

基于数字化的聚变偶极磁体悬浮技术研究

刘云辉¹ 张国书¹ 王智健¹ 杜俊杰¹ 刘 腾¹ 王 召¹ 李佳祺² 华 祥³

1(东华理工大学 核科学与工程学院 南昌 330013)

2(东华理工大学 理学院 南昌 330013)

3(江西航空职业技术学院 核技术应用学院 南昌 330001)

摘要 本文首次研制一台简化的永磁体悬浮控制测试平台,初步验证了天环一号(China Astro-Torus one, CAT-1)悬浮偶极场聚变约束装置超导磁体稳定悬浮的可行性。基于数字化分析计算设计了聚变偶极磁体的悬浮控制系统,用以实验证明磁体悬浮稳定的理论预测。测试结果表明,永磁体的悬浮精度可控制在 $\pm 50 \mu\text{m}$ 以内;分析偶极磁体悬浮状态下得到的运动频谱测试结果,证实了磁体参数的可靠性;在实验方法上采用实测磁体数据对磁体模型进行修正,得到了更准确的悬浮运行参数。总之,本文首次成功实现了永磁体悬浮稳定的任意控制,为解决CAT-1偶极场聚变装置的悬浮稳定技术奠定坚实基础。此外,数字化的控制系统也为将来实现专家控制、神经网络控制等复杂控制系统提供基础。

关键词 偶极场聚变, 偶极磁体悬浮, 数字化磁悬浮控制, 激光测位, 天环一号

中图分类号 TL62²

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240248

Research on digital fusion dipole magnetic suspension technology

LIU Yunhui¹ ZHANG Guoshu¹ WANG Zhijian¹ DU Junjie¹ LIU Teng¹

WANG Zhao¹ LI Jiaqi² HUA Xiang³

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

2(School of Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

3(Institute of Nuclear Technology Applications, Jiangxi Aviation Vocational and Technical College, Nanchang 330001, China)

Abstract [Background] The dipole magnetic field confinement is a crucial component in the field of fusion energy and space plasma research. Previous projects, such as MIT's Levitated Dipole Experiment (LDX) and the University of Tokyo's Ring Trap (RT), have explored the behavior of high-temperature plasmas in such configurations. These efforts, although significant, faced challenges in terms of limited design capabilities and funding constraints. The China Astro-Torus (CAT) project was initiated to address these limitations and push the boundaries of magnetic confinement. [Purpose] This study aims to develop a stable levitation system for dipole magnets of the CAT-1 fusion device and thereafter to validate the use of permanent magnets for magnetic field

江西省JMRH重点建设项目(No.G20230002)、江西省"双千计划"项目(No.DHSQT22021001)、江西省重点研发计划重点项目(No.20192ACB80006)、江西省科学技术研究项目(No.GJJ200714)资助

第一作者: 刘云辉, 男, 1994年出生, 2022年于东华理工大学获硕士学位, 现为博士研究生, 研究领域为磁约束聚变装置技术

通信作者: 张国书, E-mail: zhangguoshu@ecit.cn

收稿日期: 2024-06-27, 修回日期: 2025-02-25

Supported by Jiangxi Province JMRH Key Construction Project (No.G20230002), Jiangxi Province's "Double Thousand Plan" Project (No.DHSQT22021001), Key R&D of Jiangxi Province (No.20192ACB80006), Jiangxi Province Science and Technology Research Project (No.GJJ200714)

First author: LIU Yunhui, male, born in 1994, graduated from East China University of Technology with a master's degree in 2022, doctoral student, focusing on magnetic confinement fusion device technology

Corresponding author: ZHANG Guoshu, E-mail: zhangguoshu@ecit.cn

Received date: 2024-06-27, revised date: 2025-02-25

generation and explore the feasibility of a novel levitation system that can stabilize the dipole magnet effectively. **[Methods]** The experimental setup involved the development of a levitation permanent magnet ring system (LPMR). The system was designed to simulate the magnetic dipole field required for plasma confinement. Key components included a laser positioning system for high-precision feedback and a digital control system that adjusted the current in the lifting coil to maintain the magnet's position, and real-time position data was used to modulate the current dynamically, ensuring stable levitation. **[Results]** The system successfully achieves stable and sustained levitation of the permanent magnet, with minimal oscillations observed. The vertical oscillation frequency is measured at 2.53 Hz, which is slightly lower than the theoretical prediction of 2.71 Hz, indicating that there is potential for further optimization of the system. **[Conclusions]** These results of this study demonstrate the effectiveness of the digital control model implemented for stabilizing the magnet. The system performs well over extended periods, confirming its capability for long-term operation. The successful stabilization achieved by the LPMR system lays a solid foundation for the development of advanced magnetic confinement systems, which are critical for the future of fusion energy research. The findings offer valuable insights for enhancing magnetic levitation and confinement techniques in fusion reactors, contributing significantly to the development of the CAT-1 device. The ability to stabilize dipole magnets through digital control also represents a key advancement in magnetic confinement technology.

