

粒子束空间传输影响因素及应对方法^{*}

任三孩¹, 邢艳军², 彭忠³, 黄惠军⁴

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
3. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 4. 西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要:全面分析了初始束流分布、发散度、能散度以及地磁场对粒子束空间传输的影响情况,并针对束流长距离传输的静电扩散和地磁偏转效应进行了数值建模及定量的数值仿真研究。结果表明,对于固定束流能量、流强粒子束,可通过增大初始半径削弱粒子束静电扩散效应达到设计要求;通过背景磁场精确预测,可准确控制束流方向精度。可以看出,研究带电粒子束本身的自洽行为以及与其外场的作用,对带电粒子束流的产生、传输特性研究及工程化应用都有重要意义。

关键词:粒子束;空间传输;静电扩散;地磁偏转

中图分类号:V419.2 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2023)02-138-08

Influence factors and coping strategies about the space transmission of particle beam

REN Sanhai¹, XING Yanjun², PENG Zhong³, HUANG Huijun⁴

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;
2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;
3. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;
4. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: The effects of initial beam distribution, divergence, energy divergence and geomagnetic field on the spatial transmission of particle beams were comprehensively analyzed, and the numerical modeling and quantitative numerical simulation of electrostatic diffusion and geomagnetic deflection effects were carried out. The simulation result shows that for particle beam with fixed beam energy and beam intensity, the electrostatic diffusion effect of the particle beam can be weakened by increasing the initial radius, and the exact direction of beam can be accurately predicted through accurate measurement of magnetic field. It can be seen that research on self-consistent force of charged particle beam and its interaction with external field is great significant to the study of generation, transport characteristics and engineering application of the particle beam.

Keywords: particle beam; space transmission; electrostatic diffusion; geomagnetic deflection

粒子束由大量速度接近光速的微小粒子组成,当高流强、高能量的粒子束流遇到目标时,高能粒子与目标物质产生相互作用,通过热效应或辐射效应使目标毁伤。与激光、微波一样,粒子束具有速度快、能量集中、效果可控等特点,应用非常广泛,在前沿科学和尖端科技的发展中起着重要的作用^[1]。

根据粒子的不同,粒子束分为电子束、质子束和中性束三种类型^[2]。其中电子束和质子束由于自身带电,束流在空间传输过程中,受粒子间库仑力影响,将呈现扩散的趋势;同时由于地磁场的存在,带电粒子高速运动时,受洛伦兹力影响,轨迹将发生偏转;中性束不带电,不受地磁场的影

响,但在中性化过程中面临较大的技术难度。

带电粒子束传输是一个极为复杂的物理问题,影响粒子束传输的因素很多,例如:初始束流分布、发散度、能散度、地磁场影响等^[3]。粒子束传输研究大部分聚焦于加速装置的输运系统尺度,针对带电粒子束在电磁场中的聚焦和传输问题,采用束流光学的方法进行设计与研究^[4-6]。此外,带电粒子在等离子体中传输的过程中,会和等离子体离子、原子发生库仑碰撞相互作用,从而入射带电粒子的电荷态会变得非常复杂,完全不同于初始的电荷态^[7-8]。只有较少研究针对相对论带电粒子束(电子、质子)在真空中短距离传播的扩散问题^[9-12],对粒子束在真空中的传输进行

^{*} 收稿日期:2021-04-07

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFA1604600)

作者简介:任三孩(1982—),男,河南南阳人,博士,副研究员,E-mail:sanhairan@163.com

了简单建模^[13],初步研究了粒子束类型、能量、流强和出口初始半径等因素对粒子束扩散的影响。

本文将采用理论与数值方法,定量研究分析带电粒子束在地球空间中长距离传输的问题,并分析相应的应对方法。

1 影响粒子束空间传输的因素分析

对于带电粒子束而言,其特点是粒子束流为带电束流,而不是中性束流。在大气层外的真空状态,一方面由于带电粒子之间的斥力,带电粒子束会在短时间内散发殆尽,另一方面由于地球强磁场的束缚效应,带电粒子束流无法大尺度跨越地磁力线传播。因此,带电粒子束自身特性和空间环境特点是影响粒子束空间传输的关键问题。

1.1 发散角因素

粒子动力学的研究表明,束流在经过保守力场的作用下,发散角和束斑尺寸的乘积可以认为是恒定不变的参数。在不考虑其他因素情况下,假设粒子束扩散只受发散角因素影响,则粒子束束斑大小与发散角的关系可简单计算如表1所示。由表1可知,无论电子还是质子,在同样的发散角之下,粒子束斑与传输距离成正比。当发散角在100 μrad 以下时,束斑尺寸在100 km 处小于10 m。

