

高精度电磁标定力的产生及其特性分析*

王大鹏, 金星, 周伟静, 李南雷

(装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室 北京 101416)

摘要:高精度标定力的产生是微推力高精度测量的关键之一。电磁力具有非接触、结构简单、容易控制等优势,成为微推力测量系统有效的标定力产生方法。针对微推力测量对于电磁标定力的性能要求,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:相对倾角、径向偏差不为0时,电磁力均会变大,且关于磁铁中心轴线具有对称性,沿轴向距离,电磁力先增大后减小。基于天平称重法,设计了可三维调节的电磁力测量装置,提出了轴向距离、径向偏差、相对倾角的归零调节方法;获得了电磁力较为完备的力学特性,通过分段拟合方法,解决了在较小标定力时相对误差较大的问题,确定了电磁力及电流的控制关系及相对位置变化范围;提出了不敏感角、不敏感径向偏差、不敏感轴向距离区间等新概念,为电磁力产生装置的性能表征提供了具体参数。

关键词:电磁力;微推力测量;标定;误差

中图分类号: TH73 V439.7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Generation and characteristic analysis of high accuracy electromagnetic calibration force

Wang Dapeng, Jin Xing, Zhou Weijing, Li Nanlei

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: The generation of high accuracy calibration force is one of the key factors for high precision measurement of micro thrust. With the advantages of non-contact, structure simplicity, control easiness and etc., electromagnetic force has become an effective method to generate calibration force in micro thrust measurement system. Aimed at the performance requirements of electromagnetic calibration force in micro thrust measurement, the effect of relative position changes between the magnet and the coil on the magnitude of the electromagnetic force is focused. The output characteristics of the electromagnetic force with vertical distance, radial deviation, relative angle changes are obtained by simulation; the electromagnetic force is symmetric along the central axis of the magnet and will become larger when the relative angle and the radial deviation are not zero; the electromagnetic force increases first and then decreases when axial distance increases. Based on the balance weighing method, a 3-D adjustable electromagnetic force measurement device is designed and a zero adjustment method of axial distance, radial deviation and relative angle is proposed. Relatively complete mechanical properties are obtained by the piecewise fitting method, the problem of large relative error in small calibration force output is solved. The control relationship between the electromagnetic force and the current is obtained, and the relative position variation range is specified. The new concepts such as insensitive angle, insensitive radial deviation, insensitive axial distance section and etc. are put forward, which provide specific parameters for performance characterization of the electromagnetic force generating device.

Keywords: electromagnetic force; micro thrust measurement; calibration; error

0 引言

微小卫星是未来卫星技术发展的趋势之一^[1],已成为目前的一大研究热点^[2]。满足微小卫星指向与定位精度的推力通常在 100 μN 量级,甚至达到 μN 量级^[3-5]。国内外已研制出了多种新概念微推力器,可产生 1 μN ~ 100 mN 量级推力。精确测量推力、了解推力性能是微推力器进入工程应用的前提保证,直接影响航天器空间任务的有效完成^[6]。

为解决推力测量难题,从 20 世纪 60 年代开始,国内外学者先后研制出天平结构、扭摆结构、单摆结构以及悬臂梁结构等类型测量系统,其原理都是基于力的动力学效果,将推力转换成测量台架的振动幅值或转动位移^[7]。为确定测量系统参数,通常方法是对测量系统施加恒定作用力(称为标定力),根据系统响应来确定系统参数。标定力误差越小,系统参数的标定精度越高,有了高精度的系统参数,就可以高精度描述测量系统的振动规律,提高测量精度。因此,获得高精度标定力是推力测量系统的关键技术之一^[8]。

目前产生标定力的方法有重力法^[9]、电磁力法^[10-12]及静电力法^[13]。重力法原理简单:基于滑轮组件,通过砝码(已知质量的质量块)瞬间施加作用力来获得标定力。但绳线牵引方向准确对准所需标定力方向较难,滑轮组与绳线摩擦力等对标定力大小有影响,造成标定结果可信度低。同时在真空实验时操作不便,难以控制产生大小可变标定力。静电力法由于对极板间距敏感、工作电压高等特点,存在使用上不方便的问题^[14]。电磁力法基于通电导线在磁场中受到安培力这一原理,通常由线圈与永磁铁组成,具有结构简单,力的大小线性可调等优点,是较常用的一种标定力形式。

然而,在标定过程中,磁铁与线圈之间相对位置(以下简称相对位置)会发生变化,线圈所处的磁场为瞬态变化磁场,当电流大小恒定时,电磁力输出并不是恒定值,因而电磁力与电流之间并不是严格的线性关系。而目前在设计产生电磁标定力时,并未考虑相对位置变化对电磁力大小的影响,而是直接在相对位置不变,且具体位置关系未量化的情况下建立电磁力与电流的控制关系。依照这种控制关系设定的电磁力输出值与实际输出值会存在未知大小的误差,影响电磁力的输出精度,直接影响微推力测量精度。

本文在介绍电磁标定力产生原理并分析相对位置变化影响电磁力机理的基础上,借助仿真软件、实验测量两种方式,研究得到了相对位置变化情况下电磁力的输出特性,并依据特性提出了实验中相对位置归零方法,通过拟合得到电磁力与电流的控制关系,最终确定了一种高精度电磁力产生方法。

1 电磁标定力性能要求

以微推力扭摆测量系统为例,扭摆的执行机构为水平旋转的横梁,电磁力标定装置应用时,磁铁安装在横梁上,线圈安装在固定装置上,如图 1 所示。线圈通电后与磁铁产生电磁斥力,横梁在电磁力作用下绕 O 点转动,位移传感器记录系统响应(横梁线位移),根据电磁力和横梁位移,可以确定系统参数,完成标定。



图 1 采用电磁力标定装置的扭摆横梁俯视图
Fig. 1 Top view of torsional pendulum calibrated by electromagnetic force

由图 1 可见,标定过程中,由于横梁的转动,磁铁与线圈之间相对位置(以下简称相对位置)会发生变化,线圈所处的磁场为瞬态变化磁场,当电流大小恒定时,电磁力输出并不是恒定值。而在微推力测量中,电磁标定力主要用于提供恒定作用力来标定系统参数,这就要求标定力在控制参数不变的情况下,必须具有一定的输出精度,且与控制参数为线性关系。同时,由于不同类型的微推力器产生的推力大小不同,要求标定力也要具有较宽的输出量程。

