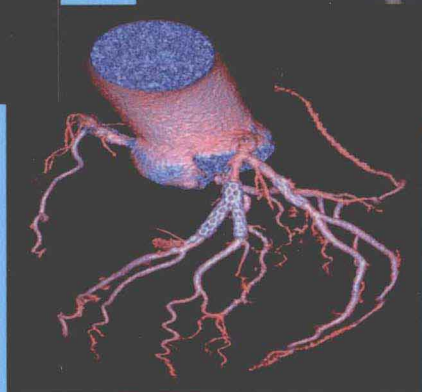
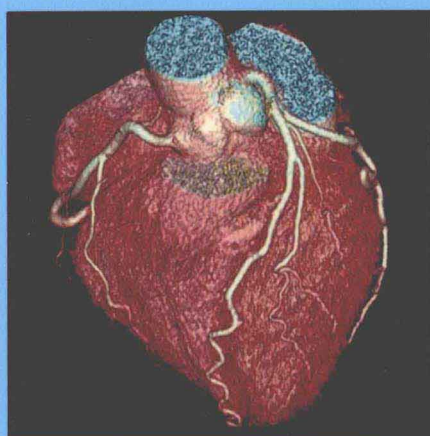


Clinical Application of Spectral Cardiac CT

心脏能谱CT 临床应用

◎ 主 编 张立仁

◎ 副主编 范丽娟



人民军医出版社

PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS

心脏能谱 CT 临床应用

Clinical Application of spectral Cardiac CT

主 编 张立仁

副主编 范丽娟

编 者 (以姓氏笔画为序)

史轶伦	付东海	刘 建	刘 喆	刘世辰
刘艳平	刘华阳	刘军波	孙凤伟	李 旭
李 硕	吴学胜	应援宁	张计旺	张立仁
张津瑀	张晓浩	陆 伟	范丽娟	周 伟
徐冬生	董 智	管延芳		



人民军医出版社

PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS

北 京

图书在版编目 (CIP)数据

心脏能谱CT临床应用/张立仁主编. —北京: 人民军医出版社, 2013.10
ISBN 978-7-5091-7020-5

I. ①心… II. ①张… III. ①心脏病—能谱—计算机X线扫描体层摄影—诊断学 IV. ①R816.2

中国版本图书馆CIP数据核字 (2013) 第221948号

策划编辑: 高爱英 文字编辑: 刘新瑞 责任审读: 吴 然
出版发行: 人民军医出版社 经销: 新华书店
通信地址: 北京市 100036 信箱 188 分箱 邮编: 100036
质量反馈电话: (010) 51927290; (010) 51927283
邮购电话: (010) 51927252
策划编辑电话: (010) 51927300—8172
网址: www.pmmp.com.cn

印刷: 北京天宇星印刷厂 装订: 恒兴印装有限公司
开本: 889mm × 1194mm 1/16
印张: 12 字数: 236 千字
版、印次: 2013 年 10 月第 1 版第 1 次印刷
印数: 0001—2000
定价: 158.00 元

版权所有 侵权必究
购买本社图书, 凡有缺、倒、脱页者, 本社负责调换

内容提要

本书在介绍心脏成像基础知识和能谱成像技术以及心脏能谱技术优势的基础上,对低辐射剂量、低对比剂冠状动脉图像和高心率冠状动脉成像、冠状动脉斑块、管腔狭窄病变、支架术后、旁路移植术后和心肌病变成像、临床胸痛三联症筛查成像、小儿复杂先天性心脏病的容积螺旋穿梭技术成像和其他心脏病例成像进行了详细讲解。书后列出近年来与心脏能谱成像有关的参考文献,附录中列出了各种心脏成像(包括能谱成像)的冠状动脉扫描方案,并附有冠状动脉扫描患者知情同意书及扫描流程和注意事项供读者参考。本书可以作为从事 CT 工作,特别是心脏 CT 工作人员的专业参考书,也可供临床心脏内、外科专业人员及医学院校影像专业师生和相关专业工作者阅读参考。

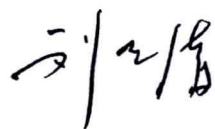
序 一

近年来医学影像发展迅速，尤其 CT 设备、技术和临床应用的进展引人注目。能谱 CT 作为 CT 领域的一项新技术，随着其基础研究的深入，临床应用的逐步进展受到关注，同时，对于冠心病的检诊，冠状动脉 CT 成像亦快速发展，且与 CT 能谱技术结合的能谱 CT 冠状动脉成像也已有效地进入临床。但值得注意的是 CT 应用的辐射剂量问题应引起充分重视，尤其对儿童及生育期妇女。众所周知，各种影像学技术，包括 CT、MRI、超声、核医学及普通 X 线和导管法心血管造影均各有优势和不足，仍应重视临床应用中的综合分析和优选应用，为广大病患提供影像学优质服务。

值此时刻，由泰达国际心血管病医院放射科张立仁主任医师担任主编，并组织科室专家、专业人员，以该院的实践经验为基础，参考新文献进展，编写的《心脏能谱 CT 临床应用》一书即将问世。迄今，国内各种影像学包括 CT 的专著已出版频多，但尚未见“心脏能谱 CT”的专著。本书共分 11 章，讲述能谱 CT 心脏成像技术及临床应用，共约 20 万字，图片 600 多张，可谓图文并茂，是一部反映能谱 CT 及其在心脏应用新进展的专著。祝愿并相信本书的出版，对推动我国能谱 CT 以及医学影像学的发展将会起到积极作用。

