

Li Peng, Ren Weijia, Li Zongfeng. Design of the static calibration test system for Lorentz actuators in space application. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(1): 92-100

空间用洛伦兹力激励器静态标定测试系统^{*}

李 鹏^{1,2,3} 任维佳^{2,3} 李宗峰²

1(中国科学院光电研究院 北京 100094)

2(中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 基于洛伦兹力的空间用电磁激励器是空间高微重力主动振动隔离系统的核心控制部件。为满足系统实时变化的控制器输出要求,必须标定激励器的设计参数,得到输出力与输入电流之间的关系。设计了一套用于激励器静态标定的自动测试系统,并对其硬件结构设计、软件模型及测试数据处理进行了介绍。系统硬件结构包含力传感器、力值显示控制仪、三轴位移台、电机驱动器模块及数据接收分发模块。系统软件采用 LabVIEW 编程技术,实现了对信号的采样、显示和存储。利用 Matlab 进行数据处理,得到相应处理结果,为激励器进一步的优化设计提供了技术依据。

关键词 振动隔离, 电磁激励器, 静态标定, 数据处理

中图分类号 V52

Design of the Static Calibration Test System for Lorentz Actuators in Space Application

LI Peng^{1,2,3} REN Weijia^{2,3} LI Zongfeng²

1(Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

2(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The static calibration test system for Lorentz Actuators of active payload-level vibration isolation system for experiments in space is systematically studied by simulations and tests. In order to meet the demand for real-time changes controller outputs in high quality microgravity vibration isolation system, actuator design parameters should be inspected and the relationship between output force and the input current should be deduced. A test system was designed, and its hardware structure, software model as well as the test program diagram, were introduced. The system hardware contains force sensors, force value shows, three axis displacement control apparatus, motor drive module and data receiving and distribution module. The LabVIEW programming technology was utilized in the system software to realize signal sampling, data displaying and storage. Finally,

* 载人航天预先研究项目资助 (030201)

2011-10-28 收到原稿, 2012-08-03 收到修定稿

E-mail: lipeng@csu.ac.cn

Matlab was used to process data. The test results provide technical basis for further optimal design of the actuators. By fitting error graphics, the correctness and rationality of the system design were verified, which provides a reliable guarantee for the normal operation of the active vibration isolation system.

Key words Vibration isolation, Electromagnetic actuator, Static calibration, Data processing

0 引言

近地轨道航天器和空间站因其所具有的微重力环境而适宜开展空间微重力科学实验. 然而, 科学实验载荷会受到各类空间扰动影响 [1], 过大的扰动将使得实验不能达到预期结果, 甚至严重歪曲或导致实验失败. 与此同时, 研究还发现, 空间飞行器自身的微重力环境水平也没有预期的理想, 在不使用主动隔振的情况下将无法满某些空间科学实验的微重力水平要求 [2]. 高微重力主动隔振系统正是为了满足科学实验载荷高微重力环境需求而研制的一套科学实验支撑系统. 其采用磁悬浮主动振动隔离技术, 为科学实验载荷提供理想的微重力实验环境.

主动隔振系统是机、电、磁、热和控制技术的综合应用装置, 其主要由支撑结构、位移传感器 (PSD)、加速度计、电磁激励器以及系统控制器组成, 设计完成的隔振系统原理样机如图 1 所示 [3].

支撑结构包括作为系统支撑单元的定子和载荷支撑单元的浮子. 为了最大限度地隔离平台上的各类扰动, 将浮子与定子在机械上完全分离, 仅由脐带线 (电缆线) 相连, 因此, 定子的振动 (平台振动) 仅

通过脐带线传递给浮子. 为进一步衰减浮子 (包括实验载荷) 上的振动, 采用了惯性加速度和相对位移两个控制回路的主动控制方式, 如图 2 所示 [1]. 加速度回路通过安装于浮子上的加速度计测量其惯性加速度 [4], 位移回路通过分体式位移传感器 (PSD) 感知隔振对象与定子之间的相对平动和相对转动. 将测量结果反馈给系统控制器, 控制器按照既定的控制策略解算出抵消实验载荷运动所需的作用力, 并驱动激励器输出反作用力, 实现振动隔离.

