

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.05.011

# 管路主动减振系统作动器设计

曾威璋, 郑水英

(浙江大学能源工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**为提高管路主动减振系统中动磁式直线电机的减振效果,课题组提出了适用于不同情况的作动器的设计思路。以等效磁路法为基础,得到了作动器的电磁特性;利用有限元软件 Ansoft Maxwell 模拟仿真得出相关参数,并与公式计算的结果进行对比,确认设计具有合理性。应用此方法可以根据实际需求设计不同性能参数的作动器。

**关键词:**管路振动;动磁式直线电机;等效磁路法;电磁力;Ansoft Maxwell

中图分类号:O353.1;TB115.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)05-0057-06

## Actuator Design of Pipeline Active Vibration Damping System

ZENG Weizhang, ZHENG Shuiying

(College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** To improve the vibration damping effect of the moving magnetic linear motor in the pipeline damping system, a design suitable for the specific conditions of the piping system was proposed. Based on the equivalent magnetic circuit method, the electromagnetic characteristics of the actuator were obtained. The relevant parameters were obtained by using the finite element software Ansoft Maxwell, and compared with the results calculated by the formula to confirm the rationality of the design. This method can be applied to design actuators with different performance parameters according to actual needs.

**Keywords:** pipe vibration; moving magnetic linear motor; equivalent magnetic circuit method; electromagnetic force; Ansoft Maxwell

管路是流体传输、传动和控制工程中用以输送流体介质、传递流体动力和流体信息不可缺少的元件,在工业中被广泛应用<sup>[1]</sup>。气水管道系统易受系统设计取值、系统安装布置以及系统实际运行情况等多种因素的影响<sup>[2]</sup>。活塞式压缩机或往复泵工作的间歇性引起气流压力和速度呈周期性变化,称作“流体脉动”。流体脉动是管路系统发生振动的主要原因之一<sup>[3]</sup>。强烈的振动会引起管件焊缝疲劳破坏,发生泄漏,甚至造成火灾、爆炸等重大事故,对安全生产不利<sup>[4]</sup>。因此对管路系统振动和减振技术的研究很有必要。

管路系统的减振可分为被动、主动和混合减振,随着自动控制技术和计算机技术的飞跃发展,振动控制理论从被动控制开始往主动控制方向发展<sup>[5]</sup>。压电

直线电机是众多压电作动器中的一类,具有结构简单、定位精度高及设计形式多样等优点,近年来受到国内外学者的广泛关注<sup>[6]</sup>。在管路主动减振系统中,动磁式直线电机作为作动器系统的核心部件,需要从理论和模拟上进行研究。

### 1 基于等效磁路法作动器电磁性能的研究

任何机电装置都是由电系统、机械系统和联系两者的耦合电磁场组成的。利用能量守恒定理,用磁链  $\Psi$  和位移  $x$  作为独立变量,得到电磁力  $F_e$  表达式<sup>[7]</sup>:

$$F_e = - \left. \frac{\partial W}{\partial x} \right|_i; \quad (1)$$

$$\Psi = N\Phi. \quad (2)$$

式中:  $W$  为系统的磁功能,  $i$  为线圈瞬时值,  $N$  为线圈匝数,  $\Phi$  为线圈交变磁通。

收稿日期:2019-03-07;修回日期:2019-07-02

基金项目:国家重点研发计划项目:危险化学品储存设施燃爆毁伤效应及事故调查技术(2016YFC0801204)。

第一作者简介:曾威璋(1994),男,湖南安乡人,硕士研究生,主要研究方向管路振动主动控制。E-mail:83956804@qq.com

变量之间的关系:

