

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.005

发动机喷油器用电磁直线执行器动态建模与试验*

时岩 常思勤

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对发动机电控喷油器中电-机能量转换机构存在的问题, 基于永磁自锁原理提出了一种电磁直线执行器(EMLA)。在考虑涡流、结构尺寸及边缘效应等影响因素下, 采用等效磁路法建立了EMLA的动态模型, 并通过仿真数据与样机试验数据的对比, 验证了动态模型的正确性, 使其可作为分析EMLA动态特性的有效工具。分析表明, EMLA在0.5 MPa开启油压条件下其过渡时间为1.57 ms(行程0.25 mm), 满足发动机高速喷射的要求, 并且因其无需保持电流而可提高发动机的经济性。

关键词: 汽油发动机 电控喷油器 电磁直线执行器

中图分类号: U464.136+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0021-06

Modeling and Experiment of Electromagnetic Linear Actuator for Fuel Injector of Engine

Shi Yan Chang Siqin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Based on the theory of permanent magnet latching, an electromagnetic linear actuator (EMLA) for a fuel injector of engine was presented. Using method of equivalent magnetic circuit, the dynamic model of the EMLA was established. Eddy current, dimensions of components, and fringing effect were taken into account in modeling. Using PWM method and H-bridge driver circuit, the prototype of the EMLA was tested on the test bed. The experimental and simulated data agreed well and the model was validated. The results show that under 0.5 MPa supply pressure, the transition time of the EMLA was 1.57 ms over 0.25 mm stroke. The EMLA had good transient characteristics and met the working requirement of the fuel injector. Furthermore, because of no holding current, the fuel economy of engine was improved.

Key words: Gasoline engine Electronic control injector Electromagnetic linear actuator

引言

高速开关阀作为液压、气动等流体系统中实现数字控制的关键元件, 因其具有高频响应、控制精度高、结构简单、成本低等优点, 目前在工业领域有着广泛应用^[1-5]。电磁执行器作为高速开关阀的核心部件, 其动态特性对高速开关阀的响应速度、控制精度等有着较大的影响^[6-10]。传统电磁执行器的工作原理都是螺线管式, 一种新的设计思想是将高能永磁材料引入电磁执行器设计中。文献[11~12]

利用永磁体与电磁线圈两种励磁源的共同作用增大电磁力的输出。文献[13~14]利用永磁体将动磁式动子自锁在开启位置而无需保持电流, 可降低电磁执行器的稳态功耗。

为了降低发动机用电控喷油器的功耗, 本文提出一种电磁直线执行器(EMLA), 该设计利用永磁自锁原理将衔铁锁止在开启与关闭位置而无需保持电流。在动态过程中, 利用高能永磁材料、电磁线圈及高刚度压缩弹簧3种激励源的耦合作用, 提高开关阀的动态响应特性。

收稿日期: 2012-07-13 修回日期: 2012-08-23

* 国家自然科学基金资助项目(50876043)和江苏省科技支撑计划资助项目(BE2008133)

作者简介: 时岩, 讲师, 博士, 主要从事电磁直线执行器研究, E-mail: peter19799275@163.com

1 EMLA 结构与工作原理

所提出的 EMLA 应用于某汽油发动机的电控喷油器,该喷油器属于常闭式两位三通阀,其主要性能参数见表 1。为保证发动机在最高转速下的燃油供应量,该阀在 0.25 mm 的行程下要求其过渡时间小于 1.8 ms。

表 1 喷油器主要性能参数

Tab.1 Main performance parameters of injector

参数	数值
行程/mm	0.25
过渡时间/ms	≤1.8
流量/g·s ⁻¹	3
供油油压/MPa	0.5
工作电压/V	12

为满足喷油器的工作要求,所设计的 EMLA 如图 1 所示。线圈不通电时,关闭永磁体所产生的磁通在动铁芯上产生静态磁力,将动铁芯锁止在下端位置,即阀的关闭位置。同时,将部分高能永磁体的能量以机械的方式储存在高刚度压缩弹簧中,该部分能量在动态过程的初期可以加速动铁芯的动态响应。由于气隙的原因,此时开启永磁体较关闭永磁体对动铁芯的影响要小。线圈通电时,线圈所产生的磁通将逐渐地消弱关闭永磁体的磁通,并在弹簧的助力作用下,动铁芯开始向上移动。过了中间位置,线圈与开启永磁体具有相同的磁通,从而可以克服弹簧力继续向上移动,并最终到达上端位置,即阀的开启位置。阀落座后,线圈可以断电,开启永磁体所产生的磁通将动铁芯锁止在开启位置,而无需保

