



·粒子束及加速器技术·

非理想氢原子束真空环境长程传输模拟研究^{*}

石俊杰¹, 郝建红¹, 张芳², 赵强², 范杰清¹, 沈硕¹, 董志伟²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘 要: 模拟研究了非理想氢原子束在真空环境下的长程传输效应。根据中性化程度的不同, 将非理想束分为欠中性束和过中性束。通过建立束流传输的准电磁模型, 研究了束流密度、中性化因子、空间磁场和弹性散射等因素对非理想氢原子束的影响。结果表明: 对于欠中性束, 负氢离子的存在对氢原子的传输几乎没有影响, 因此欠中性束的发射装置可以考虑去除偏置磁场, 以减小设备体积和质量; 对于过中性束, 束流损失率与束流密度和中性化因子有关, 即束流密度越大, 束流损失越大; 中性化因子越高, 束流损失就越高; 而无论是欠中性束还是过中性束, 空间磁场和粒子间的弹性散射对其传输都没有影响。

关键词: 非理想束; 长程传输; 束流密度; 中性化因子; 束流损失率

中图分类号: O46

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220123

Simulation of long-range transport of non-ideal hydrogen atom beams in vacuum environment

Shi Junjie¹, Hao Jianhong¹, Zhang Fang², Zhao Qiang², Fan Jieqing¹, Shen Shuo¹, Dong Zhiwei²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: Neutral beam has potential applications in space debris cleanup and space exploration. As that neutral beam prepared by ion source is not ideal in practice, this paper simulates the long-range transmission effect of non-ideal hydrogen beam in vacuum environment. According to the degree of neutralization, non-ideal beams are divided into under-neutral beams and over-neutral beams. The effects of beam density, neutralization factor, spatial magnetic field and elastic scattering on the nonideal hydrogen beam are studied by establishing a quasi-electromagnetic model of beam transmission. The results show that the presence of negative hydrogen ions has no effect on the transmission of hydrogen atoms in the under-neutral beam, thus the bias magnetic field can be removed to reduce the volume and mass of the device. For the over-neutral beam, the loss ratio is related to the beam density and neutralization factor, that is, the higher the beam density, the greater the beam loss; the higher the neutralization factor, the higher the beam loss. The magnetic field and the elastic scattering between particles have no effect on the propagation of either the under-neutral or over-neutral beams.

Key words: non-ideal beam, long-range transmission, beam current density, neutralization factor, beam loss ratio

随着太空垃圾的日益增长和粒子束发射与传输技术的不断发展, 近几年业内不断提出了通过粒子束清除太空垃圾的方案和设想。Shoji 等人提出了利用离子束辐照的推力将大型空间碎片物体推离地球轨道的设想, 并对该设想进行了数值和实验研究^[1]。Bombardelli 等人提出了使用离子束进行非接触式碎片清理的方案, 并对该方案的可行性、预期性能及其主要技术挑战进行了分析^[2]。马晓刚对离子束建模、卫星清除碎片时的在轨控制等问题展开了研究^[3]。由于离子束在真空中传输时易发散, 而理想状态下的中性束不含其他杂质离子, 在真空中传输时不存在空间电荷效应导致的束流发散, 具有准直好、易传输等优点, 因此有望通过发射高能中性束轰击太空垃圾, 达

* 收稿日期: 2022-04-25; 修订日期: 2022-08-29

基金项目: 高功率微波技术重点实验室基金项目 (6142605200301)

