

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416288

CAT-1 超导磁悬浮系统的平衡分析与 永磁实验装置设计*

王亚林¹ 杨庆喜² 张国书³ 王 召³ 刘云辉³

(1. 东华理工大学机械与电子工程学院 南昌 330013; 2. 中科院合肥等离子体所 合肥 230088;

3. 东华理工大学核科学与工程学院 南昌 330013)

摘 要: 天环一号(CAT-1)是国内首个采用磁悬浮偶极场磁体设计的磁约束等离子体装置。本文根据 CAT-1 装置总体目标和参数设计要求,采用线电流简化模型,基于矢量磁场、力学平衡及动力学等方法,完成了超导磁悬浮系统的平衡稳定分析,给出了参数设计结果;初步设计出简化的永磁悬浮实验装置,用于检验超导磁悬浮系统稳定性及参数可靠性。结果表明,对于 CAT-1 装置的悬浮磁体 1 200 kg、电流 5 MA、悬浮距离 2.0 m 设计目标,托举线圈半径最优值为 1.7 m,相应的电流为 3.49 kA,为实现对悬浮磁体偏移运动的有效阻减及控制,平衡点附近工作区域应限制在垂直位移 $|\Delta z| < 0.1$ m、水平位移 $|\Delta r| < 0.05$ m、倾斜角位移 $|\Delta \alpha| < \pi/24$;分析了 TSR 线圈对悬浮线圈的影响,计算显示 TSR 与悬浮线圈产生对向漂移,漂移幅度与径向位置有关,同时 TSR 线圈侧原本闭合磁力线被破坏,造成输运粒子损失;采用 1.5 kg 永磁完成了悬浮实验装置概念设计,分析表明永磁体与托举线圈间距 0.1 m,铜导托举线圈电流 895 A,满足控制对响应速度的要求。

关键词: CAT-1 装置;悬浮偶极场;悬浮超导环;平衡与稳定控制;永磁体悬浮测试平台

中图分类号: TN362.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 0827

Balance analysis of CAT-1 superconducting maglev system and design of permanent magnet experimental device

Wang Yalin¹ Yang Qingxi² Zhang Guoshu³ Wang Zhao³ Liu Yunhui³

(1. School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institute of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: CAT-1 is the first domestic magnetic confinement fusion device to use a magnetic levitation dipole field magnet design. Based on the overall goals and parameter design requirements of the CAT-1 device, this paper uses a simplified line current model, and employs vector magnetic field, mechanical equilibrium, and dynamics methods to complete the equilibrium stability analysis of the superconducting magnetic levitation system, and provides parameter design results. A simplified permanent magnet levitation experimental device has been preliminarily designed to verify the stability of the superconducting magnetic levitation system and the reliability of the parameters. The results show that for the CAT-1 device's levitation magnet weighing 1 200 kg, current of 5 MA, and levitation distance of 2.0 m design goals, the optimal value of the lifting coil radius is 1.7 m, and the corresponding current is 3.49 kA. In order to effectively reduce and control the displacement of the levitated magnet, the working area near the equilibrium point should be restricted to vertical displacement $|\Delta z| < 0.1$ m, horizontal displacement $|\Delta r| < 0.05$ m, and tilt angle displacement $|\Delta \alpha| < \pi/24$. The influence of TSR coil on the suspended coil is analyzed. The calculation shows that TSR and the suspended coil drift in the opposite direction, the drift amplitude is related to the radial position, and the originally closed magnetic field line on the side of the TSR coil is destroyed, resulting in the loss of the transported particles. A conceptual design of a levitation experiment device using 1.5 kg permanent magnets was completed, and the analysis showed that the distance between the permanent magnet and the copper levitation coil of 0.1 m, levitation coil current of 895 A satisfying the requirements for control response speed.

Keywords: CAT-1 device; floating dipole field; floating superconducting ring; balance and stability control; levitated permanent magnet testing device

0 引 言

悬浮偶极场磁约束装置是磁约束等离子体的一种新型

技术路线,源于地球磁层等离子体约束原理,采用悬浮环承载流线圈产生极向磁场(即偶极场)来实现等离子体约束。悬浮偶极场等离子体具有稳定的高密度、高压强峰化分布,

收稿日期:2024-06-22

* 基金项目:江西省 JMRH 重点建设项目(G20230002)、江西省“双千计划”项目(DHSQT22021001)、江西省重点研发计划重点项目(20192ACB80006)、江西省科学技术研究项目(GJJ200714)、国家青年自然科学基金项目(12105042)、安徽省教育厅高校科学研究重点项目(KJ2018A0716)资助

峰值区域比压值大于 100%，理论分析与数值模拟预测，峰值区域密度、温度及能量约束时间有望达到 D-He 和氦催化 D-D 聚变点火条件，对核聚变能源开发及应用极具吸引力。此外，偶极场磁约束装置^[1-2]等离子体约束在悬浮超导磁体环外侧、峰化分布稳定^[3]、悬浮体无机械支撑、无接触传热等特点^[4-5]。目前，分别由 MIT 建造的 LDX^[6-7]、东京大学建造的 RT-1^[8]两个偶极场磁约束装置，在其上实验测得：在低频电磁扰动下，得到等离子体向内湍流箍缩、自组织建立稳定性峰值分布、局部 β 比压大于 100%、电子云约束时间 300 s 及实验室测到了哨声波等实验现象和结果^[9-10]；由哈尔滨工业大学研制的近地卫星地球磁层研究装置(SPERF-DREX)也有了实质进展^[11]。但对于聚变研究由于装置设计及缺乏加热实验等原因，等离子体三乘积性能参数还比较低^[12-14]，目前 LDX 装置已退役，RT-1 还在运行，RT-1 转向对反物质进行实验研究。

针对偶极场装置国内外现状，东华理工大学科研团队首次提出“天环一号”(China astro-torus No. 1, CAT-1)悬浮偶极场磁约束聚变装置^[15]的设计研究，用于偶极场聚变高温等离子体 MHD 稳定性、输运机制及实验定标规律等实验研究，装置整体的最终目的是实现对高温高密度偶极场等离子体稳定性、湍流输运机理等等离子体约束性能相关的物理实验研究；综合分析项目前期涉及的理论推导，设计出装置永磁实验装置^[16-18]。