具体而言,由于高精度的标定力是微推力测量的前提,通常要求标定力输出误差在 1% 以内。同时由于微推力器型号不同,推力大小也有一定差异,通常要求标定力至少跨越 100 μN ~ 10 mN 3 个量级。

2 电磁标定力的产生

2.1 电磁力产生原理

电磁力产生原理为通电导线在磁场中受到安培力,力的大小与电流大小成正比。半径为 R 的导线环水平置于圆形磁铁 N 极正上方,通过大小为 I 顺时针电流,如图 2 所示。

导线环上选取垂直纸面向里的电流元 Idl , Idl 在受到安培力方向在纸面内垂直磁场 B , 大小为 $dF = Idl \times B$ 。由于磁场轴对称性, dF 关于 Z 轴对称,其水平分量 dF_h 矢量和为 0, 竖直分量 dF_z 大小相等,方向都沿 Z 轴正方向,则导线环受到安培力 F_c 为:

$$F_c = F_z = \int dF_z = \int dF \sin\alpha = 2\pi IB R \sin\alpha \quad (1)$$

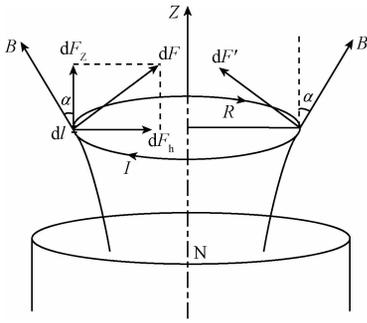


图 2 导线环在磁场中受力图

Fig. 2 Stress diagram of a conductor ring in magnetic field

对 n 匝线圈,各匝线圈受到的安培力 F_{ci} 方向均沿 Z 轴正方向,线圈受到安培力 F 可表示为:

$$F = \sum_{i=1}^n F_{ci} = 2\pi I \sum_{i=1}^n R_i B_i \sin\alpha_i \quad (2)$$

式中: R_i, B_i, α_i 分别为第 i 匝线圈对应半径、磁感应强度、磁感应强度矢量与 Z 轴正方向夹角。

2.2 电磁标定力的影响因素

相对位置不变时,线圈处于恒定磁场中,式(2)中, R_i, α_i 是已知确定的, B_i 也是不变的, F 与 I 成一元线性关系:

$$F = 2\pi I \sum_{i=1}^n R_i B_i \sin\alpha_i = kI \quad (3)$$

式中: B_i 值确定但大小未知,故 k 未知。设电流为 I , 所产生电磁力为 F , 可建立电磁力与电流的控制关系:

$$F = f(I) = a_0 + a_1 I + \Delta f \quad (4)$$

式中: Δf 表示随机误差,为讨论方便,常采用零均值正态分布函数表示为 $\Delta f \sim N(0, \sigma^2)$, a_0 表示系统误差,无系统误差时为 $a_0 = 0$ 。

选取如图 3 所示的轴向距离 d_v 、径向偏差 d_h 、相对倾角 θ 三个物理量来定量表示相对位置关系。相对位置一定时, d_v, d_h, θ 为恒定值,线圈处于恒定磁场中, F 与 I 成一元线性关系,且在 d_v, θ 均为零值时如式(3)所示。也就是说,线圈与磁铁相对位置关系不变时,线圈电流大小与标定力大小为线性关系。

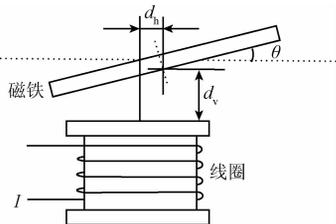


图 3 表征相对位置的物理量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of physical quantity of relative position

但在标定时, d_v, d_h, θ 为时变量,此时线圈处于瞬态变化磁场中。 I 一定时, F 随相对位置变化而变化,并不是恒定值,所以不能简单地用某一个固定位置处的线性关系 $f(I)$ 来描述整个位置变化范围内 F 与 I 的控制关系。但考虑到标定中,相对位置变化量通常较小(d_v 变化通常在 μm 量级),且常具有周期性,所以理论上 F 输出可视为围绕某一恒定值上下小幅浮动的变化值。因此,在一定精度要求下,可在一定的相对位置范围内,采用一元线性回归拟合方法,用一个 $f(I)$ 来描述 F 与 I 的控制关系:

$$f(I) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 I + \Delta f, \Delta f \sim N(0, \hat{\sigma}^2) \quad (5)$$

$$\begin{cases} L'_v \leq d_v \leq L''_v \\ L'_h \leq d_h \leq L''_h \\ \varphi' \leq \theta \leq \varphi'' \end{cases}$$

式中: $L'_v \leq d_v \leq L''_v, L'_h \leq d_h \leq L''_h, \varphi' \leq \theta \leq \varphi''$ 为满足一定 F 输出误差所对应的 d_v, d_h, θ 变化范围,具体大小通过实验测量得到。“ $\hat{\cdot}$ ”表示估计值,标定力输出相对误差为:

$$\frac{\hat{\sigma}}{f(I)} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{a}_0 + \hat{a}_1 I} \quad (6)$$

由于实验中调节 d_v, d_h, θ 、输出 I 及测量 F 都对精度要求较高,通常情况下较小的误差都可能对测量结果造成较大影响^[15]。因而需要在实验前对 F 输出特性有一定了解,从而为标定实验提供一定的理论指导,避免可能出现的系统误差。

3 电磁标定力力学特性仿真分析

有限元分析软件是计算电磁力的常用方法^[16-19]。在 Ansoft Maxwell 有限元软件中建立图 1 中线圈磁铁模型: 1)线圈外径 $\Phi 11 \text{ mm}$,内径 $\Phi 10 \text{ mm}$,高 25 mm ,材料为铜;2)永磁铁尺寸 $\Phi 50 \times 3 \text{ mm}$,材料为钕铁硼(NdFe36),沿 Z 轴负方向磁化;3)线圈加载绕 Z 轴逆时针,大小为 150 A 的激励电流;4)自适应计算参数设置为最大收敛步数 10,收敛百分比误差 1%,每次迭代加密剖分单元比例 30%,其他依照软件默认值;5)求解域为 x 轴 $[-35, 35]$ 、 y 轴 $[-35, 35]$ 、 z 轴 $[-10, 40]$ 。