表1 传输距离、发散角与束斑尺寸关系

Tab.1 Beam spot size due to different transmission distance and divergence angle

传输距离/km	发散角/μrad	束斑尺寸/m
10	100	1
30	100	3
50	100	5
100	100	10

1.2 能散因素

带电粒子束在磁场的作用下将发生偏转,偏转半径由粒子的能量和磁场大小确定: $R = \frac{mv}{qB} = \frac{E}{Bc}$ 。作为近似,假设粒子处于相对论运动,其中 E 为电子能量, B 是磁场大小, c 是光速,电荷 $q = 1e$ 。从该公式可得不同能量粒子的偏转半径不同。不同能量的粒子传输一段距离之后,因轨迹的差异而散开。这种现象和光的色散概念类似,在粒子动力学中也称之为色散。从总体的效果上

看,束流的尺寸会因为色散在运动的垂直方向被拉长,具体偏转半径尺寸变化的计算公式为:

$$\delta R = \frac{1}{Bc} \delta E = \frac{E}{Bc} \frac{\delta E}{E} = R \frac{\delta E}{E}$$

(1)

式中, R 为偏转半径, $\delta E/E$ 为相对能散。根据计算,如果电子束存在1%的能散,束流偏转半径将相对变化1%,超过百米量级。

1.3 静电扩散因素

当带电粒子束在空间传播时,空间电荷和束流会产生显著的静电力和洛伦兹力,其中静电力使得粒子相互排斥,会造成粒子束的扩束效应,而运动电荷(电流)产生的磁场诱发的洛伦兹力则会约束粒子束,对束流具有聚焦效应^[10]。

1.4 地球磁场因素

当粒子束其他性能参数固定时,地磁场对束流指向以及地磁场扰动对粒子束流远程传输位置精度具有决定性的影响^[14]。而太阳风-磁层-电离层系统是一个存在复杂内部耦合的动力学系统,系统中的太阳风、磁层和电离层各个圈层相互作用,相互调制。在该系统中发生的各种现象(诸如磁暴、亚暴、极光等)都不是局部的现象,而是系统的整体行为。因此,带电粒子束在空间长距离传输轨迹的预测,需要对出束指向、空间矢量磁场与目标位置和运动特性的关联性进行详细分析。

2 应对方法研究

2.1 消色散方法

在空间磁场的作用下,粒子束中的粒子由能量差异导致偏转半径的不同,进而在空间中运动轨迹出现差异,称之为粒子束在磁场中的色散。图1为50 MeV 电子束能量偏差 ± 10% 时,在100 nT空间磁场环境下传输100 km 后的轨迹偏差的数值计算结果。

色散导致的轨迹偏差将导致在垂直于空间磁场和束团运动的方向,束团尺寸由于偏差而被拉伸,降低电荷密度与作用效果。其计算公式为:

$$\delta r = \frac{\delta E}{E} R \left(1 - \cos \frac{L}{R} \right)$$

(2)

式中, $\delta E/E$ 为相对能散, R 为偏转半径, L 为目标距离。在50 MeV 电子束,100 nT 的环境下, R 约为1 650 km, ± 10% 能量偏差将导致尺寸达到600 m,与图1的模拟结果相符。考虑该偏差和能量差异成正比, ± 0.5% 能量偏差仍然导致束团尺寸拉伸到30 m。

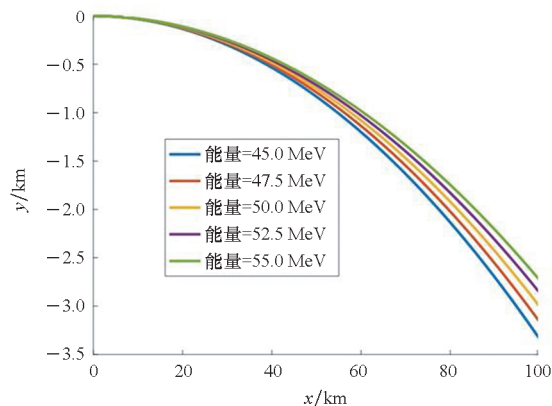


图 1 电子束空间传输 100 km 的色散

Fig. 1 Dispersion of electron beam after transmission of 100 km

色散可以通过特殊的磁铁系统减小,称之为消色散技术。具体原理是:不同能量的粒子,在磁铁系统中获得不同的偏转力和聚焦力^[15]。通过合理设计,使得不同能量粒子在出口时,初始发射角度不一致,并且正好补偿在空间中轨迹的差异。在大型加速器储存环中需要磁铁实现粒子的环形运动,因此消色散技术被广泛使用,控制粒子在长时间运动中轨道的偏离。目前的技术水平,储存环的粒子可以维持数小时以上的运动,其运动距离达到数十亿千米,也证明了消色散技术的可行性与稳定性。

消色散技术一般采用多个四极磁铁组,四极磁铁对电子的作用类似光学透镜。磁铁系统对不同能量的电子束提供不同的聚焦和散焦作用。可以实现在出口处不同能量电子束的角度不一样,通过合理的设计,可以完全补偿不同能量在空间传输中的差异。在常见加速器工程中,常常每间隔一段距离安装消色散磁铁系统,其距离和四极磁铁的焦距在尺度上类似,因此色散可以得到较好的抑制。然而粒子束在空间的传输中,不能安装磁铁。消色散只能在发射前进行。虽然从理论仍然可行,但目标距离远大于常见四极磁铁的焦距,可能存在较大的误差。因此需要研究消色散技术,降低能量偏差带来的尺寸拉伸效果。

