doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.052

变齿距电磁作动器优化设计

石　勇　宁一高　赵建辉　孙　军
(哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对传统定齿距电磁作动器线性度差的问题,通过磁路分析建立了变齿距电磁作动器的解析模型。在此基础上,分析了气隙、定动子齿宽差、线圈匝数、动子半径等参数对作动器性能的影响,发现定动子齿宽差对作动器的线性度具有重大影响,从理论上揭示了采用变齿距结构实现良好线性度的必要性,并且良好线性度的实现需要牺牲一定的电磁力。为了尽可能提高变齿距电磁作动器的线性度,同时不至于使电磁力降低太多,采用遗传算法对其进行优化设计。结果表明,遗传算法参数设置的不同对优化结果的影响很小,相比于定齿距电磁作动器,变齿距电磁作动器可以实现线性度提高 93.08% 时,电磁力仅降低 8.22% 。最后,利用样机试验验证的有限元模型对优化后的方案进行仿真计算,计算结果证明优化后的作动器在 0 ~ 3 mm 位移范围内具有良好的线性性能,同时验证了所建立解析模型的有效性。

关键词: 变齿距电磁作动器; 线性度; 解析模型; 遗传算法; 有限元模型
中图分类号: TB535　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)06-0394-07

Optimal Design of Variable Tooth Electromagnetic Actuator

Shi Yong　Ning Yigao　Zhao Jianhui　Sun Jun
(*College of Power and Energy Engineering*, *Harbin Engineering University*, *Harbin* 150001, *China*)

Abstract: As one of the most important performance indexes for electromagnetic actuator with tooth structure, linearity has major impact on the vibration controlling effect. However, traditional fixed tooth electromagnetic actuator has poor linearity. To solve this problem, the analytical model of variable tooth electromagnetic actuator was worked out by analyzing magnetic circuit. Influence rules of several parameters, such as air gap, the difference between tooth width of stator and active cell, coil turns and the radius of the active cell, on actuator performance were analyzed based on the analytical model, indicating that the difference between tooth width of stator and active cell had great influence on the linearity of variable tooth electomagnetic actuator. And the necessity of applying variable tooth to gain good linearity was revealed theoretically and the realization of good linearity needed to be at the expense of decreasing electromagnetic force. To improve the linearity of variable tooth electromagnetic actuator as much as possible and minimize the decrease of electromagnetic force at the same time, genetic algorithm was applied to the optimal design. The results showed different setting for genetic algorithm parameters had negligible effect on optimization results and that compared with the fixed tooth electromagnetic actuator, variable tooth electromagnetic actuator can improve linearity by 93.08% under the condition of electromagnetic force was only dropped by 8.22%. Finally, the simulating calculation for optimized scheme was carried out with the finite model which was verified by the experimental results of the processed prototype, and calculation result proved that the optimized actuator had good linearity in the displacement range of 0 ~ 3 mm, meanwhile, it validated the analytical model.

Key words: variable tooth electromagnetic actuator; linearity; analytical model; genetic algorithm; finite model

收稿日期: 2016 - 02 - 20　修回日期: 2016 - 03 - 16
基金项目: 国家自然科学基金项目(51475100)和黑龙江省留学自然基金项目(LC201422)
作者简介: 石勇(1973—),男,副教授,博士,主要从事柴油机电控与仿真、电磁执行器研究,E-mail: sy.heu@hrbeu.edu.cn

引言

振动控制是振动工程领域内的一个重要分支，在航空航天、汽车、船舶、精密制造与加工等领域有着广泛的应用[1-4]。作动器作为执行机构，是隔振系统的关键部件，其性能直接影响振动控制效果。传统定齿距电磁作动器的线性度较差，限制了隔振控制效果的提高，于是文献[5]提出了变齿距电磁作动器的概念，但是对于变齿距电磁作动器的理论原理以及优化设计的研究，目前尚未开展。

电磁作动器属于机电磁多物理场耦合系统，其优化研究主要有数值法和解析法两种。数值法一般通过有限元软件进行[6-8]，具有较高的精度，但计算时间较长，且不能直观反映各参数与目标特性的关系，不适合初始设计。解析法一般是通过磁路分析，建立系统数学模型，然后利用优化算法求解系统参数[9-11]，采用解析法有利于对系统本质规律的把握，而且计算速度快，但建模过程复杂。

本文首先建立变齿距电磁作动器的解析模型，从理论上揭示采用变齿距结构实现良好线性度的必要性。然后基于此解析模型，利用遗传算法对其进行优化设计，使其在 0 ~ 3 mm 位移范围内实现良好的线性度。最后，通过试验验证的有限元模型对优化结果进行仿真计算，证明所建立的解析模型以及优化结果的有效性。

1　变齿距电磁作动器结构和工作原理

以图 1 所示的单自由度隔振系统为例，设其沿垂直方向受到的激励力为 $F = F_0\sin\omega t$，传至地面力的幅值为 F_T，则力的传递率为

$$\eta = \frac{F_T}{F_0} = \frac{\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \tag{1}$$

