

医学物理学——物理学在医学中的应用*

喀蔚波[†]

(北京大学医学部医学物理学教研室 北京 100083)

摘要 面向物理工作者介绍物理学在医学中应用的历史及对医学发展所起的作用.对近年来医学物理学在医学影像和肿瘤放射治疗两个领域中的发展现状与最新进展作了综述.物理学与医学结合不仅为临床诊断、治疗提供了先进的手段,同时也促进了物理学的发展.

关键词 医学物理学,医学影像,肿瘤放射治疗

MEDICAL PHYSICS——THE APPLICATION OF PHYSICS TO MEDICINE

KA Wei-Bo[†]

(Section of Medical Physics, Health Science Center, Peking University, Beijing 100083, China)

Abstract Physics has been applied to medicine for several hundred years, and has greatly spurred the development of medical science. Two important examples are medical imaging and radiation oncology. A review of the state-of-the-art of these two fields is presented for physicists. The combination of physics and medicine has not only provided advanced techniques for clinical diagnosis and treatment but has also advanced physics itself.

Key words medical physics, medical imaging, radiation oncology

1 医学物理学发展概述

物理学与医学的结合可以追溯到 400 多年前,一般认为伽利略(G. Galileo, 1564—1642)是将物理学应用到医学上的真正创立者.伽利略是一位著名的物理学家,但他曾是医学专业学生,他在实验基础上推导出单摆周期和摆长的关系,并用于测量人的心率,他发明了测温计,设计出了第一个现代意义上的显微镜.早期物理学与医学的结合一方面将具有定量特点的物理学方法、手段用于医学研究;另一方面通过对医学问题的研究得到了一些重要的物理规律.为医学物理学作出重要贡献的有些是具有医学背景的物理学家,有些则是医生或生理学家.

英国医生及生理学家哈维(W. Harvey, 1578—1657)首先依靠逻辑推理得出循环的存在是心脏功能的必要条件,因为当时他没有观察到连接动脉和静脉的通道.首次观察到毛细血管的是意大利医生及生物学家马尔皮基(M. Malpighi, 1628—1694).他最早提倡用显微镜研究人体的微细结构,在 1661 年用显微镜首次观察到了毛细血管网的存在,对现代医学的微循环理论作出了贡献.托马斯·杨(T. Young, 1773—1829)不仅是英国物理学家,还曾在伦

敦行医.他用弹性理论研究动脉血流中的脉动;用衍射方法测量出细胞和纤维的直径;用光学知识研究了人眼的调节作用和散光;和亥姆霍兹(H. von Helmholtz, 1821—1894)共同创立了色觉的三色理论.法国医生及生理学家泊肃叶(J. Poiseuille, 1799—1869)创造了用水银压力计测量狗主动脉血压的方法;研究了血液的粘滞性流动,建立了粘滞流动的泊肃叶公式.提出能量守恒定律的亥姆霍兹担任过解剖学教授和生理学教授,最后任物理学教授.他的贡献遍及光学、声学、热力学、电动力学、生理学和医学.他揭示了眼的聚焦机理,并继托马斯·杨之后系统阐述了色觉的三色理论;他发明了研究眼球晶体变化的晶体镜和观察视网膜的眼底镜;他第一个测定了神经脉冲的传播速度并确定为 27 m/s;证明了肌肉收缩释放的热是动物热的重要来源.德国生理学家斐克(A. Fick, 1829—1901)创立了扩散过程的斐克定律.

近 100 年来许多物理学的新发现、新理论很快应用于医学, X 射线、放射性、激光、电子显微镜、核磁共振等技术为医学研究及临床应用提供了新的方

* 国家自然科学基金重点基金(批准号 39830110)资助项目
2002-01-29 收到

[†] E-mail: Kawb@bjmu.edu.cn

法和手段,对现代生命科学的发展作出了突出的贡献。在此只举一个例子,看看 X 射线的发现对医学及生命科学的影响。

1895 年 11 月,德国物理学家伦琴(W. Röntgen)发现了 X 射线,并用 X 射线拍下了世界上第一张 X 光照片。伦琴将他的新发现发表后仅几周,芝加哥物理学家格鲁勃(E. Grubbe)即利用 X 射线为一名乳腺癌患者进行了放射治疗。3 个月后,维也纳一所医院将 X 射线拍片应用于外科诊断。1963 年,美国物理学家科马克(A. M. Cormack)发现人体不同组织对 X 射线的吸收系数有所不同,提出了用投影数据重建图像的数学方法。为 X 射线电子计算机断层成像(X-ray computed tomography,简称 X-CT)奠定了理论基础。1972 年,英国工程师亨斯菲尔德(G. N. Hounsfield)研制成第一台头部 X-CT,在临床上使用并获得清晰的诊断影像。CT 使观察体内任意断层的图像成为可能,极大地扩展了医学影像的范围。1979 年他们两人共同获得诺贝尔生理学及医学奖。

