

零维系统模型改进及其对 EAST 稳态运行区的分析和预测*

于明生¹⁾²⁾ 钱金平^{1)†} 丁斯晔³⁾ 任启龙¹⁾ 叶阳¹⁾²⁾ 万宝年¹⁾²⁾

1) (中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学, 合肥 230026)

3) (通用原子能公司, 圣地亚哥 92186-5608, 美国)

(2023 年 3 月 10 日收到; 2023 年 4 月 4 日收到修改稿)

零维系统模型已广泛应用于下一代托卡马克装置设计以及聚变反应堆等离子体性能的预测和分析, 但普遍采用物理近似和经验公式会导致较大的系统性误差. 本文通过引入等离子体平衡程序使主要等离子体分布参数及其计算基于磁面信息, 引入 Sauter 模型的自举电流系数与碰撞率变化关系改进自举电流计算, 利用 EAST 上的实验结果对改进后的模型进行验证, 零维系统模型计算结果与动理学平衡分析结果基本符合. 利用改进模型从已有实验结果出发, 对 EAST 上实现 500 kA 等离子体电流的稳态、长脉冲运行区所需要的加热/电流驱动功率及其能够达到的归一化比压进行了分析和预测. 计算结果表明, EAST 在 7.0—9.5 MW 加热/驱动功率, 约束改善因子 H_{98} 为 1.25—1.35, 归一化密度 f_{nG} 约为 0.9 的参数范围内可以实现 500 kA 等离子体电流且自举电流份额在 50% 以上的稳态运行; 9.5 MW 加热/驱动功率, H_{98} 为 1.0—1.4, f_{nG} 为 0.8—1.0 的参数范围可以实现较高性能的长脉冲或稳态运行. 综合来说, 提升等离子体约束性能, 可在较低的加热/驱动功率下实现同样等离子体参数的完全非感应运行, 扩展等离子体运行区, 是实现高参数等离子体稳态运行最为有效的途径.

关键词: 零维系统模型, 平衡, Sauter 模型, 稳态运行

PACS: 52.65.-y, 52.55.Fa

DOI: 10.7498/aps.72.20230364

1 引言

零维系统模型从能量约束时间的实验经验定标率出发, 通过求解热核聚变等离子体热平衡方程 $0 = P_h + P_\alpha - P_R - W/\tau_E$ 以及粒子平衡方程 $n_e = \sum_i n_i Z_i$ 在一定的解析近似条件下推算等离子体的主要参数, 其中 P_h 为外部注入加热功率, P_α 为 α 粒子加热功率, P_R 为辐射功率, W/τ_E 为运输的功率, W 为内能, τ_E 为能量约束时间, n_i 和 Z_i 分别为各种离子密度及其电荷数, 通过粒子平衡方程,

计算有效电荷数 $Z_{\text{eff}} = \sum_i n_i Z_i^2 / n_e$. 模型简洁明了, 对应的计算程序运行快, 已被广泛应用于下一代托卡马克装置以及聚变反应堆等离子体性能的预测和分析. 当前已有很多用于对托卡马克工程和物理设计研究的零维系统模型, 例如美国 general atomic 发展的通用原子系统代码 (general atomic system code, GASC) 零维系统模型^[1], 用来设计和优化聚变发展装置 (fusion development facility, FDF) 以及装置运行的功耗; Johner Jean 发展的 HELIOS 零维系统模型^[2] 使用了更高精度的等离子体位形计算等方法, 对国际热核聚变实验堆

* 国家自然科学基金 (批准号: 11975274) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jqqian@ipp.ac.cn

(international thermonuclear experimental reactor, ITER) 的等离子体运行参数开展了分析; 欧盟发展的 PROCESS 零维系统模型^[3] 包含了更广泛的物理和工程内容, 如等离子体物理、热电转换、建造和运行成本等, 用于设计优化欧盟聚变示范堆 PPCS 和建设运行成本的分析评估. 中国聚变工程试验堆 (China fusion engineering test reactor, CFETR) 的物理概念设计也基于零维的系统模型确定了实现物理目标需要的装置主要工程参数和加热功率^[4], 并基于 EAST 稳态实验结果对 CFETR 的稳态运行开展了初步的分析^[5]. 零维系统模型可以快速进行各种参数的扫描计算, 可以用于装置参考运行点的辅助设计并为更为精确的一维数值模拟提供准备, 也可以用于装置运行参数和所需加热、电流驱动条件的预测从而快捷地为实验设计提供参考. 基于零维系统模型的方法, 以 ITER 物理和工程设计为基础, 结合偏滤器靶板热负荷、稳定性等约束条件, Zohm^[6,7] 分析讨论了商用聚变示范堆 (DEMO) 所需要的最小装置尺寸, 对采用高温超导技术实现高纵场下的稳态等离子体运行区做了仔细的分析.

零维系统模型在求解能量和粒子平衡方程中, 通常使用了一系列解析理论近似表达式和基于实验总结的物理关系^[1,8–11]. 例如, 通过等离子体大半径 R 、小半径 a 、拉长比 κ 和三角形变 δ , 利用 q_{95}^{ITER} 近似表达式计算等离子体几何位形和安全因子 q_{95} ; 对等离子体分布参数假设对称并具有类抛物分布, $n(\rho) = (n_0 - n_1)(1 - \rho^2)^{\gamma_n} + n_1$, γ_n 为密度分布的峰化因子, $\rho = r/a$ 为归一化等离子体小半径, n_0 为中心等离子体密度, n_1 最外封闭磁面的密度, 电子、离子温度分布也均采用类似的假设; 但杂质分布一般而言假设其有效电荷数 Z_{eff} 分布为常数, 利用电中性条件假设某种杂质含量计算离子密度分布. 对于外部注入的加热和电流驱动, 模型中直接利用了等离子体的吸收功率, 驱动电流是基于理论推导的驱动效率表达式、结合实验得到的经验关系^[1,12–14] 确定的; 对于氦氖燃烧等离子体, 其聚变功率 P_{fus} 由聚变反应率、离子温度和氦氖离子密度分布计算, α 粒子加热功率 $P_\alpha = P_{fus}/5$, 欧姆电流可简单由等离子体电阻和环电压 V_L 计算, 其分布可以通过等离子体电子温度分布计算电导率以及假设空间均匀环向电场 ($V_L/(2\pi R)$) 计算, 进一步还可以计算欧姆加热功率; 总自举电流通过近似

表达式 $I_{bs} = C_{bs}\beta_p A^{-1/2}I_p$ 计算, 其中 C_{bs} 为预设的常系数, 通常与等离子体碰撞率相关, $A = R/a$ 为装置的环径比, β_p 为等离子体极向比压, I_p 为等离子体电流. 求解等离子体能量平衡过程中利用了能量约束时间的实验定标律, 最常用的有 $\tau_{98,y2}^{\text{ITER}}$ H 模定标率^[15] 和 τ_{89L}^{ITER} L 模定标率^[16], 其实际能量约束时间与定标率的比称之为能量约束改善因子, 通常表达为 H_{98} 或者 H_{89} , 更为详细和具体的零维模型描述见文献^[1–3, 17].