针对该应用场景的消色散技术只能在粒子束发射之前,利用二极磁铁和四极磁铁预先对不同能量粒子产生不同的初始发射角,使其轨迹在目标处汇集到同一点。调制的初始发射角满足 $\delta\theta = \frac{\delta E}{E} \tan\left(\frac{L}{2R}\right)$ 时,即可消除色散带来的轨迹偏差。如果能够实现能量偏差 1 MeV 的情况下,发射角偏差 0.604 mrad,则可大幅度减小束团的尺寸拉

伸,如图 2 所示。该方案可使 $\pm 0.5\%$ 能量偏差下束团尺寸拉伸降低至 0.3 m 以内。

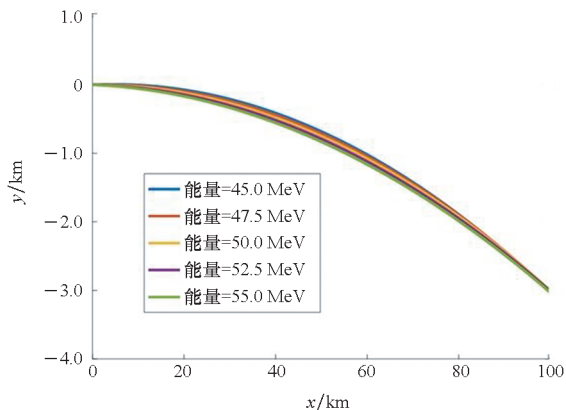


图 2 消色散后束流传输

Fig. 2 Electron beam transmission after de-dispersion

2.2 静电削弱方法

粒子束中带电粒子彼此之间的斥力引起粒子束扩散,粒子之间的斥力跟彼此之间的距离成平方反比关系。以电子为例,加速器出口电子束的直径一般为 1 mm 左右,并且由于聚束过程,电子束的电流在纵向上集中,束团长度为 1.5 mm 左右,其脉冲电流达到 2 A,电流面密度高达 2.5 MA/m^2 ,因此束流内带电粒子之间会产生较大的库仑斥力。在空间传输中,该斥力在不到 1 km 距离中将发射角增加到 1 mrad 以上,束流扩散直径将超过 100 m,在空间传输中也无法对束流进行操控与补偿。因此需要在发射前就降低粒子束电流密度,将斥力降低到可以接受的范围内。

假设束流为无限长均匀带电圆柱体,则一个粒子在距轴 r 处的受束流的径向静电力可由式(3)计算得到。

$$F_e(r) = W \frac{I(r)}{r} \quad (3)$$

式中, W 为各项系数之和, $I(r)$ 为半径 r 内的总电流强度。此外束流会产生感应磁场,该磁场对 r 处粒子会有一个指向轴心的约束力,计算公式为:

$$F_m(r) = -\beta^2 W \frac{I(r)}{r} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (5)$$

可见, $\beta < 1$,所以合力 $F = F_e(r) + F_m(r)$ 指向外面,最终引起束流的扩散。根据粒子的动力学计算,最终可以近似得到粒子束随距离扩散的近似公式为:

$$z(r_1) = \frac{r_0 F(\chi)}{\sqrt{2K}} \quad (6)$$

式中, $K = \frac{eI_0}{2\pi\epsilon_0 m_r (v_z \gamma)^3}, \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$,
 $F(\chi) = \int_1^\chi \frac{dy}{\sqrt{\ln(y)}}$ 。利用上述带电粒子束流空间
传输扩散特性公式进行计算研究,可以获得不同
能量、不同流强下粒子束流扩散特性。假设粒子
束均匀分布,表2和表3分别给出不同能量和流
强的电子束(50 MeV、100 mA)与质子束
(50 MeV、100 μ A),在空间中传播的扩散半径随
传输距离的变化情况。

表2 50 MeV、100 mA 电子束流传输扩散半径
Tab.2 Diffusion radius of electron beam transmission
(50 MeV、100 mA)

初始半径/ m	传输距离			
	50 km	100 km	150 km	200 km
0.01	0.49	1.07	1.68	2.31
0.02	0.43	0.98	1.55	2.14
0.05	0.34	0.83	1.35	1.89

表3 50 MeV、100 μ A 质子束流传输扩散半径
Tab.3 Diffusion radius of proton beam transmission
(50 MeV、100 μ A)

初始半径/ m	传输距离			
	50 km	100 km	150 km	200 km
0.01	5.91	12.51	19.32	26.28
0.02	5.55	11.83	18.35	25.01
0.05	5.02	10.87	16.96	23.21

