

医学成像技术概论

鲁振龙

(中科院兰州分院)

摘要:近十几年来,随着核技术、计算机技术和图象重建理论的飞速发展,相继出现了许多活体内部医学成像的技术,使放射医学诊断达到了崭新的水平。本文讨论下列几种医学成像技术: B型超声诊断、同位素造影术、X线CT(计算机控制断层扫描)、核磁共振成像(NMRI)和正电子断层扫描(PET)。

一、引言

十九世纪末伦琴发现了X射线,从而逐渐形成了医学放射诊断学科,使医学成像技术成了物理学在医学应用中发展最快的领域之一。医学成像的原始形式是X射线荧光检查(直接成像)和放射照相(射线照片)。虽然至今它们仍占主要地位,但是因为它们只对骨骼能够清晰成像,而人体各脏器组织的影象出现严重的重叠和干扰。几十年来,放射科医生为此苦恼和束手无策。七十年代以来,出现了许多活体内部成像的新方法,基本上成功地解决了上述难题。各脏器组织清晰图象的获得,使医学诊断水平突飞猛进,也为癌症和其它致命疾病的早期诊断提供了锐利的新武器。

这类新方法问世的两大前提是图象重建理论和现代化的计算机技术。前者把仪器直接测量到的信号,转换重建成人体内部脏器组织真实情况的图象。后者完成测量分析过程中需要进行的巨量繁杂的数据分析运算。这两大前提都是在七十年代才开始具备的,这也就是医学成像技术在近十几年来获得实质突破的重要原因。

曾几何时,医学界还只把B型超声诊断、同位素造影术和计算机X线断层扫描并列为三大影象技术。自七十年代以来,计算机及信息处理技术的应用,使超声图象显示具备了灰阶和实时效果,组织及器官图象层次清晰。同位素造影术和计算机X射线断层扫描,这

两者都是把传统的X射线方法加以完善,从而得到更多珍贵信息。后者把X线技术、图象重建理论和现代化的计算机技术结合起来,得到了清晰的人体横断层图象。正当人们骄傲宣称放射医学诊断学科进入CT新时代的时候,另一种更为优越的医学成像技术又脱颖而出并迅速发展起来,这就是核磁共振成像(NMRI)。八十年代兴起的另一种医学成像技术就是正电子断层扫描,它在探测成像组织的化学成分和象脑、心脏等珍贵器官的研究中,日益显示出无法比拟的优越性。

下面我们首先依次讨论上述五种活体医学成像技术,然后总结比较它们的异同和所达到的性能指标,并简短地展望未来趋势。

二、B型超声诊断

正常人听觉范围的声波频率是16-20,000赫,超过20,000赫的声波通称为超声波。超声波在人体软组织中的传播速度约为1,500米/秒。超声波在人体内传播时,遇到声阻(声速×密度)不同的组织,就可产生反射和折射。根据超声的这种特性,就产生了四种常用的超声诊断技术,即A型超声、B型超声、M型超声心动图和超声多普勒诊断法。我们只介绍能提供医学成像的B型超声诊断。

B型超声诊断是一种无伤害的~~非~~非侵入性方法,能够探查人体软组织并提供成像或疾病情况。1952年霍来首先使用B型超声仪诊断乳腺疾病。B型超声仪又称辉度调制型超

声仪，回声由上而下地代表探测的先后次序，光点在荧光屏上组成一切面声学图象，所以又称切面显象法。根据光点的多少、强弱和分布状态即可进行疾病诊断。根据扫查方法和用途的不同，我们把B型超声分为三类，即手动接触扫查、线阵式扫查和扇形扫查（相控阵扫查）。

B型超声长期进展缓慢的原因是图象质量差和扫查速度慢。超声成象是用人为的规定阈值，控制任何超声的回声信号是否显示。过去的阈值规定在-36~-40分贝，当时只能显示脏器的轮廓线条。过去扫查速度慢，就只能探查静态器官。七十年代以来，随着电子技术、计算机及信息处理技术的应用，使超声图象显示有了质的飞跃，灰阶技术和实时显象相继问世。灰阶技术就是对0~-40分贝的大界面反射加以抑制，而将-40~-100分贝的小界面反射给予放大，这样就能显示出脏器或组织的精细结构了。灰阶通常取10~14级，目前最大的灰阶范围为32级。实时B型显象系统，每秒成象可达24~30幅，这就可以观察脏器的活动状态，应用十分方便，已用于观察心跳、胎心及胎儿活动等。