基于零维系统模型的计算不可避免地会造成相对应的系统性误差. 对于实际的等离子体放电, 等离子体高场侧的磁面和低场侧的磁面并不对称, 并且这种不对称会使等离子体磁轴向低场侧偏移, 产生所谓的 Grad-Shafranov 位移^[18,19], Grad-Shafranov 位移的大小与等离子体位形、极向比压 β_p 和等离子体电流密度分布密切相关, 尤其在小纵横比、大三角形变和高 β_p 下 Grad-Shafranov 位移会很大, 使得等离子体磁轴更加偏向低场, 高低场磁面更加的不对称, 如果没有磁面信息而仅对分布参数进行空间坐标积分, 对等离子体内能及其磁比压 (β , β_p) 的计算会带来比较大的误差, 也会进一步的给自举电流的计算带来较大的偏差; 另外, 由于使用的参数分布是假设的类抛物线函数, 与实验实际测量的参数分布不能完全吻合, 给实验结果分析和外推也带来了较大的偏差. 另一方面, 对于自举电流的计算, 由于缺少准确的参数分布在磁面上的信息, 零维系统模型通常采用预设自举电流系数 C_{bs} 并通过公式 $I_{bs} = C_{bs}\beta_p A^{-1/2}I_p$ 计算, 从 Sauter 物理模型^[20] 我们知道, 自举电流系数与等离子体碰撞率存在一定关系, 如果将系数设为常数忽略碰撞率的变化, 同样会产生一定的问题. 对于未来聚变功率的计算, 总的聚变功率是由反应率与氦氖密度乘积的积分得来, 如果积分没有使用磁面会造成比较大的误差.

本文的主要工作, 针对以上两方面的问题, 在保持零维系统模型快速计算这一优势的前提下对模型进行一些改进, 仍然保持零维系统模型简洁明了的特性. 首先, 对于等离子体位形近似问题, 通过引入等离子体平衡位形反演程序^[21,22] (equilibrium fitting, EFIT) 计算等离子体位形, 这样可以使得所有的参数分布都基于磁面坐标. 如果采用零维系统模型开展实验分析比对, 可以将实验测量到的在实空间的参数分布映射到磁面上, 使模型中的

计算基于磁面信息, 这样既可以降低由近似位形引起的计算误差, 还可以通过 Sauter 解析模型^[20] 计算自举电流系数 C_{bs} 随碰撞率的变化更加准确地给出自举电流, 或者直接计算自举电流密度分布. 进一步地, 利用改进后零维系统模型, 基于 EAST 上已有的完全非感应等离子体实验结果, 对在更高等离子体电流下实现稳态或长脉冲的相关实验条件进行了分析.

2 零维系统模型的拓展

2.1 零维系统模型拓展

本文是在用于 CFETR 概念设计所使用的零维系统模型基础上拓展的^[4,5], 为了使零维系统模型的计算基于磁面信息, 在模型中引入了 EFIT. EFIT 程序可以从实验磁测量中计算等离子体平衡位形及相应的磁面, 更为准确的平衡位形可以利用激光偏振干涉仪 POINT 测量作为约束条件计算获得^[23], 位形以及磁面等信息存储在名为 g-file 的文件内. 然后将从实验诊断中获取的实空间分布参数映射到磁面上, 这样就获得了基于磁面的分布参数, 从而使模型与实验建立联系, 通过模型计算的结果可以与实验结果进行直接对比.

在零维系统模型中, 等离子体电流由三部分组成: 欧姆电流、驱动电流和自举电流. 欧姆电流通过等离子体电导和环向电场计算, 外部驱动的电流由驱动效率和注入功率的半经验表达式计算^[24], 自举电流通过理论近似表达式计算. 在求稳态解时欧姆电流设置为零, 此时, 自举电流的大小就直接决定了维持总的等离子体电流所需要的驱动功率. 对于自举电流的计算, 在零维系统模型中, 等离子体主要参数都是假定分布的, 计算的自举电流不是很准确, 通常情况用基于解析理论近似物理表达式: $I_{bs} = C_{bs}\beta_p A^{-1/2} I_p$, 这里 C_{bs} 一般根据各装置尺度和等离子体参数范围选取, 具有较大的不确定性.

Sauter 模型已被广泛应用于等离子体动力学平衡中计算自举电流, 其正确性得到了大量的实验验证^[20,25]. 由 Sauter 模型可以知道, 自举电流依赖于等离子体压强、密度和温度的梯度且与等离子体碰撞率密切相关, 这就对电子和离子密度与温度分布测量的精确度要求非常高, 通常对测量数据基于磁面利用函数拟合的方式获得, 这中间过程不可避

免地会产生一定的误差. 图 1 为 EFIT+ONETWO 动力学平衡分析^[26] (红色线条) 和零维系统模型 (蓝色线条) 分别对 EAST 炮号 #90615 在 6540 ms 时刻用 Sauter 模型计算的自举电流密度分布, 尽管两种计算出来的自举电流密度分布相似, 但动力学平衡分析给出的总自举电流份额为 49%, 而零维系统模型计算给出的总自举电流份额在 67%, 显然零维系统模型中没有其他物理约束条件的迭代计算不可避免的带来了较大的偏差.

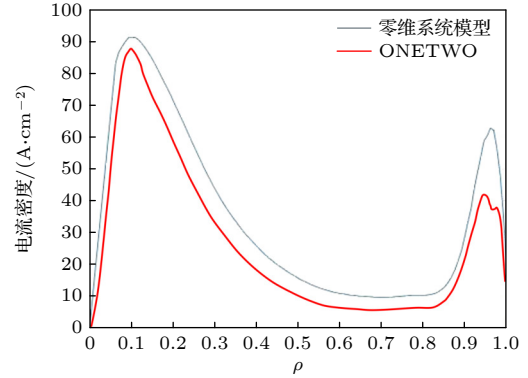


图 1 ONETWO 动力学平衡分析^[26] (红色线条) 和零维系统模型 (蓝色线条) 分别对 EAST 炮号 #90615 在 6540 ms 时刻用 Sauter 模型计算的自举电流密度分布
Fig. 1. The ONETWO kinetic equilibrium analysis^[26] (red line) and the zero-dimensional system model (blue line) respectively calculated the bootstrap current density profile of EAST shot #90615 at 6540 ms using the Sauter model.