Key words Dipole field fusion, Dipole magnetic levitation, Digital magnetic levitation control, Laser Positioning

悬浮偶极场磁约束等离子体概念首先源自在本星磁场,由于其闭环磁力线能够非常好地约束带电离子,其原理有望应用于磁约束约束聚变等离子体、非中性等离子体(non-neutral plasmas)^[1]、反物质等离子体(antimatter plasmas)以及其他带电粒子。与托卡马克装置诸多运输模式不同^[12],悬浮偶极场等离子体具有稳定的高密度、高压强峰化分布,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可能达到D-³He或催化D-D聚变点火条件,对核聚变能源开发及应用极具吸引力。美国麻省理工大学建造的悬浮偶极场实验装置(Levitated Dipole eXperiment, LDX)针对聚变等离子体进行了研究^[3],该装置取得稳定悬浮之后,在内箍缩、稳定峰值分布及电子加热等物理实验中取得突破性进展,但因其设计参数偏低、缺乏后续资金支持,于2006年停止运行。日本东京大学的RT(Ring Trap)项目在早期设计了机械支撑铜线圈的proto-RT^[4-5]完成早期的偶极场约束概念研究。其后开发的mini-RT装置^[6-7],实现了偶极磁体的稳定悬浮。德国慕尼黑研究核子与原子物理的中心NECPOMUC(Neutron Capture Cross Section Measurements Under Microscopic Conditions)也基于偶极场约束原理开发了机械支撑的永磁偶极场电子-正电子对等离子体约束装置APEX(A Positron - Electron eXperiment)^[8],并正在开发紧凑型超导悬浮偶极场等离子体约束装置(compact levitated magnetic dipole charged particle trap)。

中国CAT(China Astro-Torus)项目正在计划设计建造一个参数更高的悬浮偶极场实验装置,拟开

展聚变等离子体的MHD(Magnetohydrodynamics equations)稳定性、输运机制及实验定标规律等实验研究^[9-10]。中心超导偶极磁体的稳定磁悬浮技术是其重要特色和关键难点,目前国内尚无相关研究。在聚变约束要求下,偶极磁体悬浮与一般的磁悬浮有所不同,为了实现聚变,偶极磁体周围约束了大量的等离子体,引起复杂的动态非平衡电场和磁场;另一方面,用于约束等离子体的偶极磁体必须采用超导材料,由于其超强的电磁感应作用,偶极磁体周围的空内具有磁通量守恒效应,这意味着即使偶极磁体位置发生了变化磁场也不发生变化,由于这两方面原因,基于霍尔原理磁体定位的系统不适用于偶极聚变装置的磁体定位。因此,哥伦比亚大学和麻省理工大学联合开发的LDX实验装置^[11]、东京大学的RT系列装置^[12]、德国APEX项目的悬浮装置^[13]均采用了激光定位测量磁体位置作为悬浮控制的反馈量。

偶极磁体的悬浮稳定性取决于磁体系统的参数配置。以无量纲量($\frac{R_l}{R_f}, \frac{z}{R_f}$)的所处区域来判断磁体系统的稳定性特征,如图1所示。图中虚线为发散振动(频率 f 为实数),实线为收敛振动(频率 f 为虚数),红色虚线为分界线,频率为0;图1(a)为磁体在垂直方向上振动频率与磁体参数的等高线图;图1(b)为磁体在水平方向(绿)和 α 方向倾斜转动(黑)振动频率与磁体参数等高线图; α 方向的振动存在一个临界值1.4,托举线圈(Levitation Coil, LC)半径大于该值则 α 方向的振动是收敛的;垂直方向和水平方向的分界线恰好重合,且具有 $2f_{cr}^2 + f_z^2 = 0$ 恒

等关系^[14]。CAT-1的悬浮超导磁体系统配置为 $\frac{R_L}{R_F} = 3.4$ 、 $\frac{z}{R_F} = 4.0$ ，处于垂直方向的不稳定区域，倾斜-水平方向稳定区域，与LDX、RT-1、mini-RT所处的区域是一致的。本文设计了一个基于永磁体的实验（Levitation Permanent Magnet Ring, LPMR），将磁体系统的参数配置设置在CAT-1等一系列偶极场装置

的附近(2.8,3.0)。利用激光测量磁体的位置，控制系统^[15]根据磁体位置动态调整托举线圈中的电流实现了磁体的稳定悬浮。这是CAT-1偶极场聚变装置的悬浮稳定技术的基础。本文主要从偶极场装置悬浮理论、控制原理及技术、悬浮装置平台分析计算与设计、实验测试数据结果等方面对取得的成果进行介绍。

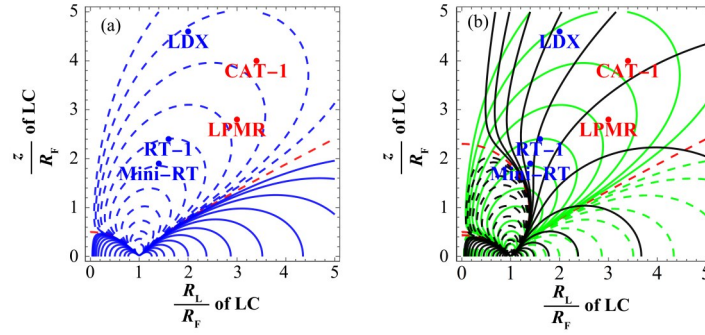


图1 偶极磁体装置悬浮稳定性与托举线圈参数分布图(彩色见网络版)

(a) 垂直稳定性与磁体参数关系, (b) 倾斜(黑线)-水平(绿线)稳定性与磁体参数关系

Fig.1 Dipole magnet levitation stability and parameter distribution of LC (color online)

(a) The relationship between vertical stability and magnet parameters, (b) The relationship between tilted (black line) - horizontal (green line) stability and magnet parameters

