

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.07.041

Galatea型磁约束装置悬浮磁阱的电磁力研究

佟为明, 李 帅, 金显吉, 李中伟

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘要: 悬浮磁阱可以很好地消除磁阱盲鳗线圈支撑结构上的等离子体流失, 进而提高磁阱对等离子体的约束效率。文中以Galatea型磁约束装置四极悬浮磁阱为研究对象, 提出了四极悬浮磁阱盲鳗线圈所受电磁力的计算方法, 并利用COMSOL建立四极悬浮磁阱的电磁仿真模型, 分析各线圈距离与电流变化对线圈所受电磁力的影响, 对悬浮磁阱的设计意义重大。

关键词: 磁约束装置; 悬浮磁阱; 电磁力

Study on Electromagnetic Force of Levitating Magnetic Trap in Galatea Type Magnet-confining Device

TONG Weiming, LI Shuai, JIN Xianji, LI Zhongwei

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The levitating magnetic trap can eliminate the plasma loss of the magnetic trap blind eel coil support structure, and then improve the confinement efficiency of the magnetic trap to the plasma. In this paper, the quadrupole-levitation magnetic trap of the Galatea magnetic confinement device is taken as the research object, the electromagnetism force's calculation method of blind coils is proposed, the electromagnetic simulation model of quadrupole-levitation magnetic trap is established by COMSOL, the influence of distance and current of the coil on the electromagnetic force of the coil is analyzed, which is of great significance to the design of the suspension magnetic trap.

Key words: magnet-confining device; levitating magnetic trap; electromagnetic force

0 引言

目前,化石能源的储量以及其对于环境的破坏问题日益严重,核能是解决能源问题的主要途径之一^[1]。相较于核裂变的原料储量少和产生难处理的放射性废料,核聚变的原料储量丰富且对于环境污染较轻,因此各国都在大力发展可控热核聚变反应装置^[2]。

迄今为止,国际上已经提出了多种磁约束方法,比如悬浮偶极器(LDX)、反向场箍缩(RFP)、托卡马克、仿星器等^[3-5]。Galatea型磁约束装置是可控核聚变装置的一种,其是一种载流导体浸没在等离子体中的非托卡马克装置,相较于其他磁约束装置具有体积小、制作成本低、能自动抑制等离子体的互换不稳定性等优点^[6-7]。近年来,世界各国都在大力发展可控磁约束装置, Galatea型磁约束装置也得到了大力发展。

磁阱是Galatea型磁约束装置的核心部分^[8],其利用磁阱盲鳗线圈产生的弱磁场区域来约束注入其内部的等离子体,磁阱对等离子体的约束情况直接影响到Galatea型磁约束装置的工作效率^[9]。在传统的Galatea型磁约束装置中,磁阱盲鳗线圈主要由金属支架进行固定^[10],但钢制盲鳗支架上存在大量的等离子体丢失,大大降低了磁阱的工作效率。文[11-12]构想了线圈悬浮的可能性,文中分析了线圈位移以及电流对于磁阱盲鳗线圈所受电磁力的影响,对于研究Galatea型磁约束装置悬浮磁阱的可行性意义重大,同时为中国悬浮磁约束装置的研制提供大量的实验数据参考。

1 Galatea装置悬浮磁阱分析

1.1 Galatea悬浮磁阱结构

Galatea型磁约束装置是非托卡马克磁约束装置的一种,其核心部分为装置的磁系统,包括全等

离子体通道和磁阱,装置运行过程中需要对等离子体通道和磁阱中的相关参数进行测量和诊断^[13],从而掌握装置的运行状态以及等离子体的约束情况。

Galatea型磁约束装置的结构见图1。图1中:标号1表示电源系统;标号2表示等离子枪;标号3表示全等离子体通道;标号4表示磁阱^[14]。

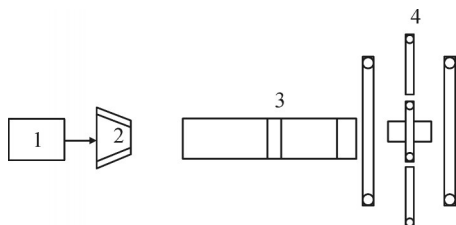


图1 Galatea型磁约束装置的结构

Fig. 1 The structure of Galatea device about magnetic constraint

电源系统主要为等离子体枪供电,等离子体枪为同轴等离子体枪^[15-16],电源供电状态下,在两极板间添加电压,击穿填充的气体,从而产生等离子体。全等离子体通道是装置的重要组成部分,其作用是将由等离子体枪喷射出的等离子体进行输运和筛选。

