

高能强流负离子束系统束光学特性的数值模拟

王惠三, 简广德, 周才品

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

摘要: 基于负离子-中性束注入器中强流负离子束引出与加速系统的特点所建立的数值模拟模型和计算程序, 通过数值模拟研究了强流负离子束系统电磁场位形、几何参数、等离子体参数、束流密度和负离子剥离损失对负离子束光学特性的影响。对8电极800keV强流负离子束系统的初步优化结果表明: 对引出流密度为 $21\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 H^- 离子束, 当负离子初始温度为 0.2eV 时, 由系统出射的85%束散角可达到 0.23° 。

关键词: 强流负离子束系统; 数值模拟

中图分类号: TL62⁺91; O523⁺.26

文献标识码: A

1 引言

用大功率高能中性束注入器对大型受控核聚变装置进行等离子体加热、无感电流驱动、电流分布控制和点火是目前研究的主要方面。由于负离子在高能量下仍具有很高的中性转换效率, 发展负离子-中性束注入器已成为必然趋势^[1]。对强流负离子束系统进行数值模拟研究的主要目的就是为以后进行该系统的辅助设计做准备。

由于强流负离子束系统与正离子束系统相比具有不同的特点, 因此该系统的数值模拟与正离子束系统的数值模拟相比, 其物理模型涉及了更多的物理过程: 磁场中的等离子体电子扩散, 负离子和伴随负离子引出的电子在系统电磁场共同作用下的运动以及负离子在输运过程中与其他粒子碰撞的剥离损失等。负离子束系统的数值模拟与正离子束系统的数值模拟相比, 计算程序更为复杂, 增添了更多的内容。

2 数值模拟的物理模型与基本方程

强流负离子束系统的主要特点可归纳为: a 电子伴随负离子一起被引出、加速; b 为提高系统效率, 除改进、优化负离子源以提高负离子产生和生存率并减少伴随引出的电子流外^[2], 还要在系统内加磁场, 将已引出的电子在低能下偏转接收, 通常在低电位($\leq 10\text{kV}$)的引出电

收稿日期: 1999- 09- 29; 修订日期: 2000- 01- 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19685006- 02)

作者简介: 王惠三(1940-), 男, 山东蓬莱人, 研究员, 1965年毕业于清华大学工程物理系, 主要从事离子源、负离子束-中性束物理与技术的研究及相关电物理装置的研制和应用工作。

极内埋置的永久磁铁将电子偏转到作为电子接收极的引出电极上; c 利用与引出电极电位相近的抑制电极吸收来自引出电极的二次电子和束中残存的电子; d 负离子在引出、加速过程中存在与其它粒子碰撞的剥离损失过程; e 由于负离子产生率低, 负离子束系统中的负离子束流密度大大低于常规的正离子束系统中的正离子束流密度(两者相差约一个量级); f 在经改进后的馈钨式“体积”型负离子源中, 负离子的温度很低^[3]($\leq 0.2\text{eV}$), 故负离子束能获得较好的束光学特性。

强流负离子束系统的关键问题在于增大束中负离子/电子的比例, 减少负离子损失, 以提高系统的效率。

对于强流负离子束系统, 除了计算系统的电位分布外, 还要计算其磁场分布, 进而计算电子和负离子束在电磁场共同作用下的轨迹以及它们的空间电荷效应对束光学特性的影响等。因此, 在泊松方程中必须附加电子电荷项并同时求解负离子和电子在电、磁场中的运动方程, 需联立求解的基本方程是:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla^2 \Phi = -(\rho_i + \rho_e)/\epsilon \quad (3)$$

$$d(m_i \mathbf{v}_i)/dt = q_i(\mathbf{v}_i \times \mathbf{B} - \nabla \Phi) \quad (4)$$

$$d(m_e \mathbf{v}_e)/dt = q_e(\mathbf{v}_e \times \mathbf{B} - \nabla \Phi) \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho_i \mathbf{v}_i) = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\rho_e \mathbf{v}_e) = 0 \quad (7)$$

式中, $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量; Φ 为电势; ρ_i 和 ρ_e 分别为负离子和电子电荷密度; m_i 和 m_e 分别为负离子和电子质量; q_i 和 q_e 分别为负离子和电子电荷量; $\mathbf{v}_i$ 和 $\mathbf{v}_e$ 分别为负离子和电子的速度矢量; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢量; ϵ 为介电常数。