从 Sauter 模型可以看到, 等离子体压强梯度在自举电流的产生中占主导, 这和近似解析理论得到的 $I_{bs} = C_{bs}\beta_p A^{-1/2} I_p$ 是一致的, 这里 C_{bs} 与 Sauter 模型中压力梯度项的系数 \mathcal{L}_{31} 等效, \mathcal{L}_{31} 是等离子体碰撞率的函数. 作为近似可以通过动力学平衡分析得到某一等离子体碰撞率下的 C_{bs} 作为参考值, 然后通过 \mathcal{L}_{31} 与 C_{bs} 等效关系推算其他碰撞率下的 C_{bs} 值. 为此对 \mathcal{L}_{31} 与等离子体碰撞率的数据在较大的运行参数范围进行了拟合, 如图 2 所示, 拟合函数用于零维模型中对任意等离子体碰撞率下自举电流的快速计算.

此时重新考虑图 1 自举电流的计算, 通过对分布函数的积分计算以及平衡的重建, 得到此时的平均碰撞率为 0.664. 通过拟合公式 $f(\nu_{e*}) = C_{bs}$ 计算得到新的自举电流系数为 0.479, 进而由公式 $I_{bs} = C_{bs}\beta_p A^{-1/2} I_p$ 计算自举电流份额为 50%, 和动力学平衡分析结果 49% 较为吻合. 这样的计算避免了使用分布参数的梯度带来的不确定性同时又

考虑了等离子体碰撞率变化带来的修正,显著减小了自举电流计算的误差.为了验证这一方法的普适性,另外选取两炮纯射频辅助加热/电流驱动的实验#89790和#77801进行分析,两炮实验结果均利用EFIT+ONETWO进行过动理学平衡分析,给出的自举电流份额^[27]分别为40%和29%,极向比压 β_p 分别为1.65和1.30,零维系统模型计算出的碰撞率分别为0.316和0.315,自举电流系数分别为0.548和0.549,相应的自举电流份额分别为43%和32%,与动理学平衡分析结果相近.

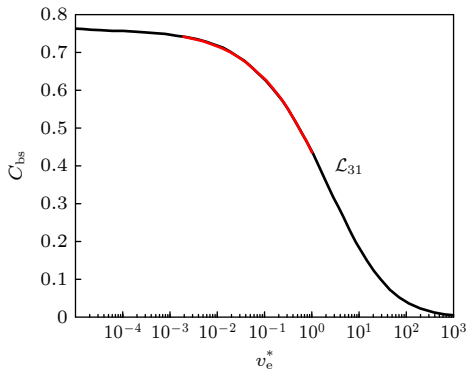


图2 对 Sauter 模型 \mathcal{L}_{31} 部分与等离子体碰撞率的关系拟合,黑线为 \mathcal{L}_{31} (来自文献^[20]),红线为拟合曲线

Fig. 2. Fitting the relationship between the Sauter model \mathcal{L}_{31} part and the collision rate of the plasma, the black line represents \mathcal{L}_{31} (from Ref^[20]), and the red line represents the fitting curve.

零维系统模型依据想要求解的问题可以有多种运行流程,例如在托卡马克聚变堆设计的过程中,可以在确定聚变堆目标如总聚变功率、聚变功率增益下,通过零维系统模型确定装置的尺寸、加热功率等参数条件,进而计算需要的工程参数^[4];或者在确定工程参数下,通过零维系统模型计算装置实现科学目标的参考运行区间,为进一步的一维

模拟分析提供依据^[28].本文主要求解的问题,是基于 EAST 已有的实验结果对更高等离子体电流运行条件,在不同的约束以及密度参数范围下实现全非感应电流稳态运行,即 $I_p = I_{CD} + I_{bs}$ ($I_{ohmic} \sim 0$) 时需要的加热功率, I_p 为等离子体电流, I_{CD} 为等离子体驱动电流, I_{bs} 为自举电流, I_{ohmic} 为欧姆电流.

2.2 零维系统模型计算与动理学平衡分析结果对比

为了验证零维系统模型改善后程序计算的准确性,选取了 EAST 上已进行过动理学平衡分析的 4 次比较典型的高 q_{95} 稳态等离子体放电进行对比.这 4 炮等离子体 q_{95} 范围在 6.5—8.5,约束改善因子 H_{98} 在 1.1—1.3 范围,归一化密度范围在 0.60—0.85,表 1 给出了相应的实验条件,加热、电流驱动功率、主要等离子体分布参数等数据来源于实验诊断测量,其他数据来源于参考文献所做的动理学平衡分析^[26,27].

零维系统模型计算与磁平衡反演/动理学平衡分析结果对比如表 2 所列.其中储能、 β_N 、 β_P 、 q_{95} 的数据来自磁平衡反演, f_{LHW} 、 f_{EC} 、 f_{NBI} 、 f_{bs} 分别代表低杂波、电子回旋、中性束驱动电流和自举电流在等离子体电流中所占的份额,数据来自动理学平衡分析的结果^[26,27],该结果经过了严格的自洽动理学平衡分析,最后的磁平衡位形已有了压力分布、电流密度分布等各方面约束,计算结果比较可靠;而在零维系统模型中,磁平衡位形仅仅是通过电磁测量重建得到的,这之间存在一些差别.尽管如此,从结果比较可以看到,零维系统模型计算与动理学平衡分析对绝大部分参数的偏差均在 10% 以内,证明了改进后模型的可靠性.以此为出发点,为后续基于 EAST 实验进行更大运行范围的外推预测奠定了基础.

表 1 零维系统模型计算所对应的实验条件

Table 1. Experimental conditions corresponding to the zero-dimensional system model calculation.

炮号		#89790	#90615	#101449	#94437
辅助加热 功率/MW	离子回旋	0.21	0.28	0.53	0
	电子回旋	0.63	0.63	0.98	0.63
	低杂波	1.3	1.78	1.4	1.08
	中性束	0	0	0	3.7
总功率/MW		2.14	2.69	2.91	5.41
电子弦密度/ (10^{19} m^{-3})		3.8	4.7	4.1	4.5
归一化密度 f_{nG}		0.65	0.81	0.60	0.73
等离子体电流/kA		369	370	363	366

表 2 模型计算结果与磁平衡反演/动理学平衡分析结果对比

Table 2. Comparison between the model calculation results and the magnetic equilibrium inversion/kinetic equilibrium analysis results.