1 CAT-1 装置结构及主要参数

CAT-1 装置中的超导悬浮线圈(floating coil, FC)放于半径达 4 m 的真空室中，重 1 200 kg，装置真空室半径 4 m，FC 外表面磁场 ≥ 5 T；CAT-1 装置 3D 结构图及主主要部件如图 1 所示^[19-21]，CAT-1 实验装置其他设计条件及物理参数要求如表 1 所示。

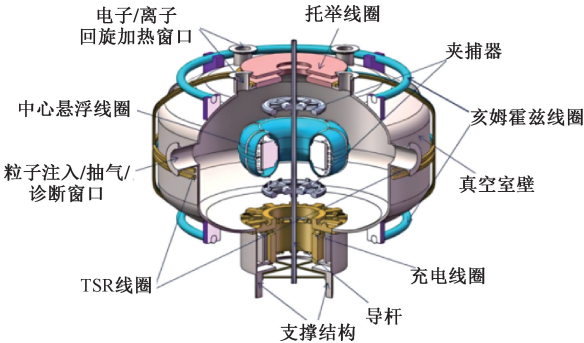


图 1 CAT-1 装置 3D 结构图
Fig. 1 Schematic diagram of CAT-1 device

2 悬浮线圈平衡理论分析

2.1 线电流平衡原理

CAT-1 对应 3D 结构中，托举线圈(levitation coil, LC)与悬浮线圈 FC 对应电流环模型如图 2 所示^[22]，根据牛顿

表 1 CAT-1 设计条件及参数要求
Table 1 CAT-1 design conditions and parameter requirements

等离子体	峰值密度/ m^{-3}	5×10^{19}
子体	最大温度/eV	500
物理	比压 β	100%
装置工程	超导环	磁悬浮设计
	真空室	边界满足等离子体交换膜稳定性
	压缩比(V 边缘/V 峰值)	>500
	绝热压力比(P 峰值/P 边缘)	$>30\,000$
悬浮磁体(FC)	悬浮时间/h	>3
	水平摆动频率/Hz	<0.5 Hz
	倾斜摆动频率/Hz	<1.6 Hz
	重力	与悬浮电磁力相平衡
辅助加热	垂直速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	<5
	高能电子温度/keV	200
	ECRH/ICRH 加热功率/kW	500~1 000

第二定理得：

$$m_F \frac{d^2 \vec{r}_F}{dt^2} = \frac{\mu_0 \cdot I_F I_L}{4\pi} \oint \oint \frac{d\vec{L}_L \times \vec{r}}{r^3} \times d\vec{L}_F - m_F \vec{g} \quad (1)$$

其中， $d\vec{L}_L$ 为托举线圈微元， I_F 为悬浮线圈中的电流， $d\vec{L}_F$ 是悬浮线圈的微元， m_F 为悬浮磁体质量， $\vec{r}_F$ 为悬浮。

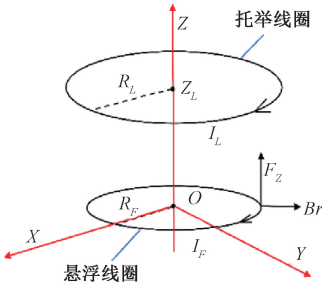


图 2 CAT-1 理想电流环模型
Fig. 2 CAT-1 ideal ring current model

2.2 悬浮线圈静态稳定力学分析模型

在 CAT-1 项目中，悬浮线圈由超导线绕制而成，对应超导体的磁通量守恒为：

$$\Phi = L_F I_{F0} = M_{LF} I_L + L_F I_F \quad (2)$$

其中，悬浮线圈的磁通量 Φ 在超导体中磁通守恒，为常数； L_F 为悬浮磁体的自感系数，与面积和匝数有关； I_{F0} 为悬浮线圈在底部充电的电流； I_F 为在真空中心达悬浮平衡时的悬浮线圈电流； M_{LF} 为托举线圈和线圈的互感，与两者的空间位置和几何尺寸有关。联立式(1)、(2)可得：

$$I_F^2 - I_{F0} I_F + \frac{mgM_{LF}}{L_F \oint \oint \frac{\vec{dl}_L \times \vec{r}}{r^3} \times \vec{dl}_F} = 0 \quad (3)$$

托举线圈电流在悬浮磁体上方,产生电磁吸引力,可得悬浮磁体电流方程为:

$$I_{F0} - \sqrt{I_{F0}^2 - \frac{4mgM_{LF}}{L_F \oint \oint \frac{\vec{dl}_L \times \vec{r}}{r^3} \times \vec{dl}_F}} \\ I_F = \frac{2}{2} \quad (4)$$

托举线圈对应电流函数为:

$$I_{F0} + \sqrt{I_{F0}^2 - \frac{4mgM_{LF}}{L_F \oint \oint \frac{\vec{dl}_L \times \vec{r}}{r^3} \times \vec{dl}_F}} \\ I_L = \frac{L_F}{M_{LF}} \frac{2}{2} \quad (5)$$

联立求解上述方程得到悬浮磁体电流为:

$$I_{F0} = 2I_F + \sqrt{I_{F0}^2 - \frac{4mgM_{LF}}{L_F \oint \oint \frac{\vec{dl}_L \times \vec{r}}{r^3} \times \vec{dl}_F}} \quad (6)$$

根据恩绍定理^[17],悬浮线圈平衡位置对应的数学式为:

$$\frac{\partial(\frac{\mu_0 \cdot I_f I_l \oint \oint (\frac{\vec{dl}_l \times \vec{r}}{r^3}) \times \vec{dl}_f - mg)}{\partial \vec{n}}} < 0 \quad (7)$$

