

医用直线加速器的肿瘤放射治疗方案优化分析

王 诚

浙江星汉医疗技术有限公司 浙江杭州 310000

摘要：肿瘤严重威胁人类健康，放射治疗作为肿瘤综合治疗的重要手段之一，在肿瘤治疗中占据着关键地位。本文探讨医用直线加速器在肿瘤放射治疗中的应用及方案优化。分析直线加速器的工作原理、当前放疗方案存在的问题，从治疗计划制定、剂量优化、技术应用以及质量控制等多方面提出优化策略，并对优化后的效果进行评估，旨在提高肿瘤放射治疗的精准性、有效性和安全性，为临床实践提供理论支持。

关键词：医用直线加速器；肿瘤放射；治疗方案；优化

引言：

医用直线加速器因其能产生高能 X 射线或电子束，对肿瘤细胞进行精准打击，已成为现代放射治疗的核心设备。然而，如何优化基于医用直线加速器的肿瘤放射治疗方案，以提高治疗效果、减少并发症，一直是医学领域研究的重点。优化后的放射治疗方案，有利于更精准地杀灭肿瘤细胞，同时最大程度地保护周围正常组织，提高患者的生存质量，具有重要的临床意义。

一、医用直线加速器的工作原理

（一）基本结构与组成

医用直线加速器主要由加速系统、微波功率系统、束流传输系统、照射头、治疗床以及控制系统等部分组成。加速系统是核心部件，通常采用行波或驻波加速结构，利用微波电场将电子加速到高能状态。微波功率系统为加速系统提供所需的微波能量，束流传输系统负责将加速后的电子束或由电子束产生的 X 射线传输到照射头，照射头则对射线进行准直、调制等处理后，照射到患者的肿瘤部位。治疗床用于承载患者，并可进行精确的位置移动，控制系统则实现对整个加速器的操作和监控^[1]。

（二）射线产生机制

当电子枪发射的电子在加速系统中被微波电场加速到高能状态后，电子束可直接引出用于电子线治疗，也可打在重金属靶上，结合韧致辐射产生高能 X 射线。在产生 X 射线的过程中，电子的能量越高，产生的 X 射线能量也越高，其穿透能力和对肿瘤细胞的杀伤能力也越强。不同能量的射线适用于不同深度和类型的肿瘤治疗，例如低能 X 射线适

用于治疗浅表肿瘤，而高能 X 射线则更适合深部肿瘤的治疗^[2]。

二、当前肿瘤放射治疗方案存在的问题

（一）治疗计划制定的局限性

在治疗计划制定过程中，通常依赖于 CT、MRI 等影像技术获取患者肿瘤及周围组织的信息。然而，这些影像技术存在一定的局限性，如 CT 图像的软组织分辨率较低，对于一些与周围组织密度相近的肿瘤，难以准确勾勒边界；MRI 图像虽然软组织分辨率高，但成像时间较长，患者在成像过程中的微小移动可能导致图像伪影，影响肿瘤定位的准确性。同时，目前的剂量计算模型大多基于简化的物理模型，无法完全准确模拟射线在人体复杂组织结构中的传播和能量沉积过程。特别是在遇到骨骼、肺部等不均匀组织时，剂量计算误差较大，导致肿瘤部位剂量不足或周围正常组织受到过高剂量照射^[3]。

（二）剂量分布的不均匀性

由于肿瘤的形状和结构复杂，传统的放射治疗技术难以保证肿瘤内部剂量均匀分布。在一些不规则形状的肿瘤中，部分区域接受的剂量过高，增加正常组织损伤的风险，而部分区域则剂量不足，影响肿瘤的控制效果^[4]。此外，尽管放射治疗的目标是杀灭肿瘤细胞，但在治疗过程中，周围正常组织不可避免会受到一定剂量的照射。过高的正常组织受照射剂量，导致放射性肺炎、放射性肠炎等并发症，影响患者的生活质量和后续治疗。

（三）治疗技术应用的不适应性

传统的二维放疗和简单的三维适形放疗技术，在肿瘤

的精准治疗方面存在较大局限性。二维放疗仅能从两个维度对肿瘤进行照射，无法很好地适应肿瘤的三维形状，容易导致肿瘤周围正常组织受到过多照射；三维适形放疗虽然能够在一定程度上实现肿瘤的三维适形照射，但对于形状复杂、与周围重要器官紧密相邻的肿瘤，仍难以满足临床需求。此外，虽然调强放射治疗（IMRT）、容积旋转调强放疗（VMAT）等新技术，在理论上能更好实现肿瘤的精准放疗，但在实际应用中，这些技术对设备性能、治疗计划设计和实施过程的要求较高。例如，IMRT技术需进行复杂的逆向计划设计，计算量庞大，且对加速器的多叶准直器（MLC）精度要求严格；VMAT技术在治疗过程中，加速器的旋转速度、剂量率等参数需要精确控制，否则容易导致剂量分布偏差^[5]。

