

螺距和调制因子在螺旋断层放疗计划优化中的作用

王志伟,段继梅,岳麒,杨秀美,谷丹,解李斯琪,李荣清
昆明医科大学第一附属医院肿瘤放疗科,云南 昆明 650032

【摘要】目的:分析螺距和调制因子在螺旋断层放疗(HT)计划中的作用。**方法:**选择病例5例,分别是脑胶质瘤、鼻咽癌、肺癌、肝癌和直肠癌,采用不同螺距(0.287、0.430)和调制因子(1.5、2.0、2.5、3.0、3.5)组合制定HT放疗计划,射野宽度统一设置为2.5 cm,其余优化参数 importance、penalty 和 dose calc grid 分别设置为1、1、normal,共计50例计划。系统迭代300次后完成计划。计算并记录靶区适形指数、均匀性指数、危及器官剂量指标、出束时间、机架旋转周期,并分析其与螺距、调制因子的相关性。**结果:**不同螺距、调制因子对脑胶质瘤病例的脑干及其危及器官计划体积的 D_{max} 指标、鼻咽癌病例的脊髓 D_{max} 指标、肺癌病例的脊髓 D_{max} 和全肺 D_{mean} 指标的影响均有统计学差异。此外,两者对出束时间和机架旋转周期也有显著影响。**结论:**螺距对机架旋转周期的影响较明显,旋转周期与螺距成正比;调制因子对出束时间和旋转周期的影响也较明显,两者与其呈正比。

【关键词】螺旋断层放疗;螺距;调制因子;剂量学

【中图分类号】R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)01-0017-05

Treatment plan optimization affected by pitch and modulation factor in helical tomotherapy

WANG Zhiwei, DUAN Jimei, YUE Qi, YANG Xiumei, GU Dan, XIE Lisiqi, LI Rongqing

Department of Radiation Oncology, First Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming 650032, China

Abstract: Objective To analyze the effects of pitch and modulation factor (MF) in helical tomotherapy (HT) plan. **Methods** Five cases of astrocytomas, nasopharyngeal carcinoma, lung cancer, liver cancer, and rectal carcinoma, respectively, were selected. With a field width setting of 2.5 cm, 2 pitches (0.287 and 0.430) and 5 MF (1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5) were combined and used to design HT plans, while the optimization parameters of importance, penalty, and dose calculation grid were set to 1, 1, and normal, respectively. After 300 iterations, a total of 50 plans were designed. The conformity index, homogeneity index of target areas, dose index of organs at risk, delivery time, and the rotation period of gantry were calculated, and their correlations with pitch and MF were analyzed. **Results** The dose index differences in the maximum dose (D_{max}) of brain stem and other planning risk volumes of astrocytomas, spinal cord- D_{max} of nasopharyngeal carcinoma, and spinal cord- D_{max} of lung cancer, total lung- D_{mean} of lung cancer were statistically significant. The delivery time and rotation periods of gantry were also obviously affected by pitch and MF. **Conclusion** The rotation period which is significantly affected by pitch is proportional to pitch. The rotation period and delivery time which are obviously affected by MF are proportional to MF.

Keywords: helical tomotherapy; pitch; modulation factor; dosimetry

前言

螺旋断层放疗(Helical Tomotherapy, HT)机是将一个6 MV直线加速器安装在类似CT滑环的机架上(孔径85 cm),机架顺时针以不同速度(扫描图像时

10 s/圈,治疗病人时12~60 s/圈)连续旋转,同时治疗床匀速进床,由32对气动二元多叶光栅(叶片一次开关动作时间是20 ms)对特定宽度窄扇形射束进行调制并完成对患者病灶的治疗,其最大治疗范围40 cm(直径)×160 cm(长度)^[1]。HT机不论外形还是治疗方式都与常规C形臂加速器有很大区别。放疗计划优化时,需要设定射野宽度、螺距、调制因子等优化参数,其中射野宽度是由沿进床方向排列的铅门限