中国工程院院士

中国医学科学院阜外心血管病医院教授



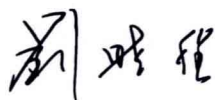
2013 年 6 月

序 二

先进的 CT 设备、放射同仁的努力与放射影像学的不断规范、患者日益增长和临床医师的认可使得冠状动脉 CT 成像技术在我院蓬勃开展，并在临床工作中发挥了重要的作用。回顾 2003 年在这所心血管疾病专科医院使用冠状动脉 CT 成像初期，当大家在工作站屏幕上看到 360° 旋转的冠状动脉图像时兴奋不已，对每例患者的图像都精雕细刻。因此，当年本院放射科即获得了北美放射年会心脏最佳图像质量奖。冠状动脉 CT 成像技术近年来发生了诸多革命性的变化，如探测器材料的革新、覆盖范围的加大、与能谱成像匹配的高压发生器的改革、球管能力的提高、扫描速度的加快、心脏能谱扫描的实现、图像重建算法的进步和图像处理工作站性能的提高，所有这些变革无疑进一步提高了冠状动脉 CT 检查的成功率、准确性、可靠性和便捷性。

我院放射科经多年的努力工作，在低辐射剂量冠状动脉 CT 成像、高心率下冠状动脉 CT 成像、支架高分辨 CT 成像、冠状动脉能谱（去钙化冠状动脉病变精细分析、斑块成分分析）成像和小儿复杂先天性心脏病动态 CT 成像上均取得了明显进步，我们愿意把自己的经验、体会与同道分享。相信大家在阅读本书后会对 CT 在心血管领域的应用和进展有更深刻的理解与认识。

CT 是心血管疾病诊治中极其重要的“侦察兵”，是临床医师的“眼睛”和“准星”。高技术含量的设备必然会促进医疗、科研、教学的进步，这是设备厂家与医院互惠共赢的结果。在分享高端 CT 精美图像的同时，我会鼓励本院放射科专家们继续努力，进一步与心脏内、外科和其他医技部门同道沟通，进一步挖掘设备潜力，以积累更多的临床经验，更规范化地应用好这项技术，探索解决更多的难题，使 CT 在心血管疾病诊治中发挥更大的作用，从而最大限度地造福于广大民众。



泰达国际心血管病医院院长

2013 年 6 月

前言

2004 年底全球首次推出 64 排 CT，迅速在心脏和冠状动脉成像上得到应用，至 2008 年底已在临床上取得了令人瞩目的进展，同时确立了 64 排 CT 在冠状动脉成像中的地位。其后各个著名的设备厂家对 CT 心脏技术制订了各自的策略，走不同的发展之路，都将更高端的设备推向市场，被称之为“后 64 排 CT”时代。

CT 已经成为心脏大血管疾病临床中筛查、诊断、随访的一个重要手段，64 排（层）螺旋 CT 冠状动脉成像也已经在冠心病的诊疗中广泛应用。当前，能谱 CT 对冠心病的潜在价值正在得到大家的关注。心脏能谱 CT 的成像、重建、诊断模式与常规 CT 有所不同，只有充分理解其基本原理、影像表现、临床应用，才能使这一手段在临床发挥其应有的作用。

作为心血管疾病专科医院，我们从 2003 年即开始开展冠状动脉 CT 成像研究，并于 2010 年下半年开始了“高分辨 CT（即 Discovery HD 750）”的使用，至 2012 年底累计的冠状动脉 CT 成像病例达 15 000 例以上。能谱冠状动脉成像的问世又将冠状动脉的应用推向了一个新的高峰，能谱图像已在斑块、血管病变、心肌血流成像方面显示出更广泛的应用潜力。我们将多年的临床实践经验编撰总结成书，以展示冠状动脉 CT 成像的临床应用价值。

本书重点介绍后 64 排高端 CT 设备在控制冠状动脉辐射剂量、应用低剂量对比剂成像、实现高心率冠状动脉成像、高分辨支架图像、冠状动脉粥样硬化斑块能谱分析、能谱冠状动脉去钙化、能谱胸痛三联症筛查、复杂先天性心脏病动态容积螺旋穿梭扫描方面的效果，有助于读者详尽理解冠状动脉成像的临床应用。另外，对做好冠状动脉 CT 成像的流程、各种扫描的参数与序列也进行介绍，有助于读者结合实际解决工作中的问题。本书全部资料均来自本院临床实践，部分病例有血管造影作为“金标准”对照，理论融入实践，图文并茂，加深读者理解。

能谱 CT 冠状动脉成像目前仍处于临床应用早期，还有诸多问题需要深入探讨解决，对于本书的不足之处，恳望读者批评指正。

张立仁

泰达国际心血管病医院

2013 年 6 月

目 录

/ 第 1 章 心脏成像技术	1
第一节 心脏 CT 技术的发展历史	1
第二节 心脏 CT 性能的重要指标	4
第三节 冠状动脉能谱 CT 的技术特点	7
/ 第 2 章 冠状动脉低辐射剂量、低浓度对比剂成像	19
第一节 冠状动脉低辐射剂量成像要点	19
第二节 冠状动脉低浓度对比剂成像要点	21
第三节 病例分析	24
/ 第 3 章 高心率患者冠状动脉成像	37
第一节 高心率冠状动脉成像的基础知识	37
第二节 SSF 技术在 CT 冠状动脉成像中的应用	39
/ 第 4 章 冠状动脉斑块成像	47
第一节 CT 征象及诊断要点	47
第二节 病例分析	49
/ 第 5 章 冠状动脉管腔病变成像	57
第一节 基本知识概述	57
第二节 CT 征象及诊断要点	57
第三节 病例分析	58
/ 第 6 章 冠状动脉支架成像	75
第一节 基本知识概述	75
第二节 高分辨 CT 支架成像的研究	75
第三节 支架 CT 图像诊断要点	79