文中主要分析Galatea型磁约束装置四极悬浮磁阱中盲鳗线圈所受电磁力的情况,四极磁阱由盲鳗线圈a、b和补偿线圈c组成。盲鳗线圈与补偿线圈均通入电流,但补偿线圈通入电流的方向与盲鳗线圈电流方向相反,用于削弱两个外盲鳗线圈之间的电动力^[17],盲鳗线圈通电后产生特殊的磁场位形,进而将等离子体约束在其内部。Galatea型磁约束装置四极磁阱结构图见图2。

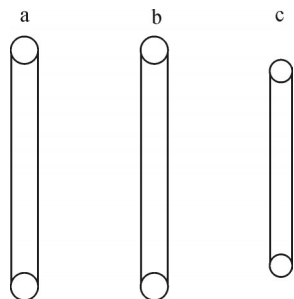


图2 Galatea型磁约束装置四极磁阱结构图

Fig. 2 The structure of quadrupole magnetic trap

1.2 Galatea悬浮磁阱盲鳗线圈所受电磁力

文中主要针对Galatea四极悬浮磁阱,为了探究磁阱盲鳗线圈所受电磁力和哪些参数有关,首先需要建立四极磁阱盲鳗线圈电磁力的计算模型。在单线圈情况下,空间任一点P的磁感应强度计算如下,单线圈模型见图3。

根据毕奥—萨伐尔定律^[18],空间内任一点P(x, y, z)的磁感应强度为

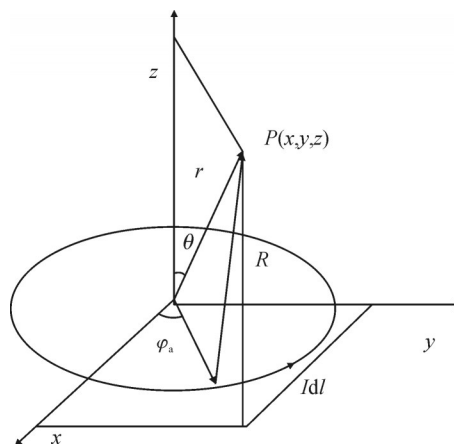


图3 单线圈模型

Fig. 3 The model of single coil

$$dB = \frac{\mu_0 Idl \times R}{4\pi R^3} \quad (1)$$

式(1)中: μ_0 为真空中磁导率, $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m; I 为线圈中的电流,A; R 为电流微元到P的距离,m。

通过积分可以计算磁场作用于载流回路的力F,计算式为

$$F = \oint_l Idl \times B \quad (2)$$

原则上,磁场力都可以归结为磁场作用于元电流段的力,但是由于这种计算方法引入了矢量积分,计算十分繁复,文中采用计算更加简便的计算方式。

首先,建立四极悬浮磁阱模型,见图4。

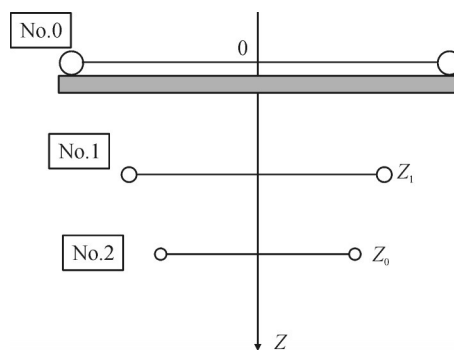


图4 四极悬浮磁阱模型

Fig. 4 The trap model of levitating quadrupole

图4中:标号0表示磁阱补偿线圈,其由支架固定;标号1、2表示磁阱悬浮线圈,线圈轴向方向设为z轴且分别通入电流 I_0 、 I_1 、 I_2 。忽略线圈内径且各个线圈均处于水平状态(轴线相同)。

