

NDZ 20 医用电子直线加速器的设计、 运行和临床疗效

陆用义 赖启基

(南京大学)

许康雄 梅泽如

(江苏省肿瘤防治研究所, 南京)

NDZ 20 医用电子直线加速器, 属行波反馈型, 采用改变工作频率、相位、磁控管输出功率及束流负载的方法调整能量, 电子线能量从5—20MeV分七档, X线有10、15 MV 两档, 并设有AFC, ARC, ADC等自动稳定频率、剂量率和照射野均匀度等控制系统, 对一些主要部件达到较为先进的指标。该机运行已近两年, 停机率36年与37年分别为2.14%和3.53%, 剂量稳定性等一系列指标均达到或优于国家GBW4-81所规定指标, 两年来治疗病人1366人, 疗效显著。

关键词 医用电子直线加速器, 行波反馈, 放射治疗。

一、引言

NDZ20 医用电子直线加速器是南京大学等单位共同研制的双光子大型医用电子直线加速器, 它虽然是一台科研样机, 但自1986年2月在江苏省肿瘤防治研究所投入临床使用以来, 已安全运行两年多, 充分显示出它的能量高、调能范围宽、剂量率高、均匀性好、半影区小等一系列优点, 而且稳定可靠, 发现故障能及时排除和维修, 因而停机率低。在治疗各种癌症患者过程中, 临床反应轻, 疗效显著。

二、整机主要设计特点

1. 主要性能指标

表 1 主要性能指标

Table 1 Major performance index

	电 子 线	X 线
能 量/MeV	5,8,10,13,16,18,20	10, 15
剂量率/cGy·min ⁻¹	100—300	100—300
照射野/cm ²	6 × 6—16 × 16	3 × 3—20 × 20
野均匀度/%	≤ ± 5	≤ ± 3
X线污染	≤ 5 %	
半 影/mm		≤ 8
泄漏剂量		≤ 0.1%

2. 射频反馈系统的选定

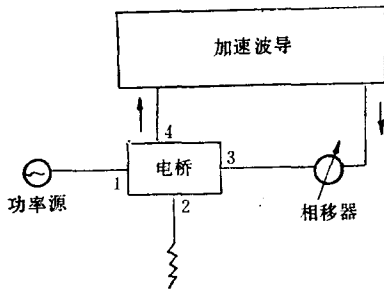


图 1 反馈系统的基本原理图
Fig.1 Block diagram illustrating principles of feedback system

在脉冲功率为4.6MW的磁控管作功率源，且加速管长度不宜过长的前题下，要把高能电子束最高加速到20MeV和两档X线，决定选用射频反馈系统，利用其束负荷不大时，由于反馈提高了加速管入口功率，在加速管长度较短的情况下，可达到较高的能量。反馈系统的基本原理如图1所示。

根据等效回路计算可得：

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{x^2}{(n+1)x^2 - 2[n(n+1)]^{1/2}x \cos\varphi + n\cos^2\varphi}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{(n+1)/n - 2[(n+1)/n]^{1/2}x \cos\varphi + x^2}{[(n+1)/n]x^2 - 2[(n+1)/n]^{1/2}x \cos\varphi + \cos^2\varphi}$$

式中，功率分配比 $n = P_4/P_2$ ，回路衰减 $x^2 = P_4/P_3$ ， φ ——从“3”臂返回的波与“1”臂入射波在“4”臂的相位差。

采用 3 dB 电桥，即取 $n=1$ ， $x^2=2$ ，回路衰减为 3 dB，并调节相移使 $\varphi=0$ ，则有

$$P_3/P_1=2, P_2/P_1=0,$$

这表示稳定以后加速器入口功率可以比输入功率增加一倍，而在负载端功率为零。

为保证反馈回路的工作稳定，还采取了一系列自动调整和监控措施。

3. 调能方式的选择及束流品质的保证

为确保整机较宽的电子线调能范围和双光子方式，采用了综合调能方案，即通过改变工作频率、相位、磁控管输出功率及束流负荷来选择最佳调能方案和合适的工作点，满足宽能量调节范围和长期稳定工作的要求。