其中, $\vec{n}$ 为悬浮线圈的任意位移方向,平衡位置悬浮线圈所受合外力为 0, mg 为常数,式(7)不能在任意方向同时成立,须先要求某个特定方向不变,文中设位移 $\vec{n}$ 为特定方向,经过归一化处理,可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{F}}{\partial z} = \frac{\mu_0 \cdot I_f I_l}{4\pi} \oint \oint \frac{\partial(\frac{\vec{dl}_l \times \vec{r}}{r^3})}{\partial z} \times \vec{dl}_f + \oint \oint \frac{\vec{dl}_l \times \vec{r}}{r^3} \times \frac{\partial(\vec{dl}_f)}{\partial z} < 0 \\ \frac{\partial \vec{F}}{\partial er} = \frac{\mu_0 \cdot I_f I_l}{4\pi} \oint \oint \frac{\partial(\frac{\vec{dl}_l \times \vec{r}}{r^3})}{\partial er} \times \vec{dl}_f + \oint \oint \frac{\vec{dl}_l \times \vec{r}}{r^3} \times \frac{\partial(\vec{dl}_f)}{\partial er} < 0 \end{array} \right. \quad (8)$$

其中, z 为垂直位移方向, er 为水平位移方向,

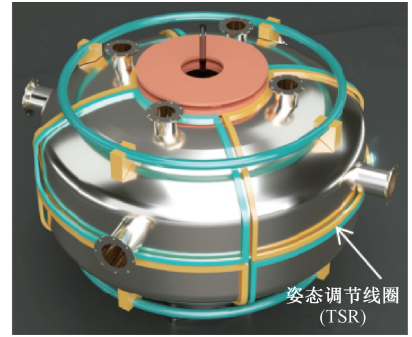
$\vec{\partial F} / \partial z, \vec{\partial F} / \partial er$ 分别为悬浮线圈电磁力在垂直、水平方向的偏微分函数及对应稳定条件。

当环形电流倾斜时,得到力矩的偏微分函数及稳定条件为:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial \alpha} = \frac{\oint \oint \vec{dl}_f \times \vec{r}}{\partial \alpha} = \oint (\vec{dl}_f \times \frac{\partial \vec{r}}{\partial \alpha} + \vec{r} \times \frac{\partial \vec{dl}_f}{\partial \alpha}) < 0 \quad (9)$$

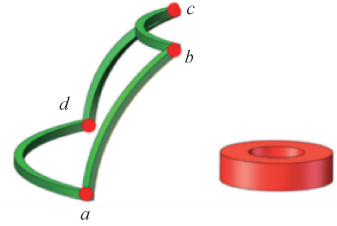
2.3 TSR 姿态调节线圈组

为保持偶极场线圈的悬浮稳定控制,在 CAT-1 真空室外面设计了上下、左右共 8 个对称分布的姿态调整线圈 (title-slider-rotate coil, TSR) 来控制其倾斜、偏移和旋转运动;对应 TSR 整体分布如图 3 所示(黄色、绿色线圈),8 个姿态调节线圈如图 3(a)所示,单个 TSR 线圈模型如图 3(b)所示,单个 TSR 线圈上的电流通路方向为 $a-b-c-d-a$ 。



(a) 姿态调节(TSR)线圈空间布置图

(a) Spatial arrangement of tilt-slider-rotate(TSR) coils



(b) 单个TSR线圈
(b) Single TS

图 3 TSR 线圈图组

Fig. 3 TSR coils assembly

根据笛卡尔坐标原理,偶极场装置的 TSR 线圈可使用的参数方程表示为^[23]:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = [R_m(\phi_a) \cos(\phi_a) \cos(\theta), R_m(\phi) \cos(\phi) \cos(\theta_a), \\ R_m(\phi_c) \cos(\phi_c) \cos(\theta), R_m(\phi) \cos(\phi) \cos(\theta_b)] \\ y = [R_m(\phi_a) \cos(\phi_a) \sin(\theta), R_m(\phi) \cos(\phi) \sin(\theta_a), \\ R_m(\phi_c) \cos(\phi_c) \sin(\theta), R_m(\phi) \cos(\phi) \sin(\theta_b)] \\ z = [R_m(\phi_a) \sin(\phi_a), R_m(\phi) \sin(\phi), \\ R_m(\phi_c) \sin(\phi_c), R_m(\phi) \sin(\phi)] \end{array} \right. \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 R_m(\phi) &= a + b \sin(\phi), \\
 a &= KRc - b \sin(\phi_a), \\
 b &= \frac{KRc - \sqrt{rc^2 + Hc^2}}{\sin(\phi_a) - \sin(\phi_c)}
 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\phi \in (\phi_a, \phi_c)$ 是环向角, 其中的 $\phi_a = \theta_b = 0.01\pi$, $\theta_d = 0.49\pi$, $\phi_c = \arctan(Hc/rc)$, $\theta \in (\theta_c, \theta_d)$ 是极向角; 系数 rc 和 Rc 分别表示水平线圈的半径; Hc 是两个水平线圈间距; $K = \cos(\theta)$ 。

文中将图 3 真空室体积近似为圆柱体, 在 CAT-1 参数要求方面, 设定每一个 TSR 线圈分为水平两段、竖直两段; 绘制水平段线圈时, 选择的极向角参数为 ϕ_b 或 ϕ_d , 环向角参数 $\theta \in (\theta_a + n\pi/4, \theta_c + n\pi/4)$, 绘制垂直段线圈时选择极向角参数为 $\theta_a + n\pi/4$ 或 $\theta_c + n\pi/4$, $\phi \in (\phi_b, \phi_d)$ 。对应完整磁约束线圈示意图如图 4 所示。

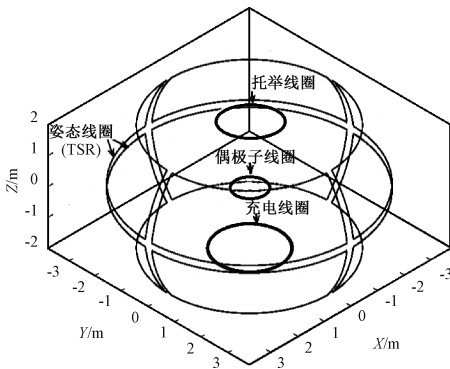


图 4 悬浮偶极场装置 CAT-1 磁约束线圈示意图

Fig. 4 Schematic diagram of CAT-1 magnetic constraint coil of levitated dipole field device