第四节 病例分析.....	81
/ 第 7 章 冠状动脉旁路移植血管成像	95
第一节 基本知识概述.....	95
第二节 CT 征象及诊断要点	95
第三节 病例分析.....	96
/ 第 8 章 冠心病心肌病变成像	109
第一节 基本知识概述.....	109
第二节 CT 征象及诊断要点	109
第三节 病例分析.....	110
/ 第 9 章 胸痛三联症	123
第一节 基本知识概述.....	123
第二节 CT 征象及诊断要点	123
第三节 病例分析.....	124
/ 第 10 章 复杂先天性心脏病容积螺旋穿梭成像	133
第一节 基本知识概述.....	133
第二节 病例分析.....	138
/ 第 11 章 CT 成像在其他心脏疾病中的应用	147
/ 参考文献.....	165
/ 附录.....	169
附录 A 各种心脏 CT 成像扫描协议.....	169
附录 B CT 冠状动脉造影检查知情同意书.....	182
附录 C 冠状动脉 CT 检查流程及患者注意事项.....	183
/ 索引	184

第 1 章 心脏成像技术

心血管疾病已经成为人类健康的最大威胁之一。心血管 CT 凭借其无创性、便捷性、高效的阴性预测值和敏感性逐渐成为心血管疾病的必备影像学检查手段。

随着技术的不断进步，心脏 CT 的应用范围也在不断扩大，不仅能为评价冠状动脉的解剖和生理提供检查，而且还可以评价心脏的结构、功能和心肌的活性。在这些新兴心脏 CT 技术当中，冠状动脉能谱 CT 是最先进的技术平台。通过众多的创新性技术，冠状动脉能谱 CT 不仅实现了自然心率高分辨心脏成像、低剂量心脏成像，而且将 CT 能谱成像应用于心脏和冠状动脉，实现了钙化的去除、心肌血供的定量测量和斑块的精确定性。

本章简要地回顾了心脏 CT 的技术发展历史和心脏 CT 性能的重要评价指标，着重阐述冠状动脉能谱 CT 平台的各项技术特点，为读者深刻理解后续章节所论述的临床应用奠定基础。

第一节 心脏 CT 技术的发展历史

20 世纪 70 年代，Godfrey Hounsfield 博士发明了第一台 CT 扫描机，并且进行了临床头部扫描，由此获得 1979 年诺贝尔医学和生理学奖。他在获奖感言中提到，冠状动脉检测可能是 CT 下一个有前途的发展领域，在特殊扫描条件下有可能检测到冠状动脉。此后，CT 经过几次技术革命，在机器设备、技术方法、科学研究和临床应用等各方面都有了飞速的发展。

诞生于英国的第一个 X 线 CT (EMI-Scanner) 只能做大脑断层扫描，而且每个影像扫描一次需要 4min，再传输完成重建成像需要 7min。其机械性运动属于平行旋转式，一次转 1° ，总共是 180° 。由于采用笔形 X 线束和只有 1 ~ 2 个探测器，所采数据少，所需时间长，图像质量差 (图 1-1)。

Godfrey N.Hounsfield

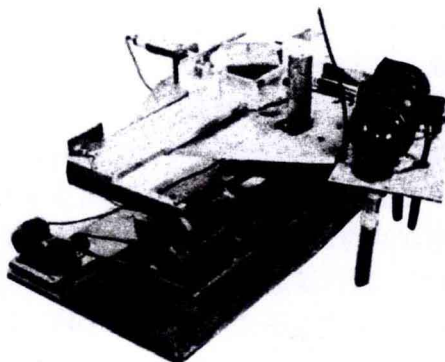


图 1-1 Hounsfield 博士的第一台 CT 及第一张头扫描图像

单排螺旋 CT 的发明是由于滑环技术的引入,实现了从层面扫描到容积扫描的飞跃,使以往需 10 ~ 30min 的检查在 1min 内即可完成。滑环技术以铜制的滑环和碳刷接触导电,实现单向连续旋转扫描,一次屏气即可完成整个需要检查的范围,而不必分开扫描。

由于心脏是一个始终处于自主运动的器官,因此心脏检查曾经是非螺旋 CT 和单排(层)螺旋 CT 临床应用的盲区。因为非螺旋和单排(层)CT 的时间分辨率对于心脏搏动来说很低,不能完成心脏搏动冻结进行成像。20 世纪 80 年代初,出现了电子束 CT,使冠状动脉的 CT 成像得以实现,当时的电子束 CT 大多数只做一些无创性的冠状动脉钙化评价,其他的应用如评估冠状动脉的狭窄等还是非常有限的。

电子束 CT (EBCT) 的概念被 Boyd 等进一步扩充,并由此产生了商用产品 Imatron (GE 医疗) 扫描机(图 1-2A)。在 EBCT 中,偏转磁场控制电子枪发射出电子波束,轰击放置在机架底端的半圆形阳极靶。通过这种方式产生的轫致辐射穿过病体,被放置在病人上方的半圆弧形探测器阵列接收。与传统 CT 不同的是,EBCT 完全不需要机械运动,这使得在很短的时间内(最少 0.05s,通常实践中 0.1s)完成扫描成为可能。EBCT 第一次实现了忽略心脏运动的影响而得到相对清晰的心脏和大血管的图像。

图 1-2B 是 EBCT 系统上得到的急性主动脉夹层 Stanford A/DeBakey I 型图像。在出现症状 8h 后用 0.1s 的扫描,这幅图像上能够清楚地看到升主动脉内膜的撕裂口(箭头)。EBCT 曾经安装在主流的心血管研究中心,随之而来的还有各种的临床应用,例如钙化积分。EBCT 使 CT 心脏影像第一次达到了临床应用的标准,对于 CT 心功能评价也具有非常重要的价值。