$$dW = F_e(t) dx + \Psi di. \quad (3)$$

作动器的磁路由励磁线圈、内外轭铁、永磁体、永磁体支架、支座和气隙组成。由于它是轴对称结构,故其磁路结构可简化,如图1所示。

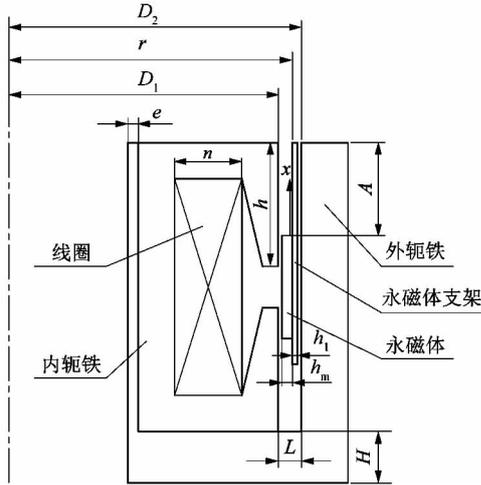


图1 动磁式电机结构

Figure 1 Structure of moving magnetic motor

在图1中,气隙中径为 $r$ ;内轭铁的外径为 $D_1$ ;外轭铁的内径为 $D_2$ ;永磁体厚度为 $h_m$ ;永磁体支架厚度为 $h_1$ ;支座的高度为 $H$ ;线圈厚度为 $n$ ;永磁体运动时偏离平衡处的位移为 $x$ ;永磁体平衡处与内轭铁顶部的距离为 $A$ ;永磁体与内、外轭铁间的气隙宽度均为 $m$ ;内轭铁齿高为 $h$ ;空气的磁导率为 $\mu$ ;永磁体相对磁导率为 $\mu_r$ ;支座的厚度为 $e$ ,内、外轭铁间隙为 $L$ 。

表1 等效磁阻阻值

Table 1 Equivalent magnetoresistance value

$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
$m/[\mu\pi D_1(h-A+x)]$	$m/[\mu\pi D_2(h-A+x)]$	$m/[\mu\pi D_2(h-A-x)]$	$m/[\mu\pi D_1(h-A-x)]$
$R_{a1}$	$R_{a2}$	$R_{b1}$	$R_{b2}$
$L/[2\mu\pi r(A-x)]$	$L/[2\mu\pi r(A-x)]$	$h_m/[2\mu\mu_r\pi r(h-A+x)]$	$h_m/[2\mu\mu_r\pi r(h-A-x)]$

永磁体为环形并沿径向充磁,沿径向方向的厚度为 $h_m$ ,永磁体矫顽力为 $H_c$ ,故其磁动势为:

$$F_{b1} = F_{b2} = H_c h_m. \quad (4)$$

电机中变化的磁场是由线圈变化电流产生的,根据安培定律,若线圈匝数为 $N$ ,线圈中电流的瞬时值为 $i$ ,那么系统产生的励磁磁动势为:

$$F_L = Ni. \quad (5)$$

如图2所示, $\Phi$ 为磁路总磁通, $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ 和 $\Phi_4$ 分别为磁路各支路的磁通。各支路总磁阻分别为 $R_{a1}$ ,

由于内、外轭铁材料为硅钢片,其磁阻相较于永磁体和空气非常小,即它们的磁导率远远大于永磁体和空气的磁导率,故为了简便计算,忽略内、外轭铁的磁阻,仅考虑永磁体、永磁体支架与空气间隙的磁阻。为了使用等效磁路方法分析,假定磁路中的磁导是线性的,即忽略了磁滞、涡流和漏磁的影响。可以将电机磁路简化为图2所示的电路图。在图2中, $R_1, R_2, R_3$ 和 $R_4$ 为内、外轭铁与永磁体间的气隙磁阻;内、外轭铁之间的气隙磁阻为 $R_{a1}$ 和 $R_{a2}$ ;由于磁力线两次以不同方向穿过永磁体,故永磁体上部分磁阻与磁动势分别为 $R_{b1}$ 和 $F_{b1}$ ,下部分磁阻与磁动势分别为 $R_{b2}$ 和 $F_{b2}$ 。

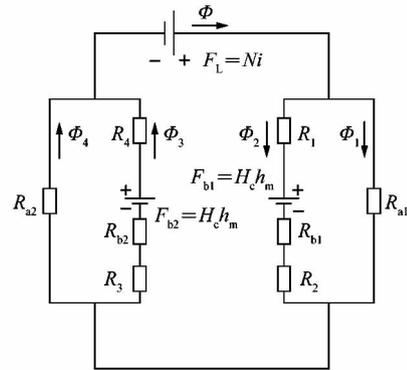


图2 等效磁路图

Figure 2 Equivalent magnetic circuit diagram

磁阻的大小与磁路的长度成正比,与磁路的横截面积成反比,并且与材料属性相关,即:磁阻 = 磁路的长度/(磁导率 磁路的横截面积)。由此可知图2中所示各气隙磁阻的大小为表1所示。

