

Ye Jingwei, Ding Wenyao, Sun Zhibin, Huang Huang, Zhao Qing, Zhai Guangjie. Electromagnetic levitation force and loop structure. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(1): 80-86

空间电磁悬浮线圈参数与悬浮力*

叶经纬¹ 丁文耀^{1,2} 孙志斌¹ 黄 璜³
赵 清² 翟光杰¹

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(北京理工大学理学院 北京 100081)

3(北方工业大学自动化学院 北京 100144)

摘 要 以中国空间无容器材料实验装置为应用背景,重点探讨了电磁悬浮线圈结构参数对线圈内部空间的感生磁场分布情况及电磁悬浮力的影响规律,研究了悬浮力场分布与匝数、初匝线圈半径、锥角、线圈间距、螺距等结构参数之间的关系,并通过实验验证了计算的正确性.为空间电磁悬浮线圈的设计提供了理论参考依据.

关键词 电磁悬浮, 悬浮力, 悬浮线圈, 无容器, 微重力

中图法分类号 V 542

Electromagnetic Levitation Force and Loop Structure

YE Jingwei¹ DING Wenyao^{1,2} SUN Zhibin¹ HUANG Huang³
ZHAO Qing² ZHAI Guangjie¹

1(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(School of Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

3(North China University of Technology, Beijing 100144)

Abstract Electromagnetic Levitation (EML) is a kind of technology for containerless processing of material. It has a lot of advantages, such as no contamination, processing materials with higher melting point, stronger erodibility and easy concreting nucleus. The important levitation is to produce big levitating force against gravity on the ground, and to compensate the remaining gravity in space. In this paper, the distribution of levitating force produced by loops is calculated. A stable potential well is also studied and produced to capture the sample. The calculation is mainly focused on the relation between the distribution of levitating force and the structure of loops, such as the number of turns, the angle of wimble, the radius of loop, the space and screw-pitch between loops. A series of curves representing the properties of different structures and the theoretical support for actual loop designs have finely been tend.

Key words Electromagnetic levitation, Levitating force, Levitating loop, Containerless, Microgravity

* 载人航天工程项目资助

2009-05-04 收到原稿, 2010-02-05 收到修定稿

E-mail: gjzhai@cssar.ac.cn

1 引言

熔化和凝固是人类制备材料的主要手段之一. 对凝固过程的理解和利用依然是材料科学研究的重要前沿问题之一, 如金属非平衡相的研究及晶体生长的研究等. 这些研究获得的基础性规律以及获得的新材料能够直接或间接应用于其他领域. 除了排除重力影响来研究凝固规律外, 人们早已认识到容器也是影响材料凝固规律的重要因素之一. 因此国际上对空间无容器材料实验装置研究给予了足够的重视, 如欧洲宇航局 (ESA) 发展了以电磁悬浮为基础的 TEMPUS 系统, 日本宇航局 (JAXA) 开发了静电悬浮装置, 中国也在载人航天计划中列入了空间电磁悬浮材料实验装置研究.

电磁悬浮最初是由 Muck 于 1923 年提出来的^[1], 1952 年, Okress 等^[2]首次对金属实现了电磁悬浮熔炼. 该方法可以消除容器对材料的污染和容器内壁引起的异质形核, 被广泛应用于高活性、高熔点金属熔炼, 材料的深过冷研究, 材料物性参量的测定, 气体金属、熔渣金属的相互作用等研究^[3-6]. 空间材料研究已经证明了微重力条件对材料凝固的巨大影响^[7-10]. 空间电磁悬浮是伴随着空间材料研究的发展而发展起来的^[10]. 空间电磁悬浮材料实验装置能够提供无容器及微重力材料科学实验环境, 且由于其在空间上具有开放性能够处理批量实验样品的优点, 受到空间材料科学研究人员的关注.

悬浮线圈是空间电磁悬浮的核心部件, 悬浮线圈参数是直接影响空间电磁悬浮效率、样品稳定区大小、悬浮力大小等重要悬浮技术指标. 本文重点研究的是线圈结构与悬浮稳定性之间的关系, 得出了悬浮力分布与各个结构参数 (包括线圈匝数、线圈半径、锥角、间距和螺距等) 之间的依赖关系, 为确定悬浮线圈参数提供理论依据.

