arXiv:2304.01788v1 [physics.plasm-ph] 4 Apr 2023

DEMO中性束注入器中束流驱动等离子体中和器的功能优化

Fabio Veronese[1,2],Piero Agostinetti[1,3],Christian Hopf[4],和 Giuseppe Starnella[4]

[1]*Consorzio RFX*（*CNR*、*ENEA*、*INFN*、帕多瓦大学、*Acciaierie Venete S.p.A.*），*Corso Stati Uniti 4*，帕多瓦，*35127*，意大利[2]聚变研究中心（*CRF*），帕多瓦大学，*Corso Stati Uniti 4*，帕多瓦，*35127*，意大利[3]等离子体科学与技术研究所帕多瓦分部，*Corso Stati Uniti 4*，帕多瓦，*35127*，意大利[4]马克斯·普朗克等离子体物理研究所，*Boltzmannstr. 2*，慕尼黑附近的加兴，*85748*，德国

https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113663

摘要

束流驱动等离子体中和器（BDPN）被提议作为一种比负离子中性束注入（NNBI）所用气体中和器更高效的替代方案。本文对采用 BDPN 的整个 NNBI 束线性能进行了建模。我们同时考虑了所有相关的物理和工程因素，其中最重要的是：BDPN 内部等离子体密度和电离度随其几何结构及供气流量的变化；束线的几何传输率；束线内中性气体分布对束线部件几何结构和气体流量的依赖关系；以及提取的 D^- 束流在这些中性粒子与带电粒子分布中的粒子种类演化。此外，我们计算了 BDPN 部件以及其下游中性束注入部件的预期热负荷，并研究了 BDPN 入口处的磁尖 cusp 场对束线透射率的影响。尽管我们的结果仅是在所采用的边界条件下进行的优化，但我们发现，采用 BDPN 的束线可将系统墙插效率提高约 13%，从气体中和器方案估算的 0.30 提高至 0.34。

1 引言

继国际热核聚变实验堆之后，预计示范聚变电站将成为迈向热核聚变基荷发电的下一步，旨在证明完整电站在技术和商业上的可行性。为实现这一目标，需要提高占空比、延长等离子体放电时间，并通过提高辅助加热系统的效率来降低循环功率。对于欧洲DEMO，2014年至2020年制定的预概念设计 [1] 假设每种候选加热系统提供50 MW的功率，包括电子回旋共振加热（ECRH）、离子回旋共振加热（ICRH）和中性束注入（NBI）加热。自2021年以来，基准设计仅采用电子回旋加热，但中性束注入和离子回旋加热仍在持续开发，作为风险缓解策略。中性束注入设计假设通过两条或三条1 MeV束线注入50 MW功率，加速的负氘离子电流为40 A。

中性束注入的能量效率主要受限于中性气体中负电荷束流中和程度的上限，这使系统有 $\gtrsim 45$ % 的功率以未中和离子的形式损失，这些离子会撞击残余离子束流收集器。

电子邮件： fabio.veronese@igi.cnr.it

再加上早期剥离损失、再电离损失、几何传输损失以及有限的电源效率，这些损失使典型的基于负离子的中性束注入系统的墙插效率（即注入功率与系统总功耗之比）限制在约 30% [2]。

等离子体中和器提供了一种可能的解决方案。在这一概念中，中和器内的气体电离度达到几个百分点，从而提高负束流的中和器效率[3]。实验已证明中和效率有所提高 [4], ，但迄今为止，实验一直使用外部电弧源来产生等离子体，这增加了系统复杂性和功耗。

2013年，E. Surrey和A. Holmes提出了一种等离子体中和器概念：束流本身会沿途电离背景气体 [5],，这种中和器称为束流驱动等离子体中和器（BDPN）。束流以剥离出的快电子（对于1 MeV的D束流，能量为272 eV）⁻ 以及束流通过电离背景气体产生的快电子（称为Rudd电子）的形式，向中和器沉积能量。这些快电子会引发二次电离。为了获得足以增强中和效果的等离子体密度和电离度，壁面衬有 cusp 磁体。2019年，I. Turner和A. Holmes在后续研究中 [6] 对BDPN的一种可能设计作了更详细的描述，并改进了Surrey和Holmes最初提出的零维模型。他们预测，对于类似国际热核聚变实验堆的中性束注入离子束，中和效率最高可达 ≈ 80 %。

Starnella 等人进一步修订了该模型，纳入了此前被忽略的几种损失机制，使预测的可实现中和率降至 $\approx$ 68 %。这一最新模型除计算电离度和中和效率外，还计算中和器气体的温度。主要输入参数包括中和器的主要尺寸、尖峰磁场强度、磁体间距以及填充压力。该模型采用迭代计算，收敛需要数个 CPU 小时。

Starnella 所假设的 BDPN 设计采用箱形中和器。与国际热核聚变实验堆的气体中和器不同，为减少等离子体损失，该设计没有用于分隔内部通道的壁面。所有壁面均衬有按 Halbach 构型排列的永磁体；此外，狭缝之间的条形构件中安装的磁体在束流入口和出口狭缝之间形成磁场。由于没有内部壁面会增加气体导通能力，因此入口和出口的条形构件向外延伸，形成“鳍片”（图 1b），以此限制气体导通能力。该设计仅为概念方案，尚未针对实际集成到束线中进行优化。本文尝试实现这一点：优化 BDPN、离子源和残余离子束流收集器（RID）的形状参数，以最大化整个束线的中性粒子产额，即注入的中性氘通量与从离子源提取的 D^- 离子电流之比，而非将 BDPN 作为独立部件时的中和产额。这要求我们考虑

1. 沿整条束线，各束线部件（BLC）造成的中性氘几何传输损失及其对 BLC 几何参数的依赖关系；2. BDPN 中等离子体密度和电离度对 BDPN 尺寸及气体密度的依赖关系；3. BDPN 中的气体温度以及气体从 BDPN 流出的流导，以确定所需的中和器气体流量；4. 中性气体分布对气体流量、抽气速率及空间抽气分布的依赖关系，以计算再电离损失；5. 提取出的 D^- 束流沿整条束线的粒子种类演化。

为了使这项优化成为一项可管理的任务，我们规定 BLC 的总体形状，仅将其尺寸参数留作可在允许范围内优化的变量。除了便于开展本研究外，这些限制在实际中也会存在，例如束线包络的最大允许尺寸，或增殖包层中可容许的最大开口。