根据粒子动力学的计算,粒子束束流扩散程
度与粒子束初始半径呈反比。为了满足减小发散
角的需求,设计合理的束流光学系统,通过四极磁
铁组增加加速器出口束流的束斑尺寸,同时等比
例地缩小束流的发散角,可以有效控制粒子束的
静电扩散效应。

2.3 磁补偿方法

带电粒子从加速管出射后,经过空间传输,空
间磁场偏转及抖动将严重影响束流运动轨迹精
度。由于加速管出射的电子束并非平行束,而是
存在一定的发射角和能量分布,这样经过长距离
传输束流会被磁场偏转,因此需要对出束指向、空
间矢量磁场与目标位置和运动特性的关联性进行
高精度建模。

由于空间磁场受到太阳风的调制,磁场存在
扰动,必然引起带电粒子束偏转半径改变,导致传

输方向出现偏差,下面简单计算不同磁场扰动幅
度引起的偏差大小。假定 M 点距离初始位置(P
点)为 R_d ,且方向与磁场方向完全垂直,背景磁
场强度为 B_0 ,粒子束偏转半径为 R_c ,此时目标位置
偏离瞄准方向 L_1 。若磁场有一个偏差 ΔB ,此时
粒子束最终轨迹偏离瞄准方向 L_2 ,则可以计算得
到粒子束在 ΔB 扰动下,会出现偏差 ΔL 。带电粒
子束轨迹如图3所示。

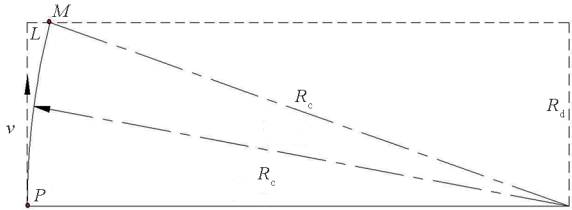


图3 带电粒子束轨迹

Fig.3 Transmission trajectory of charged particle beam

$$R_c = \frac{mv}{qB} = w \frac{1}{B}$$
(7)

$$dr = w \cdot d\left(\frac{1}{B}\right) = -\frac{w}{B^2}dB = -R_c \frac{dB}{B}$$
(8)

$$L = R_c - \sqrt{R_c^2 - R_d^2}$$
(9)

$$\Delta L = |L_1 - L_2|$$
(10)

表4和表5分别给出电子和质子束在不同扰
动磁场下的偏差数值,计算结果表明磁场扰动越
强,束流指向误差越大。对于50 MeV的粒子束
流,当磁场扰动精度控制在1 nT以内时,电子束
流在100 km外传输误差不大于32 m,质子束传
输误差不大于9.4 m。

表4 磁场引起的50 MeV 电子束流偏转误差
Tab.4 Deflection error of 50 MeV electron beam
caused by magnetic field

扰动磁场强度/nT	$\Delta L/m$
0.01	0.32
0.10	3.20
1.00	32.00
5.00	160.00
10.00	320.00

表5 磁场引起的50 MeV 质子束流偏转误差
Tab.5 Deflection error of 50 MeV proton beam
caused by magnetic field

扰动磁场强度/nT	$\Delta L/m$
0.01	0.094
0.10	0.940
1.00	9.400
5.00	47.000
10.00	94.000

3 仿真验证

3.1 静电扩散控制仿真

带电粒子束在空间传输时,运动的空间电荷将产生电力和磁力,分别使粒子束具有发散和聚焦的趋势。可以通过采用粒子模拟对带电粒子束以很大的电流和相对论速度的传播进行建模,计算粒子轨迹与电力或磁力之间的双向强耦合作用,具体公式见 2.2 节。

在进行粒子束长距离运输模拟仿真计算中,由于粒子束束斑直径与粒子束传输距离之比超过 10^5 量级,因此在空间尺度上存在巨大跨度。为了解决这一困难,在实际建模计算中取与粒子束束斑尺度相当的空间尺度进行模拟。计算域 x, y 取 $[-0.4\text{ m}, 0.4\text{ m}]$, z 取 $[0, 2\text{ m}]$,具体网格划分如图 4 所示。

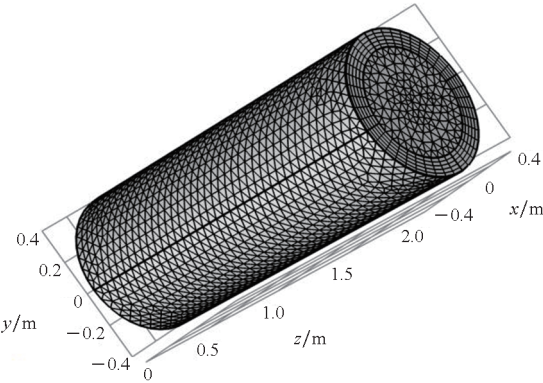


图 4 计算域及网格划分

Fig. 4 Computational domain and grid meshing

引起空间带电粒子束扩散的静电力主要由三个物理参数决定,分别为带电粒子束能量大小(即初始速度大小)、束斑大小和带电粒子束的束流强度,为简化起见,将分别选取两种典型关键参数,对这三个关键物理参数进行仿真研究。