【收稿日期】2016-07-22

【作者简介】王志伟,工程硕士,助理工程师,从事肿瘤放射物理相关工作,E-mail: wangzhiwei1118@163.com

制,可以控制窄扇形射束在治疗等中心处的投影宽度,有 1.05、2.50、5.02 cm 共 3 种选择;螺距指机架每旋转一圈的进床距离与铅门宽度的比值;调制因子决定了计划的调制强度水平,其定义是最长的子野打开时间与子野平均打开时间的比值。

本文目的是分析不同螺距和调制因子对 HT 计划的影响,为 HT 计划优化时参数选择提供参考。本文射野宽度统一选择 2.50 cm,在实际治疗中,除全脑全脊髓等较长靶区以及离危及器官较近的小靶区外,这一铅门宽度能满足大部分放疗计划。为了减

少螺纹效应^[2],螺距由以下公式计算得到: $\text{pitch} = 0.86 / n, n = 1, 2, 3 \cdots$ 。本文螺距选择 0.287 和 0.430 两档,调制因子则取 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 共 5 个数值。将螺距与调制因子组合后分别优化放疗计划,分析其影响。

1 材料与方法

1.1 病例资料

选择不同部位的肿瘤放疗病例 5 例,处方剂量、分次数与原治疗计划一致,详见表 1。

表 1 5 例放疗病例信息
Tab.1 Information of 5 radiotherapy cases

Tumor site	Gender	Age/year	Target/Prescription	Fraction
Astrocytomas in the left frontal lobe	Male	41	PGTV/59.4 Gy PCTV/51.3 Gy	27
Nasopharyngeal carcinoma	Male	67	PGTV _{nx} /70.0 Gy PGTV _{nd} /66.0 Gy PTV/59.4 Gy	33
Lung cancer in the right side	Female	39	PTV/50.0 Gy	25
Liver carcinoma	Female	48	PTV/50.0 Gy	25
Rectal carcinoma	Male	60	PTV/50.0 Gy	25

PGTV: Planning gross target volume; PTV: Planning target volume

1.2 计划设计

将所选 5 例放疗病例分别采用不同螺距(0.287、0.430)与调制因子(1.5、2.0、2.5、3.0、3.5)的组合进行计划优化,其余优化条件均设置一致,具体如下:射野宽度统一设置为 2.50 cm,剂量计算网格(dose calc grid)选择 normal,靶区及危及器官的优化参数 importance 和 penalty 均设为 1,优化前各病例危及器官剂量均不超过其限值进行设置,计划系统(TomoTherapy Planning Station 4.2)自动迭代 300 次后结束计划,记录各病例相关靶区、危及器官剂量指标、出束时间(Times)及机架旋转周期(Periods)。每例病例有 10 个计划,共 50 个计划。

1.3 计划评价

靶区评价指标是适形度指数(CI): $CI = V_{\text{ptv}} \times (V_{\text{tv}} / TV_{\text{pv}}^2)$,其中 V_{ptv} 是计划靶区(PTV)的体积, V_{tv} 是处方剂量所包绕的所有区域体积, TV_{pv} 是 PTV 在 V_{tv} 内的体积。均匀性指数(HI): $HI = D_{5\%} / D_{95\%}$,其中 $D_{5\%}$ 和 $D_{95\%}$ 分别是 5%、95%的 PTV 体积受照的剂量。

1.4 统计学方法

采用 SPSS 17.0 软件,分析不同螺距、调制因子组合与各病例优化结果中靶区评价指标、危及器官剂量指标、出束时间和机架旋转周期的相关性(相关系数采用 Spearman), $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区和危及器官相关性分析

5 例放疗病例中各靶区评价指标(CI、HI)并未获得有统计学差异的结果,但是部分病例的危及器官剂量指标与螺距、调制因子的不同组合出现有统计学差异的结果(表 2)。