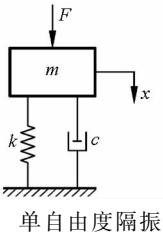

图 1　单自由度隔振系统

Fig. 1　Single-degree-of-freedom vibration-isolation system

由式(1)可以看出，在不同的激励频率 ω 下，适当调整刚度 k、阻尼系数 c 或质量 m 都可以降低力的传递率，从而改善隔振效果。

变齿距电磁作动器通过在不同工况下改变系统刚度来实现良好隔振效果，其结构如图 2 所示。可以看出，在壳体、法兰和衔铁相对的工作面上设计有一些矩形的小齿，相对的齿面间存在一定的工作气隙。壳体、法兰和衔铁的材料均选用导磁性能优良的电工纯铁 DT4，这样可以使磁力线更好地聚集在由壳体、法兰和衔铁组成的工作磁路中，减少工作气隙以外部分的磁势降；其他部件均为非导磁材料，以减少漏磁通，从而在相同激励安匝数下获得更大的电磁力。对线圈通以一定大小的电流，当不发生振动时，壳体、法兰上的齿(定子上的齿)和衔铁上的齿(动子上的齿)是对齐的，作动器对外不产生作用力；当发生振动时，动子上的齿与定子上的齿发生相对位移，作动器就会对外产生轴向作用力，力与相对位移在一定范围内基本呈线性关系。而设计齿距不等，更容易实现良好的线性度。通过改变线圈绕组上驱动电流，就可以改变作动器的位移-力特性曲线的斜率，即改变系统的刚度，从而实现良好的隔振效果。

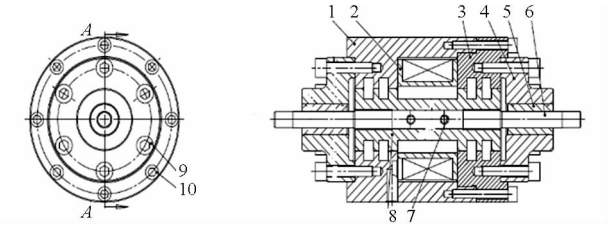

图 2　变齿距电磁作动器结构简图

Fig. 2　Schematic of variable tooth electromagnetic actuator

1. 壳体　2. 线圈架　3. 法兰　4. 轴承端盖　5. 直线轴承　6. 主轴　7. 弹性圆柱销　8. 衔铁　9、10. 螺栓

2　变齿距电磁作动器解析模型的建立

2.1　等效磁路模型

设线圈绕组匝数为 N，绕组电流为 i，绕组两边各有对称的 4 对齿。在忽略磁饱和的情况下，气隙磁阻远大于导磁体磁阻，磁场能量几乎全部存储于工作气隙中，故在计算中忽略导磁体磁阻。设各齿对间气隙磁导分别为 P_1、P_2、P_3 和 P_4，对应的气隙磁通分别为 ϕ_1、ϕ_2、ϕ_3 和 ϕ_4，齿间工作气隙均为 g，动子齿相对定子齿的位移为 u。则其等效磁路如图 3 所示[12]。

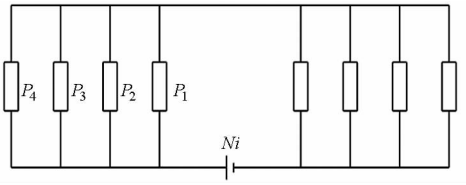

图 3　变齿距电磁作动器的等效磁路

Fig. 3　Equivalent magnetic circuit of variable tooth electromagnetic actuator

工作气隙 1 的磁共能为

$$\omega_1 = \frac{1}{2}\frac{Ni}{2}\phi_1 = \frac{(Ni)^2 P_1}{8} \tag{2}$$

利用虚功法可求得齿对 1 间的电磁力为

$$F_1 = -\frac{\partial \omega_1}{\partial u} = -\frac{(Ni)^2}{8}\frac{\partial P_1}{\partial u} \tag{3}$$

则作动器总的电磁力为

$$F = -2\left(\frac{\partial \omega_1}{\partial u}+\frac{\partial \omega_2}{\partial u}+\frac{\partial \omega_3}{\partial u}+\frac{\partial \omega_4}{\partial u}\right) = \frac{(Ni)^2}{4}\left(\frac{\partial P_1}{\partial u}+\frac{\partial P_2}{\partial u}+\frac{\partial P_3}{\partial u}+\frac{\partial P_4}{\partial u}\right) \tag{4}$$