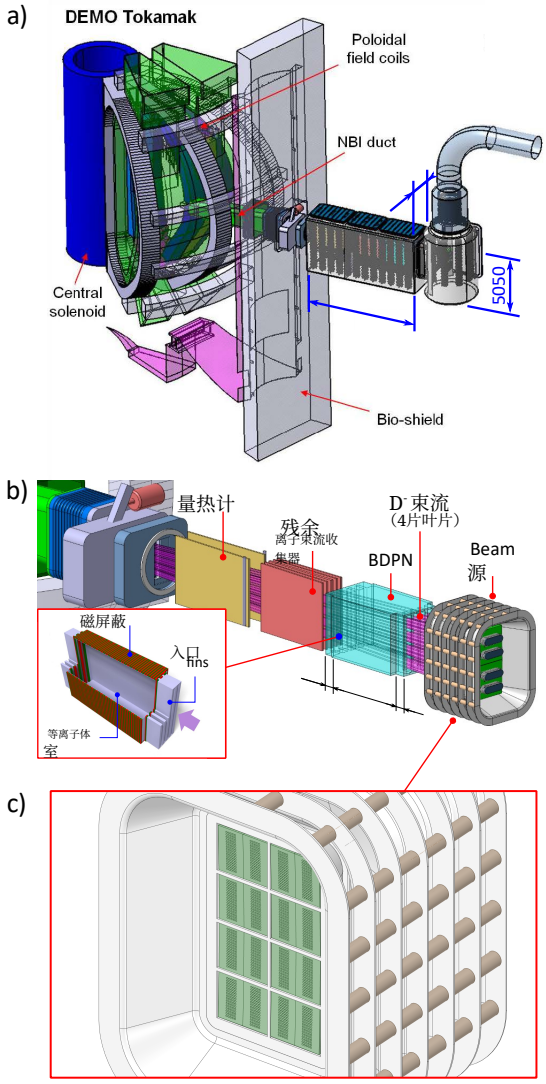


图 1：DEMO NBI 的预概念设计（2022）。a）DEMO 托卡马克和中性束注入组件的等轴剖视图，标示注入器真空室的主要尺寸；b）采用 BDPN 方案的 DEMO NBI 主要部件视图，附有展示 BDPN 几何结构及一种可能磁构型的剖视图 [7]；c）束源细节图，展示所选的束流条阵列布局。

2 问题设置

我们的出发点是 DEMO NBI 当前的预概念设计（图 1）。我们保持焦点（即所有束let 相交的点）位于包层内，并保持中和器到焦点的距离不变。不过，我们允许改变中和器长度，并相应地重新定位离子源。在真空侧，则保持 NBI 容器现有的横截面不变。

还需要确定束小束阵列的组织方式：较高的束列有利于降低 BDPN 鳍片之间以及 RID 通道内的气体导通能力。此外，BDPN 的横截面形状不宜与正方形相差太大，这有助于保持较高的体积与损失表面积之比；入口狭缝的数量则应为偶数，以满足磁尖 cusp 场的对称性要求。因此，原有的布局——由 4×4 个束小束组组成，每组包含 5×16 个束流束——看起来是合理的选择，我们也将沿用这一布局。不过，束组之间的垂直间距可以预先确定，因为它们都要穿过相同的狭缝和通道；而水平间距则需要作为自由参数，以便周围部件的几何结构能够调整。

我们施加了若干进一步的外部约束：离子源的最大水平尺寸设为 1.5 米，中和器允许的最大长度为 4 米。所采用的工作流程如下：

- 首先，我们找出确定 BDPN 和 RID 尺寸参数取值的关系，以实现给定的几何透射损失值。随后，我们绘制满足所有外部约束的可行解几何参数空间，例如前文提到的尺寸约束或允许的最小壁厚。

- 对于上述离散化参数空间中的每个允许点，均使用基于 Starnella模型 [7]得到的参数化缩放关系，计算 BDPN 中的等离子体密度和中性气体温度。此项计算将

针对流入中和器的不同气体流量进行。对于每项计算，均使用有限元法代码中的参数化几何结构计算气体密度分布。该气体分布可用于数值求解描述 D^- 束流与背景气体发生碰撞时演化过程的方程组，从而得到注入环形装置的等效中性束流电流。

- 能够使中和束流分数达到最大的几何结构–气流组合，就是所需的解。

•随后对整个中性束注入束线进行粒子追踪仿真，以计算BLC上的热负荷，并再次核查束流演化和透射率计算。

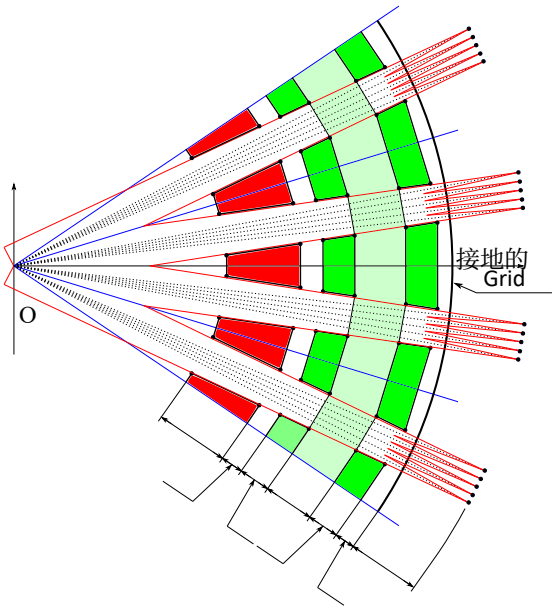


图 2：该参数模型中 NBI BLC 的水平截面几何示意图。

2.1 参数化几何结构描述

图2展示了束线几何结构的水平横截面示意图。接地栅极位于右侧的圆上。各个束let可视为从右侧的点源出发，并在朝左传播时以发散角 ϵ 扩展。由于实际提取出的束let一开始就具有有限尺寸，因此点源位于提取栅极位置后方一定距离处。所有束let都聚焦于左侧的同一焦点 O ，并在该处分别沿水平方向和垂直方向相交，以尽量减小束流在该位置的宽度。显然，焦点 O 处的束流宽度由单个束let的发散程度决定。接地栅极与焦点之间是两个关注的束线组件。沿束流方向，第一个是BDPN，其特征参数包括入口鳍片长度L_{a}、内部长度 L_{PC} （等离子体室长度）和出口翅片长度 L_{b}。第二个组件是RID，其长度为 L_{RID} ，与中和器相距 L_{nr} 。为简化起见，假定所有束let起点以及BDPN和RID的入口、出口表面均位于以点O为球心的球面上。中和器和RID被划分为四个相等的“扇区”，每个扇区对应一组束流，因此只需确定一个，其余的通过旋转获得。首要任务是找到一种算法，用于确定 BDPN 和 RID 中通道的长度和宽度，确保达到所需的几何传输率，同时满足所有外部约束。需要指出的是，图 2 仅为示意图，其中角度以及由此形成的宽长比都经过了大幅夸张。

2.1.1 束流模型描述

每个束let均用高斯功率分布描述，其 $1/e$ 发散度为 ϵ。发散度定义为主束流轴与功率密度函数降至 $1/e$倍处之间的夹角。如果束let与 z轴对齐，且起始于一个点源，则归一化功率密度分布定义为

$$F(x,y,z)=\frac{1}{2\pi\sigma^2(z)}\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2(z)}\right), \qquad (1)$$