首先计算 B 分布规律,得到沿着磁铁半径由边缘向圆心方向, B 值逐步减小,沿 Z 轴正方向, B 值同样逐步减小。设置 $d_v = 3 \text{ mm}, \theta = 0^\circ, d_h = 0 \text{ mm}$,计算结果如图 4 所示,说明线圈各处受力沿 Z 轴对称分布,指向线圈外侧斜向下,且越靠近磁铁,电磁力数值越大, X, Y, Z 轴分力 F_x, F_y, F_z 分别为 $-0.050 175, -0.057 816, -85.726 238 \text{ mN}$,计算精度为 0.1 mN ,有 $F_x = F_y = 0 \text{ mN}, F_z = -85.726 238 \text{ mN}$,线圈与磁铁表现为吸引力。

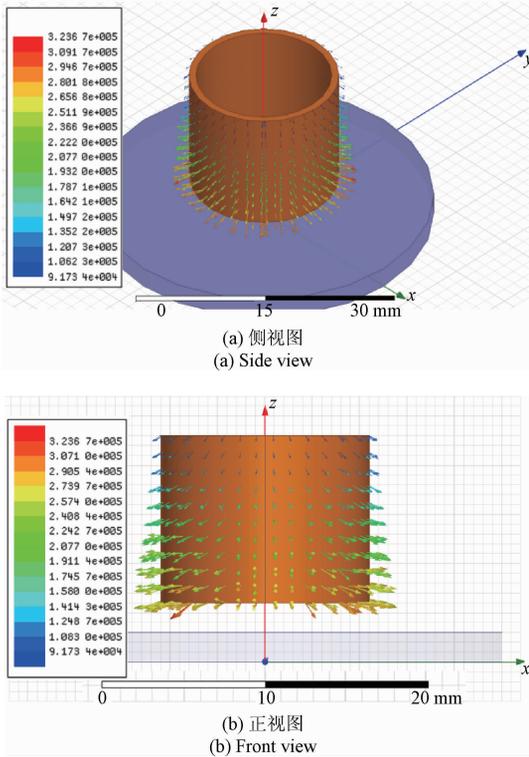


图4 $d_h = 0 \text{ mm}, \theta = 0^\circ, d_v = 3 \text{ mm}$ 时线圈受力图
Fig. 4 The coil's stress diagram when $d_h = 0 \text{ mm}, \theta = 0^\circ, d_v = 3 \text{ mm}$

3.1 相对倾角对电磁标定力的影响分析

设置 $d_v = 3 \text{ mm}, d_h = 0 \text{ mm}$ 固定不变, I 大小不变, 调节 θ 变化。定义 θ 绕 Y 轴顺时针为正方向, $\theta = \pm 3^\circ$ 时, 计算结果与图4中 $\theta = 0^\circ$ 结果对比如表1所示。

表1 $\theta = \pm 3^\circ$ 与 $\theta = 0^\circ$ 计算结果对比

Table 1 Comparison of calculation results when $\theta = \pm 3^\circ$ and $\theta = 0^\circ$

$\theta / (^\circ)$	F_x / mN	F_y / mN	F_z / mN
-3	2.724 3	-0.066 811	-85.733
0	-0.050 175	-0.077 816	-85.726
3	-2.718 3	0.069 572	-85.732

由表1可知, $\theta = \pm 3^\circ$ 时, F_y 均等于0 mN, F_x 大小相等, 方向相反, F_z 大小相等, 方向相同, 原因为 F 沿 Z 轴对称分布。同 $\theta = 0^\circ$ 相比, $\theta = \pm 3^\circ$ 时, F_z 数值变大, 说明倾斜 $\pm 3^\circ$ 后线圈由于靠近磁铁表面及边缘而增加的电磁力比由于远离磁铁表面及边缘而较小的电磁力在数值上要大。 $\theta = -3^\circ$ 时线圈各处受力如图5所示, 可明显看到左侧由于靠近磁铁表面及边缘受力大于右侧。

在 $d_h = 0 \text{ mm}, d_v = 3, 5 \text{ mm}$ 位置处, 激励加载面电流 $I = 1\ 000 \text{ A}$, 方向与图4中相反, 此时线圈受到斥力,

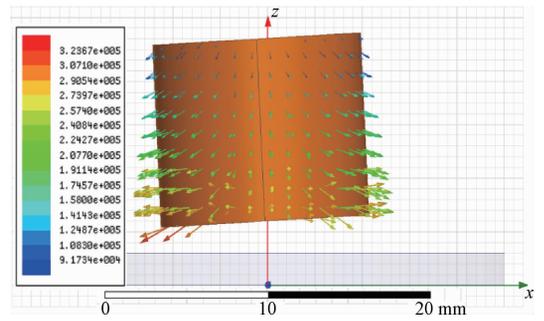


图5 $d_h = 0 \text{ mm}, \theta = -3^\circ, d_v = 3 \text{ mm}$ 时线圈受力分析
Fig. 5 The coil's stress diagram when $d_h = 0 \text{ mm}, \theta = -3^\circ, d_v = 3 \text{ mm}$

$F_z > 0$, 得到 F_z 随 θ 变化规律如图6所示。由图6可知, 1) F_z 具有对称性, 且 $\theta = 0^\circ$, F_z 取最小值; 2) 计算区间内, 不同 d_v 下, θ 增大时, F_z 均是先单调增大, 后减小, 再继续增大; 3) 同一 θ 值下, $d_v = 5 \text{ mm}$ 较 $d_v = 3 \text{ mm}$ 位置处 F_z 要大, 初始单调递增区间也大。

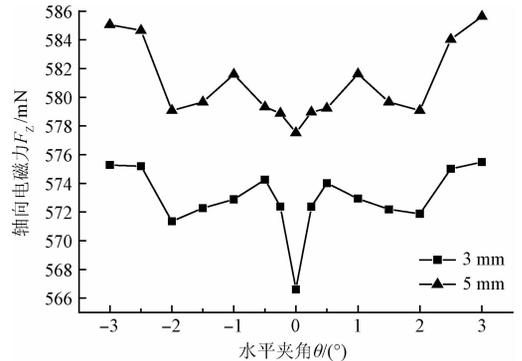


图6 $I = 1\ 000 \text{ A}$ 时 θ 与 F_z 关系
Fig. 6 Relationship between θ and F_z when $I = 1\ 000 \text{ A}$