1953 年,美国生物学家沃森(J. D. Watson)与英国物理学家克里克(F. H. Crick)在碱基互补配对原则的基础上,构建了 DNA 分子双螺旋结构模型。他们的主要依据之一是威尔金斯(M. Wilkins)和弗兰克林(R. Franklin)通过 X 射线衍射法推出的 DNA 分子呈螺旋结构的结论及键距的计算数据。DNA 双螺旋结构的发现把人们对生物科学研究的视野,一下子从细胞水平推向了分子水平,它标志着分子生物学从此诞生。沃森、克里克和威尔金斯三人因此于 1962 年共同获得了诺贝尔生理学及医学奖。通过 X 射线衍射完成血红蛋白和肌红蛋白结构分析的佩鲁兹(M. Perutz)和肯特鲁(C. Kendrew)也获得了 1962 年诺贝尔化学奖。直到现在,X 射线衍射方法仍然是研究生物分子结构的主要方法。

20 世纪中叶,一批物理学工作者,特别是核物理学工作者进入医学领域,从事肿瘤放射治疗及医学影像的研究。物理学与医学的结合形成了一个新的研究领域——医学物理学(medical physics),并于 1958 年成立了美国医学物理学家协会(The American Association of Physicists in Medicine, AAPM);1963 年成立了国际医学物理学组织(International Organization for Medical Physics, IOMP)。医学物理学是将物理学的理论、方法和技术应用于医学而形成的一门交叉学科。它的出现大大提高了医学教育水平,促进了临床诊断、治疗、预防和康复手段的改进和更新进程。医学物理学涉及的范围相当广泛^[1],包括用物理学的

概念和方法解释人体器官、系统的功能,正常及异常的生理过程,物理因子(如噪声、电磁辐射等)对人体及各种人体材料所产生的效应;并将具有定量特征的物理学思想和技术引入到临床的诊断和治疗中。物理学与医学的结合不仅促进了医学的发展,也对物理学的发展起了推动作用。一方面临床的实际问题为物理学提出了新的研究课题;另一方面医学应用的巨大市场为相关的物理学研究提供了必要的经费支持。下面以医学影像及肿瘤放射治疗为例说明医学物理学在临床上的应用。

2 医学影像

现代医学影像技术除前面提到的 X 射线影像(包括 X-CT)外,还包括超声成像、磁共振成像和核医学成像^[2]。它们不仅可以无损地提供体内的解剖学(或结构)信息,有些技术还可以提供体内功能的信息。这有助于临床医生及时作出正确的诊断;同时功能成像还是研究大脑的活动和功能、某些疾病的病理机制、药物在体内的吸收代谢过程等无创伤研究和诊断的主要手段。

2.1 X 射线影像

利用人体不同器官和组织对 X 射线的不同吸收特性为基础发展起来的 X 射线透视和 X 射线摄影术是一种平面成像技术,为人体骨骼和内脏器官疾病或损伤进行诊断、定位提供了强有力的手段。目前平面 X 射线图像占医院中全部影像的 70%,是医学影像的主要来源。利用物质对低能 X 射线(能量小于 80 keV)的质量吸收系数与物质原子序数的 3 次方成正比的性质,做胃肠道检查时可食用钡盐作为 X 射线成像显像增强剂。将向血管内注射碘造影剂前、后获得的 X 射线图像相减,就可以获得消除骨骼和软组织结构的血管影像。血管造影技术和其他脏器的显像增强技术的发展,扩大了 X 射线成像的应用范围。X 射线的数字化成像是近年来研究的重点。直接数字化 X 射线摄影(direct digital radiography, DR)有两种方式:一种是美国提出的平板探测器技术。它由非晶硒和薄膜晶体管构成阵列板,利用非晶硒的光电导特性将 X 射线潜影转变成数字化图像,或由闪烁体将 X 射线转换成可见光子,可见光由光电二极管接收,输出数字化影像信号。另一种是俄罗斯提出的多丝正比室技术。它采用充气电离室探测器测量 X 射线强度的分布,获得数字图像。DR 具有以下优点: X 射线剂量比传统 X 射线摄影显

