

# 紧凑型聚变裂变混合堆参数优化及放电模拟

陈美霞<sup>1,2</sup>, 吴斌<sup>1</sup>, 周晓林<sup>2</sup>, 刘成岳<sup>1</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 四川师范大学物理与电子工程学院, 成都 610068)

**摘要:** 在聚变裂变混合堆大、小半径分别不变情况下, 通过优化聚变裂变混合堆中心螺管尺寸, 用聚变系统分析程序对紧凑型聚变裂变混合堆的参数进行了优化分析, 给出了紧凑型聚变裂变混合堆的最佳设计点。利用 TSC 平衡演化程序以该设计点为基础进行了放电模拟研究, 结果表明该堆具有良好的经济优势及可行性。

**关键词:** 紧凑型; 聚变裂变混合堆; 经济性; 发电成本; 放电模拟

**中图分类号:** TL639

**文献标识码:** A

## 1 引言

聚变能研究和发展的目标是设计制造可靠、安全、高效、环境相容性好的大规模商业聚变电站。发展聚变电站, 除其要有高的安全性和好的环保性外, 其经济性一直是概念设计与工程设计阶段考虑的重要因素<sup>[1]</sup>。目前评价聚变电站经济性好坏的指标通常是电站全寿期平准化发电成本, 简称为发电成本(COE)<sup>[2]</sup>。COE 越低, 表明其经济性越好, 商业竞争力越强。通常情况下, COE 是聚变堆芯重量、尺寸大小、聚变堆规模(如小半径、环径比、拉长比、净电功率)与年运行成本等的函数<sup>[3]</sup>。

紧凑型聚变裂变混合堆是一种新的概念设计, 是探索聚变能研究和发展过程中的一种中间应用研究方案之一, 它的中心螺管(CS)尺寸较小, 在稳态时主要通过非自感来驱动等离子体电流, 具有较小的环径比, 可以获得较大的拉长比和较高的比压<sup>[4, 5]</sup>。本文利用聚变系统分析程序在大、小半径分别不变的情况下, 对聚变裂变混合堆<sup>[6, 7]</sup>中心螺管尺寸进行了优化分析, 分别找到最优化的设计点, 由此找出紧凑型聚变裂变混合堆的最佳设计点。以该设计点为基础, 利用美国普林斯顿大学等离子体物理实验室(PPPL)开发的大型托卡马克模拟程序 TSC 对该点进行了放电模拟, 研究了等离子体电流、大半径、小半径、拉长比、三角形变等重

要物理参数的时间演化。结果表明, 紧凑型聚变裂变混合堆具有一定的经济优势及可行性。

## 2 成本计算模型

对于磁约束聚变堆, COE 的大小主要取决于聚变堆总建造成本、年固定费用率、年燃料成本、年运营与维护成本、年定期部件更换与更新成本、年研发成本、年退役成本、电站平均可用率与净电功率等因素。COE 的单位通常采用美厘/千瓦时 [ $\text{mill} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ ], 目前, 计算 COE 的模型还在不断完善, 本文采用的 COE 模型<sup>[3, 8]</sup>为:

$$COE = 10^6 [C_{AC} + (C_F + C_{O\&M} + C_{SCR})(1+y)^Y + C_{D\&D} + C_{R\&D}] / 24 \times 365 P_E P_f \quad (1)$$

式中,  $C_{AC}$  为年投资成本,  $C_{AC} = T_{CC} F_{CR}$ , 单位为 M\$;  $T_{CC}$  为总建造成本, 单位为 M\$;  $F_{CR}$  为年固定费用率;  $C_F$  为运行起始年的年燃料成本, 单位为 M\$;  $C_{O\&M}$  为运行起始年的年运营与维护成本, 单位为 M\$;  $C_{SCR}$  为运行起始年的年定期部件更换与更新成本, 单位为 M\$;  $C_{R\&D}$  为年研发成本, 单位为 M\$;  $C_{D\&D}$  为年净化与退役成本, 单位为 M\$;  $y$  为物价浮动率, 单位为  $\% \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $Y$  为订货至交货周期, 单位为 a;  $P_E$  为电站输出净电功率, 单位为 MW;  $P_f$  为电站平均可用率又称为电站有效率因子。其中,

收稿日期: 2007-08-17; 修订日期: 2008-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10505022)