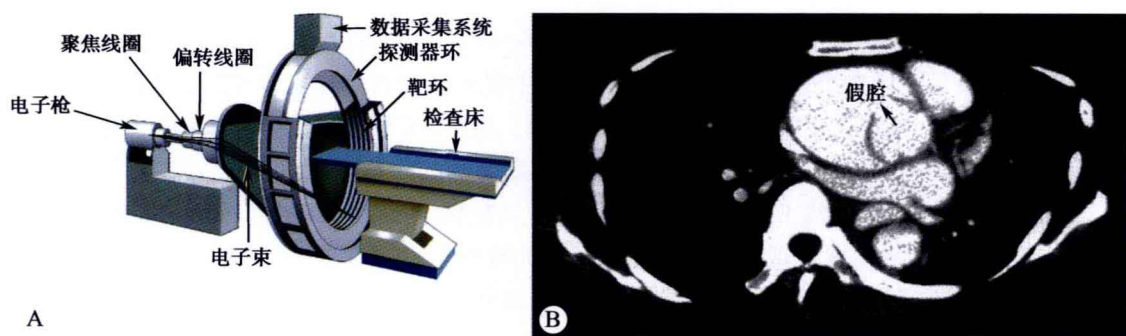


图 1-2 电子束 CT 构成 (A) 及临床心脏扫描图像 (B)

尽管 EBCT 有极大的影响,但这项技术也受到诸多的限制。例如,输出波束的限制导致放射光子数比常规 CT 有所降低,数据获取不足导致空间分辨率差等。为了达到更好的图像质量,EBCT 引入了某些新技术,然而,螺旋 CT 的迅速发展逐渐减弱了人们对 EBCT 的关注度。

CT 技术的进展,尤其是多排螺旋 CT 的出现实现了心血管疾病的无创诊断。螺旋 CT 可以在检查床以恒定速度平移的同时连续不断地获得投影数据,极大地减少了扫描时间。另外,螺旋 CT 的采样方式使得它在 Z 轴方向的采样密度是均匀的,因此可以在任意位置上重建图像(图 1-3)。

文献报道的最早利用螺旋 CT 进行心脏扫描是在 1992 年,这项研究通过 1 秒/圈旋转、2mm 层厚、30s 连续的螺旋扫描得到原始数据,采用投影角度每次增加 45° 的数据进行图像重建,最终得到 120 幅时间上连续的图像。从这 120 幅图像中,心脏舒张期的图像数据被提取出来并在 Z 轴方向上排序,然后用三维容积再现 (VR) 重建出冠状动脉影像(图 1-4 左上)。用这种重建方式得到的图像虽然空间分辨率有较大局限性,但这是人们第一次看到的三维 CT 冠状动脉图像。此后,通过

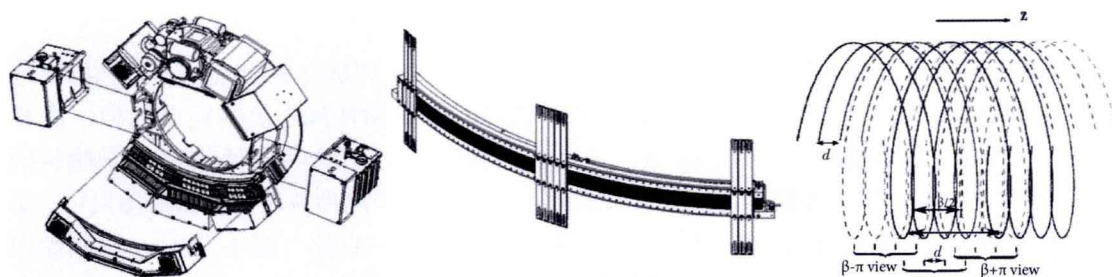


图 1-3 多排螺旋 CT 构成, 探测器结构和螺旋扫描原理

提高旋转速度, 引入 ECG 门控和三维容积重建, 螺旋 CT 图像质量得到了进一步的改善 (图 1-4 右上)。1999 年, 四排螺旋 CT 被研发出来, 旋转速度提高到 0.5 秒/圈, 冠状动脉图像质量得到了进一步的提高 (图 1-4 左下), 心脏 CT 的发展进入到多排螺旋 CT 的高速发展期。2002 年, 16 排螺旋 CT 的出现, 心脏 CT 进入了临床应用阶段 (图 1-4 右下)。