2.2 危及器官各剂量指标变化情况

根据相关性分析结果,将部分病例危及器官剂量指标随螺距、调制因子的不同组合而变化的情况作图(图 1),图中螺距为 0.287 和 0.430 的优化计划中鼻咽癌病例脊髓及其危及器官的计划体积(PRV)- D_{max} 剂量指标(红色)曲线重合。

表 2 危及器官剂量指标和螺距、调制因子不同组合的相关性分析结果

Tab.2 Correlation of dosimetry index in OAR with the combination of pitch and modulation factor

Item	Astrocytomas in the left frontal lobe	Nasopharyngeal carcinoma	Lung cancer in the right side
Brain stem-D _{max}	P=0.037	-	-
Brain stem PRV-D _{max}	P=0.037	-	-
Spinal cord-D _{max}	-	P=0.037	P=0.037
Total lung-D _{mean}	-	-	P=0.037

OAR: Organs at risk; PRV: Planning risk volumes

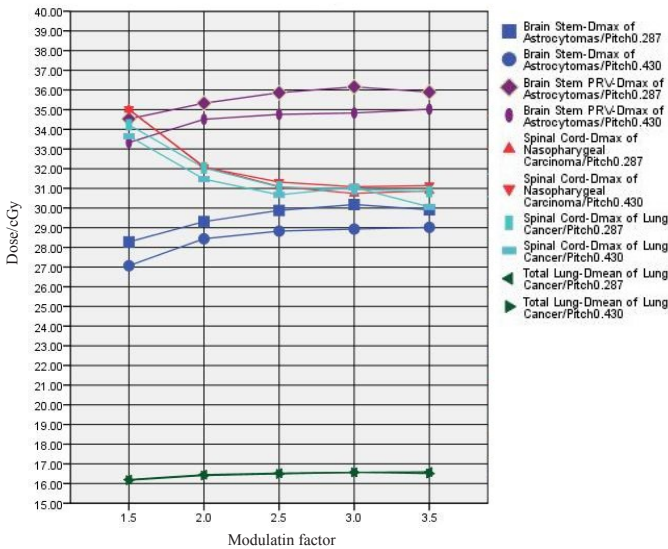


图 1 危及器官剂量指标随螺距、调制因子不同组合的变化情况

Fig.1 Changes of dosimetry index in OAR with the combination of pitch and modulation factor

表 3 出束时间和机架旋转周期与螺距、调制因子不同组合的相关性分析结果

Tab.3 Correlation of delivery time, rotation period with the combination of pitch and modulation factor

Item	Astrocytomas in the left frontal lobe	Nasopharyngeal carcinoma	Lung cancer in the right side	Liver carcinoma	Rectal carcinoma
Delivery time	P=0.005	P=0.005	P<0.01	P=0.005	P=0.005
Rotation period	P=0.005	P=0.005	P<0.01	P=0.005	P=0.005

过却以牺牲计划质量为代价^[5-8]。Skorska 等^[8]发现做前列腺癌病人 HT 计划,较大的射野宽度能减少出束时间但会导致头脚方向剂量跌落较慢,增加螺距对计划质量影响有限。Cao 等^[9]发现在前列腺 HT 计划中,采用射野宽度为 1 cm 的优化计划,其靶区剂量指标和危及器官保护做得很好,但其出束时间是射野宽度为 5.02 cm 的 3 倍。因此,建议放疗物理师根据病人一般状况来考虑优化参数的选择。Woch 等^[10]报道不同部位肿瘤计划采用较大螺距可有效减少治疗时

2.3 出束时间、机架旋转周期相关性分析结果

5 例放疗病例计划各自出束时间和机架旋转周期随螺距、调制因子的不同组合均出现有统计学差异的结果(表 3)。

2.4 出束时间、机架旋转周期变化情况

根据相关性分析结果,将出束时间、机架旋转周期随螺距、调制因子的不同组合而变化的情况分别作图(图 2 和图 3)。

3 讨论

放疗物理师优化治疗计划时,选择合适的优化参数很重要。在头颈部肿瘤的 HT 计划中,有文献^[3-4]报道与螺距相比,射野宽度和调制因子对治疗时间的影响更明显,不过较小的螺距和射野宽度能获得更好的靶区覆盖和危及器官保护。较大的射野宽度虽能减少约 50% 的出束时间,不