联系方式: 石俊杰, 15166737937@163.com。

通信作者: 郝建红, jianhonghao@ncepu.edu.cn。

到清理太空垃圾、释放轨道资源的目的。在以往对中性束的研究中,通常聚焦在惯性约束核聚变实验中将中性束注入作为一种提高等离子体温度的辅助加热手段来研究^[4-6],鲜有对中性束传输特性的研究。然而将粒子束应用到空间碎片的清理时,需要对束流传输问题进行深入研究。因此,基于未来中性束对太空垃圾的清理作用以及在太空探索中的潜在应用价值,对于中性束在真空环境下的长程传输的研究是十分必要的。考虑到在实际中,产生中性束的过程中必然会伴随其他粒子的产生,例如使用负氢离子源产生的中性氢原子束中必然会带有负氢离子,甚至会有氢离子的存在,因此,对非理想状态下的氢原子束在空间环境下的长程传输特性进行研究是有意义且十分必要的一项工作。基于此,本文模拟研究了非理想氢原子束在真空环境下的长程传输效应,通过建立束流传输的准电磁模型,研究了束流密度、中性化因子、空间磁场和弹性散射等因素对非理想氢原子束的影响。

1 非理想氢原子束的产生和传输模型构建

1.1 非理想氢原子束的产生

由于中性束可以携带巨大能量直接进入磁约束区域,实现热核聚变的反应物质和部分反应能量注入,因而氢原子束通常被应用在热核聚变的技术上。产生中性束的方法主要有两种^[7-10]:(1)正离子束通过靶物质捕获电子产生中性束;(2)负离子束通过靶物质被剥离出电子从而形成中性束。由于负氢离子更容易失去一个电子成为氢原子,其中性化率高于氢离子的中性化率,尤其在离子能量大于 100 keV 时,其中性化率远远高于氢离子^[11-12],因此目前主要通过负氢离子束制备中性束。

负氢离子束的中性化方案包括薄膜中性化和气室中性化两种,但由于薄膜的损耗较大、寿命较短,因此现在一般采用气室中性化方案^[13-14]。如图 1 所示,气室中性化方案的主要装置包括离子源、加速电极、中性化室和偏转磁场。首先从离子源引出负氢离子束并通过加速电极对其进行加速,经过加速后的高能负氢离子经过中性化室,与背景气体发生电荷交换、负离子的解离等反应后变成中性氢原子束。此时出射的氢原子束中可能会存在大量的杂质离子,如未反应的负氢离子、氢原子与背景气体碰撞电离产生的氢离子。在热核聚变中,因为需要纯净的中性束注入,所以会将中性化后的束流射入偏置磁场中,去除束内的带电粒子。

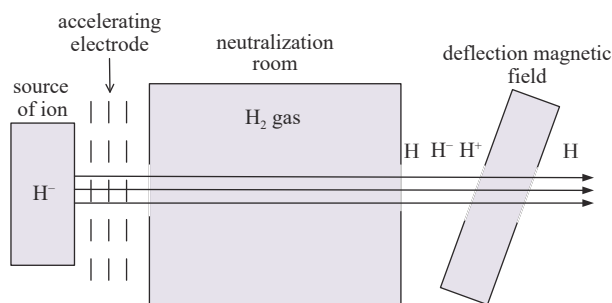


Fig. 1 Schematic diagram of neutral beam generation

图 1 中性束产生示意图

从利用氢原子束清除空间碎片的潜在应用考虑,将氢原子束发射装置布置在太空中时,多增加一个偏置磁场,会增大束流发射设备的体积、质量以及能源的消耗。因此,从氢原子束制备和基于天基的氢原子束发射装置紧凑型两个方面考虑,氢原子束的不纯净性是否会对其空间传输产生影响有待研究和探索。综上,本文对非理想氢原子束进行了真空环境下长程传输的模拟研究。

1.2 传输模型构建

由于 PIC 方法计算的是粒子束传输的整体运动特征,难以反映粒子间相互作用,而束流传输问题中粒子间相互作用极其重要,同时 MC(Monte Carlo)方法可以实现粒子间的相互作用,因此本文采用 PIC-MCC 方法 (Particle In Cell with Monte Carlo collision) 构建了非理想氢原子束在真空环境下的传输模型^[15]。首先,非理想氢原子束采用 2D3V(空间二维,速度三维)的片状束模型,如图 2 所示,其中 x 轴为氢原子束传输方向, y 轴为氢原子束的径向, z 轴为空间磁场方向。其次,由于非理想氢原子束在真空中传输时会产生自生电场和感生磁场,但若直接使用 PIC 电磁模型,非理想氢原子束长程传输时激发的电磁振荡和高频噪声等干扰会对传输结果计算造成极大影响,因此本文选择“准电磁模型”来替代电磁模型^[16-17]。该模型在利用静电模型计算束流自生电场的基础上,结合麦克斯韦方程,实现了电磁场对束流传输的综合影响,并有效的降低了电磁干扰。最后,在本文的传输模型中使用 MC 方法,设置了粒子碰撞模型。在该碰撞模型中,非理想氢原子束以一定能量和速度从源中射出,当其在真