2.4 悬浮线圈动力学分析模型

基于悬浮磁体垂直、水平、旋转 3 种运动规律, 根据牛顿第二定律建立了其周期摆动运动方程的数学模型为:

$$\begin{cases}
 \frac{\partial F}{\partial z}(z - z_0) = m_F \frac{d^2 z}{dt^2} + mg \\
 \frac{\partial F}{\partial er} er = m_F \cdot \frac{d^2 er}{dt^2} \\
 \frac{\partial M}{\partial \alpha} \alpha = I \cdot \frac{d^2 \alpha}{dt^2}
 \end{cases} \quad (12)$$

其中, z_0 为悬浮体的预设位置, F_{mz} 为悬浮磁体所受磁场力, I 为转动惯量, z 为垂直方向, er 为水平方向。 $\partial \vec{F} / \partial z$, $\partial \vec{F} / \partial er$, $\partial \vec{M} / \partial \alpha$ 分别为悬浮磁体在垂直、水平、倾斜方向 3 个方向的偏微分姿态函数模型, 得到悬浮体在 z_0 位置各方向上运动的特征频率为:

$$\begin{cases}
 f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_F} \frac{\partial F}{\partial z}} \\
 f_{er} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_F} \frac{\partial F}{\partial er}} \\
 f_\alpha = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{I} \frac{\partial M}{\partial \alpha}}
 \end{cases} \quad (13)$$

其中, 当悬浮体在某方向的导数为负数时, 其运动为简谐周期运动, 对于 3 个方向的耦合运动, 令垂直方向的位置变化为上下对称变化, 在平衡点附近时, 设定不会引起水平和倾斜方向的加速度改变, 只考虑水平偏移、倾斜偏移的变化。

3 分析计算与结果

3.1 托举线圈参数设计

根据设计目标和要求, 设定悬浮磁体大半径为 0.5 m, 小半径为 0.25 m, 悬浮状态下悬浮磁体电流为 $I_F = 5$ MA, 高度 H 为 2 m, 采用低温 Nb3Sn 超导方案^[19], 悬浮超导重量需 1 吨左右, 垂直、水平及倾斜振动频率分别小于 5 Hz、0.5 Hz 和 1.6 Hz, 确定悬浮超导线圈和托举线圈的工作参数如表 2 所示。

表 2 CAT-1 悬浮磁体系统参数及特征频率结果

Table 2 Magnet parameter table

参数	值
悬浮磁体质量/kg	1 200.0
悬浮磁体大半径/m	0.5
悬浮磁体小半径/m	0.25
悬浮高度/m	2.0
托举线圈半径/m	1.7
悬浮磁体总电流 I_F /MA	5
托举线圈平衡电流/A	34 943
垂直特征频率/Hz	$0 + 0.5i \text{ Hz} < 5$
水平振动频率/Hz	$0.3 \text{ Hz} < 0.5$
倾斜振动频率/Hz	$0.52 \text{ Hz} < 1.6$

表 2 中, 以悬浮磁体(FC)中心建立原点坐标系, R_F 为悬浮磁体半径, I_F 为电流, m_F 为质量; 对托举线圈, z_L 为托举线圈位于 z 轴方向的位置, I_L 为总电流, R_L 为半径; Br 为托举线圈激发的磁感应强度; F 为悬浮磁体上方磁力, F_z 为垂直方向分量, F_{er} 为水平分量; 对倾斜方向做刚体运动, M 为力矩, α 为倾斜角。当悬浮高度 H 为 2 m 时, 得出举线圈半径 R_L 与电流的关系, 对应图形如图 5 所示。由图 5 中可以看出, 托举线圈半径 $R_L = 1.7$ m 时, 所需悬浮电流最小值 $I_L = 34\,943$ A。

线圈稳定与托举线圈稳定区域如图 6 所示, 其中实线部分为稳定区域, 虚线为不稳定区域, 图中展示了 CAT-1 与 LDX、RT-1、Mini-RT 系列装置各个稳定点位置, 通过前述计算分析表明, 当 CAT-1 托举线圈半径 > 700 mm (即 $1.4 R_F$) 时, 悬浮线圈是稳定的。

3.2 悬浮磁体稳定分析

1) 悬浮磁体受力分析结果

计算中假定水平和倾斜方向无偏移, 将悬浮磁体的运动分解为垂直、水平、倾斜 3 个方向的运动, 对应 $er = 0$, $\alpha =$

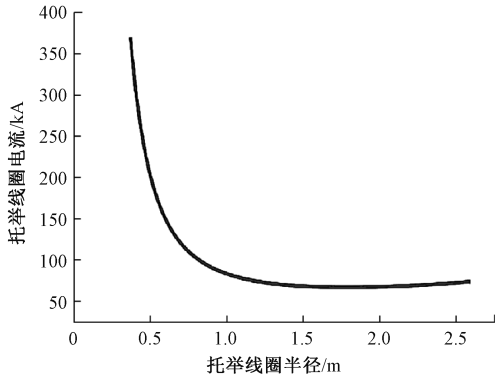
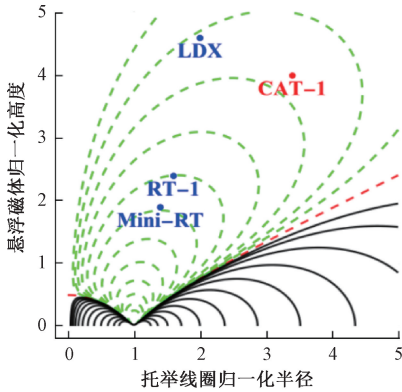
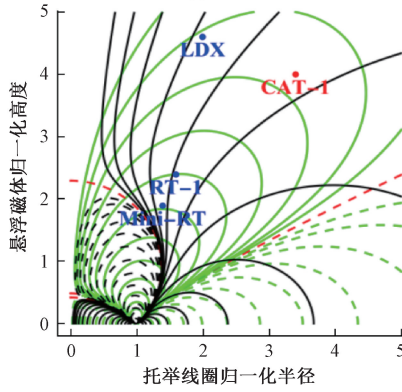


