

多重镜像法求解高压传输线的部分电容

杜世俊¹, 钮小军¹, 刘小宁²

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 该文研究了中性束注入系统中高压传输线部分电容的求解问题; 根据传输线多层同轴导电壳的结构特点, 利用多重镜像法确定与平行导线相应的一系列的镜像线电荷, 求解的问题变为由一系列平行线电荷构成的电场问题, 传输线的部分电容则通过各导体间的电位系数来求得; 这一方法避免了直接求解的困难以及大量数值计算等问题。

关键词: 中性束注入; 传输线; 部分电容; 多重镜像; 镜像电荷; 电位系数

中图分类号: TM83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5060(2005)10-1284-05

Calculating the partial capacitance of the high voltage transmission line using a multiple image method

DU Shi-jun¹, NIU Xiao-jun¹, LIU Xiao-ning²

(1. School of Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: This paper deals with the partial capacitance calculation of the high voltage transmission line for the neutral beam injectors. According to the geometry of the transmission line with multilayer and coaxial conductor shell, a series of image charges relating to the parallel conductor can be found by using the multiple image method. The problem is converted into solving the electric field of the parallel line charges. The partial capacitance can be obtained by calculating the coefficient of potential among the conductors. This method can avoid the difficulties of the complex mathematical operation in the analytical method and a large amount of calculation in the numerical method.

Key words: neutral beam injection; transmission line; partial capacitance; multiple image; image charge; coefficient of potential

0 引言

在受控核聚变实验装置中, 通常采用各种辅助手段加热等离子体, 中性束注入(NBI)是主要的方法之一。中性束注入系统由电源系统、传输线和中性束注入器等组成^[1~4], 如图1所示。

中性束注入器处于大功率脉冲运行状态, 在过负荷及故障态时, 高压火花中贮存的能量可能

造成离子源损伤甚至永久损坏, 通常采用快速开关管切断电源对离子源进行保护^[5]。尽管如此, 整个中性束注入系统中电容贮存的能量仍有可能持续地出现回路放电以致损坏电极。这些电容包括电源装置、离子源自身的电容以及高压传输线的部分电容, 其中最主要的是高压传输线的电容。在中性束注入系统高压传输线的设计中, 仍需对中性束注入器加速极设置保护装置(如

Snubber)^[6,7],因此传输线部分电容的计算对保护装置的设计是极为重要的。



图1 中性束注入系统简图

传输线部分电容的计算通常是复杂的,对不同的结构可以根据其结构特点确定求解的方法^[8~11]。NBI 高压传输线由 2 层同轴圆柱导电壳及一系列平行于轴线的导线组成,属复杂的多层导体系统,其部分电容难以直接求解且数值方法又涉及大量而复杂的计算,因此采用恰当的求解方法将大为简化传输线部分电容的求解过程。

1 高压传输线部分电容求解的基本方法

NBI 高压传输线截面如图 2a 所示。传输线最外层圆柱导电壳作为接地线,同轴的内层圆柱导电壳作为注入器加速极正极电源的传输线,处于 +80 kV 的电位。2 层圆柱壳之间是 4 根加速极负极(抑制极)的传输线,处于 -2 kV 的电位。4 根导线沿圆柱壳对称分布,形成准同轴结构。内层圆柱壳内部是用于弧电源、灯丝电源、偏磁电源等辅助电源传输线,内层导电壳对辅助电源传输线起屏蔽作用,使其运行时不受干扰。

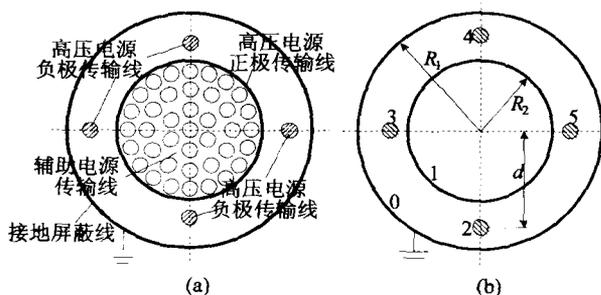


图2 NBI 高压传输线截面结构图

高压传输线的长度通常为数十米,为简单起见可将其视为无限长的直传输线。最内层辅助电源传输线的电源是通过隔离变压器直接取自于电网,因此相对于高压传输线和接地线是独立的系