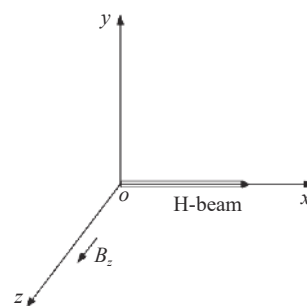
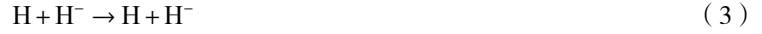


Fig. 2 Transport model of non-ideal hydrogen beam

图 2 非理想氢原子束的传输模型^[18]

真

空环境中传输时,束内粒子间复杂的非弹性散射和弹性散射造成束流损失,主要反应式为



式(1)、(2)表示负氢离子与氢原子、氢离子与氢原子间的电荷交换反应;式(3)~(5)表示氢原子与负氢离子、氢原子与氢离子、负氢离子与氢离子间的弹性碰撞;式(6)表示氢原子与负氢离子(或氢离子)间的碰撞电离反应。欠中性束传输时,束内主要发生的反应为(1)、(3)、(6);而在过中性束中主要发生的反应为(1)~(6)。

在本文的模拟仿真中,首先设置“宏粒子”代替非理想氢原子束中的真实粒子,每个宏粒子包含 3.68×10^{10} 个真实粒子,并在空间划分出计算网格,网格尺寸为 $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$,在网格上定义电磁场。粒子从长度为 12.5 cm 的线源中射出,每个时间步长发射 240 个宏粒子,时间步长为 $4.24 \times 10^{-10} \text{ s}$ 。当粒子在真空中传输时,粒子间会发生各种相互作用,这可能会改变空间电磁场以及粒子的种类和状态,因此每个时间步长都会计算当前的粒子信息和空间电磁场信息,以保证计算的准确性。由于束流传输距离较大,且计算更多关注的是束头部分,因此为保证较高的计算精度与效率,在传输模型中引入了移动窗技术。在移动窗模拟区域的设置上,上下边界使用吸收边界,可以吸收到达该边界的所有粒子,高度为 7.5 m ;左右边界使用粒子可以穿过的边界,长度为 32 m ;窗体的移动速度与束流传输速度保持相同。

本文使用的 PIC-MCC 模拟方法和传输模型与文献 [18] 中一致,该方法计算结果的合理性与准确性已得到可靠的验证。

2 非理想氢原子束真空环境长程传输模拟

由于目前氢原子束大多是由负氢离子中性化产生,通常中性化率未达 100%,因此产生的氢原子束中会存在负氢离子。当这种非理想氢原子束在真空中传输时,束流的空间电荷效应以及粒子间碰撞电离、电荷交换等作用将影响束流的传输特性。当中性化程度较低时,氢原子束内会存在较多的负氢离子,本文将这种情况称为欠中性化;当中性化程度过高时,束流内将同时有氢离子和负氢离子的存在,因此将这种情况称为过中性化。为对过/欠中性化的程度进行描述,定义中性化因子 η_- 和 η_+ 分别为束流内负氢离子和氢离子与氢原子的比值为