作者简介: 陈美霞(1977-), 女, 安徽省界首市人, 硕士研究生, 现在中科院等离子体物理研究所主要从事聚变反应堆堆芯概念设计及数值模拟。

年净化与退役成本与研发成本由下式确定:

$$C_j = F_{CRj} T_{DC} \quad (2)$$

式中,  $T_{DC}$  为直接成本,  $j = D\&D, R\&D$ ;  $F_{CRD\&D}$  和  $F_{CRR\&D}$  分别为年净化与退役成本与研发成本的固定费用率。参照文献[8]及式(1)得到优化的 COE 模型为:

$$COE = \frac{U_{DC}}{0.00876 p_f} [F_{CR} (1 + f_{IDC}) + f_{O\&M} + f_{SCR} + f_F + F_{CRD\&D} + F_{CRR\&D}] \quad (3)$$

式中,  $f_{IDC}$ 、 $f_{O\&M}$ 、 $f_{SCR}$ 、 $f_F$  分别为作为直接成本  $T_{DC}$  的间接成本、年运营与维护成本、年部件定期更换与更新成本、年燃料成本的份额; 单位直接成本  $U_{DC}$  为:

$$U_{DC} = T_{DC} / P_E \quad (4)$$

直接成本  $T_{DC}$  可以分为 5 个子系统的成本与应急费用之和。这 5 个子系统的成本分别为: 土地成本与电站建筑与设施成本 SITE, 堆体成本 FPC, 主热交换系统成本 PHT, 辅助加热系统、电源、配电系统与能量存储系统成本 HTG, 电厂配套辅助系统成本 BOP。每个子系统的单位成本分别记为:

$UC_{SITE}$ , 美元· $W^{-1}$ ;  $UC_{FPC}$ , 美元· $kg^{-1}$ ;  $UC_{PHT}$ , 美元· $W^{-1}$ ;  $UC_{HTG}$ , 美元· $W^{-1}$ ;  $UC_{BOP}$ , 美元· $W^{-1}$ 。每个子系统的应急费用因子分别记为:  $CONT_{SITE}$ 、 $CONT_{FPC}$ 、 $CONT_{PHT}$ 、 $CONT_{HTG}$ 、 $CONT_{BOP}$ 。令:

$$UC_j^* = UC_j (1 + CONT_j) \quad (5)$$

式中,  $j$  表示上述 5 个子系统, 得到  $U_{DC}$  表达式为:

$$U_{DC} = \frac{UC_{FPC}^*}{MPD} + \frac{1}{\eta_{TH} (1 - \frac{1}{Q_E})} \left[ \frac{UC_{HTG}^*}{\eta_{HTG} Q_P M} + UC_{PHT}^* + \eta_{TH} (UC_{SITE}^* + UC_{BOP}^*) \right] \quad (6)$$

式中,  $MPD$  为聚变堆芯的质量功率密度 ( $P_E / M_{FPC}$ ,  $M_{FPC}$  为聚变堆芯质量), 单位为  $kW \cdot t^{-1}$ ;  $\eta_{TH}$  为电站热电转化效率因子;  $\eta_{HTG}$  为输入堆芯功率的转化效率。式(6)中的工程能量增益  $Q_E$  与堆芯能量增益  $Q_P$  ( $Q_P$  等于聚变功率与辅助加热功率之比)的关系由下式确定:

$$\frac{1}{Q_E} = f_{AUX} + \frac{1}{\eta_{HTG} \eta_{TH} Q_P M} \quad (7)$$

$$M = \frac{14.1}{17.6} Q_b + \frac{3.5}{17.6} + \frac{1}{Q_P} \quad (8)$$

式中,  $Q_b$  为包层能量增益;  $f_{AUX}$  为辅助加热功率份

额。

紧凑型聚变裂变混合堆产生的热功率主要来自嬗变包层中的裂变反应, 堆芯聚变反应产生的中子源通过包层嬗变核废料与生产核燃料而发生裂变反应, 从而达到能量增益。包层能量增益  $Q_b$  定义为:

$$Q_b = \frac{E_{fission}}{E_{fusion}} \frac{K_{eff}}{\nu(1 - K_{eff})} \quad (9)$$