我们采用了较为先进的双腔自动频率稳定系统(AFC)、自动剂量率控制系统(ARC)和自动剂量均匀度控制系统(ADC)，以确保整机性能稳定和优良的束流品质。

4. 主要部分系统的质量保证

为确保设计指标的实现和整机高稳定工作的要求，对一些主要部件提出较为先进的指标和比较严格的要求：

- (1) 加速波导全部用变分法进行理论计算，故有较高的精度。加速管总长为2.57m，采用整体焊接(中间不用法兰)，因而减少了反射和损耗，并缩小了体积和造价。
- (2) 高稳定度的脉冲调制器，采用线型调制器加上降品质因数方法(de Qing方法)，保证脉冲幅度稳定度 $\leq 0.1\%$ ，并用外部可调的无互感十二节 Γ 形仿真线，保证顶部不平度可达 $\pm 0.5\%$ 。
- (3) 按照严格的设备和人员防护要求，设有一系列系统联锁和安全联锁装置。
- (4) 真空系统用两台离子泵，泵口真空度可达 10^{-6} Pa，恒温系统工作水温为 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ ，无需致冷装置，可保证四季整机正常运行。
- (5) 设有双路独立的剂量监测系统，并有断电剂量显示，电离室稳定性好，寿命长。
- (6) 聚焦及磁偏转系统，均采用节电的可控硅稳流电源供电，其电流稳定度好于 0.1% ，从而保证能量和束流的稳定性。
- (7) 电子枪采用轰击型钽阴极 Pierce 枪，脉冲束流可从5—500mA 连续调节，枪寿命

较长。

三、运行情况

NDZ 20 加速器从 1986 年 2 月 25 日投入临床使用以来, 已运行 2 年多, 运行概况及停机率见表 2。

表 2 NDZ20 运行情况
Table 2 NDZ20 operating situation

年份	应运行天数	实际运行天数	故障停机天数	停机率/%
1986	187	183	4	2.14
1987	255	246	9	3.53

1. 主要性能指标实测结果

A. 机械性能指标 (1) 治疗头旋转轴线与灯光野中心的一致性 $r \leq 1.5 \text{ mm}$; (2) 光野指示刻度偏差 $\leq \pm 2 \text{ mm}$; (3) 床的垂直度偏差 $\leq \pm 2 \text{ mm}$; (4) 机械等 中心偏差 $r \leq 1 \text{ mm}$ 。

B. 射线性能指标 (1) 照射野吸收剂量均匀度(抽测)列于表 3; (2) 能量(抽测)列于表 4 和 5; (3) 泄漏剂量测量, 最大为 0.67%; (4) 灯光野与照射野一致性, 误差 $\leq \pm 2 \text{ mm}$; (5) 半影 $\leq 8 \text{ mm}$; (6) 剂量稳定性(抽测): a. 短期稳定性: E_{10} 和 x_{15} 的最大变化分别是 0.68% 和 0.46%; b. 长期稳定性(各档测量): 一周稳定性 $\leq 3.4\%$; (7) 百分深度剂量曲线(实测)示于图 2 和 3。

表 3 照射野均匀度
Table 3 Radiation field flattening

能量	E_5	E_{10}	E_{18}	x_{15}
偏差/%	+1.06	± 2.04	+1.5 -4.2	± 2.38 (GT方向) -2.47 (AB方向)

表 4 电子线能量
Table 4 Electron beam energy

标称能量/MeV	5	10	18
水中射程/cm	2.4	5.4	9.3
实际能量/MeV	5.3	11	18.6
X 线污染/%	1.3	1.96	3.74

2. 二年运行中主要故障原因分析

(1) 某些电器元件性能不良或运行时损坏。如一些电位器、继电器、开关等元件经过一段时间使用后, 出现接触不良或损坏、调制器氢闸流管性能参数改变或损坏、充电二极

表 5 X线能量
Table 5 X-ray energy

标称能量/MV	10	15
50%剂量深度/cm	18.1	20.7
实际能量/MV	10	16.5

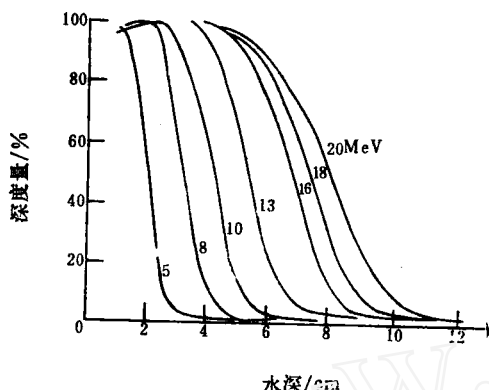


图 2 电子线在水中百分深度剂量曲线
Fig. 2 Central axis percentage depth dose curves of electron beam
SSD为100cm²

