

5.5 MeV Van de Graaff 正离子加速器的电源与控制系统及主要的技术问题

胡素华, 李 军, 陈 斌, 詹福如, 吴 瑜, 王绍虎, 余增亮

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

Power Supply and Control System and Principal Technical Problems of the 5.5 MeV Van de Graaff Positive Ions Accelerator

HU Su-hua, LI Jun, CHEN Bin, ZHAN Fu-ru, WU Yu, WANG Shao-hu, YU Zeng-liang

(Institute of Plasma Physics, CAS, Hefei 230031, China)

摘要: 叙述了 5.5 MeV Van de Graaff 正离子加速器及其各电源的技术参数、工作原理、电源与控制系统的的设计、设计与调试过程中解决的高电压隔离与绝缘、过电压保护、安全连锁、弱信号远距离测量、合理接地等几个主要技术问题,最后给出了实验结果和结论。

关键词: 正离子加速器; 电源; 控制

中图分类号: TL503.5

文献标识码: B

Abstract: The 5.5 MeV Van de Graaff Positive Ions Accelerator is introduced. Related technical matters are described, i.e., the technical parameters and working principles of power supplies, design of power supply and control system, high voltage isolation and insulation, over-voltage protection, safety interlock, weak signal measurement and effective grounding etc.. Finally, results and conclusions of experiment are presented.

Key words: positive ions accelerator; power supply; control

1 概述

5.5 MeV Van de Graaff 正离子加速器装置(以下简称加速器)应用于单离子束细胞精确定位辐照装置中。加速器及其电源与控制系统的总体框图见图 1。加速器主要由三大系统组成: 高压发生器系统, 正离子产生与加速系统, 加速器各种设备的配电、电源与控制系统。

高压发生器系统包括高压终端(高压极板和钟罩)、集电器、充电皮带及其充电装置、绝缘圆柱、皮带驱动马达、压力罐及其底座和有关部件、电晕稳定系统、发电电压表等部件。该部分的主要作用是在高压终端产生 MV 级高压, 同时使其高压稳定并且能把高压终端产生的 MV 级高压准确地测量和显示出来。

正离子产生与加速系统主要包括: 氢、氦、氩等气体源和控制气体流量的热机漏(或称气体开关)、

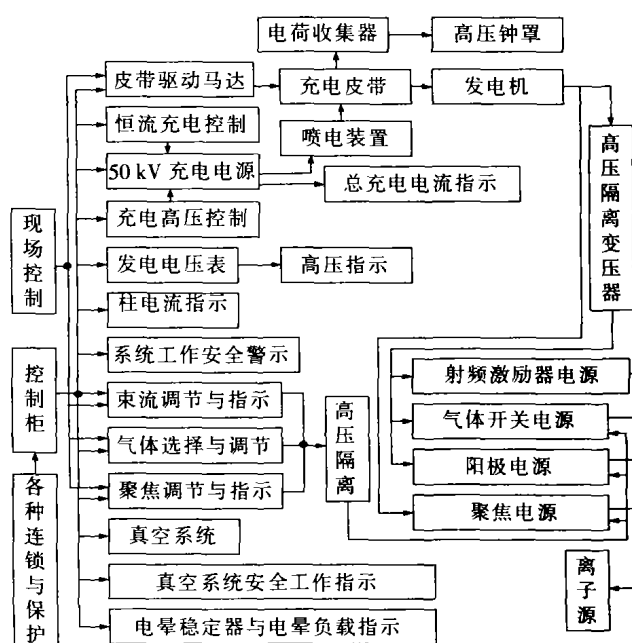


图 1 5.5 MeV Van de Graaff 正离子加速器电源与控制系统的总体框图

正离子源(离子源瓶和射频激励器等)、聚焦电极、高压终端电路系统、加速管及其延伸部分和有关部件、真空系统等。

加速器的电源与控制系统主要给上述两个系统提供各种电源,并对有关设备进行配电与控制。电源主要包括: 高压终端上的交流发电机、离子源的气体开关电源、射频激励器电源、阳极电源、聚焦电源等,还有给皮带喷电装置供电的 50kV 的皮带充电电源等。

