

# 微牛级电磁力标定装置仿真与测试研究\*

成 焯<sup>1,2,3</sup>, 龙建飞<sup>1,2,3</sup>, 罗 威<sup>1,2,3</sup>, 王嘉彬<sup>1,2,3</sup>, 黄 丹<sup>1,2,3</sup>,  
徐禄祥<sup>1,2,3</sup>, 郭 宁<sup>1</sup>, 杨 威<sup>4</sup>

1. 国科大杭州高等研究院 基础物理与数学科学学院, 浙江 杭州 310024;
2. 国科大杭州高等研究院 引力波太极实验室(杭州), 浙江 杭州 310024;
3. 国科大杭州高等研究院 浙江省引力波精密测量重点实验室, 浙江 杭州 310024;
4. 重庆科技学院 电气工程学院, 重庆 401331)

**摘 要:** 如何获得高精度标定力是微牛级推力测量的重要基础。本文构建了C型磁路结构和矩形线圈组合方式以产生高精度宽范围电磁标定力。利用有限元方法分析了该装置特征区域磁场分布,对矩形线圈与磁体相对位置影响进行了讨论,最后搭建标定实验平台并进行标定实验。得到主要结论:在特征区域范围内磁场分布均匀性较好,最大差异率仅为0.7%;电流在10  $\mu\text{A}$ ~20.2 mA范围调节时,电磁力标定范围为0.097~237.32  $\mu\text{N}$ ,实验测量数据与仿真结果最大误差为1.73%;当线圈电流分辨率为10  $\mu\text{A}$ 时,标定力实测分辨率优于0.1  $\mu\text{N}$ 。

**关键词:** 微推力测量;微牛级;电磁力标定;系统参数标定;仿真模拟

**中图分类号:** V439+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2024) 05-2303058-09

**DOI:** 10.13675/j.cnki.tjjs.2303058

## 1 引 言

微推进技术是实现空间引力波探测中无拖曳控制任务的关键<sup>[1]</sup>。2019年8月“太极一号”的成功发射,迈出了我国空间引力波探测的第一步,为我国在空间引力波探测领域率先取得突破奠定了基础。“太极一号”第一阶段在轨测试和数据分析结果表明:微推力器推力分辨率达到亚微牛量级<sup>[1]</sup>。此外,近年来微纳卫星快速发展,带动了胶体、场致发射、脉冲等离子体等微推进技术发展,相应也对微推力测量提出明确需求<sup>[2-4]</sup>。

微推力精确测量可以真实、直观地反映推力器电参数、介质参数变化引起的推力变化,从而为微推力器的研制、设计、参数选择及性能评价提供必要的技术途径<sup>[5]</sup>。地面开展微推力测量实验中,最为关键的就是需要大小准确、方向稳定的标定力,并利用产生的高精度标定力进一步获得微推力测量装置的系

统参数<sup>[6-8]</sup>。标定力产生方法主要包括:砝码法<sup>[9-10]</sup>、静电梳法<sup>[11-13]</sup>和电磁力法<sup>[13]</sup>,其中电磁标定力采用通电线圈与永磁铁作用产生电磁力<sup>[14-19]</sup>,通过建立电磁力与电流关系加载电磁力,标定力精度高,是理想的产生标定力方法。

国内外研究人员对电磁标定力进行了大量的研究。Lam等<sup>[20]</sup>开展了高精度电磁标定系统研制,测试结果显示,在超过四个数量级(30~23 000  $\mu\text{N}$ )的条件下产生线性、可重复和一致的标定力,针对稳态和脉冲力校准时,校准器的最大不确定度误差分别为18.48%和11.38%。2017年王大鹏等<sup>[21]</sup>分析了高精度电磁标定力的产生及其特性,研究了磁铁与线圈之间相对位置变化对电磁力大小的影响关系,通过仿真计算得到了轴向距离、径向偏差、相对倾角变化下的电磁力输出特性。2019年常浩等<sup>[5]</sup>研究基于音圈电机的电磁力恒力特性,仿真分析了音圈电

\* 收稿日期: 2023-03-24; 修订日期: 2023-06-15。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2202700); 国科大杭州高等研究院自主项目(2022ZZ01009); 重庆市教委科学技术研项目(KJZD-K202101506); 湖南省自然科学基金(2021JJ30564)。

作者简介: 成 焯, 硕士生, 研究领域为无拖曳控制与微推进技术。

通讯作者: 龙建飞, 博士, 高级工程师, 研究领域为无拖曳控制与微推进技术。E-mail: ljf510@163.com

引用格式: 成 焯, 龙建飞, 罗 威, 等. 微牛级电磁力标定装置仿真与测试研究[J]. 推进技术, 2024, 45(5): 2303058. (CHENG Y, LONG J F, LUO W, et al. Simulation and testing research on micro Newton level electromagnetic force calibration device[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(5): 2303058.)

