

EAST 装置 ICRF 加热天线的电磁力分析

杨庆喜, 宋云涛, 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 结合 EAST 超导托卡马克的物理运行参数, 计算给出了装置在等离子体突然破裂时 ICRF 加热天线上感应电流和电磁力解析式及其随时间变化的曲线图, 根据曲线图讨论了电磁力的极限情况和对 ICRF 加热天线结构的影响。

关键词: 离子回旋共振加热; 电磁力; 微波天线
中图分类号: TL631

文献标识码: A

1 引言

EAST 超导托卡马克是目前国际上开展磁约束高温等离子体聚变实验研究的主要装置之一。在装置运行时需要向等离子体提供巨大的能量才能使等离子体达到聚变温度, 其中射频波段(10~100MHz)的离子回旋共振加热是等离子体辅助加热的重要手段。对于这种加热方法需要一种与之相配的加热系统——射频系统, 也称为 ICRF 系统。离子回旋加热系统主要包括功率源、传输系统、阻抗匹配系统、加热天线和加热对象(等离子体)几部分^[1]。其中加热天线是 ICRF 系统重要组成部分之一, 它主要由屏蔽罩、内导体、真空馈线、调谐

电容、真空馈口等组成, 具有稳态连续波运行的特点。由于加热天线安装在真空室内直接面对等离子体, EAST 超导托卡马克装置一旦运行时, 此天线会在等离子体突然破裂情况下产生感应电流而受到电磁力的作用, 这种电磁力对它有很大的破坏作用。在天线工程设计时必须考虑这种破坏作用并予以解决。图 1 是 EAST 装置 ICRF 加热天线结构图。

2 等离子体突然破裂时 ICRF 系统加热天线上的电磁力

2.1 等离子体逆向磁通量消失后在加热天线内导体上感应电流的计算

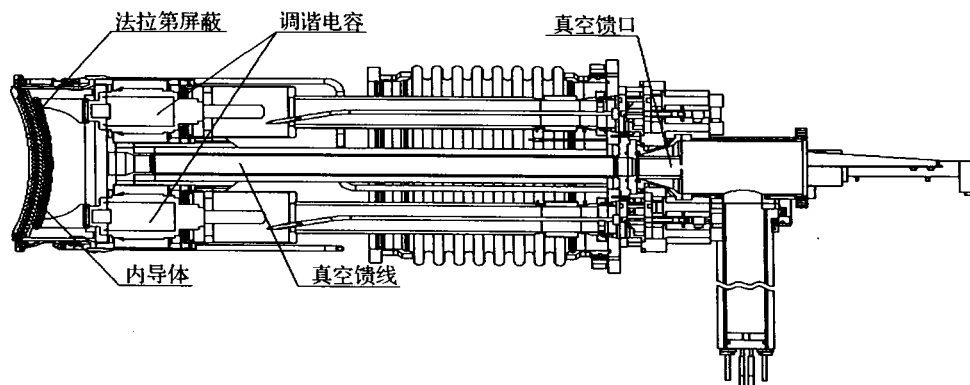


图 1 EAST 装置 ICRF 加热天线结构图

收稿日期: 2006-01-05; 修订日期: 2006-06-05

基金项目: 国家“九五”重大科学工程项目子课题

作者简介: 杨庆喜(1980-), 男, 江西吉安市人, 硕士, 主要从事 EAST 装置 ICRF 加热天线关键部件的结构设计及力学分析。

当 EAST 超导托卡马克装置投入运行时, 等离子体破裂、纵场线圈失超、等离子平衡失控发生垂直位移都会引起磁场变化, 从而在其周围的导电物体上感应电流。图 2 是等离子体破裂时等离子体与天线内导体之间的电磁感应等效回路。

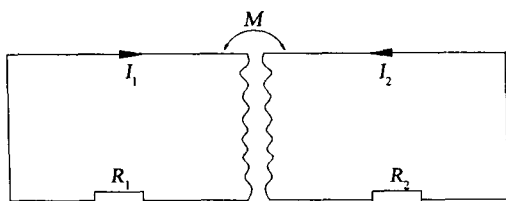


图 2 等离子体与天线之间的电磁感应等效回路

根据基尔霍夫定律可以列出天线上的电路方程^[2]:

$$M \frac{dI_1}{dt} + I_2 R_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$M \frac{dI_2}{dt} + I_1 R_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} = 0 \quad (2)$$