统。另外由于内层圆柱导电壳的屏蔽作用,辅助电源导线对分析高压传输线的部分电容并无任何影响,据此可以给出如图 2b 所示的计算高压传输线部分电容的简化模型截面。为便于后面的分析,图中示出了传输线各导体的标号、负极导线距轴线的距离以及导电壳的半径。

图 2b 所示的传输线属多导体系统,其电容的计算是复杂的,但可以通过各导体间电压与各导体所带电荷的关系来求解。对线性的多导体系统,某一导体表面位置处相对于参考导体的电压是整个系统导体在此位置上产生的电位之和。对 $n+1$ 个带电导体组成的系统,以 0 号导体为参考,各导体表面处相对于参考导体的电压可写为

$$\left. \begin{aligned} U_{10} &= \varphi_{10} + \varphi_{12} + \dots + \varphi_{1n} \\ &\vdots \\ U_{n0} &= \varphi_{n1} + \varphi_{n2} + \dots + \varphi_{nn} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, U 为各导体相对于 0 号导体的电压; φ 是各带电导体产生的电位。

由于电位 φ 与导体所带电荷有关, (1) 式又可写为^[12]

$$\left. \begin{aligned} U_{10} &= \alpha_{11}q_1 + \alpha_{12}q_2 + \dots + \alpha_{1n}q_n \\ &\vdots \\ U_{n0} &= \alpha_{n1}q_1 + \alpha_{n2}q_2 + \dots + \alpha_{nn}q_n \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, q 为导体所带的电荷; α 是与导体带电状况无关的电位系数。

将 (2) 式改写为矩阵形式

$$U = \alpha q \quad (3)$$

求解后得

$$q = \alpha^{-1}U = \beta U \quad (4)$$

其中, β 称为感应系数。

如果 (4) 式中感应系数 β 已求得, 则多导体系统的电容由下式求出^[10]

$$\left. \begin{aligned} C_{i0} &= \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \\ C_{ij} &= -\beta_{ij} \quad (i \neq j) \end{aligned} \right\} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

其中, C_{i0} 为各导体与参考导体之间的电容; C_{ij} 为各导体间的电容。

显然电容与 (2) 式中的电位系数 α 直接相关, 如果能够确定电位系数则可解得传输线的电容。电位系数 α 与导体结构、位置及介质有关, 可由 (1) 式中带电导体产生的电位获得。对图 2 所示的

传输线,直接求解电位系数是十分困难的,但可以根据导体几何结构及相对位置的特殊性用镜像法来求解。用镜像法求解首先需确定假想的镜像电荷,对结构简单的问题,镜像电荷的确定相对较简单。对多层导体或介质的结构,其镜像电荷的确定存在复杂的反复镜像问题^[13],因此多重镜像电荷的确定是求解的关键。

2 镜像电荷的确定和电位系数的求解

NBI 高压传输线除导体外,其余介质(空气)均相同。由于存在一定的对称性,以图 2b 所示的 0、1 和 2 号导体组成的系统分析多重镜像法求解过程,如图 3a 所示,整体情况可类似得出。

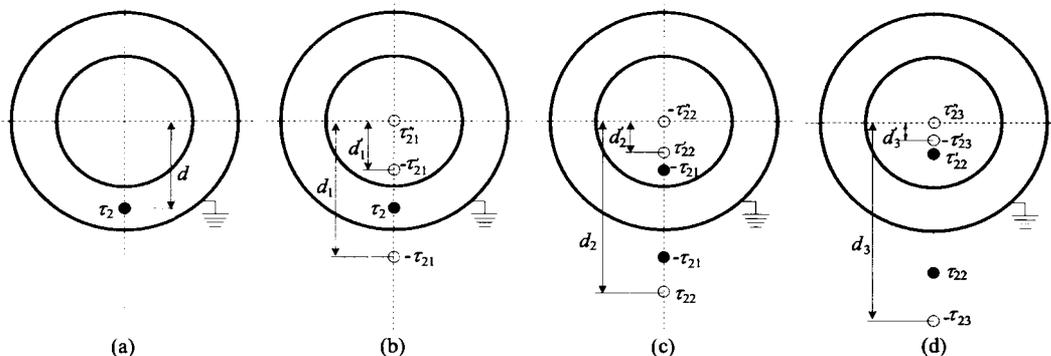


图 3 确定镜像线电荷的示意图

以 0 号导体为参考,设 2 号导体单位长度的电量为 τ_2 ,与外壳对应的镜像线电荷为 $-\tau_{21}$,电量与 τ_2 等量。由于内壳不接地,与其对应的 2 个镜像线电荷为 $-\tau'_{21}$ 和 τ''_{21} ,电量也与 τ_2 等量, τ''_{21} 位于轴心处,如图 3b 所示。镜像线电荷 $-\tau_{21}$ 和 $-\tau'_{21}$ 的位置分别为