$$\begin{cases} \eta_- = n_{\text{H}^-} / n_{\text{H}} \\ \eta_+ = n_{\text{H}^+} / n_{\text{H}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: n_{H^-} 、 n_{H^+} 、 n_{H} 分别为负氢离子、氢离子和氢原子的密度。由于欠中性束中的非理想离子仅有负氢离子,因此用 η_- 就可以描述其欠中性化的程度;而过中性束中同时存在负氢离子和氢离子,因此需要 η_- 和 η_+ 来描述其过中性化的程度。为了更清楚的展示束流非理想因素对束流传输的影响,定义束流损失率 ρ 来衡量束流的传输效率

$$\rho = 1 - n_t / n_0 \quad (8)$$

式中: n_t 为 t 时刻氢原子密度; n_0 为初始时刻氢原子密度。

2.1 欠中性化束真空环境传输模拟

考虑到目前中性化技术水平,负氢离子的中性化效率通常在 50%~80% 之内,为了使仿真尽可能符合实际工程,取中性化因子 $\eta_- = 0.3$,初始氢原子束密度为 $1.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ 。为了体现空间磁场对欠中性束传输特性的影响,分别对有无磁场情况进行模拟仿真。图 3 为无磁场影响时,能量分别为 1 MeV 、 10 MeV 和 100 MeV 的欠中性化束真空传输时的运动特征和分布,由图可见,欠中性束中的负氢离子由于空间电荷效应,在传输过程中逐渐发散,且束流能量越高,空间电荷效应越弱,负氢离子的发散程度越低,伴随束流传输的距离越远。

对能量为 100 MeV 、中性化因子分别为 $\eta_- = 0.1$ 、 0.2 、 0.3 的欠中性束进行模拟计算,得到了中性化因子不同时束流损失率与传输距离的关系,如图 4 所示。当 η_- 增加时,欠中性束中负氢离子增多,离子与氢原子间相互作用次数增加,造成束流内氢原子损失增多,因此束流损失率随着中性化因子的增大而略微增加,但从图中可以看出当 $\eta_- = 0.1$ 时,束流几乎没有损失;当 $\eta_- = 0.3$ 时,束流损失率最高不超过 0.01。即在欠中性化情况下,中性化因子变化

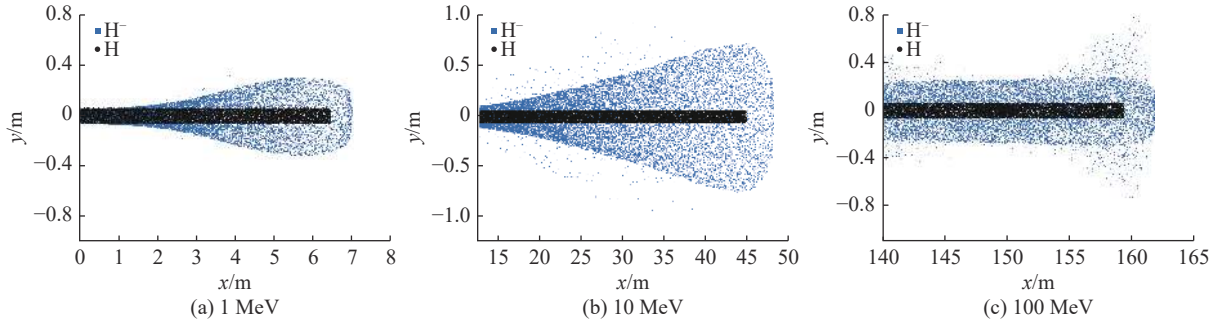


Fig. 3 Distribution of under-neutralized beams of different energies transmitted to a certain moment in the absence of magnetic field

图 3 无磁场时不同能量的欠中性束传输至某时刻的分布

对束流损失的影响微乎其微,因此可以认为欠中性束中负氢离子的存在不会造成氢原子的损失,对束流传输几乎没有影响。

图 5 为添加垂直于束流传输方向、大小为 $B_z = 8.0 \times 10^{-6}$ T 的磁场后,能量为 100 MeV 的欠中性束真空传输时的运动特征和分布。可见,负氢离子伴随束流传输时受到空间磁场的影响,在发散的同时整体向上发生偏转。但磁场仅对负氢离子的偏转产生影响,未对负氢离子的发散半径和与氢原子间的相互作用产生明显影响,也就是说磁场对欠中性束的传输几乎没有影响。