1 聚变偶极磁体悬浮原理

1.1 偶极磁体运动模型

偶极磁体悬浮系统可以抽象为两个理想电流环之间的受力与运动，如图2所示。在过去的研究中，已经通过物理模型建立运动方程，如式(1)。

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial z}(z - z_0) = m_F \left(\frac{d^2 z}{dt^2} + g \right) \\ \frac{\partial F}{\partial er} er = m_F \cdot \frac{d^2 er}{dt^2} \\ \frac{\partial M}{\partial \alpha} \alpha = I \cdot \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中： F 为悬浮磁体(Floating Coil, FC)受到来自托举线圈(LC)的拉力； m_F 为悬浮磁体的质量； z 为垂直方向的位置， z_0 为垂直方向的初始位置； er 为 xoy 平面内的方向矢量，由于磁体在 xoy 平面内具有对称性，可以表示平面内所有的运动； M 为悬浮磁体受到的力矩； I 为悬浮磁体以某一对称轴倾斜振动的转动惯量； α 为倾斜抖动的角度。

由式(1)可解得悬浮磁体在不同维度方向上的振动频率，如式(2)：

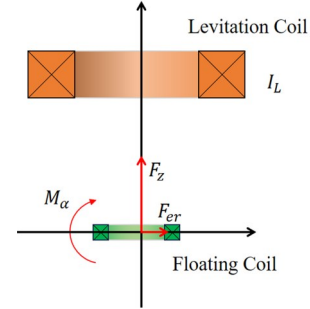


图2 偶极磁体悬浮理想电流环模型示意图

Fig.2 Diagram of dipole magnet levitation ideal ring current model

$$\begin{cases} f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_F} \frac{\partial F}{\partial z_0}} \\ f_{er} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_F} \frac{\partial F}{\partial er_0}} \\ f_\alpha = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{I} \frac{\partial M}{\partial \alpha_0}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： f 为悬浮磁体的振动频率，下标表示不同的维度方向，若值为虚数则代表悬浮磁体在该方向上的振动为周期回旋运动，具有内在稳定性；如为实数即为发散的振动，需要引入外部调节。

当磁力与悬浮磁体的某个运动分量方向相反时，磁场力在该方向的偏导数为负数，相应的频率为

虚数,表现为磁场阻尼悬浮磁体运动。相反,当磁场力与悬浮磁体的某个运动分量方向一致,磁场力在该方向的偏导数为正、频率为实数,表现为磁场增强悬浮磁体运动。总之, f 为虚数则代表悬浮磁体振动收敛(具有内在稳定性),实数则表示振动发散(需要引入外部调节)。

恩绍定理已经指出仅由静态的平方反比力不可能实现稳定悬浮,如图1所示,偶极磁体的参数不可能同时在垂直和水平稳定区域内取值。

从悬浮控制角度来说,垂直方向发散是一维的发散振动,而水平方向则是二维振动,将水平方向设置在振动收敛区域更有利于实现悬浮稳定。对于垂直方向的发散振动则需要引入反馈控制来实现动态稳定。国际上已经建成的悬浮偶极场装置的设计均采用垂直分量实数频率水平和倾斜方向虚数频率,如图1所示。

1.2 悬浮控制模型

磁体在垂直方向的反馈控制,需要控制系统对磁体的位置实时测量,并根据测量结果实时改变托举线圈中电流的大小,进而改变磁体受到的电磁力,控制磁体的运动。反馈控制模型如图3所示,控制系统由磁体运动、激光测量、ADC转换、PD、电源线圈5个主要环节构成闭环传递函数通过分析逐个环节获得。最后,控制系统能否实现稳定性可由劳斯基兹判据判别,已在早期研究中得到证明^[16]。

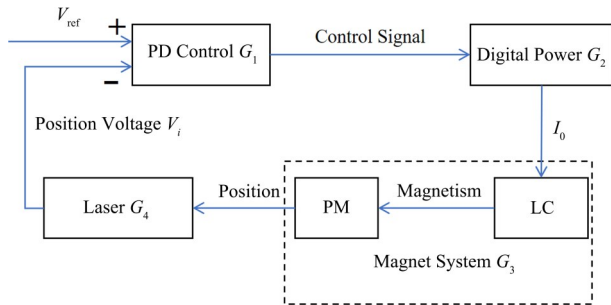


图3 悬浮数字化反馈控制模型示意图
Fig.3 Diagram of levitation feedback control model

磁体系统的运动关系可以通过式(1)的垂直方程描述,但式(1)基于积分计算的过程难以在FPGA硬件平台上实现,在悬浮控制环节需要对其进行线性化处理,如式(3)所示:

$$\frac{\partial F}{\partial z}(z - z_0) + \frac{\partial F}{\partial I}(I - I_0) + F(I_0, z_0) = m_F \frac{d^2 z}{dt^2} + m_F g \quad (3)$$

平衡时电磁力的常数部分与重力平衡,则电磁力常数项与重力相互抵消,一阶导数是悬浮磁体运动的原因。可以得到悬浮磁体运动的拉普拉斯

方程。

$$G_M = \frac{\Delta Z(s)}{\Delta I(s)} = \frac{I'_0}{m_F s^2 - z'_0} \quad (4)$$

其中, I'_0 是 $\frac{\partial F}{\partial I}$ 在 $I = I_0$ 处的取值, z'_0 是 $\frac{\partial F}{\partial z}$ 在 $z = z_0$ 处的取值。