从式(4)可以看出,只要求出各齿对间的气隙磁导,就可以求出电磁力。

2.2 气隙磁导和电磁力的计算

首先根据气隙磁场的分布特点,将齿间气隙分割为若干规则形状的区域,分别求出各个区域的气隙磁导,再将各个区域的气隙磁导相加,即可得到整个的气隙磁导[13]。如图 4 所示,设定子齿宽为 w_1,动子齿宽为 w_2,且 $w_1 \geqslant w_2$,令 $x=(w_1-w_2)/2$。气隙磁导 P 可以按照直线磁路和椭圆形磁路分成 P_a、P_b和 P_c 3 部分进行计算。

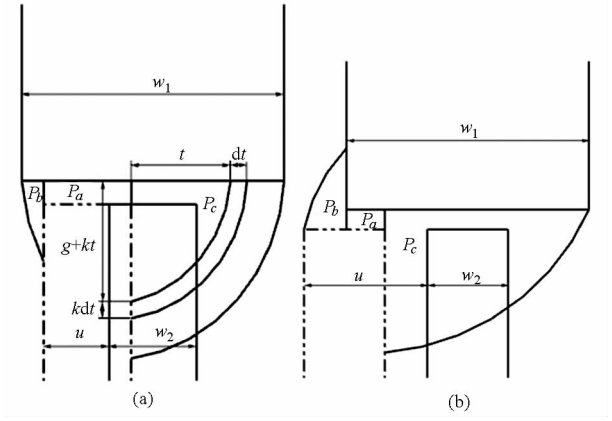

图 4 气隙磁导的划分

Fig. 4 Permeance partition of air gap

如图 4a 所示,实线表示动子齿的初始位置,虚线表示动子齿位移为 $u(u<x)$时的位置。

定、动子重叠部分的磁路近似为直线磁路,其气隙磁导 P_a可以表示为

$$P_a = \frac{2\mu_0 \pi r w_2}{g} \tag{5}$$

式中 r——动子齿齿面到主轴中心线的距离,即动子半径

电磁场有限元分析表明,边缘磁力线形状更接近于椭圆[14]。设椭圆形磁路的短半轴长度为 t,则长半轴长度为 $g+kt$,变量 k 为椭圆磁路系数,它是气隙长度 g 和 u 方向位移的函数,可以表示为[15]

$$k = \frac{t}{g+t} \tag{6}$$

边缘磁路磁通所经截面积的微分可近似表示为

$$\mathrm{d}s = 2\pi r\frac{\mathrm{d}t + k\mathrm{d}t}{2} = \pi r(1+k)\mathrm{d}t \tag{7}$$

边缘磁路的平均长度可以近似表示为

$$l_m = g + \frac{\pi}{2}t \tag{8}$$

$$P_b = \int \frac{\mu_0}{l_m}\mathrm{d}s \tag{9}$$

将式(7)、(8)代入式(9)可得

$$P_b = \int_0^{x-u}\frac{\mu_0}{g+\frac{\pi t}{2}}\mathrm{d}s = \int_0^{x-u}\frac{\mu_0}{g+\frac{\pi}{2}t}\pi r(1+k)\mathrm{d}t = \frac{2\pi r\mu_0}{\pi(\pi-2)}\left[\pi\ln\frac{x-u+g}{g}+(\pi-4)\ln\frac{\pi(x-u)+2g}{2g}\right] \tag{10}$$

同理

$$P_c = \int_0^{x+u}\frac{\mu_0}{g+\frac{\pi}{2}t}\mathrm{d}s = \frac{2\pi r\mu_0}{\pi(\pi-2)}\left[\pi\ln\frac{x+u+g}{g}+(\pi-4)\ln\frac{\pi(x+u)+2g}{2g}\right] \tag{11}$$

$$P = P_a + P_b + P_c \tag{12}$$

电磁力为

$$F = -\frac{(Ni)^2}{8}\frac{\partial P}{\partial u} = \frac{\pi r\mu_0 (Ni)^2}{4(\pi-2)}\left\{\frac{1}{x-u+g}-\frac{1}{x+u+g}+(4-\pi)\left[\frac{1}{\pi(x+u)+2g}-\frac{1}{\pi(x-u)+2g}\right]\right\} \tag{13}$$

如图 4b 所示,当 $u \geqslant x$ 时

$$P_a = \frac{2\pi r\mu_0(w_2-u+x)}{g} \tag{14}$$

$$P_b = \int_0^{u-x}\frac{\mu_0}{g+\frac{\pi}{2}t}\mathrm{d}s = \frac{2\mu_0 r}{\pi-2}\left[\pi\ln\frac{u-x+g}{g}+(\pi-4)\ln\frac{\pi(u-x)+2g}{2g}\right] \tag{15}$$

P_c和 P 仍然按照式(11)、(12)计算。

电磁力为

$$F = -\frac{(Ni)^2}{8}\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\pi r\mu_0 (Ni)^2}{4}\left\{\frac{1}{g}+\frac{4-\pi}{\pi-2}\left[\frac{1}{\pi(x+u)+2g}+\frac{1}{\pi(u-x)+2g}\right]-\frac{1}{\pi-2}\left(\frac{1}{x+u+g}+\frac{1}{u-x+g}\right)\right\} \tag{16}$$