（四）质量控制的不完善

医用直线加速器是一种复杂的大型医疗设备，其性能的稳定性影响放射治疗的质量。然而，在实际临床应用中，对设备的稳定性监测往往不够全面和及时。加速器的剂量输出稳定性、射线能量稳定性等参数，如果不能定期进行严格的检测和校准，导致治疗剂量不准确，影响治疗效果。同时，在放射治疗过程中，缺乏对患者实际受照剂量和位置的实时监测手段。目前，虽然有一些剂量验证设备和位置监测系统，但在实际应用中，这些设备的应用还不够广泛，且监测的准确性和实时性有待提高。使得在治疗过程中，一旦出现患者位置移动或设备故障等情况，难以及时发现并采取相应的措施。

三、肿瘤放射治疗方案的优化策略

（一）治疗计划制定的优化

准确的治疗计划是放射治疗成功的基础。传统的治疗计划制定依赖单一影像技术，存在精度不足的问题。而多模态影像融合技术的出现，有效弥补这一缺陷。多模态影像融合技术整合了CT、MRI、PET-CT等多种影像信息。CT图像擅长呈现肿瘤的解剖结构，能清晰显示骨骼、脏器轮廓，为肿瘤定位提供基础框架；MRI图像则在软组织成像方面表现出色，对于区分肿瘤与周围软组织、明确肿瘤浸润范围有着独特优势；PET-CT图像能反映肿瘤的代谢活性，可精准找出代谢异常增高的肿瘤组织，避免遗漏微小病灶。在脑肿瘤放疗计划制定中，将CT图像的解剖结构信息与MRI图像的软组织细节相结合，能更准确勾勒肿瘤边界，为后续的剂

量规划提供精准依据；在剂量计算方面，传统的剂量计算模型基于简化物理模型，在面对人体复杂组织结构时，计算误差较大。蒙特卡罗剂量计算模型基于随机抽样原理，能高度精确地模拟射线在人体组织内的散射、吸收等物理过程。虽然该模型计算量巨大，但随着计算机性能的飞速提升，其计算效率不断提高，已逐渐在临床中得到应用。在腹部肿瘤放疗中，蒙特卡罗模型能够充分考虑肠道、肝脏等不同组织对射线的吸收和散射差异，从而更准确计算肿瘤及周围组织的剂量分布，有效避免肿瘤部位剂量不足或周围正常组织受量过高的情况。

（二）剂量优化策略

剂量分布的优化关系肿瘤控制效果和患者的预后，逆向调强放疗计划是剂量优化的重要手段之一。一方面，逆向调强放疗计划借助计算机优化算法，根据肿瘤的形状和周围正常组织的位置，逆向计算出每个照射野的强度分布。该技术能使高剂量区域紧密贴合肿瘤形状，同时最大程度降低周围正常组织的受照剂量。以宫颈癌放疗为例，逆向调强放疗计划可以精确地将高剂量聚焦于宫颈肿瘤部位，同时减少对膀胱、直肠等邻近器官的照射剂量，从而降低放射性膀胱炎、直肠炎等并发症的发生风险，提高患者的生活质量；另一方面，自适应放疗技术则针对放射治疗过程中肿瘤和周围组织的动态变化。在放疗过程中，肿瘤会随着治疗逐渐退缩，患者体重变化、器官运动等因素也会导致肿瘤和周围组织的位置及形状改变。自适应放疗通过定期对患者进行影像扫描，实时获取肿瘤和周围组织的最新信息，并据此及时调整治疗计划。比如在肺癌放疗中，由于呼吸运动导致肺部肿瘤位置不断变化，自适应放疗技术可以根据每次治疗前的影像扫描结果，调整照射野的位置和形状，确保治疗剂量始终准确无误地照射到肿瘤部位，提高放疗的精准性和有效性。

（三）治疗技术的合理应用

合理选择和应用治疗技术是优化放射治疗方案的核心环节，图像引导放射治疗（IGRT）技术将影像设备与直线加速器紧密结合。每次治疗前，IGRT技术会对患者进行影像扫描，实时获取患者肿瘤和周围组织的位置信息。然后将这些实时图像与治疗计划中的参考图像进行对比，精确计算出患者位置的偏差。调整治疗床的位置，对患者的位置进行精确校正，确保治疗过程中肿瘤始终处于预定的照射位置。

在鼻咽癌放疗中，由于头颈部的微小移动导致照射偏差，IGRT技术能实时监测患者鼻咽部肿瘤的位置变化，及时纠正因患者头颈部移动造成的位置偏差，有效提高放疗的精度，减少对周围正常组织的误伤；此外，质子重离子治疗技术具有独特的物理特性，质子和重离子在进入人体后，在特定深度会形成布拉格峰，能量在该位置高度集中释放，而在肿瘤后方几乎没有剂量沉积。使得质子重离子治疗在有效杀灭肿瘤细胞的同时，最大限度减少对周围正常组织的损伤。对于一些对射线敏感性较低、位置特殊的肿瘤，如颅底肿瘤、胰腺癌等，质子重离子治疗优势明显。虽然目前质子重离子治疗设备昂贵，治疗费用较高，但随着技术的不断发展和普及，其应用前景十分广阔。