式中,  $E_{fission}$  为重核每次裂变释放的能量, 约为 200MeV;  $E_{fusion}$  为聚变中子的能量, 约为 14.6MeV;  $\nu$  为每次裂变产生的平均中子数, 一般为 2~4;  $K_{eff}$  为系统的有效增殖因子。整个紧凑型聚变裂变混合堆的能量增益  $Q_t$  则由下式计算:

$$Q_t = Q_p (0.2 + 0.8 Q_b) \quad (10)$$

由式(10)可知, 该紧凑型聚变裂变混合堆中的能量增益远大于堆芯能量增益, 例如对于  $Q_p = 3$ ,  $K_{eff} = 0.9$ ,  $\nu = 3$ , 可以得到  $Q_t \approx 100$ 。

### 3 参数的优化分析

聚变系统分析程序是基于零维堆芯物理模型、工程计算模型、成本和效益计算模型、优化模型等的集物理、工程、成本、效益计算一体化的聚变经济系统分析程序, 既适用于纯聚变堆经济性和系统分析, 又适用于聚变-裂变堆共生发电系统的系统分析<sup>[3]</sup>。该系统由四个主要功能模块组成: 零维堆芯参数优化计算模块、工程参数优化计算模块、成本分析计算模块以及财务分析模块。下面我们利用该程序在大、小半径分别不变情况下, 对聚变裂变混合堆中心螺管尺寸进行优化分析, 分别寻找最优化的设计点。

#### 3.1 大半径 $R=4.00m$ 不变时的情况

保持聚变裂变混合堆的大半径 4.00m 不变, 对其中心螺管的宽度进行优化, 通过聚变系统分析程序可以算出: 总建造成本  $T_{cc}$ 、聚变功率  $P_F$ 、发电成本 COE 随小半径  $a$  的变化情况以及 COE 随环径比  $A$  的变化情况, 如图 1 所示。

由图 1 可以看出,  $T_{cc}$  和  $P_F$  在小半径  $a$  从 1.00m 增加到 1.38m 时随着  $a$  的增加而增加, 此后二者均随着  $a$  的增加而下降; COE 在  $a$  从 1.00m 增大到 1.45m 时, 随着  $a$  的增大而降低, 在 1.45~1.50m 之间几乎不变, 而从 1.50m 后又开始增大; COE 在环径比  $A$  从 4.00 降到 2.76 时, 随着  $A$  的降低而降低,

当  $A$  在 2.76 和 2.67 之间时 COE 几乎不变, 然后随着  $A$  的进一步降低 COE 反而升高。由此找到在大半径 4.00m 不变时的最佳设计点是: 小半径为

1.50m, 环径为比 2.67, 最优发电成本 COE 为 20.514  $\text{mill}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