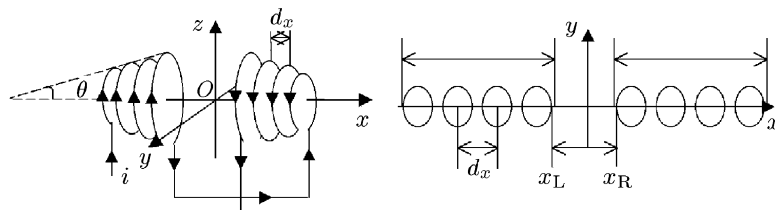


图 1 线圈结构与两线圈的间距螺距

Fig. 1 Illustration of the coil structure and spacing of the two coils and the pitch

2 空间电磁悬浮力的计算原理

电磁悬浮系统由高频电压源和悬浮线圈组成. 高频电压源将几百 kHz 的正弦信号提供给悬浮线圈, 悬浮线圈产生电磁场, 实现对样品的悬浮定位.

电磁悬浮的实质是, 当一个金属样品或半导体样品放在通有高频交变电流的线圈中时, 电流产生的高频电磁场将使金属或半导体表面产生涡旋电流 (趋肤电流). 涡流与交变电磁场相互作用, 使样品在洛仑兹力的作用下得以悬浮. 相对于地面悬浮来说, 空间电磁悬浮的不同之处在于空间中的微重力环境, 以及存在各种不同性质、不同方向的扰动. 这就要求悬浮力形成一个对称的势阱 (即各个点的悬浮力方向都是指向悬浮中心), 或至少在三个轴向上是对称的, 以便从各个角度都能束缚住样品. 而在地面实验中, 主要考虑抵消重力方向上的影响, 所采用的线圈组一般是由一对相同的线圈组成的对称结构^[11], 悬浮线圈有圆柱形、圆锥形等. 由于圆锥形线圈具有较好的悬浮稳定性, 所以常常更多地被采用.

空间电磁悬浮线圈的结构如图 1 所示. 悬浮线圈由一对结构尺寸一样的线圈组成, 两线圈的电流方向相反. 线圈的轴线沿 x 轴方向, 两线圈的中心处位于坐标轴的原点, d_x 为线圈的螺距, θ 为线圈的半锥角. 两线圈中最接近原点的线匝为初匝线圈, 向外为第二匝, 依次类推. 在悬浮实验时, 样品放置于原点处.

样品在电磁场中的受力可以表示为一个势函数的负梯度, 即

$$F = -\nabla T.$$

式中 T 代表电磁势, 其表示将样品从磁场为 0 处移至磁场 H 中所需做的功. 当样品为球形完全导体时, 磁势为

$$T = \pi a^3 \mu_0 H^2. \quad (1)$$

式中, a 为样品半径, H 为磁场强度. 式 (1) 是在样品为完全导体时得到的, 更为普遍的情况下, 应该在式 (1) 中加入一修正因子 $G(x)$, 即

$$T = G(x)\pi a^3 \mu_0 H^2. \quad (2)$$

式中

$$G(x) = 1 - \frac{3(\text{sh}2x - \sin 2x)}{4x(\text{sh}^2 2x + \sin^2 x)}$$

为与样品尺寸相关的函数, 其代表实际导体所受磁场力与完全导体所受磁场力之比. 无量纲量 x 为样品半径与趋肤深度之比.

由此可以得到磁场力公式

$$\mathbf{F} = -\pi a^3 \mu_0 G(x) \nabla H^2 = -\frac{1}{\mu_0} G(x) \pi a^3 \nabla B^2. \quad (3)$$

当样品尺寸较小时, 可以近似认为样品所在空间中磁场是均匀的, 则悬浮力可表示为

$$\mathbf{F} = -\pi a^3 \mu_0 G(x) H \frac{\partial H}{\partial z}. \quad (4)$$

由此可见, 悬浮力的大小与场强及场强梯度有关. 式 (4) 即为计算悬浮力分布的依据 [12]. 以悬浮力与样品在地面所受重力的比值 F_g 作为计算结果, F_g 越大, 说明样品受到的悬浮力越大, 有

$$F_g = \frac{F}{mg} = \frac{F}{V\rho g} = \frac{F}{\frac{4}{3}\pi a^3 \rho g}. \quad (5)$$

式中, m 为样品小球的质量, g 为地面重力加速度, V 为小球体积, a 为小球半径, ρ 为密度.

