

NBI加速极电源分布电容数值仿真

林菲¹, 郭辉², 程德胜³

(1. 中国人民解放军72803部队, 山东 烟台 264000;

2. 烟台质量技术监督局计量所, 山东 烟台 264003;

3. 中科院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要:离子源是中性束注入器(NBI)的核心部件。离子源负载打火期间,储存在电路中的电容储能超过一定阈值,离子源将会受到严重的损坏。通过对NBI电源系统的分析,得出加速极电源的对地电容是电源系统总杂散电容的主要组成部分。直接求解加速极电源的对地分布电容是十分困难的,根据加速极电源的结构布局,采用数值仿真的方法对加速极电源进行建模和求解,得到了加速极脉冲电源100 kV的等效电容大小,为NBI离子源的设计和安全运行提供了重要依据。

关键词:加速极;分布电容;脉冲调整技术;数值仿真

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2013.03.028

中图分类号:TF806.83;TN136 **文献标识码:**A

文章编号:1672-9242(2013)03-0117-04

Numerical Simulation of Distributed Capacitance of NBI Accelerator Supply

LIN Fei¹, GUO Hui², CHENG De-sheng³

(1. Unit 72803 of PLA, Yantai 264000, China;

2. Institute of Measurement and Testing, Yantai Technical Supervision Bureau, Yantai 264003, China;

3. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Ion source is the key part of NBI. When accelerator breakdown occurs, the ion source can be destroyed by the discharge of energy stored in the stray capacitances remaining in the circuit. The stray capacitances of accelerator supply are the most important part of total capacitance, but it is difficult to solve the value of capacitance of the accelerator supply directly. Numerical simulation model of accelerator supply was established and solved, and the 100 kV equivalent capacitance of accelerator supply was obtained. The purpose was to provide reliable basis for design and operation of ion source.

Key words: accelerator supply; distributed capacitance; PSM; numerical simulation

中性束注入器(NBI)的核心部件是离子源^[1-3]。因采用大功率长脉冲工作模式,离子源各部分特别是引出电极系统的热负荷及电气绝缘都是按临界工作状态设计,并且离子源在强电场条件下的等离子体负载状态运行,使得高压击穿现象时有发生。尽

管高压电源可以在10 μs内快速切断供电电源,但是储存在电路杂散电容的能量在放电时还是会对真空设备造成破坏。负载故障时吸收的能量大于5 J时,昂贵的离子源将受到严重损坏^[4-6]。

中性束注入系统由电源系统、高压传输线和中

收稿日期: 2013-01-07

作者简介: 林菲(1978—),女,山东文登人,工程师,主要研究方向为通信电源、电子通信。

性束注入器等组成^[7-8]。NBI电源系统是一组可调的大功率脉冲电源^[9-10],如图1所示,主要包括等离子体加速极电源、灯丝电源、弧流电源、抑制极电源和偏转磁场电源。灯丝和弧流电源为中性束注入器的离子源负荷供电,用于加热钨灯丝并使之在放电室放电,产生离子束(弧流);加速极和抑制极电源为离子源引出系统的加速极和抑制极供电,分别施加正(直流100 kV)、负(直流-5 kV)高压,提供离子源的中性束注入功率;偏转磁场电源为离子偏转磁场提供电源,灯丝电源、弧电源的负极接在加速极电源的正极上,因此中性束电源系统是悬浮在加速极100 kV高电位上的。

电源系统储存的能量主要储存在电路结构中的分布电容内,NBI电源系统隔离屏蔽结构带来的分布电容分为:1)辅助电源高压罩对屏蔽罩(大地)的分布电容;2)浮在高电位上的辅助电源工频高压隔离变压器两屏蔽层间分布电容;3)加速极高压电源自身电路结构与对地(屏蔽壳)的分布电容。文中将对加速极电源分布电容进行分析计算。