算例 1:电子束能量为 40 keV,初始速度约为 $1 \times 10^8\text{ m/s}$,初始束斑半径 $r = 0.01\text{ m}$,束流强度为 3 A,计算结果如图 5 所示。由计算结果可知,此时电子束在传播 0.2 m 后,其束斑半径从 0.01 m 扩散到 0.03 m。电子束运动产生的磁场强度在束流表面最强,在中心最弱,并随电子束的扩散而逐渐衰弱。电场强度(电压/距离)的绝对值在束流中心最大,远离束流中心不断减小,并随着电子束的扩散,其中心电场强度不断下降。

算例 2:电子束能量为 50 MeV,即初始速度约为 $2.99 \times 10^8\text{ m/s}$,初始束斑半径 $r = 0.1\text{ m}$,束流强度为 1 mA;计算结果如图 6 所示。从图中可

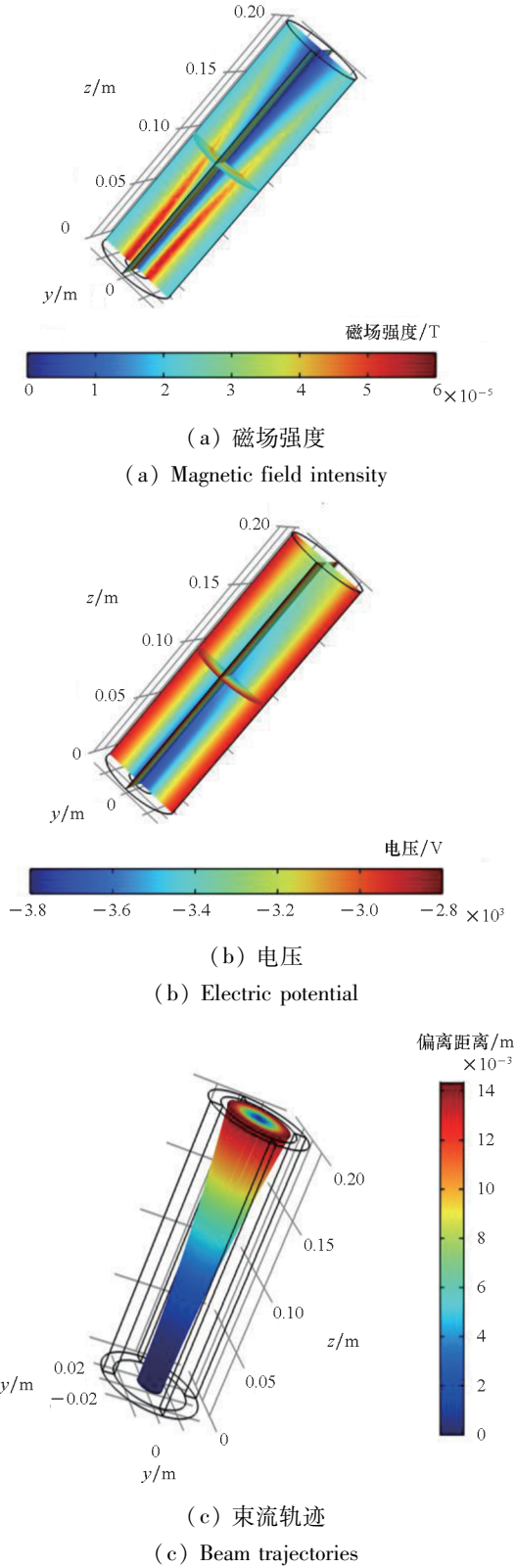


图 5 算例 1 仿真结果

Fig. 5 Simulation results for example 1

知,在计算范围之内,电子束的束斑并未有显著的扩散。电子束运动产生的磁场强度在束流表面最强,在中心最弱,电场强度绝对值在束流中心最大,远离束流中心不断减小,此时电场与磁场大小分布并未出现明显衰减。