机中的磁场分布情况,以及线圈电流、线圈与磁轭磁铁相对距离等控制因素下的电磁力变化特性,通过搭建微小电磁力恒力特性实验系统,采用高精度电子天平称重方式,获得了精确的电磁力变化特性;2022年冯孝辉等<sup>[22]</sup>结合数值仿真以及实验测量的结果,重点研究了永磁体几何结构变化对电磁力带来的影响,包括永磁体直径和厚度,最终确定了大直径永磁体+线圈组合型电磁力产生装置,并基于拟合方法建立了一定包络区间内的高精度电磁力控制关系式。该方案对磁体与线圈之间基准位置要求较高,且两者间相对位置变化范围有限。目前关于高精度电磁标定力研究仍是该领域研究的热点与难点。

针对“太极计划”空间引力波探测任务,国科大杭州高等研究院正在开展微霍尔电推进系统及微推力测量技术研究。为获得高精度标定力,本文设计一种永磁体与通电导线相结合的电磁标定力结构。采用有限元方法对该结构仿真分析,得到特征区磁场分布和电磁力特性,并进一步对该电磁标定力性能进行验证和标定,测试出标定力测量范围和分辨率,最后对测试结果进行了误差分析。本文研究为微牛级推力测量技术奠定了基础。

## 2 电磁标定力原理及结构

电磁标定力法<sup>[7]</sup>主要利用通电线圈在磁场中受到的安培力作为标定力。在稳定磁场中,标定力的大小与线圈电流值成正比,通过调节电流来产生不同范围标定力。电磁标定力原理示意图如图1所示。

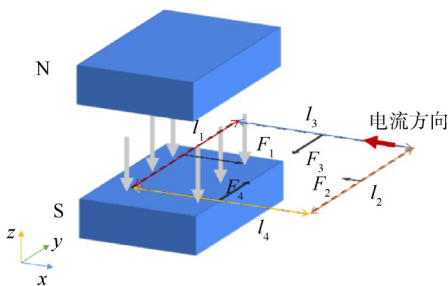


Fig. 1 Schematic diagram of stress in magnetic field

假定上磁极为N极,下磁极为S极,永磁体外部磁感应线方向从N极指向S极。以磁极间距中心点为原点建立空间坐标,坐标如图1所示。矩形线圈置于 $z=0$ 平面,并沿逆时针方向提供恒定电流使其受到安培力。将矩形线圈分为1,2,3,4段,各段所受安培力满足下式

$$F_i = \int_{l_i} B(r) I dl \quad (1)$$

式中 $B(r)$ 为线段所在空间磁场分布, $l_i$ 为对应线段长度, $I$ 为电流, $l$ 为导线垂直于磁感线的长度。

进一步对矩形线圈受力分析可知, $F_1$ 和 $F_2$ 的方向相反, $F_3$ 和 $F_4$ 反向相反。在 $z=0$ 平面内,当线段3和线段4亦关于 $x$ 轴对称时, $F_3$ 和 $F_4$ 方向相反,且大小近似相等;而线段1和2由于所处空间磁场强度分布不一样,将产生一个朝着 $x$ 方向的总电磁力 $F$ ,满足如下关系式

$$\begin{aligned} F_x &= F_1 - F_2 = \int_{l_1} \bar{B}_1 I dl - \int_{l_2} \bar{B}_2 I dl \\ F_y &= F_3 - F_4 = \int_{l_3} \bar{B}_3 I dl - \int_{l_4} \bar{B}_4 I dl \end{aligned} \quad (2)$$

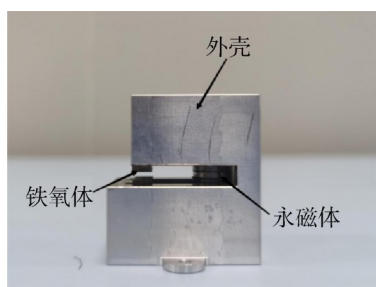
通过以上分析可知,影响总电磁力主要因素包括:磁场强度分布、线圈尺寸、线圈电流等。因此,合理设计磁体和线圈尺寸,并控制两者相对位置,通过调节电流以获得预计标定力。

根据以上分析研制电磁标定力装置,如图2所示。该装置主要包括磁体和矩形线圈。磁体结构方面,选用永磁体和铁氧体构建C型磁路以获得稳定磁场,其中永磁体选用NdFe35型号的钕铁硼材料,铁氧体用于导磁并形成磁极,磁极间距为2.0 mm,磁极端面为20 mm×50 mm。矩形线圈采用Altium软件进行设计,通过PCB板敷铜方式得以实现。为了减少空间磁场分布带来的误差,采用单线圈设计且单面敷铜,线圈直径0.2 mm,PCB板厚度为1 mm。工作时将PCB板线圈置于磁极中间,调节PCB板与磁体相对位置,并通过控制电流来产生标定力。

## 3 电磁标定力仿真

由于永磁体产生磁场的特殊性,利用有限元法对磁场强度分布进行模拟更为准确便利。采用仿真软件ANSYS Maxwell进行建模仿真,电磁力产生装置的三维仿真模型参照实物结构1:1建立,如图3所示,其中蓝色部分为永磁体,红色部分为铁氧体,绿色部分为外壳,线圈位于两磁极中间位置,电流沿线圈逆时针方向。采用三维实体四面体单元自上而下的方法,对模型进行自适应网格划分,其中对自适应网格划分不能够达到分析要求的部位,进行局部网格细化,增加节点数,以达到理想的计算结果。

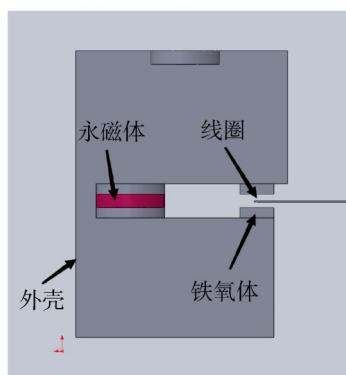
仿真模型中各部件的材料如下:选用性能好、磁力强的钕铁硼作为永磁体的材料,导磁体为铁氧体,外壳为铝合金,通电导线为铜,相关尺寸如表1所示。