$$d_1 = \frac{R_1^2}{d} \quad d'_1 = \frac{R_2^2}{d} \quad (6)$$

对一次镜像电荷 $-\tau'_{21}$,与外壳对应的二次镜像线电荷 τ_{22} 。对一次镜像电荷 $-\tau_{21}$,同样与内壳也对应的两个二次镜像线电荷 τ'_{22} 和 $-\tau''_{22}$ 。 $-\tau''_{22}$ 也位于轴心处。二次镜像线电荷 τ'_{22} 和 τ_{22} 的位置如图 3c 所示

$$d'_2 = \frac{R_2^2}{d_1} = \frac{R_2^2}{R_1^2} d \quad d_2 = \frac{R_1^2}{d'_1} = \frac{R_1^2}{R_2^2} d \quad (7)$$

同样可得图 3d 所示的三次镜像电荷 $-\tau_{23}$ 、 $-\tau'_{23}$ 的位置

$$d_3 = \frac{R_1^2}{d'_2} = \frac{R_2^4}{R_1^2} \frac{1}{d} \quad d'_3 = \frac{R_2^2}{d_2} = \frac{R_2^4}{R_1^2} \frac{1}{d} \quad (8)$$

依次如此可以求得任意次镜像后的电荷位置,在 $2k-1$ 和 $2k$ 次镜像后可得

$$d_{2k-1} = \frac{R_1^{2k}}{R_2^{2k-1}} \frac{1}{d} \quad d'_{2k-1} = \frac{R_2^{2k}}{R_1^{2k-2}} \frac{1}{d}$$

$$d_{2k} = \frac{R_1^{2k}}{R_2^{2k}} d \quad d'_{2k} = \frac{R_2^{2k}}{R_1^{2k}} d \quad (9)$$

根据上述的多重镜像法,可以确定各次镜像电荷的位置,(2)式中的电位系数可由 2 号导体及其所有镜像线电荷组成的系统来求解。

电位系数 α 是与导体带电状况无关的,从计算导体表面处的电位可求得电位系数。下面仍以图 3a 所示导体组成的系统为例求解各导体的电位系数,整个传输线可按相同的方法求解。

以 0 号导体为参考,设 1 号和 2 号导体单位长度的电荷分别为 τ_1 和 τ_2 ,2 号导体的半径为 a 。1 号导体表面位置处的电位应当是 1 号导体自身和 2 号导体的共同作用,1 号导体在其自身表面处引起的电位可直接求得

$$\varphi_{11} = \frac{\tau_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (10)$$

对应于(2)式中的电位系数为

$$\alpha_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (11)$$

2 号导体在 1 号导体表面位置处引起的电位显然包括了该导体及其对应的一系列镜像线电荷的作用,因此其对 1 号导体表面位置处电位的贡献为

$$\varphi_{12} = \frac{\tau_2}{2\pi\epsilon} \ln \left[\frac{R_1 - d}{d - R_2} \prod_{k=1}^{\infty} \times \frac{(R_1^{2k+1} - R_2^{2k}d)(R_1^{2k-2}d - R_2^{2k-1})}{(R_1^{2k-1} - R_2^{2k-2}d)(R_1^{2k}d - R_2^{2k+1})} \right] \quad (12)$$

相应的电位系数为

$$\alpha_{12} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left[\frac{R_1 - d}{d - R_2} \prod_{k=1}^{\infty} \times \frac{(R_1^{2k+1} - R_2^{2k}d)(R_1^{2k-2}d - R_2^{2k-1})}{(R_1^{2k-1} - R_2^{2k-2}d)(R_1^{2k}d - R_2^{2k+1})} \right] \quad (13)$$

同样,可以根据上述方法求解 2 号导体表面处的电位。1 号导体对 2 号导体表面位置引起的电位也可直接求得

$$\varphi_{21} = \frac{\tau_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R_1}{d} \quad (14)$$

电位系数则为

$$\alpha_{21} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R_1}{d} \quad (15)$$

