

“神龙一号”加速器束流输运系统研制*

代志勇¹⁾ 章文卫 谢宇彤 李洪 张开志 章林文
李伟峰 刘承俊 邓建军 丁伯南

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

摘要 文章系统介绍了“神龙一号”直线感应加速器束流输运系统的研制过程和取得的成果,重点阐述了螺线管线圈、二极校正线圈、多功能腔等关键单元部件的设计、传输元件的磁轴测量和准直安装、束线的总体布局、束流调试等研究内容.束流调试结果表明,该束流传输线的设计是成功的,并且具有较宽的动态适应范围.最后,结合束流调试的经验,提出了一些建议供以后工作参考.

关键词 束流输运 设计 总体布局 束流调试

1 引言

在长达几十米的输运线上,因空间电荷效应、束包络横向振荡^[1]、束心横向运动(包括Corkscrew运动^[2]和BBU效应^[3])等机制将导致束流品质逐步变坏.因此,进行束流输运系统设计的目的是尽量抑制或减小这些效应或机制对束流的扰动,把高品质的强流电子束传输到出口.

2 束流输运系统简介

“神龙一号”直线感应加速器的主体由注入器输运段、加速段、聚焦段等3个部分组成.整个束传输线从阴极发射面算起到韧致辐射靶结束,全长约48m,其间数千安培的强流脉冲电子束经过约170mm的二极管加速区,电子能量达到约3.6MeV,再经过4.5m的无加速场漂移区到达注入器出口,随后进入到长38.5m的加速段,在加速段出口时电子能量不低于18MeV;然后进入到长约3.8m的无加速漂移段,经过调整束流进入透镜的入口参数;最后通过两级磁透镜的聚焦将电子束聚焦到韧致辐射靶上产生X射线.整个束传输线使用了一百多个螺线管线圈(包括两个磁透镜)约束

电子束的横向发散,一百多对二极校正线圈调校束流的偏心,近20个在线的BPM监测运输过程中束流的强度和位置.

注入器束传输线主要由安装于二极管区的1个反向补偿线圈(BC)、3个引导线圈(LC1—LC3)和安装于注入器阳极段加速腔内的5个传输线圈(IC1—IC5)及一个多功能腔中的主线圈(JC1)组成,如图1所示.在加速段,4个加速腔和1个多功能腔为一节,一共18节,多功能腔起衔接作用,每个多功能腔内安装一个BPM.线圈固定安装在腔的线圈室中,因而腔的结构形式也就是线圈的排布形式.

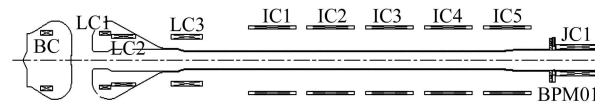


图1 注入器束流传输元件布局

漂移段的螺线管线圈采用比较紧凑的排列方式,数量为8—10个,根据实验需求的不同略有变化.在进入透镜前的一段锥形管上游安装调整线圈(短螺线管线圈,具有较强的调整能力).后面紧跟的是磁透镜组成的末级聚焦结构.

2006-07-24 收稿

* 国家专项基金资助

1) E-mail: dzycap@yahoo.com.cn

3 关键部件研制和关键技术研究

3.1 螺线管线圈

螺线管主线圈^[4]是“神龙一号”加速器束流输运系统的核心部件,它的设计研制质量直接影响电子束的输运效果.减小磁轴倾斜是电子束稳定输运提出的要求,也是螺线管线圈优化设计的方向.考虑到要给线圈定位安装和磁轴准直留有一定的余量.实际选取单个螺线管的磁轴倾斜范围为 $\pm 1\text{mrad}$,峰值磁感应强度约 0.25T .

控制线圈磁轴倾斜的重要技术措施是在线圈骨架上缠绕“匀场环”,其结构如图2,它的作用相当于一种磁校直器,所用的材料是平均厚度为 0.1mm 的DG4硅钢薄带.通过计算不同的匀场环结构参数(如厚度、宽度、占空比等)对线圈性能的影响,最后选择它的宽度为 5mm ,厚度为 4.5mm ,占空比为 0.38 .