激光模块将悬浮磁体的位置信息转换为电信号,输出电压与数据转换增益 gain_L 、转换频率 w_L 相关,因此激光模块的传递函数可以写作式(5):

$$G_L = \frac{\text{gain}_L}{\frac{s}{w_L} + 1} \quad (5)$$

ADC模块对激光模块输出的电信号进行采样,采样时间间隔为 T ,忽略转换时间。将电压信号转换为数字信号,模拟量在这个模块完成数字化。采用向后差分变换法将磁体系统传函、激光测位传函的拉普拉斯的 s 域变化到 Z 域。

$$G_M G_L G_{\text{ADC}} = \frac{\text{gain}_{\text{ADC}} \text{gain}_L I'_0 T^3 w_L Z^3}{A_0 - A_1 Z + A_2 Z^2 - A_3 Z^3} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} A_0 = m_F \\ A_1 = 3m_F + m_F T w_L \\ A_2 = 3m_F + 2m_F T w_L - T^2 z'_0 \\ A_3 = m_F + m_F T w_L + T^2 z'_0 + T^3 w_L z'_0 \end{cases}$$

Z 为 z 变换的频域变量。

数字化控制环节在数字化的激光数值基础上,将悬浮磁体测量位置与参考位置之间的差值分别进行比例放大、积分放大、微分放大。由于本实验采用FPGA芯片作为数字化载体,芯片中存储单元有限,PID算法中的积分量存在数据溢出的风险,因此本实验中的忽略积分分量,仅以比例放大分量、微分放大分量为控制基础。数字化的PID计算方法如式(7)。

$$G_{\text{PID}} = P + D \frac{1 - Z^{-1}}{T} + I \frac{T}{1 - Z^{-1}} \quad (7)$$

其中, P 为比例放大系数; D 为比例放大系数; I 为比例放大系数。

控制环节输出的数字信号进入DAC芯片,DAC将数字信号转换为电压输出,DAC电压输出不能直接负载,需要连接到功率放大器中实现托举线圈的负载,作为数字化的电源。

则电源环节的传递函数如式(8)所示:

$$G_P = \text{gain}_{\text{DAC}} \text{gain}_{\text{OP}} \frac{n}{R} \quad (8)$$

gain_{DAC} 为DAC增益; gain_{OP} 为功率放大器增益; n 为线圈匝数; R 为电阻。高速DAC不考虑转换时间,忽略线圈电感。

综合上述，悬浮控制系统的闭环传递函数为式(9)：

$$G_{\text{sys}} = \frac{G_M G_L G_{\text{PID}} G_P}{1 - G_M G_L G_{\text{PID}} G_P} = \frac{a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3}{b_0 + b_1 z + b_2 z^2 + b_3 z^3} \quad (9)$$

式(9)中分子和分母多项式的系数如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = 0 \\ a_1 = 0 \\ a_2 = \text{gain}_{\text{ADC}} \text{gain}_{\text{DAC}} \text{gain}_L \text{gain}_{\text{OP}} I_0' (2D + \mathcal{I}) n T^2 w_L \\ a_3 = -\text{gain}_{\text{ADC}} \text{gain}_{\text{DAC}} \text{gain}_L \text{gain}_{\text{OP}} n T^2 (2D + \mathcal{I} + 2PT) w_L P \\ b_0 = 2m_F R \\ b_1 = -2m_F R (3 + T w_L) \\ b_2 = 2m_F R (3 + 2T w_L) + T^2 (-\text{gain}_{\text{ADC}} \text{gain}_{\text{DAC}} \text{gain}_L \text{gain}_{\text{OP}} I_0' (2D + \mathcal{I}) n w_L - 2R z_0') \\ b_3 = T^2 (\text{gain}_{\text{ADC}} \text{gain}_{\text{DAC}} \text{gain}_L \text{gain}_{\text{OP}} (2D + \mathcal{I} + 2PT) n w_L + 2R (1 + T w_L) z_0') - 2m_F R (1 + T w_L) \end{array} \right. \quad (10)$$

数字化的控制系统需要根据july准则进行稳定性判别。我们以 P 、 D 、 $\mathcal{I}$ 三个量作为可变参数，来寻求可实现系统稳定的参数取值范围。july准则要求式(10)中的参数符合式(11)关系。

$$\left\{ \begin{array}{l} b_0 + b_1 + b_2 + b_3 > 0 \\ (-1)^3 (b_0 - b_1 + b_2 - b_3) > 0 \\ b_3 > |b_0| \\ b_3^2 - b_0^2 > |b_3 b_1 - b_0 b_2| \end{array} \right. \quad (11)$$

根据july准则即可解出数字化系统是否存在稳定的可能，以及系统稳定对于参数的要求。

2 偶极磁体悬浮稳定实验平台设计

偶极磁体悬浮在以往的研究是基于模拟电路的控制^[13,17-18]，各种信号和控制非常依赖于电路的硬件实现，不利于实现复杂的控制逻辑且调试周期长。

本文研究基于数字化控制系统对偶极磁体进行设计和实验。数字化的控制系统可以在不改变硬件结构的前提下实现更复杂的控制算法，虽然本文仅实现了经典的PD控制，但在数字化控制平台为将来实现数据同化、神经网络的控制算法奠定了基础。

