

# 30MeV 医用回旋加速器气体靶束流线的研制

魏素敏<sup>1)</sup> 张天爵 邢建升 李振国 储诚节 吴隆成 贾先禄 潘高峰 葛涛  
解怀东 吕银龙 侯世刚 管峰平 安世忠 钟俊晴 杨健俊 姚红娟

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 中国原子能科学研究院于1994年研究建成我国第一台医用强流回旋加速器CYCIAE-30及配套放射性同位素生产线,目前为了增加气体靶以生产新品种医用同位素,在原有束流输运线的基础上开展了束流输运系统的升级改造方案设计,包括束流线的总体布局考虑和光学设计,并根据束流光学设计的结果,进行了新增束流线上电磁元件的设计.在物理设计的基础上,还进行了施工设计以及各分系统的加工、调试、安装,并以物理设计得到的参数为依据进行了束流调试,靶上得到的束斑与理论值有较好的符合,满足设计要求.

**关键词** 束流线设计 光学匹配 磁铁设计 束流调试

## 1 引言

中国原子能科学研究院于1994年研究建成我国第一台医用强流回旋加速器CYCIAE-30及配套放射性同位素生产线<sup>[1]</sup>以来,每年开机供束时间约为5000小时,已经基本上做到了按照国内各医院需求定期批量供应<sup>18</sup>F、<sup>201</sup>Tl、<sup>68</sup>Ge等<sup>[2]</sup>医用放射性同位素.目前,为了适应新的科研和生产的需要,原子能院承担了核能开发科研项目“同位素与辐射应用关键技术研究”,要在CYCIAE-30现有的束流线基础上增加气体靶生产线以进行<sup>123</sup>I等用于医疗诊断中短寿命放射性核素的生产.

CYCIAE-30是一台能量在15MeV~30MeV范围内连续可调、加速负氢离子、双向剥离引出质子束的紧凑型回旋加速器,从加速器的东引出口引出的束流主要用于直接辐射液体靶以生产<sup>18</sup>F等诊断药物,从西引出口引出的束流经过7.9m输运线输运到不同的固体靶上以生产多种医用放射性同位素<sup>[1]</sup>.

新增气体靶生产线选择利用西引出口束运线在束流经过加速器大厅西墙后通过偏转磁铁将束流偏转74.75°,向南输运进入新增的气体靶靶室.当偏转磁铁无磁场时束流直通输运到固体靶上.该方案的优点在于可以利用现有的束运线上的第一对双单元四极透镜并且实验室厂房布局规范,易于实施,仅需考虑新增靶室的屏蔽问题,现有厂房不需做任何改动<sup>[3]</sup>.

## 2 光学设计

### 2.1 束流线升级改造的布局设计及设计要求

原有固体靶束流线设计由于条件限制,没有考虑空间电荷效应引起的束发散,导致实际运行过程中出现在第一对透镜处的束流损失偏大<sup>[4]</sup>.现在利用TRACE-3D<sup>[5]</sup>进行新增束流线的设计,在考虑空间电荷效应的情况下进行强流束输运的匹配,要求束斑尺寸不能太大,传输过程中束包络不超过25mm,束流能量从15MeV至30MeV连续可调,流强范围为0—1mA.

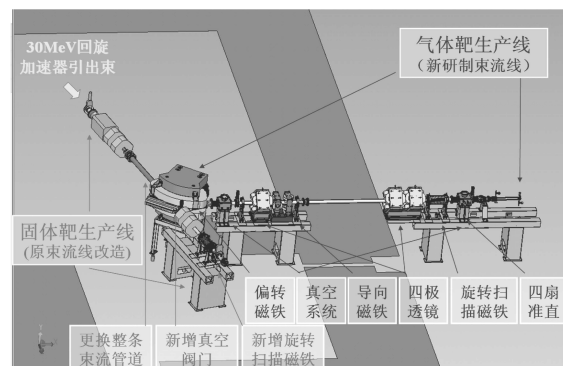


图1 新增束流线上元件排列示意图

束流线布局如图1所示,两条束流线共用西引出口至偏转磁铁的一段束流线,并由此偏转磁铁分配束

流至气体靶或者固体靶以生产所需同位素. 由于充分利用了偏转入口、出口角的边缘聚焦效应, 因此从开关磁铁出口至气体靶这一段束流线上只安排了三个四极透镜以进行束流包络的控制, 在满足设计要求的基础上最大限度的节省了空间. 同时, 由于空间的限制, 气体靶之前的一对双单元四极透镜需要占南墙的部分空间.