其中

$$\sigma(z) = \frac{z \tan \epsilon}{\sqrt{2}}. \quad (2)$$

然而，实验性中性束注入（NNBI）束最好用两个高斯分布的叠加来描述 F_{c} 和 F_{h} ，两者按给定比例共享束let的总功率。发散度较小的束流部分 ϵ_{c} 称为核心，其余发散度为 ϵ_{c} 的部分称为晕部。如果 f_{c}和 $f_{\mathrm{h}} = 1 - f_{\mathrm{c}}$ 分别是核心和晕部的束流分数，则每个束let可描述为

$$F_{\mathrm{b}}(x, y, z) = f_{\mathrm{c}} F_{\mathrm{c}}(x, y, z) + f_{\mathrm{h}} F_{\mathrm{h}}(x, y, z). \quad (3)$$

在计算中，我们采用 $f_{\mathrm{c}} = 0.85$、 $f_{\mathrm{h}} = 0.15$毫弧度和 $\epsilon_{\mathrm{c}} = 7$毫弧度，这些参数与 ITER 中性束注入的规定一致。

整个束线的透射率最终取决于从离子源看去，水平和垂直开口角限制最严格的部件；该部件是中性束注入真空室与托卡马克之间的连接管道：端口尺寸和导管必须足够小，才能适配环向场线圈之间的空间；同时还应尽可能小，以便尽量少占用增殖包层、限制逃逸的中子通量，并减少中性束注入与环形装置之间的气体流动。

由于所有束流束都从远处聚焦到端口中间的单一点，以尽可能减小出口处束流的横截面，因此，将整体束流传输率等同于单个居中束let向出口方向扩展时的束流传输率是合理的；这意味着可以用方程 3 解析估算透射率。对于半宽为 s 、距离点源L处的方形端口（矩形端口的一种特殊情况），归一化透射功率等于

$$p(s, L) = f_{\mathrm{c}} \operatorname{erf}^2\left(\frac{\alpha}{\tan \epsilon_{\mathrm{c}}}\right) + f_{\mathrm{h}} \operatorname{erf}^2\left(\frac{\alpha}{\tan \epsilon_{\mathrm{h}}}\right), \quad (4)$$

其中 $\alpha = s/L$。我们采用设计者方法，根据所需的 p_{t} 选择导管尺寸。具体做法是对方程 4 进行数值反演，从而在给定距离 L 处求得所需的半宽度 s_{t}:

$$s_{\mathrm{t}} = s\left(p_{\mathrm{t}}, L\right) = p^{-1}\left(p_{\mathrm{t}}, L\right). \quad (5)$$

然而，需要注意的是，由于上述原因，增殖包层中的所有孔径都应尽可能小。

这一目标值 p_{t} 是设计的决定因素。为确保达到该值，源与导管出口之间的任何部件都不得对束流造成更多遮挡：换言之，束流束穿过 BLC 时，必须与其轴线保持至少由方程 5 得出的缓冲距离（该距离随束流沿视线扩展而变化）。不过，由于 BLC 的设计采用了很高但很窄的通道，以降低气体通过其中的导通能力，因此导管前方部件通常无需考虑垂直（y）方向；这意味着 BLC 可以按二维方式设计。

然而，这一决定会影响 p_t；由于导管在垂直方向上似乎不再受限， p_t实际上会增大。为此，我们区分 $p_{t,\ \mathrm{tot}}$ 和$p_{t,\ \mathrm{hor}}$：其中，$p_{t,\ \mathrm{tot}}$表示三维导管中的有效总透射率，而$p_{t,\ \mathrm{hor}}$ 表示同一量，但仅限于水平面；设计阶段将采用后者。二者有直接关系，为方便起见，我们只使用后者；提到 p_t 时，指的是$p_{t,\ \mathrm{hor}}$。

在此近似中，束let从点源发出，而实际上束let具有有限尺寸（r_{b} =7 mm）：需要将束let点源相对于上文提到并在图 2 中显示的接地栅极向后移动 L_{rb} ，该位移通过反演方程 5 得出，在此情况下约为 0.6 m。确定狭缝宽度时，必须将 L_{rb} 加到所有其他距离值上。

2.1.2 几何流程

为了绘制 BLC 通道的边界表面，我们首先必须找到最靠下游的边界边缘。对于每个束let，这是该束let最近的 RID 通道壁的下游边缘。因此，只需考虑对应 RID 通道边缘处水平位置最外侧的束let。通过定义独立的

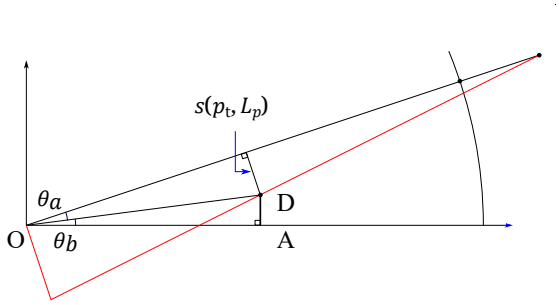


图3：用于确定束流拟合构型初始点的几何结构示意图。

变量 L 为沿最近束let视线方向的 BDPN 与 RID 长度之和，并设定期望的 p_t，即可确定距离 $L_p = L + L_{rb}$处通道最外侧束元所需的壁面间隙 s；而线段 AD 为两个通道之间 RID板允许的最小厚度的一半。一旦确定到焦点 L_f 的剩余距离，便可得出其他量：

$$\theta_a = \tan^{-1} \frac{s\,(p_t, L_p)}{L_f}\,, \tag{6}$$

$$\theta_b = \sin^{-1} \frac{\overline{AD}}{\sqrt{L_f^2 + s^2\,(p_t, L_p)}}\,, \tag{7}$$

$$\overline{AO} = \sqrt{L_f^2 + s^2\,(p_t, L_p) - AD^2}. \tag{8}$$

数值 $\theta_t = \theta_a + \theta_b$ 很重要，因为它描述了第一束流相对于初始水平轴的倾角；随后通过 $D = (AO,\ AD)$确定构型的第一个点。

RID 和 BDPN 中同一通道壁上的所有其他分界点都可以轻松获得，因为它们位于束let起点与 D 之间的直线上。通道另一侧的轮廓可以通过关于中心束元轴镜像得到；对于其他束小束组，即其他扇区，则可通过绕点 O 旋转得到。将该过程应用于整个 NBI 的示例如图 4 所示，而表 1 总结了我们的几何结构描述中哪些量是可变的、哪些量是固定的。

自由量	
变量	描述
L_{PC}	等离子体室长度
L_a	入口鳍片长度
L_b	出口翅片长度（与 L_a 相同）

固定量	
变量	描述
p_t	波导管传输功率
$2 \cdot \overline{AD}$	允许的最小 RID 宽度
L_s	GG 至中和器的距离
L_{nr}	中和器至 RID 的距离
L_{RID}	RID 长度
L_f	至焦点的剩余距离

