

文章编号: 1007-4627(2005)03-0276-04

4 MV 静电加速器调试中出现的问题

孙振武¹, 李玉晓¹, 姜胜南¹, 李 涛¹, 郑世全¹, 刘柱华², 霍裕平¹

(1 郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450052;

2 中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要: 介绍了静电加速器的结构以及调试中出现的离子源不放电、控制系统失灵和加速管破裂等技术问题, 分析了出现这些问题的原因以及解决办法, 调试出了流强为 100 μA 、能量在 3 MeV 以上的稳定质子流。

关键词: 静电加速器; 加速管; 离子源; 离子束

中图分类号: TL505 **文献标识码:** A

1 引言

静电加速器是以动带式静电起电机作高压电源的加速器^[1,2]。由于它具有稳定可调、结构简单和使用灵活等特点, 因而一直是 1—6 MeV 能量范围内从事核物理、核医学以及材料改性等科研工作最常用的加速器。根据离子束生物工程的需要, 郑州大学物理工程学院从 2000 年开始研制静电加速器。其中一部分部件从美国引进, 包括加速管、绝缘支柱和钢桶等; 另一部分部件自行研制, 包括离子源、束流运输系统、控制系统和真空系统等。由于其调试方面可供参考的文献不多, 特别在技术方面更是鲜有报道, 因此在安装调试时遇到不少问题。本文在对其结构介绍的基础上, 对调试过程中遇到的问题以及解决途径进行论述, 以供借鉴。

2 结构

2.1 高压系统

静电加速器高压系统包括高压的产生、测量与稳定。高压产生部分由喷电电源、输电带和高压电极等组成(见图 1)。喷电电源通过喷电针排产生电晕放电, 被输电带带走, 经过顶端时电荷通过刷电针排转移到高压电极上并不断积累, 就产生了对地 MV 量级的电位差。

高压测量与稳定部分由旋转伏特计、电晕针、

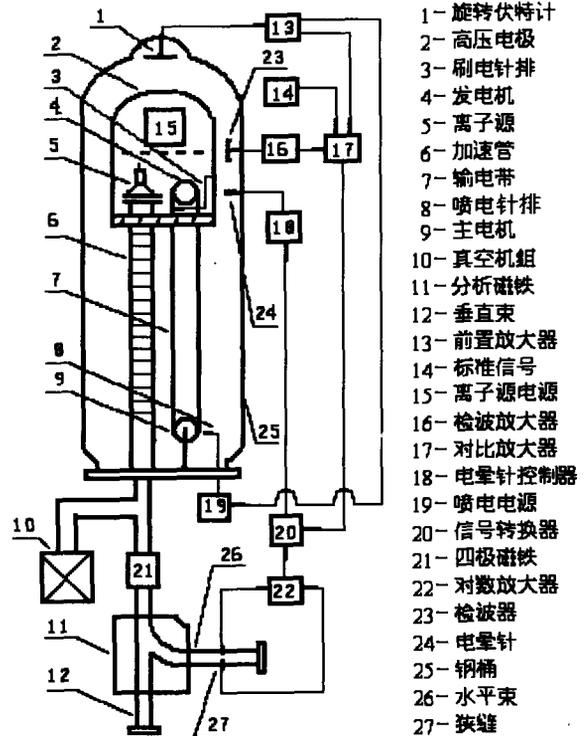


图 1 静电加速器及高压稳定系统结构示意图

检波器、狭缝以及相关电路组成^[3]。由于受电网电压的变化以及输电带运行时产生的摇摆的影响, 从输电带转移到高压电极上的电荷不总是恒定值, 使高压电极的电位有一定的波动, 从而在旋转伏特计、检波器以及分析磁铁的出口狭缝两边产生感应

信号。这些信号或直接或通过与标准信号对比后形成的误差信号使电晕针的泄放电流或喷电电源的输出电压做出调整，从而使高压电极的电位稳定在某一值。

2.2 离子源与束流输运系统

该部分包括离子源、加速管、四极透镜和分析磁铁等。气体在离子源中被电离、引出后，由加速管加速，经过四极透镜聚焦，最后由分析磁铁进行甄别选出需要的离子。图 2 是研制的高频离子源结构示意图，包括离子产生部分（高频振荡器、放电管、横向磁场磁铁和气体系统）、离子引出部分以及相关电源。高频振荡器频率为 20—50 MHz，与放电管电感耦合，在试验台上引出了束流为 169 μA 、质子比为 88% 的稳定离子束。