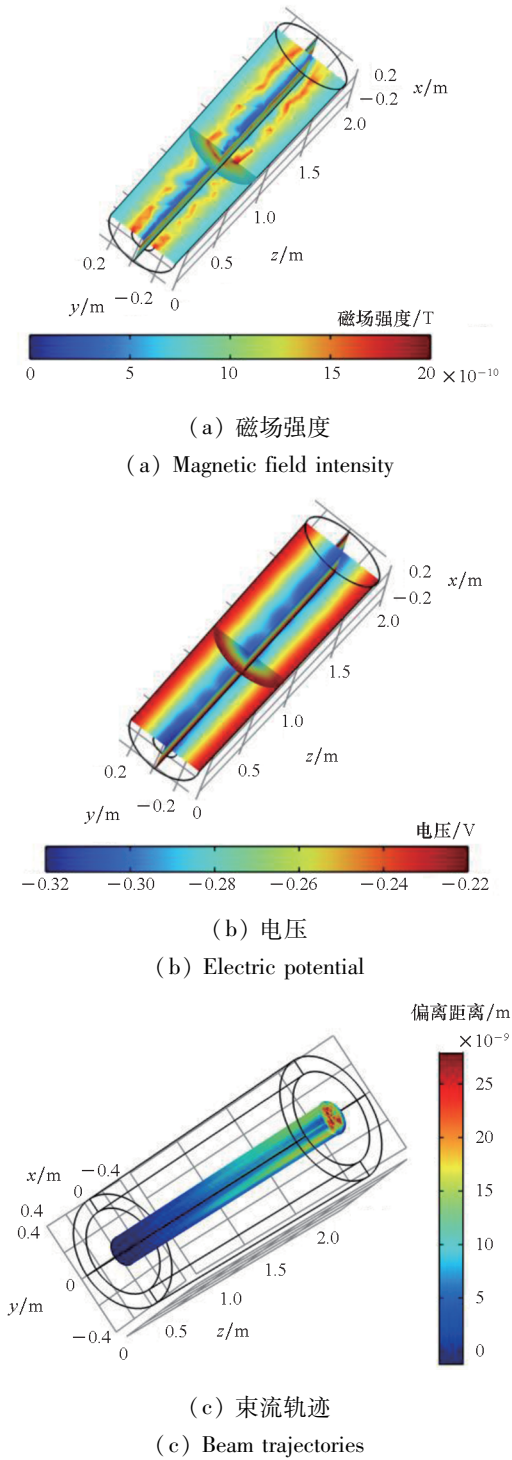


图 6 算例 2 仿真结果

Fig. 6 Simulation results for example 2

由仿真结果可知,增强粒子束能量、扩大初始束流半径、减小束流强度,可以有效抑制带电粒子束流的静电扩散效应。

3.2 地磁输运仿真

带电粒子束在地球空间传输会受空间磁场影响发生偏转。目前对地磁模型的研究已经有很多成果,一般可以分为两类,一类是动态的太阳风-磁层-电离层耦合磁流体力学模型^[16-17],另一类

是平均的地磁观测经验模型,例如国际地磁参考场模型^[18] (international geomagnetic reference field, IGRF)。

磁流体力学的应用范围广泛,其中对磁流体力学理论应用最多的就是空间物理领域,因为行星际空间环境最符合磁流体力学的基本假设。太阳风-磁层-电离层耦合磁流体力学模型数值方法已经成功应用于太阳风磁层相互作用的科学研究,将采用这一方法对地球空间磁场进行数值建模。其基本方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + \mathbf{P} \cdot \mathbf{I} - \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{\mu} \right) = (\nabla \times \mathbf{B}') \times \mathbf{B}_d - \mathbf{B}' \nabla \cdot \mathbf{B}' \quad (12)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}'}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \mathbf{B}' - \mathbf{B}' \mathbf{v}) = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}_d) - \mathbf{v} \nabla \cdot \mathbf{B}' \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \nabla \cdot \left[(\mathbf{E} + \mathbf{P}^*) \mathbf{v} - \frac{1}{\mu} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}') \mathbf{B}' \right] \\ &= \mathbf{v} \cdot [(\nabla \times \mathbf{B}') \times \mathbf{B}_d] + \mathbf{B}' \cdot [\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}_d)] - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}') \nabla \cdot \mathbf{B}' \end{aligned} \quad (14)$$

其中: $\mathbf{B}' = \mathbf{B} - \mathbf{B}_d$, $\mathbf{P}^* = \mathbf{P} + \frac{\mathbf{B}'^2}{2\mu}$, $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{P}}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho \mathbf{v}^2 + \frac{1}{2\mu} \mathbf{B}'^2$ 。 $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ 为真空电导率, $\gamma = 5/3$ 为气体绝热指数, $\mathbf{B}_d$ 为偶极子场, $\mathbf{B}'$ 为总磁场相对偶极子场的偏离,用 $\mathbf{B}'$ 取代总磁场 $\mathbf{B}$ 作为因变量,是因为这样有利于在地球附近网格较大的情况下,提高磁场和电流的计算精度。

引起空间带电粒子远程传输的地磁场扰动主要由两个物理参数决定,分别为磁场大小和地磁场方向,为简化起见,将分别针对两种典型关键参数,对其进行仿真研究。 x, y, z 计算区域取 $[-10R_e, 10R_e]$, 单位长度 $R_e = 6371.2 \text{ km}$ 。

算例 1: 电子束能量取为 50 MeV, 释放区域为同步轨道 ($r = 6.6R_e$) 处, 若地磁扰动, 将导致电子束方向与磁力线夹角产生变化。为简化分析, 假设扰动引起的角度变化为 $10^\circ \sim 90^\circ$, 则不同方向电子束轨迹仿真结果如图 7 和图 8 所示。图 7 为电子束在一次南北极周期内的运动轨迹, 灰色圆球代表地球, 不同颜色实线代表粒子束相对磁力线的不同入射夹角时的运动轨迹。图 8 为电子束初期的运动轨迹。

