

神龙一号加速器调试*

李劲¹⁾ 张开志 代志勇 章文卫 王敏洪 赖青贵 禹海军 李洪
马冰 石金水 章林文 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 介绍了神龙一号直线感应加速器脉冲功率系统、注入器、束流输运系统、韧致辐射转换靶的调试情况,给出了调试结果,并对下一步工作进行了展望. 调试结果表明,神龙一号加速器全面达到设计指标.

关键词 神龙一号 直线感应加速器 调试

1 引言

直线感应加速器可用于闪光X光照相、辐照效应、自由电子激光、粒子束聚变、高功率微波等研究领域. 中国工程物理研究院研制成功的神龙一号直线感应电子加速器达到了国际先进水平,其具体的设计指标如表1^[1, 2].

表1 神龙一号加速器设计指标

电子能量/MeV	18—20
束流强度/kA	≥ 2.5
束流脉宽/ns(FWHM)	≤ 90
X光焦斑直径/mm(FWHM)	≤ 1.5
X光照射量(1m处)/(C/kg)	≥ 0.077

神龙一号加速器包含脉冲功率系统、注入器、加速腔和束流传输系统、韧致辐射靶、控制和监测系统. 调试中充分利用数值分析与实验参数相结合的方法,解决了大量的工程问题,对一些物理设计进行了更改,保证加速器参数达到了设计指标.

2 脉冲功率系统调试

脉冲功率系统是加速器的功率源,根据总体性能要求,脉冲功率系统给加速器提供84路电压脉冲,按照严格的时序输出到加速腔^[3]. 作为一台强流高电压装置,脉冲功率系统对整个加速器的可靠性和稳定性具有决定性作用. 它所能达到的总加速电压决定了被加速电子的最终能量,加速电压平顶宽度和加速电压馈送到各个加速腔的时间同步性决定了电子束的能散度.

系统包含91个高压气体开关、8台Marx发生器和48套Blumlein以及5000m高压连接电缆. 为此建立了包含所有元件和电缆的Pspice集总参数与分布参数电路模拟模型以指导调试,同时在调试中不断修正模拟参数.

调试初期,系统部件出现大量的高电压击穿问题. Marx输出电感、Blumlein开关、加速腔电压馈入驱动杆以及Marx输出电缆等均先后出现高压击穿. 前3个部件均属于密封设计不合理导致气体或油渗漏,使部件耐压性能降低. 电缆击穿问题的解决则是利用电路模型设计消振荡元件,在不影响主波形的同时消除了主波形后的高频振荡(见图1).

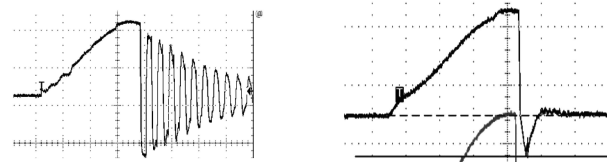


图1 Marx对Blumlein的充电波形
(左图原始波形,右图为增加消振荡元件后的波形)

在后续调试中,通过精细调试开关偏置电位和调整开关工作状态,提高电压幅度与相位的稳定性. 精细调试后的开关工作区宽,工作在200kV时,气压(25%N₂和75%SF₆混合气)在0.2MPa—0.6MPa之间均能正常动作,动作时间抖动达到了0.6ns,大大提高了84路输出的同步性和可靠性. 单路输出电压平顶

2008-01-07 收稿

* 国家专项基金资助

1) E-mail: caeplijin@263.net

宽度达到65ns(纹波系数1%),每一路输出的时间抖动约1ns,总加速电压18MV—20MV可调,稳定度优于0.4%,系统失误率小于0.2%.

3 注入器调试

注入器采用天鹅绒冷阴极发射电子.调试的主要目的是选择合适的二极管构型,调试合适的注入器匹配磁场,获取较好的输出束流波形、束心位置和束包络.调试中用类Pierce阴极(发射面)取代了初期采用的平面阴极以减小发射度.阴阳极间距最终定为170mm,二极管工作电压3.4MV—3.7MV.3.6MV时发射电流3.5kA,注入器输出2.8kA.采用校正线圈进行束心位置动态校正,注入器出口束心偏移从1.4mm降为0.61mm.采用修正三梯度法测量注入器输出的电子束脉冲中间部分束的发射度为1040mm·mrad^[4].