2.1 磁体系统参数与结构设计

为实现和验证偶极磁体的悬浮控制技术，采用小型永磁体代替超导偶极磁体开展悬浮实验。这也是磁约束偶极磁体的前期实验。本文采用的实验参数：永磁体质量 $m_F = 0.018 \text{ kg}$ 、半径 $r_F = 15.0 \text{ mm}$ 、高度为 $h = 3.0 \text{ mm}$ 、表面中心磁场强度为 0.035 T 、等效电流 $I_F = 850 \text{ A}$ 、托举线圈半径为 $R_L = 45.0 \text{ mm}$ 、线圈匝数为 $n = 1100$ 匝、悬浮高度 $H = 28.1 \text{ mm}$ 。稳定悬浮需要总的安匝数约为 $I_L = 950 \text{ A}$ 。根据磁体参数结合式(3)可知式(4)中平衡位置处 $I_0' = 0.000322$ 、 $z_0' = 8.61$ 。

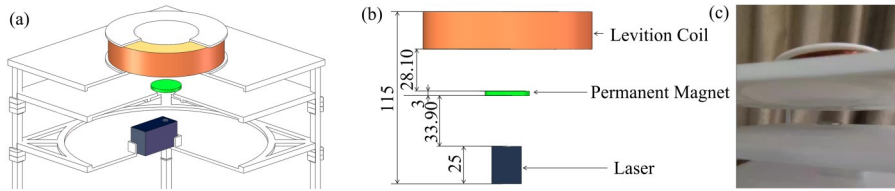


图4 永磁偶极磁体悬浮结构以及实物图(单位:mm) (a) 实验平台结构图, (b) 实验平台尺寸, (c) 悬浮实验照片
Fig.4 Permanent dipole magnet levitation structure diagram(unit in mm) (a) Structure diagram of experimental platform, (b) Experimental platform size, (c) Snapshot of suspension experiment

结合托举线圈、悬浮磁体、悬浮高度等参数代入式(2)中，可求得实验装置磁体静态的本征振动频率，分别为 $f_z = 2.71 \text{ Hz}$ 、 $f_{cr} = 1.92i \text{ Hz}$ 、 $f_a = 9.63i \text{ Hz}$ ，当磁体在平衡点位置发生振动时，磁体偏离平衡位置，尤其是水平的偏移会很大程度引起受力变化，而水平方向总是和垂直方向联动，使得 $2f_{cr}^2 + f_z^2 = 0$ 恒等关系不再成立。因为受到的电磁力发生了角度变化， f_z 、 f_{cr} 将会减小，减小的幅度与振动的幅度有关。

从图5中绘制出理想偶极磁体(绿环截面)和永磁模拟偶极磁体(绿色饼截面)的磁力线(蓝)和磁等势线(红)在悬浮条件下的分布情况，永磁体磁力线会穿过磁体，而理想的偶极磁体磁力线不穿过磁体而是环绕磁体，永磁体还是理想偶极磁体在托举线圈附近磁力线分布毫无差别。

偶极磁体是电流环激发的磁场，其特征是磁力线与任何结构交叉而形成闭合场线，永磁体的磁场由永磁材料中的分子电流激发，但材料内部相邻的

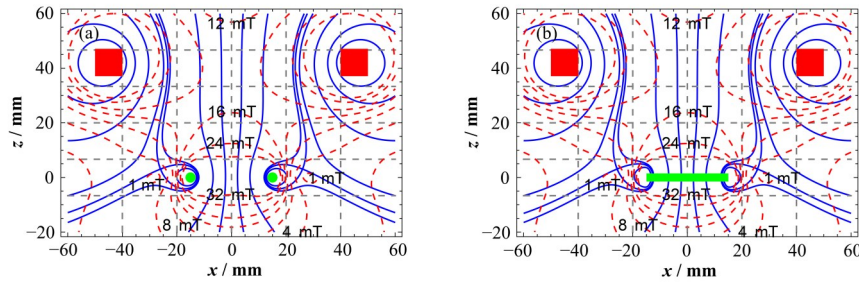


图5 理想偶极磁体磁场分布图(a),永磁磁体磁场分布图(b)(彩色见网络版)

Fig.5 IMagnetic field distribution diagrams of (color online)

(a) Ideal dipole magnet (b) Permanent magnet simulated dipole magnet

分子电流相互抵消,仅剩余磁体最外侧分子电流发挥作用,这与环形导体中的电流等效。它们的区别是永磁体的磁力线需要穿过永磁体自身结构才能形成概念上的闭合磁力线,因为这不影响永磁体与托举线圈之间的受力关系,故能采用永磁体验证悬浮控制的可行性。

2.2 控制环节设计

2.2.1 电源设计

本文采用数字控制系统通过DAC(Digital-to-Analog Converter)(AC8830)芯片产生电压信号,通过OPA541运算放大器进行功率负载,组成数控电源。电源电压稳定时间为 $2.2\ \mu\text{s}$,电源的响应延迟主要来自DAC芯片的电压稳定时间。DAC需要将控制环节的16位数据转换位 $0\sim 5\ \text{V}$ 电压($\text{gain}_{\text{DAC}} = \frac{5}{65535}$),并接在电压放大电路上。本实验采用的OPA541电压响应频率达到 $1\ \text{GHz}$ 以上,放大倍数为6倍($\text{gain}_{\text{OP}} = 6$)。LC线圈共有1100匝($n = 1100$)总电阻约为 $R = 27.7\ \Omega$,电感可以被忽略。则电源环节的响应曲线如图6所示,电源从 $0\ \text{V}$ 上升至 $10\ \text{V}$ 仅需 $2.2\ \mu\text{s}$ (绿线段)。