为实现高微重力水平, 需要激励器产生相应的力以抵消浮子运动所产生的力. 为了保证控制的精准

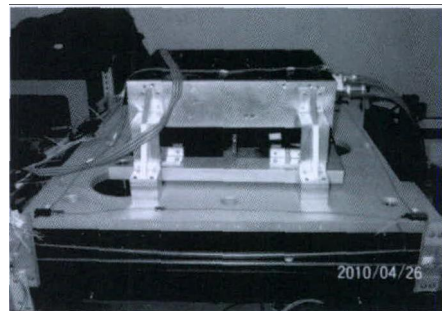


图 1 隔振系统原理样机

Fig. 1 Prototype of the vibration isolation system

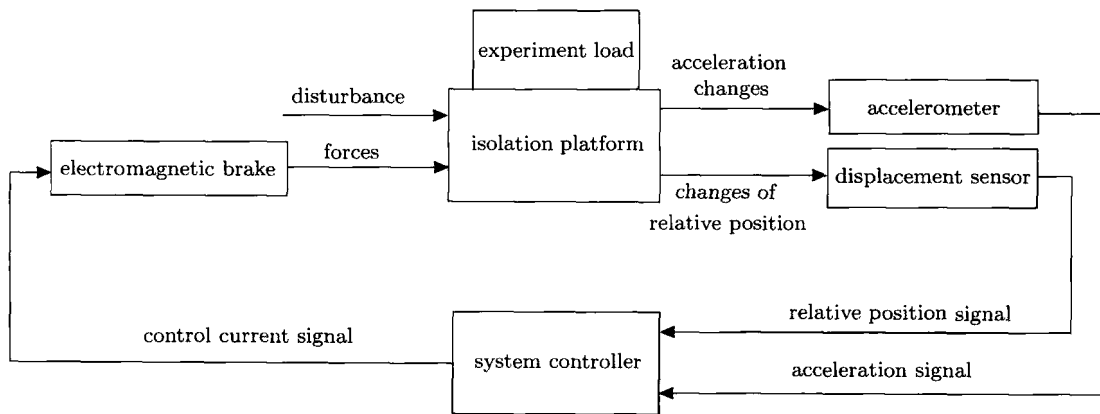


图 2 主动振动隔离系统原理

Fig. 2 Schemes of the active vibration isolation system

度, 需要得到激励器在不同位置下实际的输出力与输入电流的关系. 因此, 激励器的静态标定是确保隔振系统正常工作的重要环节之一.

1 激励器基本原理及结构形式

1.1 基本原理

主动隔振系统采用了基于洛伦兹力的电磁激励器, 其基本原理是永磁体或电磁铁产生稳定磁场, 该磁场对其中的通电导线产生作用力.

1.2 结构形式

激励器主要包括方形磁轭 (含永磁铁) 和铜丝线圈 (含线轭)^[5], 如图 3 所示.

将方形磁轭和线圈固定好之后, 在线圈中通入某一固定电流, 此时方形磁轭自带的永磁铁与通电线圈之间产生作用力. 调整电流的大小及方向可以实现非接触的主动控制.

2 静态标定测试系统方案

静态标定目的是为了验证激励器的设计参数, 其关键是得到输出力与输入电流之间的关系. 相比于有限元法或解析法等理论分析方法, 该测试系统能够

得到实际控制系统设计所必需的实测激励器输出力与输入电流的关系模型, 并且可与理论计算结果相互验证.

根据激励器静态标定需求, 为得到恒定电流通电线圈在磁场中运动产生洛伦兹力的电流-力模型, 激励器静态标定测试系统设计方案如下: 通过驱动器控制下的三轴位移台, 调整激励器通电线圈在匀强磁场中的位置, 力传感器实时测量磁轭受到的洛伦兹力, 位移台控制和力值测量则通过上位机自主开发的一套 LabVIEW 程序进行驱动和采集, 确保时间同步. 标定系统的工作流程如图 4 所示.

3 静态标定测试系统设计

测试系统主要包括硬件和测试软件两部分. 测试系统硬件主要有: 三轴位移台、电源 (2 个, 电压分别为 22 V 和 5 V)、步进电机、串口线路、高性能步进电机细分驱动器、数据分发端电路板、力值显示控制仪、上位机等. 测试软件是基于 LabVIEW 自主开发的包括有电机驱动、力值采集和数据处理等功能的应用程序 (含用户界面).