调试中作出的一个较大的物理设计更改是把阴阳极叠加杆的等阻抗设计变为变阻抗设计(见图2).注入器阴、阳极杆与感应腔内壁组成了同轴传输线,在传输线电长度比较短的情况下,设计时通常可以不考虑波过程,阴、阳极杆也采用等半径结构.而在本系统中,阴、阳极杆与感应腔间注入了变压器油以提高绝缘强度,相对气体或真空介质电长度要长一些,整个电长度已经超过了10ns,必须考虑波过程.考虑到传输线之间的阻抗匹配,设计了变阻抗的阴阳极杆.阴、阳极杆在感应间隙处有一个渐变的过渡段,从尾端到阳极头逐步变细,即阻抗逐步升高.变阻抗设计把注入器电子束的能散度(60ns内)从等阻抗设计的5%降到了2%

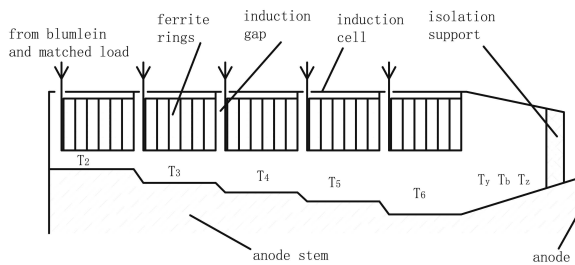


图2 注入器阴极变阻抗叠加杆

4 束流输运系统调试

由于整个加速器机械轴采用了精密的准直对中安装技术,束流传输元件和磁场配置较为合理,整机第一次通电时束流就顺利传输到加速器出口.同时,观察到了严重的BBU效应,在电子能量被加速到约10MeV以后,束流的尾部出现振荡,而且发展迅速,致使束流尾部的电子碰壁损失而使束流宽度变窄,从

最初的80ns降低到40ns(见图3).通过理论分析和数值计算发现BBU主要是由多功能腔中的尾场激励的.通过设计可以轴向伸缩的金属网罩来屏蔽多功能腔间隙,成功地抑制了BBU^[5].

束流调试的主要工作是找到束流传输的最佳传输磁场,选择较小的束包络半径.另外精细调整校正线圈调谐束心轨迹,使束心偏移量控制在1mm以内.后期调试还对整个束线的BPM磁芯重新进行定位,更换弱磁性的聚焦段支撑平台为无磁性的铝材料平台,从而使改善整个束线磁轴的对中状况.保证了加速器最终输出达到2.6kA,与注入器出口2.8kA相比仅损失了7%.

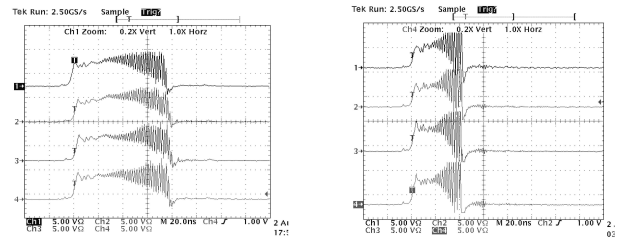


图3 BBU效应引起的高频振荡和脉冲缩短
(a)第40个腔后;(b)加速器出口.

5 钼致辐射转换靶调试

采用EGS4程序数值计算的最佳靶厚是1.2mm^[6].调试初期靶材采用3块1.2mm厚的钼靶,在多次打靶后,加速腔出现击穿现象,且击穿的概率随打靶的次数增多显著增加,尤其是最后两加速段的加速腔.用工业内窥镜观察加速间隙和绝缘环,有大量的钼微粒,由此可判定发生加速腔击穿现象的主要原因是由于电子束打靶导致的钼颗粒回流至加速腔内引起的(见图4).