1 加速极电源的设计布局

加速极电源采用脉冲调制技术(Pulse Step

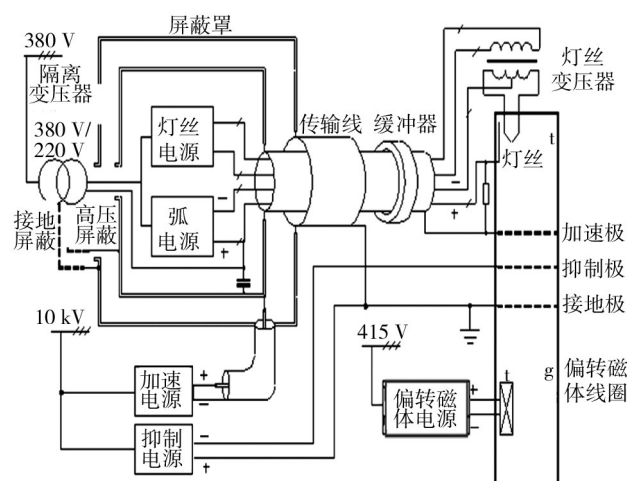


图1 电源系统结构

Fig. 1 Frame diagram of power supply system

Modulator, PSM)方案^[10],由104个提供1 kV的直流电源模块串联而成,其输出电压取决于投入的模块数,通过开关调节输出电压在1~100 kV范围内阶梯变化。某100 kV PSM电源的结构如图2所示,图中K1,K2是10 kV配电柜,分别控制两台油浸式隔离变压器的进线。两台油浸式变压器的原边是延边三角形结构,两个副边绕组分别为星形和三角形接法。单台油浸式变压器可以输出12脉波整流电压,两台串联可以输出24脉波整流电压。4台干式变压器的

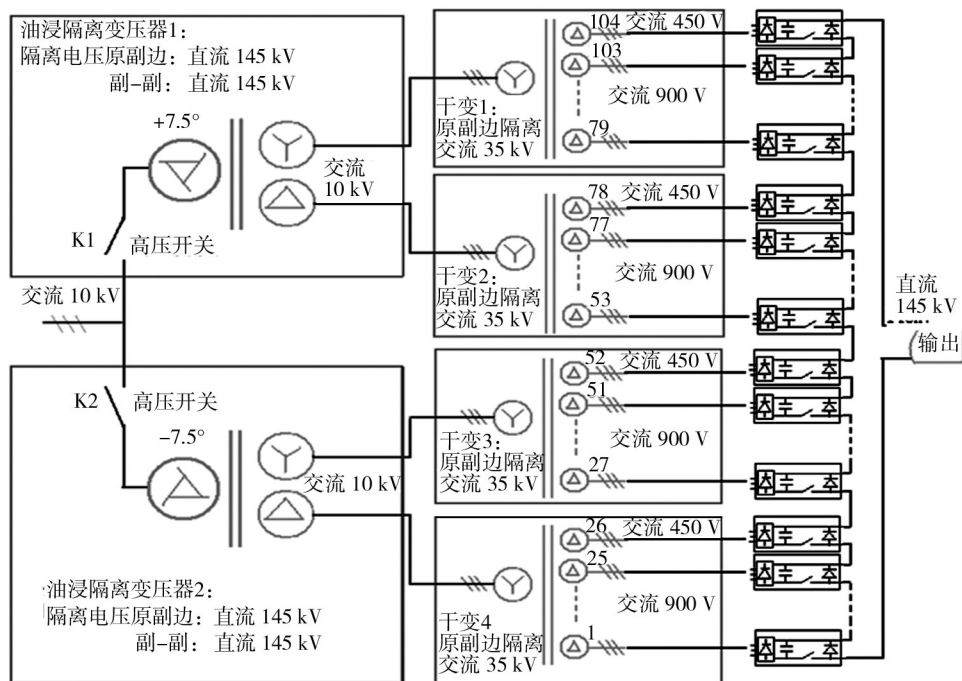


图2 100 kV PSM电源的结构

Fig. 2 Frame diagram of 100 kV PSM power supply

结构相同,各铁芯对地电位不同,每台干式变压器最上面一个副边绕组的输出为交流450 V,其它副边输出为交流900 V。4台干式变压器有104个副边绕组,分别连接104个结构相同的电源模块,产生高电压输出。

