

EAST 中性束注入电源系统的杂散电容

李 伟¹, 刘小宁¹, 傅 鹏¹, 王祥学²

(1. 中科院等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 山东铝业公司, 淄博 255052)

摘 要: 辅助电源系统的分布电容是中性束注入(NBI)电源系统杂散电容的重要组成部分。为了研究辅助电源系统的分布电容, 从而为打火故障保护单元 SNUBBER 的设计提供依据, 采用“电容特性普遍公式”和“电荷模拟法”对辅助电源系统高压屏蔽罩两种不同方式(直接对地绝缘和对地屏蔽罩)的分布电容进行分析和计算, 并通过 ANSYS 软件进行了仿真实验。计算和仿真结果表明, “直接计算法”与 ANSYS 仿真结果相吻合, 高压屏蔽罩直接对地绝缘方式计算出的电容值更小。

关键词: 分布电容; 高压绝缘; 屏蔽; 电容普遍公式; 电荷模拟法; ANSYS 仿真

中图分类号: TM854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6520(2008)08-1662-05

Analysis and Calculation of the Stray Capacitance of EAST NBI Power Supply System

LI Wei¹, LIU Xiao-ning¹, FU Peng¹, WANG Xiang-xue²

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Shandong Aluminum Corporation, Zibo 255052, China)

Abstract: The distributed capacitance of auxiliary power supply system is an important part of various stray capacitances of NBI power supply system. In order to study the distributed capacitance of auxiliary power supply system and provide a reference for SNUBBER design for acceleration grid protection from high voltage (HV) breakdown, the distributed capacitance of two shield configurations (Faraday cage isolated from earth and Faraday cage with grounded shield) for high voltage (HV) shield cage of auxiliary power supply is analyzed and calculated with two calculation methods, namely, general formula for capacitive characteristic and charge simulation method (CSM). Meanwhile, the calculation results are verified by the simulations of ANSYS software. It is shown that the simulation results are in good coincidence with the analytical results, and the distributed capacitance of Faraday cage insulated from earth is less than the Faraday cage with grounded shield, the former shield has better engineering application.

Key words: distributed capacitance; HV insulation; shield; general formula for capacitive characteristic; CSM; ANSYS simulation

0 引 言

国家大科学工程超导托卡马克聚变实验装置(EAST)的中性束注入系统由电源系统、高压传输线和中性束注入器等组成。NBI 电源系统是一组可调的大功率脉冲电源^[1-5], 见图 1, 主要包括加速极电源、灯丝电源、弧流电源、抑制极电源和偏转磁铁电源。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 80 kV)、负(直流 -2.5 kV)高压, 提供离子源的中性束注入功率。

图 2 是加速极电源电路和离子源结构示意图。

由于加速极操作在强电场条件下, 这使得高压击穿现象时有发生。研究表明, 如果负载故障吸收的能量多于几个 J(约 5 个)^[6], 加速极将严重损坏, 而代价是很昂贵的。故障时的能量主要来源于两部分: 加速极电源和杂散电容储能。杂散电容由离子源自身电容、传输线电容和电源系统电容组成。除了离子源自身电容 C_i 以外, 其它杂散电容的端电压都是 80 kV 高压, 相当于并联, 在图中用 C_e 表示。离子源打火时可以在几 μs 内通过开关 S 切断电源, 而电容储能却只能通过串联保护单元吸收^[6-8]。

则在设计电源系统的时候, 希望杂散电容尽量小, 同时杂散电容的大小决定了保护单元的设计。传输线的设计及其分布电容的计算在国内外文献中都有过论述^[9,10], 但辅助电源系统电容却没有看到相关理论分析^[11,12], 由于此电容是杂散电容中的重要部分, 本文将通过理论分析计算和仿真对它进行研究, 从而为 SNUBBER 的设计提供依据。

基金资助项目: 国家九五重大科学工程“EAST 超导托卡马克核聚变实验装置”资助项目(计投资 1998-1303)。

Project Supported by EAST of State Huge Science Project, National Plan Committee of China(1998-1303).