表 1：总结用于描述束流匹配几何结构的量的类型。

为了区分可行解与不可行解，我们将得到的中和器总宽度与允许的最大宽度进行比较——鉴于束流的形状，这是最严格的边界条件，因为它直接影响所需束源的尺寸——并在参数空间中进行相应标记。

2.2 参数化有限元模型描述

下一步将利用几何集合探索过程中获取的信息，为每种几何结构分别建立 DEMO NBI 的三维模型，并考虑 BDPN 几何结构的变化。随后，使用商业有限元法（FEM）代码 COMSOL®求解该模型中的自由分子流区气体流动，以获取气体密度分布；后处理则由 MATLAB®脚本控制。该代码采用等温角系数法，以处理辐射交换的方式处理气体流动：代码计算各元素之间的视角因子，并根据余弦反射定律对壁面上的扩散进行建模

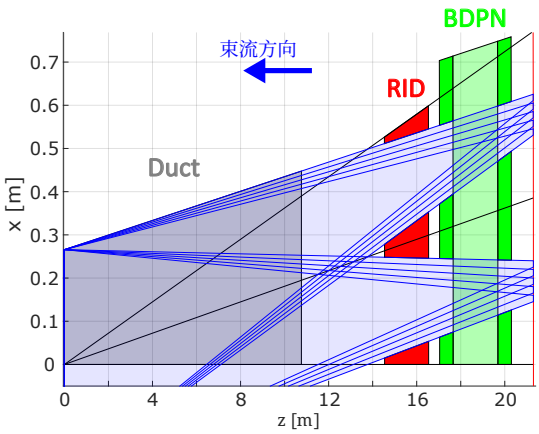


图4：BDPN的一种可能束流拟合方案的几何剖面图。非按比例绘制。

[8]。

图5所示的几何结构参考了最新的 DEMO NBI 预概念设计 [1]，并在尽可能简化系统的同时保留其主要特征，以缩短计算时间。气体源和汇的设置也基于早期关于 DEMO NBI 真空分析的报告（来自 [9]）；具体如下：

- 流入中和器的气体流量 Φ 在模拟中有所变化，并分配至等离子体室内的5个气体入口。
- 设定从源经过加速器的气体注入量为 $Q_{\mathrm{s}} = 3$ Pa $\mathrm{m}^3\ \mathrm{s}^{-1}$。
- 设定从托卡马克进入 NBI 导管的气体流量为较保守的 $Q_{\mathrm{c}} = 2$ $\mathrm{Pam}^3\ \mathrm{s}^{-1}$。
- 真空系统通过容器顶部和底部的“抽气壁”进行建模，暂定捕获系数为 C_{s}= 0.1。

该模型采用等温 formulation，但代码仍允许其中的表面具有不同温度。中和器中的中性气体受穿越束流加热，可通过将中和器内壁设为与气体相同的温度来考虑这一因素。温度

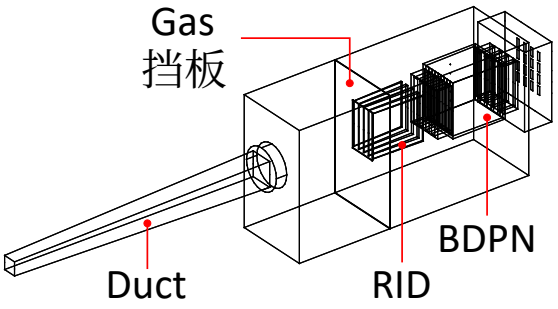


图5：工作中的 DEMO NBI 有限元模型几何图。

梯度效应可通过在等离子体中和器与室温之间的通道内侧设置适当的 T_{NEU} 值来模拟。

鉴于当前问题具有探索性质，原则上需要针对气体流入 Φ 或中和器温度 T_{NEU}的每种变化分别进行一次真空模拟，这会立即变得耗时得不切实际。为避免这一点，我们的思路是通过适当的加权插值来表示流入量和温度的变化：该方法利用 COMSOL 计算出的预设探索边界极值处的解（在本例中，即允许的最小和最大流入量，以及最小（室温）和最大允许温度下的解），然后在 MATLAB 中通过适当加权将它们组合起来，从而得到一个中间解。对于线性问题（本例即为线性问题），该解与直接评估模型所得到的结果非常接近。所设边界为中性气体温度 300 至 600 K，以及中和器粒子流入量在4×10^{21} 和 $2 \times 10^{23}\ s^{-1}$ 之间。这些边界通过试错法选定，同时尽力涵盖 BDPN 对不同流量和温度的完整响应。如果 $(T_{\mathrm{m}}, T_{\mathrm{M}})$,$(\Phi_{\mathrm{m}}, \Phi_{\mathrm{M}})$ 为所设边界，则权重定义为

$$w_{T_{\mathrm{M}}}(T) = \sqrt{\frac{T - T_{\mathrm{m}}}{T_{\mathrm{M}} - T_{\mathrm{m}}}},\ w_{\Phi_{\mathrm{M}}}(\Phi) = \frac{\Phi - \Phi_{\mathrm{m}}}{\Phi_{\mathrm{M}} - \Phi_{\mathrm{m}}},$$
$$w_{T_{\mathrm{m}}}(T) = 1 - w_{T_{\mathrm{M}}},\ w_{\Phi_{\mathrm{m}}}(\Phi) = 1 - w_{\Phi_{\mathrm{M}}}. \qquad (9)$$

如果 $G = \{k = (i,j) |\, i \in \{T_\mathrm{m}, T_\mathrm{M}\} \quad j \in \{\Phi_\mathrm{m}, \Phi_\mathrm{M}\}\}$ 是相应情况下可能的二元组合，则新的插值密度为：

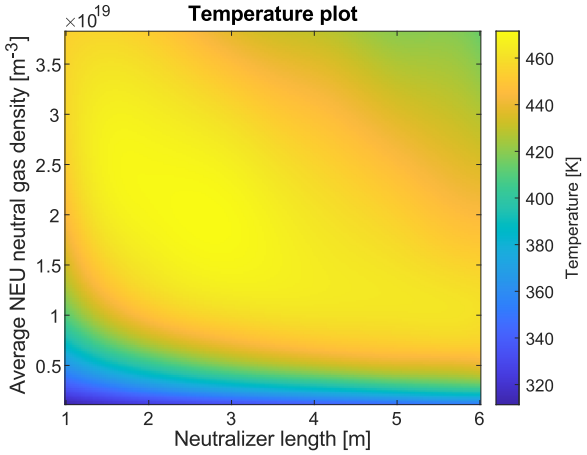
$$w_k(\Phi, T) = w_i \, w_j; \; k \in G \, , \tag{10}$$

$$n(\Phi, T) = \sum_{k \in G}^{|G|} n_k \cdot w_k. \tag{11}$$

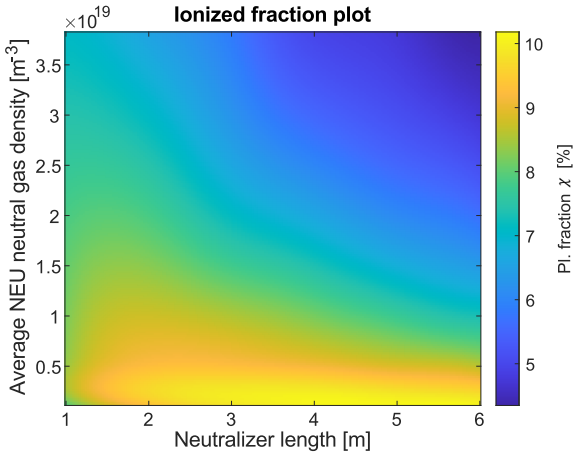
该插值是整个 MATLAB 探索算法的主要组成部分。该算法应用 BDPN 标度关系，并循环遍历可用的流入值，以寻找最大的中和束流分数。