著降低,采用双狭缝准直的多丝正比室做探测器的DR技术射线剂量降低最多,仅为传统方法的几分之一;由于DR图像对比度范围更大,使图像层次更丰富,分辨能力较高;具有各种图像后处理功能;操作快捷方便,曝光后几秒钟即可显示图像,提高工作效率;数字化图像便于存储、管理及网络传输,不仅节省胶片还可降低胶片冲洗过程中的环境污染。

平面X射线影像由于前后物体叠加在一起,是多器官的重叠图像,更无法得到垂直于人体长轴方向上的任何信息。X-CT技术解决了这个问题,它可以提供体内清晰的断层图像而在临床诊断中广泛应用。X-CT技术发展的目标是追求高精度的快速成像,以避免由于心跳、呼吸等非自主运动造成的伪影。1985年,滑环CT问世,使单周连续扫描成为可能,单周扫描时间缩短到1s。1989年,螺旋CT开始用于临床,使二维成像的常规CT扫描发展成三维采集的容积扫描,不仅大幅度提高了扫描速度和成像质量,而且极大丰富了CT的应用范围和诊断水平。1998年,多家公司推出了旋转一周可获得4个连续层面图像的多层螺旋CT,使CT技术发展到一个崭新的阶段^[3]。多层螺旋CT使扫描时间更短,扫描速度一般为0.5s/周(即每秒获得8个层面的图像),最快可达0.3s/周,提高了人体长轴方向的分辨率,最小层厚达0.5mm,图像质量更清晰。在临床上可在一次屏气时间内完成整个胸腹部扫描;适于观察微小结构以及器官的动态扫描和全身血管成像。

2.2 超声成像

超声成像(ultrasound imaging)是利用超声波遇到介质的不均匀界面时能发生反射的特性,根据检测到的回波信号的幅度、时间、频率、相位等,得到体内组织结构、血液流速等信息。以最常用的B型超声为例,回波信号加在显示器的电子枪阴极或控制栅极上,不同深度的回波对应图像上的一个个光点,光点的亮度由回波幅度线性控制。与发射脉冲同步的时间扫描电压是加在垂直偏转板上,这样自上而下的一串光点表示在各个深度界面上的回波。当声束沿一直线运动时,在水平偏转板加扫描电压,随探头的移动同步变化,使探头平移时光点也能平移。这样就得到二维断层形态图像。超声成像与其他成像相比,具有实时性好、无损伤以及低成本等优点。近年来,超声成像在彩色血流测量技术、三维超声等方面的发展特别引人注目^[4,5]。彩色多普勒血流成像系统(通常称为彩超)是利用多普勒效应测量血流数据(血流方向、流速、流速分布)并在B超图像上用

不同颜色表示这些血流数据的双重超声扫描系统,可以得到彩色多普勒血流图(color flow mapping, CFM)。由于它的直观性,在临床的许多方面都得到广泛的应用。最近几年,三维超声图像重建是超声图像处理方面的热点,已成为超声成像技术的一个发展趋势。腔内超声很适用于三维成像,已获得应用的有心脏、血管、产科、妇科等的三维超声成像。图1是一个母体内30周胎儿面部的三维超声图像。现在研究的目标是实时的或动态的三维超声,它的实现将是超声医学的一次重大变革。