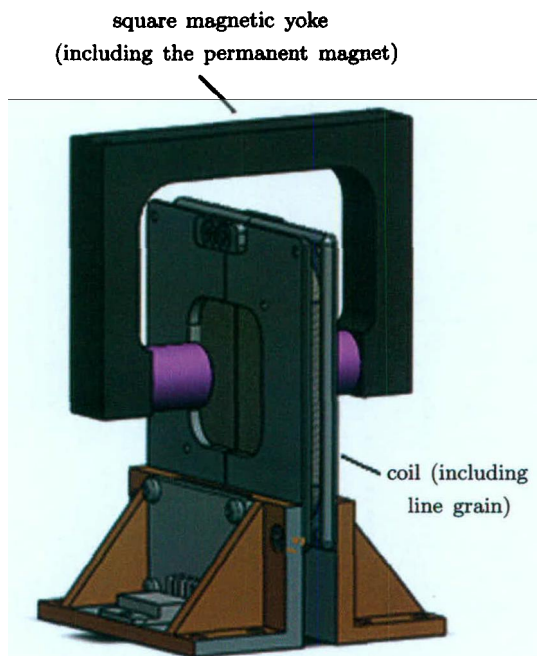


图 3 激励器结构形式
Fig. 3 Structure of the actuator

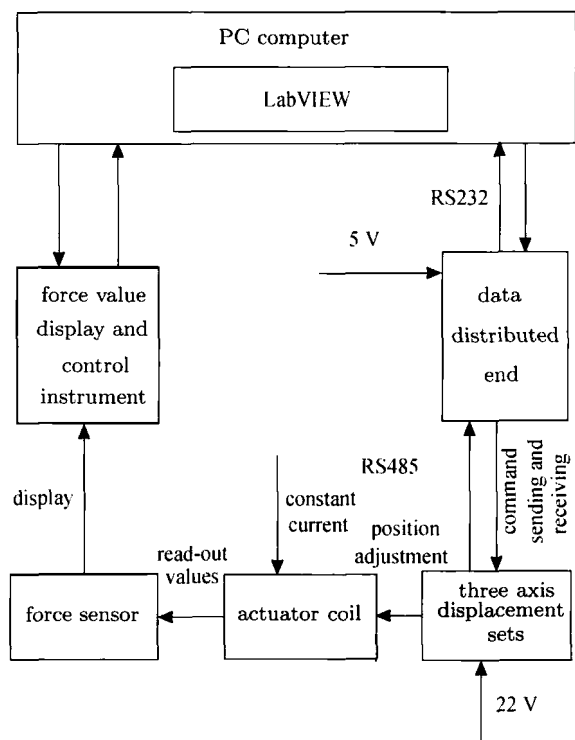


图 4 标定系统组成
Fig. 4 Composition of the calibration system

3.1 外购器件选型

测试系统需要外购的器件主要有力传感器、三轴位移台(含高性能步进电机驱动器)。

(1) 力传感器

经计算,磁轭和永磁体(含工装)自重约为 0.3 kg (3 N),激励器的最大力为 4 N。当传感器应变力方向与磁轭和永磁体(含工装)的重力方向一致且激励器输出最大力值时,传感器受力最大可达 7 N,即力传感器量程不应小于 7 N。这里所选传感器量程为 9.8 N (1 kg),总精度(含应变体精度和仪表精度)优于千分之一,即保证 XSB5 显示控制器显示值的误差在 0.01 N (1 g) 以内,满足测量要求。

(2) 三轴位移台及其步进电机驱动器

静态标定试验要求定位精度小于 0.05 mm。经调研,电动位移台螺杆导程为 4 mm,分辨率 1.25 μm,重复定位精度小于 5 μm,满足精度要求;与其搭配所

用驱动器频率 2000 Hz, 1/64 分频后为 31.25 Hz。所用步进电机每脉冲运行 1.8°。

3.2 硬件设计

测试系统自主开发设计的部件主要有数据分发端电路板和结构工装件等。

(1) 数据分发端电路板

测试过程中共有 3 路信号同时或依次采集数据并上传至上位机,由上位机发出指令分发到 3 路步进电机,根据需要设计了一种数据分发端电路板。该电路板主要包括 mcs_51, motor, pre_div 和 freq_div 模块,其硬件组成及与上位机和高细分步进电机驱动器的连线分别如图 5 和图 6 所示。