根据恒定磁场方程计算磁阱盲鳗线圈磁力矩M,计算式为

$$M = \frac{J}{2c} \oint r dl \quad (3)$$

式(3)中: J 为相应线圈的电流密度,A/m²;M为磁

力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; r 为线圈半径, cm 。

结合椭圆积分以及环形线圈电感计算方法, 确定磁阱盲鳗线圈自感以及相邻两盲鳗线圈间互感的计算公式。

$$L_{ii} = \mu_0 R_i \left[\ln \left(\frac{8R_i}{a_i} \right) - 2 \right] \quad (4)$$

$$L_{ik} = \frac{2\mu_0}{h} \sqrt{R_i R_j} \left[\left(1 - \frac{1}{2} h^2 \right) K(h) - E(h) \right] \quad (5)$$

$$h = h(x_{ij}) \quad (6)$$

$$h_{ik} = \left[\frac{4R_i R_j}{(R_i + R_j)^2 + z_{ij}^2} \right]^{1/2} \quad i \neq j \quad (7)$$

$$z_{ij} = |z_i - z_j| \quad (8)$$

式(4)-(8)中: $E(h)$ 为第1类椭圆积分, $E(h) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - h^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$; $K(h)$ 为第2类椭圆积分, $K(h) = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - h^2 \sin^2 \varphi}} d\varphi$; h 为椭圆模量 ($0 < h^2 < 1$)。

结合以上公式, 分析得到系统磁能(包含线圈间的相互作用能和自身磁能)计算模型为:

$$\Psi(z_1, z_2) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \Phi_k J_k \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^3 \Phi_k J_k = L_{11} I_1^2 + 2L_{12} I_1 I_2 + L_{22} I_2^2 \quad (10)$$

式(9)、(10)中: I_1 为盲鳗线圈1的电流, A ; I_2 为盲鳗线圈2的电流, A ; Φ_i 为第 i 个线圈的磁通量, Wb ($i=0, 1, 2$); L_{ki} 为线圈电感, H , $k=i$ 时, L_{ki} 表示线圈 i 的自感; $k \neq i$ 时, L_{ki} 表示线圈 i 与线圈 k 之间的互感。

由广义电磁力的定义, 当磁阱线圈通入电流恒定情况下, 对应于不同的线圈空间位置, 存在不同的电磁力 F , 并且只需要对磁场能量函数求偏导数即可求得电磁力^[19]。

$$F = \frac{\partial \Psi}{\partial z} \Big|_{I=\text{const}} \quad (11)$$

针对文中研究的佳拉洁雅四极磁阱, 分析不同参数情况下磁阱悬浮盲鳗线圈所受电磁力大小意义重大。

2 COMSOL仿真分析

2.1 建模与网络划分

根据式(9)、(11)可见: 线圈电流以及线圈间相对位置会对盲鳗线圈所受电磁力产生影响。为了得到线圈电流与坐标与磁阱盲鳗线圈所受电磁力的对应变化关系, 选用COMSOL有限元仿真软件进行