2.2.2 测位激光设计

测位激光采用HG-1030,该激光可测量30中心

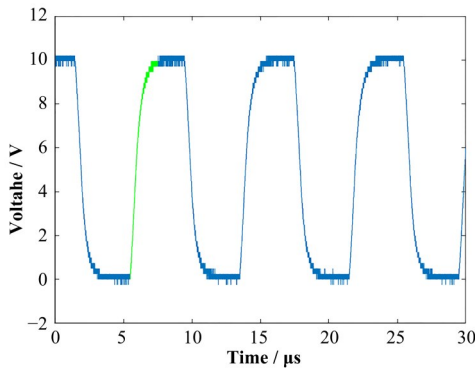


图6 电源响应曲线($\tau = 2.2\ \mu\text{s}$)

Fig.6 Time response of a system with the L coil and power ($\tau = 2.2\ \mu\text{s}$)

点 $\pm 5\ \text{mm}$ 范围内的距离并转换为 $0\sim 5\ \text{V}$ 的电压信号,转换过程中具有 $1.5\ \text{ms}$ 的延迟,即增益为 $\text{gain}_L = 500$,响应频率为 $\omega_L = 667\ \text{Hz}$ 。利用ADS1256芯片将电压信号转换为数字量,仅采用芯片的高16位作为有效值($\text{gain}_{\text{ADC}} = \frac{65535}{5}$),位置采集环节数字分辨率达 $0.3\ \mu\text{m}$ 。ADS1256将模拟量转换数字量最短需要 $210\ \mu\text{s}$,是整个控制系统的耗时最长的环节。

2.2.3 PD控制

在FPGA芯片中计算单元有限,不能支持长时间的积分累加。因此,控制环节采用简单的PD结构。PD控制的全部环节中,FPGA芯片仅需 $200\ \text{ns}$ 即可根据激光的测位的数字结果完成电流输出值的运算。因此整个控制系统可以在 $1\ \text{ms}$ 内完成从信号采集到磁场建立的全过程。这个控制时间相对磁体运动来说是足够短的,所以可以忽略控制系统所需的时间,磁体悬浮几乎完全取决于磁体的受力。

综合磁悬浮模型和实验平台参数,将参数代入式(10)可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = 0 \\ a_1 = 0 \\ a_2 = D \\ a_3 = -D - 0.001 P \\ b_0 = 0.703 \\ b_1 = -2.579 \\ b_2 = 3.048 - D \\ b_3 = -1.172 + D + 0.001 P \end{array} \right. \quad (12)$$

结合式(11)可以解得控制系统稳定的参数要求为 $P \geq 1, D > 0.0005(7421 - P)$ 。

3 结果与分析

3.1 磁体标定

在以往的研究中磁体的等效模型的尺寸由磁体中心位置磁场强度及磁体几何尺寸确定^[16]。然而,在实际调试过程中发现永磁体并不严格符合单一导线的载流导体环模型,铜线绕制的托举线圈也不例

外。因此,在实验前需对永磁体和托举线圈激发的磁场与磁体模型计算结果进行校准。以磁体中心轴上多点测量,修正磁体模型。因此,在理论模型的基础上还需要乘上修正系数。

托举线圈电磁体的模型修正如图7所示,图7(a)为LC线圈不同电流下轴向磁场分布,不同电流下相同位置的磁场强度呈现线性关系;图7(b)将不同电流条件的磁场测量结果统一单位电流进行平均并与磁场模型比较。发现实测值总是小于理论值。这可能来自两个因素:其一,LC线圈加工的匝数与设计匝数不符;其二,实际的LC线圈具有明显的体积,以中心对称位置的导线产生的磁场可能大小一

致但方向存在一个小偏移,偏移部分将相互抵消。图7(c)是基于实测值与理论值得到的修正曲线。

永磁体的模型修正如图8所示,图8(a)展示了永磁体实测的磁场强度在轴向上的分布与理想的偶极磁体(FC)模型计算之间的对比。发现永磁实测磁场强度总是大于理论计算值,其原因在于理论模型简单地将永磁的半径等效为电流半径,实际上永磁材料内部的分子电流可能有更复杂的关系;图8(b)给出了修正系数与距离的关系图。

托举线圈和永磁体模型计算的磁场强度均需乘上相应修正系数才能得到实际磁场强度,从而得到正确的磁体间受力关系。

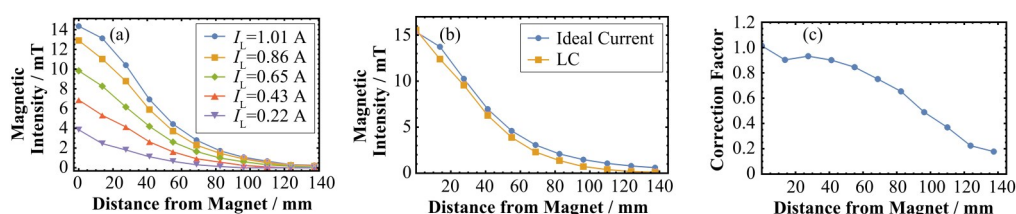


图7 LC线圈磁场与理论模型的修正关系(彩色见网络版)

(a) LC线圈不同电流下轴向磁场分布图,(b) 归一化磁场测量与模型磁场比较图,(c) LC模型修正曲线图

Fig.7 Correction relationship between the magnetic field of the LC coil and the theoretical model (color online)

(a) Axial magnetic field distribution diagram of LC coil under different currents, (b) Normalized magnetic field measurement and model magnetic field comparison diagram, (c) LC model correction curve chart