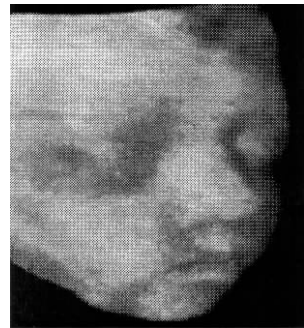


图1 胎儿面部的三维超声图像



2.3 磁共振成像

磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)利用了人体内水分子中的氢核在外磁场中产生核磁共振的原理。含氢液体样品放入外磁场时,反映宏观氢核磁矩的磁化强度矢量 M 沿磁场方向取向,这时在垂直主磁场方向加一射频脉冲磁场,使 M 偏离主磁场方向(夹角为 θ)。 θ 角大小与激发脉冲宽度成正比,MRI中经常使用的 90° 、 180° 脉冲就是分别使 M 偏离主磁场 90° 及 180° 。射频脉冲结束后氢核通过自旋-晶格弛豫(纵向弛豫,时间常数为 T_1)及自旋-自旋弛豫(横向弛豫,时间常数为 T_2)恢复到原来的平衡状态。由于人体不同的正常组织、器官以及同一组织、器官的不同病理阶段氢核的弛豫时间有显著不同,利用梯度磁场进行层面选择和空间编码就可以获得以氢核的密度、纵向弛豫时间 T_1 、横向弛豫时间 T_2 作为成像参数的体内各断层的结构图像。为得到体内更多有用的信息,近年来引进了很多新的MRI图像对比度机制。如扩散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)是通过测量人脑中水分子扩散的特性来反映组织的生化特性及组织结构的变化^[6]。在临床上可用于急性脑梗塞的早期诊断。以血氧水平依赖(blood oxygenation-level dependent, BOLD)程度为依据的功能磁共振成像(functional MRI, fMRI)以及根据磁共振信号的化学位移测量脑内有关

区域内各种化合物分子的磁共振波谱(magnetic resonance spectroscopy, MRS)也已经用于脑功能研究及疾病的诊断治疗^[7-9]。BOLD 成像的原理是:伴随着大脑的神经活动,在大脑皮层相应区域内就会出现局部毛细血管中的血流增加;由于氧的摄取量没有明显增加,局部血氧量增加,脱氧血红蛋白减少,脱氧血红蛋白具有顺磁性,它的减少将改变 T_2 加权的磁共振信号,因此脱氧血红蛋白就可以内源性对照增强剂作为 fMRI 的信号源,比较刺激前后磁共振信号的差异就可以确定该刺激激活脑区的范围,从而进行脑功能的研究。在临床上,当脑部肿瘤在某功能区附近时,可通过 fMRI 确定该功能区的范围,手术时给予保护。

2.4 正电子发射断层成像

在核医学成像领域中,当今最具代表性的设备是正电子发射断层成像仪(positron emission tomography, PET)。PET 是将正电子发射的同位素药物注入人体之后,探测正电子在体内被电子俘获产生湮灭反应时沿相反方向发出的两个能量为 0.511 MeV 的光子,从而获得正电子发射体标记的药物在体内的三维密度分布,以及这种分布随时间变化的信息。

PET 中使用的正电子放射性同位素主要有 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F , 它们由回旋加速器产生(如采用加速至 9 MeV 的氘离子束轰击氖气靶可产生 ^{18}F),再经化学合成得到所需药物。这些放射性同位素在体内的丰度较高,用它们标记的多种化合物,可以显示人体进行的多种重要的生理、生化过程。许多疾病在发生解剖结构的变化之前,总是先发生代谢等功能上的改变,因此通过 PET 可以进行疾病的早期诊断。现在以肿瘤成像药物 ^{18}F 标记的脱氧葡萄糖(fluorodeoxyglucose, FDG)为例,说明 PET 在肿瘤临床诊断中的应用^[10]。葡萄糖是细胞能量代谢的主要来源,由于恶性肿瘤的异常增殖,造成对葡萄糖的过度利用,其途径是提高葡萄糖通过细胞膜的转运能力和加强糖代谢的主要调控酶的活性。FDG 是葡萄糖的同分异构体,可与葡萄糖竞争 6 位磷酸化反应,磷酸化后,FDG 不进入三羧酸循环而是滞留在细胞之内,因此 FDG 的多少可以表示细胞葡萄糖代谢的水平高低。通过 FDG 量的测定可以判定肿瘤的良好性、肿瘤恶性程度以及肿瘤的转移和复发。图 2 是用 ^{18}F -FDG 显示化疗前后肿瘤消失的 PET 图像,病人胸腔正面左腋窝及右肺部的暗区表示肿瘤,下面骨盆处的暗区是由于放射性核素很容易被肾脏从血液中滤出,聚集在膀胱而形成。PET 是目前各种医学影像设

备中技术水平最高、应用价值最大的设备,它的最大优势是能定量评价在体组织的生理、生化功能,可以在分子水平上进行研究及临床诊断。由于它可以进行代谢功能的定量测量,可用于疾病(特别是神经性疾病及肿瘤)的早期诊断。此外 PET 还是国际公认的研究脑神经活动的重要手段。其空间分辨率可达 2.5 mm,但其价格昂贵,目前只在少数大型医院和医学研究机构中使用。