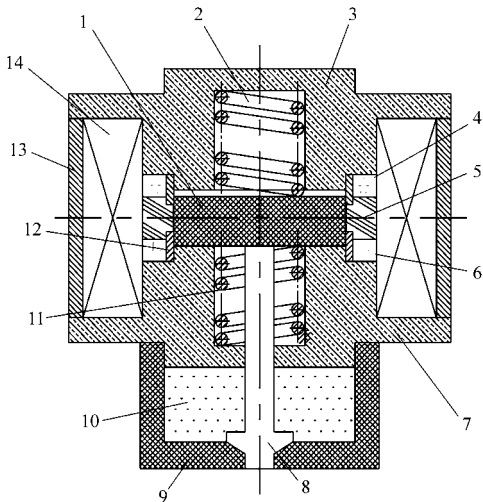


图 1 EMLA 轴对称结构图

Fig.1 Axisymmetric structure of EMLA

1. 动铁芯 2. 关闭弹簧 3. 上端盖 4. 开启永磁体
5. 极靴 6. 关闭永磁体 7. 下端盖 8. 针阀 9. 阀体
10. 燃油 11. 开启弹簧 12. 隔磁环 13. 外壳 14. 线圈

持电流。当线圈反向通电时,动铁芯开始向下移动,其关闭过程与上述开启过程一致。

端盖、外壳、极靴及动铁芯的材料为导磁性能较强的 DT4C,永磁体的材料为 NdFe42SH,隔磁环的材料为铜,针阀、弹簧及阀体的材料为不锈钢。

相比于传统的螺线管式电磁执行器,EMLA 在开启与关闭位置不需要保持电流,只需要在瞬态动作过程中向线圈供电,因此电能消耗较小,可提高发动机的经济型。同时,通过控制线圈的电流,可实现优良的动态特性。

2 动态模型的建立

为了分析 EMLA 的动态特性,利用等效磁路法建立了动态模型的状态方程。EMLA 的动态模型可以分解为电磁子模型与机械子模型,两者的耦合关系如图 2 所示。电磁子模型用以表示输入电压与电磁力输出的关系,同时机械子模型利用电磁力输出结果计算出动铁芯的位移与速度,并将其反馈给电磁子模型,从而完成当前时间步长上的耦合计算。

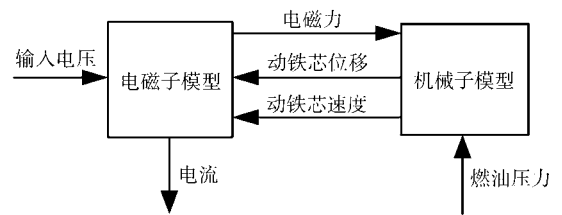


图 2 EMLA 动态模型

Fig.2 Block diagram of dynamic model of EMLA

2.1 电磁子模型

电磁子模型用以表述输入电压与电磁力输出之间的非线性关系。该模型可分解为一个电路模型和一个磁路模型,其中电路模型由一个脉冲电源、可变电感及线圈电阻组成,如图 3 所示。