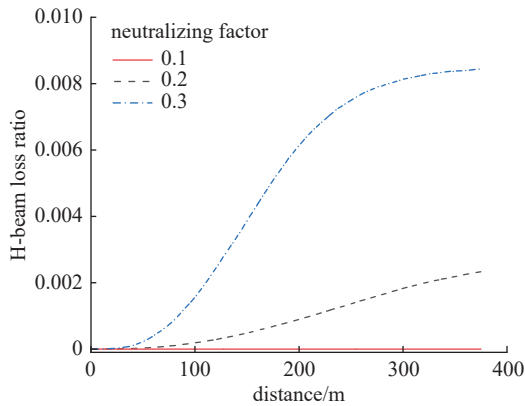


Fig. 4 Effects of neutralizing factor on beam transport of under-neutral beam

图 4 中性化因子对欠中性束束流传输的影响

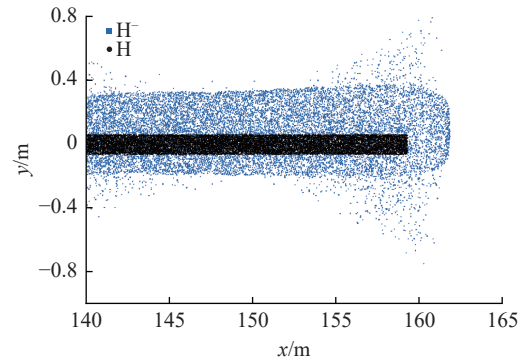


Fig. 5 Distribution of 100 MeV transmitted to a certain moment in the presence of magnetic field

图 5 能量为 100 MeV 的欠中性束束流传输分布

结合上述模拟实验结果可知,欠中性化氢原子束在真空环境下长程传输的过程中,束流内的负氢离子对氢原子的传输几乎没有影响。因此,当氢原子束发射装置布置在空间环境中,在确定离子束出中性化室后为欠中性化状态时,氢原子束发射装置可以去掉偏置磁场室,以减轻设备质量,减小设备体积。

2.2 过中性化束真空环境传输模拟

取中性化因子 $\eta_- = \eta_+ = 0.3$, 初始氢原子束密度为 $1.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$, 暂不考虑空间磁场的影响,对能量为 100 MeV 的过中性化束真空传输时的运动特征和分布进行模拟分析,结果如图 6 所示。

图 6 中蓝色粒子为负氢离子,黑色粒子为氢原子,红色粒子为氢离子。由于负氢离子和氢离子传输时径向速度的微小扰动,过中性束在传输过程中会形成垂直于传输方向的极化电场,在极化电场的作用下,负氢离子与氢离子不停地穿过氢原子束,出现了纵向的振荡现象,其中束头位置现象最为明显。这种振荡使束内带电粒子与氢原子之间发生碰撞电离、电荷交换等作用,由此造成束流损失,如图 7 所示,过中性束的束流损失率随着传输距离的增加而升高。考虑到弹性碰撞对束流传输的影响,在过中性束的传输过程中设置了氢原子与负氢离子、氢原子与氢离子、氢离子与负氢离子间的弹性碰撞,结果如图 7 所示,粒子间的弹性碰撞对束流传输基本没有影响。

为探究束流密度对过中性束传输的影响,令束流的中性化因子为 $\eta_- = \eta_+ = 0.3$, 对初始氢原子密度分别为 $1.0 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ 、 $5.0 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ 和 $1.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ 的过中性束,模拟计算得到了束流密度不同时束流损失率与传输距离的关系,如图 8 所示。从图中可以看到,在中性化因子一定时,过中性束的束流损失率随初始束密度的增大而增大。过中性束在真空中传输时,束密度越大,带电粒子对束流的作用就越强,束流损失率变化就越快,其曲线越陡峭。当