快速扫查在提供实时成象和灵活性方面是很有用的，在象心脏这样的运动客体观察中也是最需要的。现在已能诊断心脏动脉问题，象二尖瓣变狭和其它瓣膜疾病及心脏先天性缺陷，甚至可能检测心脏表面的解剖结构。把反射波探测和多普勒位移相结合，能使超声扫描增加新的维数，同时测量血管和血流。这就能够探测通过心脏有缺陷瓣时的反常的高速血流或反常的流动方向。

超声检测的显著成功还表现在研究腹部器官和胎儿。它能提供快速探测腹部硬块的方法，图象的整个纹理变化有时表明疾病情况。例如超声能够探查肾脏移植过程中排斥的早期信号。采用头或其它解剖尺寸的测量，超声扫描可用于胎儿成熟研究，允许区分许多类型的胎儿反常。借助于它进行羊膜

穿刺术，能够避免刺伤胎儿、胎盘和脐带。

超声成象的空间分辨与在组织中传播的超声脉冲所占的体积有关。该体积能够分为两个成分，决定于测量转换器束流的横向尺寸；决定于脉冲持续时间的轴向尺寸。典型仪器的横向分辨为2.6mm，轴向分辨为1mm。提高分辨的方法是使用更高的频率。问题在于，超声在软组织中的吸收增加近似与频率成正比，更高的频率意味着更强的吸收。当束流不需要深深穿入组织即用于表面结构时，提高频率效果很好。用高达15MHz的超声频率，测量了眼睛中的肿瘤或视网膜分离。频率8MHz的实时成象研究颈动脉主干分叉点的情况，能够显示动脉粥样硬化病的形成早期，经过少许计算就能提供关于血流过动脉的附加信息。

B型超声诊断的优点是图象直观，能准确显示脏器或病变的轮廓、性质和范围，使组织和器官之间的关系清楚、层次分明和一目了然。可以随时记录或照相留作资料，有利于会诊和科研时使用。

超声诊断设备的最新技术改进是编入数字处理和数字成象记忆装置；并且尝试从反射波以外的渠道提取别的信号，以便提供成象组织的定量特征。这就要求我们更好地理解高频超声波和人体软组织间的包括散射、反射和衍射等在内的全面相互作用，精确掌握在所有方面的声学性质并等效活体器官所看到的行为，这就是神往已久的声学的人体模型。

目前B型超声图象直观、无损伤、无痛苦和操作简便。对软组织脏器如肝、胆、胰、脾及肾等，或对动态器官如心脏及胎儿，都有重要的诊断价值。其不足之处是对含气体的脏器，超声大部分被反射不能传入深部，因此对肺、胃等脏器的诊断，不如X线诊断，它正在迅速改进之中，并且前景光明。

三、数字减法血管造影术

普通胶片的放射照相的主要缺点是，在

成象材料不是骨骼而是脏器软组织时明显变差。科学家们首先采用同位素造影技术来解决这个难题。所谓造影,就是通过口服或注射某些X射线不能透过的药物,使某些器官在X射线下显示出来,以便检查疾病。这就是说,造影术是靠造影药物来增强待成象器官组织与周围组织的图象反差,来达到克服人体各脏器组织影象重迭干扰的目的。然而一般的同位素造影术在许多情况下,图象反差仍然不够,也就是本底太大造成影象重迭。在物理学的其它领域里,减去本底的技术已经屡建奇功,现在自然想到把它用于造影术。因为绝大多数场合是用于检测血管和有关组织的结构,并且成象一般用减法荧光检查仪器得到,所以这个技术称做数字减法血管造影术。

最常用的数字减法有两种。第一种是把有无造影药物的两次成象相减得到清晰的器官成象。另一种是所谓能量减法。因为许多同位素的吸收,谱中都有突然的不连续点,例如碘的吸收谱中它的K边缘在33KeV处。用略高于和低于33KeV的单能束得到的数据形成的减法成象将给出含碘物质的器官的清晰成象。