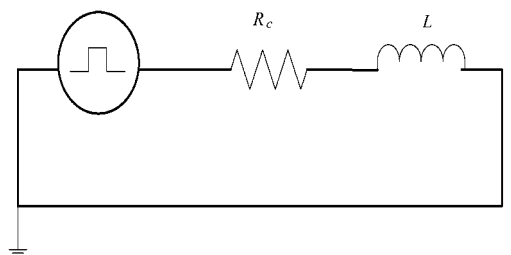


图 3 电路模型结构图

Fig.3 Schematic of electrical circuit

对于磁路模型,在考虑边缘效应与涡流损失的影响下,采用等效磁路法建立了其状态方程。利用基尔霍夫电压定律,输入电压可表示为

$$V = R_c i + N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

式中 V ——输入脉冲电压

R_c ——线圈电阻 i ——线圈电流
 N ——线圈匝数 Φ ——总磁通

为了确定式(1)中的线圈电流,首先需要计算磁路中的总磁通,本文充分考虑了 EMLA 结构尺寸的影响,建立了磁路图及其等效磁路图,如图 4 与图 5 所示。

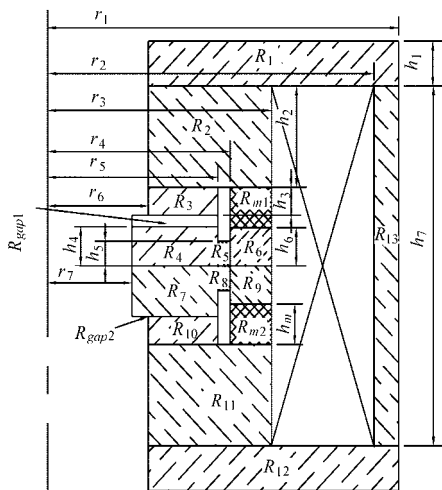


图 4 EMLA 磁路图

Fig. 4 Schematic of magnetic circuit

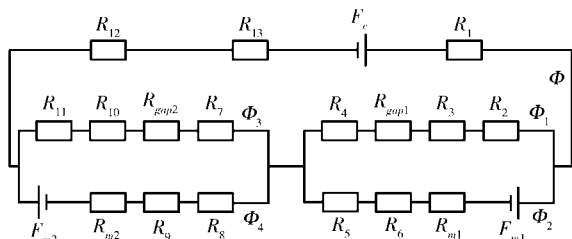


图 5 EMLA 等效磁路图

Fig. 5 Schematic of equivalent magnetic circuit

对于线圈,可用磁动势表示为

$$F_c = Ni \quad (2)$$

在考虑边缘效应的影响下,气隙磁阻 R_{gap1} 与 R_{gap2} 可表示为

$$R_{gap1} = \frac{1}{2\pi r_7 \mu_0 \left\{ \frac{r_5 - r_7}{x_{max} - x} + \frac{2}{\pi} \left[1 + \ln \frac{\pi h_4}{2(x_{max} - x)} \right] \right\}} \quad (3)$$

$$R_{gap2} = \frac{1}{2\pi r_7 \mu_0 \left[\frac{r_5 - r_7}{x} + \frac{2}{\pi} \left(1 + \ln \frac{\pi h_4}{2x} \right) \right]} \quad (4)$$

式中 x_{max} ——动铁芯行程
 x ——动铁芯瞬时位移
 μ_0 ——空气磁导率

图 4 所示的各部分导磁材料的磁阻可表示为

$$R_1 = R_{12} = \frac{\ln \frac{r_1}{r_6}}{2\pi h_1 \mu} \quad (5)$$

$$R_2 = R_{11} = \frac{h_2}{\mu [2\pi r_6 (r_3 - r_6)]} \quad (6)$$

$$R_3 = R_{10} = \frac{h_3}{\mu [2\pi r_6 (r_5 - r_6)]} \quad (7)$$

$$R_4 = R_7 = \frac{h_4}{\mu [2\pi r_7 (r_5 - r_7)]} \quad (8)$$

$$R_5 = R_8 = \frac{\ln \frac{r_4}{r_5}}{2\pi h_5 \mu} \quad (9)$$

$$R_6 = R_9 = \frac{h_6}{\mu [2\pi r_4 (r_3 - r_4)]} \quad (10)$$

$$R_{13} = \frac{h_7}{\mu [2\pi r_2 (r_1 - r_2)]} \quad (11)$$

式中 μ ——DT4C 材料的磁导率

- r_1 ——磁阻 1 外径
- r_2 ——磁阻 13 内径
- r_3 ——磁阻 2 外径
- r_4 ——磁阻 5 外径
- r_5 ——磁阻 3 外径
- r_6 ——磁阻 1 内径
- r_7 ——磁阻 4 内径
- $h_1 \sim h_7$ ——磁阻 1、2、3、4、5、6、13 轴向高度
- $R_1 \sim R_{13}$ ——导磁材料的磁阻