仿真分析^[20]。在COMSOL仿真软件中, 建立四极悬浮磁阱模型见图5。

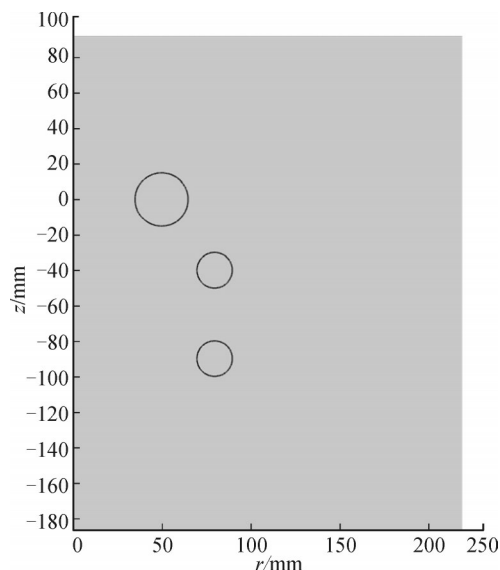


图5 COMSOL中四极悬浮磁阱模型

Fig. 5 The quadrupole-levitating magnetic trap model in COMSOL

在四极悬浮磁阱二维仿真模型中, 以 z 轴坐标表示线圈轴线上的位移变化, r 轴表示各线圈半径方向。磁阱补偿线圈0的半径为15 mm, 中心坐标为(50 mm, 0 mm); 磁阱悬浮盲鳗线圈1和2半径均为10 mm, 中心坐标分别为(80 mm, -40 mm)和(80 mm, -90 mm)。悬浮磁阱模型中盲鳗线圈内外径之差为0.1 mm, 仿真分析过程中忽略此因素对线圈电磁力产生的影响, 同时假设两盲鳗线圈具有完美的抗磁性(线圈1和2的相对磁导率为零)。

有限元分析(FEA)利用数学近似的方法对真实的物理系统进行模拟。其将求解域分解为由大小不等形状不同且彼此相连的有限个单元组成的离散域, 此划分称为有限元网络划分; 然后对于每一个小单元进行近似求解, 给出单元各个状态变量的离散关系; 最后联立各个单元的方程进行总装求解。四极悬浮磁阱模型在COMSOL仿真软件中的有限元网络划分见图6。

2.2 电磁力分析

设定补偿线圈电流值 I_0 为100 A, 匝数为10; 盲鳗线圈1和2的电流 I_1 、 I_2 均为30 A, 匝数为10。结合式(1), 利用COMSOL软件仿真得到磁阱空间的磁感应强度, 结果见图7。

从仿真得到的四极磁阱空间磁场分布可见: 补偿线圈0周围的磁感应强度最大, 盲鳗线圈1和2周围磁感应强度较小且两个磁阱盲鳗线圈间存在弱磁场区域, 此区域可用来约束由等离子体注入磁阱

