

系统与附件

一种新型电磁作动器的仿真分析及试验验证

王 蛟, 沈建平

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 针对目前电磁作动器电磁力小、漏磁严重等问题, 设计出一种对称式双线圈多永磁体反向串接结构的作动器。研究了该作动器的共振频率、幅值与作动器刚度、阻尼之间的关系; 采用有限元电磁场仿真分析了该作动器的磁场分布和线圈所受的电磁力, 并通过试验加以验证。

关键词: 电磁作动器; 主动控制; 仿真; 试验

中图分类号: TM574 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)02-0041-04

Simulation Analysis and Experimental Verification of a New Type of Electromagnetic Actuator

Wang Jiao, Shen Jianping

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: As the current electromagnetic actuator has the problems of small electromagnetic force and magnetic leakage, etc., a kind of actuator featuring symmetric double coil multi-permanent magnet with reverse concatenated structure was developed. The relationship of resonant frequency and amplitude of the actuator with the rigidity and damping of the actuator was studied. The finite element electromagnetic field was used to simulate the magnetic field distribution of the actuator and the electromagnetic force of the coil, which was verified by tests.

Key words: electromagnetic actuator; active control; simulation; test

0 引 言

振动被动控制技术不需要外界能量, 装置结构较简单, 易于实现, 经济性与可靠性好, 且在许多场合下减振效果已能满足要求, 因此, 在工程领域中得到广泛应用^[1]。然而, 随着振动控制的要求越来越高, 特别是被动控制理论上只能对设备安装频率的 1.414 倍进行隔离, 而且当结构固定之后, 无法跟踪激励频率的变化, 所以对振动主动控制方法的研究逐渐得到重视^[2]。

振动主动控制研究的热点和难点主要在两个方面: 一是控制技术的研究, 即控制理论及新的算法和手段在振动主动控制领域的应用; 二是作动器的研究。而且随着主动控制技术的发展, 后者变得越

来越重要。作动器的研究是工程应用的实际问题, 是主动控制能否实际应用的关键^[3], 设计出响应迅速、出力大的作动器是工程应用的重点和难点。作动器的种类较多, 目前常用的有电磁作动器、液压作动器、压电作动器、磁致伸缩作动器、电致伸缩作动器、气动作动器等。电磁作动器因其结构紧凑、反应灵敏、输出位移大、适用频带宽, 在许多领域得到广泛应用^[4]。

本文根据柴油机振动主动控制系统的特点, 研制出一种新型电磁作动器, 并进行理论建模, 仿真与试验分析。结果表明: 该作动器具有结构紧凑, 能量密度高、漏磁小、出力大等特点, 能够满足柴油机振动主动控制的要求, 应用前景广阔。

收稿日期: 2017-10-25

作者简介: 王蛟(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为振动主动控制, 634611711@qq.com。

1 电磁作动器的结构原理

根据主磁路磁场形成机理的不同,电磁作动器可分为永磁型和电磁型两类。永磁型是指用永磁体构成作动器的主磁路磁场;而电磁型则是利用励磁线圈和导磁材料(如硅钢片等)形成作动器的主磁路磁场。本文设计的是永磁型电磁作动器,其结构如图1所示。