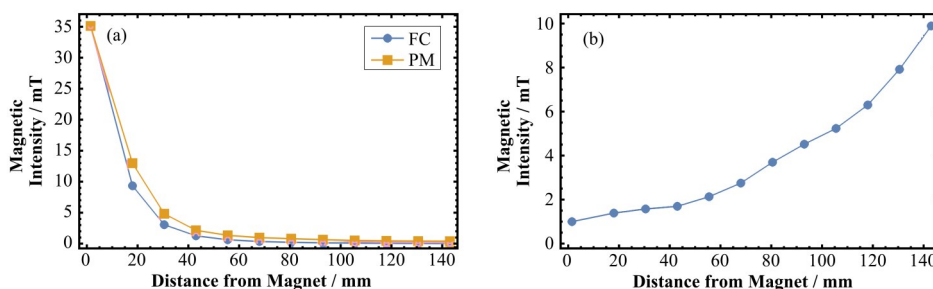


图8 永磁模型与FC理论模型的修正关系 (a) 永磁磁场与模型磁场在轴向上的分布,(b) 永磁模型修正曲线图

Fig.8 Correction relationship between the permanent magnet model and the FC theoretical model (a) The axial distribution of the magnetic field from permanent magnet and model magnet, (b) The correction curve of permanent magnet

3.2 磁悬浮控制

如图9(a)所示,在实验时, $t = 5.5$ s时发出悬浮指令,磁体经过约2 s的上升过程达到悬浮稳定。在稳定悬浮约25 s后,发出下降指令结束悬浮。

图9(a)为悬浮实验的全过程中偶极磁体的位置;图9(b)为悬浮的上升过程,磁体在托举线圈拉力作用下越过平衡位置形成超调量,而后在PD控制作用下逐渐稳定在平衡位置;图9(c)为悬浮平衡状态磁体的振动,虽然磁体稳定在平衡位置,但振动是不可能避免的,只能通过PD反馈控制及时将磁体从偏离位置纠正;图9(d)为(c)的频谱散点图,通过对图9(c)做傅里叶变换得到,以此分析平衡稳定时磁体的运动,频谱明显在 $f = 1.29, 2.53, 10.80$ 三个位置

形成散点高位区。

4 分析与结论

4.1 磁体运动分析

基于运动方程(式(2))给出的振动频率和实测的运动频谱,可知受控悬浮磁体存在三个维度方向的特征运动。然而,频率明显与理论值存在差异:其中垂直 z 方向运动频率2.53 Hz小于理论计算值2.71 Hz;水平方向运动频率1.29 Hz小于理论计算值1.92 Hz。此外,实验中磁体在倾斜方向的运动频率与计算值基本一致,说明偶极磁体运动模型可以准确解释偶极磁体在托举线圈倾斜方向上的运动规律,大致预测垂直和水平方向上的运动规律。

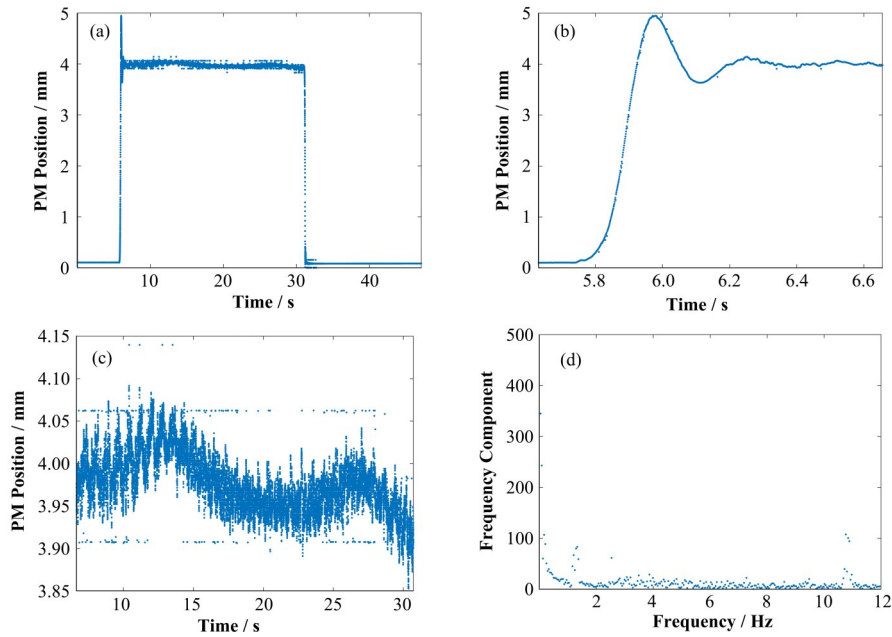


图9 偶极磁体悬浮实验结果图 (a) 悬浮过程, (b) 悬浮上升过程, (c) 悬浮稳定时磁体抖动, (d) 稳定悬浮的特征频率
Fig.9 Diagrams of dipole magnet levitation experimental results (a) Floating process, (b) Floated rising process, (c) When the PM is stable, the magnet shakes, (d) The characteristic frequency of stable PM

4.2 悬浮控制分析

如图9(a)、(b)、(c)所示,磁体悬浮过程为位置点图中明显存在部分离散的与轨迹之外的点,这些随机点的出现来自两方面原因:其一是ADC芯片将模拟信号转换为数字信号存在错误率,但这部分仅引起十分微小的偏差,几乎不影响磁体稳定悬浮;其二因素是激光信号发生变化时电压变化会引起ADC芯片与激光信号输出之间的电压振荡相当于在正常信号电压上叠加一个随机电压,因此ADC的转换结果出现随机的偏大偏小的值,这些值出现的频率和幅度主要取决于两个元件之间信号线的连接情况,当信号线接触不良时会导致磁体悬浮失控。

