

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.002

共轨喷油电磁阀动态特性仿真与实验^{*}

李丕茂 张幽彤 倪成群 欧阳巍
(北京理工大学清洁车辆实验室, 北京 100081)

摘要: 电磁阀动态响应特性直接影响高压共轨喷油器的开启和关闭过程。首先对电磁阀驱动电流加载和卸载过程进行了实验研究,基于实验结果和驱动原理求取了不同气隙下电磁阀磁链与电流的关系,并根据磁链与电磁力的关系建立了电磁阀的电磁模型。然后根据电磁阀的工作原理建立了描述衔铁运动特性的电磁阀动力学模型。最后,在 Matlab/Simulink 仿真环境中建立了以驱动电流为输入的共轨喷油器电磁阀机电耦合模型,对模型进行了验证,仿真计算结果与实验结果显示了很好的一致性。

关键词: 共轨喷油器 电磁阀 动态响应特性 机电耦合模型

中图分类号: TK42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0007-06

Simulation and Experiment of Dynamic Characteristics of Common-rail Injector Solenoid Valve

Li Pimao Zhang Youtong Ni Chengqun Ou Yangwei
(Low Emission Vehicle Research Lab, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Opening and closing process of high pressure common rail injector are affected directly by dynamic response characteristics of solenoid valve. In order to research the dynamic response characteristics of solenoid valve, experimental investigation was first conducted on the drive current and the power source voltage. Relationships between flux linkage and drive current of solenoid valve under different air gaps were acquired from the experimental results according to the principle of drive circuit. Electromagnetic model of the solenoid valve was built based on the relationships acquired. Then dynamic model of armature was built according to the working principle of solenoid valve. Finally, electromechanical model of the solenoid valve consisting of electromagnetic model and dynamic model was built and simulated in Matlab/Simulink. Special experiment was designed to verify the electromechanical model. Simulation and experiment results showed a good agreement with each other.

Key words: Common-rail injector Solenoid valve Dynamic response characteristic Electromechanical model

引言

电磁式共轨喷油器的开启和关闭由电磁阀控制,是衡量喷油器动态响应特性的重要指标,与电磁阀的动态特性紧密相关。国内外研究人员已经对电磁阀特性进行了大量的研究。

文献[1]提出了一种估算衔铁位移的方法,该

方法考虑了稳态电流对电磁阀电感的影响,适用于恒定电流作用下电感与衔铁位移一一对应的情况。文献[2~4]采用有限元法对电磁阀静态特性以及气隙固定不变、控制电流动态变化情况下的电磁力与电流的关系进行了研究,采用初始磁化曲线描述铁芯材料的磁化特性。文献[5~7]采用磁通分层磁阻模型研究了电磁阀的动态特性,考虑了磁通密

收稿日期: 2012-05-04 修回日期: 2012-06-11
^{*} 国家自然科学基金资助项目(51076014)
作者简介: 李丕茂,博士生,主要从事柴油机电控研究,E-mail: lpmwf@yahoo.com.cn
通讯作者: 张幽彤,教授,博士生导师,主要从事柴油机电控、混合动力研究,E-mail: youtong@bit.edu.cn

度在磁路横截面内分布不均匀的影响,采用恒定的相对磁导率或者初始磁化曲线来描述铁磁材料的磁化特性。文献[8~12]不考虑磁通密度在磁路横截面内分布不均匀的影响,基于磁路欧姆定律建立电磁阀的电磁模型,对电磁阀的动态特性进行了研究,同样采用恒定的相对磁导率或者初始磁化曲线来描述铁磁材料的磁化特性。

有限元法的缺陷在于不能模拟气隙的动态变化过程和磁滞的影响。不考虑磁通密度在磁路横截面内分布不均的磁阻模型的缺陷是不能反映磁通密度分布不均导致的磁导率的变化,无法考虑磁滞的影响。综上所述,国内外对控制电流加载和卸载过程中电磁阀特性变化的研究还不够深入。此外,建立的电磁阀模型没有考虑因磁滞导致的控制电流加载和卸载过程的区别。

基于以上研究,本文首先对控制电流加载和卸载过程中的电磁阀驱动电流和电源电压进行实验研究,并根据磁链与电磁力的关系建立电磁阀的电磁模型。然后,建立描述衔铁运动特性的电磁阀动力学模型,并在 Matlab/Simulink 仿真环境中建立以驱动电流为输入的共轨喷油器电磁阀机电耦合模型,对模型进行验证。