2 号导体在其自身表面处引起的电位是包括了该导体及其对应的所有镜像电荷的贡献,其电位为

$$\varphi_{22} = \frac{\tau_2}{2\pi\epsilon} \ln \left[\frac{R_1 - d}{a} \prod_{k=1}^{\infty} \times \frac{(R_1^{2k} - R_2^{2k-2}d^2)(R_1^{2k+1} - R_2^{2k}d)(R_1^{2k-2}d^2 - R_2^{2k})}{(R_1^{2k-1} - R_2^{2k-2}d)(R_1^{2k} - R_2^{2k+1})d^2} \right] \quad (16)$$

电位系数 α_{22} 则可由上式求得。

至此对图 3a 所示简单的、存在多重镜像电荷的系统,可以求得其电位系数。对图 2 所示的实际高压传输线,在将 4 根加速极负极导线都进行多重镜像后,可以求得(3)式中形式为 5×5 对称的电位系数矩阵。再利用(4)式和(5)式的关系,可求得各导体间的部分电容,最终得到如图 4 所示的由高压传输线部分电容构成的电容网络。由于传输线内层圆柱导电壳(图 4 中 1 号导体)处于 80 kV 的高电位,因此可由内层导电壳与接地外壳之间的等效电容作为传输线的电容,由此可近似求得高压传输线单位长度的电容为

$$C = C_{10} + \frac{(C_{12} + C_{13} + C_{14} + C_{15})(C_{20} + C_{30} + C_{40} + C_{50})}{C_{12} + C_{13} + C_{14} + C_{15} + C_{20} + C_{30} + C_{40} + C_{50}} \quad (17)$$

以上的求解属同一介质问题,如果 2 层导电壳间的介质与外层不同,则可用同样的方法确定

镜像线电荷的电量及其位置,但镜像线电荷带电量的确定相对较复杂。

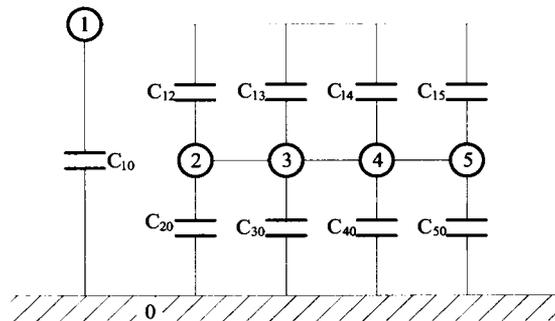


图 4 高压传输线部分电容构成的电容网络图

为了验证本文的求解方法,根据静电场中互易原理,(13)式和(15)式中的电位系数应当满足 $\alpha_{12} = \alpha_{21}$ 。

以本文研究的实际情况为例($R_1 = 272 \text{ mm}$, $R_2 = 72.5 \text{ mm}$, $d = 209.6 \text{ mm}$, $a = 2.26 \text{ mm}$),当镜像的次数 $k = 15$ 时,由(15)式求得的结果与(13)式的相对误差小于 1.5×10^{-15} ,间接地证明了用多重镜像法求解传输线部分电容的正确性。

另外用多重镜像法和有限元方法计算图 2b 所示实际传输线的单位长度电容分别为 $4.21 \times 10^{-15} \text{ F/m}$ 和 $4.5 \times 10^{-15} \text{ F/m}$,其结果是一致的。

多重镜像法在理论上是精确的解析解,不存在计算误差。有限元方法是数值求解方法,显然存在计算误差且涉及大量而复杂的数值计算。

3 结 论

由于 NBI 高压传输线是多层导电壳和一组平行导线组成的系统,其电容难以直接求解且数值方法又涉及大量计算。

根据传输线多层导电壳同轴的特点,采用多重镜像法对一组平行于轴线的导线反复镜像,以确定一系列镜像线电荷的位置。镜像线电荷确定后,通过计算各导体与参考导体之间的电位来确定电位系数,传输线的部分电容则根据电容与电位系数之间的关系求得。计算结果表明,用多重镜像法求解 NBI 高压传输线的部分电容是简单而有效的。

(下转第 1291 页)