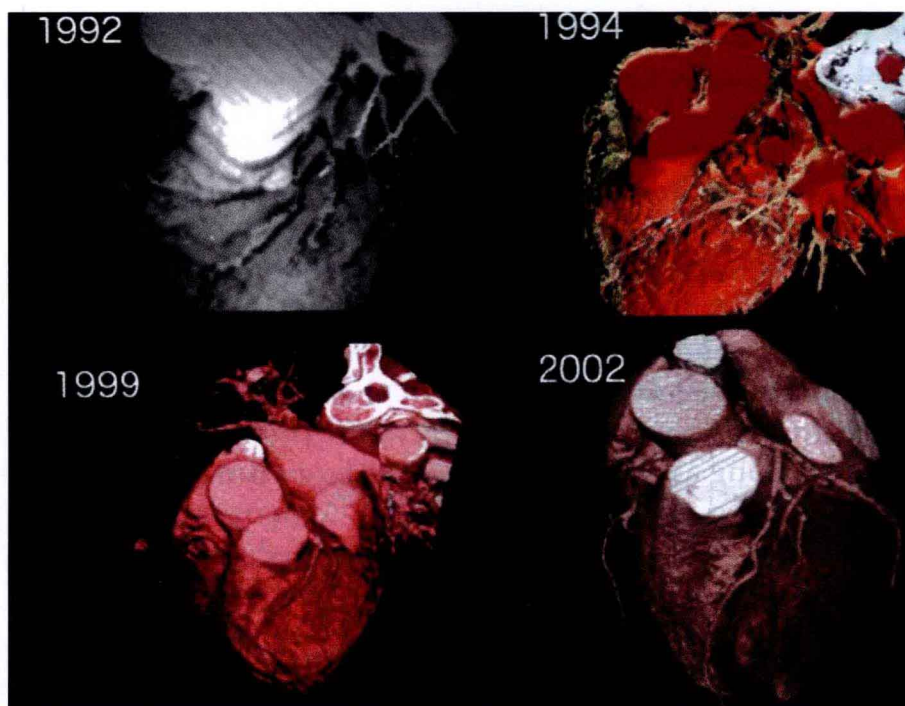


图 1-4 心脏螺旋 CT 影像的发展

相对于单排螺旋 CT 而言, 多排螺旋 CT 采用阵列探测器和多通道数据采集系统, 机架旋转一圈能同时获得多个层面的断层图像, 大大提高了扫描速度和空间分辨率。最初的多排螺旋 CT, X 线管旋转一周所完成的容积数据采集只可重建出 2 或 4 层图像, 之后在短短的几年内, 又相继推出了 8 排、16 排、32 排、40 排和 64 排。64 排螺旋 CT 是 CT 心脏成像的一个里程碑, LightSpeed VCT (GE 医疗) 是其中的代表作。64 排螺旋 CT 一次采集可获得 128 层图像, 可以在不到 5s 的时间内完成心脏扫描, 使心脏 CT 成为临床常规。如今的多排螺旋 CT 已经发展到 128 排和 320 排, 其中 320 排 CT 可以在一个心动周期内完成全心的扫描。但是宽体探测器固有的锥形束伪影问题, 使宽体探测器的图像质量受到极大的挑战。如何有效解决宽体探测器的锥形束伪影问题是多排螺旋

CT 发展面临的主要问题。

随着多排螺旋 CT 心脏成像技术的发展,更多的心脏扫描序列被开发出来。心脏扫描要求数据采集和图像重建与心电图信号 (ECG) 联动。ECG 波形可以帮助预测心脏的运动期相,用 R-R 间期的百分比来控制心脏图像产生的期相位置。心电门控有前瞻性和回顾性两种模式。前瞻性门控通过 ECG 监测患者心电信号,根据心动周期 R-R 间期,开始曝光的期相被设置在扫描协议中,如 R-R 间期的 60% 或 70%,CT 在 R-R 间期根据预设的期相启动扫描和重建 (图 1-5A)。回顾性门控模式下患者的心电信号被连续监测,同时以螺旋扫描方式连续采集数据 (图 1-5B),扫描投影的数据和心电信号被同步记录。扫描完成后,患者的心动周期信息被回顾性地用于图像重建。

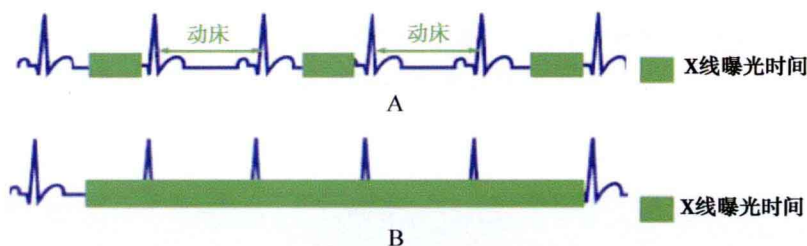


图 1-5 多排 CT 心脏成像 ECG 门控

A. 前瞻性心电门控; B. 回顾性心电门控

第二节 心脏 CT 性能的重要指标

一、心脏扫描时间分辨率

心脏 CT 成像的时间分辨率是指重建心脏 CT 图像所需要的时间窗宽度。心脏 CT 成像设备需要有较高的时间分辨率来应对心脏的快速跳动。冠状动脉紧贴心肌,而心肌在整个心动周期不断搏动,因此需要在冠状动脉成像期间冻结心脏的搏动。图像的重建可采用单扇区或多扇区扫描数据。单扇区重建指的是每一幅图像用一个心动周期内的半扫描数据进行重建,多扇区重建指的是每一幅图像用多个扇区内相邻期相的半扫描数据进行重建。

心脏成像需要在心脏运动相对较少的时间窗内进行。心动周期中相对静止的期相是舒张期,所以通常冠状动脉成像在舒张期内进行。理想的心脏成像时间窗宽度是心脏 R-R 间期的 10%。如心率为 60/min (心动周期为 1s) 的心脏成像,完美的冻结心脏时间分辨率是 1s 的 10%,也就是 100ms。

为了达到更高的时间分辨率,目前有以下几种关键技术。

1. 提高旋转速度 以单扇区重建为例,在单扇区扫描中,断层图像重建需要的 CT 图像数据为球管旋转 180° 再加上一个扇角可得到的数据,由此也就确定了单扇区重建能够达到的时间分辨率。因此,为了提高时间分辨率,CT 机架的旋转时间也越来越快。目前,市面上最快的机架旋转时间约为 270ms,单扇区扫描的时间分辨率可达 140 ~ 150ms。

2. 多扇区重建 单扇区重建由于机架旋转速度的影响,时间分辨率的提高有限。在多扇区重建方法中,选用不同心动周期相应期相不同部分的数据,各扇区数据的总数等于图像重建所需的扫描数据,这等于缩短每一心动周期内时间窗的宽度,结果是冠状动脉成像的时间分辨率得到了改善。

该方法的时间分辨率一般可达 $80 \sim 250\text{ms}$ 。

3. 双球管系统 双球管 CT 采用两套 X 射线发生装置和两套探测器系统成一定角度安装在同一平面, 进行同步扫描。两套 X 射线球管既可发射同样电压的射线也可以发射不同电压的射线, 从而实现数据的整合或分离。由于双球管 CT 具备在 X-Y 平面上间隔 90° 的两套数据采集系统, 机架旋转 90° 就可以获得 180° 的数据。机架旋转一周的最短时间为 0.28s , 单扇区采集的时间分辨率因此达到了 75ms 。