3 作动器性能的主要影响参数

线性度和电磁力是半主动隔振系统电磁作动器的主要性能指标。在作动器工作的位移范围内,电磁力随位移变化的线性度越好,隔振控制效果越好;在相同位移情况下,电磁力越大,则对应的刚度越

大，即可以实现更宽的电磁刚度调整范围。

电磁作动器的线性度可以表达为实际输出的位移-力特性曲线和拟合的直线间的最大偏差与最大位移时的电磁力的比值，即

$$\delta = \frac{|\Delta F|_{\max}}{F_{\max}} \tag{17}$$

该值越小，表明线性度越好。

从式(13)和式(16)可以看出，影响变齿距电磁作动器性能的结构参数主要有 r、N、x 和 g。r 和 N 相当于一个比例系数，只对电磁力有影响，而不影响线性度，一般在空间允许的情况下，尽可能取较大的值即可。因此，本文重点研究 x 和 g 对作动器性能的影响。

3.1　参数 g 对作动器性能的影响

取线圈匝数 N 为 100，电流 i 为 3 A，动子齿齿面到主轴中心线的距离 r 为 36 mm，空气磁导率为 $\mu_0 = 1.256 \times 10^{-6}$ H/m，参数 x 取 1 mm。根据式(13)和式(16)对电磁力进行计算，并采用最小二乘法将不同 g 值对应的位移-电磁力曲线拟合为相应的通过原点的直线，如图 5 所示。

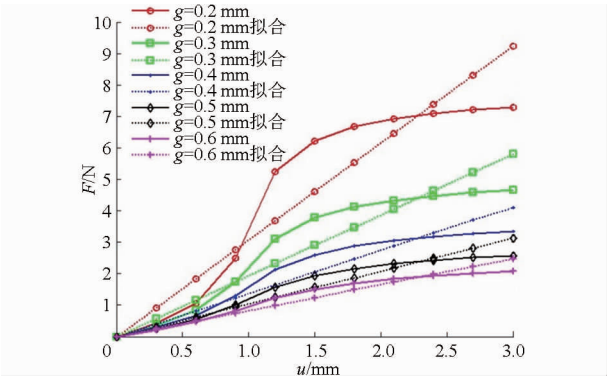

图 5　参数 g 对作动器性能的影响

Fig. 5　Influence of parameter g on actuator performance

从图 5 可以看出，随着 g 的增大，相应位移处的电磁力显著减小；根据式(17)对相应的线性度进行计算，结果表明，随着 g 的增大，线性度逐渐变好，相应的线性误差分别为 26.59%、24.39%、22.57%、21.02% 和 19.69%。

3.2　参数 x 对作动器性能的影响

将参数 g 取为 0.4 mm，计算得到电磁力随参数 x 的变化，以及拟合得到的相应直线如图 6 所示。

从图 6 可以看出，当 x = 0 mm 时，也即动子齿和定子齿的齿宽相等时，其位移-电磁力曲线是一条凸函数曲线。传统的定齿距电磁作动器就是采用这样的结构，并将位移-电磁力曲线近似看做直线处理[16]，显然这样会造成很大误差。当 x 大于 0 mm 而小于 3 mm 时，位移-电磁力曲线由两部分组成，前半部分为凹函数曲线，而后半部分为凸函数曲线。

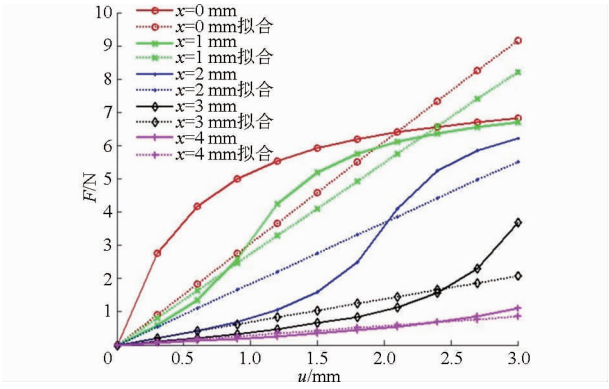

图 6　参数 x 对作动器性能的影响

Fig. 6　Influence of parameter x on actuator performance

当 x 大于等于 3 mm 时，位移-电磁力曲线为一条凹函数曲线。

随着 x 的增大，计算得到的线性误差分别为 34.69%、22.57%、19.26%、43.50% 和 22.58%，可见线性度普遍比较差；同时，可以看出，随着 x 的增大，相同位移 u 对应的电磁力不断减小。

4　作动器性能优化

从以上分析可以看出，参数 g 对电磁力的影响很大。为了获得较大的电磁力，期望参数 g 尽可能的小，但是 g 过小又会使加工和装配困难，而且工作时可能会造成动定子摩擦使可靠性降低。因此，本次优化设计中参数 g 在加工精度和运行稳定所允许的前提下尽可能取较小的值，0.4 mm；当然，随着 g 的减小，还会导致线性度变差，但是后面将会证明即使 g 取为较小的值，通过参数 x 的优化设计，同样可以获得很好的线性度。