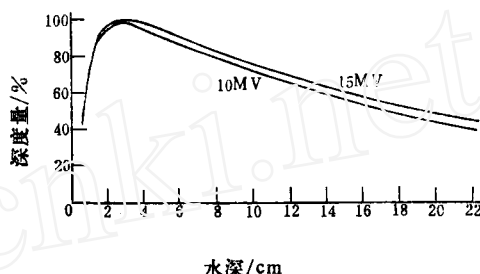


图 3 X线百分深度剂量曲线
Fig. 3 Central axis percentage depth dose curves of x-ray
SSD为100cm²

管击穿、高压电缆疵点击穿。

(2) 加工或设计不完善。如治疗床刹车不灵、有些点过松或过紧、治疗头野灯控制马达卡齿、X线金靶卡住、稳频腔调谐螺丝松动等，这些故障发生后经维修改进已排除。

(3) 维修操作方面。如电机轴承未定期加润滑油、恒温系统调节不当、开机前冷却自来水阀门忘记打开、治疗头旋转用力过大限位块撞断、偏转弯管打穿等。

(4) 外围条件：主机房温度过高、空调机失灵、冷却自来水临时停水、控制系统在地沟中信号线被老鼠咬断等。

上列一些故障发生后，由于技术上判断准确，国产元件随时可替换，故障发生后随时排除，因此停机时间少，没有造成长期影响患者治疗的后果，而且维修费用低廉，维修过程还有所改进。

四、临床近期疗效观察

NDZ 20 型电子直线加速器，在江苏省肿瘤所经过二年多的临床应用，每周开机五天，每天工作6—8h，机器性能比较稳定，剂量均匀度好，剂量率上升速度快，X线漏剂量小，联锁系统安全可靠。照射患者情况列于表 6。

现列举各治疗组病例如下：

1. 高能X线治疗组

病例 1 食管癌：屠××，男57岁，农民，因吞咽干饭时有梗阻感一月余，经食道钡透及食道造影摄片，示管道中段偏上有一长约6.5cm、口径0.6cm之不规则狭窄，钡剂通过

表 6 治疗人数及照射野次

Table 6 The number of treated patients and time of radiation field

年度	治疗人数	照射野次
1986	453	7957
1987	913	16075

缓慢。又经纤维镜检查，在距门齿27—28cm处粘膜粗糙不平，表面糜烂，伴少量坏死组织，质脆较易出血。取活检经病理证实为“食道中段鳞癌”，体检无特殊发现。于86年3月4日在模拟机下透视定位后，应用NDZ 20型电子直线加速器的15MV X线取等中心三野常规照射，照射野大小为 $6 \times 12 - 5 \times 8 \text{cm}^2$ （缩野技术），靶吸收剂量每周900cGy，分五次给予。总剂量达70Gy结束疗程。治疗过程中，全身和局部放射反应轻微，白血球和血小板计数均在正常值范围内，治疗结束时食道造影示，食管中段病变处管壁柔软光滑，扩张口径可达1cm，按食管癌放疗后X线诊断标准评价为II级，近期疗效良好。

病例2肺癌：刘××，男56岁，工人，咳嗽伴有左胸痛三月余，胸透发现左舌叶肺不张，经气管镜检查，见左下舌段开口被息肉样新生物全阻塞，左上、下叶开口分增宽，左下支气管呈纵行皱裂。取活检病理证实为“左肺鳞癌”。X线摄片为左舌叶肺根部致密块影 ϕ 为3cm，合并肺不张。

体检一般情况尚好，双侧锁骨上区未及肿大之淋巴结，胸廓两边对称，左肺呼吸音略低，未闻啰音，肺功能测定提示，肺部通气功能轻度减退。应用NDZ20型电子直线加速器的15MV X线取前后相对平行野照射（包及纵隔），野大为 $13 \times 16 \text{cm} - 7 \times 8 \text{cm}^2$ （缩野技术），靶吸收剂量每周850cGy，分五次给予，总剂量为65Gy（未经骨、肺校正）。为避免脊髓过量受照，纵隔受量达50Gy后即缩野照射（避开脊髓）。在治疗过程中，患者曾发生右下腹痛并感有恶心，体检发现麦氏点有压痛及反跳痛，白血球为 $7800/\text{mm}^3$ ，中性球为89%，淋巴球为11%，经外科会诊可能是急性单纯性阑尾炎，采取抗炎保守治疗一周，腹痛消失继续放疗。治疗结束X线摄片示左下肺致密边界模糊，与放疗前X片比较范围有所缩小，近期疗效有改善。