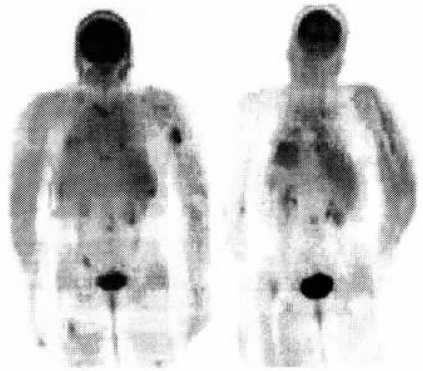


图 2 化疗前后的 PET 图像
(a)化疗前 (b)化疗 4 个月后

3 肿瘤的放射治疗

放射治疗主要用于恶性肿瘤,它与手术治疗、化学药物治疗组成了肿瘤三大治疗手段^[11]。国内外统计数字表明,约有 50%—70% 的癌症患者需要不同程度(单纯放射治疗或与手术、药物配合治疗)地接受放射治疗。目前经治疗后的肿瘤 5 年生存率为 45%。在被治愈的 45% 的肿瘤患者中,对治愈率的相对贡献为手术治疗 22%,放射治疗 18%,药物治疗 5%。研究表明,原发肿瘤的局部控制是肿瘤治愈的先决条件,局部控制的失败,会导致肿瘤的局部复发和肿瘤的远地转移。在未治愈的约占 55% 的肿瘤患者的死因调查中,因肿瘤原位复发导致治疗失败的病例约占 1/3。因此,通过采用新的或改进的治疗方法,使所有肿瘤患者的原发(局部)肿瘤得到完全控制,有可能使全部肿瘤患者的 5 年生存率在现有基础上进一步提高。放射治疗不仅是肿瘤局部治疗的有效手段(治愈率约占整个肿瘤治愈率的 40%),而且还能够保留器官的部分生理功能,改进患者愈后的生存质量。

正常组织在受照射后,细胞增殖周期缩短,能很快完成受损伤组织的修复,而肿瘤组织对放射损伤的修复慢,因此利用正常组织和肿瘤组织对射线有

不同的影响和损伤,以及它们恢复能力的差别,进行分次放疗就可以达到尽可能地杀灭肿瘤细胞并保护正常组织的目的。

随着物理技术的发展,肿瘤放射治疗从最早使用 X 射线管发出的 keV 级低能 X 射线发展到使用放射性同位素发出的 γ 射线(常用 ^{60}Co)及医用电子加速器产生的高能($\geq 6\text{ MeV}$)X 射线和高能电子束等。20 世纪 90 年代,以市场上出现带有多叶光阑(multi-leaf collimator, MLC)的电子直线加速器为标志进入了调强适形放射治疗(intensity modulated radiation therapy, IMRT)的新阶段。IMRT 技术是采用物理手段通过调整射野的束流形状和强度分布改善肿瘤(靶区)与周围正常组织和器官的剂量分布,使得高剂量区剂量分布的形状在三维方向上与肿瘤形状一致^[12]。早在 20 世纪 70 年代就已经提出了 IMRT 的思想,由于当时计算机技术的限制,还不能在临床上实现。近十年来,随着计算机硬件和软件技术的快速发展,特别是多叶光阑及其计算机控制系统的建立和发展,使调强适形放射治疗成为可能,并已投入临床使用。调强适形放射治疗被认为是放射肿瘤学史上的一个里程碑,它将是本世纪初放射治疗技术的主流。