3 计算结果与分析讨论

由图 1 可以看出, 由于采用的模型具有对称性, 可以只计算在 xy 平面上悬浮力的分布, 而对于整个

线圈空间的悬浮力, 则可以由 xy 平面上的力经过绕轴旋转得到.

对于一个线圈, 其结构参数有匝数、锥角、线圈半径、左右线圈间距、螺距和导线直径等. 在计算其中某一个参数对悬浮力的影响时, 总是保持其余的参数不变. 以下计算均以半径为 2.8 mm、密度为 8.4 g/m³ 的焊锡球为样品, 线圈中通以 $I = 26$ A、频率为 40 kHz 的交变电流. 线圈各参数初始值如下: 两侧线圈的匝数各为 14 匝, 初匝线圈半径为 20 mm, 锥角为 30°, 螺距为 2.7 mm, 导线截面的直径为 2 mm (计算中保持不变), 左右线圈间距为 8 mm. 在不同的频率下 $G(x)$ 为常数, 为得到线圈各项参数与 F_g 的关系, 首先取 $G(x) = 1$ 以便于计算. 计算结果如图 2 所示.

由图 2 可见, 在导线附近区域悬浮力远大于远离导线区域, 结合图 3 可以看出, 在 x 和 y 轴方向上分别有 3 个悬浮力的极小值点 (如图 2(a) 中小圆圈所示)、4 个极大值点. 这是因为空间中每个点的悬浮力都是由两个线圈的相反的场强梯度叠加而成. 无论是在 x 轴还是 y 轴上, 原点两侧悬浮力方向均指向原点, 而其余两个极小值点两侧力的方向均背离极小值点, 可见线圈内部的稳定位置只有原点处, 落在两个不稳定极小值点之间的样品可以在指向原点的悬浮力的作用下回到稳定点. 这样的特性可以使样品被约束在原点附近. 在 y 轴方向上, 右两个极小值处即为线圈边缘所在位置, 在线圈范围内悬浮力始终指向原点, 但无论是在 x 轴还是 y 轴方向上, 样品移出两侧极小值点时, 其受力方向将变为指向线圈外部, 意味着线圈失去了对样品的束缚.

可以通过以下两个因素分析线圈的悬浮性能: 样品偏离后所受悬浮力的大小; 允许样品偏离的区域, 即约束范围 (实际上是一个三维的区域, 简化到

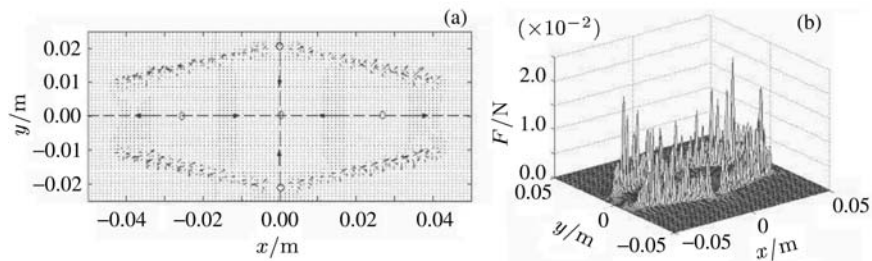


图 2 (a) xy 平面悬浮力矢量 (箭头所示为该点附近区域悬浮力方向), (b) xy 平面悬浮力的大小 (不考虑悬浮力方向)
Fig. 2 (a) Vector diagram of the levitation force in the xy plane (the arrow shows the direction of the levitation force), (b) 3D graph for the size of levitation force in the xy plane (direction of levitation force not included)

