

**CNIC-01611**  
**SWIP-0152**

**SUNIST 极向场线圈物理设计**  
**PHYSICAL DESIGN OF POLOIDAL FIELD**  
**COILS ON SUNIST**  
*(In Chinese)*

**中国核情报中心**  
**China Nuclear Information Centre**

CNIC-01611  
SWIP-0152

# SUNIST 极向场线圈物理设计

李芳著 王中天 简广德  
(核工业西南物理研究院, 成都, 610041)

## 摘 要

叙述了 SUNIST 极向场线圈的物理设计。主要内容包括：等离子体 MHD 平衡位形的优化，在 SUNIST 装置运行的第一阶段，等离子体位形被控制在垂直稳定的范围内；在成形场线圈单电源供电的条件下，优化了成形场线圈的几何位置和电流配置；用正则化和瞎子爬山法进行了 OH 线圈的零场设计。

关键词：极向场线圈，平衡位形，垂直稳定

# **Physical Design of Poloidal Field Coils on SUNIST**

*(In Chinese)*

LI Fangzhu WANG Zhongtian JIAN Guangde  
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu, 610041)

## **ABSTRACT**

The physical design of poloidal field coils on SUNIST is described. The main content is the optimum of MHD equilibrium configuration, in the first step of SUNIST operation, it is vertical stable. Only shaping field coils are in series each other. The position of shaping field coils and the distribution of current in it are optimized. Using the regularization method and method of so called blind man climbing mountain, the distribution of current in OH coil is optimized.

**Key words:** Poloidal field coils, Equilibrium configuration, Vertical stable

## 前 言

SUNIST 是一个球形环聚变装置，由清华大学，中国科学院北京物理研究所和核工业西南物理研究院共同设计和建造。本文叙述了该装置极向场线圈系统的物理设计，主要内容包括：等离子体 MHD 平衡位形的建立及优化。在 SUNIST 装置运行的第一阶段，等离子体位形被控制在垂直扰动稳定的范围内；在成形场线圈单电源供电的条件下，优化了成形场线圈的几何位置和电流配置；用正则化和瞎子爬山法进行了 OH 线圈的零场设计。

### 1 平衡和垂直不稳定性

SUNIST 装置的主要参数如下：

环向场	$B_T = 0.15 \text{ T}$
等离子体电流	$I_p = 50 \text{ kA}$
等离子体大半径	$R = 0.30 \text{ m}$
等离子体小半径	$a = 0.23 \text{ m}$
环径比	$A = 1.3$
拉长比	$k > 1.43$
三角形变	$\delta > 0.2$
OH 磁通	$\phi = 0.03 \text{ V} \cdot \text{s}$

自由边界 MHD 平衡代码 SWEQU<sup>[1]</sup> 被用于极向场线圈和位形的优化设计。在该代码中，等离子体电流剖面为：

$$J_t = J_0 \left[ \beta_{p0} \frac{r}{R_0} + (1 - \beta_{p0}) \frac{R_0}{r} \right] (\Psi - \Psi_b)^\alpha \cdot f(\beta, \Psi)$$

$$f(\beta, \Psi) = (\Psi_m - \Psi) + \beta (\Psi_m - \Psi_b) \quad (1)$$

式中， $\Psi_m$  和  $\Psi_b$  分别为磁轴和边界处的  $\Psi$  值。

等离子体的极向比压值  $\beta_p$  和内感  $l_i$  分别为：

$$\beta_p = \frac{4 \oint p dv}{\mu_0 R_0 I_p^2}$$

$$l_i = \frac{2 \oint B_p^2 dv}{\mu_0^2 R_0 I_p^2} \quad (2)$$

选取等离子体电流表示式 (1) 中表征极向比压值的参数  $\beta_{p0}$ ，电流剖面参数  $\alpha$  和  $\beta$ ，由式 (2) 可以求得等离子体位形的  $\beta_p$  和  $l_i$ 。一般说来，内感  $l_i < 0.5$ ，表征等离子体电流呈凹形剖面，为反剪切位形。

球形环等离子体有着自然的拉长和三角形变，这也是球形环等离子体有良好约束的重要原因。参考文献 [2] 给出了均匀垂直场条件下，等离子体自然拉长随着径比的变化关系，它们强烈地依赖于等离子体的内感  $l_i$ ：

$$k_0 = 1 + \left[ \frac{0.63}{l_i} + \frac{0.11}{l_i^2} \right] A^{-2} + \left[ \frac{0.20}{l_i} + \frac{-0.24}{l_i^2} \right] A^{-4} \quad (3)$$