由图 7、图 8 可知, 电子束在大尺度上受地球磁场约束, 围绕磁力线在南北极弹跳运动。粒子运动轨迹与粒子能量、地磁场强度以及速度与磁

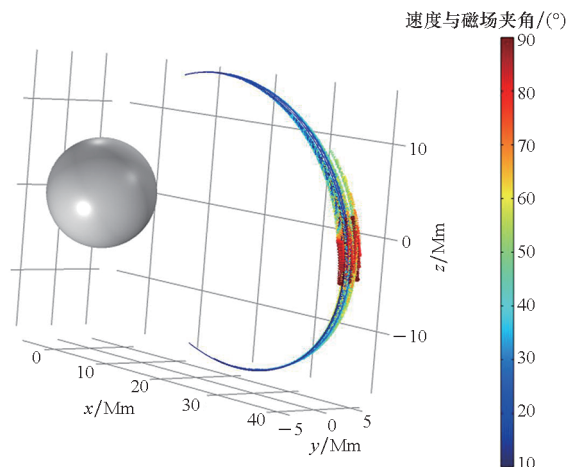


图 7 不同投掷角下的电子运动轨迹

Fig. 7 Electron transmission trajectory under different incident angles

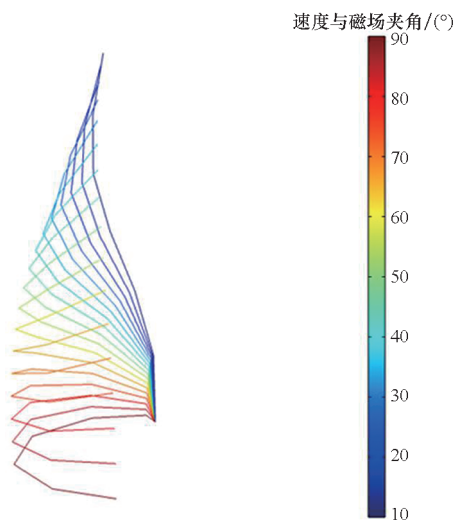


图 8 电子束初期运动轨迹

Fig. 8 Initial transmission trajectory of electron beam

场夹角相关。并且随着夹角由 10° 增加到 90° , 电子束回旋半径逐渐减小, 并且电子束传输方向产生显著变化。此外, 赤道区域由于磁场强度相对小, 粒子束回旋半径相对较大; 而地球两极附近由于磁场强度大, 粒子回旋半径变小。

算例 2: 电子束能量仍取为 50 MeV, 释放区域为同步轨道处, 若地磁扰动, 将导致磁场强度产生变化。为简化分析, 假设磁场方向固定, 初始磁场大小为 104 nT, 磁场扰动强弱不同, 分别取 -28 nT、-24 nT 和 -20 nT, 其相应背景磁场大小分别为 76 nT、80 nT 和 84 nT, 则不同磁场强度背景下的电子束轨迹仿真结果如图 9 所示, 其中色带标目的单位为地球半径 R_e , 此处取 $R_e = 6371$ km。计算结果表明, 随着地磁扰动强度的增强, 电子束的传输轨迹受到影响, 与最初轨迹的

偏离越大。

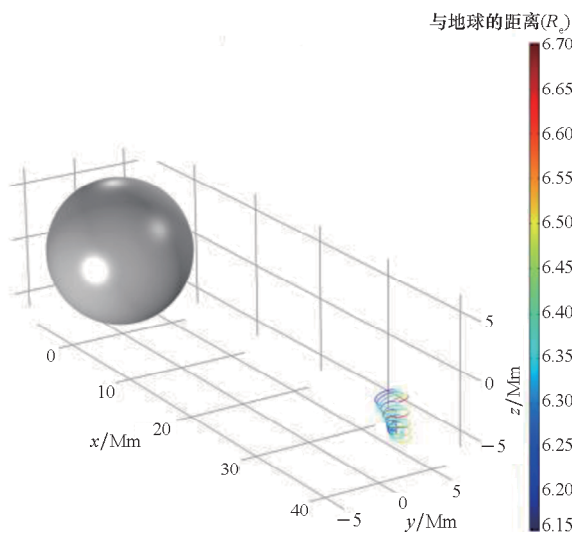


图 9 不同扰动磁场下同步轨道的电子束运动轨迹

Fig. 9 Electron beam transmission trajectory under different perturbation magnetic fields

由以上仿真结果可见, 粒子束在空间中的长距离传输受到地球背景磁场的强度和方向的严重制约。通过空间实际获取的地磁场数据不断修正磁流体力学模型, 可以精确预估由于地磁场带来的偏转, 并予以修正。

4 结论

本文分析了带电粒子束在地球空间的传输特性与影响因素, 分别讨论了粒子束发散角、能散、静电扩散的内在因素, 以及地磁背景磁场的外在因素的影响机理及效果。并针对静电扩散效应与地磁偏转效应开展了数值建模与仿真研究, 仿真结果与理论分析基本一致。