炮号	物理量	磁平衡反演/动理学平衡结果	零维系统模型计算	误差%
#89790	储能/kJ	175	164	6.3
	β_N	1.4	1.4	0.7
	β_P	1.64	1.60	2.4
	q_{95}	6.5	6.15	5.4
	f_{bs}	0.4	0.43	7.5
#90615	储能/kJ	195	186	4.6
	β_N	1.57	1.47	6.4
	β_P	1.8	1.88	4.4
	q_{95}	6.4	6.9	7.8
	f_{bs}	0.49	0.5	2.0
#101449	储能/kJ	231	218	5.6
	β_N	1.8	1.75	2.8
	β_P	2.62	2.34	10.7
	q_{95}	8.23	7.4	10.1
	f_{bs}	0.44	0.47	6.8
#94437	储能/kJ	243	228	6.2
	β_N	1.97	1.89	4.1
	β_P	2.31	2.31	0.3
	q_{95}	6.92	7.2	4.0
	f_{bs}	0.45	0.49	8.9

3 EAST 未来稳态运行区的预测与分析

EAST 全超导非圆截面托卡马克具有类似 ITER 的全金属第一壁, 致力于高约束等离子体稳态运行模式研究, 以支撑未来 ITER 和 CFETR 的稳态运行^[29,30]. 目前 EAST 典型的稳态运行模式运行^[31] 在 $q_{95} > 6.5$ 的范围, 归一化密度 f_{nG} 在 0.5—0.9 的范围, 获得约束改善因子 $H_{98} = 1.1—1.4$, 而未来 ITER 和 CFETR 稳态运行模式分别期望在 q_{95} 为 5.0—5.5 和 q_{95} 为 5.5—6.5 的范围^[32], 自举电流份额至少要达到 50%. 考虑到 EAST 上 140 GHz 电子回旋加热对应的纵场可选范围有限, 将目前的 EAST 稳态运行提升到 ITER 和 CFETR 稳态运行模式对应的 q_{95} 范围内, 则需要进一步提升等离子体电流, 从而需要更高的加热和电流驱动功率才能实现完全非感应等离子体运行. 利用零维系统模型可以基于现有的 EAST 实验条件出发进行外

推, 探索更大等离子体参数运行范围区间所需要的条件. 在典型的 EAST 单零和双零平衡位形下, 等离子体电流 500 kA 对应的 q_{95} 处在 5—6 范围, 可以在 ITER 或 CFETR 稳态运行模式相近的 q_{95} 下研究相关稳态运行的物理, 基于零维系统模型可以在较大的等离子体参数运行区外推实现稳态和长脉冲运行所需要的加热和电流驱动功率, 为未来的 EAST 实验运行提供参考. 由于目前阶段, EAST 上中性束注入系统在长脉冲运行上的局限性, 下面的分析将集中在全射频波加热、电流驱动的等离子体运行模式.

3.1 完全非感应电流运行区的外推预测

在相同归一化密度下等离子体电流的提高意味着更高的等离子体密度. 在一定的等离子体电流下, 一般而言提高等离子体密度, 电流驱动份额下降, 自举电流份额会有所增加, 需要更高的加热和驱动功率来维持完全非感应电流等离子体运行. 如果等离子体电流增加, 极向比压降低, 自举电流份额也会降低, 也需要更高的加热和电流驱动功率. 以 #90615 炮号, 6540 ms 时的参数作为外推的参考点确定自举电流系数和加热及其电流驱动效率, 该实验已进行过完整的动理学平衡分析: 该炮为完全非感应等离子体放电, 环电压为零, 环向磁场 $B_t = 2.477$ T, 等离子体电流为 369 kA, 由电子回旋驱动电流 $I_{EC} = 9$ kA (2%) 和低杂波驱动电流 $I_{LHW} = 182$ kA (49%) 以及 $I_{bs} = 182$ kA (49%) 的自举电流组成, 安全因子 q_{95} 约为 7.55, 弦平均电子密度 n_{el} 约为 $0.47 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, 归一化密度 f_{nG} 约为 0.81, H 模约束改善因子 $H_{98} = 1.2$.

将等离子体电流提高到 500 kA, 扫描弦平均电子密度和不同约束改善因子下等离子体能达到稳态 (完全非感应) 需要的加热及电流驱动功率. 对于弦平均电子密度的扫描, 每次完成稳态运行计算后增加 $0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 并计算相应的归一化密度, 直到该参数条件下无法达到稳态运行条件; 对于能量约束改善因子的扫描, 参考 EAST 目前 H_{98} 的范围, 将 H_{98} 范围定义在 1.0—1.3; 对于加热及电流驱动功率的匹配计算, 以参考炮加热比例 (参考表 1) 等比提高或降低, 当某一类加热功率达到定义上限后, 对该功率进行固定. 等比例变化加热功率虽然不是稳态运行下的功率最优化方案, 但计算简单快速, 对不同加热、驱动功率配比具体的优化策略

在第 3.2 节讨论. 对 EAST 外推的稳态结果会用于分析长脉冲运行情况, 所以统一加热功率的最大值定义为可稳定长脉冲运行的区间, 根据目前 EAST 上加热、电流驱动系统运行积累的经验, 最高加热功率分别设定为: 低杂波电流驱动功率在 3.5 MW、电子回旋辅助加热在 2 MW、离子回旋辅助加热在 4 MW. 计算结果如图 3 所示, 采用与参考炮相同的等离子体位形, 安全因子 q_{95} 约为 5.8. 浅绿色五角星代表参考实验炮, 短虚线为等归一化密度线, 长虚线为等功率线.

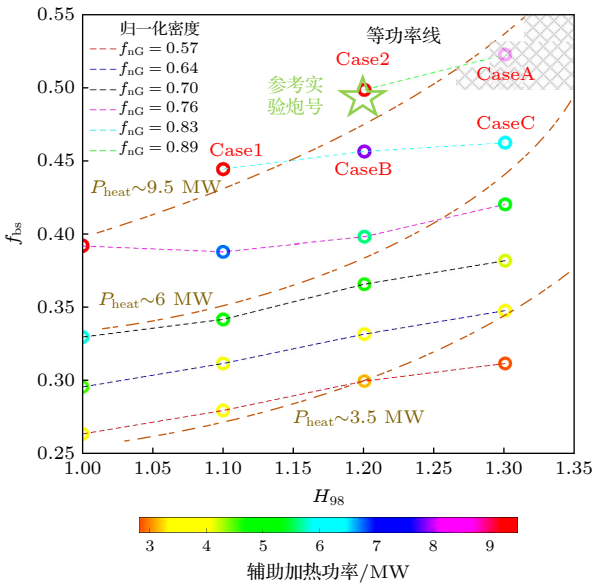


图 3 EAST 在 500 kA 等离子体电流在不同密度条件及不同能量约束改善因子下达到完全稳态运行所需要的辅助加热功率及所对应的自举电流份额

Fig. 3. The auxiliary heating power required for EAST to achieve steady-state operation under different plasma current densities and different improvement factors of energy confinement, as well as the corresponding fraction of bootstrap current for each condition.