$R_B, R_C$ 和 $R_{a2}$ ,其中 $R_B = R_1 + R_{b1} + R_2, R_C = R_3 + R_{b2} + R_4$ 。 $F_{b1} = F_{b2}$ ,令 $F_b = F_{b1} = F_{b2}$ 。由于是将磁路等效为电路,所以基尔霍夫电压、电流定律和欧姆定律同样适用与磁路中,得:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4; \\ \Phi_1 R_{a1} &= \Phi_2 R_B + F_b; \\ \Phi_4 R_{a2} &= \Phi_3 R_C - F_b; \\ \Phi_1 R_{a1} + \Phi_4 R_{a2} &= F_{L0}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将各个磁阻代入式(6)求解得磁路总磁通为:

$$\Phi = \frac{\pi r \mu [F_L - 2x F_m]}{L} = \frac{\pi r \mu N h i}{L} - \frac{2 \pi r \mu H_c h_m x}{L} \quad (7)$$

作动器是由动磁式直线电机稍作改进得到的,动磁式直线电机与动圈式直线电机不同,不能直接通过法拉第电磁感应定律和洛伦兹力方程得到永磁体与励磁磁场间的相互作用<sup>[8]</sup>。为了得到电机的各项特性,需要对磁路进行详细的数学分析,利用机电能量转换原理求解。

作动器的机电系统中含有永磁体,利用虚电流法,将图1中的永磁体等效为2个虚拟线圈,产生与永磁体相同的磁势,线圈一的匝数和电流分别为 $N_1$ 和 $I_1$ ,线圈二的匝数和电流分别为 $N_2$ 和 $I_2$ ,磁势的大小为:

$$F_b = H_c h_m = N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (8)$$

在计算时,将虚拟线圈和系统中其他线圈做相同处理,得到虚拟线圈的磁链和电流,所以系统的磁场储能和磁供能函数可以用包括虚拟线圈在内的全部线圈磁链和电流来表示。为了计算简便,忽略磁路能量损失,由式(2)可知,状态变量为磁功能,系统的磁功能 $W$ 作为 $(i_1, i_2, i, x)$ 的函数,其中 $i_1, i_2$ 和 $i$ 分别表示电流 $I_1, I_2$ 和 $I$ 的瞬时值。磁功能值的大小与积分路径无关,可将积分路径分为3条,分别是路径1、路径2和路径3,将3条路径上的磁功能 $W_1, W_2$ 和 $W_3$ 相加就是作动器系统的磁功能 $W$ 。

$W_1$ 为当虚拟线圈中电流为零时,动子运动到 $x$ 处,励磁线圈中电流由0变化为 $I$ ,耦合磁场磁功能的增量; $W_2$ 和 $W_3$ 为当励磁线圈中电流为 $I$ 时,动子运动到 $x$ 处,虚拟线圈一部分电流为零,另一部分电流由0变化为对应值时,系统耦合磁场磁功能的增量。

对于路径1,将图2中 $F_{b1}$ 与 $F_{b2}$ 忽略,此时的磁路图就是虚拟线圈电流为0时的磁路图;对于路径2,将图2中 $F_{b2}$ 忽略,此时的磁路图就是虚拟线圈中电流 $i_2$ 为0时的磁路图;对于路径3,将图2中 $F_{b1}$ 忽略,此时的磁路图就是虚拟线圈中电流 $i_1$ 为0时的磁路图。

通过式(2)和(3)计算系统的总磁功能为:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 = \frac{F_L^2}{2G} + \frac{2A(h-A)}{Gh^2} F_m^2 - \frac{2F_L F_m}{Gh} x \quad (9)$$

式中: $G = \frac{L-h_1}{\mu \pi r h}$ 。

由式(1)可知,通过磁功能对 $x$ 求取偏微分可得电磁力,即:

$$F_e(t) = \left. \frac{\partial W}{\partial x} \right|_i = -\frac{2F_L F_m}{Gh} = -\frac{2\pi r \mu N H_c h_m}{L} i = \alpha i \quad (10)$$