4.3 结语

1)磁体能够在一维控制结构中实现稳定悬浮,证实了偶极磁体悬浮的稳定区域的存在性。数值不相等的原因可能是未考虑空气阻力的影响。

2)本文构建的数字化PD控制系统能够实现偶极场磁体的悬浮控制,但控制过程部分激光返回信号存在部分数据异常,悬浮的振动有望在之后的优化中进一步提高。

3)本文所构建的数字化的控制系统将不再局限于PID等通用控制系统,数字化的引入在将来可以搭载专家控制、神经网络控制等更具潜力的控制系统,以期在未来实现更高的控制精度。

总之,本文首次成功实现了永磁体悬浮稳定的任意控制,为解决CAT-1偶极场聚变装置的悬浮稳

定技术奠定坚实基础。

作者贡献声明 刘云辉负责酝酿和设计实验、实施研究、采集数据、起草文章;王召分析、解释数据;王智健负责对文章的知识性内容作批评性审阅;刘腾负责统计分析;张国书获取研究经费;杜俊杰负责行政、技术或材料支持、指导;李佳祺、华翔为支持性贡献等。

参考文献

- Davidson R C. Physics of nonneutral plasmas[M]. Singapore: CO-Published With World Scientific Publishing Co, 2001. DOI: 10.1142/p251.
- 肖政耀, 李新霞, 王森. HL-2M装置内部输运垒端流运输的GTC模拟研究[J]. 核技术, 2024, 47(5): 050002. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.050002.
- XIAO Zhengyao, LI Xinxia, WANG Sen. GTC simulation of turbulence transport at internal transport barrier of HL-2M tokamak[J]. Nuclear Techniques, 2024, 47(5): 050002. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.050002.
- 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(20 - 22): 2371 - 2380. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2006.07.002.
- Saitoh H. Confinement of toroidal non-neutral plasma in proto-RT[C]. Physics with Ultra Slow Antiproton Beams, Wako (Japan). AIP, 2005: 372 - 390. DOI: 10.1063/

- 1.2121999.
- 5 Saitoh H. Control of equilibrium structure of a toroidal non-neutral plasma in proto-RT[C]. Plasma Physics: 11th International Congress on Plasma Physics: ICPP2002, Sydney (Australia). AIP, 2003: 553 – 556. DOI: 10.1063/1.1593990.
- 6 Morikawa J, Ohkuni K, Hori D, *et al.* Plasma production and levitation experiments of a high-temperature superconductor coil in a mini-RT internal coil device[J]. TEION KOGAKU (Journal of the Cryogenic Society of Japan), 2004, **39**(5): 209 – 216. DOI: 10.2221/jcsj.39.209.
- 7 Ogawa Y, Morikawa J, Ohkuni K, *et al.* System design of a magnetically levitated internal coil device mini-RT[J]. TEION KOGAKU (Journal of the Cryogenic Society of Japan), 2004, **39**(5): 175 – 181. DOI: 10.2221/jcsj.39.175.
- 8 Saitoh H, Pedersen T S, Hergenbahn U, *et al.* Recent status of a positron-electron experiment (APEX) [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, **505**: 012045. DOI: 10.1088/1742-6596/505/1/012045.
- 9 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): 040504. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.040504.
WANG Zhao, LIU Teng, DU Junjie, *et al.* Magnetic field configuration of attitude control coil based on line segment approximation method[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(4): 040504. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.040504.
- 10 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. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202203001.
LIU Teng, ZHANG Guoshu, DU Junjie, *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. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202203001.
- 11 Schultz J H, Kesner J, Minervini J V, *et al.* The levitated dipole experiment (LDX) magnet system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1999, **9**(2): 378 – 381. DOI: 10.1109/77.783314.
- 12 Yano Yoshihisa. Position control of a superconducting magnet-floating coil in a magnet-sphere-shaped plasma device RT-1[D]. Tokyo: UTokyo, 2017.
- 13 Saitoh H, Stoneking M R, Sunn Pedersen T. A levitated magnetic dipole configuration as a compact charged particle trap[J]. The Review of Scientific Instruments, 2020, **91**(4): 043507. DOI: 10.1063/1.5142863.
- 14 Earnshaw S. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether[J]. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 1848, **7**: 97.
- 15 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. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2021.04.016.
LIU Yunhui, ZHANG Zhenqi. Simulation of levitation permanent magnetic ring control[J]. Energy Research and Management, 2021(4): 85 – 90. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2021.04.016.
- 16 刘云辉. 天环一号偶极悬浮磁体系统稳定与控制的初步分析与参数设计[D]. 南昌: 东华理工大学, 2022.
LIU Yunhui. Preliminary analysis and parametric design of stability and control for china astro-torus No.1 dipole levitation magnet system[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2022.
- 17 Yano Y, Yoshida Z, Ogawa Y, *et al.* Feedback control of the position of the levitated superconducting magnet in the RT-1 device[J]. Fusion Engineering and Design, 2010, **85**(5): 641 – 648. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2010.02.029.
- 18 Morikawa J, Ozawa D, Ogawa Y, *et al.* Levitation experiment using a high-temperature superconductor coil for a plasma confinement device[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, **40**(10A): L1029. DOI: 10.1143/jjap.40.11029.