1 实验

1.1 电磁阀结构及工作原理

图1为共轨喷油器电磁阀结构图。工作过程中,铁芯和衔铁行程限制器固定不动。当电磁力和弹簧2对衔铁施加向上的力不足以克服弹簧1对衔铁施加向下的力时,电磁阀关闭,气隙最大。线圈中通过电流,当电磁力和弹簧2对衔铁施加向上的力能够克服弹簧1对衔铁施加向下的力时,衔铁向上运动,电磁阀打开。

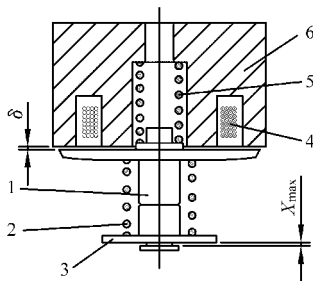


图1 喷油器电磁阀结构图

Fig.1 Structure of injector solenoid valve

1. 衔铁 2. 回位弹簧2 3. 行程限制器 4. 线圈 5. 回位弹簧1
6. 铁芯

1.2 实验设备

图2为实验系统原理图。通过气隙粗调旋钮和气隙细调旋钮来调节衔铁与电磁阀阀体之间的气

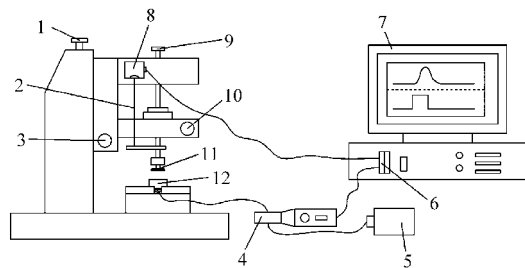


图2 实验系统原理图

Fig.2 Test system diagram

1. 气隙粗调旋钮 2. 激光 3. 粗调锁紧旋钮 4. 电流传感器
5. 喷油器驱动模块 6. 数据采集卡 7. 工控机 8. 激光位移传感器
9. 气隙细调旋钮 10. 细调锁紧旋钮 11. 衔铁 12. 电磁阀阀体

隙,气隙的大小通过激光位移传感器来测量,激光位移传感器的精度为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$,量程为 $\pm 1 \text{ mm}$ 。电流传感器的测量范围 $0 \sim 70 \text{ A}$,输出为 100 mV/A 。驱动模块可以调整脉宽、高电流值、保持电流值。

1.3 实验方案及结果

通过喷油器驱动模块可以调节燃油喷射脉宽、最大电流值以及驱动方式等。实验中通过调节驱动模块使驱动电流随时间的变化如图3所示。驱动电流随时间变化的过程分为3个阶段:电流快速上升阶段A、大电流保持阶段B和电流快速下降阶段E。在不同的气隙下采集A和E阶段的电流和电源电压。

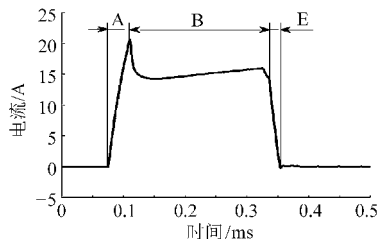


图3 实验用共轨喷油器驱动电流曲线

Fig.3 Drive current of common-rail injector used in experiment

图4为A阶段喷油器电磁阀驱动电流和电源电压随时间变化曲线。图5为E阶段喷油器电磁阀驱动电流和电源电压随时间变化曲线。为了方便比较,电流下降过程绘制成图5所示的电流上升过程。

比较图4和图5可以看出,产生相同的电流变化,A阶段所需的时间远远大于E阶段所需的时间,这是因为A阶段电磁阀电感在较大的电流范围内大于E阶段电磁阀的电感。另外,从图4和图5可以看出电磁阀电流上升过程与恒定电感下电流上升过程不同,这说明A阶段和E阶段电磁阀电感均随电流的变化而变化。