用第一种方法时,可大大减少所用造影药物的浓度。例如用碘造影研究心脏工作情况时碘浓度可减少20倍。另外在稍微不同情况下测量的数据相减还能得到有临床应用价值的重要信息。X射线透射束的强度是能量、时间和位置的函数,所以通过检测强度函数 $I(E,t,r)$ 在 E 、 t 、 r 变化时的改变,就可得到多种有用信息。单胶片成象时许多变量已经对整个成象过程进行了平均,现在就能大大改进了。例如,空间过滤能够消除成象不同位置处的亮度变化,并能拾取含有具体空间频率的特点。现在已能以低空间频率的左心室为背景,显示高空间频率的冠状动脉,所用的就是空间过滤型技术。

近几年同位素造影术进展神速,又有下列几种新的综合技术相继出现。

①混合式减法。所测强度对于时间和能量的导数。它可用于降低病人运动对测量结果的影响。现在用能量分离很开的一对辐照,代替使用造影物质前后的单次辐照。另外能量减法和时间分离成象的减法还可进一步消除骨骼的残余影响,更清楚地显示成象组织。

②X射线断层照相减法血管造影术。测量强度对于空间变量和时间的导数。注入碘的动脉数字减法造影术中得到的二维成象可能有重迭现象。使用此法可以消除重迭。联合使用X射线断层照相可以得到三维信息,只需迅速移动源或者采用多重源来解释处于几个不同角度的同一病人的成象,从而得到该病人动脉的三维准确诊断。

③X射线断层照相能量减法。测量强度对于能量和深度的导数。它能给出成象组织不同区域的化学组成。因为X射线散射的光电贡献和康普顿贡献随能量变化,据此可以得到关于材料和有效原子序数的信息。

④多重K边缘减法。测量强度对能量的二次导数。

总之,相当于深度减法的X射线断层扫描和相当于时间减法的数字减法血管造影术相结合对临床至关重要。它们能够增强数据显示,开发出许多物理的、几何学的和生物学的信息。它们都是普通X射线方法的有机延伸。

四、 X射线CT

X射线CT就是计算机控制X射线断层扫描。它出现于七十年代,它把X射线技术、图象重建理论和现代化的计算机及信息处理技术紧密结合起来,得到了人体横断层的清晰图象,引起科学界热烈欢呼,普遍认为进入了CT新时代。

X射线CT主要包括三个部分: X射线系统,扫描测量、数据获取系统和计算机图象及显示系统。它是物理和医学水乳交融的产

物，也是一种典型的知识密集性技术。

它用对不同角度人体扫描的大型装置结合的方法，产生三维人体的分层成象。每次扫描产生与标准X射线成象相当的窄条。然后把由所有扫描组成的信息，用于重建在整个分层中X射线吸收的二维变化。

有关X射线产生和探测的基本技术已有30多年的历史了。新的东西只是信息处理能力，也就是图象重建理论。Cormack和Hounsfield独立地研究出新的数学方法，用于由通过吸收器的束流的积分吸收来重建X射线断层照片图象。为此他们荣获1979年诺贝尔生理学 and 医学奖金。用于X射线CT的工业用扫描器的研制也很快发展起来。目前国际上重要医院都已广泛采用CT进行医学诊断。

最新型的X射线CT，通常把X射线管和大数目（500—1000个）高准直探测器安装在环型机械上。环型机械可以环绕病人旋转，每经过360°旋转病人每个不同角度投影都产生500—1000次观察。每次观察都记录透射的X射线，并且典型剖面约需5—10ms。这种速度时X射线管需要的平均功率输出约20—30kW。X射线束经过准直，并且在1.5和10mm间可调。辐照的分层越薄，轴分辨就越好。为了消除X射线输出和探测器灵敏度变化的影响，对每次测量都要进行标准化归一化。