病例3鼻咽癌：高××，男60岁，干部，近半年来时有吸涕带血现象，半月前发现左上颈肿块伴局部软组织肿痛、咽痛，经当地医院抗炎治疗，左上颈部肿块一直未消退。来本所诊治，检查发现鼻咽顶壁隆起不平，局部有新生物，经活检病理证实为“鼻咽部低分化鳞癌”

体检一般情况好，左上颈胸锁骨乳突肌前缘可及一大大小为 $2 \times 2 \text{cm}^2$ 淋巴结，质硬活动。鼻咽顶壁偏左见新生物隆起，范围约 $2 \times 1 \text{cm}^2$ ，局部粘膜充血明显，无颅神经损害征象，经X线摄片示，鼻咽顶后壁呈不规则增厚隆起，颅底未见骨质破坏。临床诊断为鼻咽癌II期（ $T_1N_1M_0$ ）。应用NDZ20型电子直线加速器的10MV X线取二耳前相对平行野照射，野大为 $5.5 \times 7 \text{cm}^2$ ，双颅采用 ^{60}Co 前切野加10MeV电子束垂直照射，鼻咽部靶吸收剂量每周940cGy，分五次给予，总剂量达70Gy结束疗程，治疗过程中，鼻咽部新生物逐渐退缩，左上颈淋巴结缩小，患者觉口干，口咽部粘膜充血，照射野皮肤干燥，有色素沉着。疗程结束时，鼻咽部新生物已完全消失，无全身不良反应，白血球及血小板均在正常值范围，

近期疗效满意。

2. 电子线治疗组

病例4 乳房癌(术后): 朱××, 女68岁, 退休职工, 右乳癌术后, 经放疗、化疗后, 胸壁再发, 用8 MV电子线超分割放疗, 每次115cGy, 每日照射2次, 总剂量64.5Gy结束疗程, 右胸壁新生物明显退缩、消失、变平, “血管痣”样再发亦显示消退, 近期疗效良好。

3. 局部及全身反应观察

1. 局部反应:

受10—15MVX线照射, 在常规放疗下, 一般在3—4周后出现皮肤反应, 到疗终照射皮肤至多出现红斑反应, 不影响放疗计划的完成。受不同能量电子束照射, 皮肤、粘膜出现反应的时间较早, 一般在2—3周左右, 影响反应的因素较多, 故不作详细分析。

2. 全身反应:

(1) 放射反应症状: 如食欲减退、恶心、头晕、乏力等, 治疗病例中无一例因上述症状而中止放疗。

(2) 白血球及血小板观察:

所有患者在疗前、疗中定期作白血球及血小板计数, 有个别偶尔降至正常值以下外, 一般均在正常值范围内波动。

从各种肿瘤病人治疗过程的观察, 全身及皮肤反应不大, 临床近期效果是肯定的, 为扩大社会效益和经济效益, 满足肿瘤病人的需要, 江苏省、南京市计经委积极组织有关单位共同协作, 准备在二年时间内达到批量生产, 供国内外推广使用。

(编辑部收到日期: 1988年4月25日)

THE DESIGN, OPERATION AND CURATIVE EFFECT OF NDZ 20 MEDICAL LINEAR ACCELERATOR

LU YONGYI LAI QIJI

(Nanking University, Nanjing)

XU KANGXIONG MEI ZERU

(The Research Institute for Tumour Provention and Cure of Jiangsu, Nanjing)

ABSTRACT

NDZ 20 Medical linear accelerator is a kind of travelling wave feedback model. Its energy can be adjusted by changing frequency, phase, output rf-power of magnetron and beam loading. It has seven electron energy ranges between 5 to 20 MeV and two energy ranges of x-ray (10 MV and 15 MV). Some advanced techniques such as AFC, ARC and ADC are used automatically to stabilize control system for frequency, dose rate and flatness of field. Some major components have advanced parameter. The machine has run for two years. The ratio of down time was 2.14% in 1986 and 3.53% in 1987. All parameters have reached or surpassed the GBW 4-81 stipulated by the National Standards. In the last two years 1366 patients have been treated, the clinical cure effect was notable.

Key words Medical linear accelerator, Travelling wave feedback, Radiation therapy.