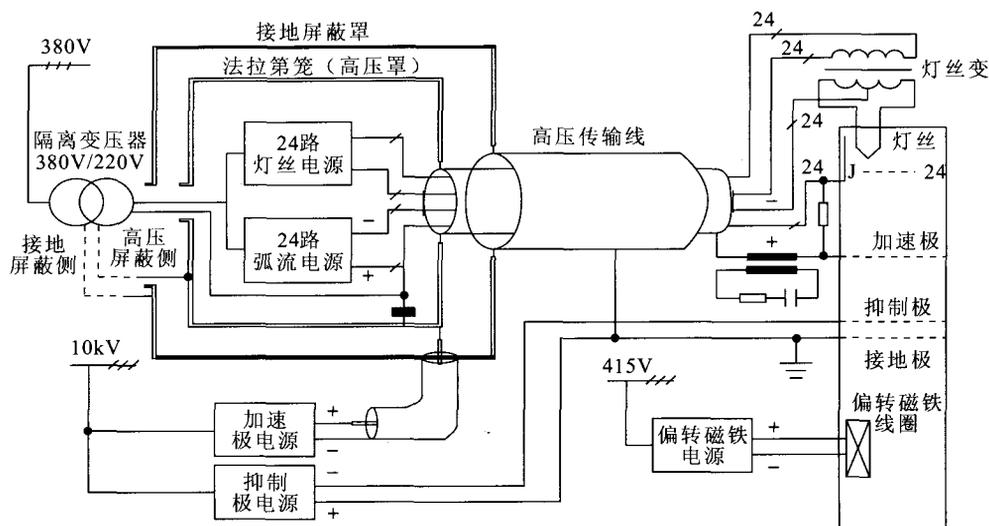


图1 EAST装置NBI电源系统框图

Fig. 1 Block diagram of NBI power source system of EAST

1 弧流和灯丝电源屏蔽层设计

灯丝电源和弧流电源都是建立在高电压基础上的。从抗干扰的角度,它们是被一个高压罩(法拉第电磁笼)包围的。高压罩是个密闭金属等势体,它可以隔离外电场的作用,保护内部电源模块,实现了电磁屏蔽。同时,电源快速地启动和关断,产生时变场,以电磁波的形式对电源本身和周围电子设备造成强电磁干扰,而当这些电磁波传播到法拉第笼表面时会发生衰减。高压罩是连接在传输线电源端的高压内导体上的,也就是说它是80 kV的等位体。

从安全操作的角度,应该在高压罩外面再加一层接地屏蔽层,而高压罩和接地屏蔽罩之间应充分考虑高压绝缘和电晕的影响。比如德国的TEXTOR装置上^[12],就采用了长×宽×高为2.5 m×1.75 m×1.2 m的高压罩和接地屏蔽层。

而有些聚变装置如欧共体的JET则是没有采用接地屏蔽罩^[11],直接将高压舱安装在4个绝缘瓷柱上,对地高压隔离的。

这样辅助电源部分的分布电容实际上就是高压罩对地的电容,而地既可以是接地屏蔽罩,也可以是大地,这部分电容是可以通过仪器测量出来的。为了指导设计,本文将对不同结构的分布电容进行分析计算,从而对辅助电源和SNUBBER的设计提供理论依据。

从保护的角度,应为SNUBBER设计留出裕量,参考其他装置的参数,将高压罩体积取长×宽×高为4 m×4 m×4 m。

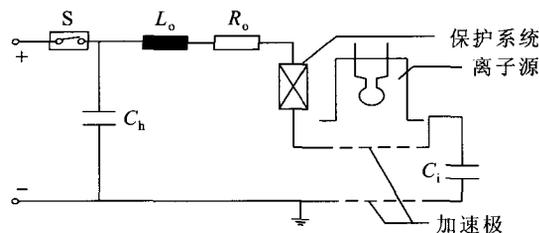


图2 离子源和加速极电源电路示意图

Fig. 2 Schematic of ion source and acceleration grid power supply circuit

2 采用接地屏蔽罩时分布电容计算

2.1 解析解法

对于80 kV高电压,以空气作为绝缘介质,按照7 kV/cm的最大绝缘场强设计^[2],并考虑裕量,选择接地屏蔽罩的体积(长×宽×高)为4.26 m×4.26 m×4.26 m。定义为 $b=4.26$ m, $a=4$ m。