2.3 BDPN 标度关系

为了获得电离度和中性气体温度，必须针对上述参数空间探索中的每个点运行 Starnella 等人提出的 BDPN 模型 [7] 。Starnella 的代码是一种零维平衡代码，用于模拟离子和电子的各种群体及其大量相互作用和损失通道（例如壁面损失、碰撞解离、解离复合等）；其输入包括快负离子束、BDPN 几何结构和填充压力，随后输出相应的平衡温度和预期电离度。由于单次 BDPN 模型运行需要数个 CPU 小时，这种做法极不切实际。为解决这一问题，在保持尖 cusp 磁场强度、尖 cusp 间距等其他众多变量不变的情况下，仅针对较少数量的中和器长度 L_PC、宽度、高度以及气体流量运行 BDPN 模型。所得数据以多维查找表的形式存储，因此只需通过插值即可获得特定参数组合所对应的模型输出。图 6 展示了根据该表得出的气体温度和电离度随中和器长度变化的关系。



(a) BDPN 的温度缩放。中和器长度固定时，气体密度越大，束流的加热效应越弱；气体密度极低时，束流不受影响地穿过，不会加热气体。



(b) BDPN 的电离度缩放。中和器长度固定时，气体密度越大，束流的电离效应越弱。

图 6：在高度和宽度恒定时，BDPN 标度关系在其定义域内的曲线图。

2.4 探索算法

一旦几何参数空间中的某个点被判定为光束光学可行，并且查找表中已提供其密度的加权插值结果，就会启动探索算法。该算法旨在系统扫描 BDPN 标度查找表中可用的流入参数空间，同时确保解在气体温度和气体流动方面保持一致。具体如下：

- 吞吐量循环已启动：对于每个给定的 Φ值，根据温度在边界 T_{m} 和 T_{M}之间的变化，计算中和器内部的平均密度。

- 将该曲线与在相应固定中和器尺寸下、根据 BDPN 标度关系得到的气体温度—平均密度曲线求交。交点处的温度即为工作温度T_{NEU} ，计算必须在该温度下继续进行。

- 利用给定的 Φ 和T ，通过加权插值获得最终的中性粒子密度分布；同时，根据中和器平均密度和 BDPN 标度关系得到电离度 χ。

- 中性气体分布和等离子体密度可用于推导束流通过 NBI 的束流比例演化，所依据的是文献中的截面数据（来自 Barnett [10]和 Berkner [3]）。

- 对于每个允许的 Φ值，重复上述过程；在 NBI 导管出口处具有最高中和束流分数的值，被视为给定几何集合的最优解。其他重要量（例如相应的特定流入量和温度）也会被存储，以便分析下一种几何结构。

通过这种方式，可以建立由参数组合（L_{a}， L_{PC}）确定的、光学上可行的几何结构与相应指标之间的相关关系，例如 NBI 出口处的中和束流分数、所需气体流入量和温度；从中很容易找出中性束功率最高的方案。

仅靠文字可能难以理解整个算法，附录 A 中提供了该过程的详细流程图。

2.5 粒子追踪仿真

上一步的结果，即中性气体密度分布、等离子体密度分布和几何结构，是在 COMSOL 中进行全中性束注入粒子追踪仿真的输入；输出则是最终透射至等离子体的中性粒子比例，以及粒子损失在各个 BLC 上造成的热负荷。其他边界条件设置如下：

- 粒子的位置和方向通过二维高斯速度分布确定，其宽度由所选束流的 $1/e$发散度决定，峰值对应于 1 MeV 能量，并在 3σ 处截断，以避免粒子沿过宽的轨迹运动。

- 每个束let由核心和晕比例组分构成，各自的导引中心均位于球形 GG 表面上，方向指向与焦点重合的中心。

- 分配给粒子的总电流为 40 A，等于从 1280 个孔径（半径 7 mm）提取的电流；提取电流密度为 254 A m^{-2} ，加速器的假定效率为 0.8。该电流按各自比例分配给核心和晕部组分。

- 束流演化通过碰撞算法进行建模，采用与 2.4 节相同的截面来推导反应率 ν。

- 仅考虑两种外场：RID 在 50 kV 下产生的外场，以及 BDPN 两端的约束磁场；目前忽略了其他源（例如托卡马克的极向杂散场）。

为了评估端部约束磁体对交叉带电粒子束流的偏转效果，已初步采用一种磁体配置，

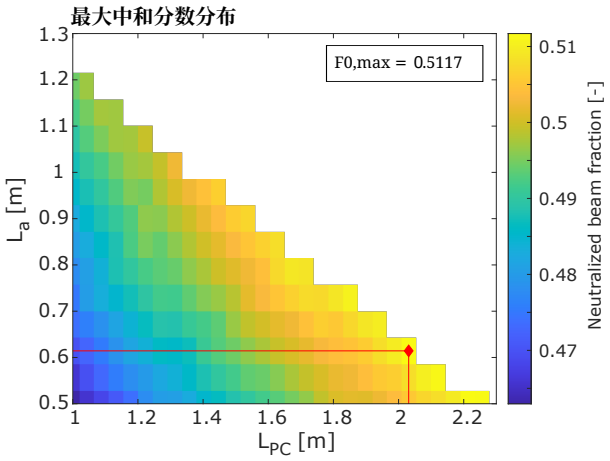


图 7：BDPN等离子体室长度（L_{PC}）和翅片长度（$L_{\mathrm{a}} = L_{\mathrm{b}}$）参数空间图，展示了各中和器配置在最佳气体流量下的注入中性粒子分数。红色菱形标示全局最大值，右上方的白色区域表示不允许的组合。