加速器除了以上三大系统之外,还有一些辅助设备,如水冷却系统,绝缘气体的干燥、压缩、循环系统及其供气管道和气体储存罐等设备。

2 加速器的电源与控制系统

2.1 5.5 MV 高压终端上离子源系统的电源及控制在 5.5 MV 高压终端上离子源系统的电源中,

交流发电机用于各电源的交流供电,气体开关电源及其控制系统用于选择并加热不同的气体开关,从而使不同的气体进入离子源瓶中,射频激励器电源则将射频波引入离子源瓶中,并使其中的气体电离为所需要的正离子,在阳极电源的作用下正离子流被引出,再由施加着聚焦电源的聚焦电极聚焦后进入到加速管中加速。

(1) 交流发电机

交流发电机位于高压终端上固定充电皮带的定滑轮中,是极对数 $p=14$ 的中频交流发电机,它的额定技术参数是: $4\text{ kV}\cdot\text{A}$, 115 V , 35 A , 400 Hz , 单相2线,转速为 1728 r/min ,它的励磁参数为直流 51 V , 2.7 A 。

发电机主要是在 MV 级高压终端上通过 $1\text{ kV}\cdot\text{A}$, 400 Hz , $115\text{V}/115\text{V}$,能隔离 80 kV 直流高压的单相隔离变压器给离子源系统的电源供电,并且直接给聚焦电极的聚焦电源供电。发电机是随着充电皮带驱动马达的转动与停止而分别发电输出和停止发电的,发电电压的幅值和频率是否稳定与驱动马达的转速有着密切的关系,而马达的转速则与其三相交流供电电源的电压幅值和频率是否稳定有关。现在交流发电机的输出电压一般约为 115 V ,频率为 360 Hz 。

(2) 离子源的气体开关电源及气体选择控制

气体开关电源的参数是:交流 0.5 V , 70 A ,要求电流连续可调。

离子源的气体开关电源设计为3套,用气体选择开关可选择控制3种不同的气体进入离子源电离,从而产生不同的正离子。气体开关电源的工作原理是:交流发电机的输出电压供给隔离 80 kV 直流高压的隔离变压器的原边,变压器的副边分别给3个不同的自耦调压器供电,自耦调压器的输出给变压器供电,变压器的副边输出交流 0.5 V , 70 A 连续可调的电流,供给热机漏气体开关加热,从而使气体源瓶中的气体通过开启的热机漏进入离子源中。

(3) 离子源的射频激励器及其电源

射频激励器由1个振荡器,2只用作将射频静电场引入离子源瓶中的电容极板的弹簧夹子以及1条连接振荡器极板和离子源瓶上的弹簧夹子的传输线组成。

振荡器由1对电子管组成,设计振荡频率 125 MHz ,可提供 $0\sim 60\text{ W}$ 的功率。对管工作在自激、推挽、调谐栅极对工作状态。由传输线经弹簧夹子将射频波耦合进入离子源瓶中,使瓶中的气体电离产生正离子。

振荡器对管灯丝加热的电源由电源变压器副边提供,电压为 6.0 V 。

振荡器对管的板极电源是由全波整流经 LC 滤波后提供的直流电源。电源整流变压器副边有中心

抽头,原边则有输入位置可调的几个抽头。改变交流输入位置便可改变变压器的变比,从而在一定范围内改变对管的板极直流电压,因此改变了耦合进入离子源瓶中射频波的能量。射频振荡器对管的板极输入电压实际达 $650\sim 700\text{ V}$,电流 $0\sim 30\text{ mA}$,板极输入功率可达 200 W ,振荡器实际的工作频率为 $140\sim 150\text{ MHz}$ 。

(4) 离子源的阳极电源(prob 电源)

阳极电源的参数为直流 3 kV , 3 mA , 1% 的稳定度,且电压连续可调。

交流发电机的输出电压供给能隔离 80 kV 直流高压的隔离变压器的原边,其副边给自耦调压器供电,自耦调压器输出电压进行桥式整流,经滤波给离子源的阳极电源提供直流高压。阳极电源的正高压施加到离子源阳极,负极输出则与离子源的阴极和锥体连接,该电压用于正离子的引出。

(5) 聚焦电源

聚焦电源输出直流高压为 50 kV ,电流为 $200\text{ }\mu\text{A}$,电压稳定度为 1% 。

由交流发电机的输出电压直接供给自耦调压器的原边,自耦调压器的副边输出供给高压变压器,最高 15 kV 输出的变压器的副边与三倍压整流电路相连。整流电路的正极性高压输出端与离子源的阴极和锥体相连,负极性端接到聚焦电极,并且二者均与高压终端的 MV 级高压地相连。该直流高压在离子源的锥体和聚焦电极之间产生一个静电场,该电场对从离子源引出的正离子施加影响,使之平行校正为束后进入加速管中加速。