图 5 托举线圈半径(R_L)与悬浮所需电流(I_L)关系图
($H=2.0\text{ m}$)

Fig. 5 Relationship between LC radius (R_L) and floating required current (I_L) when $H=2.0\text{ m}$



(a) 垂直
(a) Vertical



(b) 水平-倾斜
(b) Horizontal-tilt

图 6 CAT-1 稳定性与托举线圈参数分布图

Fig. 6 CAT-1 stability and parameter distribution of levitation coil

0、托举线圈(LC)电流 $I_L=34\,943\text{ A}$ 、悬浮高度 $H=2.0\text{ m}$ 。对于 FC 垂直方向稳定分析,假定 LC 线圈垂直位置为 z ,合外力垂直分量为 F_z ,得到悬浮磁体的垂直受力与位置关系,悬浮磁体工作点在垂直方向 $\pm 0.1\text{ m}$ 范围内近似为线性关系^[24],如图 7 所示。

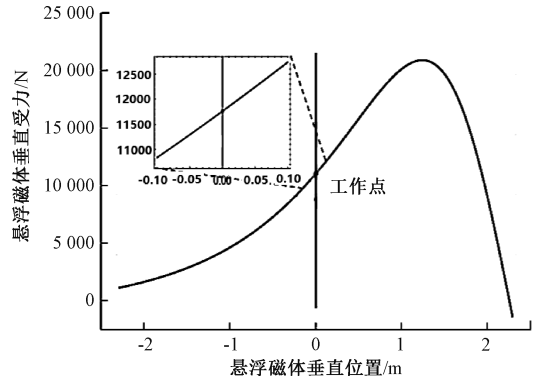
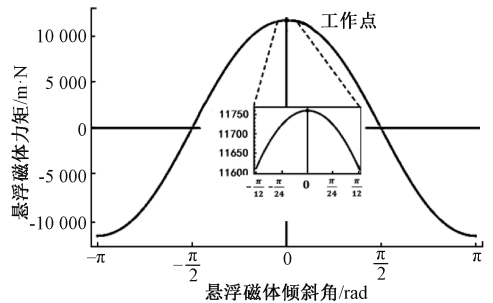


图 7 悬浮磁体的受力与位置关系图($er=0.0\text{ m}$ 、 $\alpha=0\text{ rad}$)

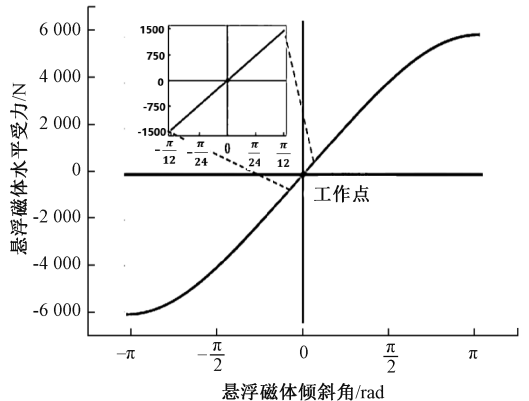
Fig. 7 Relationship between force and position of FC with $er=0.0\text{ m}$ 、 $\alpha=0\text{ rad}$

2) 倾角偏移力学分析

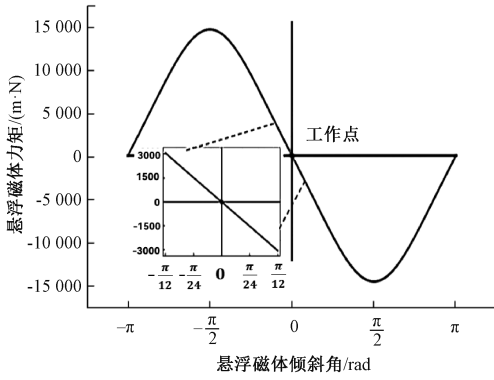
由于水平和倾斜偏移均会破坏磁体系统的对称性,会导致 FC 线圈受力和力矩的改变,因此需综合考虑悬浮磁体位置偏移运动引起的力学耦合问题。倾斜角(α)在 $\pm\pi/12$ 内时,悬浮磁体应当在预设平衡位置的附近做一定幅度的振动,为对悬浮磁体偏移运动的有效阻减及控制,平衡点附近工作区域应限制在垂直位移 $|\Delta z|<0.1\text{ m}$ 、水平位移 $|\Delta er|<0.05\text{ m}$ 、倾斜角位移 $|\Delta\alpha|<\pi/24$,通过分析图 8 中 3 个曲线得出水平位置的偏移影响小于另外两者一个数量级。受力耦合计算结果如图 8 所示。



(a) 倾斜角(α)对垂直的影响
(a) Tilt angle(α) effect on vertical



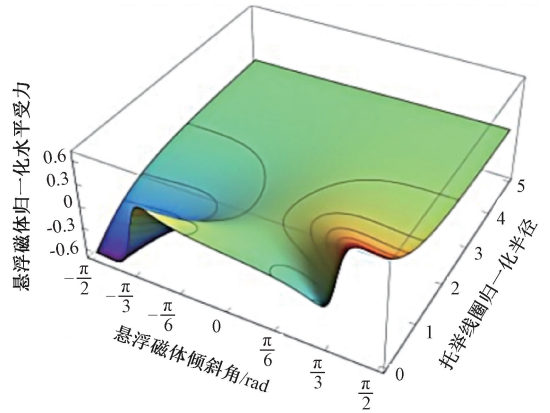
(b) 倾斜角(α)对水平分力的影响
(b) Tilt angle(α) effect on horizontal