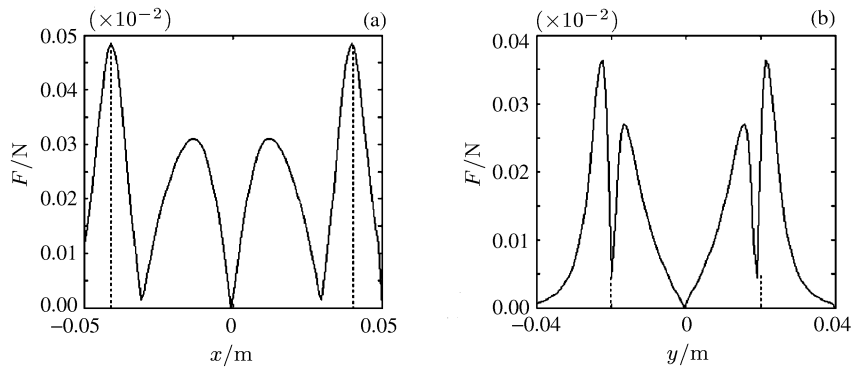
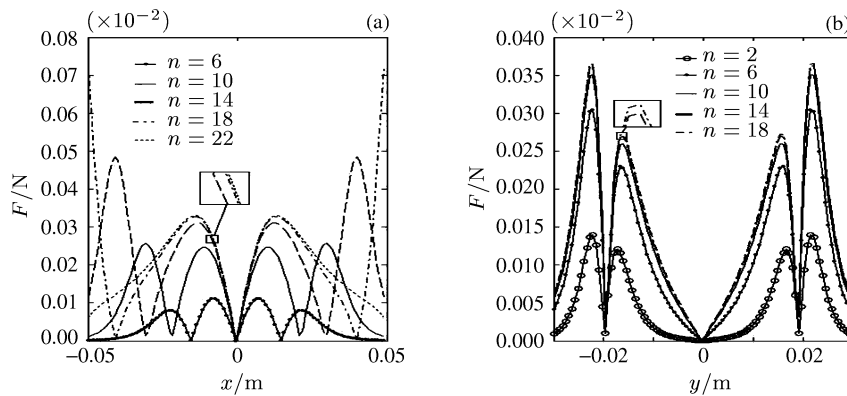


图3 各参数取初始值时悬浮力在两个坐标轴上的分布 (虚线表示线圈范围)

Fig. 3 Levitation force distribution on the two coordinate line when the initial parameter values are used (dashed lines show the coil regime)

图4 悬浮力与匝数 n 的关系Fig. 4 Variation of the levitation force distribution with the number of turns (n)

xy 平面上时则表现为在某一轴向上的长度). 从图3可以看出, 两个不稳定极小值点之间的长度越长, 则约束范围越大. 这就是对线圈的结构参数进行选择时的依据.

图4显示了悬浮力与单侧线圈匝数 n 的关系. 可见线圈匝数的增加使两坐标轴上悬浮力增大, 并且每增加1匝线圈, x 轴上两个不稳定极小值点的间距扩大1cm左右, 增加了悬浮稳定性. 但匝数增加到一定程度后, 悬浮力的提升将非常微小, 例如如图4(a), $n = 18$ 与 $n = 22$ 的图像在原点两侧极大值之间几乎重合; 而图4(b)中 n 为10~18的图像都几乎重合, 并且由于受到空间条件(功耗、体积等因素)的限制, 也不可能使用太多匝的线圈. 这在进行实验时是要仔细权衡的.

图5显示了不同线圈锥角对悬浮力的影响. 从 x 轴上看, 越大的锥角可以获得越好的悬浮性能, 当锥

角为 $\pi/6$ 时末扎线圈半径约为10.5mm, 因此出现了线圈 x 轴边缘处 F_g 快速上升至最大值. 从 y 轴上看, 在线圈内部, 接近原点处锥角越小, 则悬浮力越大, 峰值处相反, 各曲线的交点出现在1cm附近, 可见当样品在 y 轴上的偏离位置较小, 则宜采用大锥角的线圈, 但显然锥角的大小是受到线圈匝数和初匝线圈半径限制的. 图6则显示了线圈半径对悬浮力的影响(图6只给出了初匝线圈半径, 其他半径可由锥角与螺距算得). 由图6可见, 半径每减小5mm, x 轴上悬浮力大小的变化非常明显, 线圈内部的极大值增大20%左右. 这是由于各线元均靠近中轴, 使悬浮力得到了加强. y 轴上越大的半径能够获得越大的极大值和约束范围, 但显然由于斜率较小, 在原点附近悬浮力远远不如小半径线圈.