永磁体可以表示为磁动势与磁阻的串联形式

$$F_{m1} = F_{m2} = F_m = H_m h_m \quad (12)$$

$$R_{m1} = R_{m2} = \frac{h_m}{\mu_0 \mu_r [2\pi r_4 (r_3 - r_4)]} \quad (13)$$

式中 F_{m1} 、 F_{m2} ——开启永磁体与关闭永磁体的磁动势

- F_m ——永磁体磁动势
- R_{m1} 、 R_{m2} ——开启永磁体与关闭永磁体磁阻
- H_m ——永磁体磁场强度
- h_m ——永磁体轴向高度
- μ_r ——永磁体相对磁导率

根据图 5 中磁阻的组成结构,可简化为

$$R_a = R_2 + R_3 + R_{gap1} + R_4 \quad (14)$$

$$R_b = R_{m1} + R_6 + R_5 \quad (15)$$

$$R_c = R_7 + R_{gap2} + R_{10} + R_{11} \quad (16)$$

$$R_d = R_{m2} + R_8 + R_9 \quad (17)$$

$$R_e = R_1 + R_{12} + R_{13} \quad (18)$$

利用求解回路电流的方法,可知

$$\begin{cases} \Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_3 + \Phi_4 \\ \Phi_1 R_a = F_m + \Phi_2 R_b \\ \Phi_3 R_c = \Phi_4 R_d - F_m \\ F_c = \Phi R_e + \Phi_1 R_a + \Phi_3 R_c \end{cases} \quad (19)$$

通过求解式(19)可得

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi &= \frac{F_c + F_m \left(\frac{R_c}{R_c + R_d} - \frac{R_a}{R_a + R_b} \right)}{R_c + \frac{R_a R_b}{R_a + R_b} + \frac{R_c R_d}{R_c + R_d}} \\ \Phi_1 &= \frac{F_m + \Phi R_b}{R_a + R_b} \\ \Phi_3 &= \frac{\Phi R_d - F_m}{R_c + R_d} \end{aligned} \right. \quad (20)$$

式中 $\Phi_1 \sim \Phi_4$ ——各支路磁通

由于 F_c 是瞬态电流的函数,同时 R_{gap1} 与 R_{gap2} 又是瞬态位移的函数,因此式(1)可写为

$$V = R_c i + \frac{N \partial \Phi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{N \partial \Phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (21)$$

对式(21)进行改写可得到求解瞬态电流的非线性方程

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{N \partial \Phi}{\partial i} \left(V - R_c i - \frac{N \partial \Phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} \right) \quad (22)$$

涡流会对动铁芯的动态响应产生影响,通常采用并联一个电阻的方法来考虑涡流的影响,而本文通过计算磁场扩散时间的方法来模拟涡流^[15]。利用拉普拉斯域的一阶滞后模型可以计算出 Φ_1 与 Φ_3 考虑涡流后的新值 Φ_1^* 与 Φ_3^* ,即

$$\frac{\Phi_1^*(s)}{\Phi_1(s)} = \frac{1}{\sigma \mu \left(\frac{r_5 - r_7}{2.4048} \right)^2 s + 1} \quad (23)$$

$$\frac{\Phi_3^*(s)}{\Phi_3(s)} = \frac{1}{\sigma \mu \left(\frac{r_5 - r_7}{2.4048} \right)^2 s + 1} \quad (24)$$

式中 σ ——动铁芯的电导率

作用在动铁芯上的电磁力为

$$F_c = \frac{\Phi_1^{*2} + \Phi_3^{*2}}{2\mu_0 [2\pi r_7 (r_5 - r_7)]} \quad (25)$$

2.2 机械子模型

根据牛顿第二定律,机械子模型的动力学方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + k(x - x_s) = F_e + F_p \quad (26)$$