图 3 大致给出了 EAST 500 kA 等离子体电流稳态运行不同归一化密度和约束改善因子与所需总加热功率的关系. 整体上看, 等离子体自举电流份额会随着约束改善因子、加热功率和等离子体密度的提高而提高, 但约束改善因子和加热功率对自举电流份额的提高更为有效. 参考 ITER 稳态运行自举电流份额^[28] 在 50% 以上, 归一化密度 f_{nG} 约为 0.8, 灰色网格部分标记了 EAST 如果在 500 kA 电流稳态运行下, 达到相同份额及以上的目标需要的参数范围, 加热功率范围在 7—9.5 MW, H_{98} 为 1.25—1.35, f_{nG} 可达 0.9.

考虑到 EAST 具有全金属第一壁, 实现高的约束改善因子具有一定的挑战性, 我们分析计算结果中的两种情况: Case 1 相对实验参考炮, 约束改善因子 H_{98} 从 1.2 下调到 1.1, 归一化密度 $f_{nG} = 0.83$ 与 ITER 稳态运行模式相当; Case 2 相对实验参考炮维持约束改善因子不变, 但归一化密度提高到 $f_{nG} = 0.89$, 略超出 ITER 稳态运行模式, 期望在更高的密度下降低等离子体与第一壁的相互作用. 两种情况下非感应电流份额分别为 97% 和 96%, 所需加热和电流驱动功率已达到了预设的最大功率 9.5 MW, 还达不到全非感应电流稳态运行条件. 辅助功率的上限是考虑了长脉冲运行所做的限制, 对实现完全非感应运行而不追求特别长的运行时间下, 辅助加热功率仍可有提高的空间, 所以通过适当提高相应的加热功率仍可以实现 Case 1 和 Case 2 对应的完全非感应电流稳态运行, 或略微降低相应的电子密度, 也能在设定的最大 9.5 MW 的等功率线附近实现完全非感应运行.

对 EAST 来说, 探索高性能等离子体的稳态或长脉冲运行, 如何控制沉积在偏滤器靶板的热负荷是一个关键的问题. 实验发现, 过高的热负荷会对靶板造成不可逆的侵蚀^[33,34], 是制约等离子体长脉冲运行的关键因素之一, 因此探索 EAST 高性能运行模式下的偏滤器靶板峰值热通量情况以及与等离子体参数之间的关系, 降低靶板的热负荷是有必要的. 以自举电流份额在 50%、归一化密度在 0.8 以上的点 A 为例, 参考密度和约束与 A 点相近的 B, C 两点, 通过对刮削层热通量衰减长度和靶板受热面积的定标律^[9] 计算此时的偏滤器和内外靶板的峰值热负荷情况, 结果如图 4 所示, q_{div} 为总的偏滤器热流, inner 和 outer 分别为偏滤器内靶板和偏滤器外靶板的峰值热流, 由于 #90615 炮实验是上单零位形, 因此基于 #90615 炮实验的外推也都是上单零位形, 只需考虑上偏滤器. 偏滤器热流和加热功率以及辐射关系密切, 一般而言, 减少芯部辐射或者提高加热功率都会使得偏滤器热负荷增加, 其中外靶板的热负荷往往多于内靶板, 通过对等离子体参数的控制达到稳态运行所需要的加热功率可以简单的展示与偏滤器热流的关系. 可以看到, 图 3 中 A 点参考运行点对应的偏滤器总热负荷达到 4.7 MW/m², 其中外靶板峰值热负荷 3.1 MW/m², 在 EAST 目前偏滤器设计的热负荷承受范围内, 但已超出实验参考炮 2.5 MW/m²

的峰值热负荷水平, 在长时间尺度下会引起粒子再循环问题^[29,30], 需要未来的实验去探索解决. 在其他条件不变的情况下, 将实验参考炮的归一化密度 f_{nG} 从 0.89 下降到 0.83, 如图 3 中的 B 点, 维持完全非感应电流所需要功率变化较小, 带来偏滤器靶板峰值热负荷变化也很小, 但自举电流份额也下降了约 6%. 将 B 点的约束改善因子 H_{98} 从 1.2 上调至 1.3, 其他条件不变的情况下, 如图 3 中的 C 点, 维持完全非感应电流所需要的功率的下降使得偏滤器靶板的峰值热流减少了近 1 MW/m^2 , 同时自举电流份额提高了 2% 左右. 目前运行状态下偏滤器内外靶板的热负荷还很不对称, 如果能通过一些方法减轻这种内外靶板热负荷的不对称性可进一步降低偏滤器靶板的峰值热流, 对高性能的稳态或长脉冲运行会更加有利. 上面简单的分析可以看到, 提高等离子体约束是实现高自举电流份额、减小偏滤器靶板热负荷最有效的途径, 是未来开展高参数下等离子体稳态长脉冲研究最重要的方面.

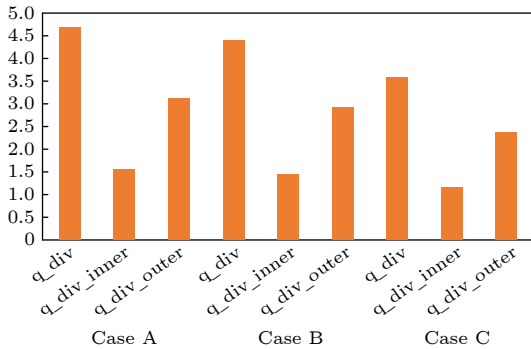


图 4 对应图 3 中 Case A, Case B, Case C 三点的总的偏滤器热负荷以及内外偏滤器靶板峰值热负荷情况 (MW/m^2)
 Fig. 4. The total divertor heat load and peak heat load on the inner and outer divertor target plates for points Case A, Case B, and Case C in Fig. 3 (unit: MW/m^2).