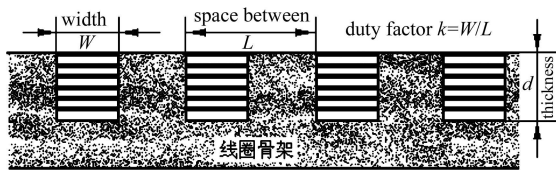


图2 匀场环结构示意图

3.2 二极校正线圈

匀场环的引入使螺线管线圈的磁轴倾斜大大减小,每个螺线管再装配正交两对二极校正线圈,产生任意方向的均匀横向磁场,就能对入射束轴进行有限调节,使加速器的“三轴”(几何轴、磁轴和束轴)达到高精度合一.

通过计算和对模型件测量结果的对比分析证明,作为校正线圈,绕组 \sin/\cos 分布明显优于均匀分布.以 \sin/\cos 分布制成的二极校正线圈样品的平面展开图如图3所示,在校正线圈磁场分布测量中发现,处于螺线管内时,由于匀场环对径向场的屏蔽作用,使校正线圈磁场强度增强 60% 左右(如图4).

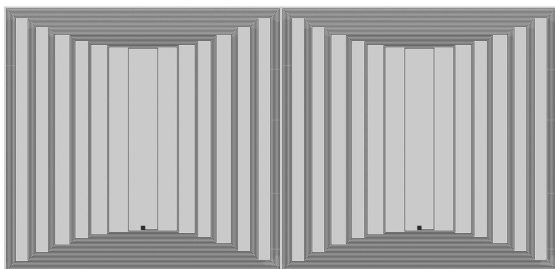


图3 二极校正线圈平面展开图

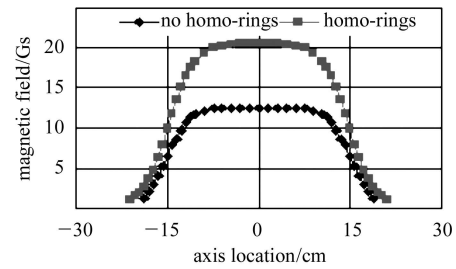


图4 校正线圈在螺线管内外测量结果比较

3.3 多功能腔

如图5所示,自主设计的多功能腔^[5]具有如下特点:(1)保持束输运磁场的连续性;(2)方便进行磁轴对中,保证磁轴与几何轴的高精度合一;(3)能外接高真空机组;(4)低 Q 值和低横向阻抗;(5)带有束流探测器,方便进行束流诊断;(6)是维修拆卸节点,与加速腔之间实现“软连接”.它替代了以前采用波纹管连接方式,不仅简化了结构,更重要的是提高了加速器的性能.

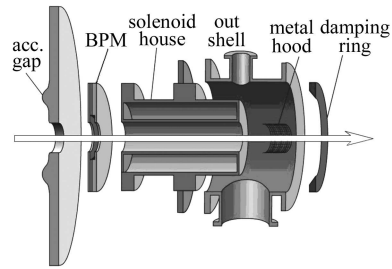


图5 多功能腔的结构简图

3.4 恒流电源

根据束流输运的要求自主设计研制了两种高稳定性的恒流电源,其指标如表1所示,此外,两种电源稳定输出建立时间不超过 1s 、电流输出预置、调节、监控实现远程控制.

表1 高性能恒流电源性能参数

| 电源型号 | 输出幅值/A | 调节分辨率 | 负载能力 | 稳定度 | 纹波 | 故障率 |
|------|---------|-------------------|-------------|--------------|--------------|----------------|
| 大型 | 300/500 | $\leq 1\text{A}$ | 0.1Ω | $\leq 0.1\%$ | $\leq 0.3\%$ | $\leq 10^{-4}$ |
| 小型 | 2 | $\leq 5\text{mA}$ | 5Ω | $\leq 1\%$ | $\leq 1\%$ | $\leq 10^{-4}$ |

3.5 磁轴测量

一条拉紧的金属细丝通过加速腔,其两端固定在能精确进行二维调节的机构上.当代表着加速腔机械轴的这条细丝与组元磁轴不重合时,螺线管线圈产生的磁场将会有一径向分量作用于通过该丝的脉冲电流上,由于洛伦兹力的作用,该丝出现振动,此振动以近