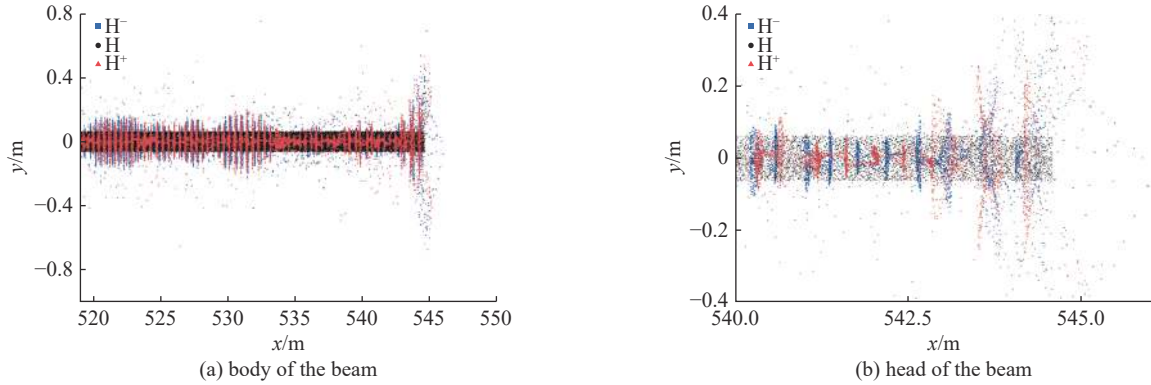


Fig. 6 Distribution of the 100 MeV over-neutralized beam at a certain time

图 6 某时刻 100 MeV 过中性化束的分布

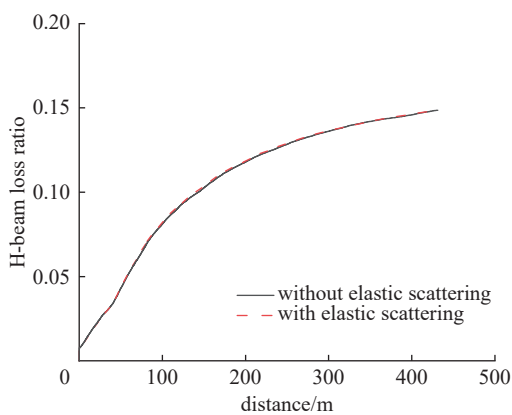


Fig. 7 Effects of elastic scattering on beam transmission

图 7 弹性散射对束流传输的影响

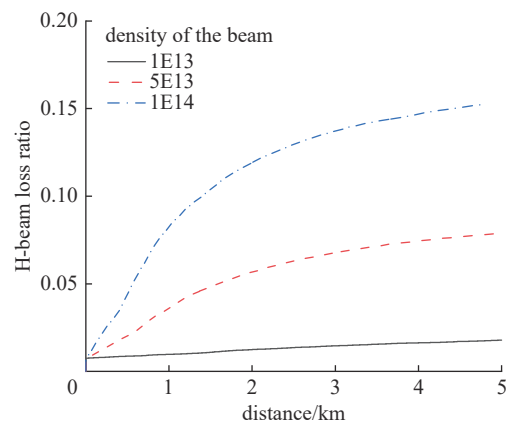


Fig. 8 Effects of beam density on beam transport

图 8 束流密度对束流传输的影响

束流传输一段距离后，负氢离子与氢离子挣脱极化电场的束缚，脱离过中性束发散到周围空间，因此束流损失率趋于稳定，基本不再变化。

保持初始束密度为 $1.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ 不变，分别对 $\eta_- = \eta_+ = 0.1, 0.2, 0.3$ 的过中性化束进行模拟计算，得到了中性化因子不同时束流损失率与传输距离的关系，结果如图 9 所示。在保持束密度不变的情况下，中性化因子越高，束内粒子间的碰撞电离、电荷交换等作用越强，因此束流损失率随着中性化因子的增大而增大。