对于内外都是立方体(或一般长方体)导体的电容计算,不能象球形电容器那样,按照

$$C = \frac{q}{U}, \quad (1)$$

的定义直接求得。其中 q 为导体带电量; U 为两导体间的电压。在这里,可以把导体间的电容等效成6个对应面间的电容的并联。而平行面间的电容则可以利用电容特性普遍公式^[13]:

$$C = 1 / \int \frac{dl}{\epsilon S(l)}. \quad (2)$$

式中, ϵ 为绝缘介质常数; l 为积分路径,选取与平均电场的力线重合的路径; $S(l)$ 为 l 处平行截面面积,见图3。

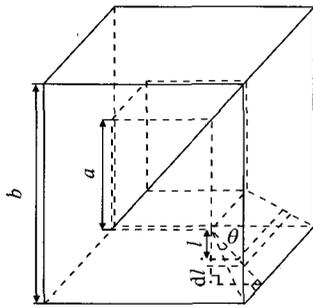


图3 高压罩与接地屏蔽罩电容计算示意图

Fig. 3 Schematic of capacitance calculation of HV deck and ground shielding box

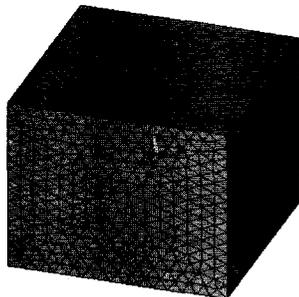


图4 高压罩对接地屏蔽罩电场网格剖分图

Fig. 4 Meshing of the electric field between HV deck and ground shielding

将 $S(l) = (a + 2\sqrt{2}l \tan \theta)^2$,

$\tan \theta = \frac{(b-a)/2}{\sqrt{2}(b-a)/2} = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 代入式(2), 得

$$C' = 1 / \int_0^{b-a} \frac{dl}{\epsilon(a+2l)^2} = \epsilon / (\frac{1}{2a} - \frac{1}{2b}) = 1.16 \text{ nF}. \quad (3)$$

这样高压罩和接地屏蔽罩间的电容 $C_1 = 6 \times C' = 6.96 \text{ nF}$.

2.2 ANSYS有限元数值计算

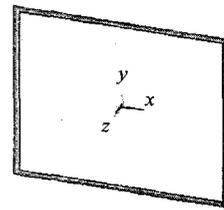
利用 ANSYS 对该静电场问题建模, 用 4 面体单元对场域网格剖分的结果见图 4。图 5 为施加边界条件后所得等势线分布情况, 图 6 为电场强度计算结果, 为了清楚看到三维图内部, 绘出了以工作平面为切平面的截面图。

将电场所有单元的能量相加, 得整个电场储能 $W = 21.8214 \text{ J}$, 由能量公式:

$$W = \frac{1}{2} C U^2, \quad (4)$$

得到有限元法计算的高压罩与接地屏蔽罩间的电容

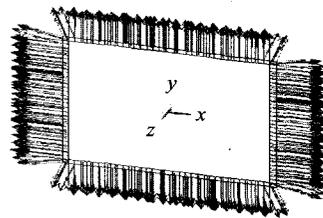
$C_1 = \frac{2W}{U^2} = 6.819 \text{ nF}$ 。由图 6 电场强度计算结果可知, 最大场强 $E_{\max} = 6.465 \text{ kV/cm} < 7 \text{ kV/cm}$, 满足设计要求。



0 8889 17778 26667 35556 44444 53333 62222 71111 80000

图5 切平面等势线分布图

Fig. 5 Distribution of electric potential in the cutting plane



326313 361894 397475 433056 468638 504219 539800 575382 610963 646544

图6 切平面电场强度分布图

Fig. 6 Distribution of electric field intensity in the cutting plane

3 高压罩对地电容计算

3.1 模拟电荷法求解

为计算高压罩对地电容, 先假设高压罩带有电量 q 。地面的影响可以用镜像电荷代替, 但因为无法在立方体内找出合适的简单电荷使它为等位体, 所以镜像法在这里不适用。然而模拟电荷法却是可以通过在导体内部虚拟若干个假想电荷^[14,15], 来代替电极表面连续的电荷分布, 进而建立电量和电压的直接关系式, 从而求取静电电容。并且, 模拟电荷法不像镜像法那样, 为了求解精度, 需要对地无穷镜像。所以本文将采用此方法。

对于立方体等位面的高压罩, 不能象球面或柱面等规则的等位面那样, 根据电场知识直接用少量点电荷、环状电荷或线电荷来模拟电极表面复杂的电荷分布。所以这里采用 n 个点电荷作为假想电荷, 并在导体表面取同等数量的点作为轮廓点。见图 7, “·”表示假想电荷, “×”表示轮廓点。

根据静电场理论, 建立假想电荷和轮廓点间关系式

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

即 $Pq = \varphi$ 。 (6)