3.2 径向偏差对电磁标定力的影响分析

同相对倾角研究方法, 设置 $d_v = 3 \text{ mm}, \theta = 0^\circ$ 固定不变, I 大小不变, 调节 d_h 变化。定义沿 X 轴向右为正方向, $d_h = \pm 3 \text{ mm}$ 时计算结果如表2所示。

表2 $d_h = \pm 3, 0 \text{ mm}$ 计算结果对比

Table 2 Comparison of calculation results when $d_h = \pm 3, 0 \text{ mm}$

d_h / mm	F_x / mN	F_y / mN	F_z / mN
-3	2.724 3	-0.066 811	-85.733
0	-0.050 175	-0.077 816	-85.726
3	-2.718 3	0.069 572	-85.732

由表2可知, $d_h = \pm 3 \text{ mm}$ 时, F 关于 Z 轴对称。同 $d_h = 0 \text{ mm}$ 相比, F_z 数值变大, 说明水平移动 $\pm 3 \text{ mm}$ 后线

圈由于靠近磁铁边缘而增加的电磁力比远离磁铁边缘而减小的电磁力在数值上要大。 $d_h = -3$ mm 时线圈各处受力如图 7 所示,可明显看到左侧由于靠近磁铁边缘受力大于右侧。

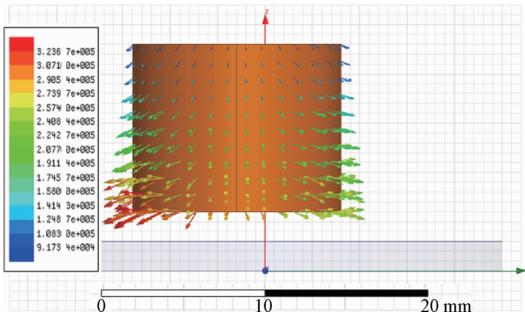


图 7 $\theta = 0^\circ, d_v = 3$ mm, $d_h = -3$ mm 时线圈受力分析

Fig. 7 The coil's stress diagram when $\theta = 0^\circ, d_v = 3$ mm, $d_h = -3$ mm

在 $\theta = 0^\circ, d_v = 3, 5$ mm 位置处,加载激励电流 $I = 1\ 000$ A 时, F_z 随 d_h 变化规律如图 8 所示。由图 8 可知, 1) F_z 具有对称性,且 $d_h = 0$ mm, F_z 取最小值;2) 计算区间内,不同 d_v 下, F_z 均随 d_h 单调增大。

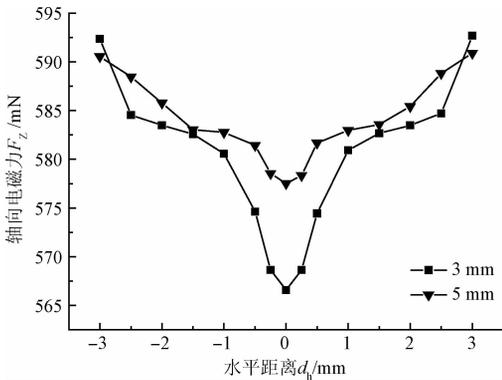


图 8 $I = 1\ 000$ A 时 d_h 与 F_z 关系

Fig. 8 Relationship between d_h and F_z when $I = 1\ 000$ A

3.3 轴向距离对电磁标定力的影响分析

由图 7、8 得到, d_v 会影响 F_z 大小。设置 $d_h = 0$ mm、 $\theta = 0^\circ$, 分别设置 $I = 1\ 000, 900$ A, F_z 随 d_v 变化规律如图 9 所示。由图 9 可知, 1) $I = 1\ 000$ A 与 900 A 时, F_z 变化趋势相同, 这是由于 d_v 一定时, F_z 大小由 I 决定; 2) 计算区间内, F_z 数值随 d_v 先增大后减小, 呈反抛物线分布, 而不是单调减小, 原因是随着 d_v 增大, 式(1)中 B 与 α 并不是同时减小。

综合以上仿真分析结果, 可以得到 3 点结论:

1) 沿磁铁轴向对称的 θ, d_h 值, 产生的 F 具有对称

性, F_z 大小相等, 方向相同;

2) θ, d_h 都存在包含零值在内的较小的连续对称区间, 随着 θ, d_h 增大, F_z 单调增大;

3) 随着 d_v 增大, F_z 先增大后减小, 呈反抛物线分布。

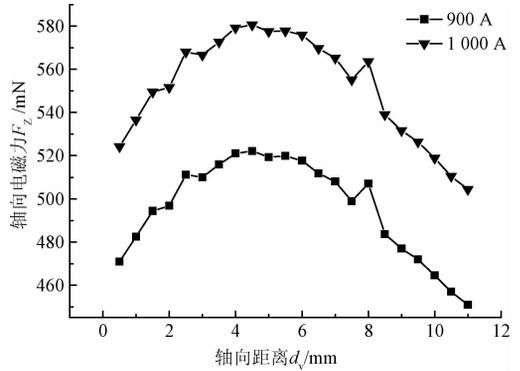


图 9 $I = 900, 1\ 000$ A 激励电流下 d_v 与 F_z 关系

Fig. 9 Relationship between d_v and F_z when $I = 900, 1\ 000$ A

此处需说明, 仿真计算时永磁铁材料设置为钕铁硼, 不同材料的圆柱形永磁铁的 B 分布特性是相同的, 因而仿真得出的 F_z 输出特性也适用于其他材料磁铁, 但具体数值会有所不同。

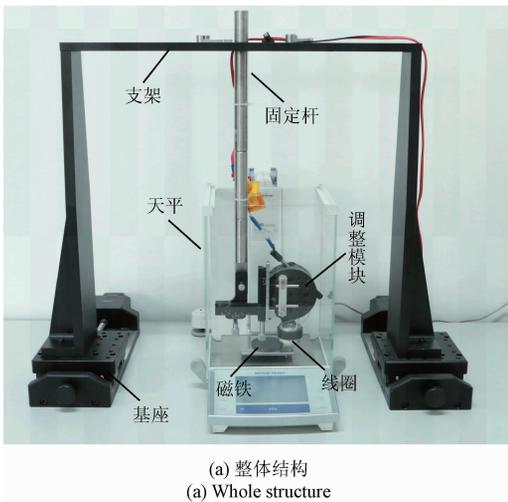
4 电磁标定力力学特性实验分析

由于磁铁线圈的制造加工精度不同, 以及磁铁的退磁等因素影响, 实际电磁力与理论值必然会存在一定差异, 最终电磁力与电流的控制关系还是需要实验来确定, 通常采用精密电子天平称重法。本文以图 1 中电磁力产生装置产生 0.1 ~ 10 mN 量程标定力为例, 说明高精度标定力产生方法。