(a) Magnet



(b) Rectangular coil



(c) Relative position of magnet and coil

Fig. 2 Electromagnetic force generating device

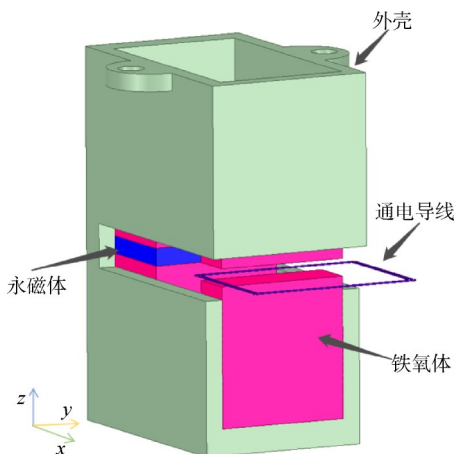


Fig. 3 Model of electromagnetic force generation device

### 3.1 特征区域磁场仿真分析

基于上述仿真模型,结合励磁参数,通过仿真计算得到  $z=0$  平面磁场强度分布,如图 4 所示。从仿真

Table 1 Key dimension parameters of components

钕铁硼永磁体	通电线圈	铁氧体导磁体
型号:NdFe35	单根线直径:	相对磁导率:
剩磁( $B_r$ ):1170 mT	0.2 mm	3000
矫顽力( $H_{cb}$ ):868 kA/m	匝数:1	剩磁( $B_r$ ):8 mT
最大磁能积( $BH_{max}$ ):	线圈尺寸:	矫顽力( $H_{cb}$ ):
263 kJ/m	40 mm×50 mm	7 A/m

结果可以看出,接近磁极端面的区域内,磁场分布均匀且磁场强度最大,如图中红色部分所示;对于大于磁极端面区域,磁场强度沿四周逐渐减小,这主要是磁极结构边缘效应导致。此外,磁场强度分布关于  $x$  和  $y$  轴具有较好对称性。

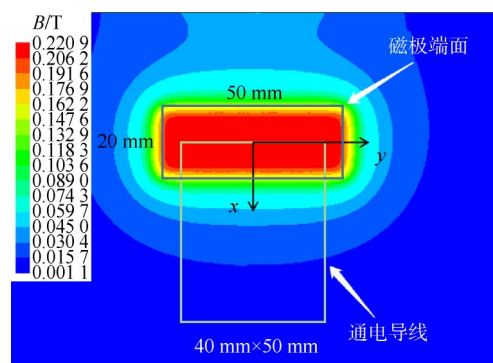


Fig. 4 Distribution of magnetic field

对磁场强度分布进行定量计算分析,结果如图 5 所示。定义磁场强度最大差值与平均值的比值为差异率  $(B_{max}-B_{min})/B_{av}$ 。分别对沿  $x, y, z$  三个坐标轴的磁场强度分布进行计算,通过差异率定量评估各方向上磁场强度分布均匀性。仿真结果显示: $y$  轴  $(-25.0 \text{ mm}, 25.0 \text{ mm})$  范围内,磁场强度最大值 278.1 mT,最小值为 276.2 mT,差异率约为 0.7%;而在  $x$  轴  $(-10.0 \text{ mm}, 10.0 \text{ mm})$  范围内,磁场强度最大值 291.0 mT,最小值 290.1 mT,差异率为 0.3%,超出该区域,磁场强度迅速下降,在  $x=40 \text{ mm}$  处磁场强度仅是  $x=0 \text{ mm}$  处磁场强度的 1.2%。此外,在  $z$  轴  $(-1.0 \text{ mm}, 1.0 \text{ mm})$  范围内,磁场强度最大值 285.6 mT,最小值 285.1 mT,差异率约为 0.2%。根据仿真结果可知,电磁标定力装置在磁极间隙区域内,形成了一个较均匀的磁场。

PCB 板与磁体相对位置选定。根据仿真结果,PCB 板线圈尺寸设计为  $40 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。调节线圈与磁体相对位置,使 PCB 板置于  $z=0$  平面,并使得线段 1 与  $y$  轴重合,线段 3 和线段 4 关于  $x$  轴对称。此时线段 3 产生电磁力  $F_3$  和线段 4 产生电磁力  $F_4$  可以相互抵消。由于线段 4 所处的磁场强度远小于线段 1 所处