实际上,作动器通过改变励磁线圈中电流大小来改变电磁力的大小,由式(10)可知,电磁力的大小与励磁线圈中电流成正比,比例系数 $\alpha$ 的单位为N/A,其表达式为:

$$\alpha = -\frac{2\pi r \mu N H_c h_m}{L} \quad (11)$$

## 2 作动器结构设计

需要减振部分的管路质量为60 kg,为了达到很好的减振效果,作动器的质量需要设计为3 kg左右,同时 $\alpha$ 值尽可能在20~25 N/A。由给定的性能参数通过电磁力表达式来确定结构参数,参数如表2所示。表中 $t_1$ 为外轭铁厚度, $t_2$ 为内轭铁厚度, $L_m$ 为永磁体长度。

表2 作动器结构参数

$r$	$D_1$	$D_2$	$h_m$	$h_1$	$A$	$m$
40.25	38.0	42.5	2	1	18	0.75
$h$	$e$	$H$	$n$	$t_1$	$t_2$	$L_m$
24	2	10	8	9	7	20

空气的磁导率为 $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$  N/A,永磁体磁场强度为 $H_c = 9.78 \times 10^5$  A/m,线圈匝数为 $N = 160$ ,将上面参数代入式(11)得:

$$\alpha = -\frac{2\pi r \mu N H_c h_m}{L} \approx -22.38 \text{ N/A} \quad (12)$$

在内、外轭铁磁通达到饱和前,电磁力的大小与电流可近似为线性关系,为了验证此作动器设计的合理性,还需通过有限元计算分析作动器中磁通是否达到饱和。

## 3 基于 Ansoft Maxwell 计算分析作动器电磁特性

Ansoft Maxwell 作为世界著名的商用低频电磁场有限元软件之一,在各个工程电磁领域都得到了广泛的应用<sup>[9]</sup>。作动器的设计主要依据等效磁路法,为了验证此方法是否准确,故采用 Maxwell 软件对作动器进行有限元分析。

### 3.1 建模及激励

如图3所示为运动部件为band区域里的永磁体及支架,其中band为运动区域,尺寸大小由表2给出。

在进行运动设置时,有运动类型、数据信息和机械信息3栏,在运动类型中选取 Translation 直线运动;数据信息栏中有初始位置,双向运动的范围,考虑实际情况将初始位置设置为0 mm,运动范围为-10.00~+10.00 mm;在机械信息一栏中选取考虑启动,需要

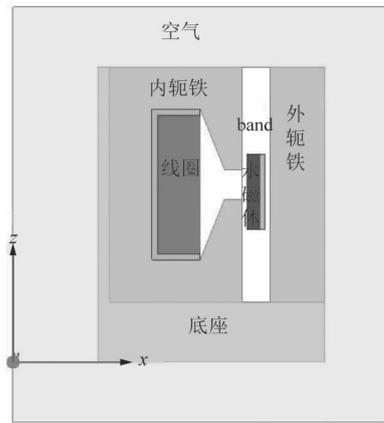


图 3 瞬态模型

Figure 3 Transient model

考虑动子的初速度、质量、阻尼和载荷,将初速度设置为 0,载荷力  $F = -10\pi^2 \sin(40\pi t + 0.5\pi)$  N。

此分析中,加载激励为电流,选择模型中的线圈区域将其设置为线圈,线圈匝数为 160 匝,电流方向为正。线圈设置完成后,需要将其添加到激励中,设置好交变电流单位为 A,将线圈添加到此绕组中完成对激励的设置。

### 3.2 作动器磁通分析

作动器的设计是在假定内、外轭铁中磁通不饱和的条件下完成的,内外轭铁材料为硅钢片,其磁感应强度与磁场强度(B-H)曲线如图 4 所示。当磁感应强度小于 1.3 T 时,硅钢片内磁通密度没有达到饱和,其 B-H 可近似为线性关系。

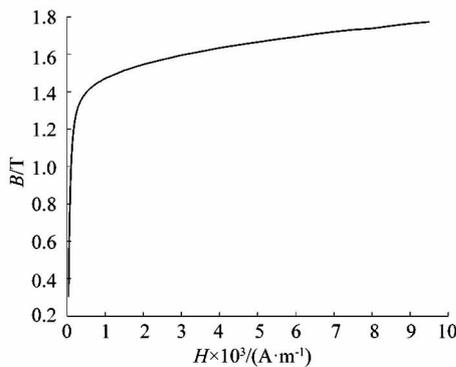


图 4 硅钢片 B-H 曲线

Figure 4 Silicon steel sheet B-H curve

由于线圈电流为周期变化,故作动器中磁通密度的大小也为周期变化。线圈电流幅值为 2 A,频率为 20 Hz,相位为  $\pi/2$ ,为了观察作动器稳态下的情况,取 4 s 以后的计算结果,当  $t$  为 4.012 5 s 时,作动器中线圈电流分别为 0 A,此时线圈产生的磁通密度为 0。作