3.2 加热功率配比的策略分析

确定等离子体电流下, 一般而言提高加热、驱动功率会使非感应电流部分增加, 具体的功率配比对于总加热功率与自举电流份额的影响较大. 外部注入功率由两部分组成, 一部分为电流驱动功率即低杂波和电子回旋, 提高这部分功率可以提高电流驱动份额, 同时对自举电流份额也有贡献; 另一部分仅用于加热即离子回旋可以提高自举电流份额. 由于电子回旋加热效率高并且对排除芯部金属杂质极为重要^[29,30], 所以充分利用电子回旋加热并固

定功率在最大可用的水平 2 MW, 分析在同一稳态运行参数条件下, 不同的低杂波功率与离子回旋功率的配比所对应的自举电流份额, 找到更有利于长脉冲运行的总加热功率与自举电流份额关系.

以图 3 中参考运行点 A 的功率配比为例进行分析, 将离子回旋加热从 0 按照每 0.5 MW 提高到 4 MW, 固定电子回旋功率为 2 MW, 计算等离子体达到完全非感应运行时需要的低杂波功率, 结果如表 3 所示. 如果要实现该参数条件下的完全非感应电流运行, 最低总功率可以在 6.28 MW 条件下实现, 这时至少需要 4.28 MW 的低杂波功率, 已远超本文中设定的低杂波长脉冲运行的最大 3.5 MW 的限制, 这样的功率水平对低杂波电流驱动系统长脉冲运行而言具有一定的困难, 且自举电流份额达不到 50%. 当总加热功率提高到 7.35 MW 时, 可以达到自举电流份额 50% 的目标, 而低杂波电流驱动功率为 3.85 MW, 可以尝试长脉冲的运行. 在维持完全非感应电流条件下进一步提升离子回旋加热功率, 可以降低低杂波电流驱动功率并提升自举电流份额, 各种加热和电流驱动功率的配比更加均衡, 从实验的角度上更加适合于等离子体长脉冲运行. 但另一方面可以发现, 离子回旋功率每提高 0.5 MW, 维持完全非感应电流运行, 低杂波功率相应地仅降低 0.1—0.2 MW, 这对应的会带来偏滤器靶板热负荷的提高. 从维持同样的非感应等离子体电流看, 低杂波驱动功率更为有效, 随着总加热功率的提高, 自举电流份额相应的提高, 虽然离子回旋加热功率没有直接的电流驱动, 但对自举电流的提升比低杂波更为有效.

表 3 Case A 完全非感应运行条件下不同的功率配比对应的自举电流份额

Table 3. The fraction of bootstrap current corresponding to different power ratios under fully non-inductive operation conditions for Case A.

离子回旋/MW	低杂波/MW	总加热/MW	自举电流份额
0	4.28	6.28	0.485
0.5	4.10	6.60	0.492
1.0	3.95	6.95	0.497
1.5	3.85	7.35	0.504
2.0	3.75	7.75	0.513
2.5	3.65	8.15	0.520
3.0	3.51	8.51	0.526
3.5	3.40	8.90	0.533
4.0	3.30	9.30	0.539

3.3 EAST 长脉冲运行参数分析

EAST 实验期望通过长脉冲 H 模放电去探索适合于 ITER 和未来聚变堆的高约束运行模式, 前面已经讨论了 EAST 在 500 kA 等离子体电流下稳态运行需要的功率, 本节将在更宽的范围讨论 500 kA 下 EAST 的长脉冲的运行能力. 对于等离子体长脉冲运行能力可以通过放电平顶段维持时间 $t_{\text{flatop}} = \Delta\psi/V_L$ 进行直观的描述, $\Delta\psi$ 为扣除了等离子体电流爬升阶段极向场可用于平顶维持的伏秒数, 在 EAST 典型的运行条件下, 极向场可提供 3 V·s 用于电流平顶阶段的维持, V_L 为等离子体环电压. 等离子体性能通过归一化比压 β_N 来评估. 考虑纯射频波加热和电流驱动, 总的加热功率仍设定为 9.5 MW. 基于以上条件, 使用零维系统模型对电子密度与能量约束改善因子进行扫描, 结果如图 5 所示, 由于平顶段维持时间数值跨度太大, 使用其倒数更具有可读性, 其中纵坐标值为零对应于完全非感应电流情况 (steady-state, SS), 为负值时表示非感应电流大于等离子体电流, 也就是所谓的等离子体电流过驱 (over-drive, OD), 原则上可以实现更高等离子体电流下的完全非感应运行, 横坐标对应归一化比压 β_N . 图 5 给出了归一化电子密度 f_{nG} 为 0.5—1.0、能量约束改善因子 H_{98} 为 1.0—1.5 等高线, 不同点的颜色对应于自举电流份额, 在 9.5 MW 总功率下, 可实现自举电流份额 f_{bs} 为 44.5%—78.5%, 归一化比压 β_N 为 1.63—3.24. 由图 5 可以看到, 在 9.5 MW 总功率下, EAST 可实现的稳态运行 (SS) 参数范围很大, 包括非感应电流大于等离子体电流的部分, 意味着有可能在更高等离子体电流 (更低 q_{95}) 实现完全非感应电流和稳态运行. 即使在 H_{98} 约为 1.0 时, 500 kA 的等离子体电流仍可以在 f_{nG} 约为 0.8 下实现完全非感应运行, 归一化比压在 1.9, 自举电流份额在 46% 左右. 同时随着约束的改善, 能够实现完全非感应运行的电子密度区间也越来越大, 当 H_{98} 约为 1.3 时, 可以在归一化电子密度 f_{nG} 约为 1 下实现完全非感应运行, 归一化比压可达到 $\beta_N > 2.8$, 已接近 ITER 稳态运行模式的归一化比压 β_N 约为 3. 由于纵坐标为平顶时间的倒数, 所以正的 t_{flatop} 越靠近 t_{flatop} 约为 0, 即 SS 运行的参数范围, 等离子体的运行时间就越长. 如果能够保证总功率 9.5 MW 的长脉冲运行, 那么在相当宽的参数范围内, H_{98} 为 1.0—1.4,

f_{nG} 为 0.8—1.0, 可以实现完全非感应电流或者长脉冲运行, 为支持 ITER 和 CFETR 稳态运行、探索研究稳态运行模式相关的物理提供很大的运行区.