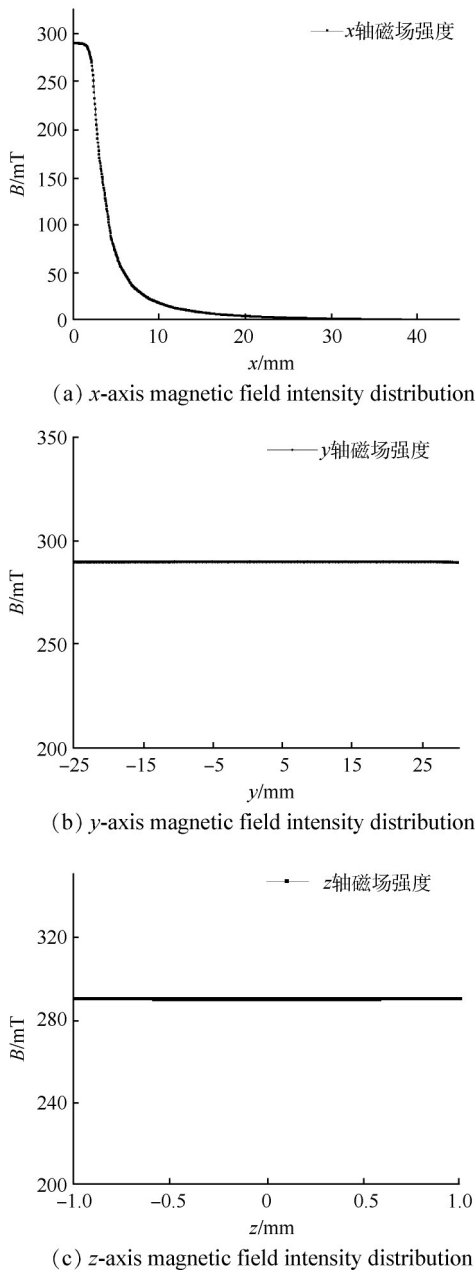


Fig. 5 Distribution of magnetic field intensity

的磁场强度(约为1.2%),可以近似忽略。因此,线圈总体受到 $x$ 方向的力,且近似为线段1产生的电磁力。进一步分析可知,当线圈与磁体相对位置在 $y$ 方向偏差 $(-5.0\text{ mm}, 5.0\text{ mm})$ 内,磁场强度最大改变量约为0.7%; $x$ 方向偏差 $\Delta x(-10.0\text{ mm}, 10\text{ mm})$ 内,磁场强度最大改变量约为0.3%;在 $z$ 方向偏差 $\Delta z(-1\text{ mm}, 1\text{ mm})$ 内,磁场强度最大该变量优于0.2%。因此,矩形线圈与磁体尺寸匹配设计,并控制两者相对位置在偏差范围内。

### 3.2 电磁力仿真

通过有限元数值计算获得线圈电磁力,结果如表2所示。采用ANSYS软件可以直接对线圈所受电

磁力进行仿真计算。设定线圈电流变化范围:10  $\mu\text{A}$ ~20 mA,分别计算了PCB板在 $x, y, z$ 三个方向的分力和合力。从表2中可知,线圈电磁力主要沿 $x$ 轴方向, $y$ 轴和 $z$ 轴方向的分力几乎可以忽略,这也与磁场仿真结果相一致。以电流20 mA计算结果为例分析,此时,线圈在 $x$ 轴的受力为237.19  $\mu\text{N}$ ,在 $y$ 轴的受力为1.707 6  $\mu\text{N}$ ,在 $z$ 轴的受力为0.077 118  $\mu\text{N}$ ,合力为237.2  $\mu\text{N}$ 。比例计算显示, $F_y$ 和 $F_z$ 分别为 $F_x$ 的0.72%和0.03%,合力大小近似等于 $F(x)$ ,即线圈电磁力主要沿 $x$ 轴方向, $y$ 轴和 $z$ 轴分力可以忽略不计。

Table 2 Simulation calculation results of coil electromagnetic force

$I/\text{mA}$	$F(x)/\mu\text{N}$	$F(y)/\mu\text{N}$	$F(z)/\mu\text{N}$	$\text{Mag}(F)/\mu\text{N}$
0.01	-0.098 6	0.000 9	$-3.373 2 \times 10^{-5}$	0.098 6
0.5	-5.929 7	0.042 6	$-1.693 0 \times 10^{-3}$	5.929 9
1	-11.859 0	0.085 1	-0.003 4	11.860 0
10	-118.590 0	0.852 4	-0.036 1	118.600 0
20	-237.190 0	1.707 6	-0.077 1	237.200 0

电磁力随电流变化结果如图6所示。从图中可见,当电流在10  $\mu\text{A}$ ~20 mA变化时,电磁力从0.098 6  $\mu\text{N}$ 增大到237.2  $\mu\text{N}$ 。对仿真结果进行多项式拟合,得到电磁力与电流的拟合关系式 $y=12.05x+a$ ,拟合曲线 $R(\text{COD})$ 为1,即电磁力与电流具有很好的线性度。

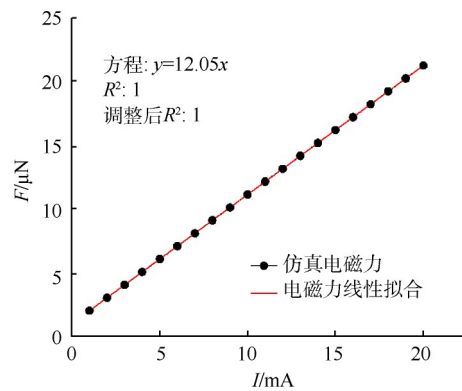


Fig. 6 Linear fitting of simulated electromagnetic force

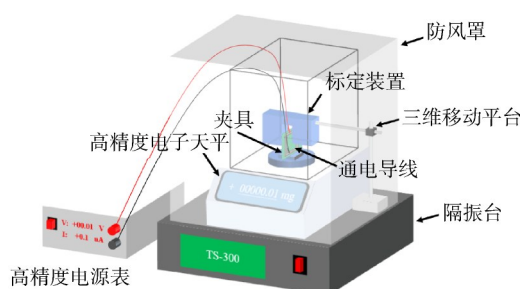
## 4 电磁力实验研究

### 4.1 实验装置

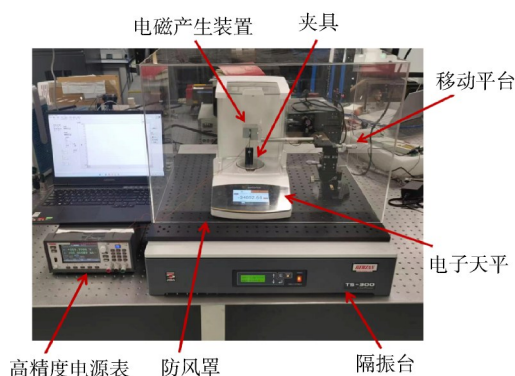
电磁力标定实验连接关系示意图如图7所示。实验仪器主要包括:高精度电子天平、电流源表、隔振台组成。选取赛多利斯电子天平作为标定力的工具,天平量程为1 mg~30 g,实际分度值( $d$ )达到0.01 mg;