(6) 各电源电压的控制与调节

上述各电源电压的调节可以在控制室的控制柜上进行,也可以在高压终端的工作现场控制调节。电压的调节是通过自整角机控制的,发射机分别安装在控制柜或现场控制盒中,而接收机则安装在加速器底座上,接收机轴上装有轮盘。另外,位于高压终端 MV 级电位上的自耦调压器的轴上也有轮盘,在两个轮盘的边缘槽中安装有绝缘绳,该绳隔离了 MV 级高压。当控制自整角机的发射机转动时,则位于底座上相应的接收机转动,同时带动了高压终端的自耦调压器的转动而改变了各电源从自耦调压器输入的交流电压,因此也改变了各直流电源的输出电压。

2.2 地电位上 50 kV 的皮带充电电源及其控制

50 kV 的皮带充电电源主要用于使气体击穿电离、向充电皮带喷电,再由皮带将电荷传输至高压终端,从而使高压终端极板的电位升高。电源的技术参数为: 50 kV , 5 mA ,电压的稳定度为 1% ,充电电流可调。

50 kV 电源的交流输入电压由安装在控制柜上的自耦调压器控制,输入到 22 kV 的高压变压器,高压变压器的副边电压经过全波倍压整流和电容滤波

电路得到直流高压,高压正端供给恒流充电调节电子管的板极电压,恒流充电调节管的阴极通过滤波电感和限流电阻与喷电单元的喷电针相连。电源的负极则经一总充电电流表与喷电单元的接地板极相连。充电皮带则在喷电针和接地极板间通过传输电荷。为了增加电源的绝缘强度,高压变压器、整流器和恒流调整管均安装在一个充满绝缘油的箱子中。恒流喷电电流控制由两部分组成:一部分是由调压器控制恒流调整管上的板极电压,而另一部分则是恒流调整管的屏极和栅极电源及其控制单元,这部分元件装在另一个充满绝缘油的箱子中,它是通过自整角机控制恒流调整管的栅极电路中的自耦调压器,从而控制恒流控制管的栅极电位。这两部分共同控制了充电电路中的总喷电电流的大小和恒流。二者均在控制室中的控制柜上操作。在实际工作中,恒流充电电流最大只需约 $100\ \mu\text{A}$,而实际可达 $300\ \mu\text{A}$ 。

在打开加速器外罩的情况下,当皮带驱动马达启动以后,若启动 $50\ \text{kV}$ 充电电源,则高压终端就会有高压产生。为了保证高压终端工作人员的安全,设计了运行和调试两种工作方式的选择。在调试工作方式, $50\ \text{kV}$ 电源只能由在高压终端开启,而在控制室中是不能启动的,所以高压终端也不会有高压产生。

另外,为了保证工作人员和设备的安全,电源控制中还设计有绝缘气体压力连锁、实验室门连锁、水连锁、真空连锁等。

3 电源与控制系统在设计及其与加速器联合调试中几个主要的技术问题

3.1 可靠的MV级高压隔离控制系统

加速器离子源系统的电源,如阳极电源、气体开关电源、聚焦电源等,均悬浮于MV级直流高压上,而且要实现电源的电压或电流能连续可调。控制部件是采用自整角机带动系有绝缘绳的轮盘转动,从而带动高压终端的各自耦调压器转动,达到使各电源输出电压或电流可调的目的。其中绝缘绳是很重要的,它必须具有耐高压、有足够的弹性和摩擦力的特点,并且随温度、湿度等变化,它的伸缩率要小,在系绝缘绳时,要注意松紧适度。调试的难点在于:调试时需打开外罩,使绳暴露于常温、1个大气压和一般大气湿度下,即使在该情况下调试得非常好,但当罩上外罩、充满高压绝缘气体,一般气压在 $1.37\times 10^6\ \text{Pa}$,气体露点在 $-50\ ^\circ\text{C}$ 以下时,绝缘绳经常变得特别松,这样调试时,绳与轮盘之间就会打滑,因此使高压终端的电源不能可靠调试。若绳一开始调得太紧,又会使各电源一开机输出不在零位。若各电源输出初始值太大,如气体电源,会使气体开关开启,损耗气体瓶中的气体等,影响各电源的正常工作。所以首先要选择合适的绝缘绳,并必须对绳的松紧度做多次反复调整,使