图7显示了两侧初匝线圈的间距与悬浮力的关系. 间距每增大2mm, x 轴上的约束范围就扩大约

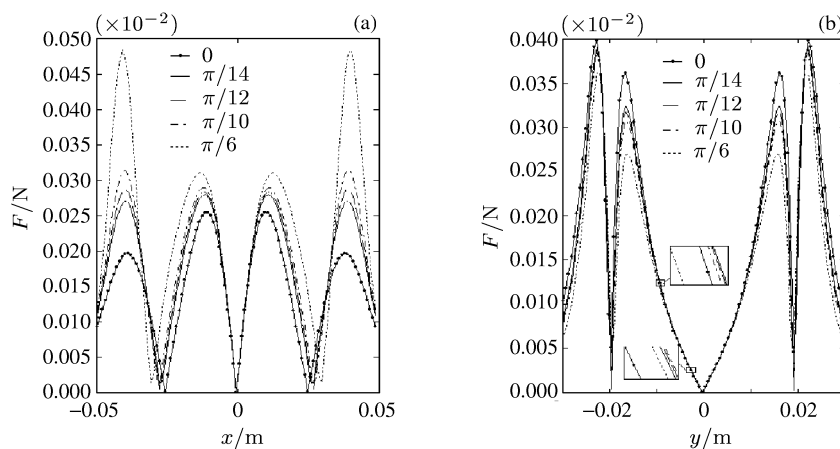


图 5 悬浮力与锥角的关系

Fig. 5 Variation of the levitation force distribution with the cone angle of coils

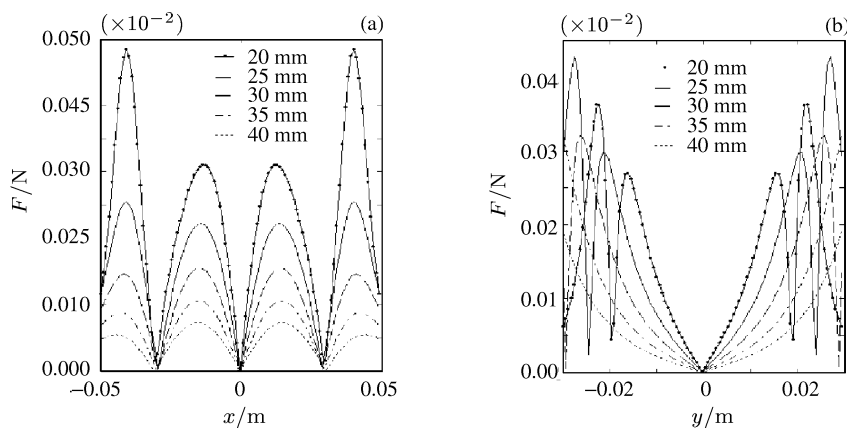


图 6 悬浮力与初匝线圈半径的关系

Fig. 6 Variation of the levitation force distribution with the radius of first turn in the coils

2 mm, 原点至第一个交点之间的悬浮力随之增大, 而 y 轴上随着半径的增大悬浮力的减小较显著, 因此在留有一定样品操作余量的范围内, 可以减小两线圈的间距. 图 8 显示了线圈螺距与悬浮力的关系. 螺距的大小直接影响线圈长短, 各线元到受力点之间的距离增大, 则导致悬浮力急剧减弱. 但是螺距每减少 1 mm, 则 x 轴上的约束范围将减少约 2.6 cm.