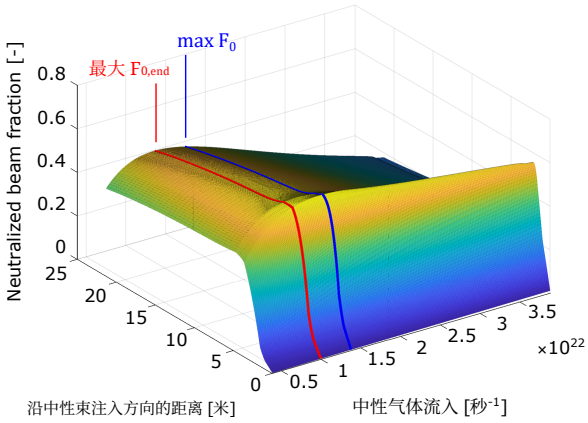


图 8：中性粒子比例沿 NBI（从右向左）的演化随气体流入量变化的曲线。红线表示在 NBI 出口处中性粒子比例达到最大值的束流演化曲线，蓝线表示在中和器末端达到最大值的束流演化曲线。

其钐钴磁体采用可行的 20 mm 正方形横截面。

3 结果

3.1 BDPN 模型的结果

参数探索得出了一些有趣的结果：将鳍片与中和器长度的每种可行组合及其对应的、在 NBI 出口处达到最大值的中性粒子比例绘制成图，即可直观地看出绝对最高值的位置（图 7）。需要说明的是，这些数值并非插墙效率，而是中和产额，且仅代表其中一部分。本文稍后将利用现有数据估算插墙效率。

最大值为 0.5117，位于 L_{PC} =2.03 m、$L_{\mathrm{a}} = L_{\mathrm{b}} = 0.614$ m，气体流入量为$\Phi = 1.01 \times 10^{22}$ s $^{-1}$（相当于 0°C 时的 38 Pa m^3 s^{-1}）。解空间呈三角形，这是最大宽度约束导致的，其上边缘标示了中和器总长度 $L_{\mathrm{NEU}} = L_{\mathrm{a}} + L_{\mathrm{PC}} + L_{\mathrm{b}} = 2L_{\mathrm{a}} + L_{\mathrm{PC}}$达到可实现最大值的点。

观察中性粒子比例沿束线随气体输入量变化的曲线（图 8）时，还可以发现另一方面。直观地说，为了最大化中性粒子比例，人们会尽可能将中和器的工作点设在接近可用上限的位置；然而，图 8 展示了不同的情况：在束线末端实现最大中性粒子比例的理想束流演化，其最大值为$F_{0,\ \mathrm{end}}$)，对应的中和器气体流量低于在中和器出口实现最大中和效果所需的流量（max F_0）。这是因为要达到中和器的最佳性能需要更多气体，进而使中和器下游的密度升高并增加再电离损失，造成的损失超过了所得增益。

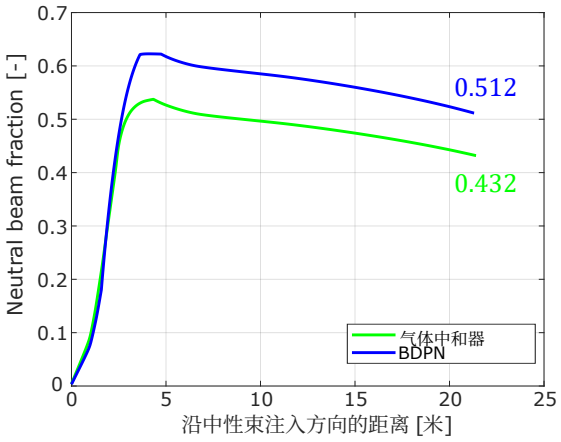


图 9：气体中和器（绿色）与 BDPN（蓝色）的比较。图中显示中性束注入器出口处的最大中性粒子比例。

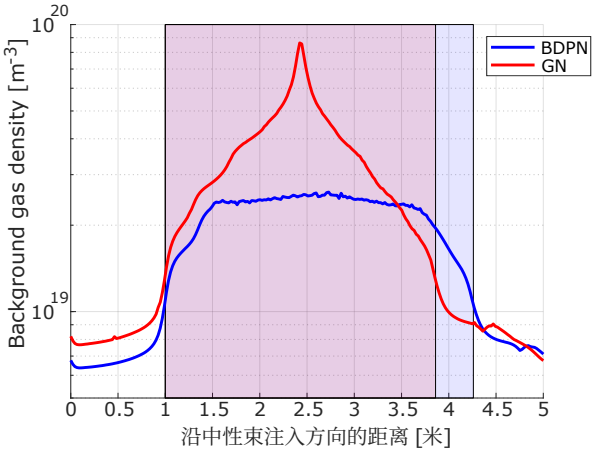


图 10：中和器区域气体中和器与 BDPN 之间的背景气体分布比较。图中标出了两种情况下中和器的轮廓。

3.2 与气体中和器的比较

由于 BDPN 被提议用来替代气体中和器（GN），因此有必要以有意义的方式将 BDPN 的结果与 GN 进行比较。因此，我们将其与一种“等效”气体中和器（GN）进行比较，其中“等效”指的是：

- 占用空间（长度和宽度）相同，且不超过最大允许值。
- 相同的束流质量和目标功率分数。
- 采用相同的束流匹配设计，相当于一个 BDPN，但 $L_{\mathrm{PC}} = 0$ 保持恒定。
- 同样通过调节气体流入量来最大化中性粒子比例；不过现在4个通道各有3个气体入口（共12个孔径）。

两种情况下最佳的中性束演化显示在同一张图中，以突出差异（图 9）；中性气体分布也同样如此（图 10）。对比表明，气体中和器的百分位数比对应的 BDPN 低约 8 个百分点（$F_{0,\ \mathrm{end}} = 0.432$），长度则相近，均为 2.86 m。在这种情况下所需的总流入量为 $\Phi = 1.09 \times 10^{22}\,\mathrm{s}^{-1}$（41 Pa $\mathrm{m}^3\,\mathrm{s}^{-1}$，温度为 0°C）。可以采用与文献 [1]类似的方法，估算这两种情况下中性束注入的插座效率：将结果中的新数值代入效率链后，气体中和器的插座效率为 0.30，BDPN 的插座效率为 0.34（表 2）。

3.3 粒子追踪模型的结果

运行粒子追踪模型，以确定热负荷分布和功率平衡，并提供有价值的交叉验证，以确认先前的结果（图 11）。为评估末端磁体对束流离子的影响，还运行了一项除不含磁体外其余设置完全相同的模拟。此外，为交叉验证束流拟合设计能否传输所需功率，还运行了一项不考虑反应和外场的模拟。结果列于表 3。

模拟结果显示，透射率的解析估算值与

	参考值 ITER HNB	选项 1 2022 DEMO NBI （带气体中和器）	选项 2 2022 DEMO NBI （含 BDPN）
提取电流密度 [A m^{-2}]	289	251	224
总提取电流 [A]	57	50	44
标称加速电压 [MV]	1	1	1
辅助/提取总效率	0.9	0.9	0.9
总功率 [MW]	63	55	49
剥离/晕电流损失效率	0.7	0.8	0.8
加速电流 [A]	40	40	35
离子源/中和器传输率	0.95	0.95	0.95
中和器效率	0.55	0.54	0.62
束线/导管传输率	0.8	0.82	0.8
估算的等离子体功率 [MW]	16.67	16.67	16.67
注入器总效率	0.26	0.30	0.34