之在通常的大气压、气温和湿度下,同时又要在高干燥、高压、低露点的绝缘气体中均能正常工作,才能保证MV级高压上的电源能正常工作、可靠控制。

3.2 可靠的高压绝缘,保证各电源设备正常工作

为了保证加速器的高压终端能升压到MV级高压,且各部分在高压下能正常工作,如:使 $50\ \text{kV}$ 的皮带充电电源保证充电皮带安全地向高压终端传输电荷,同时高压终端的电源系统、加速管的均压电阻、柱电流测量等部件及部件之间均不能产生高压打火等,因此,压力外罩中必须充满绝缘气体。该加速器采用的是1:4(体积比)的 CO_2 和 N_2 。调试经验表明:绝缘气体的纯度、压力、露点和准确的体积比是非常重要的,特别是准确的气体体积比尤为重要。一般情况下,绝缘气体的压强不低于 $1.37\times 10^6\ \text{Pa}$,露点至少要达到不高于 $-50\ ^\circ\text{C}$,这样加速器工作在 $3.5\ \text{MV}$ 是较安全的,要达到 $5.5\ \text{MV}$,绝缘气体的压强必须达到 $1.55\times 10^6\ \text{Pa}$,露点不高于 $-62\ ^\circ\text{C}$ 。

3.3 MV级高压终端各电源设备的过电压保护

高压终端上的交流供电系统有一个公共端,其电位与高压终端钟罩和极板等电位,即MV级电位。如果在调试过程中,加速器的外压力罩中的绝缘气体的各种参数均未达到一定值时,有可能在各高电位相对某低电位或地电位之间产生放电击穿。那么将在高压终端上的交流供电系统产生瞬时过电压,其幅值则远远大于发电机的正常输出电压。该过电压有可能对发电机的励磁绕组、电枢绕组及与之有关的离子源系统的各电源设备造成损坏,这样的故障在调试过程中曾经发生过。所以必须在发电机励磁绕组、电枢绕组和隔离变压器的副边设计浪涌过电压的吸收保护电路,其保护效果是很明显的。

3.4 微弱电信号的远距离测量

加速器装置中有许多微弱信号的测量,如束流、柱电流、发电电压表测电流(即MV级高压表)、皮带充电电流、电晕负载电流、聚焦环电流等,这些 $1\sim$ 几百 μA 的电流信号均要从远自30多米外的装置现场传输到控制室中的控制柜面板上,如果处理不当是不会检测到信号的,或者信号失真。在电源系统的设计中采取了以下几种措施:

(1)将 μA 级信号的传输线与其它控制线路和强电主回路电路的传输线相互隔离,并用屏蔽盒屏蔽,屏蔽盒外壳一点接地,避免干扰信号产生。

(2)选择合适线径的传输线,以免弱信号在线路中造成衰减,从而造成测量信号不准确。

(3)设计合理的直流公共点系统,该系统仅在一处,即装置的底座接地。

(4)对各微弱信号的指示仪表(如微安表)设计了LC保护电路,保护微安表在实验过程中免遭冲击电压或电流的损坏。

(下转第473页)

3 铁心多点接地故障的处理

3.1 运行中的应急处理

发现变压器铁心存在多点接地故障后,为了保证变压器安全运行,应当停电吊罩检查和处理,但系统运行方式暂不允许长时间停役,因此采用了在外引铁心接地回路中串接电阻的临时应急措施,以限制铁心接地回路的环流,防止故障进一步恶化。串接电阻前,用钳形电流表测得铁心接地回路的环流为29.5 A,为使环流限制在300 mA以下,串接了110 Ω的电阻,串接电阻后,又进行了变压器油跟踪试验,色谱分析结果见表2。

表2 西郊1号主变铁心串接电阻后的色谱分析结果 $\mu\text{L/L}$

日期	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₁ +C ₂	CO	CO ₂
06-02	80.40	260.50	48.00	260.60	0.95	589.40	790.50	6 054.00
06-05	75.40	245.50	55.40	318.00	1.00	625.70	691.00	5 320.00
06-10	65.40	240.00	51.40	300.50	1.00	604.50	840.00	6 716.00
06-25	39.00	105.00	60.80	230.00	0.90	484.00	660.00	5 658.00

