

高精度非接触磁浮机构设计及其 输出特性测试研究

唐忠兴¹, 姚 闯¹, 何 闻², 周丽平¹, 赵洪波¹, 赵艳彬¹

(1. 上海卫星工程研究所, 上海 201109; 2. 浙江大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 为验证“双超”卫星地面试验系统与地面验证方案的合理性、可行性, 针对“双超”卫星平台的核心部件非接触磁浮机构, 提出了一种非接触磁浮机构磁钢匀强磁场、激励线圈拓扑结构及高精度程控精密功率放大器的多参数综合优化设计与测试方法。首先, 通过选择适宜的磁钢材料和设计磁钢结构尺寸参数实现非接触磁浮机构磁钢磁场的均匀性; 其次, 通过激励线圈参数优化可降低输出力的波动; 再次, 通过驱动电路的优化设计可提升程控精密功率放大器的输出电流精度; 最后, 通过非接触磁浮机构的输出特性测试, 验证了设计方法的有效性。该方法将“双超”平台的需求分解成磁浮机构各部分的设计指标, 简化明确了设计思路, 方案通过验证为下一步“双超”平台原理样机的设计及未来“双超”平台的工程应用提供了技术支撑。

关键词: 非接触磁浮机构; 匀强磁场; 激励线圈; 驱动电路; 输出特性测试

中图分类号: V 416.6

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.01.019

Research on High-Precision Non-contact Maglev Device Design and Its Output Characteristic Test

TANG Zhongxing¹, YAO Chuang¹, HE Wen²,
ZHOU Liping¹, ZHAO Hongbo¹, ZHAO Yanbin¹

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;

2. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract: In order to verify the rationality and feasibility of the ground test system and the ground verification scheme of the “dual super” satellite platform, in view of its core component, i.e., the non-contact maglev device including the uniform magnetic field, the excitation coil topology, and the high-precision programmable precise power amplifier, a multi-parameter integrated optimization design and test method is proposed. By selecting suitable magnetic steel materials and designing the size parameters of the magnetic steel structure, the magnetic field uniformity of the non-contact maglev device is realized. By optimizing the excitation coil parameters, the fluctuation of the output force can be reduced. By optimizing the drive circuit, the output current precision of the programmable precise power amplifier can be improved. Finally, by testing the output characteristics of the non-contact maglev device, the effectiveness of the design method is verified. The method decomposes the requirements of the “dual super” satellite platform into the design indicators of the components of the non-contact maglev device, which simplifies the design idea. The verification of the scheme provides technical support for the design of the next principle prototype and the future engineering applications of the “dual super” satellite platform.

Key words: non-contact maglev device; uniform magnetic field; excitation coil; drive circuit; output characteristic test

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-12-18

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0500803); 上海市科学技术委员会人才计划资助项目(16XD1423200, 16QB1403500)

作者简介: 唐忠兴(1985—), 男, 博士, 主要研究方向为高精度姿态控制机构、卫星姿态与轨道动力学、姿态机动策略等。

0 引言

随着未来航天的发展,如空间引力波测量、天文望远镜、高分敏捷遥感等对卫星平台的超精超稳控制提出了更高的要求^[1-5]。如未来发展 1:5 000 比例尺测绘卫星指向精度需求达到 10^{-4} 度量级,姿态稳定度需求达到 10^{-6} ($^{\circ}$)/s 量级,而当前新型卫星平台(如现役的风云四号卫星)的指向精度为 10^{-3} 度量级,姿态稳定度为 10^{-4} ($^{\circ}$)/s 量级,难以适应未来发展的需要。“双超”卫星平台采用“动静隔离、主从协同”控制方法,系统总体指标为姿态指向精度优于 $5 \times 10^{-4}^{\circ}$,稳定度优于 5×10^{-6} ($^{\circ}$)/s,已成为适用于该类航天器设计的重要选择。“双超”卫星平台将卫星设计成相对独立又有机结合的平台舱和载荷舱两部分,通过非接触磁浮机构实现两舱的动静隔离设计,使得安装活动部件、挠性部件的平台舱的振动和干扰不会传至载荷舱,空间上达到振动隔离的效果;同时采取载荷舱高精度主动控制,平台舱跟随载荷舱从动控制的主从协同控制策略,进而满足高性能载荷要求。