1) 粒子束的静电扩散效应主要受粒子束能量、初始束斑大小以及束流强度控制, 当取高能、大束斑、低流强束流时, 带电粒子束在空间传输时的静电效应最小。

2) 采用磁流体力学模型, 可以精确背景磁场预测, 准确控制束流方向精度。

综合以上分析和讨论, 针对带电粒子束本身自洽行为及其与外场相互作用的研究, 对束流传输特性、带电粒子束流的产生与设计以及等离子体的研究都有重要意义。虽然粒子束在空间传输时会受到多种内在和外在因素的影响, 但是这些影响都可以通过一定的方法进行减缓和解决。利用高精度数值模拟方法来研究粒子束流空间传输的动力学已有较为成熟的研究成果。可以预期, 带电粒子束应用技术将会成为等离子体物理、高

能物理学以及医疗、国防工业应用等研究领域的热点技术。

参考文献 (References)

[1] DAVIDSON R C, QIN H. Physics of intense charged particle beams in high energy accelerators [M]. Singapore: World Scientific Press, 2001.

[2] 谢文楷. 带电粒子束的理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

XIE W K. Theory and design of charged particle beam[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)

[3] 安超凡, 谢修瑾, 蒲越虎. 粒子束团状态对测量束流发射度及能量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(11): 149 – 157.

AN C F, XIE X C, PU Y H. Effects of bunch state on measurement of beam emittance and energy[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(11): 149 – 157. (in Chinese)

[4] POWIS A T, PORAZIK P, GREKLEK-MCKEON M, et al. Evolution of a relativistic electron beam for tracing magnetospheric field lines[J]. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2019, 6: 69.

[5] XUE B X, HAO J H, ZHAO Q, et al. Influence of geomagnetic field on the long-range propagation of relativistic electron beam in the atmosphere[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(11): 3871 – 3876.

[6] 赵海龙, 刘洪臣, 王春生, 等. 正交电磁场中粒子束的质量聚焦及粒子轨迹[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(5): 195 – 200.

ZHAO H L, LIU H C, WANG C S, et al. Mass focusing and particle trajectories of particle beam in orthogonal electromagnetic field [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(5): 195 – 200. (in Chinese)

[7] ZWICKNAGEL G, TOEPFFER C, REINHARD P G. Stopping of heavy ions in plasmas at strong coupling [J]. Physics Reports, 1999, 309(3): 117 – 208.

[8] OGURI Y, HASEGAWA J, KANEKO J, et al. Stopping of low-energy highly charged ions in dense plasmas[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2005, 544(1/2): 76 – 83.

[9] SANCHEZ E R, POWIS A T, KAGANOVICH I D, et al. Relativistic particle beams as a resource to solve outstanding problems in space physics [J]. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2019, 6: 71.

[10] 戴宏毅, 王同权, 肖亚斌. 带电粒子束自生力对束流扩散

的影响[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(4): 41 – 44.

DAI H Y, WANG T Q, XIAO Y B. Research of effect of self-generated space charge force of charged particle beams on its radical spread[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(4): 41 – 44. (in Chinese)

[11] 戴宏毅, 肖亚斌, 王同权, 等. 带电粒子束在真空中传输时的扩散研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2001, 28(4): 6 – 10.

DAI H Y, XIAO Y B, WANG T Q, et al. Study of spread of propagation of charged particle beams in vacuum[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2001, 28(4): 6 – 10. (in Chinese)

[12] HUMPHRIES S, Jr. Charged particle beams[M]. New York: Dover Publications Incorporated, 2013.

[13] 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 J H, WANG X, ZHANG F, 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. (in Chinese)

[14] SHAHZAD A A, PATIL B J, PETHE S N, et al. Design of electron beam bending magnet system for electron and photon therapy: a simulation approach [J]. Indian Journal of Pure and Applied Physics, 2019, 57(7): 492 – 497.

[15] 李佳, 赵全堂, 冉朝晖, 等. 消色散 270°偏转磁铁系统设计及束流动力学研究[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(12): 102 – 109.

LI J, ZHAO Q T, RAN Z H, et al. Design and beam dynamic analysis of 270° achromatic deflection magnet system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(12): 102 – 109. (in Chinese)

[16] PENG Z, WANG C, HU Y Q, et al. Simulations of observed auroral brightening caused by solar wind dynamic pressure enhancements under different interplanetary magnetic field conditions [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2011, 116(A6): 1 – 11.

[17] 彭忠. 太阳风 – 磁层 – 电离层耦合的全球 MHD 数值模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.

PENG Z. Investigation of the solar wind-magnetosphere-ionosphere coupling in terms of global MHD simulations[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)

[18] THÉBAULT E, FINLAY C C, BEGGAN C D, et al. International geomagnetic reference field: the 12th generation[J]. Earth, Planets and Space, 2015, 67(1): 79.