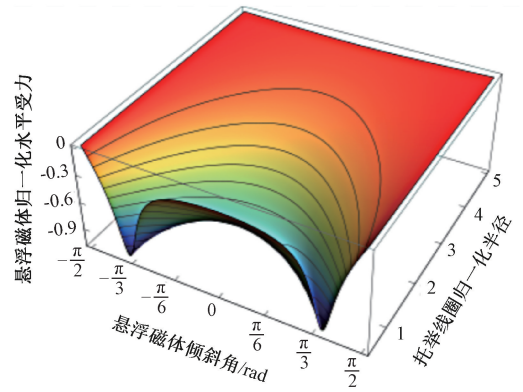
(c) 倾斜角(α)对力矩的影响
(c) The influence of inclination angle (α) on torque

图 8 倾斜角(α)引起的受力耦合

Fig. 8 Force coupling caused by tilt offset (α)



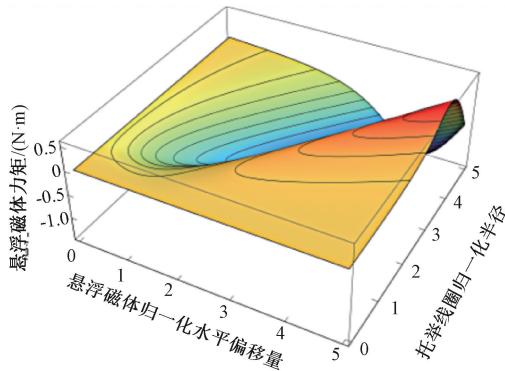
(c) 倾斜角对水平受力影响
(c) Influence of tilt angle on horizontal force



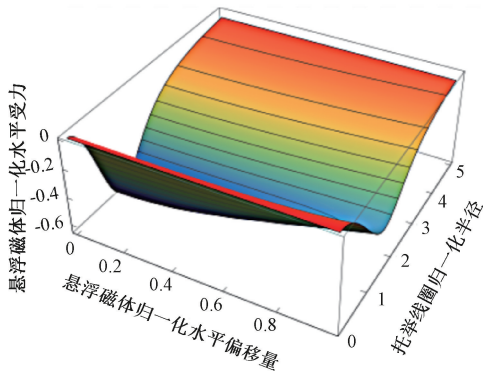
(d) 倾斜角对垂直受力影响
(d) Influence of tilt angle on vertical force

图 9 耦合运动影响关系图

Fig. 9 Influence diagram of coupled motion



(a) 水平偏移对倾斜力矩影响
(a) Influence of horizontal offset on tilt moment



(b) 水平偏移对垂直受力影响
(b) Influence of horizontal offset on vertical force

3) 运动耦合分析

为确保受力变化控制在线性范围内,使水平、倾斜方向实现自稳定在垂直方向上,设计反馈控制系统来确保了其振动在设计范围内可控。采用水平归一化位移、受力方法,得出 FC 悬浮磁体互作用及耦合运动影响关系计算结果图,耦合运动影响关系如图 9 所示。

在 CAT-1 最优托举线圈参数条件下,综合分析图 9(a)~(d) 4 个归一化计算图形,得出倾斜振动的角频率为 3.3 rad/s,悬浮磁体的悬浮高度临界值为 0.9 m。当托

举线圈达到 $r_l > r_*$ 时,不同方向之间的受力耦合均呈负指数规律下降, r_* 为倾斜稳定最大临界值,文中 r_* 大致取值范围在 $1.4 R_F \sim 2 R_F$; 当无偏移、无倾斜时,倾斜稳定最大临界值为 $1.4 R_F$ 。

4) TSR 线圈磁场与偶极场耦合计算

这里假设偶极场线圈电流 $I_D = 5$ MA, TSR 线圈电流为 $I_{TSR} = 50$ kA,在偏移和倾斜模式下,根据给定的 TSR 线圈和偶极场线圈电流,在笛卡尔坐标系下对应的磁场线方程为:

$$\frac{dx}{B_x} = \frac{dy}{B_y} = \frac{dz}{B_z} = \frac{ds}{|B|} \quad (14)$$

其中, B_x 、 B_y 和 B_z 分别表示磁场的 x 、 y 和 z 轴分量; ds 表示磁场线距离步长。在数值求解常微分方程时,使用 Matlab() 变步长 4 阶龙格库塔函数 ode45,最大曲线步长取 $ds_{max} = 1$ mm。得出磁偶极场在偏移、倾斜两种模式下三维磁场线,其中蓝色点线为磁场线,红色曲线为 TSR 线圈,青色、绿色和品红色曲线分别为悬浮线圈、充电线圈和偶极场线圈,虚线表示电流为零时的线圈,对应分布曲线如图 10 所示。

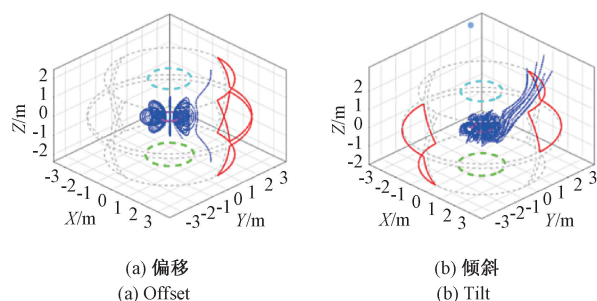


图 10 磁偶极场与 TSR 线圈在偏移和倾斜模式下磁场耦合三维磁场线分布

Fig. 10 The magnetic dipole field is coupled with the three-dimensional magnetic field line distribution of the TSR coil in offset and tilt modes

在图 10(a)偏移模式中,靠近 TSR 线圈一侧磁偶极场受磁场作用磁场线向内侧挤压变形。在图 10(b)倾斜模式中,磁场线受到 TSR 线圈作用沿偶极场线圈产生对向漂移,在漂移幅度与径向位置有关的影响下,初始时位于不同极向平面内的通量管混合可能驱动等离子体输运和不稳定性;同时在 TSR 线圈作用下,在靠近 TSR 线圈侧磁偶极场会产生许多开放磁场线造成输运粒子损失。

3.3 永磁体实验装置概念设计

实验前期,为降低研发成本,在真实建造 CAT-1 的 1 200 kg 悬浮超导环之前,拟设计一个结构简单的非真空环境,先放置重量轻的环形永磁环代替超导环,模拟悬浮超导实验装置的工作状况,以积累 CAT-1 的悬浮控制经验。文中设计环形永磁体重量为 1.5 kg,托举线圈采用铜导磁体,利用 TSR 姿态线圈降低悬浮永磁体摆动,垂直位置偏移反馈控制技术,达到水平偏移与倾斜在偏移限制范围时可实现自稳定目的。