## 2.2 束流光学匹配结果

按照束包络及束斑的要求, 利用 TRACE-3D 程序

分别对能量为 30MeV, 20MeV, 15MeV 以及流强分别为 0, 1mA 时的束流进行匹配. 考虑到气体靶是一个长 500mm,  $\Phi 20\text{mm}$  的圆筒, 为了避免束流在靶中过分发散以至于碰壁而损失, 因此在光学匹配时要使束流在靶中成腰. 图 2 显示了 30MeV, 1mA 的束流传输过程中的包络情况.

上述光学布局可以通过调节四极透镜的场梯度来有效地调节输运过程中包络和靶上的束斑大小, 以满足能量从 15~30MeV、流强从 0~1mA 的束流传输, 适应不同的生产要求.

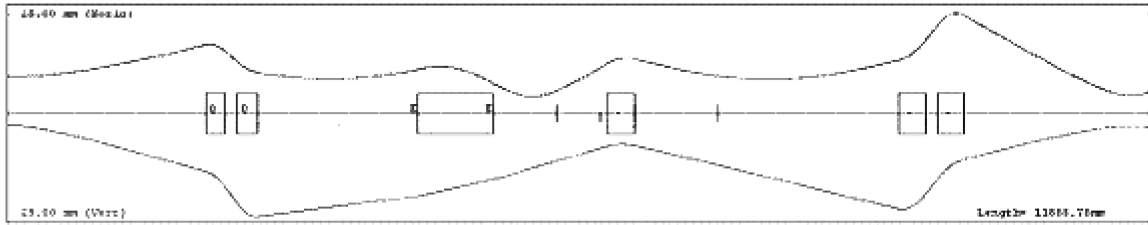


图 2 TRACE-3D 计算 30MeV, 1mA 束流线的结果

## 3 电磁元件设计

新增束流线上新增的电磁元件共计: 3 个四极透镜、1 对导向磁铁、1 个偏转磁铁、1 个旋转扫描磁铁; 另外, 现有的固体靶束流线上新增 1 个旋转扫描磁铁. 所有这些电磁元件的设计、加工、测量均已完成, 下面以四极透镜为例进行说明.

为了产生常梯度磁场, 理想的四极透镜的极面形状应为双曲线, 但在实际加工及安装、定位中存在困难<sup>[6]</sup>, 而基于准确的磁场数值分析所提出的极尖断面为折线的四极透镜结构, 已经在中国原子能科学研究院 30MeV 回旋加速器现有的束运线和串列加速器核物理实验室的 6 条束运线中先后得到应用, 并积累了成熟的设计方法和加工经验. 该结构在保证磁场梯度波动较小的基础上, 与双曲线相比, 具有磁场集中、磁场梯度高、只需普通机床加工、易于安装定位、易于保证磁极对称性等优点. 该结构设计的难点在于: 通过磁场数值分析, 准确寻找磁极折线的顶点位置<sup>[6]</sup>. 本设计工作的重点在于利用 POISSON 程序进行优化设计, 找到适合的折点位置, 以达到均匀的场梯度, 并采用 MAFIA 程序进行三维磁场计算, 以研究边缘场效应和四极铁的有效长度等.

经过大量的计算, 综合比较, 确定了磁极折线顶点的最佳位置. 同时, 由光学模拟所得结果可知, 所需几个四极透镜的有效长度为 290mm, 考虑到端部场效应, 可由下式估算磁铁机械长度:  $L_m = L_{\text{eff}} - ka$ , 其中参数  $k = 0.8 \sim 1.14$ <sup>[7]</sup>,  $a$  为磁极内切圆半径, (本设计

中的  $a$  为 38mm), 估算时取  $k = 0.95$ , 则可以计算得到磁铁的机械长度为 254mm. 利用 MAFIA 程序进行三维磁场模拟, 计算得出磁铁中心轴线上的磁场梯度分布, 进而计算得到磁铁的有效长度约为 290.3mm, 满足光学条件, 这说明机械长度 254mm 的计算是合理的.