源表采用吉时利 2869Keithley 2280S-32-6 高精度测量直流电源,量程为 100 nA 到 6 A,输出电流的分辨率达到六分半;选用 Herzan TS Series 主动隔振台 TS-300 进行隔振。为了进一步减少环境振动等外部因素,本实验在太极实验室地下负二楼开展,且时间选在安静的深夜(23:00~24:00)。标定过程中,采用专门设计的工装夹住 PCB 板并置于天平底盘上,并且垂直朝上,利用三维移动装置悬空固定永磁体并使磁极 NS 为水平方向。此时,可以避免永磁体与天平底盘的直接接触,从而减少磁场对天平带来的影响。通过调节高精度三维移动装置控制 PCB 板与磁体的相对位置,其中调节精度为 0.1 mm;同时应用防风罩可以有效减少空气流动对实验数据所带来的影响。使用 Labview 控制电源,减少手动调节电源产生的振动影响。本实验中电流的最大值为 20 mA,通电导线电阻大小约为 4  $\Omega$ ,通电导线功率约为 0.001 6 W,同时在标定过程中,进行了 1 h 稳定性对比试验,标定参数无变化,因此,忽略导线热效应引起误差。



(a) Schematic diagram of experimental device



(b) Photo of experimental device

Fig. 7 Electromagnetic force calibration system

## 4.2 设置实验基准

PCB 板与磁体相对位置控制。首先将 PCB 板初步置于磁体间隙中,通过激光水平仪确保两者相互垂直;其次对水平相对位置进行调节,先利用三维移

动装置使 PCB 板紧贴左侧磁极,记录此时刻度尺的示数  $a_1$ ,再拧动螺旋刻度尺,使 PCB 板紧贴右侧磁极,记录此时刻度尺的示数  $a_2$ ,将 PCB 板移动到  $0.5 \times (a_1 + a_2)$  刻度值处,此时水平方向上,PCB 线圈恰好位于两磁极的正中央,螺旋刻度调节如图 8 所示。最后对垂直方向进行调节,通过升降装置调节磁体高度,使得矩形线圈 1 段位于磁极中间位置,当 PCB 板与磁体两者处于理想相对位置时,可以开始标定测试。

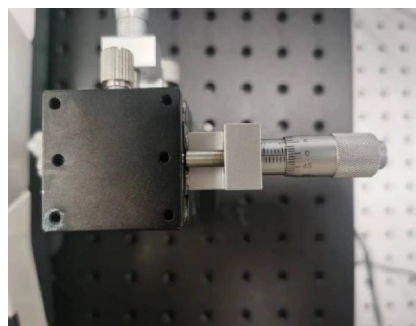


Fig. 8 Horizontal position adjustment of spiral scale

## 4.3 范围标定

保持 PCB 板与磁体相对位置固定,对天平进行调零操作,天平示数稳定后记录示数初始值  $m_0$ ,打开源表输出高精度直流电流,该源表电流调节精度 0.1 nA,且具备自动数据采集功能,记录不同电流值下的天平示数  $m_i$ 。此时,电磁力大小体现为装置对天平施加力的变化值。

$$F_i = (m_i - m_0)g \quad (3)$$

式中  $g$  取太极实验室(杭州)本地的重力加速度 9.7936  $\text{m/s}^2$ 。

测试结果如图 9 所示。源表输出电流值为 10.0  $\mu\text{A}$ ~20.2 mA 时,天平标定电磁力大小为 0.097 9~237.319 9  $\mu\text{N}$ 。为减少操作误差,测试过程中每组数据重复测量 5 次,以平均值为测试结果,最大差值为误差棒。基于测试数据对电磁力与电流值线性度分析,拟合曲线斜率 11.886,拟合的决定系数为 0.999 998 247。通过标定测试,得到该装置标定范围:0.1~245.0  $\mu\text{N}$ ,且与控制电流呈线性关系。

## 4.4 推力分辨率标定

电子天平的分度值为 0.01 mg,当电流值变化值为 10.0  $\mu\text{A}$  时,可以得到电子天平最小示数变化,即  $\Delta m$  为 0.01 mg,取  $g$  为 9.793 6  $\text{m/s}^2$ ,由重力计算公式

$$F = \Delta mg \quad (4)$$

计算得到电磁力的大小为 0.097 936  $\mu\text{N}$ ,实测标

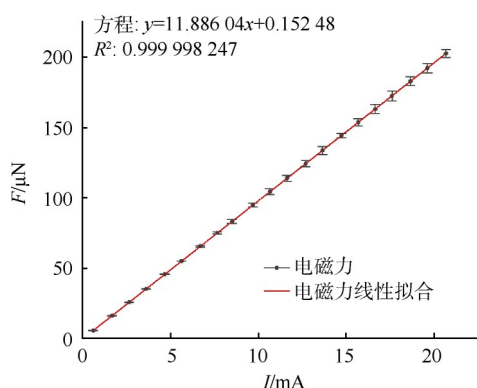


Fig. 9 Calibration experiment electromagnetic force fitting curve

定力的精度优于  $0.1 \mu\text{N}$ 。即源表电流变化值  $10.0 \mu\text{A}$  条件下,可以实现  $0.1 \mu\text{N}$  分辨率标定力。由于源表控制精度高达  $0.1 \mu\text{A}$ ,受限于天平的分度值,理论上该装置具有更高的分辨率。