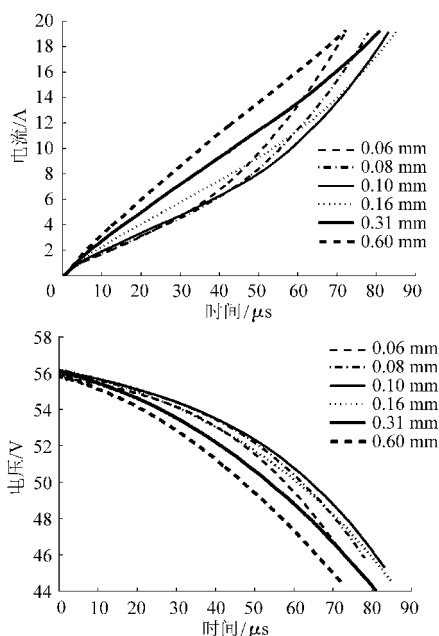


图4 A阶段驱动电流及电源电压变化曲线

Fig. 4 Drive current and power source voltage of stage A

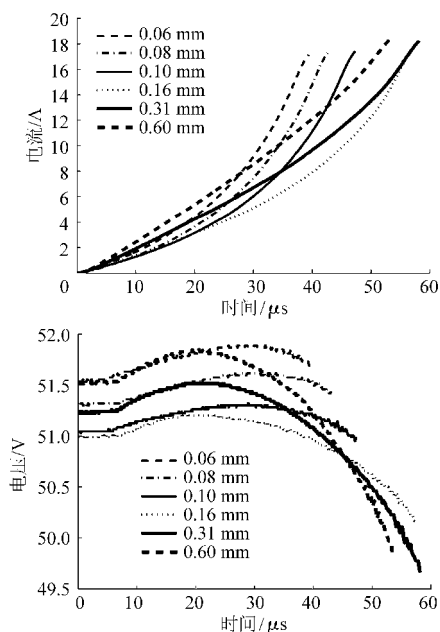


图5 E阶段驱动电流及电源电压变化曲线

Fig. 5 Drive current and power source voltage of stage E

2 理论分析

2.1 电磁力

不考虑漏磁通的影响,电磁力的计算式为^[13]

$$F_m = \frac{\phi^2}{\mu_0 S} \quad (1)$$

式中 μ_0 ——真空磁导率 ϕ ——磁通量

S ——磁路中气隙的横截面积

根据磁链的定义,可以得到磁通量 ϕ 表达式为

$$\phi = \frac{\psi}{N} \quad (2)$$

式中 ψ ——电磁阀磁链 N ——线圈匝数

将式(2)代入式(1)得

$$F_m = \frac{\psi^2}{\mu_0 S N^2} \quad (3)$$

式中 μ_0 、 S 和 N 均为常数,所以 ψ 的大小可以代表电磁力的大小。下面分析 A 阶段和 E 阶段的磁链。

2.2 A 阶段磁链

A 阶段的等效电路如图 6 所示,满足方程

$$\frac{d\psi}{dt} + i(R_{inj} + R_c) = U \quad (4)$$

式中 R_{inj} ——喷油器的串联等效电阻

R_c ——回路其它元件的电阻

t ——时间 U ——电压

i ——电流

采用前向差分格式将式(4)中的磁链对时间的导数进行离散得

$$\frac{\psi_{n+1} - \psi_n}{t_{n+1} - t_n} + i_n(R_{inj} + R_c) = U_n \quad (n=0, 1, \dots, M-1) \quad (5)$$

式中 M ——采样点数

由于采样频率一定,所以令 $\Delta t = t_{n+1} - t_n$,化简式(5)得

$$\psi_{n+1} = \Delta t [U_n - i_n(R_{inj} + R_c)] + \psi_n \quad (n=0, 1, \dots, M-1) \quad (6)$$

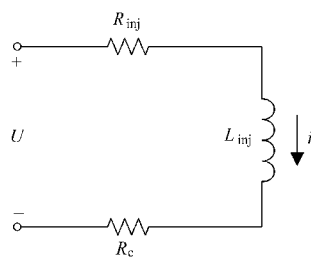


图6 A阶段和E阶段的等效驱动电路

Fig. 6 Equivalent drive circuit of stage A and E

铁芯和衔铁材料为软磁材料,在电磁阀控制电流为 0 A 时,铁芯和衔铁材料内部仍然会有少量剩磁存在,初始磁链不为 0 Wb。但由于剩磁较小,所以忽略剩磁的作用,认为 A 阶段电流为 0 A 时,磁链为 0 Wb。采用式(6)对图 4 和图 5 中的数据进行处理,得到 A 阶段的磁链。

