》旨在普及科学知识、弘扬科学精神,设有物理知识、物理前沿、科技经纬、科学源流、教学参考、中学园地、科学书屋、科学正听和科苑快讯等栏目。诚邀在物理学及相关领域工作的科技、教育和科普等方面的专家学者,以公众喜闻乐见的文字,深入浅出、图文并茂地与读者分享现代物理知识、科学前沿成果和大科学装置进展等精彩故事,共襄“两翼齐飞”之盛举。投稿时请将稿件的Word文档发送至本刊电子邮箱 mp@mail.ihep.ac.cn, 并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

2023年《现代物理知识》每期定价15元,全年6期90元,欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者,请按下列价格付款:

2010~2021年单行本每期10元;2022年单行本每期15元;2010~2019年合订本每本60元。

订阅方式

(1) 邮局订阅 邮发代号:2-824。

(2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识**年**期”)

名称:中国科学院高能物理研究所

开户行:工商银行北京永定路支行

账号:0200004909014451557

(3) 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;

(4) 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊;淘宝购买链接:



淘宝网购刊



微信购刊