#### 4.5 相对位置改变对电磁力的影响

在4.2节确定实验基准位置的基础上,改变通电导线与永磁体之间轴向与径向的相对位置。通电导线初始位置保持在  $(0, 0, 0)$ , 分别移动  $x, y, z$  轴坐标, 以  $0.5 \text{ mm}$  为步长移动  $x$  轴, 前后移动从  $(-2.5 \text{ mm}, 0, 0)$  到  $(2.5 \text{ mm}, 0, 0)$ , 共 10 组数据, 电流值设置为  $10 \text{ mA}$ 。移动  $y$  轴坐标, 从  $(0, -4 \text{ mm}, 0)$  移动到  $(0, 4 \text{ mm}, 0)$ , 共 7 组数据, 电流值设置为  $10 \text{ mA}$ 。移动  $z$  轴坐标, 以  $0.5 \text{ mm}$  为步长, 从  $(0, 0, -1 \text{ mm})$  移动到  $(0, 0, 1 \text{ mm})$ , 共 5 组数据。相对位置改变对电磁力大小的影响如图 10 所示。

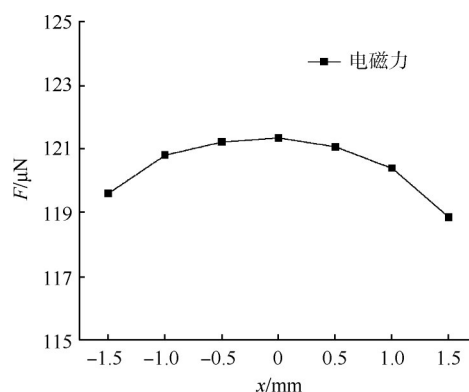
在电流值等于  $10 \text{ mA}$  时, 越靠近磁极中心区域电磁力越大。在磁极中心区域, 坐标轻微改变对电磁力的影响可控。电磁力随相对位置的变化规律与磁场仿真结果一致, 磁场分布均匀。

#### 4.6 不确定度分析

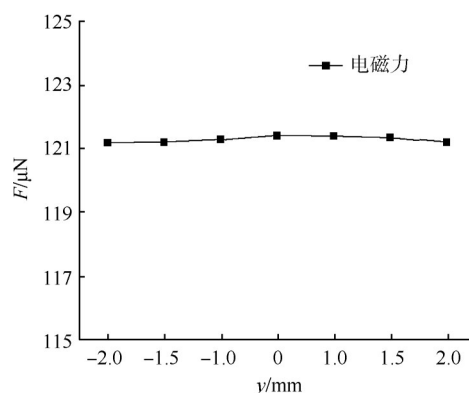
实验测试结果与仿真值的数据对比分析如表 3 所示,  $F_e$  为实验得到的电磁力,  $F_s$  为仿真得到的电磁力, 在电流值为  $0.01 \sim 20.2 \text{ mA}$  时, 相差  $0.32\% \sim 1.73\%$ 。

标定结果与仿真结果曲线关系如图 11 所示。仿真得到的斜率为  $12.05$ , 实验测试的斜率为  $11.886$ , 相差  $1.36\%$ 。

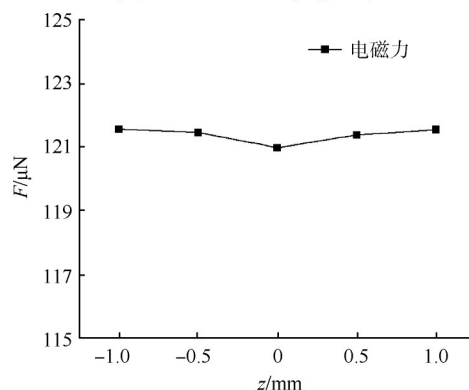
标定误差主要来源于环境的影响、实验仪器的分辨率大小以及多次测量带来的 A 类不确定度。环境误差方面主要包括: 气体扰动和地面振动两个部分。标定实验中, 通过增加了隔振台、天平增加防风罩, 并选取合适的时间和地点, 这些措施避免了环境



(a) Effects of changing the  $x$ -axis



(b) Effects of changing the  $y$ -axis



(c) Effects of changing the  $z$ -axis

Fig. 10 Effects of relative position changes between permanent magnets and energized wires on electromagnetic force

带来的测量误差。因此, 本文主要分析仪器误差, 即 B 类不确定度。标准不确定度的计算公式如下

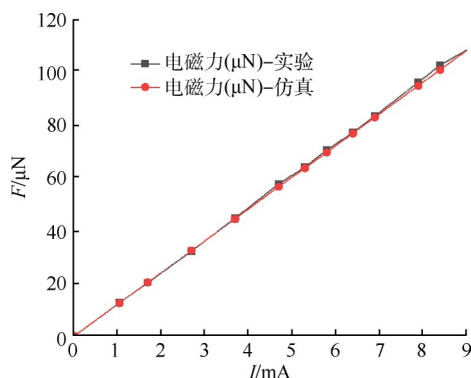
$$U_B = \frac{\Delta A}{C} \quad (5)$$

$\Delta A$  为仪器允许的最大误差 (误差限),  $C$  为包含因子, 取决于仪器误差的分布规律, 仪器说明书无特殊说明, 取矩形分布,  $C = \sqrt{3}$ 。