式中, R_1 、 L_1 、 I_1 和 R_2 、 L_2 、 I_2 分别为等离子体和加热天线内导体的电阻、自感和电流; M 为等离子体与加热天线内导体之间的互感系数。对方程 (1)、(2) 进行拉普拉斯变换可得:

$$M s I_1(s) - M I_1(t_0) + I_2(s) R + L_2 s I_2(s) - L_2 I_2(t_0) = 0 \quad (3)$$

已知等离子体电流衰减公式 $I_p(t) = I_1(t_0) \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right)$ 、等离子体电流初值 $I_1(t_0) = 10^6 \text{ A}$ 、天线内导体感应电流初值 $I_2(t_0) = 0$ 和等离子体电流的衰减时间 $t_p = 3 \text{ ms}$ 。

根据上述条件对方程 (3) 进行整理变换最终可得:

$$I_2(t) = 10^6 M \left[-\frac{0.003}{0.003 L_2 - R_2} \exp(-3t) + \frac{0.003}{0.003 L_2 - R_2} \exp\left(-1000 \frac{R_2}{L_2} t\right) \right] \quad (4)$$

2.1.1 求自感系数 L_2

当等离子体破裂时, 即等离子电流从 1MA 急剧衰减到 0MA 时, 加热天线内导体上产生感应电流。在对结果影响不大的前提下, 为了减少计算的

复杂程度, 把天线内导体看作是个长方体^[3], 故有 $L_2 = \mu_0 d l / w$, 其中 μ_0 、 d 、 l 、 w 分别是磁导率、天线的内导体厚度、长度、宽度。对于 EAST 装置加热天线, 内导体 $d = 100 \text{ mm}$ 、 $l = 600 \text{ mm}$ 、 $w = 10 \text{ mm}$, 根据提供的参数可得 $L_2 = 7.5 \times 10^{-6} \text{ H}$ 。

2.1.2 求电阻 R_2

天线内导体是由不锈钢镀铜材料制成, 其电阻率为 $\rho = 1.7 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$, 所以得出天线内导体的电阻为 $R = 1.45 \times 10^{-4} \Omega$ 。

2.1.3 求互感系数 M

取单位长度的等离子体 C1 和单位长度的天线内导体 C2 两个闭合回路, C1 回路有电流 I_1 流通, 于是 C2 在 C1 电流所激发的磁场中通过回路 C2 的磁通量为 $\phi = M_{21} I_1$, 其中, M_{21} 代表两回路间的互感系数, 根据诺伊曼公式 $M_{21} = M_{12} = M'$ ^[4], 可以得出等离子体电流在单位长度天线内导体回路中产生的磁通量为 $\phi = M' I_1$, 而等离子体电流在天线内导体回路中产生的磁通量也可表示为 $\phi = \mu_0 S I_1$ ^[3], 所以根据上面求自感系数时提供的内导体参数, 可以得出天线内导体与等离子体两个回路之间的互感为 $M = 7.5 \times 10^{-7} \text{ H}$ 。把已求出的 R_2 、 L_2 、 M 代入 $I_2(t)$ 可求得:

$$I_2(t) = 15.5 \exp(-3t) - 15.5 \exp(-19300t) \quad (5)$$

2.2 等离子逆向磁通量消失后天线内导体电磁力的计算

在 EAST 超导托卡马克装置等离子体中, 电子绕约束磁场 B_T 作回旋运动时产生净电流 I_1 , 如图 3 所示(由于 I_1 产生的磁场方向与 B_T 相反, 故称为“逆向磁通量”^[3])。当等离子体逆向磁通量消失后, 天线内导体上产生感应电流, 在环向磁场 B_T 作用下天线内导体上产生一定的电磁力。图 3 是在等离子逆向磁通量消失后天线内导体上产生的电磁力的结构示意图。