非接触磁浮机构是“双超”卫星平台的关键执行元件,其原理是基于匀强磁场设计的音圈电机,通过调节线圈的电流精度便可保证其高精度力控性能。相比飞轮、控制力矩陀螺等执行元件,非接触磁浮机构性能优异,有效改善微振动、大挠性的技术瓶颈,实现“双超”指标;磁浮机构适应性好、通用性强,可适用于各种轨道与规模的高精度卫星,对于遥感、测绘卫星效果更佳;同时,非接触磁浮机构隔离效果突出,具有高带宽、无摩擦等优点,可显著提升卫星平台的控制性能。本文面向新型的“双超”卫星平台,提出了一种非接触磁浮机构磁钢匀强磁场、激励线圈拓扑结构及高精度程控精密功率放大器的多参数综合优化设计与测试方法,可为其未来的工程应用提供技术支撑。

1 非接触磁浮机构多参数综合设计

1.1 非接触磁浮机构

1.1.1 非接触磁浮机构概述

非接触磁浮机构由磁钢、激励线圈和程控精密功率放大器组成。通过程控精密功率放大器所提供电流,由磁钢在工作气隙中产生强而均匀的磁力线并穿过线圈架,根据洛伦兹力生成原理输出两路

相互垂直力,其示意图如图 1 所示^[6-7]。线圈架由两组激励线圈构成,其中一组在磁场范围内沿水平方向绕制,另一组在磁场范围内沿竖直方向绕制。当两组线圈中分别通入由程控精密功率放大器所提供的电流后,将分别产生竖直和水平方向的洛伦兹力,可使得非接触磁浮机构做垂直和水平方向运动。

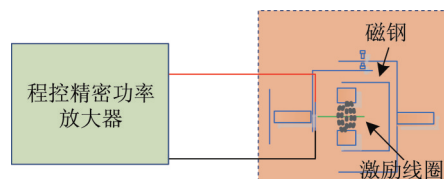


图 1 非接触磁浮机构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the non-contact maglev device

非接触磁浮机构安装时,将磁钢与平台舱固连,激励线圈与载荷舱固连,从而在工作过程中可对所要控制的载荷舱与平台舱产生相互垂直的二维作用力,实现平台舱和载荷舱的动静隔离非接触设计。与此同时,基于载荷舱上的高精度星敏与陀螺,非接触磁浮机构直接对载荷舱施加高精度控制力矩,便可实现载荷舱的主动控制;基于载荷舱与平台舱之间的相对位置传感元件,非接触磁浮机构对两舱直接施加高精度控制力,便可实现两舱间的从动控制。

1.1.2 非接触磁浮机构指标分解

“双超”卫星的系统总体指标主要是指卫星载荷的姿态指向精度和稳定度,“双超”卫星的系统总体指标为载荷舱姿态指向精度优于 $5 \times 10^{-4}^{\circ}$,稳定度优于 5×10^{-6} ($^{\circ}$)/s。磁浮机构是实现载荷舱主动“双超”控制、两舱相对位置控制及两舱动静隔离的核心执行机构。“双超”卫星对磁浮机构的需求统一体现在对其输出力的精度上,即

$$\begin{aligned} \omega &= \int_0^1 \dot{\omega} dt = \int_0^1 \frac{\Delta T}{J} dt = \\ &\frac{1}{J} \int_0^1 2\Delta FL_{\text{力臂}} dt < 5 \times 10^{-6} \\ \int_0^1 \Delta F dt &< \frac{8.7 \times 10^{-6} (\text{rad/s}) J}{2L_{\text{力臂}}} < \\ &5.0 \times 10^{-4} (\text{N} \cdot \text{s}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ω 为姿态稳定度, ($^{\circ}$)/s; J 为系统的惯量; ΔT 为干扰力矩。