由图 7 可以看出,气隙较小的情况下,在电流较小时磁链随电流的增加快速增大;电流增大到一定程度后,磁链随电流的增加而增大的速度变缓。气隙较大的情况下,随电流的增加磁链在整个电流范围内均快速增加,但磁链小于相同电流下较小气隙对应的磁链。

根据铁磁材料的磁化特性可知,气隙较小时,磁链增大的速度在电流较大时变缓,因为铁芯和衔铁

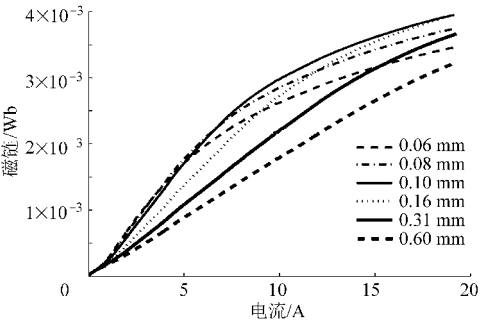


图7 A阶段磁链与电流的关系曲线

Fig.7 Relationship between flux linkage and current of stage A

材料在电流较大时达到了磁饱和状态。气隙较大时,不会出现增大速度变慢是因为气隙较大,对应的磁路磁阻就较大,所以相同的电流作用下,磁通密度较小,铁芯和衔铁材料不会出现磁饱和状态。可以预见,如果实验中所用的电磁阀驱动电流继续增大,那么更多气隙下的磁链随电流的变化会出现类似的情况。

2.3 E阶段磁链

E阶段的等效电路与A阶段的区别是:A阶段电源放电,回路电流增大,电流方向如图7所示,E阶段是电源充电的过程,电流逐渐减小,电流方向与图7中所示的电流方向相反,且E阶段的 R_c 小于A阶段的 R_c 。为了保证电磁力不发生突变,E阶段还必须保证在最大电流点磁链与A阶段该电流下的相同。这样做的前提是A阶段和E阶段的最大电流是相同的,由于实验条件所限,无法做到A阶段与E阶段的最大电流相同,但2个电流值相差不大,所以可以近似认为E阶段最大电流的磁链与A阶段对应电流下的磁链相同。A阶段在E阶段最大电流点的磁链前面已经计算出来,以最大电流点的磁链为初始值,E阶段磁链的计算公式为

$$\psi_{n+1} = \psi_n - \Delta t [U_n + i_n (R_{inj} + R_c)]$$

$(n = M - 1, \cdots, 1, 0)$

(7)

从图8可以看出,不同气隙下,E阶段磁链随电流的变化呈现出与A阶段相同的规律。

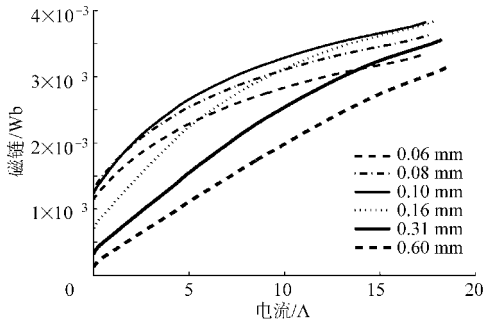


图8 E阶段磁链与电流的关系曲线

Fig.8 Relationship between flux linkage and current of stage E

对比图7和图8可以发现,相同的气隙、相同的电流下,A阶段的磁链小于E阶段的磁链。E阶段电流下降为0A时电磁阀的磁链远远大于0Wb,特别是在气隙较小的情况下。而由于软磁材料的剩磁不能永久地保留,所以可以确定这些剩磁会在很短的时间内消失。同一气隙下,A阶段和E阶段之间的各种区别都是由铁芯和衔铁材料的磁滞效应造成的。

3 仿真分析

3.1 电磁模型

电磁力根据式(3)计算,不考虑漏磁通。磁链 ψ 采用查找二维表格和线性插值的方法来计算,即根据电磁阀气隙和电流通过查表的方式来确定磁链。模型中一共包括2个二维表格,除E阶段外,其它阶段均采用由图7所示的数据构成的二维表格,E阶段采用由图8所示的数据构成的二维表格。