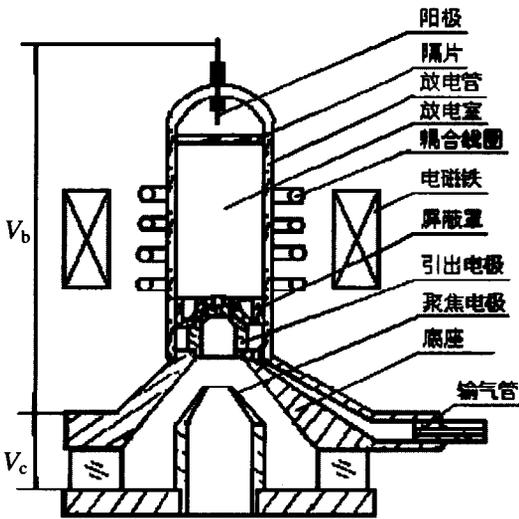


图 2 高频离子源结构示意图

2.3 控制系统

为了提高加速器控制系统的智能化水平，提高对高压端参数的监控能力以及对数据的采集和记录能力，提高可操作性，采用最新的 PLC 控制技术以及红外和光纤传输技术^[4,5]，用计算机直接对加速器进行控制和管理，动态跟踪其运行过程。图 3 给出了其硬件结构方框图，由微机、PLC、输入输出模块和步进电机等组成。3 台 PLC 分别位于 3 层机架中，处在 3 个不同的电位上；其中主机架和扩展机架 1 之间有 4 MV 的电位差，采用红外传输，传输速率可达 1.5 Mbit/s。两个扩展机架间的电位差

为 30 kV，采用光纤传输。离子源的气压、板压、引出电压和磁场电压的调节与采集由 PLC3 通过输入输出模块完成。PLC2 除完成聚焦电压的调节采集外，还负责把其本身以及从光纤传输下来的有关 PLC3 的数据通过红外模块传输给 PLC1，在此汇总后交由微机控制管理。加速器的运行管理由 3 台微机完成，其中微机 1 负责数据的采集与记录，微机 2 和微机 3 分别负责在控制台上和现场控制调节设备各参数，它们通过工业以太网实现信息的交换。经过调试，该系统工作稳定可靠，并显示出比传统的继电器控制系统具有明显的优越性。

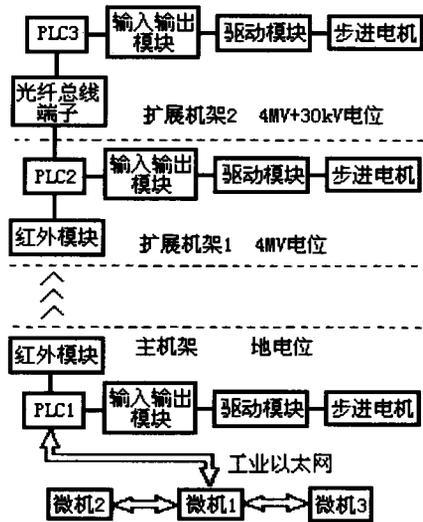


图 3 控制系统结构方框图

2.4 气体系统

由于静电加速器的高压电极半径 $r = 0.37 \text{ m}$ ，那么在大气压下其击穿电压大约为 $V = 3 \times 10^6 r$ ，即 1.1 MV^[2]。为了提高其耐压特性，达到设计的 4 MV，需要向钢罐内注入 10 个大气压以上由 80% $\text{N}_2 + 20\% \text{CO}_2$ 组成的绝缘气体^[6]。

为了保证气体的纯净，每次充气前先用排气泵从加速器钢桶中抽出空气。压缩机用于气体在钢桶与储存罐之间的转移。干燥剂用的是 Al_2O_3 ，可重复使用。当其干燥效果不好时，用干燥器本身的加热设备以及鼓风机驱走其水分。过滤器可过滤掉气体中的固体杂质以及从压缩机带过来的润滑油。当加速器钢桶内的气体湿度较大时，需要循环干燥。由于此时是在无压差情况下运行，一般用循环机。阀门的不同组合可实现充气、排气和干燥等不同的