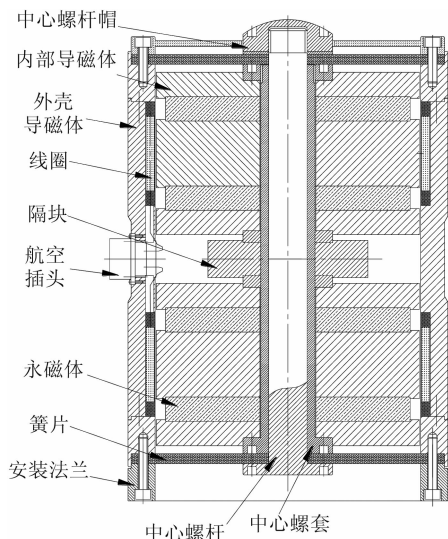


图1 电磁作动器结构简图

2 作动器的动力学模型

电磁作动器可以简化为单自由度模型,由作动器动子部分和上下簧片组成动力学模型,如图2所示。

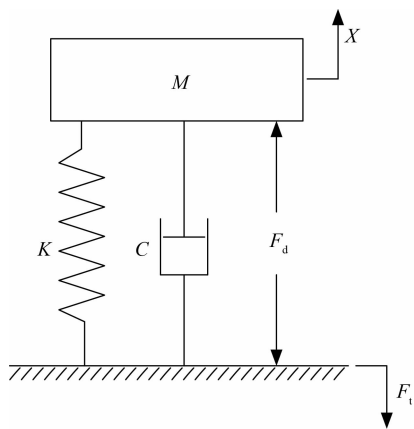


图2 作动器力学模型图

根据上述电磁作动器结构,其动力学问题可以简化为作动器动子质量在受电磁力激励下的单自由度系统的受迫振动,如图2所示。动子质量为 M ,位移为 X ,上下簧片等效刚度为 K ,阻尼为 C ,线圈受到的电磁力为 F_d ,电磁作动器对基座的输出

力为 F_t 。建立系统的运动微分方程:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F_d \quad (1)$$

作动器的对外输出力为:

$$F_t = F_d - C\dot{X} - KX \quad (2)$$

由上述两式可得:

$$F_t = M\ddot{X} \quad (3)$$

由式(3)可知:作动器对外输出力是由作动器动子的惯性力提供。通过对式(1)和式(3)做拉氏变换,可以得到作动器输出力和与电磁力的传递函数:

$$\frac{F_t(s)}{F_d(s)} = \frac{Ms^2}{Ms^2 + Cs + K} \quad (4)$$

将模型参数 $M = 35.6 \text{ kg}$, $C = 100 \text{ (N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$, $K = 26000 \text{ (N} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}$ 代入式(4),得到作动器输出力与电磁力之间的频响关系曲线,如图3。

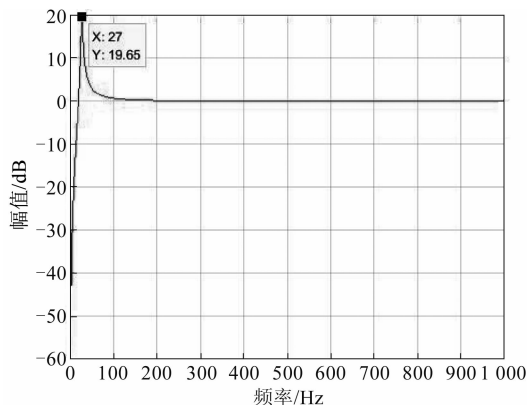


图3 输出力与电磁力之间的频响曲线

由图3可以看出:振动器的共振频率 ω_n 为27 Hz;在共振频率至1 kHz,作动器的输出力与电磁力呈线性关系。由于电磁力与输入电流呈正比,因此,在振动主动控制中,可以通过改变作动器输入电流的方式实现对作动器输出力的控制。当频率 ω 远大于共振频率 ω_n 时,作动器的输出力与电磁力几乎相等。

通过改变模型参数 K ,增加一倍或减少50%,得出频响关系曲线如图4。由图4可以看出:作动器的共振频率随刚度的增大而增大,而 K 值的改变对线性频段的幅值影响不大。