电源单模块额定参数为直流1215 V/100 A,尺寸为0.66 m×0.33 m×0.85 m,模块摆放使用4个支架,每支架4层,每层放置7个模块,如图3所示。每层相邻模块电位差最大为直流1400 V,相邻模块间距设定为145 mm。相邻层上下两个模块对应的电位差是直流9800 V,上下两层间距为230 mm。

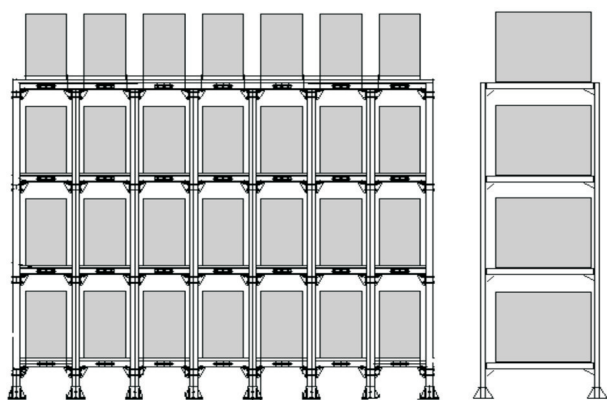


图3 PSM电源支架结构

Fig. 3 Structure diagram of PSM power supply

支架材料采用玻璃钢型材,两支架间距为2.75 m。第一个支架底部与地面距离是0.8 m,其余三个与它并排的支架距地1.9 m。加速极电源的电源模块杂散电容将取决于有无高压屏蔽罩。

2 ANSYS模拟仿真电容计算的原理

对于加速极PSM电源来说,由于各个电源模块上的电位是不同的,因此直接使用解析法很难求解加速极电源的对地分布电容。采用ANSYS软件来计算电容,其基本原理是先求解出导体与地电位的电场储能,再根据电场储能与电容间的关系,计算出导体的对地分布电容。

导体电场中储存有电场能量,对于无源区域 Ω ,电场中的储能 W_e 可表示为:

$$W_e = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \varepsilon \cdot E^2 d\Omega = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \varepsilon |\nabla \varphi|^2 d\Omega \quad (1)$$

式中: ε 为介质的介电常数; E 为电场强度; φ 为电场中的电位; ∇ 为纳布拉算子; $\nabla \varphi$ 为电位的梯度。

从式(1)可以看出,只要知道了电场的电位分布,就可以得到储能的大小。应用有限元法思想,把整个区域 Ω 剖分成许多个单元子区域 Ω^e ,分别求出每个单元的储能后再求和,就得到了整个区域的总电场储能值^[1],见式(2)(假设为二维静电场,并设介质为各向同性的线性电介质)。

$$W_e = \frac{\varepsilon}{2} \int_{\Omega} |\nabla \varphi|^2 d\Omega = \frac{\varepsilon}{2} \sum_{e=1}^n \int_{\Omega^e} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] d\Omega \quad (2)$$

从求出的电位 φ 出发便可以计算出电场储能。电场储能与电容间的关系见式(3)。

$$W_e = \frac{1}{2} CU^2 \quad (3)$$

式中: C 为电容; U 为电压。求解电容值见式(4)。

$$C = \frac{2W_e}{U^2} \quad (4)$$

3 ANSYS仿真建模与求解

在使用ANSYS求解静电电容时,当导体系统只有两种电势的情况下,可以采用电场储能求解电容的方法。然而加速极电源每个电源模块的电位都是不同的,因此无法使用计算电场能量的方法计算出各个导体中的分布电容。对于NBI离子源来说,所要关注的其实不是系统的电容,而是系统的分布电容储存的能量。NBI电源其它部分的电场储能都是基于100 kV高压平台分布电容计算得出的,对于加速极电源的电场储能可以通过ANSYS对电场进行求和得到,然后将电场储能等效为100 kV高压的分布电容,这样有利于离子源电源屏蔽结构的总体设计。