由于磁浮机构不含周期性转动部件,因此其输出干扰力主要为常值干扰,即 ΔF 为一个常值误差,

与 $\int_0^1 \Delta F dt$ 在数值上相等, 即有

$$\int_0^1 \Delta F dt \stackrel{\text{数值上}}{\Rightarrow} \Delta F \quad (2)$$

则为满足使用需求, 磁浮机构出力精度为

$$\Delta F = \Delta BIL + B\Delta IL < 5 \times 10^{-4} \quad (3)$$

式中: ΔF 为干扰力, N; ΔB 为磁场的精度; ΔI 为控制电流的精度; L 为作用长度。

为满足载荷舱“双超”控制需求, 磁浮机构出力精度为 5×10^{-4} N。下面对磁浮机构电流需求精度进行分析。

1) 电流精度指标论证。

为满足两舱相对位置调节的需求, 则电流最大值为

$$I_{\max} = \frac{F_{\max}}{BL} = 47.6 \text{ mA} \quad (4)$$

“双超”需求电流精度为

$$I_{\text{err}} = \frac{5 \times 10^{-4} \text{ N}}{BL} = 0.1 \text{ mA} \quad (5)$$

电流相对精度为

$$\frac{I_{\text{err}}}{I_{\max}} = 2.5 \times 10^{-3} \quad (6)$$

2) 匀强磁场指标论证。

根据磁浮机构出力 5×10^{-4} N 精度需求, 对于给定的磁场误差, 电流 I 越大, 则磁场误差引起的输出力误差越大, 即

$$\Delta F_{B_{\max}} = \Delta B I_{\max} l \quad (7)$$

则

$$\begin{aligned} \Delta F_{B_{\max}} &= \frac{\Delta B}{B} B I_{\max} l < 5 \times 10^{-4} \text{ N} \\ \frac{\Delta B}{B} &< \frac{5 \times 10^{-4} \text{ N}}{B I_{\max} l} = 2.5 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (8)$$

由上式可知, 磁场均匀度相对误差小于 2.5×10^{-3} , 即可满足由磁场误差引起的最大干扰需求。

1.2 磁钢匀强磁场设计

图 1 所示的非接触磁浮机构构型磁场利用率比

$$\begin{aligned} dA &= \frac{Ie_x}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left[\frac{y - H/2}{\left(x^2 + (y - H/2)^2\right)^{3/2}} - \frac{y + H/2}{\left(x^2 + (y + H/2)^2\right)^{3/2}} \right] + \\ &\quad \frac{Ie_y}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left[\frac{x}{\left(x^2 + (y - H/2)^2\right)^{3/2}} - \frac{x}{\left(x^2 + (y + H/2)^2\right)^{3/2}} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

较高, 对卫星的电磁兼容设计要求较低, 并且此构型可控制在较小尺寸范围适合卫星平台装配。考虑到空间高低温环境因素, 选择钕铁硼磁铁作为非接触磁浮机构的永磁材料^[8-9]。

建立非接触磁浮机构的局部磁场模型, 如图 2 所示。

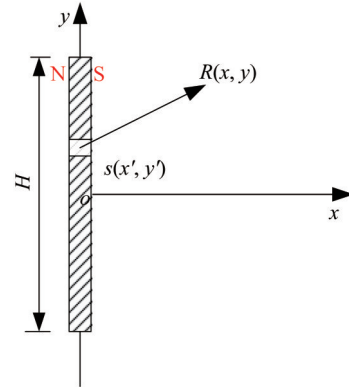


图 2 局部磁场分布图

Fig.2 Local distribution of the magnetic field

在一维假设下, 即假设永磁体为一维线状, 线状左右两侧 s 是源点, R 是场点, H 为非接触磁浮机构两个磁钢 (磁体两极) 的工作长度。线永磁体上每一个线元在空间某点的矢势为

$$dA = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} d \frac{\boldsymbol{\mu} \times \boldsymbol{e}_R}{R^2} \quad (9)$$

式中: A 为线永磁体的磁矢势; ϵ_0 为介电常数张量; c 为光速; $\boldsymbol{\mu}$ 为电流元矢量; $\boldsymbol{e}_R$ 为源点到场点的单位矢量。

一维情况下,

$$d\boldsymbol{\mu} = Idl\boldsymbol{e}_x \quad (10)$$

$$R^2 = x^2 + (y - y')^2 \quad (11)$$

$$\boldsymbol{e}_R = \frac{x}{\sqrt{x^2 + (y - y')^2}} \boldsymbol{e}_x + \frac{y - y'}{\sqrt{x^2 + (y - y')^2}} \boldsymbol{e}_y \quad (12)$$

得到任意一点磁场表达式

又有

$$B = \nabla \times A$$

(14)