为了避免铜导托举电流及电感太高而导致位置的反馈控制系统及电源响应延迟,在选择磁体间距时,悬浮体平衡稳定间距选择 0.1 m,永磁体等效电流为 35 kA,托举线圈电流为 0.895 kA,相互作用力 17.7 N,所需作用力 14.5 N,设定的托举线圈电流满足控制要求。磁体轴向间距与所需相互作用力、托举线圈电流之间关系曲线分析与计算结果如图 11 所示。

设计永磁体悬浮高度为 0.1 m,永磁体环(悬浮线圈)外直径 0.1 m,内直径为 0.04 m,高文 0.03 m,截面积为 0.0018 m^2 ,表面场强为 0.6 T;托举线圈为铜导线圈,外直径为 0.24 m,内直径为 0.18 mm,高为 0.04 m,截面积 0.0024 m^2 ,得到对应永磁环与托举线圈的位置布置及平面设计如图 12 所示。

装置整体结构设计分为上中下 3 层环形支撑,对应材质线圈盒为 G10,支撑为 SS316L 方钢;托举线圈 7 kg,平衡场线圈 6.4 kg;升降机构包含带自锁功能的伺服电机和蜗轮丝杠。基于环形永磁体的悬浮控制 3D 实验装置设计如图 13 所示。

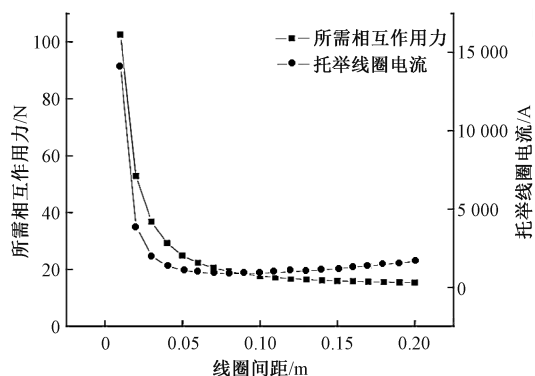


图 11 1.5 kg 永磁体线圈轴向间距与所需相互作用力以及托举线圈电流之间关系曲线

Fig. 11 The relationship curve between the axial spacing of 1.5 kg permanent magnet coils, the required interaction force, and the current of the lifting coil

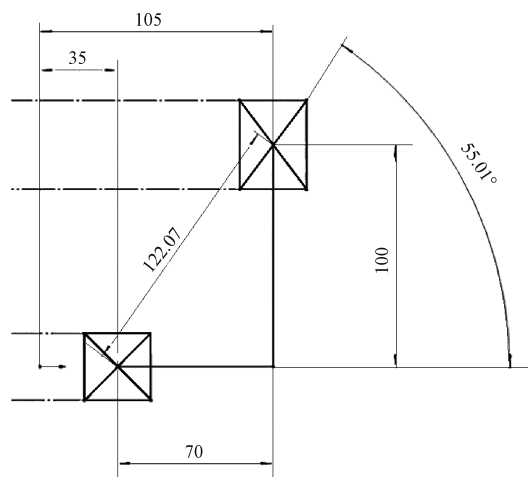


图 12 永磁环与托举线圈的位置布置平面设计图

Fig. 12 Layout plan of permanent magnet ring and lifting coil positions

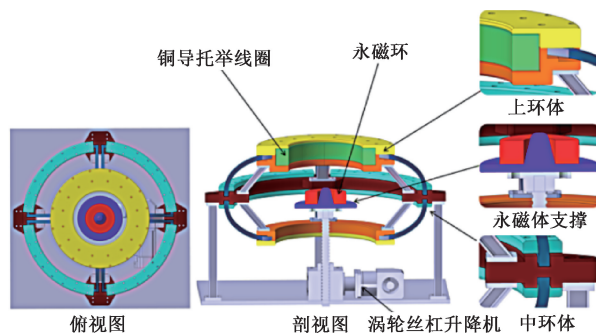


图 13 基于永磁环悬浮控制实验装置 3D 结构概念示意图

Fig. 13 Conceptual diagram of 3D structure based on permanent magnet ring suspension control experimental device

通过仔细分析计算和设计优化,给出了 1.5 kg 简化永磁体悬浮控制测试平台概念设计,初步分析表明,装置平台垂直偏移采用控制反馈系统后,水平偏移与倾斜在偏移限

制范围可实现自稳定,悬浮体的摆动幅度可通过 TSR 姿态线圈控制。

4 结 论

经过对悬浮磁体稳定性进行分析,得到主要结论如下:

在 CAT-1 装置中,悬浮磁体在托举线圈磁场中,水平稳定和垂直稳定不可能同时存在,当托举线圈的半径足够大(大于悬浮磁体半径 1.4 倍)的时候,悬浮磁体在倾斜方向总是稳定的;当悬浮高度确定时,托举线圈半径总是存在最优值使得实现悬浮的电流最小;悬浮磁体在该条件下垂直方向具有不稳定性。

在倾斜振动的角频率为 3.3 rad/s ,在 CAT-1 最优托举线圈参数条件下,悬浮磁体的悬浮高度临界为 0.9 m ;垂直最大位移为 0.1 m ,水平最大偏移为 0.05 m ,最大倾斜角为 $\pi/24$;悬浮磁体电流在托举线圈电流增大过程中减小,因此欲要保证悬浮状态下悬浮磁体的约束性能不受影响,在对悬浮磁体充电的过程中须适当过量充电。

完成了简化永磁悬浮实验装置详细结构及尺寸平面设计,初步分析计算表明,采用 1.5 kg 永磁体得到托举线圈电流 895 A ,可望幅降低铜导托举线圈电流及电感引起的反馈控制系统及电源响应延迟等问题,满足控制对响应速度的要求。