加速极PSM电源支架没有使用屏蔽罩,电源模块直接对地、空气绝缘。根据等离子电源的结构布局,ANSYS建模的电源支架模型如图4所示。

等离子电源放在室内环境中,因此其外部环境不是无穷远边界,这里取尺寸为20 m×10 m×15 m的方框与地面组成一个零电位的外部来求解边界。

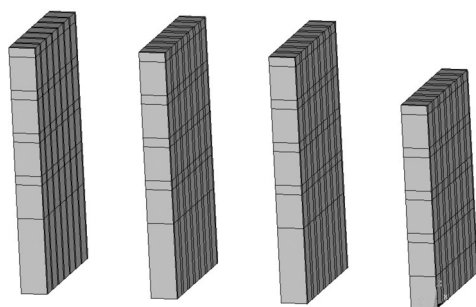


图4 PSM支架建模

Fig. 4 Model of PSM structure

模型使用静态电场三维网格单元 SOLID123 划分网格, 然后对模型中每个电源模块的节点单元依次加载电压载荷, 外围方框节点单元加载零电位, 最后对模型进行求解, 得到等离子体电源模型的电场分布结果。由于三维模型无法直接看到内部的电势分布, 这里将取模型的竖直切面作为样本, 观察三维模型内部的电势分布。得到的等离子体电源模型切面电势分布如图5所示。

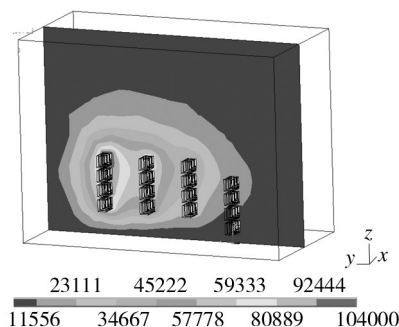


图5 模型剖面的电势分布

Fig. 5 Potential distribution diagram of model profile

从图5中可以明显看出, 随着电源模块电位的升高, 电源模块周围的电位也不断增大。通过对仿真节点单元电场储能进行求和可以得到整个模型的电场储能, 输出的电场储能如图6所示。

计算得到的总电场储能为 1.568 61 J, 这里的电场储能可以等效为 100 kV 电压对应的分布电容, 根据式(4)可以得到分布电容为 0.32 nF。加速极电源、高压屏蔽罩、隔离变压器总分布电容的大小可以为离子源保护装置——直流电源缓冲器的设计提供依据, 直流缓冲器能够利用铁磁材料涡流损耗和磁滞

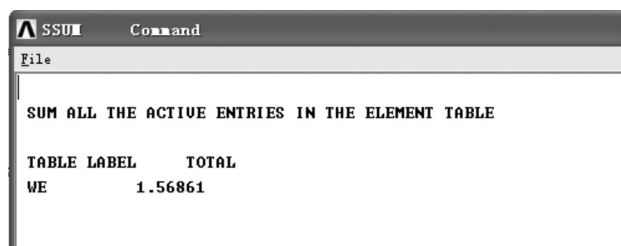


图6 加速极电源电场储能输出结果

Fig. 6 The output results of energy storage of the accelerator power supply

损耗消耗故障能量。

4 结论

NBI 离子源是中性束生成的关键部件, 离子源打火时吸收的能量不能超过一定阈值, 因此必须严格控制 NBI 离子源各部件分布电容的储能。根据加速极 PSM 电源各个电源模块电位不等的特点, 将 PSM 电源储能等效为 100 kV 的分布电容, 并通过 ANSYS 数值仿真软件进行建模与求解, 得到加速极 PSM 电源的分布电容, 为 NBI 离子源的设计和安全运行提供了依据。