式中 m ——运动部件质量

c ——阻尼系数 k ——弹簧刚度

x_s ——弹簧预压缩量

F_p ——燃油压力

燃油压力是通过针阀的压降而产生的,其计算公式为

$$F_p = p_s S_1 - p_0 S_2 \quad (27)$$

式中 p_s ——燃油油压

S_1 ——燃油油压作用面积

p_0 ——针阀出口压强

S_2 ——出口压强作用面积

通过耦合电磁子模型与机械子模型可以建立 EMLA 的动态模型,本文利用 Simulink 进行建模与仿真工作。

3 试验装置

为了验证 EMLA 动态模型的正确性,研制了 EMLA 原理样机,并将其组装到喷油器当中,如图 6 所示,其设计参数见表 2,其中运动部件质量包括动铁芯与针阀。

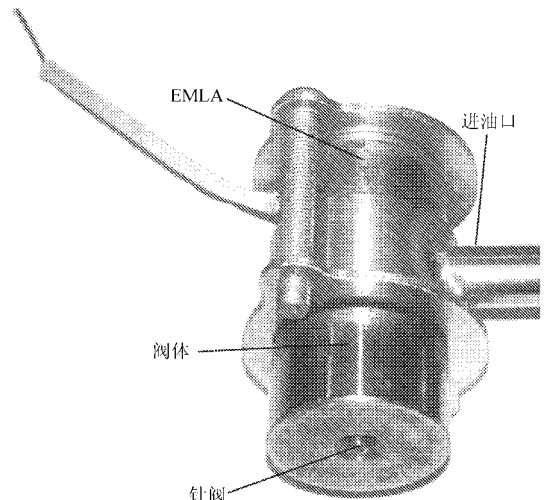


图 6 原理样机

Fig. 6 Valve prototype

表 2 原理样机设计参数

Tab. 2 Prototype parameters

参数	数值
动铁芯行程 x_{max}/mm	0.25
运动部件质量 m/g	1.4
阻尼系数 $c/N \cdot s \cdot m^{-1}$	0.2
弹簧刚度 $k/N \cdot mm^{-1}$	35
弹簧预压缩量 x_s/mm	0.125
线圈匝数 N	200
线圈电阻 R_c/Ω	3
燃油油压作用面积 S_1/mm^2	9.42
出口压强作用面积 S_2/mm^2	12.56
燃油油压 p_s/MPa	0.5
针阀出口压强 p_0/MPa	0.1

原理样机的测试台架如图 7 所示,过渡时间是反映 EMLA 动态特性的关键参数,本文利用高精度激光位移传感器实时获取 EMLA 的瞬时位移,其采样速率可达 $50 \mu s$,在该采样速率下精度为 $0.2 \mu m$ 。

通过控制线圈电流可以对 EMLA 的动态过程进行控制,从而实现良好的动态特性,因此本文应用脉宽调制(PWM)方法对线圈电流进行控制。相对于常规的螺线管式执行器,EMLA 需要正向与反向

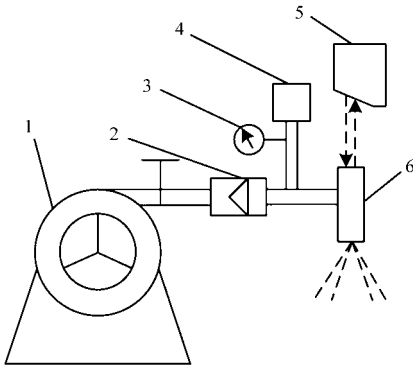


图 7 测试台架原理图

Fig. 7 Schematic of test bed

- 1. 压气机 2. 流量计 3. 压力表 4. 供油系统
- 5. 激光位移传感器 6. 喷油器

的激励电流以完成其开启与关闭动态过程,基于此设计了 H 桥式电路,如图 8 所示。当 Q1 与 Q4 同时打开时,电流便从电源流经线圈而接地,线圈正向通电,所产生的电磁力驱动动铁芯开始向上移动。当针阀完全打开时, Q1 与 Q4 同时断开,完成开启过程。同理,当 Q2 与 Q3 同时打开时,线圈反向通电,针阀完成关闭过程。利用 DSP2812 控制器作为 PWM 信号发生器,驱动 Q1 ~ Q4 通断,并向线圈提供 0 ~ 12 V 电压。数据采集工作由独立的 NI - PXI 采集系统完成。