为模拟负离子在输运过程中的剥离损失, 还必须对负离子束通过某些区段后的电荷密度 ρ_i 进行修正:

$$\rho_i = \rho_i(1 - F) \quad (8)$$

式中 F 是负离子经过相应区段的损失率。

在正离子、负离子和电子组成中性的离子源等离子体中, 由等离子体-鞘层模型和电子横越磁场通过鞘层的玻姆扩散模型来确定发射初始条件。计算时可发射面分成若干单元, 每单元按离子无规热速度服从有定向漂移速度的麦克斯韦分布, 引出具有不同初始速度方向的数条小束来模拟对负离子温度所表征的初始无规热速度的影响^[4]。

利用三角网格、有限元法解泊松方程, 可以较方便地对复杂电极形状和边界进行处理。磁场分布的计算和优化详见文献[5]。在计算域内的每个小三角网格内, 可利用分析方法通过直接积分求解粒子运动方程(设每个小网格内的电、磁场为常数), 在每个网格内沉积的空间电荷按三角网格单元内角大小分配到各顶点上。经反复迭代计算直到获得电位、电子和负离子轨迹、电子和负离子电荷之间的自洽解。

为了保证在电、磁场中带电粒子轨迹的计算精度, 在计算域内所取网格的线性尺寸 Δx 应满足:

$$\alpha \Delta x / v \ll 1 \quad (9)$$

式中 v 为粒子通过该网格时的速度; $\omega = qB/m$ 是粒子在磁场中回旋运动的圆频率; q 和 m 分别为粒子电荷和质量; B 为磁场强度。

对于同一网格尺寸, 由于电子质量远小于负离子质量, 所以负离子轨迹的计算精度比电子轨迹的更高些。

3 数值模拟的内容和主要结果

3.1 系统磁场位形的优化

通过数值计算对埋置于负离子束系统引出电极内的永磁体的磁场位形进行优化, 使得磁场位形既能有效地将引出的电子偏转到作为电子接收极的引出电极上, 又能尽量减少其对负离子的影响。永久磁铁的磁化方向与束轴平行, 并使其在引出电极口两侧的磁场方向相互反向。对于大面积多孔引出栅, 磁铁极性应沿孔的行列逐行变换。该磁场沿通过引出口中心的系统轴线上的磁场分布如图1所示(图中 x 坐标原点取在距等离子体电极放电室一侧 1cm 处)。由于在等离子体电极一侧磁场扩展到放电室内, 而且存在负离子源放电室的磁过滤器的杂散磁场, 故沿束轴线磁场强度的线积分并不等于零。

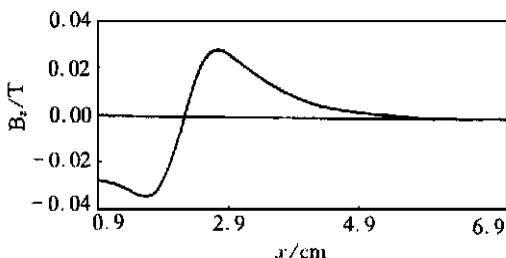


图1 系统轴线上的磁场分布

对于高能多级加速的负离子束系统, 还可在相应的加速极内埋置磁体以随时偏转、接收在各级加速过程中由于负离子剥离而产生的电子。

3.2 系统电场位形的优化

我们研究的 800keV 负离子束系统由等离子体电极、引出电极、电子抑制电极和 5 个加速电极组成, 最末一个电极又称为地电极。各电极电位分别以 $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7, U_8$ 表示。计算域及各电极的几何尺寸如图2所示, 系统的磁场分布如图1所示。设引出的负离子流密度 J_{H^-} 与伴随引出的电子流密度 J_e 均为 $21 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, 即 $J_{H^-} = J_e = 21 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$; 等离子体电子温度 $T_e = 2 \text{ eV}$; 等离子体负离子温度 $T_i = 0.2 \text{ eV}$ 。令 800keV 负离子束系统中各电极电位如下(其余参数不变):

方案1 $U_1 = -800 \text{ kV}, U_2 = -789 \text{ kV}, U_3 = -783 \text{ kV}, U_4 = -660 \text{ kV}, U_5 = -500 \text{ kV}, U_6 = -330 \text{ kV}, U_7 = -165 \text{ kV}, U_8 = 0$;

方案2 $U_1 = -800 \text{ kV}, U_2 = -791 \text{ kV}, U_3 = -791 \text{ kV}, U_4 = -686 \text{ kV}, U_5 = -500 \text{ kV}, U_6 = -330 \text{ kV}, U_7 = -165 \text{ kV}, U_8 = 0$;

方案3 $U_1 = -800 \text{ kV}, U_2 = -789 \text{ kV}, U_3 = -789 \text{ kV}, U_4 = -660 \text{ kV}, U_5 = -530 \text{ kV}, U_6 = -350 \text{ kV}, U_7 = -175 \text{ kV}, U_8 = 0$ 。