图 3 中, A、B、C 三点处的磁场的的数据列于表 1 中。

表 1 天线内导体上 A、B、C 处的磁场的的数据 单位: T

| | 水平磁场 B_r | 环向磁场 B_T | 垂直磁场 B_z | 总的磁场 B |
|---|------------------------|------------|-------------------------|----------|
| A | 0.878×10^{-2} | 3.306 | 2.682×10^{-2} | 3.305 |
| B | 1.474×10^{-1} | 3.298 | 1.8947×10^{-1} | 3.3075 |
| C | 0.878×10^{-2} | 3.306 | 2.682×10^{-2} | 3.305 |

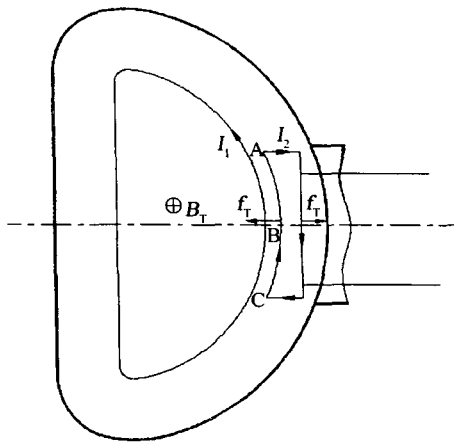


图 3 天线内导体上产生的电磁力的结构示意图

内导体主要受环向磁场作用的径向电磁力 f_r ，根据上面给出的数据可知：A、C 两点对称的，所以下面主要取单位长度内导体来分析 A 和 B 两点的电磁力。由式 $f = BIl$ 可以得出 f_{rA} 和 f_{rB} ：

$$f_{rA} = 51.24[\exp(-3t) - \exp(-19300t)]$$

$$f_{rB} = 51.11[\exp(-3t) - \exp(-19300t)]$$

由图 4、5 可见，天线内导体上 A、B 两点所受电磁力随时间变化的曲线图非常相似，都是在 1.5ms 时刻衰减完，而且 A、B 两点所受最大电磁力相差很小，A 点电磁力最大值为 51.24N，B 点电磁力最大值为 51.11N。由此可知，等离子体逆向磁通量消失后天线内导体所受电磁力不大，而且较均匀。

2.3 等离子体极向磁通量消失后天线屏蔽罩上感应电流的计算

在 EAST 超导托卡马克装置中，等离子体的平衡控制是由外加的垂直磁场和等离子体电流产生的极向磁场 B_θ 相叠加而完成的^[3]，所以等离子体的极向磁通量消失后将会在天线屏蔽罩上感应电流。为了计算的方便，且对计算结果影响不大的前提下，可把天线看做是一个长方体(长、宽、高分别为 $l = 0.75\text{m}$ 、 $w = 0.55\text{m}$ 、 $h = 0.2\text{m}$)。图 6 是等离子体极向磁通量消失后天线屏蔽罩上产生感应电流和受到的电磁力示意图。