表 2：不同 DEMO NBI 选项的主要参数和效率。第一列数据来自[1]，其余两列则纳入了本文获得的结果。

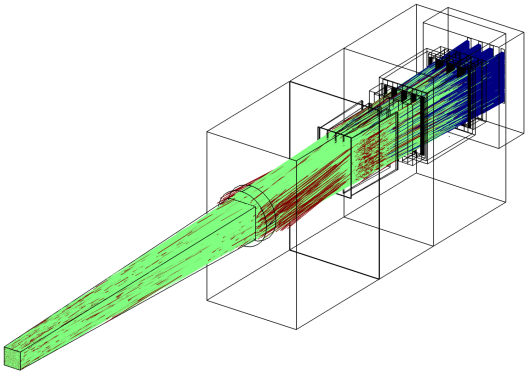


图 11：粒子模型的轨迹图。蓝色表示 D^- 离子，绿色表示 D^0 中性粒子，红色表示 D^+ 离子。

数值结果非常吻合，证实了束流拟合设计方法的合理性。另一项重要的验证是所达到的中性粒子比例：在 MATLAB 中，该值通过微分方程组求得；而在 COMSOL 中，束流演化则通过粒子碰撞算法模拟。为验证这一点，可以将无磁场情况下中性束注入末端的中性粒子比例（0.4820）除以数值传输率（0.9192），得到有效数值中性粒子转化率 0.524，并与图 9 的原始 $F_{0,\max}$ （0.512）进行比较。两者仅相差约 3%，考虑到近似程度，这一结果相当理想。作为束流拟合方法的结果，热负荷功率密度分布均匀，中和器翅片的峰值约为 0.95 MW m^{-2} ，RID 面板的峰值约为 3.44 MW m^{-2} （图 12）。

表 3 中的数据还强调了为 BDPN 两端选择合适磁体配置的重要性：模型中采用的配置只是初步尝试，但偏转已足以造成额外 2 MW 的损失。

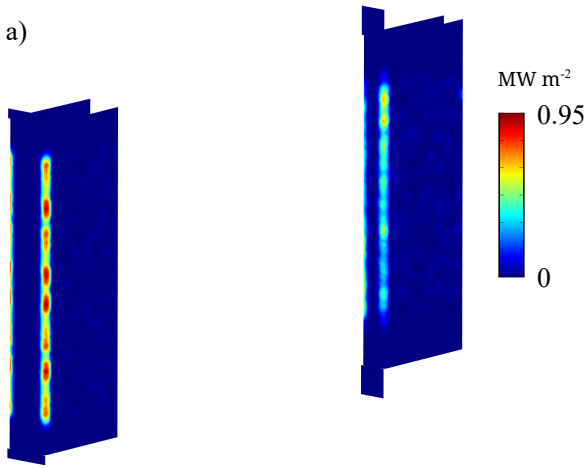


图 12：所关注 BLC 的热负荷分布图。图 a) 为中和器的中央鳍片组，图 b) 为 RID 的中央板。

	无磁场	有磁场
初始功率	40.04 MW	
中和器	0.671 MW	0.705 MW
RID	14.90 MW	15.04 MW
出口 (D^0)	19.30 MW	17.29 MW
GG - 等离子体	48.20 %	43.18 %

	数值	解析
透射率	91.92%	91.90%

表 3：BDPN 的各项粒子模拟结果。上表自上而下依次为：在接地栅极发射的初始功率、中和器中的功率损失、沉积在 RID 上的功率、束线出口处进入环形装置的功率，以及注入功率占初始功率的比例；下表：采用解析方法和不考虑任何磁场或电场的数值粒子追踪计算得到的几何传输率对比。

3.4 进一步改进的可能性

所展示的结果是在既定初始边界条件下进行优化所得，因此并非全局最优解。优化过程也揭示了不同量之间如何相互影响。这些权衡关系有助于构想新的几何构型，在其中放宽某些约束，从而获得更好的性能。

例如，我们还研究了双叶片束流设计：将束组阵列从 4×4 重构为 2 组水平、8 组垂直的束let配置，这与此前考虑的一种 DEMO NBI 设计类似 [2]。随后适当增加容器和 BLC 的高度，以适应新的束流形状，得到图 13 所示的几何结构。这种配置的优势在于，BLC 的宽度大幅减小，并且随着束线长度增加，宽度几乎保持不变：这是

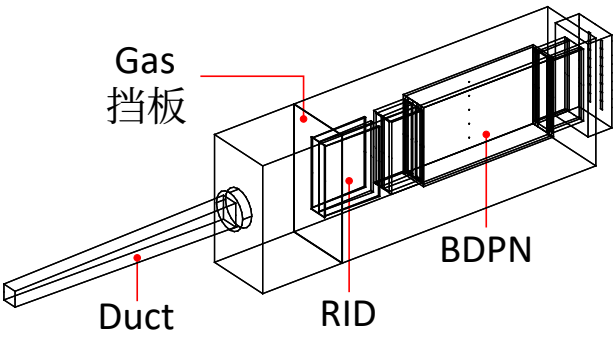


图 13：双叶片束流设计的几何图。

因为侧束流的扩展边界几乎完全被向中心聚焦所补偿。显然，这种做法不能无限延伸，因为包层孔径也必须相应扩大；不过，它可以实现明显更长的中和器。

扩展了 BDPN 标度关系，以涵盖最长 6 m 的中和器长度，并再次运行了优化程序。

中和效率的最高值为 0.56（比四叶片束流高 5 个百分点），出现在其参数空间图的最右上角（绘制方式与图 7 相同）。这意味着，此次选定的参数空间范围（最大值为 L_{a}，L_{PC} =(1.5 m，6 m)，已达到当前缩放所允许的最大范围）仍然不足以包含全局最大值。尽管如此，这次尝试证明，不同的几何结构选择方法可能会带来更高的中和率。

4 结论

本文首次对配备 BDPN 的完整 NNBI 束线进行了建模并优化其参数，假设采用真实的几何结构和边界条件。考虑几何传输率、等离子体中和器所达到的电离度随其几何结构和供气流量的变化、整个束线中的中性气体分布，以及沿

整个束线的束流组分演化，我们计算得出，从离子源加速器的接地栅极到束线末端的中性粒子产额（即注入的 D^0 通量除以加速的 D^- 通量）约为 48 %，束线的墙插效率为 0.34。与采用相同优化流程和边界条件的气体中和器相比，中性粒子比例约高 6 个百分点，墙插效率约高 4%。