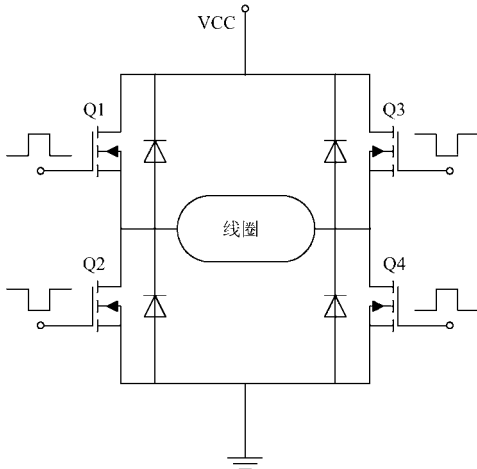


图 8 H 桥式驱动电路

Fig. 8 Schematic of H-bridge type driving circuit

4 仿真与试验

由于开启过程的负载明显大于关闭过程,而且表 1 中的过渡时间的要求也是基于开启过程提出的,因此本文对开启动态过程进行测试与仿真分析。对于发动机喷油器而言,主要采用开环控制的方法,将占空比与脉冲信号持续时间(脉冲个数与脉冲周期的乘积)作为控制参数。将占空比设为常数(100%),通过调节脉冲信号持续时间控制线圈电流,使得动铁芯可以平稳落座。

图 9 显示了在 0.8 ms 脉冲持续时间条件下瞬时位移的测试数据与仿真数据的对比,从中可以看出两者具有较好的一致性,从而验证了动态模型的正确性,可以作为分析 EMLA 动态特性的有效工具。利用动态模型仿真分析可得到开启过程的瞬时电流与瞬时电磁力,如图 10 所示。在 $t=0$ 时刻,线圈中没有激励电流存在,此时的静态电磁力是由关闭永磁体在动铁芯上产生的,大小为 -35.05 N (负号表示方向向下),该电磁力称为自锁力,可将动铁芯锁止在关闭位置。随着电流的增大,关闭永磁体在动铁芯上所产生的磁通逐渐被通电线圈所产生的磁通所削弱,电磁力逐渐减小。在瞬时电流的拐点处,由于激励电流的关断,电流开始减小。此后,电磁力在高刚度压缩弹簧所产生的向上的助力作用下,克服燃油压力与运动部件的惯性之后,推动动铁芯开始向上移动(约在 $t=1\text{ ms}$)。随着动铁芯运动速度的增加,由于反电动势增大,约在 $t=1.15\text{ ms}$ 时电流曲线又出现了拐点,加快了电流的衰减。到达中间位置时,由于对称性,关闭永磁体与开启永磁体的磁通相互抵消。此后,线圈与开启永磁体作用在动铁芯上的磁通方向相同,电磁力不断增大,克服弹

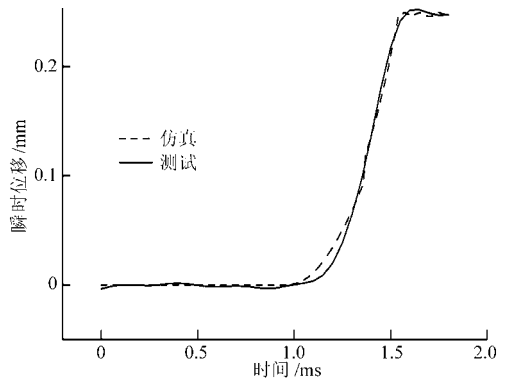


图 9 0.8 ms 脉冲持续时间下瞬时位移仿真与测试曲线

Fig. 9 Simulated and tested transient position with 0.8 ms pulse duration

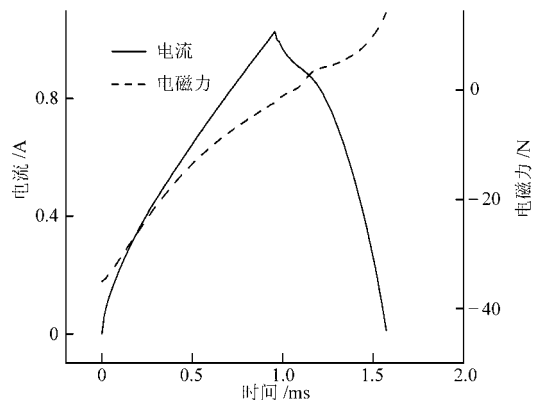


图 10 瞬时电流与电磁力仿真曲线

Fig. 10 Simulated curves of electromagnetic force and current

簧力实现平稳落座。动铁芯从关闭位置到开启位置的动作时间约为 0.57 ms, 因此整个开启时间约为 1.57 ms。当动铁芯到达开启位置后实现了平稳的落座, 没有出现反弹现象, 此时电流降为零, 动铁芯由开启永磁体实现自锁而不需要保持电流。