参考文献:

- [1] BAKER W R, HOPKINS D B. Present and Future Technology of High Voltage Systems for Neutral Beam Injectors[DB/OL]. [1978-01-27]. <http://www.osti.gov/energycitations/purl.cover.jsp?purl=/6462678-siMTor/>.
- [2] 曹亮, 李格, 王海田. 直流高压缓冲器设计研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1269—1274.
- [3] 李伟, 刘小宁, 傅鹏, 等. EAST 中性束注入电源系统的杂散电容[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1662—1666.
- [4] FINK J H, BAKER W R, OWREN H M. Analysis and Application of a Transformer Core that Acts as an Arc Snubber[J]. Plasma Science, 1980, 8(1): 33—38.
- [5] 刘胜, 胡纯栋. 利用密度反馈实现离子源长脉冲放电[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(9): 1331—1334.
- [6] 杨家兴. HL-2A 装置 NBI 高压缓冲器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 10—11.
- [7] PRAEG W F. Overcurrent Protection for the TFTR Neutral

(下转第 124 页)

表1 静电安全区域内的防静电体系组成

Table 1 Composition of anti-static system in electrostatic safe region

序号	防护范围	方法或途径
1	工作台/工位	各种加工、生产设备可靠接地;操作人员配置专用防静电服、工位防静电鞋、防静电手腕带。
2	贮存/周转	所有的装配套、测试台等表面都应铺设防静电胶垫、静电离子风机和可靠的接地系统。
3	地面	所有与火工品原材料进货、生产、测试、周转运输、包装、发货有关区域铺设防静电胶垫。
4	防静电检测	防静电腕带、防静电鞋的对地电阻、防静电胶垫的表面电阻测试率和人体在防护状态下的静电电压值都应定期检测。
5	静电接地	接地系统的可靠性、接地电阻、泄漏电阻应定期检测和系统维护。
6	器具/周转用具	火工品生产过程中使用各种表面电阻率在 $10^8 \Omega \cdot m$ 以下的防静电器具,如防静电周转箱、托盘、元件盒、毛刷、工作椅、包装袋等。
7	操作人员	增强人员防护意识,制定科学合理的静电防护管理制度和培训方案。

参考文献:

- [1] 穆丽军,高俊国,张玉令. 静电放电对电火工品作用机理分析与试验研究[J]. 工业安全与环保,2010(5):43—44.
- [2] 陈飞,周彬,秦志春,等. 半导体桥火工品的防静电和防射频技术[J]. 爆破器材,2010(3):32—36.
- [3] 刘春风,刘金城,李志鹏,等. RESD-1 人体静电放电模型系统设计与研究[J]. 河北大学学报(自然科学版),2010(5):157—160.
- [4] 陈瑞民. 电火工品防静电研究[D]. 南京:南京理工大学,2008.
- [5] 常新龙,王建龙,张磊. 人体静电作用下桥丝火工品发火概率计算[J]. 装备环境工程,2012,9(2):80—84.

(上接第120页)

- Beam Sources during Spark Down[C]// The 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research. 1979:1260—1266.(余不详)
- [8] MAYHALL D J, SHIMER D W. Design and Testing of Low Capacitance, 80 kV Source Cables for MFTF Sustaining Neutral Beam Power Supplies[C]// Proceedings of 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research. 1979:709—713.(余不详)
- [9] 王海田,李格,曹亮. EAST中性束注入器用高压缓冲器分析[J]. 强激光与粒子束,2010,22(6):1374—1377.
- [10] TAKEIRI Yasuhiko. Negative Ion Source Development for Fusion Application[J]. Review of Scientific Instruments, 2010,81(2):114—121.
- [11] 段进,倪栋. ANSYS10.0结构分析[M]. 北京:兵器工业出版社,2006:60—61.