参考文献

- [1] 李成勋,霍志鹏,钟国强,等.磁约束聚变装置辐射监测系统概况[J].核技术,2023,46(2):3-18.
LI CH X, HUO ZH P, ZHONG G Q, et al. Survey of radiation monitoring system for magnetic confinement fusion device[J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(2): 3-18.
- [2] HASEGAWA A, CHEN L, MAUEL M E. A D-3He fusion reactor based on a dipole magnetic field[J]. Nuclear Fusion, 1990, 30(11): 2405.
- [3] SURHONE L M, TENNOE M T, HENSSONOW S F. Tokmok[M]. Montana USA: Betascript Publishing, 2010.
- [4] SPITZER L. The stellarator concept[C]. International Summer Course in Plasma Physics, 1960.
- [5] 温晓东,徐立清,胡立群,等.离子回旋频率波加热下的 EAST 等离子体锯齿行为研究[J].核技术,2023,46(1):75-83.
WEN X D, XU L Q, HU L Q, et al. Sawtooth behavior of EAST plasma under ICRF heating [J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(1): 75-83.
- [6] OGAWA Y, HIMURA H, KONDOH S, et al. Design of a toroidal plasma confinement device with a levitated super-conducting internal coil [C]. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 1999, 498(1): 417-422.
- [7] GARNIER D T, HANSEN A, MAUEL M E, et al. Production and study of high-beta plasma confined by a superconducting dipole magnet [J]. Physics of Plasmas, 2006(5): 13.
- [8] SCHULTZ J H, KESNER J, MINERVINI J V, et al. The levitated dipole experiment(LDX) magnet system[J]. IEEE Transactions on Applied Super Conductivity, 1999, 9(2): 378-381.
- [9] SCHULTZ J H, DRISCOLL G, GARNIER D, et al. High temperature superconducting levitation coil for the levitated dipole experiment (LDX) [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11(1): 2004-2009.
- [10] 王聪,崔春艳,胡新宁.超导磁约束系统中超导磁体涡流损耗的研究[J].低温与超导,2020,48(3):1-5,29.
WANG C, CUI CH Y, HU X N. Research on superconducting current loss in superconducting magnet confinement system [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2020, 48(3): 1-5, 29.
- [11] MORIKAWA J, YOSHIDA Z, OGAWA Y, et al. Development of a super-conducting levitated coil system in the RT-1 magnetospheric confinement device [J]. Fusion Engineering & Design, 2007, 82(5-14): 1437-1442.
- [12] GARNIER D T, HANSEN A K, KESNER J, et al. Design and initial operation of the LDX facility [J]. Fusion Engineering and Design, 2006(81): 2371-2380.
- [13] GARNIER D T, BOXER A C, ELLSWORTH J L, et al. Confinement improvement with magnetic levitation of superconducting dipole [J]. Nuclear Fusion, 2009, 49(5): 055023.
- [14] 刘腾,张国书,杜俊杰,等.天环一号偶极场磁约束实验装置悬浮线圈的初步设计及分析[J].核聚变与等离子体物理,2022,42(3):271-278.
LIU T, ZHANG G SH, DU J J, et al. Preliminary design and analysis of floating coil for dipole field magnetic confinement experimental device, China Astro-Torus No. 1 [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2022, 42(3): 271-278.
- [15] BOXER A C, BERGMAN R, ELLSWORTH J L, et al. Turbulent inward pinch of plasma confined by a levitated dipole magnet [J]. Nature Physics, 2010, 6(3): 207.
- [16] NISHIURA M, YOSHIDA Z, SAITOH H, et al. Improved beta (local beta > 1) and density in electron cyclotron resonance heating on the RT-1 magnetosphere plasma [J]. Nuclear Fusion, 2015, 55(5): 053019.
- [17] KANGAS J, GUGLIELMI A, POKHOTILOV O. Morphology and physics of short-period magnetic

- pulsations[J]. Space Science Reviews, 1998, 83(3-4): 435-512.
- [18] 张国书,陈骝,孙占学,等. 偶极场磁约束聚变装置性能特征及研究现状[J]. 中国核电, 2019, 12(5): 553-560. ZHANG G SH, CHEN L, SUN ZH X, et al. Performance characteristics and research status of dipole field magnetic confinement fusion devices[J]. China Nuclear Power, 2019, 12(5): 553-560.
- [19] BASSANI R. Earnshaw(1805-1888) and passivemagnetic levitation[J]. Meccanica, 2006, 41(4): 375-389.
- [20] BASSANI R, VILLANI S. Passive magnetic bearings: The conic-shaped bearing[J]. Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 1999, 213(2): 151-161.
- [21] 丁家满,原琦,任东磊,等. 不确定性信息条件下系统可靠性分析[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 153-162. DING J M, YUAN Q, REN D L, et al. System reliability analysis under uncertain information [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 153-162.
- [22] 王亚林,刘云辉,张国书,等. CAT-1 悬浮偶极场超导环平衡稳定分析[J]. 低温与超导, 2024, 52(7): 38-46. WANF Y L, LIU Y H, ZHANG G SH, et al. Analysis on the balance and stability of dipole field of superconducting floating ring of CAT-1[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2024, 52(7): 38-46.
- [23] 王召,刘腾,杜俊杰,等. 基于线段近似法的姿态控制线圈磁场位形研究[J]. 核技术, 2024, 47(4): 117-127. WANG ZH, LIU T, DU J J, et al. Magnetic field configuration of attitude control coil based on line segment approximation method [J]. Nuclear Techniques, 2024, 47(4): 117-127.
- [24] 刘云辉,张振琪. 环形永磁悬浮的控制仿真[J]. 能源研究与管理, 2021(4): 85-90. LIU Y H, ZHANG ZH Q. Simulation of levitation permanent magnetic ring control[J]. Energy Research and Management, 2021(4): 85-90.

作者简介

王亚林, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向为机械与电子系统工程等。

E-mail: wyl@ecit. cn

张国书(通信作者), 博士, 教授、博导, 主要研究方向为磁约束聚变堆芯物理及聚变核工程设计研究。

E-mail: zhangguoshu@ecit. cn