综上所述, 当样品偏离稳定点的距离较小时, 宜采用多匝数、大锥角、大半径、小间距、小螺距的线圈. 但权衡系统功耗、样品尺寸等因素, 显然没必要无限地提高线圈匝数, 也不能将两侧线圈距离缩的太短; 当样品有可能偏离稳定点较远时, 就应该综合考虑线圈对样品的约束范围, 增大匝数、锥角、半径、螺距都有利于扩大约束范围. 但是上述参数的改变将影响悬浮力大小, 因此约束范围的扩大是以损失

系统效率为代价的.

4 实验及结果分析

实验采用半径 2.45 mm、密度 8.4 g/cm^3 的锡合金球为样品, 线圈电流为 26 A、频率为 40 kHz. 线圈结构采用两侧的匝数各为 14 匝, 初匝线圈半径为 20 mm, 锥角为 30° , 导线直径为 2 mm, 螺距为 2.7 mm, 左右线圈间距为 8 mm. 实际上, $G(x)$ 是受样品尺寸、样品导电参数、磁场变化频率影响的, 需要通过实验进行确定. 在给定样品条件下, 频率较低时, 则样品趋肤深度 x 趋近于 0, $G(x)$ 也趋近于 0; 当频率较高时, 则 x 趋近于无穷大, $G(x)$ 趋近于 1; 当各项参数不变时, $G(x)$ 为 (0, 1) 区间里的一个常数. 图 9 为 $G(x) = 0.01$ 时, 初始参数下 x 轴和 y 轴

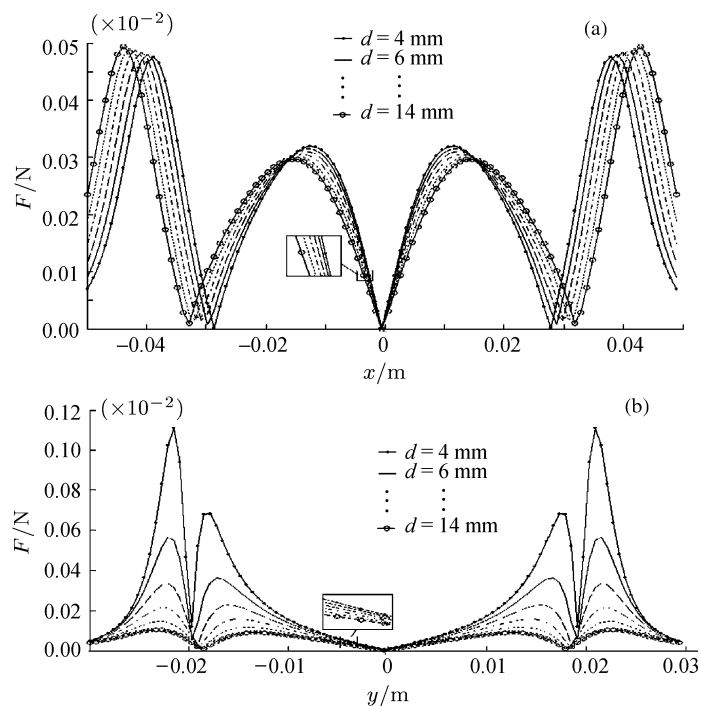


图 7 在 x 和 y 轴上的悬浮力与两线圈间距 d 的关系

Fig. 7 Variation of the levitation force distribution with the distance d between the two coils on the x, y coordinate

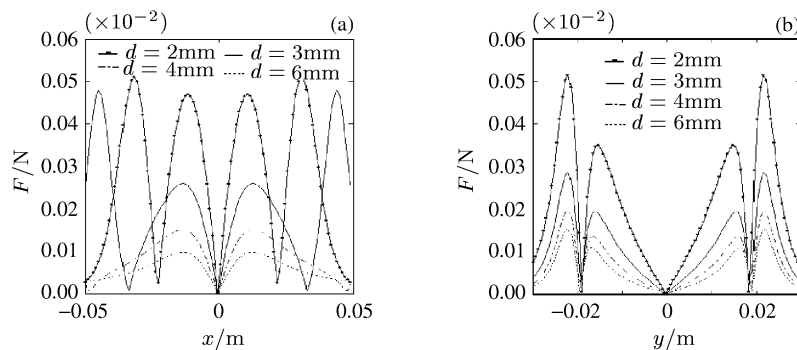


图 8 悬浮力与线圈螺距 d 的关系

Fig. 8 Variation of the levitation force distribution with the distance d between the two coils