动器中磁通密度是永磁体产生的,如图 5 所示。

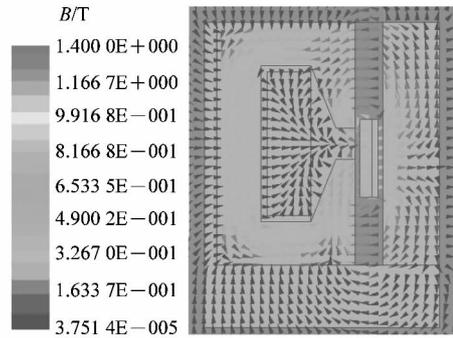


图 5 4.012 5 s 时矢量磁通密度分布

Figure 5 4.012 5 s Vector flux density

当  $t$  在 4.000 s 和 4.025 s 时,作动器的磁通密度分布如图 6~7 所示。

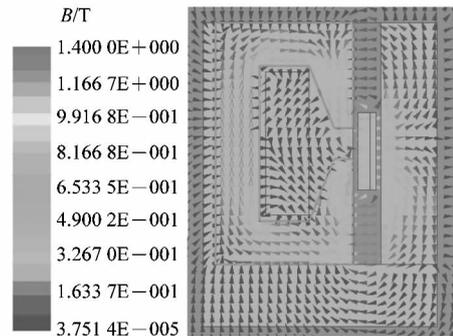


图 6 4.000 s 时矢量磁通密度分布

Figure 6 4.000 s Vector flux density

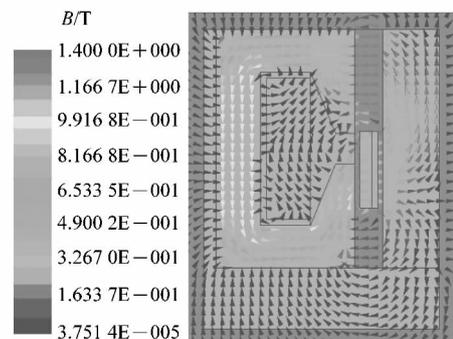


图 7 4.025 s 时矢量磁通密度分布

Figure 7 4.025 s Vector flux density

由图 6 和图 7 可知,在 4.025 s 时磁通密度最大,有及少数地方的磁通密度接近 1.3 T,此时线圈电流为 -2 A;在 4.000 s 时磁通密度最小,其值远小于 1.3 T,此时线圈电流为 2 A。图 7 中的磁通密度明显要比图 6 大,这是因为图 7 的磁通密度为永磁体与线圈产生磁通密度的叠加,图 6 中的磁通密度为线圈产生的磁通密度与永磁体产生的磁通密度相减。由此可知,

在整个周期内,内、外轭铁的磁通密度都小于 1.3 T,故作动器的设计是合理的。

### 3.3 电磁力计算分析

考虑电流变化对  $\alpha$  值的影响,将线圈电流幅值分别设为 2.0 A 和 1.2 A,频率保持 20 Hz 不变,相位为  $\pi/2$ ,同样截取 4.0 ~ 4.3 s 时间段的图形,如图 8 所示。

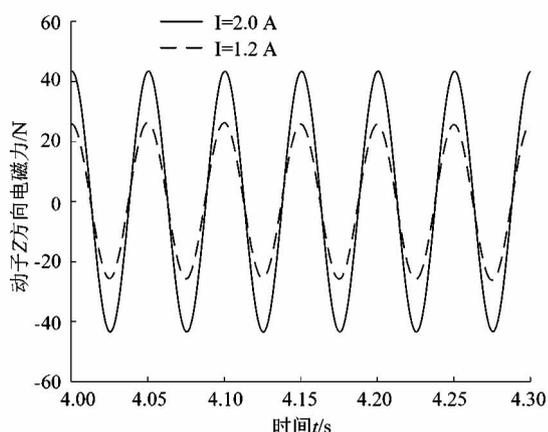


图 8 动子 Z 方向电磁力与时间关系曲线

Figure 8 Momentum Z-direction electromagnetic force and time curve

由图 8 可知,动子所受电磁力呈周期变化,周期与输入线圈电流周期相同,且电流幅值越大,动子受电磁力幅值也越大。为了更直观地反映在不同电流幅值下,动子电磁力与电流的关系,可将横坐标变为电流,得到动子 Z 方向电磁力与电流的关系,如图 9 所示。