计算输出典型地在TV监视器上显示出来，并受到成象排列转换器和电子学的控制。我们能够选择中等水平的亮度，并以此作为显示范围的背景。这些计算次数庞大并且特别灵敏，其精度实际上只受X射线量子统计效应的限制。空间分辨为每厘米5线对时，成象噪声通常是小于同体积水中衰减的0.5%。

X射线CT的优点是无论对于无规律运动的脏器组织（例如肠、胃）、还是对于有规律运动的脏器组织（例如心脏）成象效果都较好，不须采用同步技术。成象速度快，对测试环境无严格要求，适用范围较宽，能提供清晰的人体横断层成象。它使人们第一次摆

脱了人体脏器组织影象重叠的苦恼，使放射诊断医学出现了实质突破。当然CT也有不足之处，那就是由于受到机械结构的限制，通常只能做横向断层扫描；对软组织的成象效果还不十分理想。应当指出尽管它的不足之处，基本上被后来的核磁共振成象所克服；但是它的优点却是后者可望而不可及的。这也就是直到现在为止，X射线CT迅速推广使用并且常胜不衰的原因。

五、核磁共振成象

1946年珀塞尔在固体石蜡中、布洛克在液体水中各自独立地发现了核磁共振（NMR）现象。由于这个著名发现具有理论研究和多学科应用的巨大价值，两位发现者得到了1952年诺贝尔物理学奖。

质量数和原子序数不同时为偶数的核都具有核自旋，也就是都有角动量和磁矩。这些核在满足共振条件的静磁场和射频磁场的共同作用下，就能够吸收或发射射频能量并给出核磁共振信号，这就是核磁共振现象。由于核磁共振在仪器和方法上取得了巨大的进展，使它成为化学、生物医学和地质学等许多领域中的有力工具。核磁共振成象（NMRI）是它在医学应用中八十年代的最大成就。

核磁共振成象是核磁共振技术、图象重建理论和现代计算机技术相结合的八十年代珍品。它主要包括三个部分，即磁体系统、射频发射与接收系统和计算机图象重建与显示系统。在静磁场上叠加一个梯度磁场，并且梯度磁场可以任意改变梯度的方向。用这种方法，它顺利地实现了薄层选择激发和共振频率空间编码。它从实验室研究、经样机试制和临床试用、现在已到了正式批量生产阶段，这艰难的历程竟然只用了十个春秋，如此高精尖产品的问世速度真是过去闻所未闻！这即表明计算机及信息处理技术的前提已经具备；又表明在CT广泛普及并取得巨大成就的同时，对核磁共振成象这种更为优越

的医学成象技术的衷心期待。

核磁共振成象与CT相比的优越性表现在下述几个方面。第一,它的工作原理是利用人体内氢核的核磁共振信号来重建图象,这样得到的成象必然反映氢核的密度、在分子中的位置和分子周围组织的生化环境,这就是说突破了过去所有影象技术都是以人体组织解剖学为基础的传统框架,在人体分子结构水平上提供大量的生化病理信息,这是包括CT在内的过去方法所无法比拟的。这就允许在包括肿瘤在内的疾病诊断中,不但能诊断占位性病变,而且能超早期诊断占位性病变出现之前的病理变化。它还能估计病变的发展方向 and 判断病变的发展过程。它能对活体新陈代谢进行实时监测,这就允许观察和监视药物对病变组织的影响,进而判断药物的疗效。这就提供了肿瘤早期诊断和治疗研究的有力武器,为人类最终攻克癌症堡垒展现了美好前景。第二,它的影象有丰富的密度层次,好的图象反差,对软组织成象的效果远比CT为好。第三,用改变磁场梯度的方法,可以任意选取核磁共振成象的断层取向,并且没有死角,没有伪象,这就非常有利于医生进行诊断。相比之下,CT受到机械结构的限制,一般只能进行横向断层扫描,非常不利于医生对疑难病症的诊断。第四,对病人和医生都没有放射性损害,病人一般不用注射或口服任何增强图象反差的造影药物。第五,空间分辨高,可达0.7~2mm,这就足以早期诊断肿瘤。由于上述核磁共振成象比CT的优越之处,才使它在八十年代脱颖而出并突飞猛进,大有与CT一决雌雄并取而代之的声势。但是也要看到它的不足之处。主要缺点是它的成象速度慢。一组断层通常为7—14片,就要2~4分钟。这就造成它对肠胃等无规则运动的脏器组织成象效果很差,而对心脏等有规律运动的脏器组织又必须借助于同步技术。它对于骨骼等含氢很少的组织成象效果当然也不理想。对测试环境也有较严格的要求。正因如此,尽管核磁共振成象比CT