5 结束语

USB1.1规范定义的传输速率,全速模式为15 Mb/s,USB2.0规范定义的高速传输模式传输速率为480 Mb/s,USB接口芯片的生产厂家提供的芯片硬件,也是按照USB规范设计和制造的,限于单片机的处理速度,很难使设计出的USB设备与主机的实际通讯速率达到一个理想的值。解决这一问题的方法之一就是使用DSP芯片替换单片机芯片,但随之而来的另一个问题是采用DSP芯片的USB设备开发难度将会更大,开发者要自己开发USB的协议栈和主机端的设备驱动程序。

本文在基于DSP的高速、通用USB通讯系统设计方面作了一定的工作,并用于振动信号采集板的设计并已获得成功。可以相信,随着USB规范的完善和相应芯片技术的逐渐成熟,基于DSP芯片的各种设备将会越来越多。

[参 考 文 献]

[1] 许永和. EZ-USB FX 系列单片机USB 外围设备设计与应用

[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002. 62-80.

- [2] 钱志远. 内置微处理器的USB音频接口芯片TUSB3200[J]. 国外电子元器件,2001,(6):42-43.
- [3] 李照洲,黄俊梅,杨世祖. TMS320VC5410DSP中USB客户驱动程序开发与实现[J]. 计算机应用,2002,22(6):117-119.
- [4] 陶 峻,潘亚涛,陈 健. 基于DSP的USB传输系统实现[J]. 电子技术,2002,(3):56-69.
- [5] 李培育,钱曙光. 基于DSP的USB口数据采集分析系统[J]. 电子技术应用,2002,(11):9-11.
- [6] 胡宏宇,顾越洲,刘 斌. 基于TMS320C55x DSP的USB通讯研究与固件设计[J]. 电测与仪表,2002,39(8):58-60.
- [7] 徐科军,黄云志. 定点DSP的原理、开发与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2002. 10-30.
- [8] Cant C. Windows WDM 设备驱动程序开发指南[M]. 孙义,马利波,国雪飞,等译. 北京:机械工业出版社,2002. 313-352.
- [9] 张惠娟,周利华,翟鸿鸣. Windows 环境下的设备驱动程序设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002. 253-347.

(责任编辑 张秋娟)

(上接第1287页)

[参 考 文 献]

- [1] Liniers M, Alonso J, Laso L M, *et al.* Neutral beam injection system for TJ- I [A]. Beaumont B. Proceedings of the Symposium on Fusion Technology [C]. Amsterdam: Elsevier Science Publication, 1998. 307-310.
- [2] Mondino P L, Bayetti P, Pietro E D, *et al.* ITER neutral beam system[J]. Nuclear Fusion,2000,40(3):501-507.
- [3] Alonso J, Liniers M, Laso L M, *et al.* High voltage power supplies for the neutral beam injectors of the stellarator TJ- I [J]. Fusion Engineering and Design, 2001, 56(2): 693-697.
- [4] Mattoo S K, Chakraborty A K, Baruah U K, *et al.* Engineering design of the steady state neutral beam injector for SST-1[J]. Fusion Engineering and Design, 2001, 56(2): 685-691.
- [5] 王德泰,沈 宁,吴志格,等. HL-1M 中性束注入器快速断电保护器[J]. 核电子学与探测技术,1999,19(5):357-361.
- [6] Fink J H, Baker W R, Owren H M. Analysis and application of a transformer core that acts as an arc snubber[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 1980,8(1): 33-38.
- [7] Baruah U K, Patel P J, Bandyopadhyay M, *et al.* Power

supply system for 1 000 s neutral beam injector[A]. Proceedings of the 17th Symposium Fusion Engineering [C]. Piscataway:IEEE,1998. 1 133-1 136.

- [8] Gavrilakis A, Duffy A P, Hodge K G, *et al.* Partial capacitance calculation for shielded twisted pair cables[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(2):299-302.
- [9] Das B N, Chakraborty S B, Rama Rao K S. Capacitance of transmission line of parallel cylinders in the presence of dielectric coating[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,1995,37(1):94-96.
- [10] Zhang S H. Calculation of the partial capacitance in a system of conductor within the calculable resistor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,1994, 43(6):929-932.
- [11] Gavrilakis A, Asadi M M, Duffy A P, *et al.* Method for prediction of capacitance of shielded transmission lines [J]. Electronics Letters,2001,37(23):1 424-1 425.
- [12] 冯慈璋. 电磁场[M]. 北京:高等教育出版社,1983. 62-65.
- [13] 易正湘. 线电荷在双层圆柱形介质中的电势[J]. 高电压技术,1999,25(3):18-20.

(责任编辑 张 镛)