4. 冠状动脉运动追踪冻结技术 冠状动脉运动追踪冻结技术 (SnapShot Freeze, SSF) 通过高分辨采样得到心脏运动过程中的一系列图像, 对相邻期相的图像运动信息进行迭代傅里叶变换, 在频域对冠状动脉运动 (路径和速度) 进行分析和建模 (motion characterization), 从而对运动模糊进行矫正, 消除残余的运动伪影, 有效地压缩重建时间窗, 其有效单扇区时间分辨率高达 29ms 。

二、心脏 CT 的图像质量

心脏 CT 成像图像质量好才能清楚显示冠状动脉各级细小分支。冠状动脉从主动脉发出后的直径只有 $3 \sim 4\text{mm}$, 远端在 1mm 以下, 只有足够好的图像质量才能显示细小的冠状动脉分支。

决定心脏 CT 成像图像质量的是空间分辨率和密度分辨率。空间分辨率是指 CT 能分辨紧密靠近的物体的能力。空间分辨率经常在两个正交方向上测量: (x-y) 平面内和垂直于 (x-y) 平面 (z 方向)。密度分辨率, 也称之为低对比度可探测能力 (LCD), 是 CT 系统从背景中区分一个低对比度物体的能力, 是 CT 和常规射线照相之间的关键区别。

图像质量是由探测器材质和准直 (探测器单元的 Z 轴方向宽度)、采样率及重建方法综合决定的。

探测器材质对 CT 系统的图像质量具有决定性的影响, 采用的材质决定了探测器的初始速度和余晖效应, 初始速度是探测器对 X 线射入时的起始响应速度。探测器对 X 线响应的初始速度越快, 系统就有潜力得到更高采样率的投影数据。余晖效应是当 X 线关闭的时候探测器的恢复速度, 余晖效应越小, 探测器能够更快地结束对本次投影的采样, 不会对下一次采样造成累积残留。宝石探测器对 X 线的响应时间为 $0.03 \mu\text{s}$, 是普通探测器速度的 100 倍, 余晖效应为 0.001% , 是普通探测器的 $1/4$ 。响应速度快和余晖效应小的探测器从数据采样这一根源上提高了空间分辨率。

CT 扫描机使用 Z 轴方向单元宽度为 $0.5 \sim 0.625\text{mm}$ 的探测器, 由此就可以得到微小目标的细节图像, 提供了多平面重组心脏解剖结构所需的 Z 轴方向的分辨率。最新的数据采集系统 (DAS) 可以迅速得到高采样率下的信号, 减少余晖效应导致的伪影, 提高信噪比, 保证图像真实性。

迭代重建算法是近几年兴起的提高图像质量的方法, 具有代表性的是 ASiR 和 VEO。迭代重建算法是对真实 CT 系统 X 射线光子穿过物体并到达探测器的整个过程进行建模。与传统的滤波反投影重建方法不同, 迭代重建算法考虑了 X 射线光子和物体相互作用, 通过计算光子进入体素的具体方位和路径来考虑重建像素的大小和尺寸。在重建过程中, 根据 CT 影像链模型对被迭代图像进行正投, 然后得到的正投数据根据当前探测器接受到的投影数据进行补偿和反投, 进一步修正迭代图像。随着迭代次数增加, 图像越来越逼近真实图像。研究显示, 迭代平台 ASiR 可以将密度分辨率提高 50% , 高分辨迭代平台 VEO 可以将空间分辨率提高 61% 。

本书所介绍的冠状动脉能谱 CT 就应用了宝石探测器、高分辨 DAS 和 ASiR 迭代重建平台。宝石探测器的高响应速度使得提高采样率成为可能。新的迭代重建算法充分发挥了宝石探测器高响应速度和低余晖效应的优势, 结合探测器准直技术和最新的数据采集系统 (DAS), 在同样 X 射线强度 (剂量) 下, CT 系统兼顾了提高图像空间分辨率与抑制高采样率导致的高噪声, 达到了高空间分辨率和高密度分辨率的平衡。

三、心脏扫描剂量

在心脏 CT 中，放射剂量是一个需要考虑的安全性问题。普遍的共识是过多的 X 线辐射会带来致癌的风险。2007 年美国心脏协会关于心脏 CT 检查的科学报道中引用了 FDA 网站的内容，报道指出 10mSv 的 CT 检查可能导致致癌风险，风险系数是 1/2000。随后更多大样本、多中心研究显示，这个风险系数在儿童和年轻患者、女性患者中更高。

随着 CT 心脏成像技术的进步，一些成熟的降低剂量的方法已经广泛应用于临床。这些技术包括：基于 ECG 的管电流调控技术、前门控轴扫描技术、基于 BMI 的 kV/mA 设置技术、大螺距心脏扫描技术、迭代重建技术。这些技术的成熟联合使用，使心脏扫描的剂量降低了 50% 甚至更多，在 BMI 较小、心率较低的心脏扫描中，联合使用各种低剂量心脏扫描技术，可以做到亚 mSv 的心脏 CT 扫描。本书第 2 章将对心脏低剂量扫描技术进行更细致的探讨。

四、CT 冠状动脉能谱成像性能

CT 能谱成像的概念早在 20 世纪 70 年代 CT 诞生的初期就提了出来，Hounsfield 博士在 1973 年对 CT 的描述中就提到了用能谱成像来提高对物质组成的区分和定性。