改变模型参数 C ,增加一倍或减少50%,得出频响关系曲线如图5。由图5可以看出:阻尼的改变影响作动器共振频率的幅值,对线性频段的幅值几乎没有影响。

通过上述分析可知,作动器的簧片刚度和阻尼主要影响作动器的共振峰频率大小和共振频率幅

值，对作动器的输出力影响不大。作动器的输出力主要由线圈所受的电磁力决定，因此须要对作动器线圈受到的电磁力进行仿真计算。

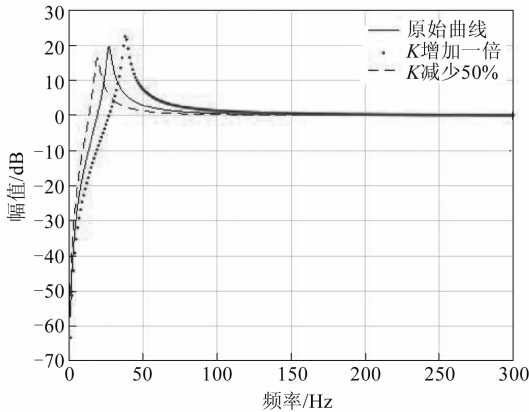


图 4 作动器刚度 K 变化后的频响曲线

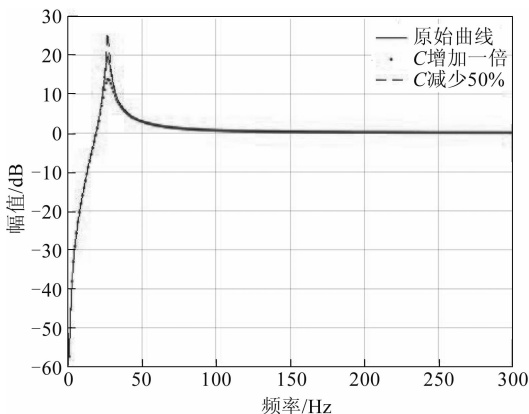


图 5 作动器阻尼 C 变化后的频响曲线

3 线圈电磁力计算

使用 ANSYS 对设计的作动器进行磁场仿真，计算作动器的磁场分布和线圈所受的电磁力。作动器可近似为轴对称模型，可用二维模型代替三维模型进行分析，简化模型示意图如图 6。

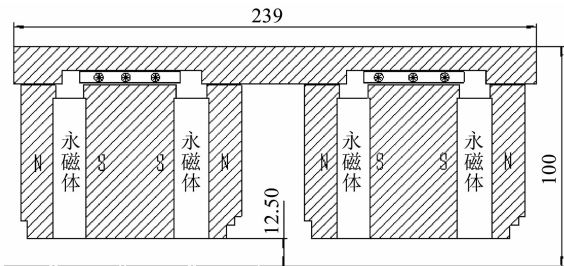


图 6 作动器简化模型

模型主要由外壳导磁体、内部导磁体、永磁体和线圈组成。作动器内部可动部分与外壳间隙 0.7 mm 。永磁体采取轴向充磁的方式，并且每对永磁体采用 N、S 方向相反的安装方式，两对永磁体充

磁方向如图 6。在实体结构中，线圈骨架和轴均为不导磁材料，所以建模时将这些部件作为空气区域处理。

在整个模型周围建立空气层考虑漏磁，忽略磁滞现象，且假定各部件的磁导率是恒定的，即为线性材料。基于以上假设，由于对称性，只取实体的一半，运用有限元软件 ANSYS 进行建模分析，主要步骤如下：

- (1) 创建物理环境；
- (2) 建立模型，划分网络，对模型的不同区域赋予特性；
- (3) 加边界条件和载荷；
- (4) 运行程序求解运算；
- (5) 后处理。

建立几何模型如图 7，定义各区域的材料属性，根据线圈匝数，按输入电流为 10 A 计算电流密度，施加边界条件后求解运算，可得到模型的磁力线分布，如图 8。

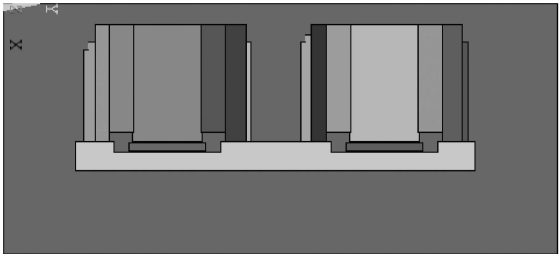


图 7 有限元几何模型

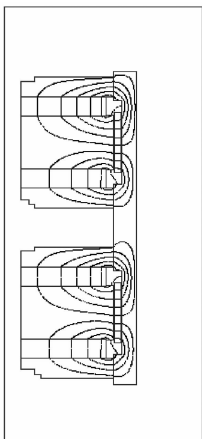


图 8 磁力线分布图

由图 8 可以看出：磁力线分布主要集中在外壳导磁体和内部导磁体，形成闭合的磁场回路，漏磁少；在壳体模型内侧磁场强度最强，且在线圈位置处，磁场强度分布均匀。电磁力计算结果如图 9。