如果作动器中各齿对的参数 x 取为同一个值，即采用等齿距结构，则其位移-电磁力特性曲线将只是图 6 中某一条曲线的等比例放大，对线性度的改善毫无作用。但是，根据前面对不同 x 值对应的位移-电磁力曲线形状的分析，如果采用不同 x 值的齿对的组合，即采用变齿距结构，很有可能实现良好的线性度。

4.1　优化模型的建立

采用 4 种类型的齿对组合，取每对齿的参数 x 为优化变量，故优化变量共有 x_1、x_2、x_3 和 x_4 4 个。

当各种类型的齿对对应的位移-电磁力曲线的形状既有凸函数曲线，又有凹函数曲线时，所组合得到的位移-电磁力曲线才有可能具有良好的线性度。从 3.2 节的分析可知，x 值应该大于 3 mm；而 x 过大，将导致作动器轴向尺寸太大，而输出的电磁力减少太多。故本次优化中约束条件可以设为

$$0 \leqslant x_i \leqslant 4 \quad (i = 1,2,3,4) \tag{18}$$

作动器优化的目标是降低线性误差,同时尽量降低电磁力的减少,故综合考虑线性度和电磁力作为优化目标。通过将参数 x 不同的齿数对间的位移-电磁力曲线叠加,得到总的位移-电磁力曲线,然后再采用最小二乘法拟合得到一条过原点的直线,通过式(17)计算相应的线性度。由于在所研究的位移范围内,电磁力随位移的增大而单调增加,故直接取位移为 3 mm 处的电磁力作为优化目标。因此,优化目标即为求线性度和电磁力的综合函数 y 的最小值。

为了处理不同性质的量在数量级上差异,需要将目标函数进行归一化[17],将传统的 8 个齿对的定子齿宽和动子齿宽都相等的定齿距电磁作动器作为优化前的作动器,则归一化后的目标函数为

$$\min\ y = \omega \frac{\delta}{\delta_0} - (1-\omega)\frac{F}{F_0} \tag{19}$$

式中 y——优化目标函数

ω——权重系数 δ——线性度

F——电磁力

δ_0——作动器优化前的线性度,$\delta_0 = 34.69\%$

F_0——作动器优化前的电磁力,$F_0 = 54.51$ N(由于期望电磁力越大越好,故式(19)中第 2 项前面是负号)

从上面的分析可以看出,本问题是一个多维、多目标、非线性的优化问题,传统的优化方法很难胜任。遗传算法是一种借鉴自然界中的生物进化原理而产生的高度并行、自适应、随机的全局搜索算法,具有思想简单、易于实现以及良好的寻优能力等诸多优点[18-19],非常适合本问题的解决。

4.2 遗传算法优化

遗传算法优化需要设置的参数主要有种群数目、交叉概率和变异概率。种群数目太小,则计算结果会很差或根本找不出问题的解;种群数目太大,会增加计算量,使收敛时间延长[20]。交叉操作是产生新个体的主要方法,它决定了遗传算法的全局搜索能力[21],因此,交叉概率太小会使搜索停滞不前;太大又容易使适应值高的个体很快被破坏。变异操作是产生新个体的辅助方法,但也必不可少,太小不能增大种群多样性,太大则会使遗传算法变成随机搜素。

为了得到遗传算法的最好结果,一般需要以不同的参数试验。因此,本文采用不同参数的多种方案,以求获得最佳结果,具体如表 1、2 所示。种群进化过程和最优个体如图 7 所示(以方案 3,$\omega = 0.5$ 为例)。

表 1 遗传算法参数设置方案及优化结果

Tab. 1 Parameters setting of genetic algorithm and optimization results

方案	种群数目	交叉概率/%	变异概率/%	目标函数值		
				$\omega = 0.8$	$\omega = 0.5$	$\omega = 0.2$
1	50	80	1	-0.141	-0.433	-0.724
2	50	60	10	-0.149	-0.430	-0.724
3	50	80	10	-0.155	-0.425	-0.723
4	100	80	1	-0.130	-0.422	-0.727
5	100	70	5	-0.155	-0.430	-0.727
6	100	60	1	-0.140	-0.426	-0.727

表 2 各方案不同权重系数下的线性度和电磁力

Tab. 2 Linearity and electromagnetic force of different weighting coefficients in each scheme

权重系数	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4		方案 5		方案 6	
	线性度/%	电磁力/N	线性度/%	电磁力/N	线性度/%	电磁力/N	线性度/%	电磁力/N	线性度/%	电磁力/N	线性度/%	电磁力/N
0.2	4.8	51.24	4.2	50.99	5.5	51.44	3.6	50.94	3.1	50.73	3.1	50.73
0.5	1.6	49.75	1.8	49.76	2.4	50.03	2.0	49.20	1.8	49.81	2.5	50.46
0.8	1.5	47.56	1.2	48.25	1.0	48.47	1.7	45.96	1.0	48.47	1.2	45.89