图 3 显示的是加工完成后的四极透镜. 之后还进行了磁场测量及磁铁长时间运行考验, 磁场测量的结果与设计结果符合教好.

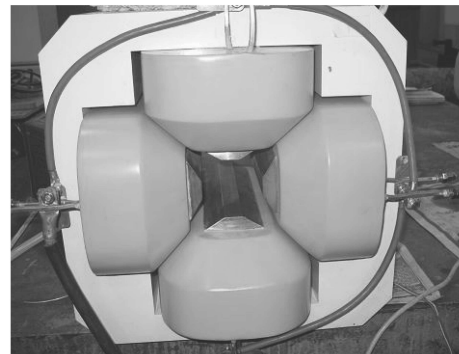


图 3 加工完毕后的四极透镜

## 4 安装调试结果

在完成了所有束流线布局设计、光学匹配、磁铁设计及加工、相关专业设计及加工工作的基础上, 于 2007 年在中国原子能院进行了整条束流线的安装、调试, 并于 2007 年 5 月初调试成功. 通过一段时间的调试, 各个元件、系统均工作正常, 可以投入使用. 整条束流线的传输效率可以达到 96.5%.

## 5 结论

30MeV 医用回旋加速器 CYCIAE-30 的新的气体靶束流线中国原子能研究院研制成功. 在对原有的输

运线进行光学设计与布局分析的基础上, 充分利用现有条件, 完成了整体束流线的设计, 并完成了整条束流运输线的安装与调试工作, 传输效率达 96.5%, 对进行新品种同位素的研究与生产有重要的实用价值.

### 参考文献(References)

- 1 SUN Zu-Xun et al. Nuclear Science and Engineering, 1997, **17**(2): 157—165 (in Chinese)  
(孙祖训等. 核科学与工程, 1997, **17**(2): 157—165)
- 2 FAN Ming-Wu, ZHANG Tian-Jue. Initial Operation of CIAE Medically Used Cyclotron, Proc. of The 7th Asia Pacific Physics Conference (7APPC), Beijing, China, Aug. 19—23, 1997
- 3 WEI Su-Min et al. Atomic Energy Science and Technology, 2006, **40**(2): 139—144 (in Chinese)  
(魏素敏等. 原子能科学技术, 2006, **40**(2): 139—144)
- 4 ZHANG Tian-Jue et al. Beam Transport Line of CIAE Medical Cyclotron and Its Magnetic Elements Design Studies, Proc. of the 1993 Particle Accelerator Conference
- 5 Crandall R, Rusthoi D P. TRACE 3-D Documentation, Third Edition, May 1997, Los Alamos National Laboratory
- 6 FAN Ming-Wu, ZHANG Tian-Jue, CHU Cheng-Jie. Atomic Energy Science and Technology, 1997, **31**(4): 296—300 (in Chinese)  
(樊明武, 张天爵, 储诚节. 原子能科学技术, 1997, **31**(4): 296—300)
- 7 LI Quan-Feng. Electromagnetic Field Calculation and Magnet Design. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 185 (in Chinese)  
(李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计. 北京: 清华大学出版社, 2002. 185)

## Beam Line Design and Construction of Gas Target for a 30MeV Medical Cyclotron

WEI Su-Min<sup>1)</sup> ZHANG Tian-Jue XING Jian-Sheng LI Zhen-Guo CHU Cheng-Jie WU Long-Cheng  
JIA Xian-Lu PAN Gao-Feng GE Tao XIE Huai-Dong LÜ Yin-Long HOU Shi-Gang  
GUAN Feng-Ping AN Shi-Zhong ZHONG Jun-Qing YANG Jian-Jun YAO Hong-Juan  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** The first medical high intensity cyclotron CYCIAE-30 and its beam line for the isotope production were built in 1994 at China Institute of Atomic Energy. Now, an upgrading beam line system is designed based on the existing beam line of CYCIAE-30 to transport the beam extracted from the cyclotron to a gas target for the new isotope production, including elements location design, optics simulation and magnet design. The machining and installation of all the elements are accomplished based on the design. The beam tuning is finished and the transmission of 96.5% is obtained.

**Key words** beam line design, optics simulation, magnet design, beam tuning