式中, P 为电位系数矩阵, $q_1, q_2 \dots q_n$ 是 n 个假想电荷, $\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_n$ 是假想电荷产生的轮廓点处电位。由(6)式得

$$q = P^{-1} \varphi. \quad (7)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{(a_i - x_j)^2 + (b_i - y_j)^2 + (c_i - z_j)^2}} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{(a_i - x_j)^2 + (b_i - y_j)^2 + (c_i + z_j)^2}}.$$

式中, ϵ_0 为空气绝缘介质常数; P_{ij} 是第 j 个假想电荷及其镜像电荷在第 i 个轮廓点处作用电位系数。其中 (a_i, b_i, c_i) 是第 i 个轮廓点坐标, $i = 1, 2, \dots, n$; (x_j, y_j, z_j) 是第 j 个假想电荷坐标, $j = 1, 2, \dots, n$ 。由于电容的值和电位大小无关, 为方便起见, 设导体电位 $\varphi = 1$ V (以地面为电位参考点)。求解(7)式, 并由 $q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$ 和(1)式可得 $C = q$ 。

对于模拟电荷法, 计算结果的准确性和假想电荷的数量、轮廓点布置、假想电荷与轮廓点位置关系有关, 这些变量有一个最优值。但因为优化起来比较困难, 且该工程问题对计算精度要求并不苛刻, 本文主要是通过模拟效果进行评价, 然后反复调整模拟控制变量, 达到一定精度即可。

定义 c 为相邻轮廓点间距离, d 为轮廓点与对应假想电荷间的垂直距离, 见图 7。为了获得优化解, 必须使 c 和 d 两个长度适当的平衡^[15]。最终取 $f = d/2c = 0.6$, 假想电荷数目 9126。计算得模拟电荷法计算的高压罩对地平面的电容 $C_2 = 2.2173$ nF, 在等位面上取非轮廓点的其他一些点作为检验点, 检验点电位最大误差约为 $\Delta\epsilon = 3\%$, 满足设计要求。

3.2 ANSYS 有限元法计算

图 8 为计算高压罩与地系统电容的模型网格剖分图。由于整个结构的对称性, 为了清晰起见, 这里只画出 1/4 模型。对于地面以上半开域的无限远场区间的计算, 这里是采用远场单元 INFIN111 来模拟的, 即上图中网格剖分的最外层。电容是通过调用 CMATRIX 命令计算的, 对于包含地共有两个导体的系统来说, CMATRIX 是个 1×1 矩阵。这样有限元法计算的 $C_2 = 2.3915$ nF。

4 结论

a) 对于辅助电源的高压部分 (弧流和灯丝电源) 装在全封闭的高压金属舱内, 同时外加接地屏蔽罩的结构电容计算, 用“电容特性普遍公式”和有限元法所得的结果, 分别为 6.96 nF 和 6.819 nF, 两者相吻合, 因而从不同角度解决了该问题。

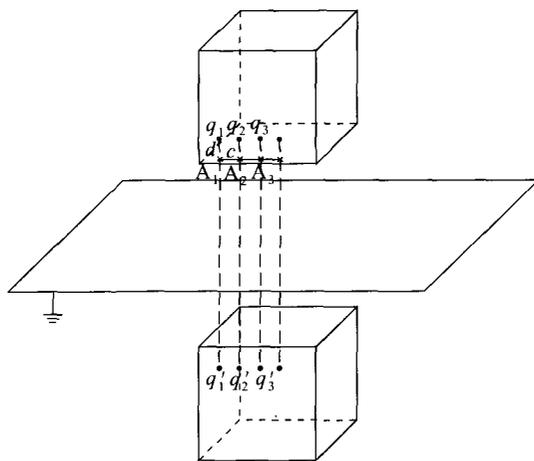


图 7 轮廓点和假想电荷布置示意图
Fig. 7 Scheme of distribution of contour points and fictitious charges