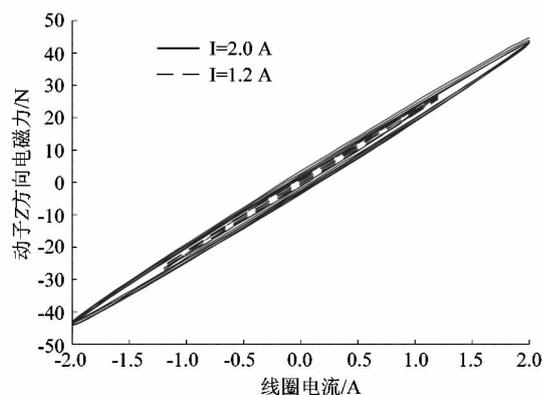


图 9 动子 Z 方向电磁力-线圈电流曲线

Figure 9 Momentum Z-direction electromagnetic force-Current curve

由图 9 可知,动子电磁力的大小与线圈电流的关系近似为线性关系,但是电流幅值对其线性度还是有影响的,所以需要电磁力与线圈电流做回归分析,在

4.0 ~ 4.3 s 内共有 601 组数据。

总体上,因变量动子 Z 方向受电磁力  $F_e$  与自变量线圈瞬时电流  $i$  的统计关系符合一元线性正态误差模型,即给定第  $\tau$  个  $i$ ,有:

$$F_e(\tau) = -\alpha i(\tau) + \alpha_0 + \varepsilon(\tau) \quad (13)$$

式中: $\varepsilon$  为在  $i(\tau)$  下,电磁力与拟合值的差值; $\tau=1,2, \dots, 601$ 。

$$\alpha = -\frac{\sum_{\tau=1}^{601} (i(\tau) - \bar{i})(F_e(\tau) - \bar{F}_e)}{\sum_{\tau=1}^{601} (i(\tau) - \bar{i})^2} \quad (14)$$

其中,

$$\alpha_0 = \bar{F}_e + \alpha \bar{i};$$

$$\bar{i} = \frac{1}{601} \sum_{\tau=1}^{601} i(\tau);$$

$$\bar{F}_e = \frac{1}{601} \sum_{\tau=1}^{601} F_e(\tau).$$

分析得到在  $I=2.0$  A 和 1.2 A 时,  $F_e$  与  $i$  的线性回归方程分别为:

$$F_e = 21.74i - 0.220; \quad (15)$$

$$F_e = 21.89i - 0.083. \quad (16)$$

由式(15)、(16)和(12)可知,在  $I=2.0$  A 和 1.2 A 时比例系数  $\alpha$  值分别为 -21.74 和 -21.89。瞬态模拟得到的比例系数与等效磁路法得到的比例系数非常接近。由于等效磁路法忽略了磁漏通,故模拟计算的结果偏小。

由图 9 可知,  $F_e$  与  $i$  并非完全线性关系,这是由于有限元分析时没有忽略了内、外轭铁的非线性特性。拟合优度  $R^2$  反应了  $F_e$  的波动有多少百分比能被  $i$  的波动所描述,它的值在 0 ~ 1 之间,拟合优度越大,自变量对因变量的解释程度越高,观察点在回归直线附近越密集。拟合优度 = 回归平方和 / (回归平方和 + 残差平方和)。通过计算得到在  $I=2.0$  A 和 1.2 A 时,拟合优度  $R^2$  分别为 0.996 3 和 0.998 6,由此可见内外轭铁的非线性的影响是可以忽视的。

## 4 结语

在不同场景下,管路振动也会不同,需要依据具体情况设计作动器,故提出一种管路主动减振系统中作动器设计的基本思路,可分为以下几个步骤来完成:

1) 依据性能要求经公式反复计算确定具体的结构参数;

2) 对作动器进行有限元分析,观察其磁路中磁通密度是否饱和。若饱和,可以修改其结构参数或者换一种材料,使其在工作时,磁路中磁通一直处于不饱和状态;

(下转第 67 页)