间。Deveau 等^[11]发现与螺距相比,射野宽度和调制因子对计划质量的影响更大。根据图 1 可知,危及器官有相关性结果的指标中,较小螺距和调制因子组合优化的计划,鼻咽癌和肺癌病例的脊髓及其 PRV-D_{max} 剂量指标较大,随着调制因子的增加则逐渐降低,这样的趋势符合螺距和调制因子的定义。如果两者越小,则危及器官在射野内停留的时间相对变长,气动多叶光栅调制能力不够,最终导致危及器官剂量指标变大。而脑瘤病例的脑干及其 PRV-D_{max} 指标显示

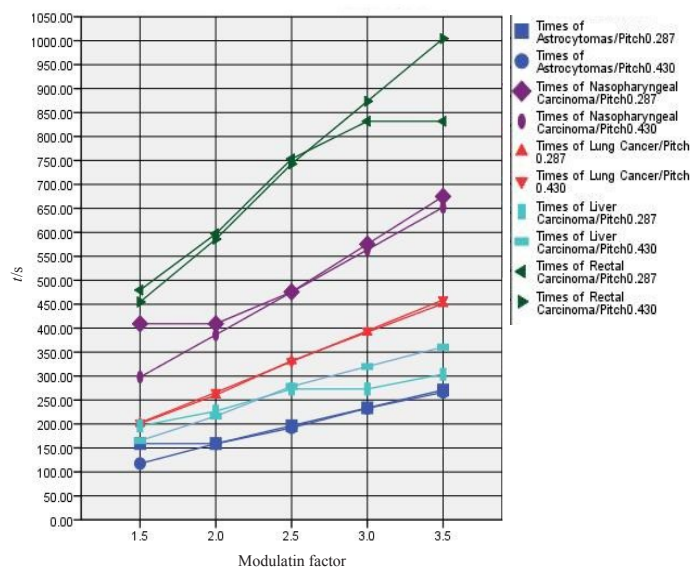


图 2 出束时间随螺距、调制因子不同组合的变化情况

Fig.2 Changes of delivery time with the combination of pitch and modulation factor

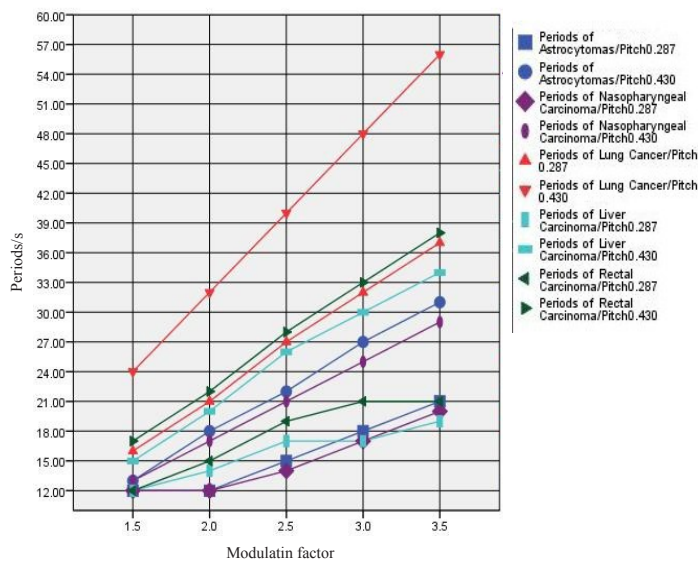


图 3 机架旋转周期随螺距、调制因子不同组合的变化情况

Fig.3 Changes of rotation period with the combination of pitch and modulation factor