工艺流程。

3 调试中遇到的问题

3.1 加速管

加速管安装前,用摇表检测其中间电极,绝缘性能良好,相互之间电阻都在 2 000 M Ω 以上,但当抽真空后又进行测量,电极间的绝缘性能被破坏,反复查找原因无结果。后无意间在真空泵开启的状态下检测,绝缘性又变好。经反复试验,发现在 67—0.1 Pa 之间,加速管存在耐压“盲区”。这种现象可用表面二次电子发射雪崩理论(SEEA)^[7]得到解释。在一定的真空度下,当高压施加到绝缘体上时,空间中存在的自由电子在电场的作用下被加速,获得能量并与气体分子或绝缘体表面发生碰撞,通过二次电子发射产生额外电子,二次电子再次撞击,这个过程持续进行就会发展成电子雪崩。本文认为这就是在 67—0.1 Pa 真空度下绝缘体绝缘性变差的原因。雷杨俊等^[8]认为,二次电子主要是电子与吸附在绝缘体表面的气体分子碰撞产生的,那么由此可以解释真空度小于 0.1 Pa 时绝缘性变好的现象。因为随着压强的降低,吸附在绝缘体表面的气体分子越来越少,使产生的二次电子也越来越少,从而不足以破坏绝缘体的耐压特性。在大气压下,由于空间中气体分子的密度大,自由电子在电场中还没有获得足以使气体分子电离的能量之前,已经发生了碰撞而卸能,不会产生二次电子,因此绝缘性也较好。

另外,加速管还容易存在一个机械隐患。当对各部分分调完成后盖上钢桶,注入绝缘气体准备总调时,加速管顶部的玻璃绝缘环内侧出现碎裂。经分析、测量后发现,这是由于离子源与加速管之间的过渡法兰的机械加工工艺造成的。由于热胀冷缩,使焊接后的法兰变形,法兰与加速管之间不再是面接触,而是线接触,产生受力不均。对于一般真空腔体,这不但没有坏处,而且还会使密封圈接触良好,因此没被人们注意。但对于静电加速器,由于加速管外充有十几个大气压的气体,使得此处的受力比在大气压要大十几倍,造成加速管上端的玻璃绝缘环内沿因受力过大而碎裂。经过对过渡法兰面的重加工,加速管进行重新封装^[9],此现象不再发生。

3.2 输电带

在最初用输电带向高压端输送电荷时,发现虽然喷电电源各项参数正常,但加速器高压端电位升不上去,测试高压端短路电流,当喷电电流已达 300 μ A 时,短路电流仅为 80 μ A。经试验发现,这主要是绝缘气体的湿度以及输电带本身的状态造成的。在大气中,输电带吸收了大量的水分,当运转时由于摩擦生热,吸收在输电带内部的水分由于输电带的温度升高而蒸发到表面,从而使输电带的绝缘性能变差,输电能力降低。如果绝缘气体的湿度较小,输电带表面的水分很快蒸发,此现象会逐渐消失。如果绝缘气体本身的湿度也较大,输电带的输电能力就很难得到改善。总之,出现这种情况后,可对绝缘气体进行循环干燥加以解决。

3.3 离子源

上机试验表明,已经在试验台上调试可行的离子源不能正常放电。分析后认为这是由引出电压的加卸载方式造成的。台上试验开机时,一般等放电稳定后从小到大慢慢加上引出电压。关机时先由大到小关掉引出电压后,再关掉振荡器电源。由于在加速器上,离子源的电源都由加速器顶端的发电机供电,无法直接控制和观测。为了参数的一致性,在开关机时,所有参数都不做调整,直接开启和关掉加速器的主电机,这样其实等同于先加、后关引出电压。因为开机时加速器底端的主电机转速是由低到高变化的,从而使加速器顶端为离子源提供电源的发电机作为从动轮,转速也是由低到高变化的,其输出的电压自然是由零达到最大值,从而使振荡器的板压在刚开机后的一段时间达不到要求的最低板压而不能使放电管放电,然而此时引出电压已经加了上去(虽然还没有达到最大值)。关机时,同理由发电机的输出电压不是直接降为零,而有一个由高到低的过程,从而使放电管内放电熄灭后,放电管两端仍有引出电压。由于放电熄灭后仍有一定的引出电压,使完全停机后放电管内的带电粒子密度减少。而开机时在放电前放电管两端已经加上引出电压,使残存在放电管内的带电粒子进一步减少,而放电管放电是靠管内的自由电子在高频电磁场的作用下与气体分子发生碰撞形成的,因此这种开关机的方式自然增加了放电的难度。变换工