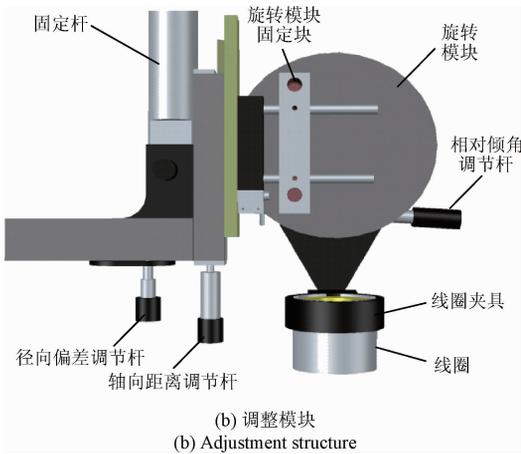
4.1 实验装置

设计的三维调整机构如图 10(a) 所示, 三维调整机构通过固定杆连接在支架上。磁铁放置在精密天平托盘上, 线圈安装在三维调整机构上, 悬于磁铁上方。通过三维调整机构, 如图 10(b) 所示, 可以调整线圈相对于磁铁的空间位置。实验时, 当线圈通电时, 通过天平示值的变化量和当地重力加速度即可获取相应的电磁力大小。

实验中, 采用的电子天平为梅特勒 XS105, 分辨率 0.01 mg, 电源为安捷伦 6 644 A, 分辨率 1 mA, 调整机构基于光学调整元件组成, 对 d_v, d_h 的最小调节量为 0.1 mm, 对 θ 的最小调节量为 $\pi/10\ 800$ rad ($\approx 2'$)。



(a) 整体结构
(a) Whole structure



(b) 调整模块
(b) Adjustment structure

图10 实验装置实物

Fig. 10 Physical map of experimental device

4.2 相对位置归零方法

线圈与磁铁初始位置,要调节变化 d_v 、 d_h 、 θ , 首先必须要确定零位置。对于 d_h 、 θ 归零, 根据仿真分析结论 1)、2), 目视粗调归零后, 可以依据单调递增性控制调节方向(远离零位置天平读数变大), 依据对称性确定零点(天平读数相同的两个位置的中心即为零点); θ 归零后, 以线圈接触磁铁, 天平读数突然增大位置作为 d_v 零位置。此处, θ 与 d_h 的归零互为前提, d_v 的归零以 θ 的归零为前提。若能首先完成 θ 归零, 就可依次完成 d_v 、 d_h 的归零, 初始时 d_h 未归零, 不能基于对称性完成 θ 归零, 需要通过其他方法实现 θ 归零。

考虑到线圈与磁铁接触时, 天平读数会突然增大, 可以利用这一特性进行 θ 归零。如图 11 所示, 线圈旋转中心 O 点与磁铁距离为 D , O 点与线圈底端边缘 a 点距离为 R 。当 $\theta = 0^\circ$ 时, 轴向方向上线圈移动距离 $d_1 = D - R\cos\alpha$ 时, 线圈底部端面与磁铁接触; $\theta \neq 0^\circ$, 线圈绕 O 点旋转 $\alpha - \beta$, a 点运动到了以 O 点为圆心, 以 R 为半径

的圆弧上的 b 点位置, 线圈在轴向方向上移动距离 $d_2 = D - R\cos\beta$ 时, 线圈边缘与磁铁接触。

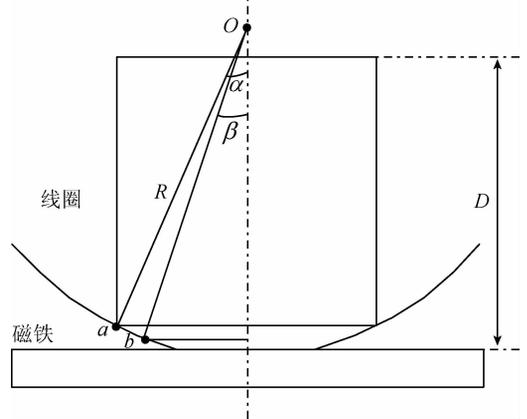


图11 不同相对倾角下线圈与磁铁接触距离变化
Fig. 11 Change of contact distance between coil and magnetic at different relative angles

由于 $\alpha > \beta$, 则有 $d_1 < d_2$, 说明 θ 在较小范围内, 当 $\theta = 0^\circ$ 时, 线圈需要在轴向移动比 $\theta \neq 0^\circ$ 时更大的距离才能接触到磁铁, 故可以通过对比寻找最大轴向移动距离完成 θ 归零。 θ 归零后, 根据对称性完成 d_h 归零, 而后通过对称性进一步验证 θ 零位置。

4.3 实验结果及分析

测量前对首先天平进行自检及砝码标定。为了排除电子天平内部电磁装置及金属部件与磁铁或通电线圈产生的磁场发生相互作用对测量结果可能产生影响, 在磁铁置于天平托盘之上后, 分别在线圈加电前后, 称量 1 mg ~ 1 g 内不同重量砝码, 结果显示, 加电前后, 天平均能够精确称量砝码, 说明本文采用的电子天平可以进行电磁力测量。

实验得到 0.1 ~ 10 mN 量程对应的 I 范围为 0.004 ~ 0.404 A, 在此区间内, 将 I 均分为 10 个子区间, 共 11 个节点。调节 d_v 、 d_h 、 θ 归零, 变化 d_v , 图 12 为在 1 ~ 7 mm 范围内每隔 1 mm, 以及 0.5、1.5 mm 共 9 个位置处, 加载 I , 测量电磁力(5 次), 将天平读数转变为力形式(北京地区 $g = 9.8015 \text{ m/s}^2$), 得到共得到 495 组 (I_i, f_i) 。