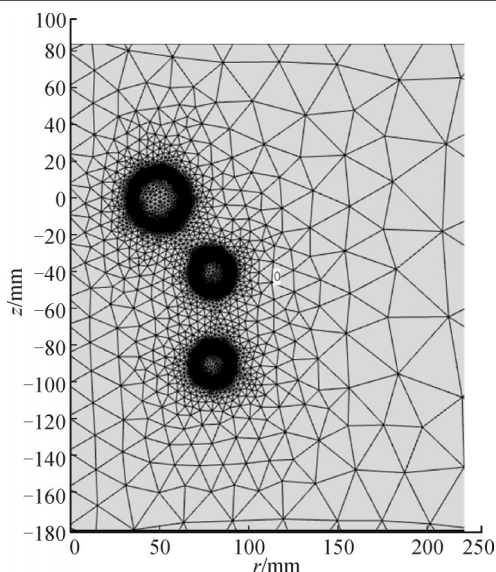


图6 COMSOL 中模型的网络划分

Fig. 6 The network division of the system in COMSOL

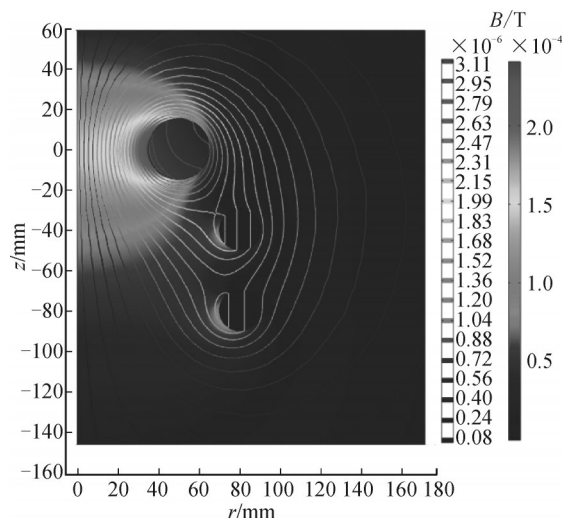
图7 悬浮磁阱空间的磁感应强度 B

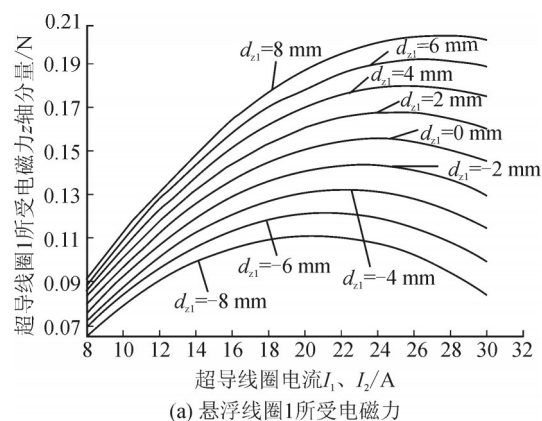
Fig. 7 The magnetic flux density in the space of magnetic trap

的等离子体,从而达到传统含支架固定结构磁阱的功能,提高磁阱对等离子体的约束效率。

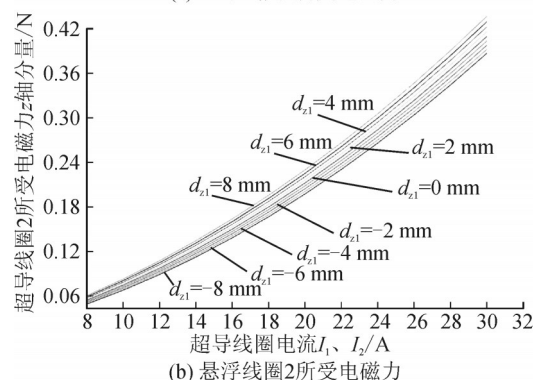
为研究四极悬浮磁阱中盲鳗线圈1、2所受电磁力与线圈电流以及相对位置变化的对应关系。在COMSOL软件中,引入参数 d_{z1} 和 d_{z2} ,用 $z+d_{z1}$ 表示磁阱补偿线圈的位置坐标, $z+d_{z2}$ 表示超导线圈1和2的位置坐标。 d_{z1} 和 d_{z2} 的取值在 $(-8 \sim +8)$ mm 之间;补偿线圈电流 I_0 变化范围为 $(0 \sim 200)$ A;悬浮线圈1和2的电流 I_1 、 I_2 变化范围为 $(0 \sim 30)$ A,每2 A为一个单位。仿真计算悬浮线圈所受电磁力随电流和距离参数改变的变化关系。

在COMSOL中增加“参数扫描”参量,为了保证磁场的对称以及两盲鳗线圈间弱磁场区域的存在

性,定义悬浮线圈1、2电流 I_1 、 I_2 同时变化。仿真得到不同 I_1 、 I_2 、不同线圈空间位置情况下的电磁力变化情况,仿真结果见图8。



(a) 悬浮线圈1所受电磁力



(b) 悬浮线圈2所受电磁力

图8 悬浮线圈电流与 d_{z1} 变化时线圈所受电磁力Fig. 8 The electromagnetic forces of levitating coils under the change of current and d_{z1}

从图8(a)、(b)中可以看到,随着 I_1 、 I_2 的逐渐增大,悬浮线圈1所受电磁力先增大后略有减小(均沿 z 轴正方向),电磁力变化范围在 $(0 \sim 0.2)$ N 之间,而悬浮线圈2所受电磁力一直增大,电磁力变化范围在 $(0 \sim 0.42)$ N 之间。

之后,设定悬浮线圈1、2的电流 $I_1 = I_2 = 30$ A,在COMSOL软件中增加线圈匝数参数 N ,匝数 N 从5到45依次递增(每次增加5匝),仿真计算分析悬浮线圈匝数、补偿线圈电流 I_0 与线圈电磁力的对应关系。仿真计算结果见图9。