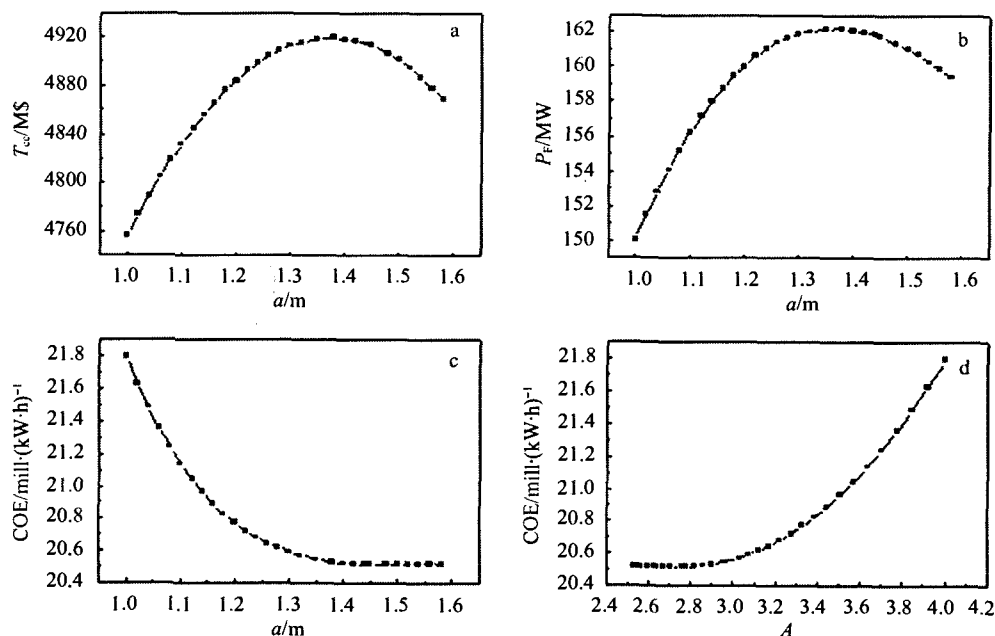


图1 总建造成本  $T_{cc}$ 、聚变功率  $P_F$ 、发电成本 COE 随小半径  $a$  的变化及发电成本随环径比  $A$  的变化

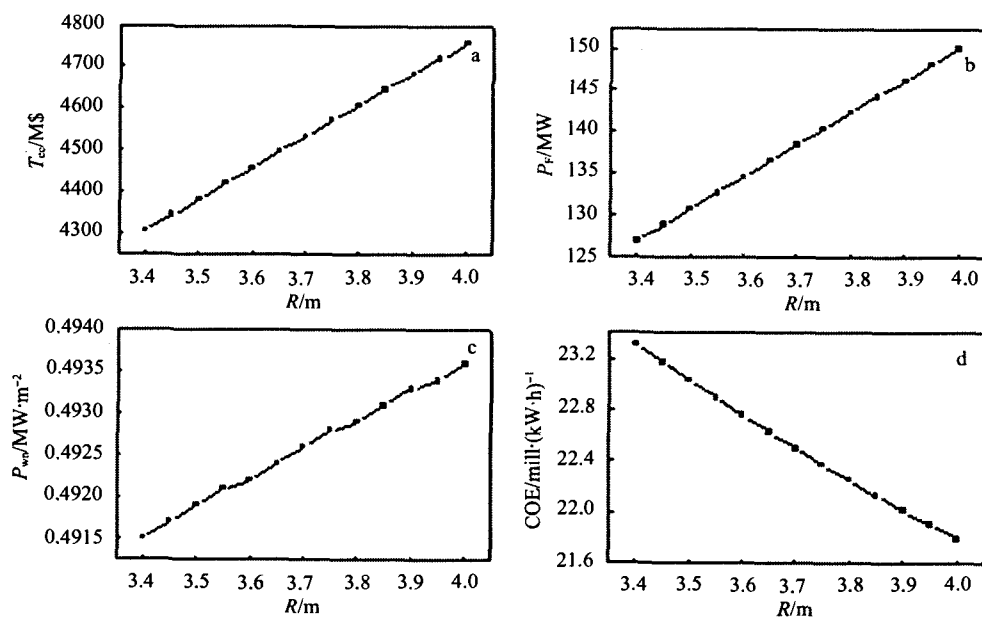


图2 总建造成本  $T_{cc}$ 、聚变功率  $P_F$ 、中子壁负载  $P_{wn}$  及发电成本 COE 随大半径  $R$  的变化

### 3.2 小半径 $a=1.00\text{m}$ 不变时的情况

如果保持聚变裂变混合堆的小半径 1.00m 不

变, 对其中心螺管的宽度进行优化, 通过聚变系统分析程序同样可以算出总建造成本  $T_{cc}$ 、聚变功率

$P_F$ 、中子壁负载  $P_{wn}$  及发电成本 COE 随大半径  $R$  的变化情况,如图 2 所示。由图 2 可知,随着  $R$  的增加,  $T_{cc}$ 、 $P_F$ 、 $P_{wn}$  也随之增加,但 COE 随着  $R$  的增加而降低;由于小半径 1.00m 不变,所以 COE 随环径比  $A$  的变化情况和图 2d 是完全相同的。

在小半径 1.00m 保持不变的情况下,随着大半径增加,环径比也在增加,从而堆体尺寸增加,磁体和极向场线圈体积和质量增加,导致直接成本增加,最终引起总建造成本的上升;同时,随着大半径增加,聚变功率、热功率、毛电功率和中子壁负载也增加,最终使得  $T_{cc}$  增加,但 COE 下降,在大半径为 4.00m 时,电价最优为  $21.794\text{mill}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ 。由此得出在小半径 1.00m 不变时的最佳设计点为:大半径 4.00m,环径比 4,最优电价 COE 为  $21.794\text{mill}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