由图 12 可得, d_v 固定时, (I_i, f_i) 呈线性分布; 同一个 I_i , 不同 d_v 对应的 f_i 大小不同; 随着 I_i 增大, f_i 差值逐步变大。

4.3.1 轴向距离对电磁标定力的影响

图 13 所示为不同 d_v 位置处, 0.364、0.404 A 对应 90 组 (I_i, f_i) 。由图 13 可知, 在 d_v 测量范围内, F 值不恒定, 成反抛物线分布, 与仿真结果一致。具体来看, 0.5 ~ 1.5 mm 时, F 单调增大, 1.5 ~ 7 mm 时, F 单调减小。在 d_v 各区间计算 F 变异系数, 得到 1.5 ~ 2 mm 区间内, 变

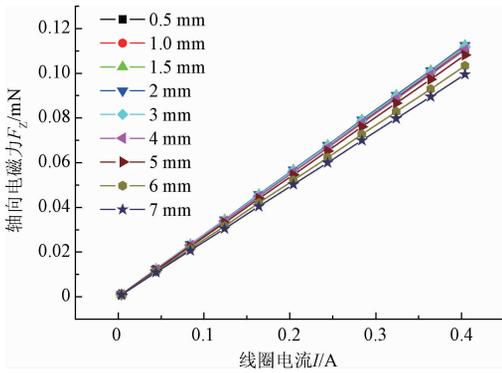


图 12 不同 d_v 处 F 与 I 关系

Fig. 12 Relationship of F and I at different d_v values

异系数取最小值 0.05%, F 值离散程度最小。3 ~ 7 mm 范围内, 变异系数取最大值 4.88%, 离散程度最大。

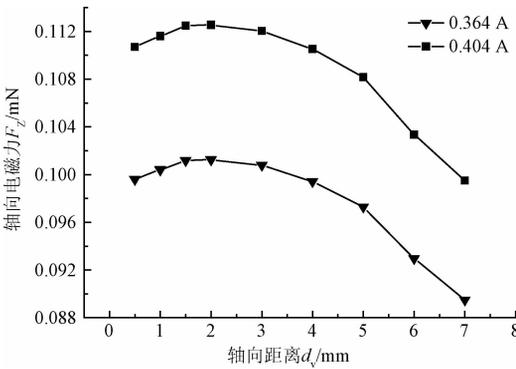


图 13 I 为 0.364, 0.404 A 时 F 与 d_v 关系

Fig. 13 Relationship of F and d_v at

$I = 0.364, 0.404$ A

4.3.2 相对倾角对电磁标定力的影响

在 d_v 一定时, θ, d_h 变化也影响 F 大小。调节 $d_v = 3, 5$ mm, $I = 0.4$ A, 变化(绝对值在 $[0^\circ, 1.5^\circ], [1.5^\circ, 3^\circ]$ 内, 计算步长分别取 $10', 30'$), 测量 F , 结果如图 14 所示。

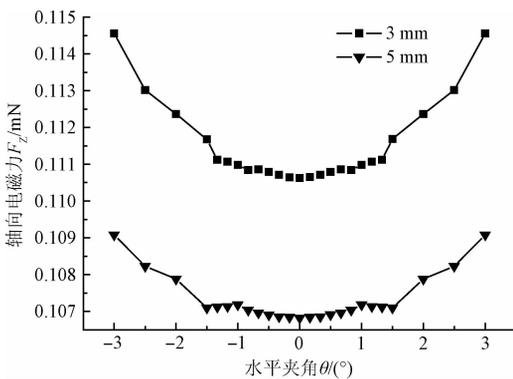


图 14 $d_v = 3, 5$ mm, F 与 θ 关系

Fig. 14 Relationship of F and θ at $d_v = 3, 5$ mm

由图 14 可知, 1) F 随对称分布, 随着绝对值增大, F 先增大后减小, 后又增大; 2) 不同 d_v 时, F 随变化趋势相同, 但具体区间上变化幅度不同。

4.3.3 径向偏差对电磁标定力的影响

同样, 调节 $d_v = 3, 5$ mm, $I = 0.4$ A, 变化 d_h (d_h 绝对值在 $0 \sim 2$ mm, $2 \sim 3$ mm, 调节步长分别取 $0.1, 0.5$ mm), 测量 F , 结果如图 15 所示。

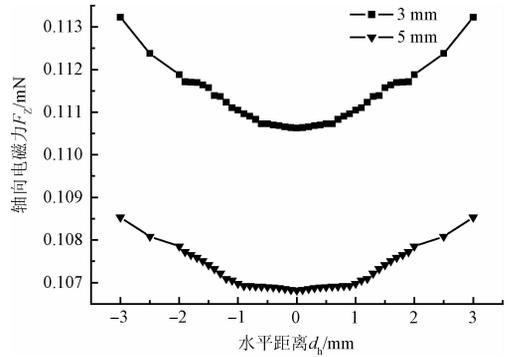


图 15 $d_v = 3, 5$ mm, F 与 d_h 关系

Fig. 15 Relationship of F and d_h at $d_v = 3, 5$ mm

由图 15 可知, 1) F 随 d_h 对称分布, 随着 d_h 绝对值增大, F 增大; 2) 不同 d_v 时, F 随 d_h 变化趋势相同, 但具体区间上变化幅度不同。

实验最终需要得到如式(5)中 $f(I)$ 及对应 d_v, d_h, θ 范围。此处定义不敏感角 φ 、不敏感径向偏差 L_h 、不敏感轴向距离区间 $[L'_v, L''_v]$ 来分别表示满足一定标定力输出误差(通常为 1% 或 1‰)对应的 θ, d_h, d_v 变化范围, 因而式(5)可表示为:

$$F = f(I) = a_0 + a_1 I + \Delta f \tag{7}$$

$$\begin{cases} L'_v \leq d_v \leq L''_v \\ -L_h \leq d_h \leq L_h \\ -\varphi \leq \theta \leq \varphi \end{cases}$$