从图9(a)、图9(b)中可以看到,随着 I_1 、 I_2 的逐渐增大,悬浮线圈1所受电磁力先增大后略有减小(均沿 z 轴正方向),电磁力变化范围在 $(-1.3 \sim +0.6)$ N 之间,同时 I_0 在 $(0 \sim 40)$ A 范围变化时悬浮线圈1所受电磁力为负(沿 z 轴反方向);而悬浮线圈2所受电磁力一直增大,电磁力变化范围在 $(0 \sim 1.9)$ N 之间,同一匝数和同一补偿线圈电流 I_0 下,悬浮线圈2电磁力远大于悬浮线圈1所受电磁力。相较于悬浮线圈电流变化时的电磁力大小变化情况,此种情况下的电磁力变化幅度更大且悬浮线圈1所受电磁力存

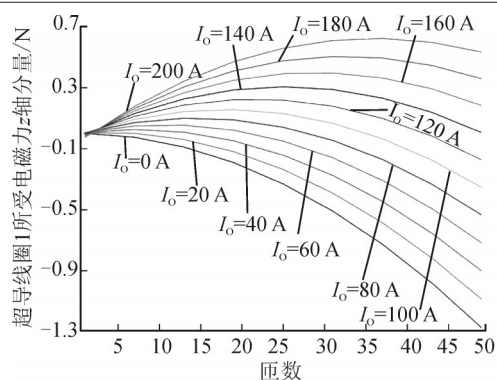
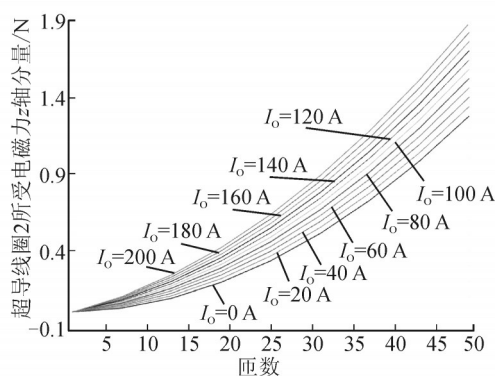
(a) 超导线圈1所受电磁力(匝数 $N-I_o$)(b) 超导线圈2所受电磁力(匝数 $N-I_o$)

图9 悬浮线圈匝数与补偿线圈电流变化时线圈所受电磁力

Fig. 9 The electromagnetic forces of levitating coils under the change of coil turns and I_o

在负值。

3 结语

文中详细分析了 Galatea 型磁约束装置各组成部分以及悬浮磁阱的结构,建立四极悬浮磁阱中盲鳗线圈所受电磁力的计算模型。利用 COMSOL 有限元软件,建立 Galatea 四极悬浮磁阱模型,仿真分析悬浮线圈电流、匝数和补偿线圈电流对于磁阱悬浮线圈所受电磁力的影响,对于 Galatea 型磁约束装置悬浮磁阱的研究与设计意义重大。

参考文献:

- [1] COWAN R. Nuclear power reactors: A study in technological lock-in[J]. The Journal of Economic History, 1990, 50(3):541-567.
- [2] MIYAMOTO K. Development of fusion researches[C]//Plasma Physics for Controlled Fusion. Springer Berlin Heidelberg: [s.n.], 2016:327-336.
- [3] BYCHKOV V, MODESTOV M, LAW C K. Combustion phenomena in modern physics: I. inertial confinement fusion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2015(47):32-59.
- [4] BOXER A C, BERGMANN R, ELLSWORTH J L, et al. Tur-

bulent inward pinch of plasma confined by a levitated dipole magnet[J]. Nature Physics, 2010, 6(3):207-212.