同理,两个相互平行的平板磁磁钢,它们之间任一点磁场表达式为

$$B = \frac{Ie_x}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left[\frac{y - H/2}{\left(x^2 + (y - H/2)^2\right)^{3/2}} - \frac{y + H/2}{\left(x^2 + (y + H/2)^2\right)^{3/2}} \right] +$$

$$\frac{Ie_x}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left[\frac{y - H/2}{\left((x - \Delta)^2 + (y - H/2)^2\right)^{3/2}} - \frac{y + H/2}{\left((x - \Delta)^2 + (y + H/2)^2\right)^{3/2}} \right] +$$

$$\frac{Ie_y}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left[\frac{x}{\left(x^2 + (y - H/2)^2\right)^{3/2}} - \frac{x}{\left(x^2 + (y + H/2)^2\right)^{3/2}} \right] +$$

$$\frac{Ie_y}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left[\frac{x - \Delta}{\left((x - \Delta)^2 + (y - H/2)^2\right)^{3/2}} - \frac{x - \Delta}{\left((x - \Delta)^2 + (y + H/2)^2\right)^{3/2}} \right] \quad (15)$$

当 $H \gg y$ 时,上式可以简化为

$$B = \frac{Ie_x}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left[\frac{-H/2}{\left(x^2 + (-H/2)^2\right)^{3/2}} - \frac{+H/2}{\left(x^2 + (+H/2)^2\right)^{3/2}} \right] +$$

$$\frac{Ie_x}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left[\frac{-H/2}{\left((x - \Delta)^2 + (-H/2)^2\right)^{3/2}} - \frac{+H/2}{\left((x - \Delta)^2 + (+H/2)^2\right)^{3/2}} \right] +$$

$$\frac{Ie_y}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left[\frac{x}{\left(x^2 + (-H/2)^2\right)^{3/2}} - \frac{x}{\left(x^2 + (+H/2)^2\right)^{3/2}} \right] +$$

$$\frac{Ie_y}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left[\frac{x - \Delta}{\left((x - \Delta)^2 + (-H/2)^2\right)^{3/2}} - \frac{x - \Delta}{\left((x - \Delta)^2 + (+H/2)^2\right)^{3/2}} \right] \quad (16)$$

式中: Δ 为磁浮机构两个磁钢之间的横向间隙。

根据上式可得,磁感应强度与 y 轴方向位移无关,即沿 y 轴方向,磁场可以看作是匀强磁场。

当非接触磁浮机构的磁钢的工作长度 H 越大,磁场的均匀性越好; Δ 在一定范围内对磁钢之间磁场的磁感应强度均匀度影响可以忽略;计算可知,当磁钢长度选择为 30 mm、横向间隙选择为 10 mm 时,可保证匀强磁场设计误差优于 0.1%。

1.3 激励线圈拓扑结构设计

激励线圈拓扑结构采用串联式双回路“日”字型绕制方案,如图 3 所示。这种方案不仅使各匝线

圈的控制电流更为精确,还可得到更优的输出力精度。图 3 中虚线方框所示区域对应磁钢横截面所形成的工作气隙,位于工作气隙部分线圈为主作用线圈,用于产生所需输出力。激励线圈由多层线圈构成,且水平和垂直向线圈依次独立正交间隔排列在各层,通电流后可分别输出相互垂直的水平和垂直向作用力。激励线圈采用印刷电路板(PCB)制板工艺,有利于提高激励线圈工作效率,同时减小了二维输出力的耦合与波动。

对于激励线圈拓扑结构的优化,由于线圈的绕制方式、激励线圈横截面面积、激励线圈所通过电流等其他参数已确定;同时,由于非接触磁浮机构输出力与激励线圈的有效作用长度 l 直接相关,因