(2) 结构工装件

结构工装件主要包括安装支座、横梁以及工装支角等。激励器固定方法如图 7 所示,将磁轭(含永磁体)通过工装支角与力传感器应变体一端连接,力

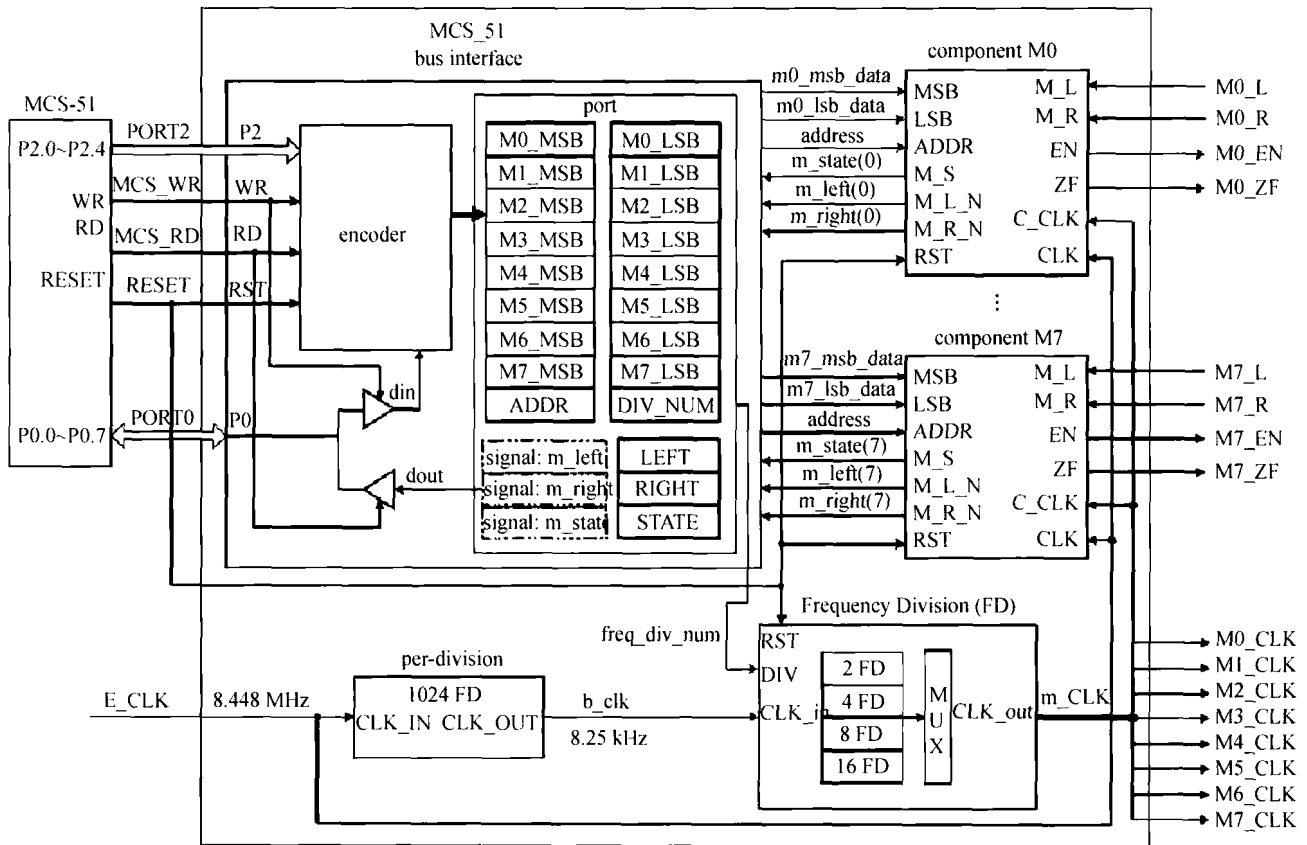


图 5 数据分发端硬件组成

Fig. 5 Principle diagram of data distribution

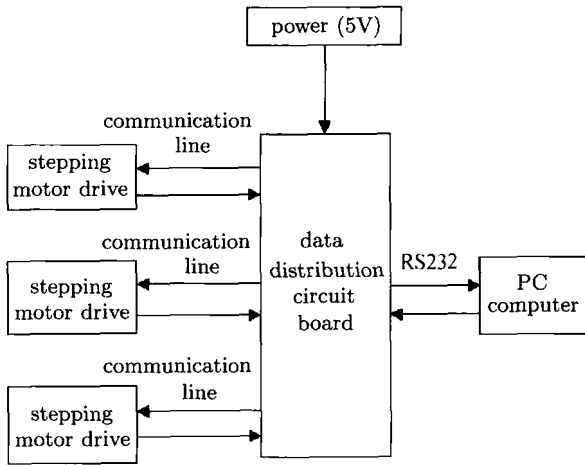


图 6 数据分发端与其他设备连线

Fig. 6 Connection layout between data distribution circuit board and other devices

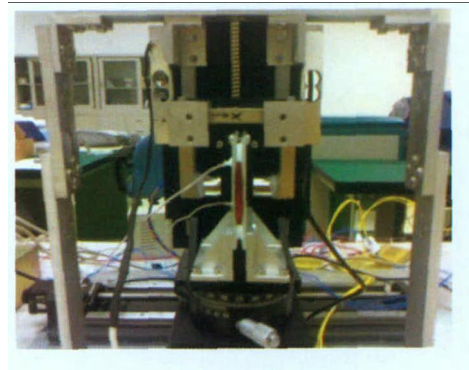


图 8 x 向传感器固定方式实物照

Fig. 8 Photo of sensors for x-axis

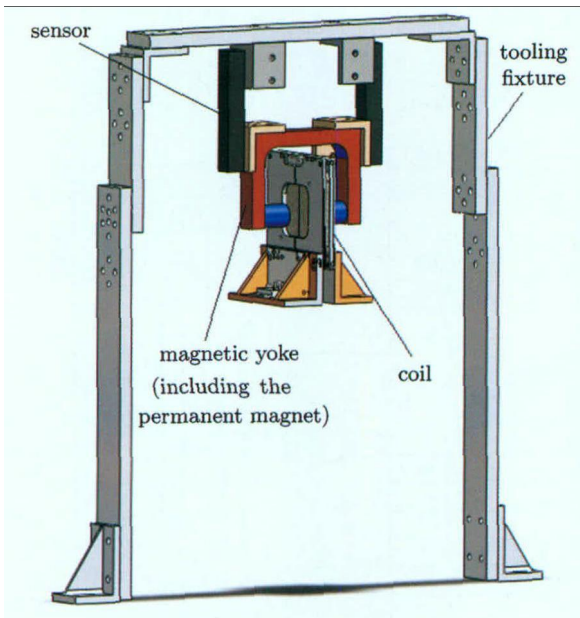


图 7 x 向传感器固定方式示意

Fig. 7 Fixed way of sensors for x-axis

传感器应变体另一端直接 (测 y 向磁轭所受作用力) 或通过工装支角 (测 x, z 向磁轭所受作用力) 固定在安装支座上; 线圈 (含线轭) 通过搭接工装 (调节安装孔径和孔位) 固定在三轴位移台上, 使线轭保持竖直且线轭几何中心对准磁铁中心; 给线圈加电, 测量不同电流下力传感器的读数。