在传统的 X 射线 CT 系统中，X 射线是由高能电子轰击重金属靶的过程中的轫致辐射现象产生的。该过程中，电子的能量转化为 X 射线光子，这些 X 射线光子覆盖了很宽的能量范围。X 射线球管阳极和成像物体之间的材料滤过了低能量的光子，形成典型的入射光子能谱（图 1-6 实线所示）。穿过物体后的射出光子能谱进一步向高能量区域偏移（图 1-6 虚线所示）。该射线硬化的现象将为 X 射线衰减系数的测量带来不确定性，当射线衰减路径变长时，得到的衰减系数将会变小。根据 X 射线 CT 的基本原理，想要得到精确的重建图像，必须保证衰减系数在所有方向角度的测量中保持固定不变。而这个条件对于非单色的 X 射线光谱来说很难得到充分满足，从而会在图像上观察到明显的伪影。为了缓解该问题，现代 CT 系统采用一种校正方法，该方法将射线穿过水或类似水的材料后的投影值重新映射，使该值与 X 射线的衰减路径长度成线性关系。此校正方法保证了水的衰减系数为一常数，从而消除了射线硬化现象给水的测量带来的不确定性。但其缺点是，当组织中含有大量非水物质，如骨头或造影剂时，仍能从图像上观察到这些物质的周围区域的伪影，而这些伪影通常会影影响诊断。

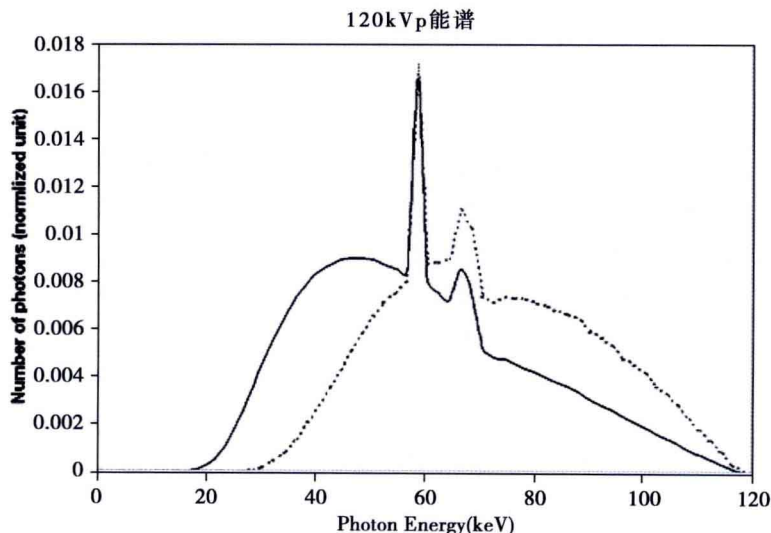


图 1-6 实线为入射 120kVp 能谱，虚线为经过 20cm 厚的水后的 120kVp 能谱

要解决上述的X线硬化效应带来的伪影、CT值不准和成分鉴别等问题,就需要CT能谱成像技术。CT能谱成像利用两种能量的瞬时切换,可以在原始数据空间进行单能量重建和基物质重建,产生的单能量图像可以有效的去除硬化伪影、提高对比度、提高病变结构的显示;基物质图像可以进行物质分离和物质的定量测量。

在心脏CT成像中有许多困难的问题需要用冠状动脉能谱成像来解决,包括软斑块和支架的精细显示、去除斑块的钙化从而进行精确狭窄诊断,心肌血供的定量测量和斑块的精细定性等,应成为现代心脏CT必备的高级功能。

第三节 冠状动脉能谱CT的技术特点

本书的临床实践和研究基于冠状动脉能谱CT平台(Discovery CT750 HD FREEdom Edition, GE Healthcare, Milwaukee, USA)。冠状动脉能谱CT是心脏CT领域一个划时代的工程技术产品,它应用了多个突破传统思维的创新技术,不仅提高了时间和空间分辨率,而且降低了扫描剂量,实现了自然心率的高分辨心脏解剖成像。最为重要的是,冠状动脉能谱CT将CT能谱成像(CT spectral imaging)成功地应用于冠状动脉,实现了冠状动脉能谱成像,这一项技术的应用解决了困扰心脏CT很久的钙化斑块问题、心肌灌注精确性问题和冠状动脉斑块成分分析的问题。