SUNIST 等离子体取  $l_i$  值在 1.0 ~ 0.45 之间，则天然拉长为 1.43 ~ 1.99。

20 世纪 70 年代，关于托卡马克垂直不稳定性的研究表明，当外垂直场衰减指数  $n$  为正时，等离子体是垂直稳定的<sup>[3]</sup>。参考文献 [4, 5] 是在等离子体刚体位移假定的情况下，较为仔细地研究了垂直不稳定性问题。结果表明，等离子体截面垂直方向的拉长比是决定稳定性的最重要的参量。时托卡马克存在两个临界拉长比： $K_{1C}$  界定等离子体是否垂直稳定；而当等离子体是垂直不稳定的时候 ( $K > K_{1C}$ )，且  $K > K_{2C}$  时，等离子体的垂直不稳定性增长率将以阿尔芬时标发生， $K_{2C}$  则界定能否用实际可行的控制功率将等离子体的垂直不稳定性增长率控制到可接受的程度。 $K_{1C}$  仅和外极向场有密切关系，它稍大于外垂直场衰减指数  $n = 0$  相对应之拉长比值  $K_{n0}$ 。在 SUNIST 运行的第一阶段，选定  $K < K_{n0}$  的拉长变形孔栏位形。

## 2 极向场线圈物理设计

本系统采用 OH 线圈和成形场线圈系统分开供电方案。OH 线圈由中心螺线管和上下对称的两对补偿线圈构成，它们提供放电过程中大部分的磁通。其几何位置和电流配置优化由参考文献 [6] 给出的正则化方法和平衡代码 SWEQU<sup>[1]</sup> 用瞎子爬山法算出。在  $\Delta\phi = 0.035 \text{ V} \cdot \text{s}$  情况下，在  $R$  从 0.13 ~ 0.43 m， $Z$  从 -0.3 ~ 0.3 m 的一个矩形区域内，平均杂散场为 1.0 Gs (1 Gs =  $10^{-4}$  T)。图 1 给出了极向场线圈示意图，表 1 给出了 OH 线圈位置及电流配置， $R_0$  和  $Z_0$  为线圈几何中心坐标， $\delta R_0$  和  $\delta Z_0$  分别为  $R$  方向和  $Z$  方向线圈宽度。

表 1 OH 线圈位置及电流配置

No. Coil	$I_{OH_i}/\text{kA}$	$N$	$R_0/\text{m}$	$Z_0/\text{m}$	$\delta R_0/\text{m}$	$\delta Z_0/\text{m}$
OH <sub>1</sub>	1792	224	0.055	0	0.02	1.14
OH <sub>2</sub>	400	5	0.144	0.59	0.04	0.04
OH <sub>3</sub>	80	1	0.64	0.73	0.02	0.02
OH <sub>4</sub>	80	1	0.64	-0.73	0.02	0.02
OH <sub>5</sub>	400	5	0.144	-0.59	0.04	0.04

在 SUNIST 运行第一阶段，成形场线圈系统由三对上下对称的线圈 (V1, V2, V3) 组成，它们共用一组供电系统，仅产生孔栏位形。经优化计算，线圈安扎数之比固定为  $I_{V1} : I_{V2} : I_{V3} = 3 : 5 : 5$ ，此时能保证在等离子体中心处的外垂直场衰减指数  $n$  为 0.064，