似于声速沿丝的两端传播,被距组元一定距离的位移探测器捕获,输出幅度与振幅大小成线性关系的电信号,如图6所示。

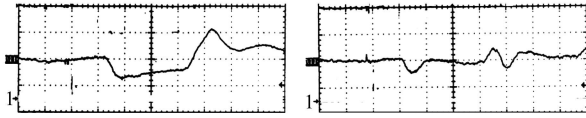


图6 典型的磁轴倾斜(左)和偏移信号(右)
(纵轴: 5.2V/格; 横轴(时间轴): 2.0ms/格)

通过调节二维调节器寻找磁轴,让细线与磁轴重合,磁轴倾斜(tilt)和偏移(offset)信号消失,比较细线调节前后的位置,可以得到加速腔的磁轴倾斜和偏移量的大小。这就是所谓的脉冲悬丝法^[6],用它可以对线圈的质量进行验收,测量并检验线圈在加速腔的安装效果,还可以对多组元加速段的准直效果进行检验测量。

3.6 准直安装

四个加速腔和一个多功能腔首先连接构成一个组元段,并进行磁轴的预准直。然后固定在一个可六维调节的支架上,最后全部18个组元段在加速器轴线上进行对中安装^[7]。组元段的对中精度达到:磁轴倾斜 $<0.12\text{mrad}$,磁轴偏移 $<0.03\text{mm}$,整个加速器的对中精度达到:磁轴倾斜 $<0.5\text{mrad}$;磁轴偏移 $<0.1\text{mm}$ 。考虑到单组元本身所具有的磁轴偏差($<0.5\text{mrad}/0.1\text{mm}$),该加速器的磁轴准直精度不大于 $0.71\text{mrad}/0.15\text{mm}$ 。

4 束流调试

4.1 束流传输中的某些不稳定性及应对措施

首先是空间电荷效应。低能区尤其是注入器二极管区空间电荷效应的影响十分显著。要将阴极发射的电子束有效地导入阳极孔,外加磁场的聚焦力必须抵消或部分抵消空间电荷力。适当选取阳极附近磁场峰值的大小和位置使束流以适当的输运半径进入阳极漂移段。

其次,束心Corkscrew运动是直线感应加速器束流传输中要解决的最主要的横向运动之一。在束传输线设计上所作的诸多努力以及开展的磁轴测量与校正技术和加速器高精度准直安装技术等研究工作的主要目的就是为减小束心的Corkscrew运动。

还有一种横向运动是BBU不稳定性,由它导致的束心位置偏移表示为

$$\xi_n \propto \xi_0 \exp(2n\omega_0\rho Z_{\perp} Q I_b / I_{\alpha}), \quad (n \gg 1), \quad (1)$$

式中 ξ_n 是第 n 个腔处束流质心横向位移, ξ_0 是束流质心初始横向位移, Z_{\perp} 是加速腔的横向阻抗, ω_0 是加速腔 TM_{1n0} 模谐振频率, ρ 表示聚焦磁场的作用, Q 是加速腔的品质因素, I_{α} 是Alfen电流, I_b 是电子束流强度。它使束心横向位移呈指数激增,终致束流脉冲的后半部分碰壁损失,束流脉宽变窄。从束流传输的角度,使用强磁场是抑制BBU的有力措施。

综上所述,束流动力学研究结果表明,在螺线管线圈能力许可的情况下,采用强磁场、减小束流包络是非常重要的。

4.2 输运磁场的初步确定

根据平衡状态的束包络方程可以估算不同能量下选取不同的束传输半径所需要的匹配磁场,结合线圈的能力(最大轴向磁感应强度不超过 2400Gs^1),束流的RMS半径应该选为 $5\text{--}6\text{mm}$ 。对于传输磁场沿轴向的变化趋势,关键是如何考察束流在加速传输过程的归一化发射度的变化趋势。

根据“神龙一号”加速器束流剖面的实验测量结果,我们确定了因束流剖面电荷密度分布变化导致归一化发射度增长的模式^[8],结合轴对称束流的RMS包络方程,编制了相应的程序对束包络振荡的情况进行了数值调试,得到了如图7所示的调试结果,以此作为束流调试实验磁场配置的指导。