对上述方案进行数值模拟得到的 H^- 束(指单孔 H^- 出射束, 下同)在出射面处的主要参数列于表1中。

表 1 系统电场位形对 H^- 离子束轨迹的影响

方案序号	束出射宽度 $\Delta y/\text{cm}$	各小束均方根发散角 α°	85% 束发散角 β°	发散角 $< 1^\circ$ 的束比例 $\eta/\%$
1	0.2563	0.1591	0.2344	100
2	0.7940	0.5132	0.6680	93
3	0.8888	0.6437	0.7628	88

由表 1 可见,因各电极电位的改变造成的引出电场及各加速电场相应电极孔透镜效应的变化,对 H^- 离子束的输运行为有着重要的影响.在方案 1 的电场位形下可获得最小的束发散,图 2 给出了在该参数下 H^- 离子束和电子束的二维轨迹.

对处于同样磁场位形下的 5 电极 300keV 系统的电场位形($U_1 = -300\text{kV}$ 、 $U_2 = -289\text{kV}$ 、 $U_3 = -283\text{kV}$ 、 $U_4 = -160\text{kV}$ 、 $U_5 = 0\text{kV}$)也进行了优化^[6].表 2 给出了初步优化的 300keV 和 800keV 两种系统的 H^- 离子出射束光学参数的比较.

可以看出,对于多级加速系统,通过调节各级加速电场可使束光学特性更趋于良好,明确显示出各加速电极的透镜作用.

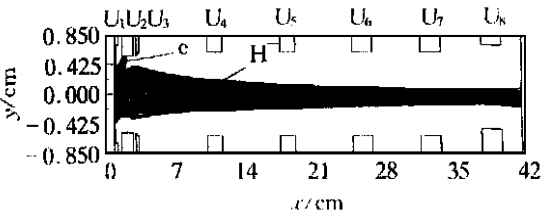


图 2 初步优化的 8 电极 800keV 负离子束系统中的 H^- 离子、电子束轨迹

$U_1 = -800\text{kV}, U_2 = -789\text{kV}, U_3 = -783\text{kV},$
 $U_4 = -660\text{kV}, U_5 = -500\text{kV}, U_6 = -330\text{kV}, U_7 =$
 $-135\text{kV}, U_8 = 0, J_{H^-} = J_e = 21\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}.$

表 2 5 电极 300keV 系统与 8 电极 800keV 系统的 H^- 离子出射束参数的比较

系统类别	出射束中心位置 y_0/cm	出射束宽度 $\Delta y/\text{cm}$	各小束均方根散角 α°	85% 束散角 β°	最大束散角 $\alpha_{\text{max}}/\circ$
300keV	- 0.0354	0.3257	0.2204	0.3132	0.5499
800keV	- 0.0363	0.2563	0.1591	0.2344	0.5306

3.3 与系统匹配的最佳负离子流密度

利用 800keV 系统方案 1 的参数,仅使负离子束流密度 J_{H^-} 变化时,由数值计算得到的出射束宽度 Δy 和 85% 束散角 β 的变化如图 3 所示.

图 3 表明,当系统的电、磁场位形确定之后,存在一个与之相匹配的最佳束流密度,在该束流密度下运行可获得好的束光学特性.图 4 和图 5 分别给出在方案 1 的参数下仅将引出束流密度 J_{H^-} 改为 $12.6\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $31.5\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时 H^- 束的二维轨迹.与系统参数相同,但仅引出流密度 $J_{H^-} = 21\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的如图 2 所示的 H^- 离子束二维轨迹相对照,可明显看到在低束流密度下束的过聚交叉和过高束流密度下束的扩张.

能量不同的系统均有此特性,只是系统束光学性能对流密度变化的敏感程度不同而已.

3.4 伴随引出的电子流密度的变化对 H^- 离子束光学特性的影响

5 电极 300keV 系统和 8 电极 800keV 系统的数值计算结果均表明, 伴随引出的电子流密度的变化对 H^- 离子束轨迹的影响远小于同量级的 H^- 离子流密度对 H^- 离子束轨迹的影响。例如, 对于 8 电极 800keV 系统, 令伴随引出的电子流密度增加 1 倍(即由 $21\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增加为 $42\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$), 其它参数同方案 1 时, 由数值计算得到的 H^- 出射束的均方根角度仅变化了约 0.01 度。