4.3.4 不敏感角、不敏感径向偏差变化规律

在 $1 \sim 7$ mm, 得到 1‰ 及 1% 相对误差要求下, φ, L_h 随 d_v 变化关系分别如图 16、17 所示。

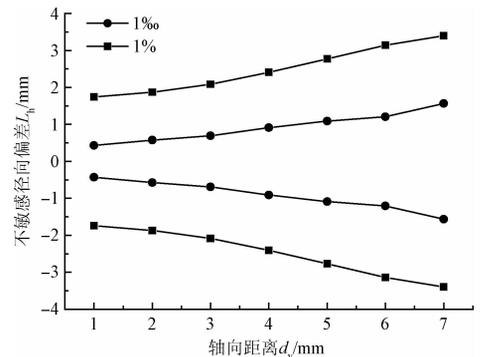


图 16 相对误差 1‰ 及 1% 下 L_h 随 d_v 的变化

Fig. 16 Relationship of L_h and d_v at

relative error 1‰, 1%

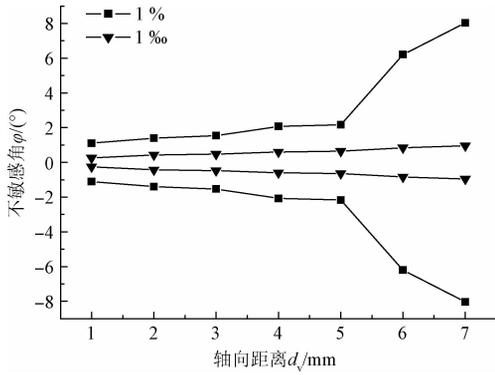


图 17 相对误差 1‰及 1% 下 φ 随 d_v 的变化

Fig. 17 Relationship of φ and d_v at relative error 1‰, 1%

由图 16、17 可知,同一 d_v 下,1‰对应的 φ 、 L_h 值均小于 1% 对应值,易得到原因为相对位置变化越小,相对误差越小。同时,随着 d_v 增大, φ 、 L_h 均逐步变大,说明随着磁铁与线圈轴向距离的增大,电磁力对磁铁与线圈之间平行程度、轴向对准程度敏感度降低。因而,式(7)中 φ 、 L_h 由 $[L'_v, L''_v]$ 区间最大值 L''_v 决定,以下来确定 $[L'_v, L''_v]$ 。

4.3.5 不敏感轴向区间及电磁力与电流控制方程

对测量得到图 12 中的 495 组 (I_i, f_i) , 在不同 d_v 区间内对整个量程内数据进行一元线性拟合,并计算相对误差。结果发现, I_i 越小,相对误差越大, f_i 为 0.1 mN 左右时,相对误差在 5% 以上。其中,1.5 ~ 3 mm 拟合结果如表 3 所示,可以看到 0.1 ~ 1 mN 量程内相对误差大于 1%,且在 0.1 mN 时达 13% 以上,因而考虑采用分段拟合减小相对误差。

表 3 $d_v = 1.5 \sim 3$ mm 时标定力的相对误差

Table 3 Calibration force's relative error at $d_v = 1.5 \sim 3$ mm

电流/A	电磁力/mN	相对误差/%
0.004	0.117 705	13.674 607
0.044	1.223 417	1.315 638
0.084	2.329 129	0.691 063
0.124	3.434 841	0.468 602
0.164	4.540 553	0.354 489
0.204	5.646 265	0.285 069
0.244	6.751 977	0.238 386
0.284	7.857 689	0.204 841
0.324	8.963 401	0.179 572
0.364	10.069 113	0.159 853
0.404	11.174 825	0.144 036

在 d_v 各区间内分段拟合,最终得到 1.5 ~ 3 mm, 分 0.004 ~ 0.044 A 及 0.044 ~ 0.404 A 两段拟合,标定力相对误差可降低到 1%。

在 0.004 ~ 0.044 A 段,再将该段划分为 10 个子区间测量,得到方程为 $y = 28.243\ 257x - 5.346\ 040 \times 10^{-3}$, 方差为 $1.713\ 854 \times 10^{-4}$, 相关系数为 0.999 752, 相对误差如表 4 所示,均降低到 1% 以内。

表 4 $I = 0.004 \sim 0.044$ A 内标定力相对误差

Table 4 Calibration force's relative error at $I = 0.004 \sim 0.044$ A

电流/A	电磁力/mN	相对误差/%
0.004	0.107 627	0.518 847
0.008	0.220 600	0.417 246
0.012	0.333 573	0.348 920
0.016	0.446 546	0.299 823
0.020	0.559 519	0.262 839
0.024	0.672 492	0.229 393
0.028	0.785 465	0.173 565
0.032	0.898 438	0.139 592
0.036	1.011 411	0.116 741
0.040	1.124 384	0.153 646
0.044	1.237 357	0.116 741

在 0.044 ~ 0.404 A 段, $y = 28.243\ 257x - 5.346\ 040 \times 10^{-3}$, 方差为 $1.713\ 854 \times 10^{-4}$, 相关系数为 0.999 752, 相对误差如表 5 所示,均在 1% 以内。

表 5 电流 0.044 ~ 0.404 A 内标定力相对误差

Table 5 Calibration force's relative error at $I = 0.044 \sim 0.404$ A

电流/A	电磁力/mN	相对误差/%
0.044	1.232 278	0.769 314
0.084	2.330 480	0.736 679
0.124	3.435 895	0.499 670
0.164	4.541 311	0.378 044
0.204	5.646 727	0.304 037
0.244	6.752 142	0.254 262
0.284	7.857 558	0.218 492
0.324	8.962 974	0.191 545
0.364	10.068 389	0.170 515
0.404	11.173 805	0.153 646

由以上结果可得,基于图 1 中装置,1% 相对误差要求下不敏感轴向距离区间为 $[1.5, 3]$ mm, 由于 $d_v = 3$ mm 对应 φ 、 L_h 分别为 $1^\circ 32'$ 、2.09 mm, 则有产生 0.1 ~

10 mN, 相对误差 1% 要求以内标定力, 电磁力与电流控制关系为:

$$f(I) = \begin{cases} 28.243257I - 5.346040 \times 10^{-3}, & 0.004 \leq I \leq 0.044 \\ 27.635387I + 9.106650 \times 10^{-3}, & 0.044 < I \leq 0.404 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1.5 \leq d_v \leq 3 \\ -2.09 \leq d_h \leq 2.09 \\ -1^\circ 32' \leq \theta \leq 1^\circ 32' \end{cases} \quad (8)$$