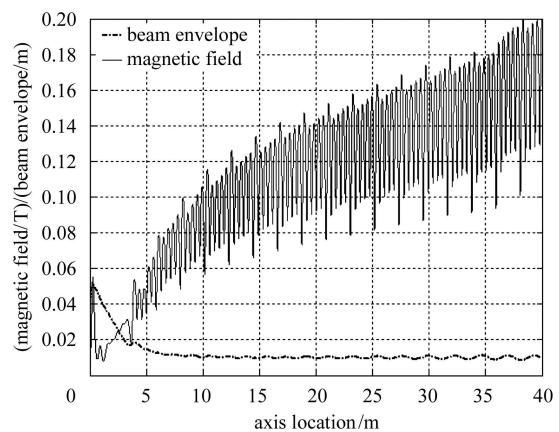


图7 数值调试获得的束包络及传输磁场配置

4.3 注入器束流调试

在注入器束流调试中,首先通过数值模拟方法,初步确定束流过聚焦和聚焦不足两种极端情况下引导

1) $1\text{Gs}=10^{-4}\text{T}$

线圈运输磁场峰值;然后以注入器出口束流波形为参考,以实验方法找到这两种情况下引导线圈运输磁场的实际配置;再通过测量束流的剖面或发射度,选定一个折中的引导线圈磁场并初步确定了注入器运输磁场的总体配置;最后,对注入器的束参数如发射电流、束流发射度、电子能量及能散进行了测量,并根据测量结果对运输磁场进行了优化,各项主要指标都达到了世界先进水平^[9].

4.4 加速段磁场配置与束流调试

加速段有多达90个螺线管线圈,采用类似注入器的调试方法是不可能的.按照理论分析、近似计算和数值模拟分别给出的磁场参数及其沿轴线的变化趋势,我们对加速段的磁场采用“逆向”配置法.所谓“逆向”配置法,就是在加速器的末端加载最强的传输磁场,该处的轴向磁场强度以近似计算值为参考,然后按照数值模拟结果沿上游逐级递减,到达与注入器的衔接处时,通过该处的多功能腔实现传输磁场的平滑过渡.在实验调试的过程中依据抽样测量的束斑大小对传输磁场进行调整.

经过艰苦地调试实验后,基本确定了主磁场配置.注入器出口束流与加速器出口束流如图8所示.

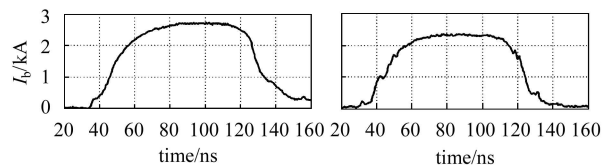


图8 注入器出口(左)与加速器出口(右)束流波形

4.5 束心校正

在主磁场基本确定之后,利用二极校正线圈动态调谐功能进行束流质心的校正.束流质心轨迹的调谐从注入器开始,分组进行.根据前次实验中BPM上所得的束心位置、Corkscrew模振幅和调谐经验,逐个改变相邻两个BPM之间校正磁场的大小和方向,再进行下一次实验验证及修改,如果下游BPM测得的束心横向偏移皆在减小,说明调谐方向正确,如此循环往复,直至获得较满意的结果.通过束心调谐,可以将整个束流传输线上的束流偏心范围控制在 $\pm 1\text{mm}$ 左右.

4.6 聚焦调整及调试结果

在进入末级透镜之前,束流要经过长约4m的无加速漂移.强流轴对称电子束聚焦的数值模拟结果表

明,在透镜入口处,适当放大束包络半径,有利于获得更小的焦斑尺寸.因此,从加速器出口到透镜入口,通过漂移段线圈的调节,束包络逐步平缓增大,但又要防止包络的过度“膨胀”和剧烈振荡,以免电子碰壁损失.图9给出的是典型的击靶束流脉冲波形.聚焦段的束流调试工作基本上是通过实验完成的.当末级透镜的励磁流为610A、透镜离靶的距离为23.2cm,并采用最新研制的叠靶后,终于使焦斑尺寸达到设计指标.

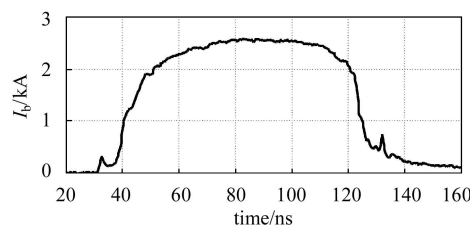


图9 钼致辐射靶上的束流波形

在全程束流传输过程中,束流损失较小约5%,束流脉冲的形状基本维持不变;打靶电流强度约2.6kA,脉冲宽度(FWHM)约60ns,束心偏移控制在1mm左右,其他结果见文献[10].