则与这样的趋势相反,出现这样的结果笔者认为可能有以下几个原因:(1)螺距、调制因子对计划质量的影响与靶区位置有关,不同部位的靶区其影响并不一致;(2)优化时各危及器官的优化权重(importance、penalty)均设置为 1,并没有增大,可能对最终危及器官的受量产生影响;(3)对于复杂或者有难度的计划,计划系统需要更多的迭代一步步达到或者接近限值条件,如果迭代次数较少,将影响最终的优化结果;(4)物理师的优化技巧、在靶区剂量指标及危及器官保护之间的取舍、权衡等因素,也可能对计划质量产生影响。此外,从图 1 还可以发现,当调制

因子从 2.5 增加到 3.5 时,各危及器官剂量指标变化趋平缓,可能提示当调制因子增大到一定程度时,其对危及器官受量的改善程度有限。这与 Mackie 等报道相一致,其发现更高的调制因子并没有获得高剂量梯度,特别是调制因子取 3 以上时,变化并不显著。

从图 2 可以看出,当调制因子为 1.5 时,螺距为 0.287 的计划出束时间比螺距为 0.430 的长(肺癌病例除外),最大、最小时间差分别出现在鼻咽癌和直肠癌病例,相差时间分别是 110、25 s;当调制因子增加到 3.5 时,较小螺距的计划出束时间比较大螺距的短(脑瘤、肺癌病例除外),最大、最小时间差分别出现在直肠癌和鼻咽癌病例,分别是 172、23 s。此外,对于本次研究的肺癌病例,不同螺距、调制因子对其出束时间影响有限(各组合计划出束时间相差不超过 10 s),并且当调制因子设置为 2.5 时,各病例计划两种螺距的出束时间很接近。从图 3 可以看出,螺距、调制因子对机架旋转周期的影响比较明显,同一病例计划其螺距设置较大时,机架旋转周期也较长,当调制因子为 1.5 时,机架旋转周期最大时间差为 8 s;当调制因子增加到 3.5 时,最大时间差为 19 s(均出现在肺癌病例中)。在图 2 和图 3 中,计划出束时间和机架旋转周期均随调制因子的增加而呈现“正增长”,而螺距对机架旋转周期的影响较其对出束时间的影响更明显。

HT 计划优化前的初算,需要设定若干优化参数:射野宽度、螺距、调制因子,完成初算后物理师才开始有真正意义的放疗计划优化(优化过程中调制因子可调整,而射野宽度、螺距则不能修改,否则需重新初算)。因此,初算时优化参数的选择很重要,每个参数有不同的选项,对于不同部位的病例,何种设置更合适,这也是 HT 物理师需要考虑的内容。解传滨等^[12]在研究鼻咽癌 HT 计划优化中,本着提高临床实施效率、减少设备损耗、让设备运行在较理想的机架旋转周期(17 s)以及获得较理想的剂量分布原则下,曾建议优化参数设置如下:射野宽度 2.50 cm、螺距 0.287~0.430、调制因子 2.0~3.0。Meyer 等^[13]在骨肉瘤病人的 HT 计划优化中也给出类似的建议。此外,Kerf 等^[14]采用 TomeEdge 技术优化 HT 计划时,也给出相关优化参数设置的建议:射野宽度 5.02 cm,螺距 0.230~

0.450, 调制因子 >2.0 。

本文靶区、危及器官的优化权重(importance、penalty)均设置为初始值1, 目的是单纯分析螺距、调制因子对不同部位病例计划的影响。在各项有统计学意义的结果中可以看出, 适当的调制因子设置(2.0~3.0)、不同螺距(0.287、0.430)之间危及器官的受量差距并不大, 出束时间也很接近。然而机架旋转周期却差距明显, 原因在于螺距的定义, 在射野宽度不变的情况下, 同一个病例其治疗长度相同, 螺距较大代表每圈的进床距离较长, 则相应的旋转圈数较少; 反之则进床较短, 旋转圈数较多, 从而影响到每圈的周期。