3.5 在输运过程中负离子的剥离损失对束光学特性的影响

负离子在引出与加速过程中主要由于与系统内残余气体粒子碰撞被剥离掉电子而受到损失, 从而造成负离子束在输运过程中空间电荷密度发生变化, 其束光学特性亦必然受到影响。数值计算结果表明, 随剥离损失的增加, 出射 H^- 离子束的宽度和散角均发生变化。对于图 2 所示的系统, 当令负离子通过引出电极处的剥离损失为 20% 时, H^- 离子出射束宽度和 85% 束散角均变化了约 30%。

3.6 末电极孔位移对束的调整作用

利用末电极孔(缝)相对于系统轴线的位移来调节出射束, 以补偿磁场对负离子束的作用并实现大面积多孔小束的会聚。计算表明, 由于末电极位移引起的出射束的偏转方向与位移方向相反, 出射束的散角亦随之发生相应变化。

此外, 数值计算也表明, 等离子体电极极口边缘几何形状直接影响等离子体边界附近的电位分布, 这对于初始发射的能量很低的离子束(特别是极口边缘小束)影响很大, 从而也影响了出射束的光学特性。

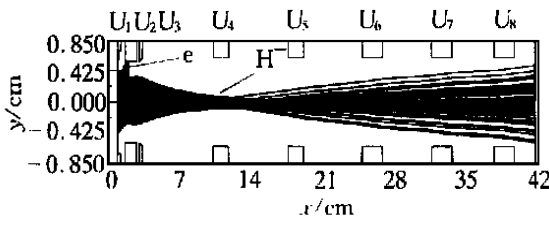


图 4 对于 8 电极 800keV 系统, $J_{H^-} = 12.6\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的 H^- 束轨迹
各电极电位同图 2, $J_e = 21\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

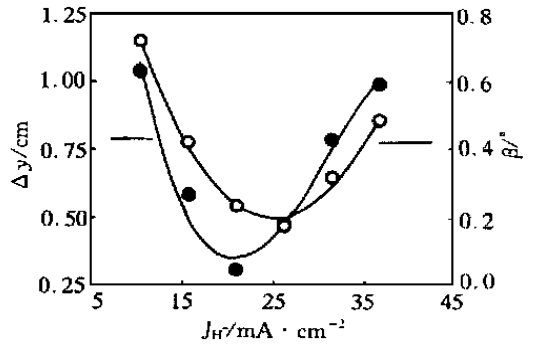


图 3 束流密度 J_{H^-} 的变化对出射束宽度 Δy 和 85% 束散角 β 的影响
各电极电位同图 2, $J_e = 21\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

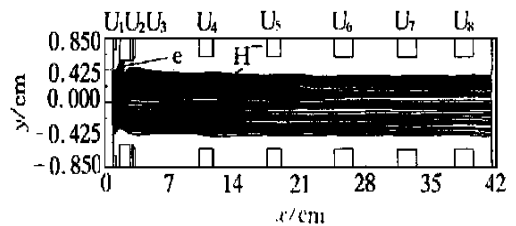


图 5 对于 8 电极 800keV 系统, $J_{H^-} = 31.5\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的 H^- 束轨迹
各电极电位同图 2, $J_e = 21\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

由于“体积”型负离子源负离子初始温度通常 $\leq 0.2\text{eV}$, 因此负离子初始温度所表征的负离子初始无规热速度对束流的光学特性影响不大, 这与数值计算结果一致。这也是负离子束系统可以做到比正离子束系统束流发散更小的原因之一。

4 讨论

负离子束系统中负离子束的最终偏转, 是由磁场的偏转作用以及由于磁场使束轴相对于各电极孔中心的偏移而导致束在电极口两侧经历的透镜效应引起的偏转作用共同造成的。因此, 即使在同一磁场位形下, 负离子能量和经历的输运过程不同也将造成出射束的不同偏移。

同样, 也可通过末电极的孔(缝)位移来控制出射束的偏转。末电极孔(缝)位移的作用原理实际就是利用了束轴相对于电极口中心的偏离所产生的透镜作用造成对束轨迹的调整。系统的能量较高时, 则需要更大的末电极口位移才能达到同样的出射束调整效果。这可由末电极口位移造成的束偏转角 θ 与束能量关系的分析表达式得到解释^[8]:

$$\theta = (E_{\text{acc}}/4W_b)\delta \quad (10)$$

式中 E_{acc} 为末电极加速电场强度; W_b 为束最终能量; δ 为末电极口相对位移。上述分析已由前面的数值计算结果得到证实, 国外文献亦有类似报导^[7,8]。

离子束系统引出间隙电场强度的变化不仅造成引出电极口透镜效应的改变, 对于确定的等离子体参数, 引出电场的变化也使离子发射面位形产生变化, 这两种因素均对束的光学特性有影响。