下面以前列腺癌的放射治疗为例,对调强适形放射治疗作一说明。图 3 中阴影区域为肿瘤的范围,图 3(a)为常规的对穿野(单野)照射,如果肿瘤细胞较正常组织对射线更敏感,即存在一个最佳剂量,既可以最大限度杀死肿瘤细胞,同时又不会对正常组织造成损害,这种方法是有效的。但是在更多情况下,正常组织与肿瘤细胞对射线的敏感程度相差不多,甚至某些正常组织对射线更敏感,同时在某些肿瘤附近有需要保护的重要器官。为此提出了适形放射治疗的思想,即通过多叶光阑或挡块使射野的束流形状与射野方向的靶区投影形状一致,进行多野照射或单野绕病人旋转照射,既可以提高靶区的照射剂量,又避免了周围正常组织的损伤。图 3(b)是四野照射的示意图,虚线所围区域是高剂量区,适形放射治疗明显改善了剂量分布。但对于像前列腺癌这样的不规则靶区,适形放射治疗仍然无法避免重要器官(如膀胱、直肠)受到较高剂量的照射。而在改变射野束流形状的基础上,进一步调整射野束流强度分布的调强适形放射治疗,通过多野照射或单野旋转照射可以使高剂量区在三维空间准确地按照靶区的形状分布。图 3(c)为三野调强适形照射的示意图,虚线所围的高剂量区与靶区有了较好的适合度。

图 4 表示了由钨或钨合金叶片组成的多叶光阑调整束流形状及强度的示意图 (a)为静态调强 (b)为动态调强。

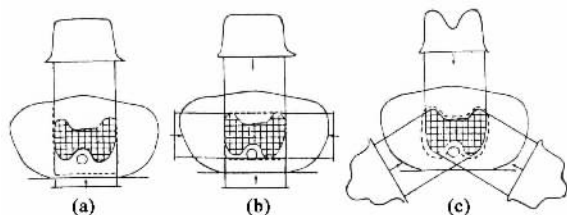


图 3 常规照射 (a)经典适形照射 (b)与调强适形照射 (c)的比较

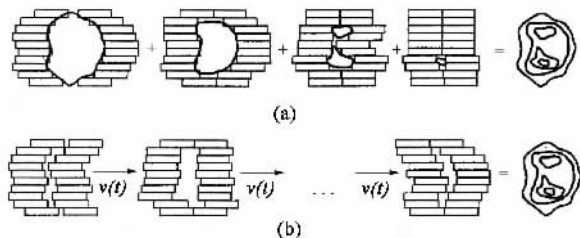


图 4 多叶光阑调整束流形状及强度示意图 (a)静态调强 (b)动态调强

现代放射治疗首先由放疗医生通过医学影像等手段确定肿瘤的位置和形状,给出照射靶区和周围正常组织的三维剂量分布,然后由物理师根据处方剂量利用计算机治疗计划系统(treatment planning system, TPS)反推出各照射野的束流形状及强度分布,治疗计划经模拟、确认后才能对病人进行照射治疗并对照射结果进行监督、验证。在调强适形放射治疗中,物理师起着非常重要的作用,由于工作量大,美国从事放疗的物理师人数已经超过了放疗医生。

4 结束语

医学物理学还包括许多方面^[13],如生物电、生物磁的测量,特别是利用超导量子干涉器件(SQUID)测量大脑活动时电信号产生的脑磁场(10^{-13} T),从而进行源定位的脑磁图(magnetoencephalograph, MEG)。芬兰已制造出 306 通道的脑磁测量装置,可用于确定癫痫病灶及进行脑功能研究。激光医学研究激光生物效应及临床诊断治疗,如用于外科手术的激光刀及低功率激光血管内照射治疗皮肤病等。血液流变学研究血液成分、血浆及血管结构的流变特性。在基础方面着重研究血液粘度、血管、血细胞变形、聚集及其相互作用机理。如我们对血细胞微观流变学特性进行了系统、深入的研究^[14-16];在

临床上研究这些流变学特性与疾病的关系. 医学电阻抗是利用生物组织与器官的电特性(阻抗、介电常数)及其变化获得与人体生理、病理状况相关的生物医学信息. 此外还有医学信号的采集与处理、大型医疗仪器的质量控制与质量保证、放射源的安全与防护等许多重要领域.

医学物理学在国内还没有受到应有的重视,与国外相比有相当大的差距. 由于教育专业目录中没有医学物理学,使医学物理学教育处于比较混乱的状态. 美国放疗临床医师与物理师之比已经达到1:2,我国大约为8:1,甚至全国平均每个肿瘤放射治疗中心不足1名物理师. 国内已开始物理师的资格考试,但在国家的职称系列中还没有医学物理师的职称. 在医学影像方面,物理工作者与临床医生的合作还比较少. 要发展国内医学物理学事业,充分发挥物理学在医学发展中的作用,有效地提高我国的医学水平,除物理工作者与临床医生的共同努力外,特别需要国家给予政策支持.