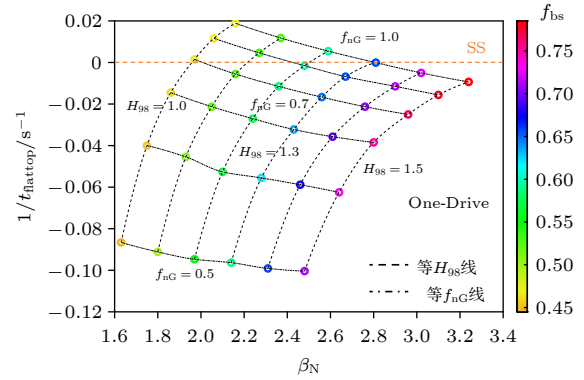


图 5 EAST 在 500 kA 等离子体电流 9.5 MW 加热功率下, 不同的电子密度与能量约束改善因子时的长脉冲运行能力

Fig. 5. EAST's long-pulse operational capability under different electron densities and energy confinement improvement factors at 9.5 MW heating power and a plasma current of 500 kA.

4 结论

零维系统模型可以针对不同问题, 通过相应的约束条件快速推算等离子体的主要参数及其所需要的加热、电流驱动功率. 本文针对模型通常使用的等离子体位形近似和自举电流近似公式引起的误差问题, 做了相应改进. 首先引入了等离子体平衡反演完善了对磁面信息的计算, 同时使用磁面坐标下的分布参数进行计算, 显著改善了计算结果的准确性并可以与实验测量结果进行直接的对比; 然后通过 Sauter 解析模型引入自举电流系数与碰撞率变化的关系, 显著改善了自举电流份额计算的准确性. 改进后的零维系统模型计算结果与动理学平衡分析结果基本吻合, 为外推未来实验结果和设计实验提供了方便快捷的手段.

针对 EAST 未来的完全非感应电流等离子体运行在接近 ITER 和 CFETR 稳态运行模式确定的 q_{95} 区间, 从已有的稳态实验结果出发进行外推, 给出了 EAST 在 500 kA 等离子体电流下实现完全非感应运行、自举电流份额在 50% 以上的参数范围, 加热/驱动功率在 7.0—9.5 MW, H_{98} 为 1.25—1.35, f_{nG} 约为 0.9, 同时简单分析了相应的偏滤器热负荷情况, 降低密度或者改善约束都能有

效地减少偏滤器靶板热流. 分析了不同的加热功率对比对自举电流的影响, 在总的非感应电流下, 通过调整功率配比可以改变自举电流份额. 进一步分析了 EAST 在 500 kA 等离子体电流下实现长脉冲运行区间, 在 9.5 MW 总的加热、电流驱动功率下, H_{98} 为 1.0—1.4 的范围, 归一化电子密度 f_{nG} 为 0.8—1.0 的范围, 可以实现较高性能的长脉冲或完全非感应的稳态运行, 支持 ITER 和 CFETR 稳态运行模式相关物理的研究. 综合所有方面的分析, 提升等离子体约束性能可在较低的加热/驱动功率下实现同样等离子体参数的完全非感应运行, 扩展等离子体运行区, 是实现高参数等离子体稳态运行最为有效的途径.

参考文献

- [1] Chan V S, Stambaugh R D, Garofalo A M, Chu M S, Fisher R K, Greenfield C M, Humphreys D A, Lao L L, Leuer J A, Petrie T W, Prater R, Staebler G M, Snyder P B, St John H E, Turnbull A D, Wong C P C, Van Zeeland M A 2010 *Fusion Sci. Technol.* **57** 66
- [2] Johner J 2011 *Fusion Sci. Technol.* **59** 308
- [3] Kovari M, Kemp R, Lux H, Knight P, Morris J, Ward D J 2014 *Fusion Eng. Des.* **89** 3054
- [4] Wan B N, Ding S Y, Qian J P, Li G Q, Xiao B J, Xu G S 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 495
- [5] Ding S Y, Wan B N, Wang L, Sun Y W, Lyu B 2016 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **44** 2502
- [6] Zohm H 2010 *Fusion Sci. Technol.* **58** 613
- [7] Zohm H 2019 *J. Fusion Energy* **38** 3
- [8] Stambaugh R D, Lao L L, Lazarus E A 1992 *Nucl. Fusion* **32** 1642
- [9] Loarte A, Bosch S, Chanin A, Clement S, Herrmann A, Hill D, Itami K, Lingertat J, Lipschultz B, McCormick K, Monk R, Porter G D, Shimada M, Sugihara M 1999 *J. Nucl. Mater.* **266–269** 587
- [10] Liu-Lin Y R, Stambaugh R D 2004 *Nucl. Fusion* **44** 548
- [11] Greenwald M, Terry J L, Wolfe S M, Ejima S, Bell M G, Kaye S M, Neilson G H 1988 *Nucl. Fusion* **28** 2199
- [12] Liu-Lin Y R, Chan V, Prater R 2003 *Phys. Plasmas* **10** 4064
- [13] Tonon G 1994 *ISPP Workshop on Tokamak Concept Improvement* Varenna, Italy, August 29–September 3, 1994 p31
- [14] Fowler R, Holmes J, Rome J 1979 *NFREYA: a Monte Carlo Beam Deposition Code for Noncircular Tokamak Plasmas Report*
- [15] ITER E 1999 *Nucl. Fusion* **39** 2175
- [16] Yushmanov P N, Takizuka T, Riedel K S, Kardaun O J W F, Cordey J G, Kaye S M, Post D E 1990 *Nucl. Fusion* **30** 1999
- [17] Dragojlovic Z, Raffray A R, Najmabadi F, Kessel C, Waganer L, El-Guebaly L, Bromberg L 2010 *Fusion Eng. Des.* **85** 243
- [18] Grad H, Rubin H 1958 *Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy* (United Nations Geneva)
- [19] Shafranov V 1958 *Soviet Physics JETP* **6** 1013
- [20] Sauter O, Angioni C, Liu-Lin Y R 1999 *Phys. Plasmas* **6** 2834
- [21] Qian J, Wan B, Lao L L, Shen B, Sabbagh S A, Sun Y, Liu D, Xiao B, Ren Q, Gong X, Li J 2009 *Plasma Sci. Technol.* **11** 142
- [22] Li G Q, Ren Q L, Qian J P, Lao L L, Ding S Y, Chen Y J, Liu Z X, Lu B, Zang Q 2013 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **55** 125008
- [23] Zhu X 2018 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [朱翔 2018 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [24] Stambaugh R D, Chan V S, Garofalo A M, Sawan M, Humphreys D A, Lao L L, Leuer J A, Petrie I W, Prater R, Snyder P B, Smith J P, Wong C P C 2011 *Fusion Sci. Technol.* **59** 279
- [25] Sauter O, Angioni C, Liu-Lin Y R 2002 *Phys. Plasmas* **9** 5140
- [26] Zhang J Y 2022 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [张家源 2022 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [27] Zhang J, Qian J, Gong X, Zhang B, Wu M, Li M, Zang Q, Zhu X, Lyu B, Liu H, Liang R, Jia T, Hu Y, Wang Z 2022 *Fusion Eng. Des.* **184** 113283
- [28] Hender T C, Wesley J C, Bialek J, et al. 2007 *Nucl. Fusion* **47** S128
- [29] Wan B N, Liang Y, Gong X Z, et al. 2019 *Nucl. Fusion* **59** 112003
- [30] Wan B N, Gong X Z, Liang Y, Xiang N, Xu G S, Sun Y, Wang L, Qian J P, Liu H Q, Zhang B, Xia T Y, Huang J, Ding R, Zhang T, Zuo G Z, Sun Z, Zeng L, Zhang X J, Zang Q, Lyu B, Garofalo A M, Li G Q, Li K D, Yang Q Q, for the E T, Collaborators 2022 *Nucl. Fusion* **62** 042010
- [31] Gong X, Garofalo A M, Huang J, et al. 2019 *Nucl. Fusion* **59** 086030
- [32] Zhuang G, Li G Q, Li J, Wan Y X, Liu Y, Wang X L, Song Y T, Chan V, Yang Q W, Wan B N, Duan X R, Fu P, Xiao B J, the C D T 2019 *Nucl. Fusion* **59** 112010
- [33] Pitts R A, Bonnin X, Escourbiac F, Frerichs H, Gunn J P, Hirai T, Kukushkin A S, Kaveeva E, Miller M A, Moulton D, Rozhansky V, Senichenkov I, Sytova E, Schmitz O, Stangeby P C, De Temmerman G, Veselova I, Wiesen S 2019 *Nucl. Mater. Energy* **20** 100696
- [34] Loarte A, Lipschultz B, Kukushkin A 2007 *Nucl. Fusion* **47** s203