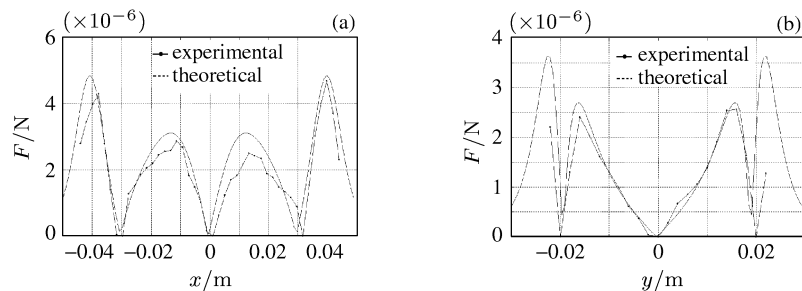


图 9 试验数据与理论数据拟合曲线比较

Fig. 9 Comparison of experimental results and the theoretical curve

上的试验数据与理论数据曲线,从测量结果可以看到, x 和 y 轴上悬浮力的极小值、极大值存在并与理论位置吻合,稳定位置位于线圈中心,两侧悬浮力指向中心,证明上述计算是正确的.

5 结语

通过电磁学计算分析了线圈结构对悬浮力的影响,研究了不同结构线圈的悬浮性能.结果表明,采用多匝数、大锥角、大半径、小间距、小螺距的线圈结构易于提高悬浮约束力.实验结果验证了理论计算方法的正确性,该理论计算方法可以作为空间电磁悬浮装置线圈结构设计的辅助方法.

参考文献

- [1] Nordine Paul C, Richard Weber J K, Abadie Johan G. Properties of high-temperature melts using levitation [J]. *Pure Appl. Chem.*, 2000, **72**(11):2127-2136
- [2] Okress E C, Wroughton D M, *et al.* Electromagnetic levitation of solid and molten metals [J]. 1952, *J. Appl. Phys.*, **23**(5):525-547
- [3] Ma Weizeng, Ji Chengchang, Li Jianguo, Xu Zhenming. Temperature character of electromagnetic levitation melting [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2003, **52**(04):834-839. In Chinese (马伟增, 季诚昌, 李建国, 许振明. 电磁悬浮熔炼的温度特性 [J]. 物理学报, 2003, **52**(04):834-839)
- [4] Hermann R, Loser W. Extension of the primary solidification region of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ by levitation of undercooled melts [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **83**: 6399
- [5] Kiessig H, Essmann U. Flow stress of pure niobium between 2200 K and the melting point 2741 K [J]. *Scr. Metall.*, 1985, **8**(19):989-992
- [6] Herlach D M, Cochrane R F, Egry I, *et al.* Containerless processing study of metallic melts and their solidification [J]. 1993, *Int. Mat. Rev.*, **38**(6):273-347
- [7] Nordine Paul C, Richard Weber J K, Abadie Johan G. Properties of high-temperature melts using levitation [J]. *Pure Appl. Chem.*, 2000, **72**(11):2127-2136
- [8] Liu Y F, *et al.* BSO single crystal growth in space and in magnetic fields [G]//Proceedings of the 6th Japan/China Workshop on Microgravity Sciences, Takeo, 2005. 133
- [9] Liu Z H, Jin W Q, Pan Z L, Liang X A. The comparison on the convective effects in high temperature solution in space and on the ground [J]. *J. Microgr. Sci. Tech.*, 2003, **XIV**:3-8
- [10] Zhong Xiaoyan, Chen Jiagui. Development of the electromagnetic levitation in space science [J]. *Physics*, 1996, **25**: 565-576. In Chinese (钟晓燕, 陈佳圭. 空间电磁悬浮技术的发展状况 [J]. 物理, 1996, **25**:565-576)
- [11] Wang N, Xie W J, Wei B B. Physical characteristics of electromagnetic levitation processing [J]. *Chin. Phys.*, 1999, **8**:503
- [12] Albert J. Hatch potential-well description of electromagnetic levitation [J]. *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**:44