束流在真空中传输时可能会受到磁场的影响，因此对束密度为 $1.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ 的过中性化束在不同磁场环境下进行真空传输的模拟研究，结果如图 10 所示。在不同磁场环境下，束流损失率变化基本一致，说明过中性化束在真空中传输时，束内带电粒子对氢原子束的损耗与磁场大小几乎无关。

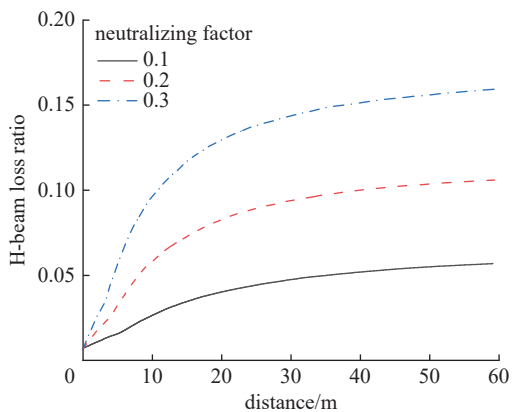


Fig. 9 Effects of neutralizing factor on beam transport of over-neutral beam

图 9 中性化因子对过中性束束流传输的影响

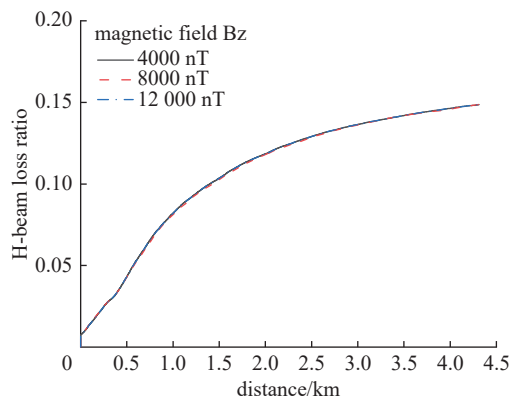


Fig. 10 Effects of magnetic fields on beam transport

图 10 磁场对束流传输的影响

3 结 论

从氢原子制备和基于天基粒子束发射装置的紧凑型考虑,从理论上探索和研究非理想氢原子束的空间长程传输特性十分必要。本文采用了 PIC-MCC 方法,结合移动窗技术,通过构建非理想氢原子束在真空下的准电磁传输模型,实现了欠中性束和过中性束公里级的传输模拟。模拟研究结果表明:(1)欠中性束在真空中传输时,束流内的负氢离子由于空间电荷效应在较短距离内弥散到周围空间中,基本不影响束流的传输,也几乎不会对束流造成损耗。因此,基于天基的欠中性束发射装置可以考虑去掉磁场偏置室,以减小设备体积和质量;(2)过中性束在真空中传输时,束流内负氢离子和氢离子形成纵向的极化电场,使负氢离子和氢离子在束流内来回穿梭,形成一种振荡传输的状态,这会对束流的传输造成损耗。当中性化因子一定时,束流密度越高,束内带电粒子与氢原子间的碰撞电离、电荷交换等作用越强,在传输时对束流造成的损耗越大。当过中性束的束密度一定时,中性化因子越高,束内带电粒子与氢原子间的作用越强,因此束流长程传输时的损耗越大;(3)当非理想氢原子束传输距离较远时,束内带电粒子发散到周围空间,不再对束流传输产生影响,此时束流损失趋于稳定,同时空间磁场和粒子间的弹性散射对束流传输没有影响。由于仅有束内粒子间碰撞电离、电荷交换等作用会造成束流损失,因此可以说非理想氢原子束在真空中传输时的损耗主要只与其束流密度和中性化因子有关。

参考文献:

- [1] Kitamura S, Hayakawa Y, Kawamoto S. A reorbiter for large GEO debris objects using ion beam irradiation[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 94(2): 725-735.
- [2] Bombardelli C, Peláez J. Ion beam shepherd for contactless space debris removal[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2011, 34(3): 916-920.
- [3] 马晓刚. 基于离子束的非接触式空间碎片清除方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. (Ma Xiaogang. A study of contactless space debris removal based on ion-beam-propelled method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017)
- [4] 侯伟. 中性束加热等离子体数值模拟研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2013. (Hou Wei. Numerical simulation of neutral beam heated plasma[D]. Hengyang: University of South China, 2013)
- [5] 谢亚红, 胡纯栋, 韦江龙, 等. CFETR中性束注入系统负离子束源概念设计[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2021, 41(4): 628-634. (Xie Yahong, Hu Chundong, Wei Jianglong, et al. Conceptual design of negative ion based beam source for CFETR neutral beam injector[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2021, 41(4): 628-634)
- [6] 胡立群, 张晓东, 姚若河. EAST托卡马克的中性束注入方案[J]. *核技术*, 2006, 29(2): 149-152. (Hu Liqun, Zhang Xiaodong, Yao Ruohu. EAST neutral beam injection project for EAST Tokamak[J]. *Nuclear Techniques*, 2006, 29(2): 149-152)
- [7] Jason A J, Hudgings D W, Van Dyck O B. Neutralization of H⁻ beams by magnetic stripping[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1981, 28(3): 2703-2706.
- [8] Hayashi K, Tanaka D, Araki H, et al. *In situ* spatial-profile monitoring of beam flux of neutral free radicals produced by photo-deionization of negative ion beams[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(24): 9581-9584.
- [9] Lee C H, Chang D S, Oh B H, et al. Hydrogen beam extraction of penning ion source for compact neutron generator[C]//2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD). IEEE, 2016: 1-3.
- [10] Dimov G I, Roslyakov G V. Conversion of a beam of negative hydrogen ions to atomic hydrogen in a plasma target at energies between 0.5 and 1 MeV[J]. *Nuclear Fusion*, 1975, 15(3): 551-553.
- [11] Tanaka M, Takeiri Y, Asano E, et al. Production of high-current large-area H⁻ beams by a bucket-type ion source equipped with a magnetic filter[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1997, 25(6): 1412-1418.
- [12] 易书卷, 陈开芹, 蒋文, 等. 剥离氢负离子获得中性束[J]. *核聚变与等离子体物理*, 1983, 3(3): 166-169. (Yi Shujuan, Chen Kaiqin, Jiang Wen, et al. The neutral beam obtained by stripping H⁻ ions[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 1983, 3(3): 166-169)
- [13] 吴青峰, 陈银宝, 王修龙, 等. 粒子束中性化方案研究[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2003: 85. (Wu Qingfeng, Chen Yinbao, Wang Xiulong, et al. Study on neutralization scheme of particle beam[J]. *Annual Report of China Institute of Atomic Energy*, 2003: 85)
- [14] 易书卷, 蒋文, 李华君. 氢离子束通过气体靶获得中性束的实验结果[J]. *核聚变与等离子体物理*, 1981, 1(2): 103-106. (Yi Shujuan, Jiang Wen, Li Huajun. Experimental results on atomic hydrogen beams produced by hydrogen ions passing through gaseous targets[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 1981, 1(2): 103-106)
- [15] Birdsall C K. Particle-in-cell charged-particle simulations, plus Monte Carlo collisions with neutral atoms, PIC-MCC[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1991, 19(2): 65-85.
- [16] 郝建红, 王希, 张芳, 等. 随移动窗推进的带电粒子束团长程传输模拟分析[J]. *国防科技大学学报*, 2021, 43(5): 168-174. (Hao Jianhong, Wang Xi, Zhang Fang, et al. Simulation analysis of long-range propagation of charged particle beams propelled by moving window[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(5): 168-174)
- [17] Zhou Jun, Liu Dagang, Liao Chen, et al. CHIPIC: an efficient code for electromagnetic PIC modeling and simulation[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(10): 2002-2011.
- [18] 沈硕, 郝建红, 张芳, 等. 氢原子束在大气长程传输中自剥离效应研究[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 064004. (Shen Shuo, Hao Jianhong, Zhang Fang, et al. Study on beam-induced-stripping effect of hydrogen atom beam in long distance propagation in atmosphere[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 064004)