- [5] SAITOH H, YOSHIDA Z, MORIKAWA J, et al. Formation of high- β ECH plasma and inward particle diffusion in RT-1[J]. Journal of Fusion Energy, 2010, 29(6):553-557.
- [6] МОРОЗОВ А И, БУГРОВА А И. Инжекция плазмы в галатею “тримикс”[J]. Физика Плазмы, 2006, том 32(3): 195-206.
- [7] МОРОЗОВ А И, БУГРОВА А И, и др. Параметры плазмы в модернизированной ловушке Галатея “Тримикс-М”[J]. Журнал технической физики, 2007, 77(12):15-20.
- [8] MOROZOV A I, BISHAEV A M, KOZINTSEVA M V, et al. Research of multipole magnetic trap - galatea “Trimyx”[J]. Czechoslovak Journal of Physics, 2006, 56(2):B31-B35.
- [9] MOROZOV A I, BUGROVA A I, BISHAEV A M, et al. Plasma parameters in the upgraded trimyx-M Galatea[J]. Technical Physics, 2007, 52(12):1546-1551.
- [10] 郑梦辉. 佳拉洁雅装置磁热耦合场下等离子体磁约束研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- ZHENG Menghui. Research on plasma confinement in magnetic - coupling field in Galatea[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [11] BISHAEV A M, BUSH A A, GLADYSHEV I V, et al. Investigation of possibility of creation of levitating quadrupole[J]. Plasma Physics, 2011, 17(1):35-37.
- [12] BISHAEV A M, BUSH A A, GAVRIKOV M B, et al. Equilibrium of a system of superconducting rings in a uniform gravitational field[J]. Technical Physics, 2013, 58(5):684-691.
- [13] GORDIENKO V A, DUBINOV A E, ZHURAVLEV S S, et al. Experimental modeling of a novel magnetic confinement system: Galatea with a myxine in the shape of a convex polyhedron[J]. Plasma Physics Reports, 2005, 31(3):266-269.
- [14] BISHAEV A M, BUGROVA A I, KOZINTSEVA M V, et al. Investigation of energy and mass balance in “Trimyx-3M” galatea multipole magnetic trap[J]. Problems of Atomic Science and Technology, 2011(1):20-22.
- [15] ANDREW A M. Global warming and nuclear power[J]. Kybernetes, 2007, 36(3/4):465-468.
- [16] Морозов А И, Бугрова А И, и др. Влияние величины магнитного барьера на параметры плазмы в ловушке “Тримикс-М”[J]. Письмо в ЖТФ, 2006, 32(21):50-55.
- [17] 黄桂香. 佳拉洁雅型磁约束装置磁系统的磁场分析与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- HUANG Guixiang. Magnetic field analysis and design in the magnetic system of Galatea magnetic confinement device[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

- [18] 倪光正. 工程电磁场原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 145-150.
NI Guangzheng. Principles of engineering electromagnetic fields[M]. Beijing: Press of Higher Education, 2009: 145-150.
- [19] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 128-130.
FENG Cizhang, MA Xikui. Introduction to engineering electromagnetic field[M]. Beijing: Press of Higher Education, 2009: 128-130.
- [20] 王 刚, 安 琳. 工程实践与理论仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 8-18.

WANG Gang, AN Lin. COMSOL multiphysics engineering practice and theoretical simulation[M]. Beijing: Press of Electronic industry, 2012: 8-18.

佟为明(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能电网通信与信息安全、工业通信技术、等离子体磁约束技术等方面的研究。

李 帅(1993—), 男, 硕士研究生, 从事 Galatea 型磁约束装置等离子体参数采集等方面的研究。

金显吉(1982—), 男, 博士, 助理研究员, 从事智能电网通信、电磁场优化等方面的研究。

书讯

高电压试验技术(第4版)”已由清华大学出版社出版发行。此书是北京市精品教材。陈昌渔, 王昌长, 高胜友编著。谈克雄编审。各大新华书店经销。

本书讲解高电压试验设备和测量装置的基本工作原理, 并提供设计和选择这些设备与装置的方法, 同时还介绍了最新的国家标准和IEC的有关规定。本书可作为高电压及绝缘技术专业研究生或本科生的教材, 还可供给电力系统和电工制造部门的工程技术人员作为自学教材。