为消除转矩的影响 (由于很难保证力传感器的测量方向通过磁轭质心, 这样会产生一个附加转矩,

影响力传感器的读数), 需要选用两套单向力传感器, 输出洛伦兹力大小为两传感器读数的均值, 且测量每个方向的力值时, 需保证应变片方向处在相应的方向上. 激励器需要完成 x, y, z 三个方向力的测量, 因此, 磁轭 (含永磁铁)、力传感器和固定支座共有 3 种组合方式. x 向传感器固定方式示意如图 7 所示, 设计完成的激励器固定实物照见图 8, 传感器箭头指向传感器应变片的位置。

3.3 软件系统设计

测试过程中, 三轴位移台要带动线圈 (含线) 持续地变换位置 (每个位置点设计停留 5s), 并保证激励器遍历线圈每一个预定位置点. 激励器运动到线圈某个位置点的同时, 上位机实时采集并存储力值控制显示仪经由传感器得到的相应力值, 实现上位机硬件部分的双向通信。

激励器测试系统采用 LabVIEW 软件进行设计. 软件流程如图 9 所示. 本激励器静态标定测试软件包括两个部分: 主程序 VI 和十六进制转换子 VI. 为便于控制, 设计了软件的人机交互界面, 其功能如下。

窗口左侧设定的功能有: 通信口选择 (COM5) 代表三轴位移台的通信口, 波特率设定 (38400), 有无校验位选择, 指令设定包括是否十六进制显示, 是否清空数据接收区、定时、步长延迟设置等。

窗口中间为数据的显示部分, 包括发送指令区、当前指令显示区、接收数据区。

窗口右侧包括浮子位置标示区、手动调节开关区及力值采集区. 浮子位置标示区显示了初始浮子坐标以及当前浮子的坐标状态; 手动调节开关可以按照需要在 x, y, z 处输入需要电机运动的步数, 调整