这些创新技术包括冠状动脉运动追踪冻结技术、心脏高分辨成像技术、冠状动脉能谱技术。

一、冠状动脉运动追踪冻结技术

冠状动脉运动追踪冻结技术(SSF)是一种提高心脏CT有效时间分辨率的全新采样和重建技术,是自然心率高分辨心脏成像的基础。

冠状动脉运动仍然是高心率时影响成像质量的主要障碍,是检查无法获得可以诊断图像的主要原因,也是右冠状动脉成像(RCA)中无法获得有效诊断的主要原因。

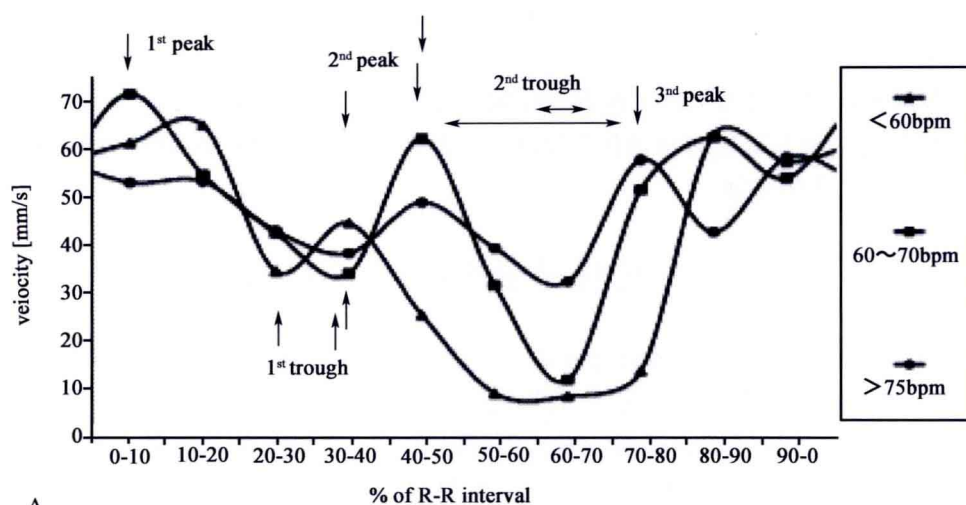
但是,冠状动脉运动是有自身规律的,这种规律可以通过特殊的采样方法记录下来,通过迭代方法计算冠状动脉的运动轨迹,从而重建出清晰的冠状动脉图像,这就是SSF的原理。

(一) 冠状动脉运动的规律

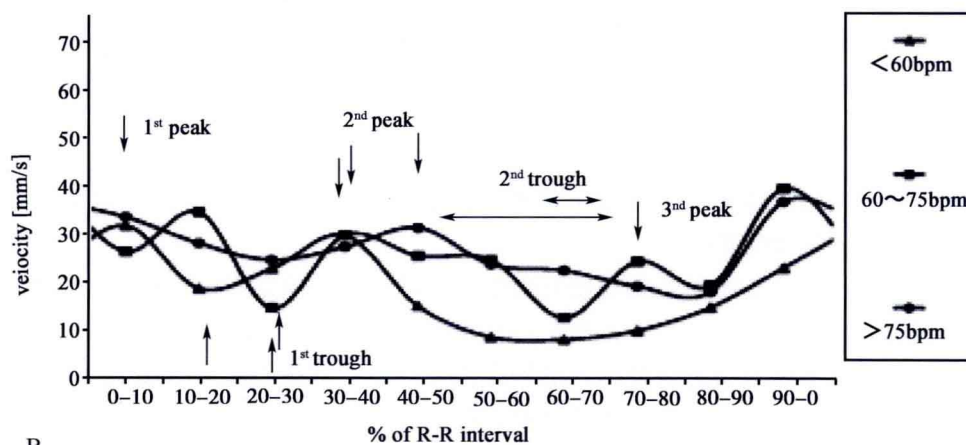
冠状动脉的运动是有规律的。冠状动脉3个主要分支在心动周期的不同期相有着不同的运动速度和幅度。Husmann对于冠状动脉运动规律的研究显示,左前降支及回旋支趋于随着左心室运动,右冠状动脉则与右心室运动同步,并同回旋支一起,在心脏舒张中后期易受心房收缩影响。三支中,左前降支的运动最不明显,右冠状动脉的运动最明显,尤其右冠状动脉中段。图1-7显示的是右冠状动脉(A)左冠状动脉(B)回旋支(C)的运动速度(mm/s)和心脏期相的关系。分析图1-7提供的数据,如果心率75/min,右冠状动脉的平均运动速度是35mm/s,如果CT数据采集的时间分辨率是75ms,CT采样期间右冠状动脉产生了2.6mm($0.075\text{s} \times 35\text{mm/s}$)的血管运动位移。对于平均直径3mm的右冠状动脉来说,运动位移程度几乎等于冠状动脉血管本身的大小。在临床实践和文献报道中,我们经常看到CT右冠状动脉影像的运动伪影(图1-8)。因此,仅仅靠提高CT机架转速和使用多扇区技术,不足以完全冻结冠状动脉的运动。这就需要对冠状动脉运动进行分析和重建,重新定义“冻结”冠状动脉的方法。

(二) SSF的技术原理

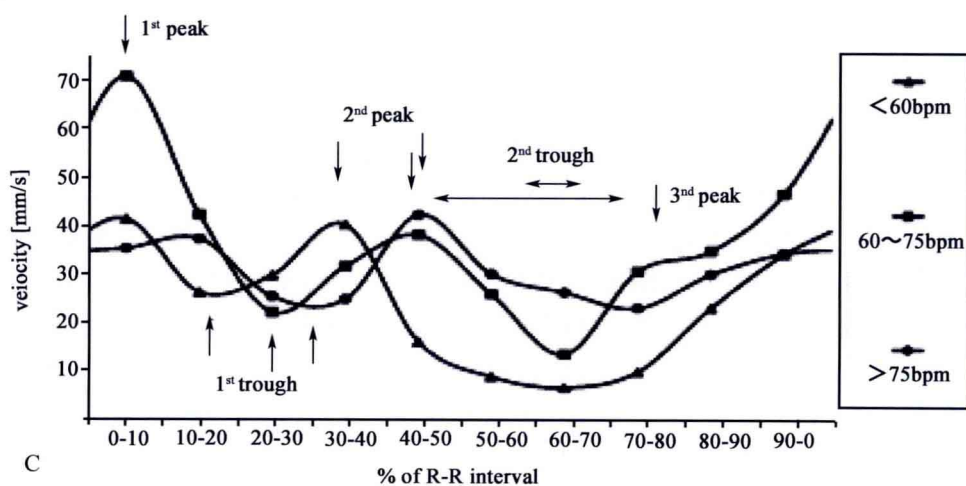
冠状动脉运动追踪冻结技术(SSF)是一种全新的冠状动脉运动分析和冻结技术,其技术本质是通过高分辨采样得到心脏运动过程中的一系列图像,对相邻期相的图像运动信息进行迭代傅里叶



A



B



C

图 1-7 右冠状动脉 (A) 左冠状动脉 (B) 回旋支 (C) 的运动速度 (mm/s) 和心脏期相的关系