展望今后医学物理学的发展,在医学影像领域PET及fMRI等功能成像除了作为研究大脑功能的重要手段外,将在临床诊断、新药研制等领域中起更大的作用. 由于每种成像模态只能给出体内的部分信息,需要将功能图像与解剖图像或不同模态的图像进行配准、融合,以提供可视化程度更高、信息更丰富的图像. 目前医学影像正在从单参数成像向多参数和多模态成像发展,综合各种影像信息并集成生化参数、细胞形态学等信息是医学影像未来发展的重点,其中涉及物理学原理技术的问题是非常多的. 同时单种成像模式性能的改进也仍然有大量的工作要做,如磁共振波谱技术可测定细胞内的代谢水平,在临床上可用于肿瘤的早期发现及肿瘤良性、恶性的确定. 医学影像领域物理工作者或物理师的任务是根据医生的需要研究新的成像手段及方法,在提高医学影像的空间分辨率和时间分辨率的同时,整合这些综合信息. 在肿瘤放射治疗方面,随着调强适形放射治疗技术的发展、完善,常规放疗将被逐渐取代. 将出现新的放疗手段及设备,如美国威斯康辛大学将直线加速器、CT、治疗计划系统、剂量监测合为一体,研制出螺旋扫描式断层放疗机并投入临床实验,它使肿瘤的定位与治疗同时进行,提高了

放疗的精度.

物理学在医学中的应用已经对医学发展起了巨大的推动作用,近20年来,医学影像、放射治疗等方面的进展也是大家有目共睹的. 我们有理由相信,21世纪医学物理学的发展将为临床医生提供更精确、更有效的诊断、治疗手段.

致谢 北京大学重离子物理研究所包尚联教授、中国医学科学院肿瘤医院胡逸民教授、首都医科大学生物医学工程学院姜远海教授和刘志成教授认真审阅了本文并提出了许多修改意见,在此表示衷心感谢.

参 考 文 献

- [1] Brown B H, Smallwood R H, Barber D C *et al.* Medical Physics and Biomedical Engineering. Institute of Physics Publishing, 1999
- [2] 张泽宝. 医学影像物理学. 北京:人民卫生出版社, 2000 [Zhang Z B. Medical Imaging Physics. Beijing: People's Medical Publishing House 2000 (in Chinese)]
- [3] Taguchi K, Anno H. Med. Phys. 2000 27 861
- [4] Neison T R, Pretorius D H. Ultrasonud Med. Biol. , 1998 24 :1243
- [5] Chou Y H. J. Formos Med. Assoc. , 1999 98 :749
- [6] Bassar P J, Mattiello J, Le Bihan D. Biophys. J. , 1994 66 259
- [7] Ogawa S, Menon R S, Tank D W *et al.* Biophys. J. , 1993 64 303
- [8] 唐孝威. 脑功能成像. 合肥:中国科技大学出版社, 1999 [Tang X W. Imaging Brian Function. Hefei: Press of University of Sciences & Technology of China, 1999 (in Chinese)]
- [9] Yacoub E, Shmuel A, Pfeuffer J *et al.* Magn. Reson. Med. 2001 , 45 588
- [10] Conti P S, Lilien S D L, Hawley K *et al.* J. Nucl. Med. Biol. , 1996 23 717
- [11] 胡逸民. 肿瘤放射物理学. 北京:原子能出版社, 1999 [Hu Y M. Radiation Oncology Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1999 (in Chinese)]
- [12] Meyer J L, Purdy J A. 3-D Conformal Radiotherapy, A New Era in the Irradiation of Cancer, Frontiers of Radiation Therapy and Oncology. Vol. 29. Meyer J L, Vaeth J M, Karger *et al.* ed. 1996
- [13] 王鸿儒. 医学物理学概论. 北京:北京医科大学中国协和医科大学联合出版社, 1993 [Wang H R. Introduction to Medical Physics. Beijing: Joint Press of Beijing Medical University and Peking Union Medical College, 1993 (in Chinese)]
- [14] Wen Z Y, Yao W J, Xie L D *et al.* Clinical Hemorheology and Microcirculation , 2000 23 51
- [15] Yao W J, Wen Z Y, Yan Z Y *et al.* Journal of Biomechanics , 2001 34 :1501
- [16] Xie L D, Sun D G, Yao W J *et al.* Science in China (Series C), 2002 45 50