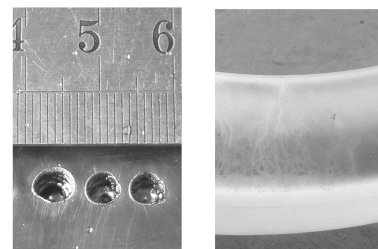


图4 使用后的叠靶(左)及加速间隙内的颗粒(右)

为此,设计了叠靶结构来减少电子束对靶的冲击和破坏.叠靶由24层钼箔组成,每层钼箔厚0.05mm,间距为0.5mm,层与层之间为真空隙.在同样电子束作用下,该叠靶与1.2mm整靶产生的X光照射量基本相同.在采用叠靶后,进入到加速腔回流颗粒已经大大减少,每次清理颗粒并对损伤部位修复后,加速器可以正常工作上千次.

6 今后的工作

神龙一号已经达到设计指标, 但仍有许多工作可以继续深入开展, 如电磁兼容及可靠性研究等.

作为一种强流加速器, 神龙一号在运行过程中产生的高电压、大电流窄脉冲会对环境产生强烈的瞬变电磁干扰. 另外, kA 级电子束通过束靶作用产生高能 γ 射线, X 射线和中子, 会作用于环境周围的各种物体产生强电磁脉冲. 这些强电磁脉冲通过空间和传导耦合, 影响到其它的测量仪器、控制设备、电源或传输电缆等, 严重的会导致设备寿命降低、误动作、信号

畸变等. 在神龙一号调试过程中已经解决了大量的具体电磁兼容问题, 但缺乏系统、科学、量化的研究, 这需要今后继续全面地开展深入研究.

作为一种高电压装置, 大量的高电压元器件属易损件, 寿命较短, 而且随着使用年代的递增故障率也会增加. 因此, 专门针对该装置进行可靠性研究, 建立可靠性模型, 利用动态知识库、人工智能、数据挖掘、模式识别、神经网络技术、小波分析等先进的技术和方法, 对系统的运行现状进行可靠性预计, 建立计算机自动故障诊断及预测维护系统, 从而对系统有预见性地维护保养, 提高系统可靠度, 对提高整机实验成功率具有非常重要的意义.

参考文献(References)

- 1 DING Bai-Nan et al. HEP & NP, 2005, **29**(6): 606—610 (in Chinese)
(丁伯南等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(1): 606—610)
- 2 DENG Jian-Jun et al. High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(5): 502—504 (in Chinese)
(邓建军等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(5): 502—504)
- 3 LI Jin et al. High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**(2): 263—267 (in Chinese)
(李劲等. 强激光与粒子束, 2005, **17**(2): 263—267)
- 4 DING Bai-Nan et al. HEP & NP, 2005, **29**(3): 219—223 (in Chinese)
(丁伯南等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(3): 219—223)
- 5 DAI Zhi-Yong et al. HEP & NP, 2007, **31**(4): 395—399 (in Chinese)
(代志勇等. 高能物理与核物理, 2007, **31**(4): 395—399)
- 6 LONG Ji-Dong et al. HEP & NP, 2004, **28**(5): 564—568 (in Chinese)
(龙继东等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(5): 564—568)

Commissioning of Dragon- I Linear Induction Accelerator^{*}

LI Jin¹⁾ ZHANG Kai-Zhi DAI Zhi-Yong ZHANG Wen-Wei WANG Min-Hong
LAI Qin-Gui YU Hai-Jun LI Hong MA Bing SHI Jin-Shui
ZHANG Lin-Wen DENG Jian-Jun DING Bo-Nan
(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract This paper describes the subsystems commissioning process of Dragon- I which include the injector, the pulsed power system, the transport system and the Bremsstrahlung target. The experimental results and further work are presented.

Key words linear induction accelerator, Dragon- I, commissioning

Received 7 January 2008

* Supported by Special National Foundation of China

1) E-mail: caeplijin@263.net