根据图 6，将单位长度天线屏蔽罩看作是截面为方型的金属空管，其截面面积 S 的磁通量为^[3]：

$$\Phi_\theta = B_\theta S \exp(-t/\tau_p) \quad (6)$$

感应电流 i 为：

$$L(di/dt) + Ri = (B_\theta S/\tau_p) \exp(-t/\tau_p) \quad (7)$$

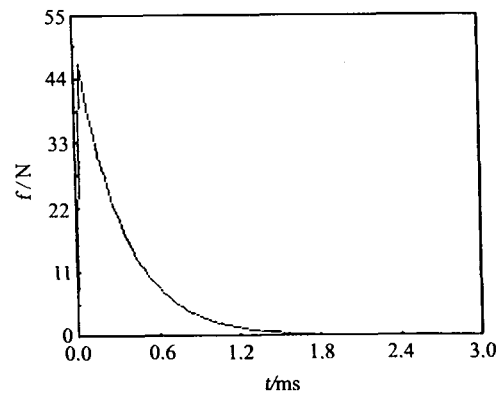


图 4 A 点所受电磁力随时间变化的曲线图

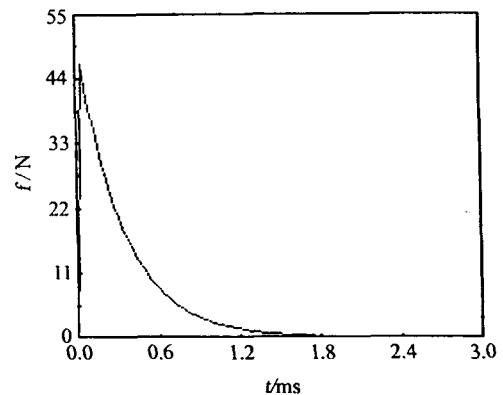


图 5 B 点所受电磁力随时间变化的曲线图

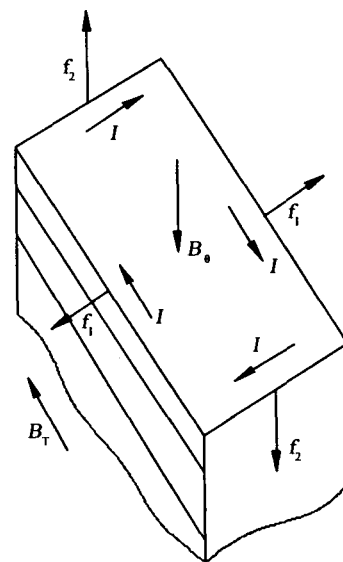


图 6 天线屏蔽罩上产生的感应电流和受到的电磁力示意图

式中, L 为天线屏蔽罩单位长度电感, $L = \mu_0 S$; R 为天线屏蔽罩单位长度电阻, $R = \rho l / \delta$; δ 为天线屏蔽罩趋肤效应厚度。EAST 装置加热天线屏蔽罩参数 $l = 0.75\text{m}$, $\delta = 0.007\text{m}$ 。由此得到 $L = 1.38 \times 10^{-7}\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$, $R = \rho \frac{l}{\delta} = 0.83 \times 10^{-4}\Omega \cdot \text{m}^{-1}$ 。定义 $\tau =$

$\frac{L}{R} = 1.66\text{ms}$, 求解方程(6)可以得到 i 的解析式为:

$$i = \frac{B_0 S}{L} \frac{\tau}{\tau - \tau_p} [\exp(-t/\tau) - \exp(-t/\tau_p)] \quad (8)$$

把以上得出的数据代入方程式(8)可得 i 为:

$$i = 9.8 \times 10^5 B_0 [\exp(-0.33t) - \exp(-0.6t)] \quad (9)$$

把 $B_0 = 1.8947 \times 10^{-1}$ 代入方程式(9)可得:

$$i = 18.5 \times 10^4 [\exp(-0.33t) - \exp(-0.6t)] \quad (10)$$

2.4 等离子体极向磁通量消失后天线屏蔽罩上电磁力的计算

在图6中可以看到,当等离子体极向磁通量消失后,天线 Faraday 屏蔽罩环路上产生感应电流 i , 与极向磁场 B_0 作用产生径向电磁力 f_1 , 与环向磁场作用 B_r 产生极向电磁力 f_2 分别为 $f_1 = B_0 i l_1$ 和 $f_2 = B_r i l_2$ 。根据式(10)和 $B_0 = 1.8947 \times 10^{-1}$, $l_1 = w = 0.55\text{m}$, 可以得出 f_1 (单位为 kN):

$$f_1 = 19.3 \times 10^3 [\exp(-0.33t) - \exp(-0.6t)] \quad (11)$$

根据式(10)和磁场 $B_r = 3.306\text{T}$, $l_2 = h = 0.2\text{m}$, 可以得出 f_2 (单位为 kN):

$$f_2 = 12.2 \times 10^4 [\exp(-0.33t) - \exp(-0.6t)] \quad (12)$$

图7和图8为电磁力 f_1 和 f_2 随时间变化的曲线图。由图7、8可见,在5ms之前, Faraday 屏蔽罩所受的径向力 f_1 和极向力 f_2 都到达最大, 分别为 4.2kN 和 26.4kN。此两种力对屏蔽罩机械结构有较大的破坏作用, 尤其是极向力 f_2 还会在天线屏蔽罩两侧相反方向以真空馈口为轴形成力矩, 对真空馈口会产生很大的破坏作用, 所以在设计天线屏蔽罩和真空馈口时, 考虑此两种力的影响是十分关键和必要的。