此,本文主要对磁钢与激励线圈有效作用长度之间的耦合进行仿真分析,如图 4 所示。

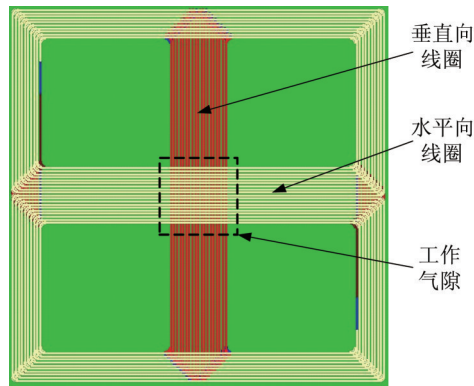


图 3 激励线圈拓扑结构

Fig.3 Topology diagram of the excitation coil

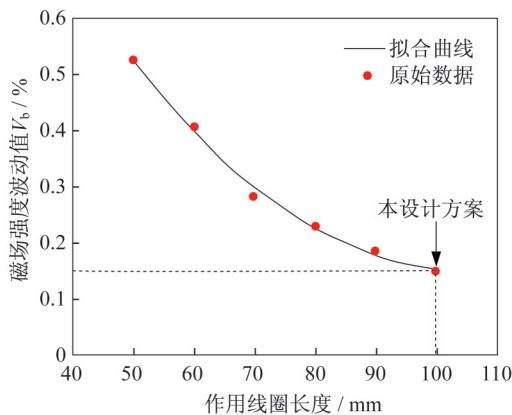


图 4 不同作用线圈长度对应 V_b 曲线

Fig.4 V_b curve via the coil length

根据图 4 的仿真结果可知:随着激励线圈的有效作用长度 l 的增加,磁场强度的波动值不断减小。综合考虑所采用的磁钢与激励线圈有效作用长度之间的耦合,选取激励线圈的有效作用长度为 100 mm。

1.4 高精度程控精密功率放大器设计

高精度程控精密功率放大器采用 MCU 通过 RS422 总线向 DAC 发出指令信号,从而输出指令电压,通过电压-电流 ($V-I$) 转换电路,产生线圈的驱动电流;同时,利用高精度的 ADC 采样主电路串联电阻两端的电压,推算得到实际的工作电流,必要时通过总线发给上位机。高精度程控精密功率放大器总体设计如图 5 所示。

1) 电压/电流变换单元设计。电压/电流转换单元采用具有电路简洁、转换精度高性能的 How-

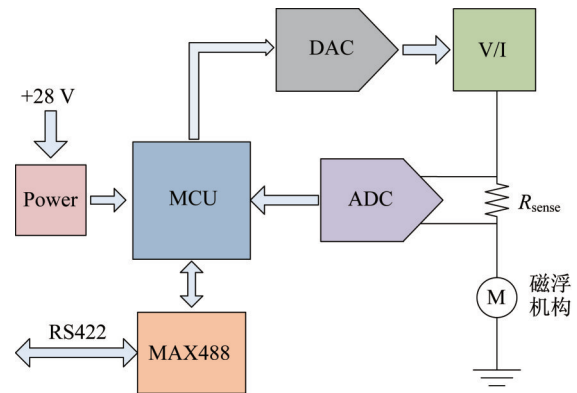


图 5 高精度程控精密功率放大器总体设计图

Fig.5 General design of the high-precision programmable precise power amplifier

land 电流源;根据控制电流高精度的要求,采用集成的差分放大器 INA133 来获得更高的性能;为了扩大 INA133 的电流输出能力,采用 LME49600 缓冲 buffer 与 INA133 的输出级串联。综上所述,电压/电流变换单元设计电路方案如图 6 所示。

2) DAC 选型。依据方案要求的输出电流范围为 0~50 mA,分辨电流 20 μ A。可得出 DAC 输出分辨率 N 为

$$N = \log_2 \left(\frac{50 \text{ mA}}{20 \mu\text{A}} \right) = 11.3 \quad (17)$$

由上式可知,实际 DAC 分辨率不低于 12 bit,即可达到要求。但是环境干扰、噪声以及 DAC 芯片自身的涨落现象会降低 DAC 的有效位数,故选用分辨率为 18 bit 的 DAC9881,其最差情况下相对精度亦可达 16 bit。