本文所用高压共轨电磁阀中由气隙构成的磁路包括图9所示的4部分, N 和 i 的乘积为磁势。 R_{ma1} 、 R_{ma2} 、 R_{ma3} 、 R_{ma4} 为磁路中气隙的磁阻。根据磁路欧姆定律以及串并联情况下磁阻的计算方法^[14]可得式(3)中 S 的计算方法为

$$S = \frac{2S_{a1}(S_{a2} + S_{a3} + S_{a4})}{S_{a1} + S_{a2} + S_{a3} + S_{a4}}$$

(8)

式中 S_{a1} 、 S_{a2} 、 S_{a3} 、 S_{a4} ——各磁阻的横截面积

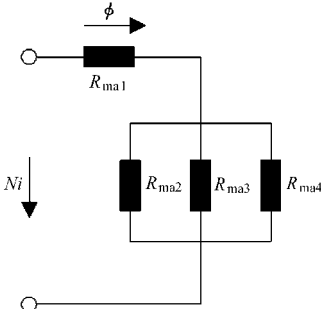


图9 电磁阀磁路中的气隙

Fig.9 Air gap of solenoid valve magnetic circuit

3.2 动力学模型

图10为喷油器电磁阀衔铁工作原理图。其中 m_a 为衔铁质量, F_m 为电磁力, k_{w1} 为衔铁向上运动与

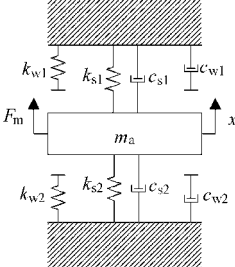


图10 衔铁工作原理图

Fig.10 Schematic of dynamic model of armature

位移限制器接触后相互作用的刚度, c_{w1} 为衔铁向上运动与位移限制器接触后相互作用的阻尼系数, k_{s1} 为回位弹簧 1 的刚度, c_{s1} 为回位弹簧 1 的等效阻尼系数, k_{s2} 为回位弹簧 2 的刚度, c_{s2} 为回位弹簧 2 的等效阻尼系数, k_{w2} 为衔铁向下运动与位移限制器接触后相互作用的刚度, c_{w2} 为衔铁向上运动与位移限制器接触后相互作用的阻尼系数, x 为衔铁位移, 向上为正。衔铁只能沿 x 方向运动, 电磁阀关闭时衔铁所处的位置取为 $x = 0$, 不考虑燃油压力的作用, 根据牛顿第二定律可得

$$m_a \frac{d^2 x}{dt^2} = -c_{s1} \frac{dx}{dt} - k_{s1} (X_{s1} + x) - c_{w1} \frac{dx}{dt} -$$
$$k_{w1} (x - X_{\max}) - c_{s2} \frac{dx}{dt} + k_{s2} (X_{s2} - x) - c_{w2} \frac{dx}{dt} +$$
$$k_{w2} (X_{w2} - x) + F_m - m_a g \cos \theta \quad (9)$$

式中 X_{s1} 、 X_{s2} —— $x = 0$ 时, 回位弹簧 1、2 的压缩量, 如果回位弹簧伸长, X_{s1} 、 X_{s2} 为负值

X_{w2} —— $x = 0$ 时, 衔铁和位移限制器的变形量, 大于零

$X_{\max}$ ——衔铁和位移限制器不接触时的最大位移

θ ——喷油器轴线与铅垂方向的夹角

在 $x = 0$ 处, X_{s1} 、 X_{s2} 、 X_{w2} 和 $m_a g$ 满足的关系式为

$$k_{s1} X_{s1} + m_a g \cos \theta = k_{s2} X_{s2} + k_{w2} X_{w2} \quad (10)$$

k_{w1} 、 c_{w1} 、 k_{w2} 和 c_{w2} 的取值与 x 有关, 分别为

$$k_{w1} = \begin{cases} 0 & (x \leq X_{\max}) \\ C_1 & (x > X_{\max}) \end{cases} \quad (11)$$

$$c_{w1} = \begin{cases} 0 & (x \leq X_{\max}) \\ C_2 & (x > X_{\max}) \end{cases} \quad (12)$$

$$k_{w2} = \begin{cases} 0 & (x \geq X_{w2}) \\ C_3 & (x < X_{w2}) \end{cases} \quad (13)$$

$$c_{w2} = \begin{cases} 0 & (x \geq X_{w2}) \\ C_4 & (x < X_{w2}) \end{cases} \quad (14)$$