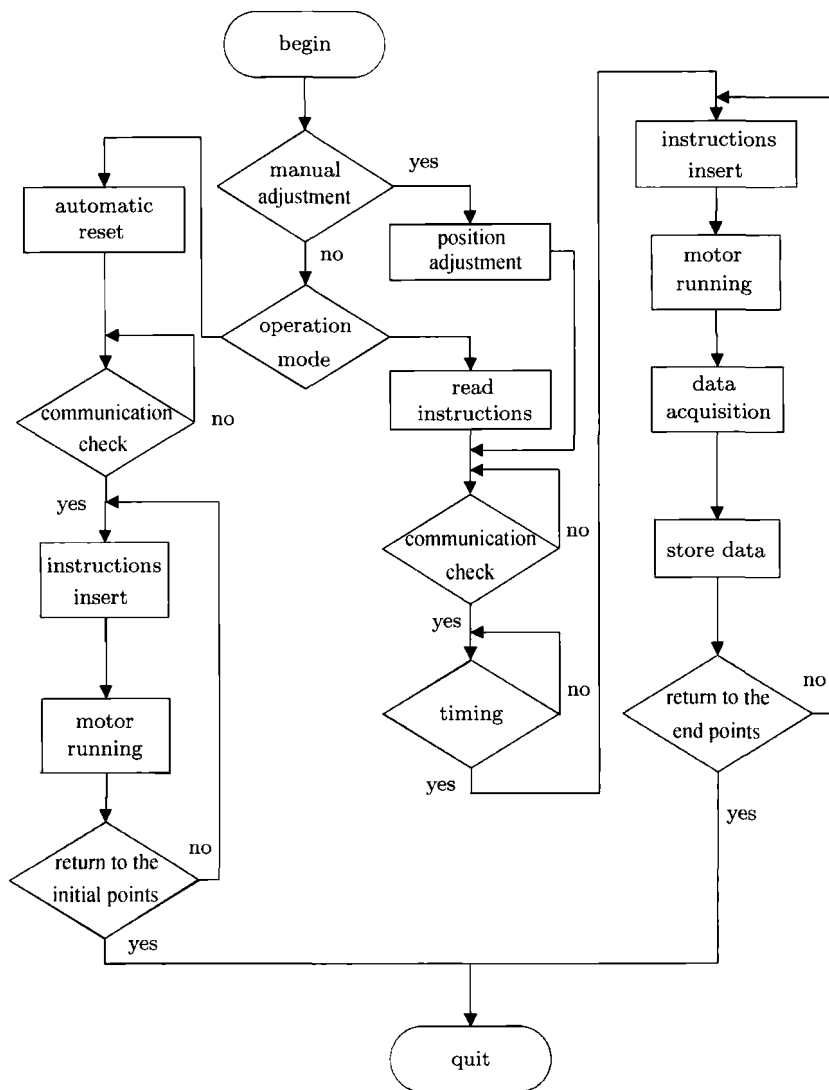


图 9 激励器测试软件流程
Fig. 9 Actuator test program flow diagram

三轴位移台的位置; 力值采集区采集两路力传感器的值并显示, 以 TXT 格式存储到指定文件夹, 其采集模式为, 位置台到达一定位置, 传感器读数稳定后, 首先采集第一路信号, 然后采集第二路信号, 中间相隔时间为 ms 甚至更低级别, 采集完第二路信号后, 电机指令再次发出, 位移台移动位置, 进行下一轮循环.

4 测试系统实现

4.1 静态标定测试系统建立

电路硬件线路连接方式包括两部分.

(1) 步进电机部分

如图 10 所示, 将 22V 的电源正负极分别连接到高细分驱动器的 < +40V 和 GND 端口; 串口线按照分配的功能分别连接到 A+, A-, B+, B- 端口, 将 5V 电源接到 +COM 光电隔离电源公共端, 由 CP (脉冲信号, 下降沿有效)、DIR (方向控制信号)、FREE (驱动器使能) 输出的信息连接到相应的数据分发端端口上 (可自行定义); 最后由数据分发端经过 232 串口接到上位机, 至此完成一个驱动器的电路连接. 本次使用 3 个电机驱动器, 只需将 2 个电源的正负极在 3 个驱动器之间串联, 然后将其各自的

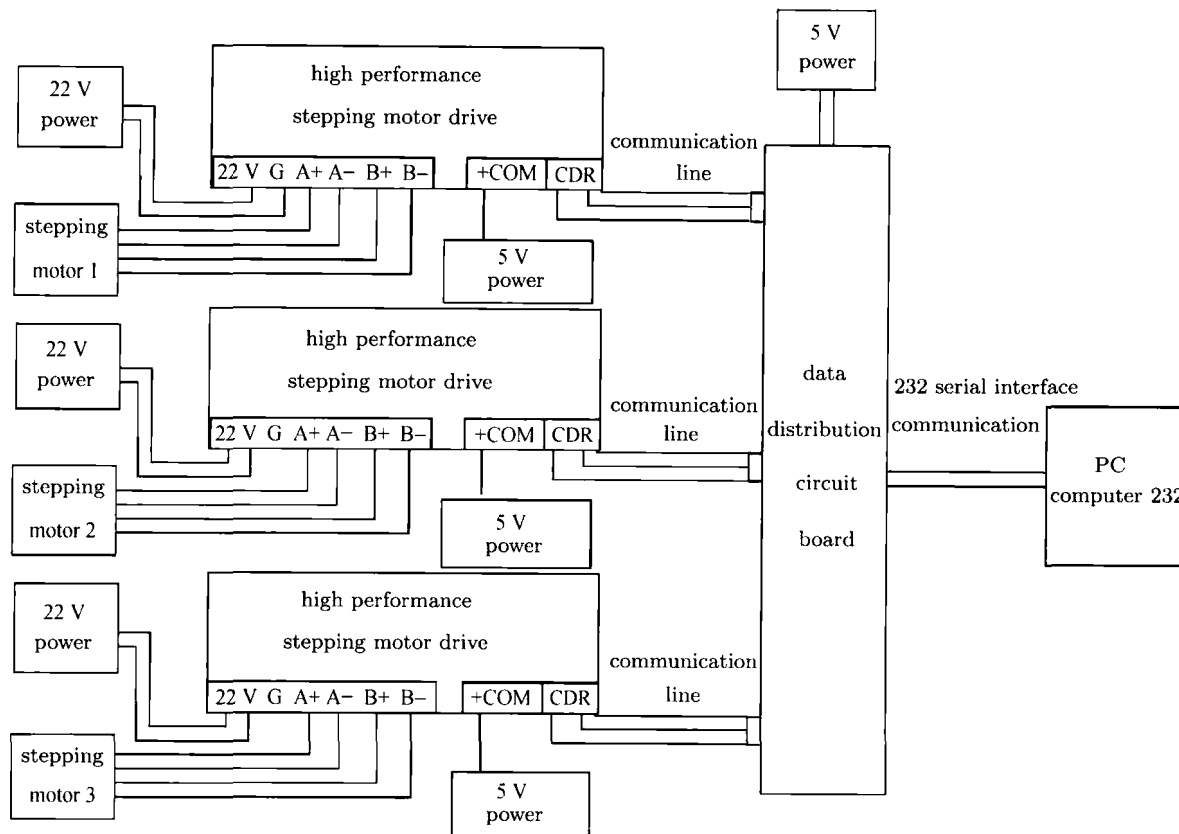


图 10 步进电机部分连接线路

Fig. 10 Stepping motor actuators connected route map

CP(C), DIR(D), FREE(F) 信息分别连接到数据分发端上。

(2) 力值显示控制仪部分

直接将力传感器与力值显示控制仪通过传输线端口连接, 力值显示控制仪接收到传感器数据后, 由自带的 485 串口通信端口通过 485 转 232 模块之后, 直接读入到上位机相应的软件中。