3 结论

从上面的分析和计算中可知, 当等离子体突然破裂时天线内导体和屏蔽罩产生的感应电流及受到的电磁力有较大的差异: 在等离子体逆向磁通量消失后, 天线内导体上感应电流最大达到 15.5A, 受到的径向电磁力最大达到 51.24N; 而当等离子

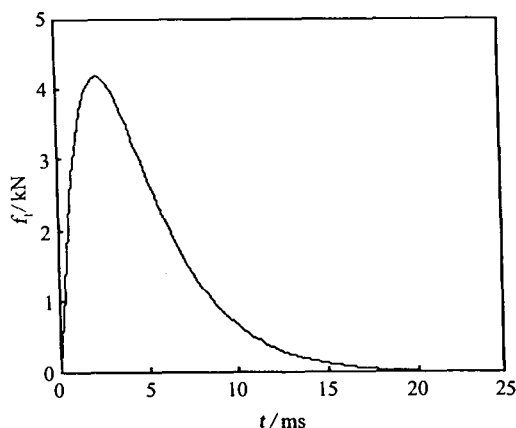


图7 电磁力 f_1 随时间变化的曲线图

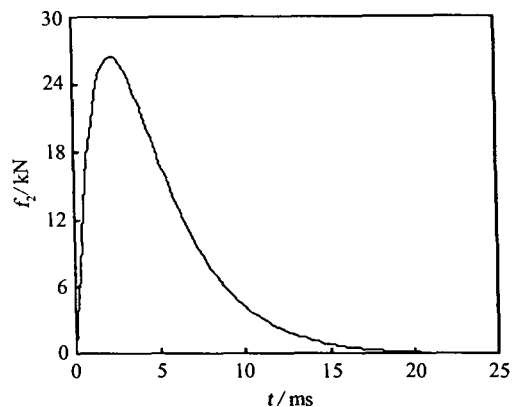


图8 电磁力 f_2 随时间变化的曲线图

体极向磁通量消失时, 在天线屏蔽罩上感应的电流最大达到 40kA, 天线屏蔽罩受到极向电磁力最大达到 26.4kN, 径向电磁力最大达到 4.2kN。这些都是等离子体电流以时间常数 $\tau = 3\text{ms}$ 衰减的极端情况下计算的结果。此外, 较大的感应电流会在天线上产生大的热负荷, 但是不会产生太大的影响, 这是由于感应电流在很短的时间内衰减完毕和天线中设有水冷却系统。但大的电磁力将引起一些力学问题, 在结构设计中应当考虑这一点, 尤其要考虑在等离子体极向磁通量消失后天线屏蔽罩两侧所受的电磁力对真空馈口和机械结构的影响。

参考文献:

- [1] 李劲. 离子回旋加热天线的研究 [D]. 合肥: 中国科学院合肥等离子体物理研究所, 1998. 4.
- [2] 宋云涛. HT-7U超导托卡马克核聚变实验装置真空室

- 结构仿真分析与实验研究 [D]. 合肥: 中国科学院合肥等离子体物理研究所, 2001. 38.
- [3] 沈学民. 托卡马克中离子回旋共振加热天线的电动力学问题 [J]. 电子科学学刊, 1992, 14(2): 170.
- [4] 孙国安. 电磁场与电磁波理论基础 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1999. 80.

Electromagnetic force analysis of ICRF heating antenna on EAST tokamak

YANG Qing-xi, SONG Yun-tao, WU Song-tao

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: With the physical operating parameters of EAST tokamak, the formula of the inductive current and electromagnetic load on the ICRF heating antenna and the curve diagram depending on the time of plasma disruption is given. Finally, the further discussion on the utmost case of the electromagnetic force and its effect on the antenna structure using the curve diagram was given

Key words: ICRF; Electromagnetic load; Microwave antenna