更为优越和先进,并且前景似乎远比CT乐观,但是要想完全代替CT好象也不是那么容易。

六、正电子断层扫描

迄今为止我们所讨论的医学成象技术,包括CT和NMRI在内,都不能提供有关成象组织化学成分的信息。但是,许多疾病都有化学原因;并且在器官的大小、位置和密度发生变化的疾病过程中,在新陈代谢和生物化学方面常常更早地发生病变。几乎同时,放射活性标记化合物已成功地用于痕量生物化学研究。应用CT技术能够绘制放射性核的分布,为此必须应用放射性核。它们必须模拟在新陈代谢过程中元素的行为,并且它们必须产生辐射同时其路程能被探测。正电子发射体对定位提供自然的当选者,因为产生两个511KeV的正电子,当正电子湮没时容易做到在路程上探测重建。新陈代谢当然采用短寿命正电子发射体象 C^{11} 、 N^{13} 、 O^{15} 和 F^{18} 。正电子断层扫描(PET)就应运而生,并实现了直接得到成象组织化学成分的关键突破。

正电子断层扫描成象系统从外观上很象X射线CT或NMRI系统。它依靠活体中的正电子发射体成象,所探测的是511KeV湮没光子。对于符合计数的数据收集,通过计算机及信息处理系统重建正电子分布,从而得到活体组织的成象。

放射性示踪物质的所需总量甚少,以能产生有用的成象为限。能够采用 C^{11} 标示C的氧化物,用于血流跟踪探测。例如通过观察心脏收缩的方法,探测心脏贲门壁的运动异常。要想达到上述目的,只需几毫居的半衰期20分的放射性碳就足够了。尽管放射性碳的氧化物是有毒的潜伏性抑制剂,但是要比测量所需放射性碳的总量大100倍才能产生可以探测到的有毒的生理效应。

正电子断层扫描与其它成象技术不同之处在于,它决定于引入的放射性示踪剂,基本上是动态的。它对极小的浓度都很灵敏并能

高度选择地探测。我们上述的心脏体积的测量不是它的灵敏度的最佳例子。因为心脏的不固定的体积是简单的力学的性质所决定的,能够用许多其它成象技术得到。用其它成象方法不能观测的例子,是用 Rb^{81} 示踪心脏肌肉组织的血流情况。在正常心脏时,这个心肌灌注法对每100克心脏组织约50毫升/分钟。静脉注射16毫居的 Rb^{81} 标记物 $RbCl$,就能提供心肌灌注的清晰图象。 Rb 的氯化物通过血流分布开。用其它方法不能做到的还有,正电子断层扫描能够通过氟化糖和脂肪酸相似的动力学原理,能够标绘某区域新陈代谢的需要量,探查心脏的生化状态和它对“燃料”

的需要。

在珍贵器官脑的研究中,正电子断层扫描作出了独特而巨大的贡献。在脑中只有氧和葡萄糖可以作为新陈代谢的基质。能够用 C^{14} 标示葡萄糖,但是葡萄糖的新陈代谢产物也是易变而流动的,这就造成影象解释的困难。由于葡萄糖的氟化过程产物二氟二脱氧葡萄糖,能够穿过心脏阻挡层又不能完全新陈代谢,并且作为磷酸盐(脂)等被收集。用 F^{18} 还能对葡萄糖通过脑的情况,进行正电子断层扫描。氧不能作类似的标绘,但是能够建立稳定态。用 O^{15} 标记能够标绘区域血流和需氧量。