在 1‰ 相对误差要求下, 在所有 d_v 区间内分段拟合, 得到只有在 1.5 ~ 2 mm 内, 分 0.004 ~ 0.044 A 以及 0.044 ~ 0.404 A 两段拟合时, 在约 8 ~ 10 mN 时, 相对误差才小于 1‰。在整个量程 0.1 ~ 10 mN 内, 无法产生相对误差小于 1‰ 的标定力。

5 结 论

1) 通电线圈在磁铁磁场中受到电磁力(安培力), 但由于磁场的均匀性, 线圈与磁铁相对位置改变会影响电磁力大小。

2) 相比于平行、对准状态, 线圈与磁铁之间产生水平倾角、水平位移量时, 电磁力会变大, 且大小关于磁铁中心轴线具有对称性, 实验测量电磁力时, 可以依据此特性用于电磁力与磁铁的平行、对准位置调节。随着线圈与磁铁轴向距离增大, 电磁力先增大后减小, 不敏感径向偏差及不敏感角逐渐增大。

3) 可以采用分段拟合的方法减小标定力输出相对误差, 确定电磁力及电流的控制关系。

4) 通过实验研究, 能够获得电磁力较为完备的力学特性, 能够获得电磁标定装置的适用范围和误差限, 从而在进行微推力测量系统标定时, 能够有效评定标定精度, 获得高精度的标定结果。

本文所研究的高精度电磁标定力产生方法, 满足了微推力测量中电磁标定力性能要求, 对于应用于其他领域内的电磁标定力也具有一定的参考意义。进一步采用工作匝数可变的线圈可以获得输出分辨率及输出量程可调的电磁标定力。提高磁铁与线圈相对位置调节精度, 考虑温度对线圈及天平工作的影响等因素, 增加测量中线圈前后方向的倾角调节功能, 是下一步需要研究的内容。

参考文献

[1] United States Air Force Chief Scientist's Office. Report on technology horizons: A vision for air force science and technology during 2010-2030 [R]. United States Air Force Report, 2010.

[2] ZHOU W J, HONG Y J, CHANG H. A micro Newton

thrust stand for average thrust measurement of pulsed microthruster [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(12):125115.

- [3] PHIPPS C R, LUKE J R, MCDUFF G G, et al. Laser-ablation-powered mini-thruster [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2002, 4760(9):833-842.
- [4] MERKOWITZ S M, AHMAD A, HYDE T T, et al. LISA propulsion module separation study [J]. Classical and Quantum Gravity, 2005, 22(10):S413-S419.
- [5] D'SOUZA B C, KETSDEVER A D. Investigation of time-dependent forces on a nano-Newton-second impulse balance [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 76(1):015105-015110.
- [6] 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.
- ZHANG R F, ZHOU J, YU X ZH. On-line fault diagnosis of spacecraft attitude control thruster based on improved Maksimov estimation algorithm [J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4):409-413.
- [7] 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.
- HONG Y J, ZHOU W J, WANG G Y. Methods of micro thrust measurement and analysis of its key issues [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2013, 34(10):2287-2299.
- [8] PANCOTTI A, HAAG T, KING S, et al. Recommended practices in thrust measurements [C]. The 33rd International Electric Propulsion Conference, 2013:1-24.
- [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.
- LIU SH J, FANG SH ZH, L X H. Identification of a micro-thrust array test stand and its dynamic error compensation [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(6):794-797.
- [10] HE Z, WU J, ZHANG D, et al. Precision electromagnetic calibration technique for micro-Newton thrust stands [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(5):055107.
- [11] TREZZOLANI F, ROMERO I P, BOSI F, et al. Design of a thrust balance for RF plasma thruster characterization [C]. Metrology for Aerospace, IEEE, 2014:462-467.
- [12] TANG H, SHI C, ZHANG X, et al. Pulsed thrust measurement using electromagnetic calibration techniques [J]. Review of Scientific Instruments, 2011,

- 82(3):035118.
- [13] GAMERO-CASTANO M, HRUBY V, CO B, et al. A Torsional balance that resolves sub-micro-Newton forces[C]. 27th International Electric Propulsion Conference, 2001: IEPC-01-235.
- [14] HEY F G, KELLER A, BRAXMAIER C, et al. Development of a highly precise micro Newton thrust balance[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 43(1):234-239.
- [15] BRADY D, WHITE H, MARCH P, et al. Anomalous thrust production from an RF test device measured on a Low-Thrust torsion pendulum[C]. Aiaa/asme/sae/asee Joint Propulsion Conference, 2015:2014-4029.
- [16] 王秋晓, 伍昭富, 付晓艳, 等. 基于动态电磁力的主动式动平衡测量方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 65-73.
- WANG Q X, WU ZH F, FU X Y, et al. Research of active dynamical balance measurement method based on dynamic electromagnetic force[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 65-73.
- [17] 贾丹平, 武威. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅电流传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1806-1812.
- JIA D, WU W. Fiber Bragg grating current sensor based on giant magnetostrictive material[J]. Journal of Electronic Measurement & Instrumentation, 2015, 29(12):1806-1812.
- [18] 沙敏, 王一枫, 丁宁, 等. 电扫描实现旋转磁场跟踪仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 1013-1020.

SHA M, WANG Y F, DING N, et al. Research on rotating magnetic-field tracking method implemented by electrical scanning [J]. Journal of Electronic Measurement & Instrumentation, 2014, 28(9): 1013-1020.

- [19] 高瞻, 宋爱国, 秦欢欢, 等. 蛇形磁路多片式磁流变液阻尼器设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 821-829.

GAO ZH, SONG AI G, QIN H H, et al. Design of multi-disc MRF damper with serpentine flux path [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 821-829.

作者简介



王大鹏, 分别在 2011 年和 2014 年于空军航空大学获得学士和硕士学位, 现为装备学院博士研究生, 主要研究方向为微推力测量技术。

E-mail: ajwzajwz@163.com

Wang Dapeng received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Aviation University of Air Force in 2011 and 2014, respectively. Now he is a Ph. D. candidate in Equipment Academy. His main research interest is micro-thrust measurement technology.



金星, 1998 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为装备学院研究员, 主要研究方向为微推力测量技术。

E-mail: jinxing_beijing@sina.com

Jin Xing received his Ph. D. degree from Beihang University in 1998. Now he is a professor in Equipment Academy. His main research interest is micro-thrust measurement technology.