由间接测量数学模型  $F = BIL = mg$  可知 (其中  $F$  为电磁力,  $B$  为磁场强度,  $I$  为电流大小,  $L$  为导线垂直于磁感线的长度,  $m$  为天平示数的变化), 系统不确定度

**Table 3 Error analysis of experimental value and simulation value**

$I/\text{mA}$	$F_e/\mu\text{N}$	$F_s/\mu\text{N}$	Difference value/%
0.01	0.097 9	0.098 6	0.72
1.05	12.731 7	12.652 5	0.63
1.7	20.372 3	20.485 0	0.55
2.7	32.359 3	32.535 0	0.54
3.7	44.854 7	44.585 0	0.60
4.7	57.880 2	56.835 0	1.81
5.3	64.246 0	63.865 0	0.60
5.8	70.807 7	69.890 0	1.31
6.4	77.369 4	77.120 0	0.32
6.9	83.637 3	83.145 0	0.59
7.9	96.466 9	95.195 0	1.34
8.4	102.930 7	101.220 0	1.69
9.8	116.361 6	118.090 0	1.46
10.7	127.651 3	128.935 0	1.00
13.0	154.589 9	156.650 0	1.32
14.8	173.604 9	175.340 0	1.01
16.5	194.717 8	196.825 0	1.08
18.4	220.186 4	221.720 0	0.69
20.2	237.319 9	240.410 0	1.31

**Fig. 11 Comparative analysis of experimental and simulation results**

来源于天平称量、电源误差、三维移动平台位移误差,标准不确定的计算公式如下所示

$$U_m = \frac{\Delta m}{C}, U_i = \frac{\Delta i}{C}, U_x = \frac{\Delta x}{C} \quad (6)$$

式中  $\Delta m$ ,  $\Delta i$ ,  $\Delta x$  分别为天平、源表、三维移动平台的误差限。这三个量互不相关,根据误差传递函数,将高精度天平、源表、三维移动平台装置产生的误差进行相加,得到标定力测量过程中仪器产生的标准不确定误差公式如下

$$U_B = \sqrt{\left(\frac{dF}{dm}\right)^2 \cdot \left(\frac{U_m}{\Delta m}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial i}\right)^2 \cdot \left(\frac{U_i}{\Delta i}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 \cdot \left(\frac{U_x}{\Delta x}\right)^2} \quad (7)$$

其中多次测量产生的A类不确定度公式如式(8)~(9)所示

$$U_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (8)$$

总不确定度满足

$$U_{\text{总}} = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (9)$$

根据扩展不确定的公式  $U = k \cdot U_{\text{总}}$ ,  $k$  取 2, 高精度电子天平的不确定度小于被标对象的 1/4, 在实际计算中忽略天平的不确定度影响。

2280S-32-6型电源,分辨率为  $0.1 \mu\text{A}$ , 三维移动平台的分辨率为  $0.01 \text{ mm}$ 。计算得扩展不确定误差为 1.633%。

## 5 结论

本文采用理论分析、有限元仿真、实验测量相结合方法对电磁标定力进行研究,得到如下结论:

(1) 采用永磁体和铁氧体构建 C 型磁路结构可获得高均匀分布磁场。对电磁标定力装置仿真结果显示:磁极间隙中间平面 ( $z=0$ ),  $x$  轴 ( $-10 \text{ mm}, 10 \text{ mm}$ )、 $y$  轴 ( $-25 \text{ mm}, 25 \text{ mm}$ ) 特征区域内,磁场分布最大差异率仅为 0.7%,  $x$  方向超出该区域,磁场强度迅速下降,在  $x=40 \text{ mm}$  处磁场强度仅是  $x=0 \text{ mm}$  处磁场强度的 1.2%。

(2) 控制线圈与磁体相对位置产生标定力,即将矩形线圈 1 段与  $x$  轴重合,3 段和 4 段结构关于  $y$  轴对称,此时,线圈主要受到  $x$  方向的电磁力,其余方向分力几乎可忽略。仿真结果显示,电流在  $10 \mu\text{A} \sim 20 \text{ mA}$  变化时,电磁力从  $0.098 6 \mu\text{N}$  增大到  $237.2 \mu\text{N}$ ,拟合曲线  $R^2$  为 1,具有较好的线性关系。

(3) 标定实验结果显示,电磁标定力装置实测最小分辨率达到  $0.1 \mu\text{N}$ ,受限于天平的分度值,理论上该装置分辨率可进一步拓展;电流输出范围  $0.01 \sim 20.2 \text{ mA}$  下,电磁力标定范围为  $0.097 \sim 237.32 \mu\text{N}$ ,实验测量数据与仿真结果相接近,最大相差 1.73%。