4.2 测试步骤

激励器静态标定系统测试步骤如下。

① 手动调节激励器与线圈的初始相对位置。首先, 力传感器采集激励器线圈产生的力值后, 由力值显示控制仪采集, 经由 LabVIEW 编写的控制软件发出指令, 将该力值数据读入上位机并与坐标相对应存储。

② 初始点的力值采集完成后, 由控制软件自动控制三轴位移台使其在某个轴方向移动 1 个步长 (这里为 2 mm), 移动完成后再次进行数据的采集存储。重

复这一过程直至激励器遍历线圈所有预设的点。

③ 改变线圈电流值, 再次重复以上过程。

5 激励器测试过程及数据处理

5.1 数据处理原理

公式 $F = ILB$ 是数据处理的重要依据, 对激励器而言, 式中, I 为线圈通电电流, L 为线圈等效长度, B 为线圈处等效磁通密度; B 的大小和方向以及 L 都是线圈 (含线轭) 和磁轭 (含永磁铁) 之间相对位置的函数。以方形磁轭 (含永磁铁) 两永磁体轴向中心为圆心, 建立如图 11 所示的坐标系。

$F = ILB$ 可以表示为

$$F = If(x, y, z). \tag{1}$$

由于激励器线圈处在一个非匀强磁场中, 特别是当线圈远离中心位置时会存在较明显的非线性特征。

这里通过改变电流幅值来实现对激励器输出力与输入电流关系模型的精确修订。激励器静态试验数据 x, y, z 三个方向共 2187 组, 包括当 I 取为 2 A, 1.5 A, 1 A 时空间 ± 8 mm 之内, 以 2 mm 为步长的所有点, 以及当线圈在坐标原点处 I 以 0.1 A 为步长从 0.1 A 到 2 A 变化的数据。

由式 (1) 可得激励器力常数

$$F/I = f(x, y, z).$$

将 x, y, z 作为自变量, F/I 作为因变量, 以最小二乘法拟合数据。使用 Matlab 中的 REGRESS 函数, 分别令 $f(x, y, z)$ 为二次、三次、四次函数, 求得拟合结果。

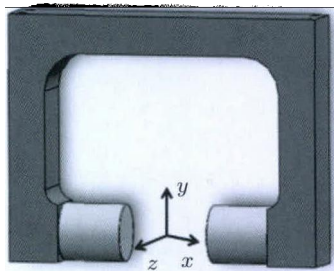


图 11 激励器坐标系

Fig. 11 Actuator coordinate system

5.2 实验数据处理

通过以上系统可以得到所需数据, 即在给定电流下激励器线圈不同位置的输出力。将通过 LabVIEW 得到的数据直接导入到 Matlab 中进行拟合, 然后对拟合常数项、拟合误差曲线及数据非线性分析进行考察。试验中一共测试了 8 组激励器, 从得到的数据中可以看出其一致性较好。限于篇幅, 这里介绍 No.1 激励器线圈在 1 A 恒流状态下 x, y, z 三个方向的四次函数拟合情况, 拟合函数

$$f(x, y, z) = [\mathbf{X}_4, 1] \times \mathbf{K}_4.$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_4 = & [x, y, z, x^2, xy, xz, y^2, yz, z^2, x^3, x^2y, \\ & x^2z, xy^2, xz^2, xyz, y^3, y^2z, yz^2, z^3, x^4, x^3y, \\ & x^3z, x^2y^2, x^2z^2, x^2yz, xy^3, xy^2z, xyz^2, \\ & xz^3, y^4, y^3z, y^2z^2, yz^3, z^4]. \end{aligned}$$

(1) 常数项

由 Matlab 中 REGRESS 函数拟合分别得到 3 个方向的拟合系数。关注拟合系数的常数项如下。x 方向力拟合常数项为 -0.0085, y 方向力拟合常数项为 1.3476, z 方向力拟合常数项为 0.0037, 可知 y 方向力为激励器的主向力。