式中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 ——常数

气隙 δ 与衔铁位移 x 的关系为

$$\delta = \delta_0 - x \quad (15)$$

式中 δ_0 —— $x = 0$ 时的气隙

k_{w1} 的估算方法为

$$k_{w1} = \frac{E S_{w1}}{l_{w1}} \quad (16)$$

式中 E ——材料的弹性模量

S_{w1} 、 l_{w1} ——横截面积和长度

k_{w2} 也可以采用相同的方法来估算。

3.3 仿真计算

基于 3.1 和 3.2 节, 在 Simulink 中建立的电磁

阀模型如图 11。 F_1 为燃油压力, 本文没有考虑, 所以将其设置为 0 N。模型包括输入、电磁模型、机械模型和输出 3 部分。模型输入如图 12 所示, 为电磁阀驱动电流。

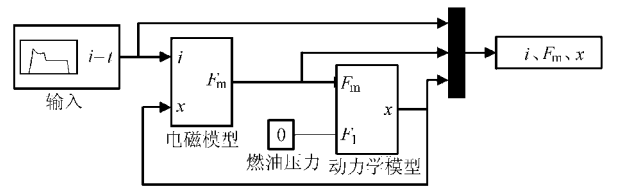


图 11 电磁阀模型

Fig. 11 Model of solenoid valve

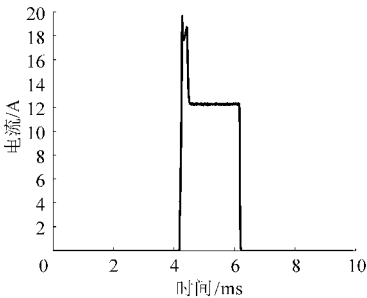


图 12 电磁阀模型输入

Fig. 12 Input of solenoid valve model

图 11 中的电磁子模型如图 13 所示。其中磁链选择模块根据仿真时间和电流确定的通过 A 或 E 阶段的磁链来计算电磁力。A 和 E 阶段磁链模块的功能为根据电流 i 和气隙 δ , 查询由图 7 和图 8 中的数据分别组成的二维表格, 并通过线性插值法计算当前电流 i 和气隙 δ 下的磁链, 然后根据式 (3) 计算电磁力。

采用三阶 Runge - Kutta 法对图 11 中模型进行求解。在燃油喷射脉宽 2 ms、初始气隙 δ_0 0.13 mm 的情况下进行仿真计算。仿真得到的衔铁位移与通过激光位移传感器测得的衔铁位移如图 14 所示。从图 14 可以看出仿真结果与实验结果保持了较好的一致性, 能够准确地描述电磁阀的动态特性。

该模型是目前正在建立的高压共轨燃油喷射系统模型中的一部分, 将被用于研究电磁阀动态特性对共轨系统燃油喷射特性的影响。

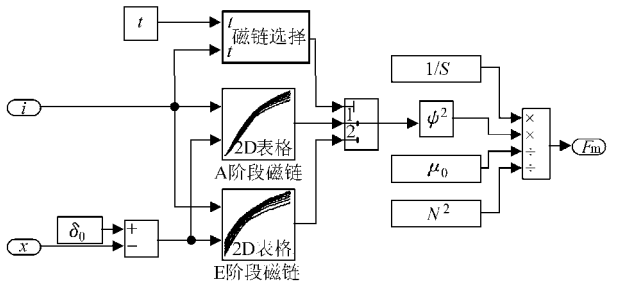


图 13 电磁子模型

Fig. 13 Electromagnetic submodel

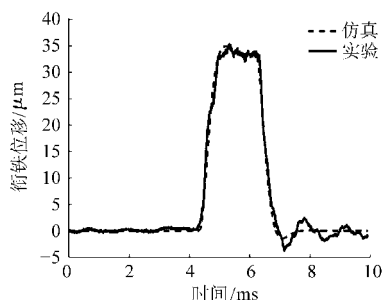


图 14 衔铁位移仿真和实验结果

Fig. 14 Simulation and experiment results of armature displacement

4 结论

(1) 对电磁阀的实验研究表明,电流发生同样大小的变化(18 A)在 A 阶段所需要的时间大于 E 阶段所需要的时间,这说明 A 阶段电磁阀的电感在较大的电流范围内大于 E 阶段电磁阀的电感。另外,电磁阀电感在 A 阶段和 E 阶段均随电流的变化而变化。