（四）质量控制体系的完善

完善的质量控制体系是放射治疗安全、有效实施的重要保障。在设备质量保证方面，建立全面、系统的设备质量保证制度必不可少。一方面，定期对医用直线加速器的各项性能指标进行严格检测和校准，包括剂量输出准确性、射线能量稳定性、多叶准直器（MLC）精度等关键参数。每周对加速器的剂量输出进行校准，确保每次治疗的剂量准确无误；每月对MLC的位置精度进行检测，保证照射野的形状符合治疗计划要求。开展定期检测，及时发现设备存在的潜在问题，并进行维修和调整，确保设备始终处于良好的运行状态；另一方面，应用实时剂量监测和位置监测技术，对患者治疗过程中的实际受照剂量和位置进行实时监控。电子射野影像系统（EPID）对患者的照射野进行实时成像，与治疗计划中的照射野图像对比，监测照射野的形状和位置是否一致；采用二维电离室矩阵、胶片等剂量验证设备，对治疗剂量进行精确验证，确保患者实际接受的剂量与治疗计划相符。这些质量监测措施及时发现治疗过程中的异常情况，如患者位置移动、设备故障等，以便及时采取相应措施，保障治疗的安全性和有效性。

四、优化后的放射治疗方案效果评估

（一）肿瘤控制率的提高

优化放射治疗方案，肿瘤的局部控制率得到显著提高。精确的肿瘤定位和剂量分布，使得肿瘤细胞能够接受到足够的照射剂量，从而有效地杀灭肿瘤细胞。研究表明，采用优化后的治疗方案，一些肿瘤的局部控制率可提高10%–20%，如早期非小细胞肺癌的局部控制率可从传统放疗的

60%左右提高到80%左右。

（二）正常组织并发症的减少

优化后的放射治疗方案能够显著降低周围正常组织的受照剂量，从而减少并发症的发生。例如，在头颈部肿瘤放疗中，应用IMRT技术和精确的剂量计算模型，口腔黏膜、唾液腺等正常组织的受照剂量明显降低，放射性口腔炎、口干等并发症的发生率可降低30%–50%，提高了患者的生活质量。

（三）患者生存质量的提升

由于肿瘤控制率的提高和正常组织并发症的减少，患者的生存质量得到明显提升。患者在治疗过程中的不良反应减轻，能更好耐受治疗，同时治疗后的身体功能恢复更快，心理压力也相应减轻。例如，在乳腺癌患者中，采用自适应放疗技术可减少对乳腺周围正常组织的损伤，降低乳房变形等并发症的发生，提高患者的心理健康和生活满意度。

结论

在医用直线加速器的肿瘤放射治疗方案中，通过改进治疗计划制定方法、优化剂量分布、合理应用治疗技术以及完善质量控制体系等措施，能有效提高肿瘤放射治疗的精准性、有效性和安全性。未来，随着医学技术的不断发展，医用直线加速器的性能将不断提升，新的放射治疗技术和方法也将不断涌现。进一步优化放射治疗方案，需要加强多学科合作，包括医学物理、肿瘤学、影像学等领域的专家共同参与。同时，应加强对新型放射治疗技术的研究和应用，如立体定向放射治疗（SBRT）、粒子治疗等，不断提高肿瘤放射治疗的水平，为肿瘤患者带来更好的治疗效果和生存质量。此外，还应关注放射治疗的成本效益问题，通过技术创新和设备改进，降低治疗成本，使更多患者受益于先进的放射治疗技术。

参考文献：

- [1] 国家癌症中心 / 国家肿瘤质控中心 . 基于医用直线加速器开展脑转移瘤立体定向放射治疗的质量控制和质量保证 [J]. 中华放射肿瘤学杂志 ,2024,33(5):383–396.
- [2] 何盛烽, 陈荣耀 . 瓦里安医用直线加速器多叶准直器叶片位置偏移对放射治疗剂量的影响 [J]. 医疗装备 ,2024,37(19):55–57.
- [3] 赵军军 . 医用电子直线加速器放射治疗的质量控制分析 [J]. 中国设备工程 ,2023(20):112–114.

[4] 陈忠. 医用电子直线加速器放射治疗的质量控制和放射治疗的临床效果分析 [J]. 中国医疗器械信息, 2021, 27(23): 134-136.

[5] 朱志强, 程鹏, 陈刘利, 等. 医用电子直线加速器技术现状与发展趋势 [J]. 中国医疗器械杂志, 2024, 48(2): 184-

191.

作者简介:

王诚 (1981.1-), 男, 汉, 浙江杭州, 浙江星汉医疗技术有限公司, 浙江大学 MBA 在读, 研究方向: 医用直线加速器维保产业技术专家 (肿瘤放疗设备的维修、保养、质控)