总之, 螺距、调制因子对HT放疗计划的影响与靶区的位置、计划难易程度、靶区和危及器官取舍以及物理师(或者剂量师)的优化技巧、经验等诸多因素有关, 同种病例采用同样的优化设置, 并不一定获得相似的优化结果。但是螺距对机架旋转周期的影响较其对出束时间的影响更明显, 机架旋转周期与螺距成正比; 调制因子对机架旋转周期、出束时间的影响也很明显, 两者与其呈正比。

【参考文献】

- [1] 马林, 王连元, 周桂霞. TomoTherapy肿瘤断层放射治疗[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2010: 35.
MA L, WANG L Y, ZHOU G X. TomoTherapy radiation oncology [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2010: 35.
- [2] KISSICK M W, FENWICK J, JAMES J A, et al. The helical tomotherapy thread effect[J]. Med Phys, 2005, 32(5): 1414-1423.
- [3] MOLDOVANN M, FONTENOT J D, GIBBONS J P, et al. Investigation of pitch and jaw width to decrease delivery time of helical tomotherapy treatments for head and neck cancer[J]. Med Dosim, 2011, 36(4): 397-403.
- [4] SKORSKA M, PIOTROWSKI T, RYCZKOWSKI A, et al. Comparison of treatment planning parameters for dose painting head and neck plans delivered with tomotherapy[J]. Br J Radiol, 2016, 89: 20150970.
- [5] HUI S K, KAPATOSE J, FOWLER J, et al. Feasibility study of helical tomotherapy for total body or total marrow irradiation[J]. Med Phys, 2005, 32(10): 3214-3224.
- [6] GUTIERREZ A N, WESTERLY D C, TOME W A, et al. Whole brain radiotherapy with hippocampal avoidance and simultaneously integrated brain metastases boost: a planning study[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2007, 69(2): 589-597.
- [7] 解传滨, 徐寿平, 曲宝林, 等. 基于两种旋转调强全骨髓照射新技术的研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2015, 32(2): 168-173.
XIE C B, XU S P, QU B L, et al. Dosimetric comparison of total marrow irradiation based on two intensity modulated arc therapy [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2015, 32(2): 168-173.
- [8] SKORSKA M, PIOTROWSKI T. Optimization of treatment planning parameters used in tomotherapy for prostate cancer patients[J]. Phys Med, 2013, 29(3): 273-285.
- [9] CAO Y J, LEE S, CHANG K C, et al. Patient performance-based plan parameter optimization for prostate cancer in tomotherapy[J]. Med Dosim, 2015, 40(4): 285-289.
- [10] WOCH K, SOISSON E T, WESTERLEY D, et al. Acceleration of tomotherapy treatment delivery by increasing pitch and decreasing modulation[J]. Med Phys, 2008, 35(6): 2636.
- [11] DEVEAU M A, BOWEN S R, WESTERLY D C, et al. Feasibility and sensitivity study of helical tomotherapy for dose painting plans [J]. Acta Oncol, 2010, 49(7): 991-996.
- [12] 解传滨, 徐寿平, 戴相昆, 等. 鼻咽癌螺旋断层治疗中物理参数优化因素的分析[J]. 实用癌症杂志, 2012, 27(3): 257-262.
XIE C B, XU S P, DAI X K, et al. Analysis of best fitting tomotherapy treatment planning parameters for nasopharyngeal carcinoma[J]. The Practical Journal of Cancer, 2012, 27(3): 257-262.
- [13] MEYER P, BOUHOURS H, DEHAYNIN N, et al. The optimal tomotherapy treatment planning parameters for extremity soft tissue sarcomas[J]. Phys Med, 2015, 31(5): 542-552.
- [14] KERF G D, GESTEL D V, MOMMAERTS L, et al. Evaluation of the optimal combinations of modulation factor and pitch for Helical TomoTherapy plans made with TomoEdge using Pareto optimal fronts[J]. Radiat Oncol, 2015, 10(1): 191-197.

(编辑: 陈丽霞)