束流传输研究现状

张嘉宝[[1]](#footnote-1)

乾元国家实验室

定向能科学技术部，共性基础与前沿交叉研究中心

## 理论研究现状

1982年-2001年期间，国防科技大学的张树发，戴宏毅，王同权，肖亚斌教授对带电粒子束在真空中传输的发散范围进行了计算[1-3]。采用的理论假设有：初始束流无能散，初始扩散角为0，且均匀分布；通过研究束流边缘的一个试探粒子的运动，得到束流的发散范围。主要的数值结果总结在表1中。研究的主要结论有

* 在同样的传输距离和流强下， 质子束发散的范围远大于相同初能量的电子束；
* 对同种粒子束，能量越大、流强越小，发散范围越小；
* 初始束半径越大，发散越小，但半径超过一定值后，变化不明显；

表1：试探粒子轨迹方法对束流真空传输的扩散范围计算[1-3]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 文献 | 初始能量/MeV | 初始束半径/m | 电流/kA | 传播距离/km | 扩散后半径/m |
| [1] | 10 | 0.01 | 1 | 1 | 12.1 |
| [2] | 1000 | 0.1 | 1 | 1000 | 10.9 |
| [3] | 100 | 0.1 | 1 | 10  100 | 2.36  33.4 |

束流在真空、无外场环境中的传输是最理想的情况，实际上当环境中存在等离子体、外磁场时，束流传输的性质会发生很大的变化，下面分别对这两种情况进行论述。

对电子束在GEO轨道传输问题，涉及到的空间环境真空度极高()，因此本调研不关心电子束在稠密等离子体中的传输。

## 仿真研究现状

### 随移动窗推进的带电粒子束团长程传输模拟分析[3]

研究目标：

引入移动窗技术，建立带电粒子束团长程传输的模型，并分析传输过程中束团内部参数和自生场的变化

研究内容：

* 以 PIC 静电模型为基础，结合移动窗技术建立了一种 2D3V 的片状带 电粒子束团的长程传输模型
* 将模拟结果与解析模型 K－V 方程的计算结果进行对比分析

模型与关键假设：

* 忽略地磁场与稀薄等离子碰撞
* 空间二维，片状带电粒子束团
* 对粒子束包络的描述采用K-V方程

研究结论：

* 所建立的仿真模型与理论模型得到的结果基本符合
* 此模型更适宜用于模拟高能强相对论电子束团的长程传输

疑问：

K-V方程有多可靠？是行业内公认的理论模型吗？有没有被实验检验过？

### Axial effect analysis of relativistic electron beam propagation in vacuum[4]

研究目标：

模拟和分析带电粒子束长程传输中轴向效应的主要特征和机制

研究内容：

* 对包括轴向空间电荷和瞬变电磁场的轴向效应进行了分析
* 讨论了束参数对轴向效应的影响

模型与关键假设：

同文献[3]

研究结论：

* 轴向空间电荷效应和瞬变电磁效应将在相对论电子束流头部产生收缩和色散两种相反的效应，抵消束流的径向扩展；在束流尾部，两种效应将促使色散效应对径向扩展产生叠加作用
* 两种轴向效应均随流强增大而增强，但对能量变化不敏感

疑问：

两种轴向效应是否有实验证实？

### 真空中相对论电子束长程传输过程仿真研究[5]

研究目标：

解决由于长程传输模型的空间尺寸较大而导致的计算资源不足等问题

研究内容：

* 建立三维粒子仿真传输模型，以便有效模拟电子束的粒子轨迹及其自生电磁场分布；
* 结合相空间理论，探讨电子束流半径随传输距离的变化规律，并探索影响这一过程的关键因素

模型与关键假设：

* 电子束初始分布采用K-V分布，平均能量 10 MeV，能散 5\%，束斑半径 2cm。
* 采用自适应网格技术，对需要高分辨率的区域使用细网格，其他区域使用粗网格。
* 计算域设置：传输长度 10km，传输截面半径 10m。

研究结论：

* 仿真得到高速运动的电子产生的二维电磁场分布，与Lorentz变换得到的结果一致
* 通过相空间图形象地展示了电子束在传输中的位形变化，绘制了不同能量的电子束半径随传输距离的变化图，对此进行了一些讨论

疑问：

仿真是在实验室系下进行的？还是在电子静止系下进行的？如何通过Lorentz变换缩短仿真长度？

## 附录

### 气压单位与换算

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 帕斯卡  (Pa)() | 毫米汞柱(mmHg) | 巴(bar) | 托(Torr) | Psi |
| 大气压1atm= |  |  | bar | 760Torr | 14.7psi |

外太空各轨道高度及对应真空度如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 外太空轨道 | 高度/km | 真空度Pa |
| 低地球轨道LEO | 167-2000 |  |
| 中地球轨道MEO | 5000-10000 |  |
| 地球静止轨道GEO | 35786 |  |

## 参考文献

1. 张树发. 带电粒子束传输中发散范围的计算[J]. 国防科技大学学报, 1982, 2.
2. 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.
3. 戴宏毅, 肖亚斌, 王同权, 张树发. 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)中文版, 2001(28)4.
4. 郝建红, 王希, 张芳, 赵强, 薛碧曦, 范杰清, 董志伟. 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: 168-174.
5. Xi WANG, Jianhong HAO, Fang ZHANG, Qiang ZHAO, Jieqing FAN, Bixi XUE, Lei GAO, Chenrui CHAI, Zhiwei DONG. Axial effect analysis of relativistic electron beam propagation in vacuum[J]. Plasma Science and Technology, 2022, 24(6): 065301.
6. 王庆宇，党怡天，铁维昊，牛浩波，孙安邦. 真空中相对论电子束长程传输过程仿真研究[J]. 航天器环境工程, 2024(41): 319-324.
7. Humphries, S. Charged particle beams[M]. Hoboken，NJ：John Wiley and ons，1990.
8. 戴宏毅, 王同权, 肖亚斌, 张树发, 王尚武.粒子束传输技术的研究现状[J]．国防科技参考, 1999(4) : 24－27.
9. 任三孩, 邢艳军, 彭忠, 黄惠军. 粒子束空间传输影响因素及应对方法[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45: 138-145.

1. zhangjiabao21@mails.ucas.ac.cn [↑](#footnote-ref-1)