Improvement of zero-dimensional system model and its analysis and prediction of steady-state operating regime on EAST*

Yu Ming-Sheng¹⁾²⁾ Qian Jin-Ping^{1)†} Ding Si-Ye³⁾
Ren Qi-Long¹⁾ Ye Yang¹⁾²⁾ Wan Bao-Nian¹⁾²⁾

1) (*Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

2) (*University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

3) (*General Atomics, San Diego, CA 92186-5608, United States of America*)

(Received 10 March 2023; revised manuscript received 4 April 2023)

Abstract

The zero-dimensional system model has been widely used for predicting and analyzing plasma performance in fusion reactors and designing next-generation tokamaks. These models can quickly scan and calculate various parameter, and can be used for the design of device reference operation point and preparation for more accurate one-dimensional numerical simulations. They can also be used to predict device operational parameters and heating/ current drive conditions, providing a quick reference for experimental design. However, relying on physical approximations and empirical formulas can lead to significant systematic errors. In this work we introduce a plasma equilibrium program to obtain the main plasma profile parameters and their calculations based on magnetic surface information. The bootstrap current calculation is improved by introducing the relationship between the bootstrap current coefficient of the Sauter model and the collision rate change. The improved model is validated by using experimental results from EAST, and the results of the zero-dimensional system model calculations are found to be consistent with the results of kinetic equilibrium analysis. Based on the improved model and existing experimental results, the required heating/current drive power and achievable normalized beta for steady-state, long-pulse operation of the 500 kA plasma current on EAST are analyzed and predicted. The calculation results show that EAST can achieve steady-state operation at the 500 kA plasma current with bootstrap current fraction over 50% in the parameter range of 7.0–9.5 MW heating/driving power, H_{98} is 1.25–1.35, and $f_{nG} \sim 0.9$. Additionally, to maintain the total non-inductive current, the total heating/current drive power needs to be highly sensitive to plasma confinement and density, which is the most effective way to increase the bootstrap current fraction and reduce the peak heat loads on the divertor. Improving plasma confinement is the most effective way to achieve high bootstrap current fraction and reduce the peak heat load on the divertor. In this work, we also analyze the effect of heating power ratio on the bootstrap current, showing that adjusting the power ratio can change the bootstrap current fraction, and we further analyze the long-pulse operating region of EAST with a plasma current of 500 kA. In the range of 9.5 MW total heating/current driving power, H_{98} is 1.0–1.4, and normalized electron density f_{nG} is 0.8–1.0, high-performance long-pulse or fully non-inductive steady-state operation can be achieved, supporting the research on the physics of ITER and CFETR steady-state operation modes. In general, improving the plasma confinement performance can achieve fully non-inductive operation at lower heating/driving power while maintaining the same plasma parameters, and expand the plasma operating regime, which is the most effective way to achieve high-parameter steady-state operation of the plasma.

Keywords: zero-dimensional system model, equilibrium solver, Sauter model, steady-state operation

PACS: 52.65.-y, 52.55.Fa

DOI: 10.7498/aps.72.20230364

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11975274).

† Corresponding author. E-mail: jqian@ipp.ac.cn

零维系统模型改进及其对EAST稳态运行区的分析和预测

于明生 钱金平 丁斯晔 任启龙 叶阳 万宝年

Improvement of zero-dimensional system model and its analysis and prediction of steady-state operating regime on EAST

Yu Ming-Sheng Qian Jin-Ping Ding Si-Ye Ren Qi-Long Ye Yang Wan Bao-Nian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 115203 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230364

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230364>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大气压非平衡等离子体甲烷干法重整零维数值模拟

Zero-dimensional numerical simulation of dry reforming of methane in atmospheric pressure non-equilibrium plasma

物理学报. 2021, 70(7): 075206 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201700>

二维系统研究中的无电极输运方法

Contactless transport method of two-dimensional electron system studies

物理学报. 2022, 71(12): 127303 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220246>

稳态微聚束加速器光源

Steady-state micro-bunching accelerator light source

物理学报. 2022, 71(15): 152901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220486>

零维 Sb^{3+} 掺杂 $\text{Rb}_7\text{Bi}_3\text{Cl}_{16}$ 金属卤化物的三重态自陷激子发射

Zero-dimensional Sb^{3+} doped $\text{Rb}_7\text{Bi}_3\text{Cl}_{16}$ metal halides with triplet self-trapped exciton emission

物理学报. 2021, 70(24): 247801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211024>

基于光谱法的发光二极管稳态热阻测量方法

Steady-state thermal resistance measurement of light-emitting diodes based on spectroscopic method

物理学报. 2021, 70(9): 098501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201093>

一种苯乙烯基喹啉衍生物的稳态和瞬态光电性质

Steady-state and transient optoelectronic characteristics of styrene-and quinoline-based derivative

物理学报. 2022, 71(1): 018501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211171>