这次优化工作揭示了一些较为直观和不那么直观的权衡。显然，延长 BDPN，进而延长整个束线，意味着增殖包层中的导管开口必须扩大，否则就会造成更大的几何损失。然而，为了在束线末端获得最佳中性粒子通量，对中和器几何结构和气体流动进行联合优化时，较长的中和器更为有利。有趣的是，对于给定的几何结构，使中和器出口处中性粒子比例达到最高的气体流量，高于使束线末端中性粒子比例达到最高的气体流量。这是因为额外的气体会导致中和器下游的再电离损失增加，其影响超过了 BDPN 中和程度的提升。理解各种权衡对于指导未来的设计工作至关重要。

显然，此处报告的数值是在一组特定边界条件下进行优化得到的。这些边界条件参考了欧洲DEMO现有NBI束线设计的空间包络，该设计采用气体中和器；但在某种程度上，这些条件具有任意性，因为每一项都可能存在争议。不过，一旦外部边界条件确定，这里开发的优化框架便可用于指导在任何一组此类条件下进行设计。

5 致谢

本研究是在 EUROfusion联盟 框架内开展的，由欧盟通过欧原子能共同体研究与培训计划资助（资助协议编号101052200 - EU-

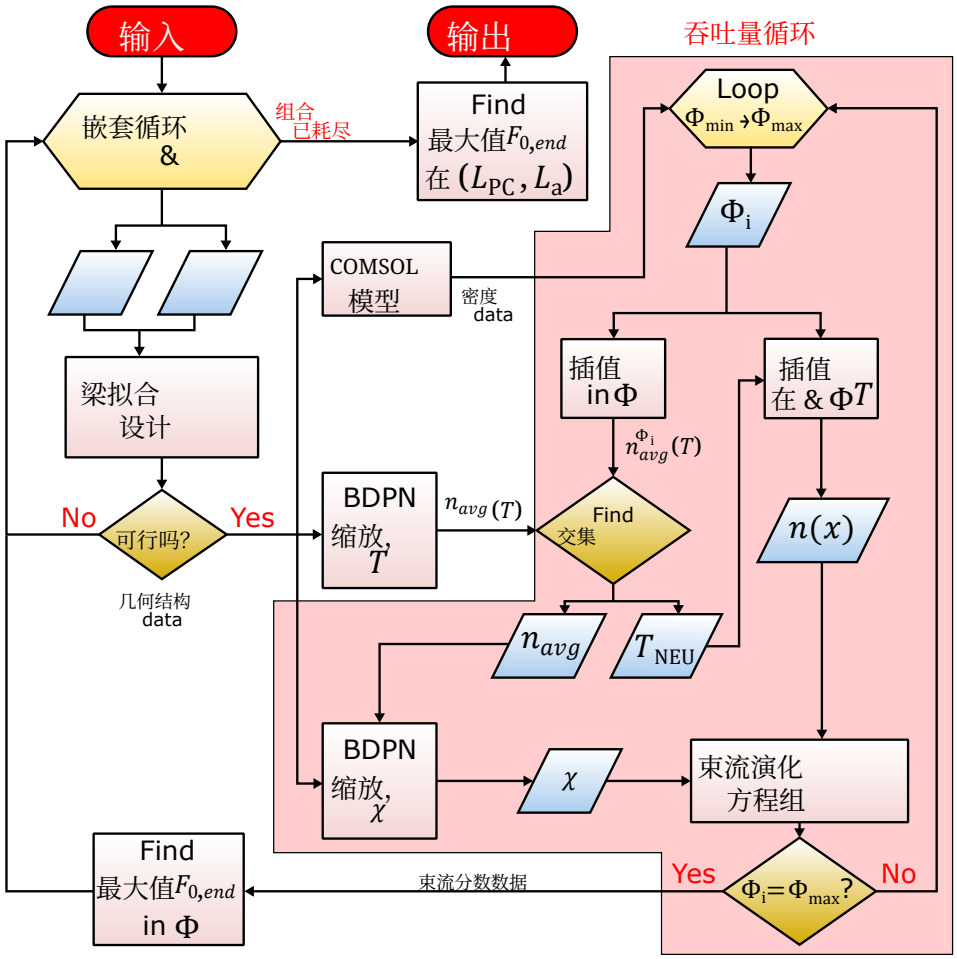
ROfusion）。然而，文中所表达的观点和意见仅代表作者本人，并不一定反映欧盟或欧盟委员会的立场。欧盟或欧盟委员会均不对这些观点和意见承担责任。

参考文献

[1]M.Q. Tran 等。欧盟*DEMO*加热与电流驱动的现状及未来发展。《聚变工程与设计》180 (2022) DOI: j.fusengdes.2022.113159[2] P. Sonato 等。*DEMO*中性束注入器的概念设计：主要进展与研发成果。《核聚变》57 (2017) 056026.[3] K. H. Berkner，用于 H^- 或 D^- 束流的等离子体中和器。第二届负离子与负离子束产生及中和国际研讨会，纽约州厄普顿（1980）。[4] M. Hanada、M. Kashiwagi、T. Inoue、K. Watan- abe 和 T. Imai。等离子体中和与气体中和高能负离子束的实验比较。Rev. Sci. Inst. 75 (2004) 1813-1815.[5] E. Surrey、A. Holmes。束流驱动等离子体中和器。AIP会议论文集1515, 532 (2013).[6] I. Turner、A. Holmes。基于国际热核聚变实验堆束流几何结构的束流驱动等离子体中和器模型。《聚变工程与设计》（2019）。[7] G. Starnella、C. Hopf、P. N. Maya。关于适用于验证聚变反应堆中性束注入器束流驱动等离子体中和器可行性的实验。《核聚变》（2022）。《分子流用户指南》，第 62-78 页。COM- SOL Multiphysics® v. 6.0。COMSOL AB，瑞典斯德哥尔摩。2021

[9] L. Xueli 等。中性束注入真空要求的最新评估。版本 1.3 (2020)，IDM ID：EFDA D 2NY6UX。_ _

[10] C. F. Barnett，《氢原子、H_2，氦原子和锂原子及离子与原子和分子的碰撞》。橡树岭国家实验室技术报告第 ORNL-6086 号（1990 年）。


输入
输出
吞吐量循环
嵌套循环
&
组合
已耗尽
Find
最大值$F_{0,end}$
在 (L_{PC}, L_a)
Loop
$\Phi_{min} \rightarrow \Phi_{max}$
Φ_i
COMSOL
模型
密度
data
梁拟合
设计
插值
in Φ
插值
在 & ΦT
$n_{avg}^{\Phi_i}(T)$
No
可行吗?
Yes
几何结构
data
BDPN
缩放,
T
$n_{avg}(T)$
Find
交集
$n(x)$
n_{avg}
T_{NEU}
BDPN
缩放,
χ
χ
束流演化
方程组
Find
最大值$F_{0,end}$
in Φ
束流分数数据
Yes
$\Phi_i = \Phi_{max}$?
No

探索算法流程图