从图 7 可以看出,随着进化代数的增大,种群的最佳适应度和平均适应度都逐渐减小,经过一定代数后,适应度几乎不再变化,优化完毕,得到相应的一组最优个体。

从表 1、2 可以看出,不同方案的优化结果差别不大,也即在本问题中,遗传算法参数设置的改变对优化结果的影响较小,计算结果相对稳定。权重系数对目标函数中的线性度和电磁力有较明显的影响,随着线性度权重系数的增大,线性度变得更好,而电磁力则相应有所减少。

同时可以看出,经过优化后,作动器的线性度有了明显提高,而电磁力仅仅有略微下降。以方案 3,线性度权重系数为 0.5 时为例,线性度相比原来的 34.69% 提高了 93.08%,而电磁力相比原来的 54.51 N 仅仅降低了 8.22%。

5 优化结果的验证

以方案 3、线性度权重系数为 0.5 时得到的优化结果为例,利用试验验证过的有限元模型对其进行分析计算,以验证优化结果的有效性。

5.1 有限元模型的建立和试验验证

该类型电磁作动器中的轴承端盖、直线轴承、线

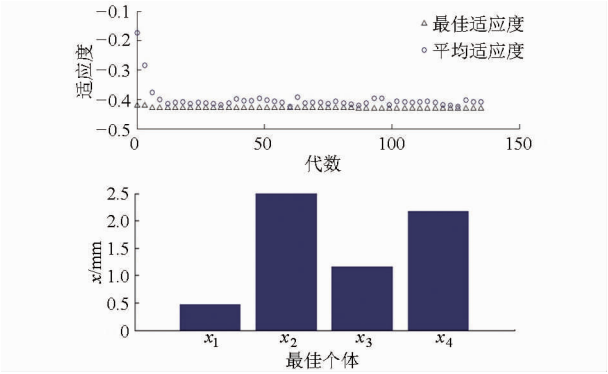

图 7　种群进化过程及相应的最佳个体

Fig. 7　Evolution of population and the best individual

圈架、主轴都是非导磁材料，其磁导率接近于空气，因此建模时将其当作空气处理，与周围空气连成一片；弹性圆柱销、螺栓、倒角等微小结构对电磁力的计算影响非常小，建模时予以忽略；衔铁、法兰和壳体材料均为电工纯铁 DT4，其导磁性能用 B－H 曲线定义，其中法兰和壳体采用紧配合，建模时忽略他们之间的微小间隙，将法兰和壳体当作一个整体，而动子上的齿和定子上的齿之间留有一定的工作气隙；线圈和空气的磁导率均设置为 1。利用 ANSYS 参数化设计语言（APDL）建立电磁作动器的二维轴对称模型，在不同驱动电流下，对一定位移时的电磁力进行仿真计算，并将仿真结果与对应的已有样机的实测电磁力（样机试验系统如图 8 所示）进行比较，如图 9 所示。

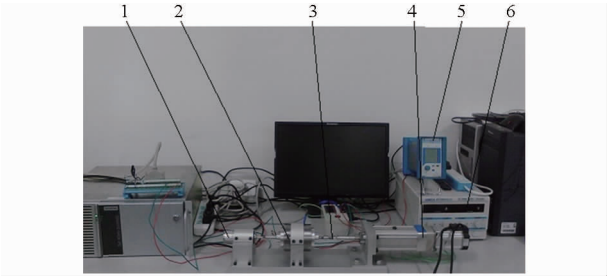

图 8　样机试验系统

Fig. 8　Experimental system of prototype

1. 位移传感器　2. 被测作动器　3. 拉压力传感器　4. 电缸
5. 电荷放大器　6. 电源

从图 9 可以看出，试验值与仿真模型的计算值误差很小，最大误差仅为 11.6%。因此，所建立的仿真模型的精度可以满足工程计算的需要，能够应用于优化结果的验证。

5.2　优化结果的有限元验证

利用试验验证过的仿真模型，按照方案 3、线性度权重系数为 0.5 时得到的优化结果的参数进行仿真计算，驱动电流 3 A、位移 0 mm 时的磁感应强度分布如图 10 所示。

由于优化结果是以不考虑磁饱和的解析模型为基础得到的，故有限元计算时也不能使作动器处于磁饱和状态。从图 10 可以看出，磁感应强度较大的部分主要集中在动子齿的根部，最大磁感应强度为 1.2 T，而 DT4 材料达到磁饱和时的磁感应强度约为 1.5 T，故此时作动器未达到磁饱和。当驱动电流小于 3 A 时，也必然不会达到磁饱和状态，因此，用该仿真模型分别计算驱动电流为 1、2、3 A 时的电磁力，并与解析模型的计算结果进行比较，如图 11 所示。