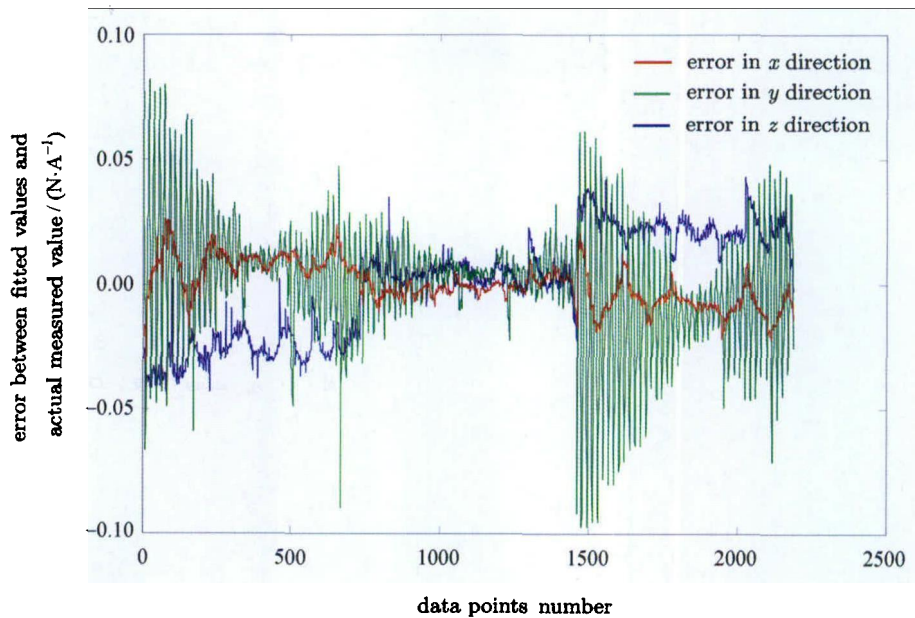


图 12 No.1 激励器 x, y, z 方向四次函数拟合误差

Fig. 12 Quartic function fitting error for No.1 actuator in x, y, z direction

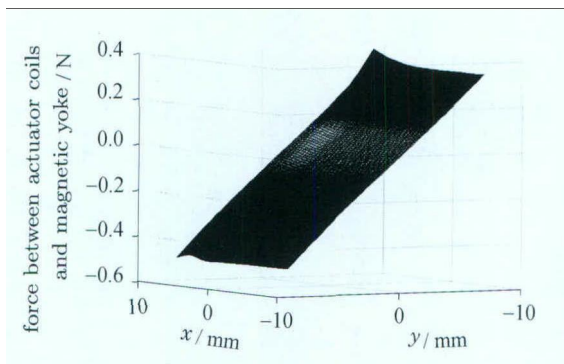


图 13 $z = 0$ 平面处力值拟合曲面

Fig. 13 Fitting surface of the force value for the plane of $z = 0$

(2) 拟合误差图形

以试验数据点的编号为横坐标, 力常数拟合函数与实测值之差为纵坐标, 得到的误差曲线如图 12 所示. 取四次函数拟合, 可保证大部分的数据误差在 $\pm 0.02 \text{ N} \cdot \text{A}^{-1}$ 以内 (超出部分可视为奇点), 相对值在 $\pm 1.5\%$ 以内.

(3) 数据非线性分析

由图 13 可知, 数据在中央绝大部分区域线性良好, 在边界处呈现出一定的非线性.

6 结语

在高微重力主动振动隔离系统原理样机的研制背景下, 结合系统激励器静态标定的需求, 提出了激励器静态标定系统的设计方案, 并给出了标定系统的详细设计. 根据这个系统得出了全部 8 个激励器的静

态测试数据, 即输出力与输入电流的关系. 通过 Matlab 对实验数据进行处理, 得到输出力与输入电流之间关系的拟合方程, 为激励器优化设计提供了基础; 由拟合误差图形验证了系统设计的合理性和正确性, 为主动隔振系统的正常运行提供了可靠保证.

参考文献

- [1] Li Zongfeng, Ren Weijia. Space microgravity active vibration isolation technology research [J]. *Manned Spaceflight*, 2010, **16**(3):24-32. In Chinese (李宗峰, 任维佳. 空间微重力主动隔振技术研究 [J]. 载人航天, 2010, **16**(3):24-32)
- [2] Liu Chunhua, Ni Runli. Recoverable satellites and space science experiments in China [J]. *Chin. J. of Space Sci.*, 2009, **29**(1):124-129. In Chinese (李春华, 倪润立. 中国返回式卫星与空间科学实验 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**(1):124-129)
- [3] Li Zongfeng. D position measurement of active vibration Isolation system under space microgravity [J]. *J. Astron.*, 2010, **31**(6):1625-1629. In Chinese (李宗峰. 空间微重力环境下主动隔振系统的三维位置测量 [J]. 宇航学报, 2010, **31**(6):1625-1629)
- [4] Li Zongfeng, Ren Weijia, Wang Anping. Study on acceleration measurement in space high quality microgravity active vibration isolation system [J]. *J. Vib. Shock*, 2010, **29**(12):211-215. In Chinese (李宗峰, 任维佳, 王安平. 空间高微重力主动隔振系统加速度测量研究 [J]. 振动与冲击, 2010, **29**(12):211-215)
- [5] Chen Jinxin, Wang Yu. Study on actuators of magnetic suspension platform under microgravity environment in space [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2008, **28**(6):584-591. In Chinese (陈进新, 王宇. 空间微重力磁悬浮平台激励器研究 [J]. 空间科学学报, 2008, **28**(6):584-591)