从表2中可以看出,串接电阻不久,总烃含量有所上升,这是由于故障气体还未完全散开所致,随着时间的推移,总烃数据开始下降。对6月25日的一组数据进行的温度估算: $t=322\log(C_2H_4/C_2H_6)+525=711\text{ }^\circ\text{C}$ 。

显然发热点温度有所下降,也证明了串接电阻的措施是有效的。

3.2 吊罩处理

统计资料表明,变压器铁心多点接地故障在变压器总事故中列第3位,主要原因是变压器在现场装配及安装中不甚遗落金属异物,造成多点接地或铁轭与铁件短路,柱与夹件相碰等。为此,在1997年对西郊1号主变进行了吊罩检查,检查后发现,在铁心底部有一些杂质,同时还发现铁心底部有一小片硅钢片下脚料。很显然,上述分析诊断是正确的。

3.3 缺陷消除

通过清除杂质,真空注油等,脱除油中的故障气

体,铁心的绝缘电阻为2 500 MΩ,几乎没有环流,该变压器运行正常,一年后又进行了油样的气相色谱分析,结果见表3。

表3 西郊1号主变吊罩处理后的色谱分析结果 $\mu\text{L/L}$

H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₁ +C ₂	CO	CO ₂
0.0	11.2	3.2	2.2	0.0	16.6	96.8	128.6

很显然,消除缺陷后,油中的各种气体组分均已正常,达到了规程的要求^[4],现该变压器仍在安全运行。

4 结语

变压器铁心的接地故障会造成铁心局部过热,使铁心的损耗增加,甚至烧毁,造成事故。通过电气试验结合油的色谱分析等进行综合分析,作出正确的诊断,在变压器不允许停电检查的时候,在铁心的接地回路中串接限流电阻作为应急措施是可行的。应该注意的是所串电阻不宜太大,以保持铁心基本处于接地电位,但也不宜过小,接地环流最好限制在0.3 A以下,同时还需注意所串电阻的热容量,以防烧坏电阻造成铁心开路。统计资料表明,变压器运行中铁心接地故障大多为油箱底部不清洁或有金属异物所致,作为运行检修部门,应严把投运前的吊罩(心)检查关,以免影响电力系统的安全经济运行。

参考文献:

- [1] 江苏电力试验研究院. 电气试验技能培训教材 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 游荣文. 高压电气设备试验方法及诊断技术 [M]. 北京: 国家电力公司电气教育出版社, 2003.
- [3] 日本电气书院. 电气设备故障检测手册 [M]. (钱汝立, 凌锡琮, 凌锡玮译), 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [4] 江苏省电力公司. 江苏省电力设备交接及预防性试验规程 [S]. 2001.

作者简介: 司增彦(1965-), 男, 工程师, 长期从事绝缘试验技术工作。

(上接第468页)

3.5 设计合理的交流公共点, 直流公共点和接地系统

在电源与控制系统中, 所有的交流公共点均汇集在总配电柜, 与中线相连接后, 一起接到接地母排, 而所有的直流公共点则均与装置的底座相连后, 再通过底座直接与接地母排连接, 这样保证了各交流电路和直流电路的相互独立性, 并分别只有一点接地, 因此避免了干扰的产生。另外, 为了安全起见, 各控制柜外壳则分别直接与接地母排连接。接地母排则直接与专门设计的接地体连接, 保证可靠接地。

4 调试结果和结论

对电源和控制系统与加速器装置成功地进行了

联调和实验。当罐中混合绝缘气体压强为 $1.37 \times 10^6 \text{ Pa}$, 真空为 $2.4 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 气体露点约 $-50\text{ }^\circ\text{C}$, 总充电电流约 $90\text{ }\mu\text{A}$, 高压 2.5 MV , 装置产生的氢离子束流达 $5\text{ }\mu\text{A}$ 。

在单离子束装置的调试中, 该系统又经受住了长期运行的考验, 一直表现出高稳定性、可靠性和安全性, 使加速器在直通靶上可产生高达 $10 \sim 15\text{ }\mu\text{A}$ 的氢离子束流。所以, 该电源与控制系统设计、安装中所采取的技术方案和多种技术措施等是正确且实际可行的。

作者简介: 胡素华(1944-), 女, 高级工程师, 长期从事电源、控制、离子束生物工程装置等的研制与实验工作。