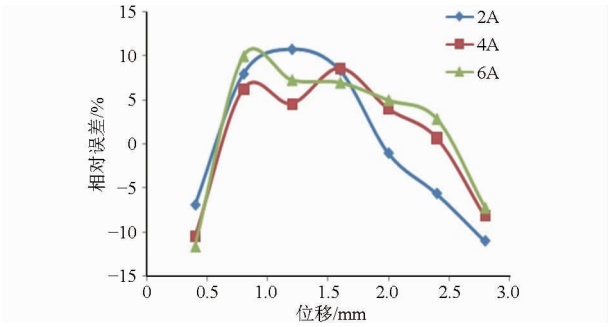

图 9　试验值与仿真值的相对误差

Fig. 9　Relative errors of experimental and simulated results

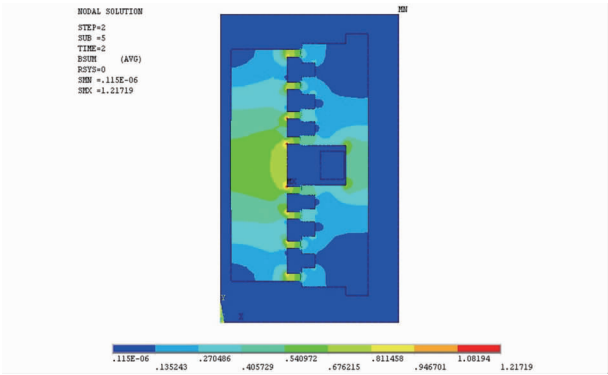

图 10　磁感应强度分布

Fig. 10　Distribution of magnetic induction intensity

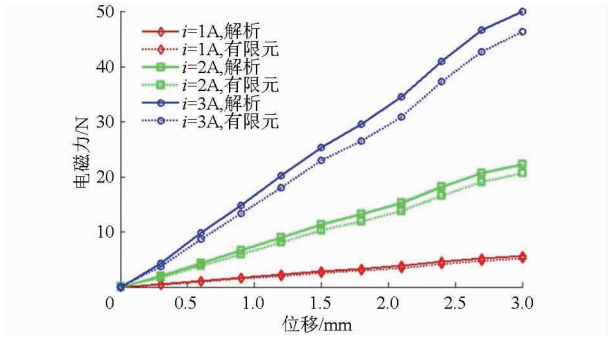

图 11　解析模型与有限元模型计算结果的比较

Fig. 11　Calculation results comparison of analytical and finite models

从图 11 可以看出，解析模型的计算结果与有限元模型的计算结果能够很好地吻合；同时可以看到，优化后的变齿距电磁作动器在 0～3 mm 位移范围内表现出了良好的线性度，从而证明了优化结果的可靠性。

6 结论

(1)根据变齿距电磁作动器的结构原理,得到了其等效磁路,并建立了解析模型。分析了各参数对作动器性能的影响规律,发现定动子齿宽差对作动器的线性度具有重大影响,而且良好线性度的获得需要牺牲一定的电磁力。

(2)基于所建立的解析模型,利用遗传算法对变齿距电磁作动器进行优化设计。结果表明,在本问题中遗传算法参数设置的不同对优化结果的影响很小,采用变齿距结构可以实现在线性度提高 93.08% 时,电磁力仅降低 8.22%。

(3)采用试验验证过的有限元模型对优化后的方案进行仿真计算,结果表明,解析模型计算结果能够与有限元计算结果很好的吻合,优化后的作动器在 0 ~ 3 mm 位移范围内具有良好的线性性能。

参 考 文 献

1 DALEY S, JOHNSON F A, PEARSON J B, et al. Active vibration control for marine applications[J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(4): 465 - 474.

2 杨柳青,陈无畏,高振刚,等. 基于电磁阀减振器的 1/4 车辆半主动悬架非线性控制[J]. 农业机械学报,2014, 45(4):1 - 7,36.
YANG Liuqing, CHEN Wuwei, GAO Zhen'gang, et al. Nonlinear control of quarter vehicle model with semi-active suspension based on solenoid valve damper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):1 - 7,36. (in Chinese)

3 张军,谌勇,骆剑,等. 整星隔振技术的研究现状和发展[J]. 航空学报,2005, 26(2):179 - 183.
ZHANG Jun, CHEN Yong, LUO Jian, et al. Review of the whole spacecraft isolation techniques[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(2):179 - 183. (in Chinese)

4 马然,朱思洪,DO M C. 拖拉机前桥半主动悬架特性参数匹配与控制[J]. 农业机械学报,2013, 44(12):6 - 10.
MA Ran, ZHU Sihong, DO M C. Parameters matching and control of tractor front axle semi-active suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(12):6 - 10. (in Chinese)

5 石勇,刘友,袁志国. 一种柴油机半主动电磁作动器的设计及特性仿真[J]. 机械设计与研究,2010, 26(1):97 - 100.
SHI Yong, LIU You, YUAN Zhiguo. A semi-active electromagnetic actuator and its characteristics simulation for vibration isolation of diesel engine[J]. Machine Design and Research, 2010,26(1):97 - 100. (in Chinese)

6 BELLI Z, MEKIDECHE M R. Dynamic optimization of an axisymmetric linear electromagnetic valve actuator[C]// Proceedings of the Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, 2013:1 - 5.