5 结论

(1) 根据发动机电控喷油器的要求利用永磁自锁原理设计了一种电磁直线执行器(EMLA)。在考虑涡流、结构尺寸及边缘效应等影响因素下, 采用等效磁路法建立了 EMLA 的动态模型, 并通过原理样

机试验验证了动态模型的正确性, 使其成为分析 EMLA 动态特性的有效工具。

(2) 通过试验与仿真分析可知, EMLA 在 0.5 MPa 负载条件下其开启过渡时间为 1.57 ms, 符合电控喷油器的工作要求, 而且相对于常规的螺线管式执行器, EMLA 无需保持电流, 可在一定程度上提高发动机的经济性。

(3) 所设定的线圈电流控制参数(占空比与脉冲信号持续时间)的值并非最优值, 需要进一步的优化以获得优良的动态特性与较低的电功率损耗。

参 考 文 献

- 1 Lee G S, Sung H J, Kim H C, et al. Flow force analysis of a variable force solenoid valve for automatic transmissions [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(3): 031103-1~031103-7.
- 2 Topçu E E, Yüksel I, Kams Z. Development of electro-pneumatic fast switching valve and investigation of its characteristics [J]. Mechatronics, 2006, 16(6): 365~378.
- 3 时岩, 常思勤, 唐玉梅. 内燃-直线发电集成动力系统的喷油器流量特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 50~53.
Shi Yan, Chang Siqin, Tang Yumei. Flux characteristic of injector for internal combustion linear generator integrated power system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 50~53. (in Chinese)
- 4 Lolenko K, Fehn A A R. Model-based open-loop control design for a hydraulic brake system with switching solenoid valves [J]. AT-Autom., 2007, 55(2): 86~95.
- 5 de Wet G J, Steyn J L, Els P S. Simulation and experimental verification of solenoid valve characteristics for semi-active dampers [J]. International Journal of Vehicle Design, 2008, 47(1~4): 118~132.
- 6 Naseradinmousavi P, Nataraj C. Nonlinear mathematical modeling of butterfly valves driven by solenoid actuators [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(5): 2324~2335.
- 7 Cai B P, Liu Y H, Tian X J, et al. Optimization of submersible solenoid valves for subsea blowout preventers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(2): 451~458.
- 8 Lan Y, Chang T N. Zero vibration on-off position control of dual solenoid actuator [J]. IEEE Transactions on, Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2519~2526.
- 9 Xiang Z, Liu H, Tao G L, et al. Development of an ε -type actuator for enhancing high-speed electro-pneumatic ejector valve performance [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2008, 9(11): 1552~1559.
- 10 Wang Q, Yang F, Yang Q, et al. Experimental analysis of new high-speed powerful digital solenoid valves [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(5): 2309~2313.
- 11 Man J, Ding F, Li Q P, et al. Novel high-speed electromagnetic actuator with permanent-magnet shielding for high-pressure applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(12): 4030~4033.
- 12 Kang D H. Increasing of thrust force in transverse flux machine by permanent-magnet screen [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1952~1955.
- 13 Jinho K, Junghwan C. A new electromagnetic linear actuator for quick latching [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4): 1849~1852.
- 14 Kim J, Lieu D. A new electromagnetic engine valve actuator with less energy consumption for variable valve timing [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2007, 21(4): 602~606.
- 15 Brauer J R. Magnetic diffusion times for infusion and effusion in nonlinear steel slabs and cylinders [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(3): 3181~3188.
- 16 郭树满, 苏万华, 刘二喜, 等. 基于自举电路的共轨喷油器驱动电路优化设计 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 11~15.
Guo Shuman, Su Wanhua, Liu Erxi, et al. Optimization design of common-rail injector driving circuit based on bootstrap circuit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 11~15. (in Chinese)