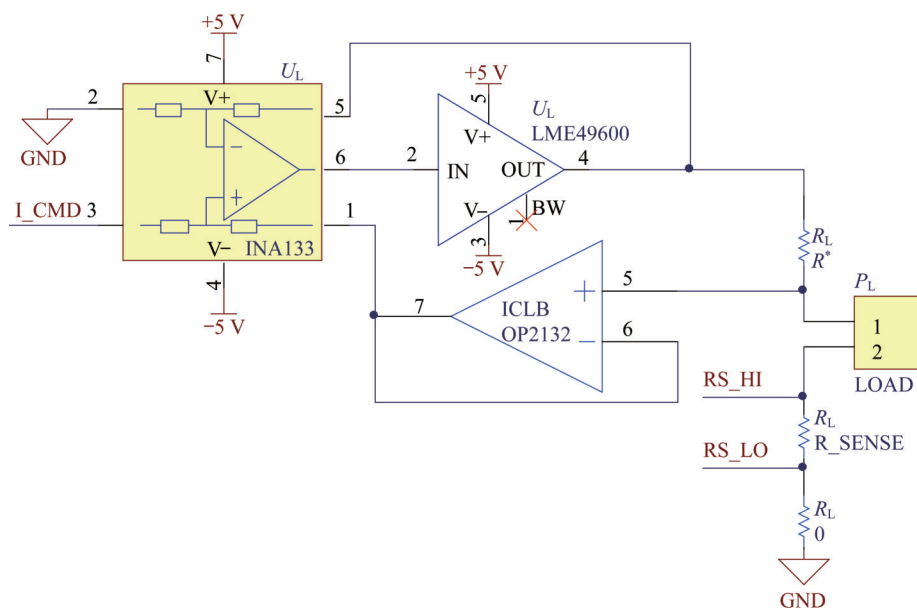
3) ADC 与电流反馈前端电路。ADC 位数的选取和 DAC 的一样,选取 18 bit 的 SAR 型 ADC——ADS8885。根据驱动运放的小信号带宽、输入信号噪声等要求,模拟前端拟采用 PGA280 仪表放大器芯片。PGA280 的增益带宽积较大,宽带噪声也很小。

通过上述的高精度程控精密功率放大器方案设计与元件的选择,保证“双超”平台非接触磁浮机构的控制精度并结合其方案的要求,设计方案的输出电流误差优于 0.05%。

2 输出特性测试研究

2.1 磁钢匀强磁场性能测试

选择磁钢磁场中激励线圈所在位置的中心面

图 6 V/I 单元电路方案Fig.6 Scheme of the V/I unit circuit

作为测量面,并在测量面选取若干测量点;利用高斯计测量激励线圈在该处的磁场强度,调节高斯计探头在磁钢磁场中的位置可得到不同测量点的磁场强度;最后综合计算得出激励线圈所在的中心位置的磁场均匀度,如图 7 所示。

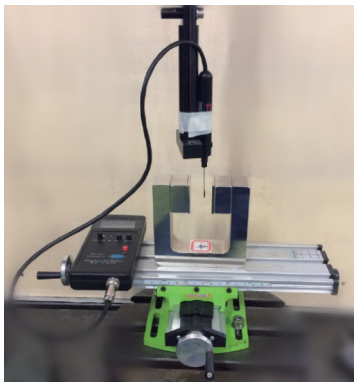


图 7 磁场测量装置实物图

Fig.7 Physical picture of the magnetic measuring equipment

测试结果及分析:高斯计测磁强精度分为 1 mT (2 T 量程)和 0.1 mT(0.2 T 量程)。测试结果见表 1。

推论出移动 0.5 mm 的磁强误差平均为

$$\epsilon_B = 0.5(\text{mT}) \times \frac{0.5(\text{mm})}{\Delta L(\text{mm})} \quad (18)$$

进而计算相对误差为

表 1 磁场强度测试记录表

Tab.1 Record sheet of the magnetic field intensity test

序号	坐标/mm	磁强/mT
1	0,0,0	415
2	3,0,0	414(跳变点)
3	-3,0,0	414(跳变点)
4	0,3,0	414(跳变点)
5	0,-3,0	414(跳变点)
6	0,0,1	416(跳变点)
7	0,0,-1	416(跳变点)

$$\epsilon'_B = \frac{\epsilon_B}{B_0} \quad (19)$$

由测试结果算得 $\epsilon_B = 0.25 \text{ mT}$, 除以 $B_0 = 415 \text{ mT}$ 即得相对误差优于 0.1%, 与设计结果一致。

2.2 电流测试方案

非接触磁浮机构电流测试方案如图 8 所示,其中,吊装杆对非接触磁浮机构的磁钢部分进行吊装,其在垂直方向可进行调节,可模拟磁钢部分与激励线圈在 Z 向的相对运动;激励线圈放置在电子天平的载物台上,利用电子天平测量激励器输出力(Z 向即重力方向)的大小;同时,电子天平放置在二轴导轨平台上,可模拟激励线圈相对磁钢部分在水平 X 和 Y 向的移动。其电流测试通过在程控精密功率放大器与激励线圈的回路中串入一个高精度