5 总结

“神龙一号”直线感应加速器束流运输系统的研制首先在设计^[11]上重点考虑了对束流横向运动产生较大影响的磁轴准直问题,线圈的设计采用了新工艺、新方法降低了线圈的磁轴倾斜和偏移,创造性地设计了多功能腔,解决了运输磁场的连续性、磁轴准直和机器维护之间的矛盾,并使用国际先进的准直安装技术,使加速器束流传输线的磁轴和机械轴达到高精度合一,大大消除了束流横向运动的根源.束流调试实验以及实验结果表明,“神龙一号”加速器束流传输线具有较宽的动态适应范围,其设计是成功的.

另一方面,在“神龙一号”加速器束流调试过程中,只有BPM一种在线测量手段,而发射度测量因其测量精度的限制未能发挥重要作用,只基于BPM信号的束流调试带有很大的经验性和盲目性.由于束流传输线的这种较宽的动态适应范围,尽管目前的传输磁场配置还远没有达到优化,但束流调试仍取得了好的结果.今后在发展多元的束测技术以及提高束测精度的同时,还将发展强有力的束流动力学数值模拟技术,为束流调试提供定量或半定量的指导.

参考文献(References)

- 1 ZHANG Guan-Ren. High Power Laser and Particle Beams, 1992, **4**(1): 53—58 (in Chinese)
(章官人. 强激光与粒子束. 1992, **4**(1): 53—58)
- 2 CHEN Y J. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1990, **A292**: 455—464
- 3 Neil V K et al. Particle Accelerators, 1997, (9): 213—222
- 4 DAI Zhi-Yong et al. China Nuclear Science and Technology Report. Beijing: Atomic Energy Press., 1998 (in Chinese)
(代志勇等. 中国核科技报告. 北京: 原子能出版社, 1998)
- 5 DAI Zhi-Yong et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(10): 1334—1336 (in Chinese)
(代志勇等. 强激光与粒子束, 2004, **16**(10): 1334—1336)
- 6 ZHANG Wen-Wei et al. High Power Laser and Particle Beams, 1996, **8**(2): 203—208 (in Chinese)
(章文卫等. 强激光与粒子束, 1996, **8**(2): 203—208)
- 7 LI Hong et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(10): 1349—1352 (in Chinese)
(李洪等. 强激光与粒子束, 2004, **16**(10): 1349—1352)
- 8 DAI Zhi-Yong et al. HEP & NP, 2004, **28**(9): 1002—1006 (in Chinese)
(代志勇等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(9): 1002—1006)
- 9 DING Bo-Nan et al. HEP & NP, 2005, **29**(3): 119—223 (in Chinese)
(丁伯南等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(3): 119—223)
- 10 DING Bo-Nan et al. HEP & NP, 2005, **29**(6): 604—610 (in Chinese)
(丁伯南等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(6): 604—610)
- 11 DAI Zhi-Yong et al. High Power Laser and Particle Beams, 2001, **13**(6): 781—784 (in Chinese)
(代志勇等. 强激光与粒子束, 2001, **13**(6): 781—784)

Development of Beam Transport System of “Dragon- I ” LIA *

DAI Zhi-Yong¹⁾ ZHANG Wen-Wei XIE Yu-Tong LI Hong ZHANG Kai-Zhi ZHANG Lin-Wen
LI Wei-Feng LIU Cheng-Jun DENG Jian-Jun DING Bo-Nan
(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract The development of beam transport system of “Dragon- I ” linear induction accelerator(LIA) and the achievements are introduced in this paper. Along with the designs of many key elements such as solenoid coil, dipole steering coils, and multi-functional cavity, several research items including measurement of magnetic axis, alignment, layout and beam tuning are also described respectively. The experimental results indicated that the design of whole beam transport system is successful. In the end of the paper, some suggestions are given for the future work.

Key words beam transport, design, layout, beam tuning

Received 24 July 2006

* Supported by Special National Foundation of China

1) E-mail: dzycap@yahoo.com.cn