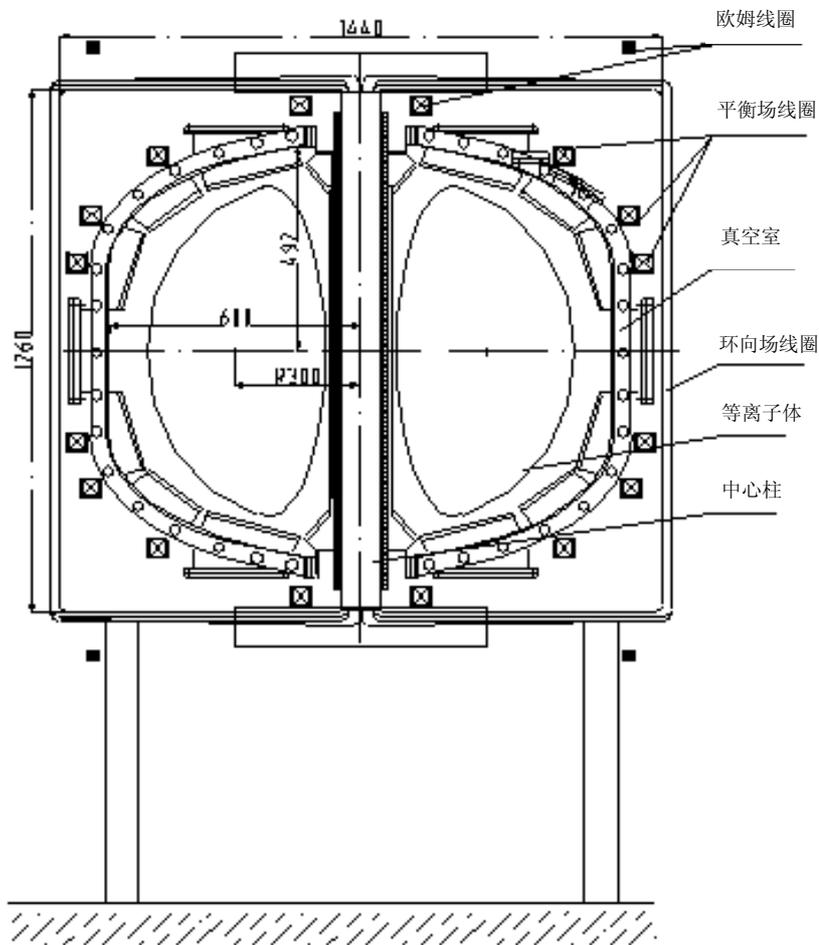


图 1 SUNIST 极向场线圈示意图

或者说，它所形成等离子体位形的拉长比将小于垂直不稳定性的第一临界拉长比  $k_{1c}$ ，等离子体是垂直稳定的，但又有适度的拉长比。不同的成形场线圈电流将产生不同几何位置和环径比的平衡位形，表 2 给出了成形场线圈位置参数，表 3 给出了由平衡代码 SWEQU 算出的位形参数，等离子体参数  $\beta_p=0.5$ ， $I_1$  分别为 0.47 和 0.95（这分别对应等离子体电流凹形剖面 and 抛物剖面）。从计算结果可以看出，不同的成形场线圈电流将产生不同的等离子体位形。电流值增加，拉长比上升，大半径和小半径均下降，这是在装置运行中需要注意的；当然，内感越小，拉长比亦越大，而需要的电流越小。在本设计中，取  $\beta_p$  为 0.5。如  $\beta_p$  增加，拉长比将下降，而所需要的电流还要增加。

表 2 成形场线圈位置参数

No. Coil	$R_0/m$	$Z_0/m$	$\delta R_0/m$	$\delta Z_0/m$
V1	0.484	0.47	0.04	0.04
V2	0.64	0.325	0.04	0.04
V3	0.675	0.215	0.04	0.04

表 3 不同的成形场线圈电流对应的平衡位形 (a)  $I_i=0.47$

$I_i/kA$	$k$	$\delta$	$R_0/m$	$a/m$	$A$
-28.3	1.69	0.41	0.34	0.27	1.26
-29.2	1.74	0.34	0.31	0.24	1.29
-30.2	1.74	0.30	0.30	0.23	1.31
-31.2	1.75	0.26	0.29	0.21	1.33

(b)  $I_i=0.95$

$I_i/kA$	$k$	$\delta$	$R_0/m$	$a/m$	$A$
-8.0	1.36	0.37	0.32	0.25	1.28
-39.0	1.37	0.33	0.31	0.24	1.30
-40.0	1.38	0.30	0.29	0.23	1.31
-40.9	1.39	0.29	0.26	0.22	1.33

### 3 讨 论

SUNIST 成形场线圈系统的设计亦考虑到装置下一步运行模式的需要。如 V1 与 (V2+V3) 独立供电，电流配置将更为合理，位形可调性更强。例如 V1 由负变正，可以产生拉长比直到 2 的位形。当然，此时等离子体已垂直不稳定，需要考虑反馈控制。进一步，如在真空室外再添加一对偏滤器线圈 V4，且用三组线圈独立供电，亦可产生各种形状的偏滤器位形。

### 参 考 文 献

- 1 Li F Z, Xu W B, Shi B R. China. J. Plasma Phys. Nucl. Fusion, 1989, 9: 12
- 2 Li F Z, et al. Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, Toki-city, Japan, 1997, 1: 522
- 3 Mukhovatov V S, Shafranov N D. Nucl. Fusion, 1971, 11: 605
- 4 Li F Z, et al. Fusion Engineering and Desing, 1998, 39~40: 109
- 5 er J B, Nelson G H. Nucl. Fusion, 1990, 30: 111
- 6 Z T Wang, G D Jian, F Z Li, G P Mao. The Fourth Asia Pacific Plasma Theory