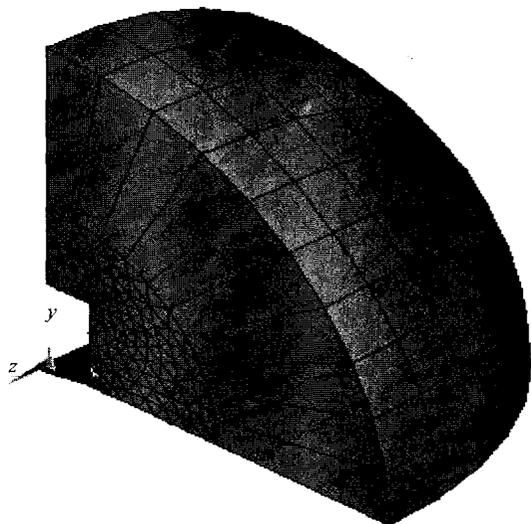


图 8 高压罩对地电场网格剖分图
Fig. 8 Meshing of the electric field between HV deck and ground

b) 对于弧流和灯丝电源装在高压舱内, 该高压舱直接对地绝缘情况的系统电容计算, 用 CSM 计算电容所得结果和用有限元分析软件 ANSYS 的计算结果基本一致, 说明所建模型可靠, 反映了电场的实际情况。

c) 两种设计结构相比, 在同样满足绝缘的情况下, 高压罩采用同样尺寸, 所得的分布电容数值相差很大。高压罩直接对地绝缘的情况, 分布电容比较小, 从减小杂散电容储能以降低 SNUBBER 造价和体积的角度考虑, 该方案更理想。

参考文献

[1] Schwarz U, Braunsberger U, Furrer A, et al. The high voltage power supply for the acceleration grids of the TEXTOR neutral

- injectors[C]// The 13th Symposium on Fusion Technology. Varese, Italy; Pergamon Press, 1984; 823-828.
- [2] Schwarz U, Haltrich S. The operating behavior of the power supplies for the TEXTOR neutral injectors[C]// The 15th symposium on Fusion Technology. Utrecht, Netherlands; North-holland Publishing Company, 1988; 5-8.
- [3] Baruah U K, Patel P J, Bandyopadhyay M, et al. Power supply system for 1000 s neutral beam injector[C]// Proceedings of the 17th Symposium on Fusion Engineering. San Diego, California, USA; IEEE Press, 1997; 1133-1136.
- [4] Alex J, Schminke W. A high voltage power supply for negative ion NBI based on PSM technology[C]// Proceedings of the 17th Symposium on Fusion Engineering. San Diego, California, USA; IEEE Press, 1997; 1063-1066.
- [5] 王一农. 基于 PSM 技术的 EAST 中性束注入器加速极高压电源设计[D]. 合肥:合肥工业大学, 2005.
- [6] Praeg W F. Overcurrent protection for the TFTR neutral beam sources during spark down[C]// The 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research. New York, USA; IEEE Press, 1979; 1260-1266.
- [7] Cheng V. Design, Fabrication & testing of core snubber network for ion source of Tokamak fusion reactors[C]// The 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research. New York, USA; IEEE Press, 1979; 1272-1276.
- [8] Watanabe K, Mizuno M. Development of a high performance core snubber for high power neutral beam injectors[J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 69(12); 4136-4141.
- [9] 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. New York, USA; IEEE Press, 1979; 709-713.
- [10] Bowen N, Deitz A, Murray H, et al. Design and test of the transmission line to the TFTR neutral beam ion sources[C]// The 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research. New York, USA; IEEE Press, 1979; 705-708.
- [11] Basile G L, Ciscato D, Dobbing J A, et al. The neutral injector auxiliary power supply system in JET; design, manufacture and tests[C]// The 13th Symposium on Fusion Technology. Varese, Italy; Pergamon Press, 1984; 835-842.
- [12] Schwarz U, Pfister U, Goll O, et al. The design of the auxiliary power supplies for the TEXTOR neutral injectors[C]// The 11th Proceeding of SOFE. Austin, Texas, USA; IEEE Press, 1985; 685-688.
- [13] 陈燊年, 陈思明, 王建成. 从麦克斯韦方程组建立的新电路理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [14] [日]河野照哉, 宅间董著. 电场数值计算法[M]. 尹克宁, 译. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [15] 盛剑亮. 电磁场数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.



LI Wei
Ph. D. candidate

李伟

1979—, 女, 博士生
研究方向为脉冲功率技术
电话: (0551) 5593261
E-mail: gogo70@ipp. ac. cn

刘小宁

1962—, 男, 研究员, 博导
目前从事 EAST 纵场电源, NBI 电源和强磁场电源的研究和设计工作, 研究领域为大功率变流技术和超导电工

傅鹏

1963—, 男, 研究员, 博导
主要从事高功率脉冲电源技术和控制研究

收稿日期 2007-12-11

编辑 陈蔓