负离子在系统内经行程 x 后, 与系统残存的中性气体粒子碰撞造成的损失率 F 可表达为:

$$F = 1 - \exp\left[-\int \sigma_{\text{st}} n_0(x) dx\right] \quad (11)$$

式中 σ_{st} 为负离子剥离截面; n_0 为中性原子密度。

当设定系统引出间隙气压为 $p = 0.3\text{Pa}$, 按能量为 10keV 的负离子的剥离截面 $\sigma_{\text{st}} \approx 10^{15}\text{cm}^2$ 计, 则经过长 3.4cm 的引出区后可近似估计剥离损失率 $F \approx 24\%$ 。为减小负离子剥离损失, 使系统处于较高的真空状态是非常关键的。

由于电子质量远小于离子质量, 电子束空间电荷效应比束流密度处于同一量级的负离子束中的空间电荷效应要弱得多, 但处于磁场中的等离子体电子的扩散作用对等离子体鞘层的影响以及由此引起的束特性的变化却往往不能忽略^[9]。

利用简化的二维程序可以更为快捷地对负离子束系统进行初步优化, 提出可供比较选择的方案, 用三维程序可以更精确地模拟一些由系统横向磁场引起的非对称性等离子体鞘层畸变等三维现象, 以及电子和离子的三维运动。可以说, 二维程序与三维程序是用于对负离子束系统束光学特性进行数值模拟的互补手段。

强流负离子束系统的数值模拟工作虽已取得很大进展, 但其物理模型, 特别是对处于磁场中的负离子源等离子体特性的描述仍有待进一步完善。

参考文献

- [1] Kyriyama M, Akino N, Arai M, et al High Energy Negative Ion-Based Neutral Beam Injection System for JT-60U [J]. Fusion Engin. and Design, 1995, 26: 445.
- [2] Kuroda T. Development of High Current Negative Ion Source [J]. Fusion Engin. and Design, 1997, 36: 143.
- [3] Okumura Y, Fujiwara F, Inoue T, et al High Power Negative Ion Source for Fusion at the JAERI [J]. Rev. Sci. Instrum., 1996, 67(3): 1092.
- [4] 王惠三, 简广德, 姜韶凤. HL-2 中性束注入器离子束系统的设计计算 [R]. 中国核科技报告, CN IC-01051 SIP-0089. 北京: 中国核情报中心. 1996.
- [5] 简广德, 王惠三. 强流负离子束系统中电子偏转磁场分布的计算 [R]. 核工业西南物理研究院年报, CN IC-01375 SW IP/AR(ZH)-001. 北京: 中国核情报中心, 1998. 80.
- [6] 王惠三, 简广德. 300keV、5 电极负离子束系统的数值模拟研究 [R]. 中国核科技报告, CN IC-01364 SIP-0115. 北京: 中国核情报中心, 1998.
- [7] Takeiri Y, Kaneko O, Oka Y, et al Multibeamlet Focusing of Intense Negative Ion Beam by an Aperture Displacement Technique [J]. Rev. Sci. Instrum., 1995, 66(11): 1144.
- [8] Tanaka M, Ose Y, Koizumi M, et al Three-Dimensional Analysis of Ion Beam Deflection by the Magnetic Field at H⁻ Ion Source for Negative Ion-Based Neutral Beam Injection [J]. Rev. Sci. Instrum., 1998, 69(2): 5326.
- [9] Pamela J. A Model for Negative Ion Extraction and Comparison of Negative Ion Optics Calculation to Experimental Results [J]. Rev. Sci. Instrum., 1991, 62(5): 1163.

NUMERICAL SIMULATION OF THE BEAM OPTICS CHARACTERISTICS IN A HIGH ENERGY AND HIGH CURRENT NEGATIVE ION BEAM SYSTEM

WANG Hui-san, JIAN Guang-de, ZHOU Cair-pin
(Southwestern Institute of Physics, Changdu 610041)

Abstract: According to the characteristics of high current negative ion beam extraction and acceleration system in the negative ion-based neutral beam injector, a numerical simulation model and calculation code for the negative ion beam system are established. The effects of electromagnetic field configuration, geometry, plasma parameters, beam density, and negative ion stripping losses on the negative ion beam characteristics are investigated. The initial optimized results of the 800keV negative ion beam system with 8 electrodes show that the magnetic field of this system can deflect the extracted electron beam to the extraction electrode as an electron acceptor at lower energy, and assuming that extracted H⁻ negative ion beam density is 21mA/cm² and H⁻ initial temperature is 0.2eV, divergence angle of 85% output beamlets is 0.234°.

Key words: High current negative ion beam system; Numerical simulation