综合以上分析,表 1 给出了紧凑型聚变裂变混合堆参数的优化结果。可以看出前者的设计优于后者,同时也显示出低环径比的优越性,由此得出紧凑型聚变裂变混合堆的最优化设计点是:大半径 4.00m,小半径 1.50m,环径比 2.67,最优发电成本 COE 为  $20.514\text{mill}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

表 1 紧凑型聚变裂变混合堆的优化参数值

参 数	$R$ 不变时最佳设计点	$a$ 不变时最佳设计点
$R/\text{m}$	4.00	4.00
$a/\text{m}$	1.50	1.00
$A$	2.67	4.0
$I_p/\text{MA}$	6.25	6.25
$\kappa$	1.55	1.55
$\delta$	0.45	0.40
$B_r/\text{T}$	6.1	6.1
$P_F/\text{MW}$	160	150
$P_{wn}/\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$	0.4	0.5
$\text{COE}/\text{mill}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	20.514	21.794

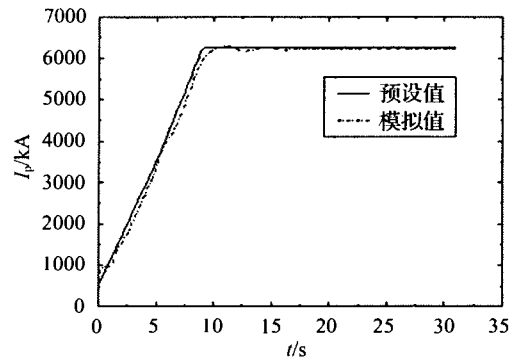


图 3 等离子体电流  $I_p$  随时间  $t$  的演化

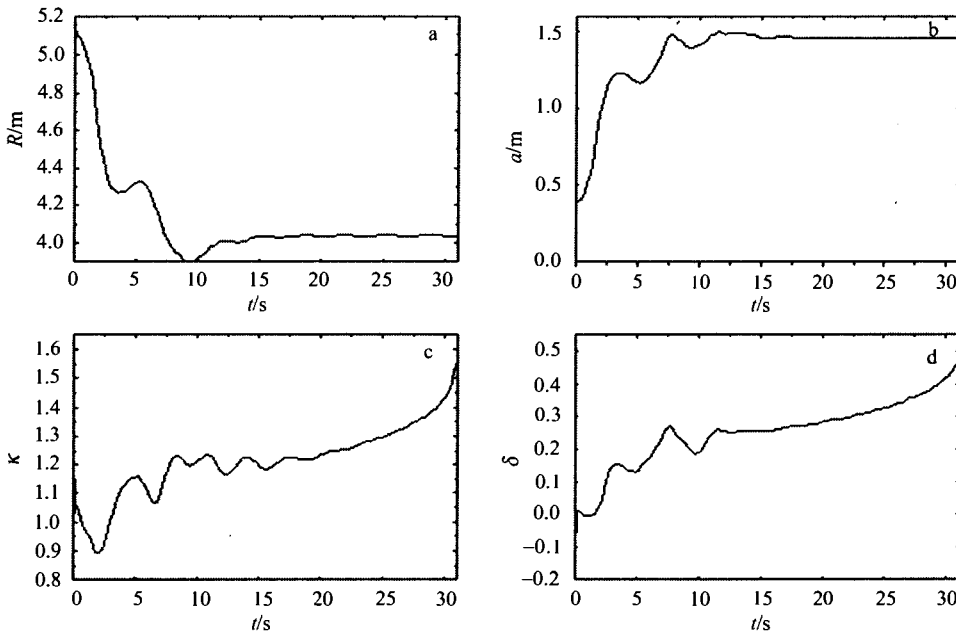


图 4 等离子体大半径  $R$ 、小半径  $a$ 、拉长比  $\kappa$  及三角形变  $\delta$  随时间  $t$  的演化

#### 4 用 TSC 程序对最优化点进行放电模拟

TSC 是美国普林斯顿大学等离子体物理实验

室开发的国际上通用的大型托卡马克模拟程序。利用 TSC 以该紧凑型聚变裂变混合堆的最优化设计点:大半径 4.00m,小半径 1.50m,环径比 2.67 为基础,对其进行了放电模拟<sup>[9,10]</sup>。等离子体从最初的圆形小截面逐步增长,并拉长形成 D 形非圆截面。图 3 为等离子体电流随时间的演化,可以看出等离子体电流在 9s 内由最初的 500kA 稳定线性上升到平顶 6.25MA,然后维持平顶到 31s,模拟结果与预设值吻合很好。同时,等离子体大半径由 5.13m 移到 4.00m 然后逐渐稳定下来;小半径从 0.37m 逐渐增加到 1.50m 然后稳定下来;拉长比从 1.0 逐渐增加到 1.55,三角形变从 0 逐渐增加到 0.45,如图 4 所示。整个模拟结果说明等离子体平衡的建立、等离子体电流及位形控制系统非常稳定,模拟结果对紧凑型聚变裂变混合堆的建堆有一定的参考价值。

## 5 总结

本文利用聚变系统分析程序就紧凑型聚变裂变混合堆的参数进行了优化分析并得到最佳设计点:大半径 4.00m,小半径 1.50m,环径比 2.67,聚变功率约 160MW,中子壁负载约  $0.4\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$ ,最优 COE 为  $20.514\text{mill}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ 。这一发电成本比先进的商用概念堆 ARIES-AT 的还要低<sup>[3]</sup>,这主要是由于紧凑型聚变裂变混合堆的发电成本、总建造成本的大部分由功率定标组成,即 COE 的减小、 $T_{cc}$  的增加主要取决于包层能量增益因子  $Q_b$  的增加,这一点不同于纯聚变堆。同时,我们利用托卡马克模拟程序 TSC 以该设计点为基础,进行了放电

模拟研究,结果表明该紧凑型聚变裂变混合堆具有良好的经济优势及可行性。

本文中的大量数据计算是在中科院合肥物质研究院计算科学中心的 SGI 计算机平台上完成的,在此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] A conceptual study of commercial fusion power plants-final report of the European fusion power plant conceptual study(PPCS) [R]. EFDA-RP-RE-5.0, April 13, 2005.
- [2] 黄德所, 吴宜灿, 储德林, 等. 聚变驱动次临界堆经济性分析 [J]. 核科学与工程, 2004, 24(2): 184-192.