(4) 电磁标定力装置标定误差主要来自实验仪器误差,根据 B 类不确定度计算公式,得到标定力测量过程中仪器产生的扩展不确定误差为 1.633%。

**致谢:**感谢国家重点研发计划、国科大杭州高等研究院自主项目、重庆市教委科学技术研项目和湖南省自然科学基金的资助。

## 参考文献

- [1] 罗子人,张敏,靳刚,等.中国空间引力波探测

- “太极计划”及“太极1号”在轨测试[J]. 深空探测学报, 2020, 7(1): 3-10.
- [2] 张如飞, 周 军, 于晓洲. 基于Maksimov算法的航天器姿控推力器故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4): 409-413.
- [3] 刘向阳, 范宁军, 李科杰. 微型推进器推力测试的现状与发展趋势[J]. 测控技术, 2004, 23(5): 18-20.
- [4] 洪延姬, 周伟静, 王广宇. 微推力测量方法及其关键问题分析[J]. 航空学报, 2013, 34(10): 2287-2299.
- [5] 常 浩, 叶继飞, 陈 粤, 等. 用于微推力测量的电磁恒力特性研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(S1): 147-152.
- [6] 莫 雄. 微牛级推力测量技术研究[D]. 四川: 电子科技大学, 2019.
- [7] 王大鹏, 金 星, 周伟静, 等. 间接法测量微推力现状及关键问题分析[J]. 宇航计测技术, 2018, 38(4): 36-42.
- [8] 杨 超, 贺建武, 康 琦, 等. 亚微牛级推力测量系统设计及实验研究[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 526-534.
- [9] 刘书杰, 方蜀州, 刘旭辉. 一种微推力器阵列测试台系统辨识与动态补偿[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(6): 794-797.
- [10] 王威屹. 毫牛级离子推力器推力测量技术研究[D]. 四川: 电子科技大学, 2021.
- [11] 马隆飞, 贺建武, 薛森文, 等. 双丝扭秤微推力测量系统[J]. 推进技术, 2018, 39(4): 948-954. (MA L F, HE J W, XUE S W, et al. Micro-thrust measuring system of twin-wire torsion balance [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(4): 948-954.)
- [12] 王春平. 毫牛级微推力测试装置研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [13] NATHANIEL P S, ANDREW D K. Comparison of force balance calibration techniques for the nano-Newton range [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 73(12): 5249-5254.
- [14] 何洪斌. 扭秤微推力测量装置的研制[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [15] 杨元侠. 微牛顿量级推进器的推力性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [16] 王春平. 毫牛级微推力测试装置研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [17] 申 波. 微推力测量实验装置的设计与研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [18] 曾庆德. 冷气微推力器测试系统设计及实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [19] TREZZOLANI F, ROMERO I P, BOSI F, et al. Design of a thrust balance for RF plasma thruster characterization [C]. Atlanta: 35th International Electric Propulsion Conference, 2017.
- [20] LAM J K, KOAY S C, LIM C H, et al. A voice coil based electromagnetic system for calibration of a Sub-micro Newton torsional thrust stand [J]. Measurement, 2019, 131: 597-604.
- [21] 王大鹏, 金 星, 周伟静, 等. 高精度电磁标定力的产生及其特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1933-1942.
- [22] 冯孝辉, 洪延姬, 崔海超, 等. 高精度电磁标定力数值模拟及实验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 210806. (FENG X H, HONG Y J, CUI H C, et al. Numerical simulation and experimental methods for high precision electromagnetic calibration force [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(8): 210806.)

(编辑:梅 瑛)



# Simulation and testing research on micro Newton level electromagnetic force calibration device

CHENG Ye<sup>1,2,3</sup>, LONG Jianfei<sup>1,2,3</sup>, LUO Wei<sup>1,2,3</sup>, WANG Jiabin<sup>1,2,3</sup>, HUANG Dan<sup>1,2,3</sup>,  
XU Luxiang<sup>1,2,3</sup>, GUO Ning<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>4</sup>

(1. School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China;

2. Gravitational Wave Universe Taiji Laboratory, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China;

3. Key Laboratory of Gravitational Wave Precision Measurement of Zhejiang Province, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China;

4. School of Electrical Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** How to obtain high-precision calibration force is an important foundation for micro Newton level thrust measurement. In this paper, a C-type magnetic circuit structure and a rectangular coil combination method are constructed to generate high-precision and wide-range electromagnetic calibration force. The magnetic field distribution in the characteristic region of the device was analyzed using the finite element method, and the influence of the relative position of the rectangular coil and the magnet was discussed. Finally, a calibration experimental platform was established and calibration experiments were conducted. The main conclusions are as follows: within the characteristic region, the magnetic field distribution uniformity is good, and the maximum difference rate is only 0.7%; When the current is adjusted in the range of 10  $\mu\text{A}$  to 202 mA, the calibration range of electromagnetic force is 0.097 to 237.32  $\mu\text{N}$ , and the maximum error between experimental measurement data and simulation results is 1.73%; When the coil current resolution is 10  $\mu\text{A}$ , the measured resolution of the calibration force is better than 0.1  $\mu\text{N}$ .

**Key words:** Micro-thrust measurement; Micro Newton level; Electromagnetic force calibration; System parameter calibration; Numerical simulation

**Received:** 2023-03-24; **Revised:** 2023-06-15.

**DOI:** 10.13675/j.cnki.tjjs.2303058

**Foundation items:** National Key R&D Program (2021YFC2202700); Independent Project of Hangzhou Institute of Advanced Research, National University of Science and Technology (2022ZZ01009); Science and Technology Research Project of Chongqing Municipal Education Commission (KJZD-K202101506); Hunan Provincial Natural Science Foundation (2021JJ30564).

**Corresponding author:** LONG Jianfei, E-mail: ljf510@163.com