(2) 对 A 阶段和 E 阶段磁链的理论分析表明,气隙较小的情况下,在电流较小时磁链随电流的增加快速增大;电流增大到一定程度后,磁链随电流的增加而增大的速度变慢。气隙较大的情况下,随电流的增加磁链在整个电流范围内均快速增加,但磁链小于相同电流下较小气隙对应的磁链。电磁阀的这些特性是铁芯和衔铁材料的磁饱和造成的。磁滞的作用使得相同电流下对应的 A 阶段的磁链小于 E 阶段的磁链,E 阶段电流下降为 0 A 时,电磁阀的磁链远远大于 0 Wb。

(3) 提出了基于电磁阀气隙、电流和磁链数据构成的二维表格查询和线性插值法的电磁阀电磁模型建立方法,即根据电磁阀气隙和驱动电流的大小,通过查表和线性插值法来确定电磁阀磁链,并根据磁链与电磁力的关系计算出电磁力。模型考虑了铁芯和衔铁材料的磁滞和磁饱和特性的影响。仿真计算结果与实验结果表现出了较好的一致性,该模型可以很好地模拟电磁阀的动态特性。

参 考 文 献

- 1 Rahman M F, Cheung N C, Khiang Wee Lim. Position estimation in solenoid actuators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996,32(3): 552 ~ 559.
- 2 Wang S M, Miyano T, Hubbard M. Electromagnetic field analysis and dynamic simulation of a two-valve solenoid actuator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993,29(2): 1 741 ~ 1 746.
- 3 Tao G, Chen H Y, YY J, et al. Optimal design of the magnetic field of a high-speed response solenoid valve[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002,129(1 ~ 3): 555 ~ 558.
- 4 Massimo Sorli, Giorgio Figliolini, Andrea Almondo. Mechatronic model and experimental validation of a pneumatic servo-solenoid valve[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2010,132(5): 1 ~ 10.
- 5 Johannes Reuter, Matthias Jäkle, Felix Prauß. Model-based control of solenoid actuators using flux channel reluctance models[C]// 2011 16th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2011, 2011: 254 ~ 259.
- 6 Piron M, Sangha P, Reid G, et al. Rapid computer-aided design method for fast-acting solenoid actuators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999,5(35): 991 ~ 999.
- 7 Bottauscio O, Manzin A, Canova A, et al. Field and circuit approaches for diffusion phenomena in magnetic cores[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004,40(2): 1 322 ~ 1 325.
- 8 Takashi Kajima, Yoshihisa Kawamura. Development of a high-speed solenoid valve: investigation of solenoids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1995,42(1): 1 ~ 8.
- 9 Szente V, Vad J. Computational and experimental investigation on solenoid valve dynamics[C]// Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2001,1:618 ~ 623.
- 10 Chu Liang, Hou Yanli, Liu Minghui, et al. Study on the dynamic characteristics of pneumatic ABS solenoid valve for commercial vehicle[C]// VPPC 2007-Proceedings of the 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007: 641 ~ 644.
- 11 Taghizadeh M, Ghaffari A, Najafi F. Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications[J]. Comptes Rendus Mecanique, 2009,337: 131 ~ 140.
- 12 Peiman Naseradinmousavi, Nataraj C. Nonlinear mathematical modeling of butterfly valves driven by solenoid actuators[J]. Applied Mathematical Modelling, 2011,35(5): 2 324 ~ 2 335.
- 13 Cheung N C, Lim K W, Rahman M F. Modelling a linear and limited travel solenoid[C]// Proceedings of the IECON '93. International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1993,3:1 567 ~ 1 572.
- 14 Wang Qilei, Yang Fengyu, Yang Qian, et al. Experimental analysis of new high-speed powerful digital solenoid valves[J]. Energy Conversion and Management, 2011,52(5): 2 309 ~ 2 313.