- [3] 黄德所. 聚变驱动次临界堆经济性研究 [D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2006.
- [4] Tobita K, Nishio S, Sato M, et al. Concept of compact low aspect ratio demo reactor, Slim CS [A]. 21th IAEA Fusion Energy Conference [C]. Chengdu, China, 2006. 16-22.
- [5] Nishio S, Ushigusa K. Conceptual design of advanced steady-state tokamak reactor [A]. 18th IAEA Fusion Energy Conference [C]. Sorrento, Italy, 2000. 4-10.
- [6] Qiu L J, Wu Y C, Xiao B J, et al. A low aspect ratio tokamak transmutation system [J]. Nucl. Fusion, 2000, 40(3): 629-634.
- [7] 吴宜灿, 柯严, 郑善良, 等. 聚变驱动次临界堆概念设计研究 [J]. 核科学与工程, 2004, 24(1): 72-80.
- [8] KRAKOWSKI R A. Simplified fusion power plant costing: a general prognosis and call for 'new think' [J]. Fusion Techn., 1995, (27): 135.
- [9] Wu Bin. Introduction of fusion driven subcritical system plasma design [J]. Fusion Engineering and Design, 2003, 66-68: 181-186.
- [10] Chu Delin, Wu Bin, Wu Yican, et al. Preliminary analysis of advanced equilibrium configuration for the fusion-driven subcritical system [J]. Plasma Science & Technology, 2003, 5(6): 2085-2092.

## Optimal analysis for the compact fusion-fission hybrid reactor parameters and discharge simulation

CHEN Mei-xia<sup>1,2</sup>, WU Bin<sup>1</sup>, ZHOU Xiao-lin<sup>2</sup>, LIU Cheng-yue<sup>1</sup>

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei, 230031;

2. College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610068)

**Abstract:** Under the conditions of constant major-radius and minor-radius, an optimal analysis for the parameters of the compact fusion-fission hybrid reactor, including the size of the center solenoid, has been made by using the fusion system analysis code, and the final optimal design point has been found out. Based on this design point, the discharge simulation of the reactor is performed with the tokamak simulation code (TSC), and the modeling results show that the reactor is more economic and feasible.

**Key words:** Compact; Fusion-fission hybrid reactor; Economics analysis; Cost of electricity; Discharge simulation