表 1 人体医学成象系统一览表

	B型超声	数字减法血管造影术	计算机X射线断层扫描	核磁共振成象	正电子断层扫描
探测什么	声波反射	透射的X射线	透射的X射线	射频辐射	511KeV湮没光子
什么成象	声音速度的不连续性	客体的电子密度	客体的电子密度	感应的核磁化强度	活体中的正电子发射体
引起什么结构	组织弹性和密度的变化	电子密度随成分和密度的变化	电子密度随成分和密度的变化	磁化强度的强度和密度随成分的变化	标记化合物的各种不同的了解
推论什么	器官的尺寸和形状,声学特性	注入造影药物的组织的定位	器官的尺寸和形状	组织中的物理变化和化学变化	示踪物质的流动和新陈代谢
典型应用	胎儿生长,肿瘤探测,心脏学	动脉变窄的检测	探测脑肿瘤	脑肿瘤成象	标绘脑中的葡萄糖新陈代谢
信号源	压电变换器	X射线管	X射线管	核进动	摄取的标记化合物
信号检测器	压电变换器	成象增强器	X射线探测器	rf拾取线圈	闪烁体探测器
成象平面	任意	纵向	横向	任意	横向
空间分辨	2mm	0.5	1	2	10
时间分辨	10^{-2}	10^{-2}	1	$10^{-1}-10^2$	10^1-10^3
典型辐射剂量	没有	成象区域为2拉德	成象区域为1拉德	没有	整个客体为 10^{-2} 拉德
粗略价格	10万美元	20万美元	100万—200万美元	100万—200万美元	100万美元
主要应用	临床诊断	临床诊断	临床诊断	生理学研究 and 临床研究	生理学研究

七、比较与趋势

我们上面已经概论了八十年代人体医学成象技术的最新概貌,评述了B型超声诊断、数字减法血管造影术、X射线CT、核磁共振成象和正电子断层扫描。为了便于读者记忆、理解和比较,我们给出了表1,即人体医学

成象系统一览表。在该表中,给出了这五种系统的成象原理、系统性能指标和应用范围等。从该表的各项比较中,不难看出它们各自的优缺点及适用范围和发展趋势。

由于七十年代以来计算机及信息处理技术的巨大进展,使医学成象技术出现了三次质的飞跃。第一次飞跃是X射线CT的出现,它

人类历史上首次提供了人体脏器的清晰的医学成象。第二次飞跃是核磁共振成象的出现，它首次突破了影象技术以人体组织解剖学为基础的传统框架，把研究推向人体分子结构水平的生化病理信息。第三次飞跃是正电子断层扫描的出现，它首次能直接提供有关成象组织的化学成分的信息，为心脏和脑等珍贵器官的生理学研究打开了大门。另外，B型超声诊断和同位素造影这两个较为古老的技术，在现代化计算机及信息处理技术的武装下，又重放异彩，走向复兴。整个医学成象领域都呈现出欣欣向荣和日新月异的大好形势。

可以预见，X射线CT这个七十年代医学成象领域里的佼佼者，尽管已经广泛普及并取得了光辉的成就，它仍将作为医学成象技术的主要品种之一而长期存在，并且扬长避短，不断改进。核磁共振成象系统尽管已转向正式批量生产并且世界上就此的成交贸易额1985年已达四亿多美元之巨，但远未普及，潜力很大。核磁共振成象这种比CT更为优越的技术，必将更加迅速地普及和发

展。正电子断层扫描技术虽然问世不久，却已经做出重大贡献，并且引起国际科技界的密切关注，必将成为揭示珍贵器官生理化学信息的锐利工具。

参 考 文 献

1. G. N. Hounsfield et al., J. Radiol. 46 (1973) 1016
2. A. M. Cormack, Med. Phys. 7 (1980) 273
3. M. E. Phelps et. al., J. Nucl. Med. 16 (1975) 210
4. B. M. Gallagher et. al., J. Nucl. Med. 19(1978)1154
5. T. Jones et. al., J. Radio. 49 (1976) 339
6. L. T. Bilaniuk et. al., J. Radio. 156 (1985)669
7. H. N. Wagner et. al., J. Nucl. Med. 26(1985)679
8. G. T. Barner et. al., J. Radio. 145 (1982)815
9. P. P. Fatouros, Med. Phys. 9(1982)819
10. P. A. Bottomley, Science 229(1985)769