作流程,在每次关机前先把引出电压降为零,开机稳定后再把引出电压升到预定的值,这样离子源每次能准确放电。

3.4 控制系统

在对控制系统进行调试时,发现位于高压区的控制设备有不同程度的受干扰现象,轻者丢失信号、控制失灵,重者 PLC 被击穿烧毁。经仔细观察分析后认为,这是由两个因素造成的,一个是离子源的高频电磁场的辐射干扰,另一个是高压端与地之间的纵向和横向放电产生的强电磁干扰。前者一般破坏性较小,仅造成信号的丢失;而后者破坏性较大,可使控制失灵、毁坏设备。

无论在调试阶段还是在运行过程中,由于离子源的电磁辐射以及高压端的打火现象都不可避免,因此只有改善控制系统本身的抗干扰能力。为此采取了3个措施:(1)用网孔尺寸为0.8 mm的铜网把高压端的控制设备屏蔽起来,以减小这些干扰对

它的影响;(2)在输入/输出端使用 TVS 二极管^[10],它在雪崩击穿时,动态电阻小、响应速度快、器件面积大和可吸收大的浪涌电流,用它短路掉控制线路中产生的响应信号;(3)对控制软件进行抗干扰设计,充分发挥 Wincc 的监控报警能力,最大限度地抑制干扰对控制系统的影响。通过这些措施,控制系统的抗干扰能力得到了大大加强,除偶尔丢失信号外,其他现象没有再发生,不会对控制系统和加速器运行造成大的影响。

4 结论

在解决了上述一系列问题后,又经过反复调试,目前静电加速器已稳定工作,可引出流强为 100 μA ,能量在 3 MeV 以上的质子流。下一步还需要对其进行耐压锻炼,把离子束能量提高到设计值 4 MeV。

参 考 文 献:

- [1] 徐建铭. 加速器原理. 北京: 科学出版社, 1974, 14—88.
- [2] 叶铭汉, 陈监璞. 静电加速器. 北京: 科学出版社, 1965, 1—36.
- [3] 巩玲华, 徐萍芳, 王建勇等. 原子能科学技术, 1996, 30(1): 199.
- [4] 郑 晟. 现代可编程控制器原理与应用. 北京: 科学出版社, 2000, 1—158.
- [5] 龚培荣, 刘 平, 李纪明等. 核技术, 2004, 27(7): 525.
- [6] 姜胜南, 李玉晓, 孙振武. 郑州大学学报(理学版), 2003, 35(1): 40.
- [7] Miler H C. IEEE Trans Insul, 1989, 24: 765.
- [8] 雷杨俊, 肖定全. 绝缘材料, 2004, 3: 29.
- [9] 孙振武, 李玉晓, 姜胜南. 郑州大学学报(理学版), 2001, 33(2): 35.
- [10] 龚培荣, 刘 平, 张 耀. 电子设计应用, 2003, 5(5): 34.

Problems Arising in Developing 4 MV Electrostatic Accelerator

SUN Zhen-wu¹, LI Yu-xiao¹, JIANG Sheng-nan¹, LI Tao¹, ZHENG Shi-quan¹,
LIU Zhu-hua², HUO Yu-ping¹

(1 School of Physics Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;
2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The structure of electrostatic accelerator and some technical problems arising in development, including the RF ion source doesn't produce discharge, the controlling system is out of order and the accelerating tube cracks et al., are introduced; the reasons and the solving means of these problems are analyzed; a stable proton beam with 100 μA and 3 MeV is obtained.

Key words: electrostatic accelerator; accelerating tube; ion source; ion beam