7 余锡文,刘德志,王东,等. 混合隔振系统中电磁作动器的优化设计[J]. 海军工程大学学报,2010, 22(6):1 - 4,41.
YU Xiwen, LIU Dezhi, WANG Dong, et al. Optimal design of electromagnetic actuator in hybrid vibration isolation system[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2010, 22(6):1 - 4,41. (in Chinese)

8 周寿明,吴红星,郑继贵,等. 基于有限元无刷直流直线电机参数优化[J]. 微电机,2014, 47(1):22 - 25,29.
ZHOU Shouming, WU Hongxing, ZHENG Jigui, et al. Finite element analysis of parameter optimization for blushless DC linear motor[J]. Micromotors, 2014,47(1):22 - 25,29. (in Chinese)

9 SCHONHARDT S, KORVINK J G, MOHR J, et al. Optimization of an electromagnetic comb drive actuator[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2009, 154(2):212 - 217.

10 BATDORFF M A, LUMKES J H. High-fidelity magnetic equivalent circuit model for an axisymmetric electromagnetic actuator [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(8):3064 - 3072.

11 ROBERTSON W, CAZZOLATO B, ZANDER A. Axial force between a thick coil and a cylindrical permanent magnet: optimizing the geometry of an electromagnetic actuator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(9):2479 - 2784.

12 LIU C T, KUO J L. Experimental investigation and 3-D modelling of linear variable-reluctance machine with magnetic-flux decoupled windings[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(6): 4737 - 4739.

13 郭芳,葛宝明,张瑞芳. 横向磁场直线开关磁阻电机的数学建模[J]. 电机与控制学报,2014, 18(10):42 - 49.
GUO Fang, GE Baoming, ZHANG Ruifang. Mathematical model of transverse flux linear switched reluctance motor[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(10):42 - 49. (in Chinese)

14 TAKEMOTO M, CHIBA A, AKAGI H, et al. Radial force and torque of a bearingless switched reluctance motor operating in a region of magnetic saturation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(1):103 - 112.

15 邓智泉,杨钢,张媛,等. 一种新型的无轴承开关磁阻电机数学模型[J]. 中国电机工程学报,2005, 25(9):139 - 146.
DENG Zhiquan, YANG Gang, ZHANG Yuan, et al. An innovative mathematical model for a bearingless switched reluctance motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9):139 - 146. (in Chinese)

16 LIU X G, FENG X X, SHI Y, et al. Development of a semi-active electromagnetic vibration absorber and its experimental study [J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 2013, 135(5):0510151 - 0510159.

(下转第 407 页)

Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3):347 – 351. (in Chinese)

18 LI J L. EHD sprayings induced by the pulsed voltage superimposed to a bias voltage[J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(12):750 – 757.

19 JAENSNOON N O, HULSEN M A, ANDERSON P D. Stokes-Cahn-Hilliard formulations and simulations of two-phase flows with suspended rigid particles[J]. Computers & Fluids, 2015,111:1 – 17.

20 WEI W, GU Z L, WANG S, et al. Numerical simulation of the cone-jet formation and current generation in electrostatic spray-modeling as regards space charged droplet effect[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering,2013, 23(1):015004 – 1 – 11.

(上接第 400 页)

17 孟飞,陶刚,张美荣,等. 自动变速器比例电磁阀优化设计与分析[J]. 兵工学报,2014, 25(5):590 – 596.
MENG Fei, TAO Gang, ZHANG Meirong, et al. Optimization design and analysis of high speed wet proportional solenoid valve [J]. Acta Armamentarii, 2014, 25(5):590 – 596. (in Chinese)

18 梁旭,黄明,宁涛,等. 现代智能优化混合算法及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,2014:1 – 11.

19 黄平,孟永钢. 最优化理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,2009:189 – 200.

20 张家旭,李静. 基于遗传算法的汽车 ESP 液压系统参数辨识[J]. 农业机械学报,2015, 46(8):308 – 313.
ZHANG Jiaxu, LI Jing. Parameter identification of automotive ESP hydraulic system based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015, 46(8):308 – 313. (in Chinese)

21 方鸽飞,王惠祥,黄晓烁. 改进遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2003, 15(4):15 – 18.
FANG Gefei, WANG Huixiang, HUANG Xiaoshuo. An improved genetic algorithm for reactive power optimization [J]. Proceedings of the CSU – EPSA, 2003, 15(4):15 – 18. (in Chinese)