图 9 分别为采用 Maxwell 应力张量方法和虚功方法计算得到的受力数据，这两种方法所得到的均

是对应线圈整体的受力数据,分别为 1 357 N 和 1 204 N。

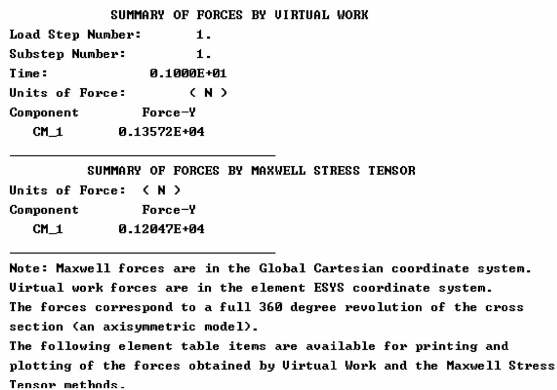


图9 电磁力计算结果

4 试验研究

试验台架如图 10 所示,力传感器刚性固定在导轨地基上,在力传感器上加装了作动器安装过渡板。试验时,信号发生器发出信号,信号通过功率放大器后被送入作动器,驱动作动器运动;安装在作动器和基座间的力传感器对作动器的出力进行测量;测量得到的数据通过电荷放大器后输入到数据采集仪进行分析和处理。在试验过程中输入为 1 V (对应 Rms 1 A 电流) 的 0 ~ 300 Hz 扫频信号,得到频响曲线,和仿真曲线对比如图 11。

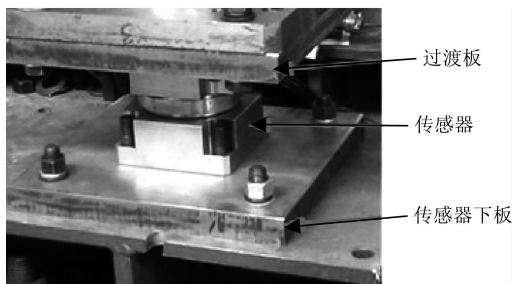


图10 作动器和力传感器的垂向安装夹具

由图 11 中可知:作动器试验的共振峰频率为 27 Hz,与理论仿真结果一致;在线性频段工作范围内,出力值约 42.74 dB/N/A,换算为 10 A 电流输入时的出力大小为 1 370 N,与有限元软件 Maxwell 应力张量法计算结果吻合,验证了电磁仿真计算的正确性;试验频响曲线与理论模型仿真曲线一致,数值上相差一个电磁力系数;出力性能和线性

频段范围能够满足柴油机振动主动控制中对作动器的要求。

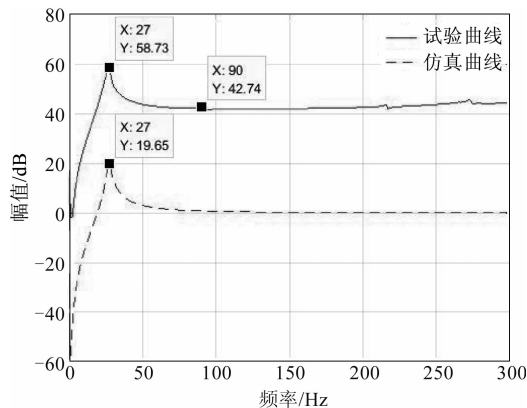


图11 试验频响曲线和仿真曲线对比

5 结论

(1) 本文设计了对称式双线圈多永磁体反向串接结构的作动器,理论分析表明:该作动器的输出力等于动子质量的惯性力,大小主要由线圈所受的电磁力决定。

(2) 刚度和阻尼主要影响作动器的共振峰频率和共振位置的幅值,对线性频段的出力值影响不大。

(3) 有限元仿真计算和样机试验表明:该结构的作动器具有漏磁小,出力大等优点。

(4) 通过样机试验测试得到作动器的出力性能数据与电磁仿真数据,比较表明:针对该型电磁作动器,使用 Maxwell 应力张量法计算得到的电磁力更接近实际值,为以后仿真计算提供了参考。

参考文献

- [1] 李雨时,周军,钟鸣,等.基于压电堆与橡胶的主被动一体化隔振器研究[J].振动、测试与诊断,2013,33(4):571-577.
- [2] 官涛.基于FPGA+DSP的振动主动控制器的研制[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [3] 杨铁军,靳国永,刘志刚,等.船舶动力装置的主动控制[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2011.
- [4] 侯军芳,白鸿柏,陶帅,等.电磁作动器在主动隔振系统中的频响及耦合特性[J].振动与冲击,2008,27(11):177-181.