电流表实现对电流的测量。

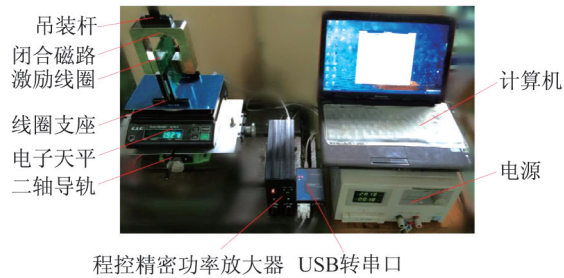


图 8 非接触磁浮机构测试方案实物图

Fig.8 Physical diagram of the test scheme for the non-contact maglev device

电子天平测力精度 0.01 g, 即 10^{-4} N; 测电流精度优于 0.01 mA。测试结果见表 2。

表 2 控制指令与输出电流、输出力之间关系记录表

Tab.2 Record sheet of the relationships among the control command, the output current, and the output force

序号	指令	电流 I/mA	质量 f/g
1	-22 400	200.576	20.32
2	-19 200	171.930	17.40
3	-16 000	143.280	14.48
4	-12 800	114.623	11.58
5	-9 600	85.950	8.66
6	-6 400	57.300	5.77
7	-3 200	28.647	2.88
8	-275	2.453	0.24
9	-220	1.949	0.19
10	-165	1.447	0.14
11	-110	0.958	0.10
12	-55	0.475	0.05
13	0	0	0
14	55	-0.518	-0.05
15	110	-1.005	-0.10
16	165	-1.499	-0.15
17	220	-2.004	-0.20
18	275	-2.488	-0.24
19	3 200	-28.688	-2.88
20	6 400	-57.357	-5.78
21	9 600	-86.033	-8.68
22	12 800	-114.703	-11.59
23	16 000	-143.400	-14.51
24	19 200	-172.093	-17.43
25	22 400	-200.785	-20.51

剔除野值点后, 输出电流的最大误差为 $\epsilon_{I, \max} = 0.071 \text{ mA}$, 相对误差计算如下:

$$\epsilon'_I = \frac{\epsilon_{I, \max} (\text{mA})}{200} \quad (20)$$

除以最大电流即得相对误差优于 0.05%, 与设计目标一致。

根据上述测试, 最终可以评估出, 非接触磁浮机构的输出力最大误差为 $4.63 \times 10^{-4} \text{ N}$, 小于设计提出的 $5.0 \times 10^{-4} \text{ N}$ 输出力精度, 可满足“双超”卫星平台的控制需求。

3 结束语

本文针对“双超”卫星平台的核心部件非接触磁浮机构, 提出了一种磁钢匀强磁场、激励线圈拓扑结构及高精度程控精密功率放大器的多参数综合优化设计与测试方法。最终的设计与测试方法显示, 非接触磁浮机构匀强磁场均匀度相对误差优于 0.1%, 输出电流的相对误差优于 0.05%, 对应的输出力最大误差为 $4.63 \times 10^{-4} \text{ N}$, 可满足“双超”卫星平台的控制需求。本文提出的多参数综合优化设计与测试方法可为未来的工程应用提供技术支撑。未来将进一步考虑卫星的在轨应用需求, 对非接触磁浮机构继续进行优化设计, 开发高精度力控、测量与限位一体化磁浮机构工程样机, 满足“双超”卫星空间应用需求。考虑到地面重力等环境干扰、模拟设备性能不足等缺陷, 需发射试验卫星在轨进一步验证“双超”卫星的精度。

参考文献

- [1] PEDREIRO N. Spacecraft architecture for disturbance-free payload [J]. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2003, 26(5):794-804.
- [2] SANNIBALE V, ORTIZ G G, FARR W H. A sub-hertz vibration isolation platform for a deep space optical communication transceiver [C]// SPIE Conference on Free-Space Laser Communication Technologies XXI. 2009:719901.
- [3] PILINSKI E B, LEE A Y. Pointing-stability performance of the Cassini spacecraft [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2009, 46(5):1007-1015.
- [4] BRUGAROLAS P, ALEXANDER J, TRAUGER J, et al. Access pointing control system [C]// Space Telescopes and Instrumentation: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. 2010:77314V.

(下转第 149 页)