

# 供油回路用电磁阀的开启响应特性研究

薛加安颖

湖南科技大学机电工程学院, 湖南, 湘潭 411201

**摘要:** 为了研究某型供油回路用高速电磁阀的响应特性受到各影响因素的作用机理, 通过有限元软件 Ansoft 建立电磁阀动态仿真结构模型。将试验结果和仿真结果对比, 得出该电磁阀开启响应时间的试验结果与仿真结果之间的误差在 3% 左右, 验证了该动态仿真模型的可靠性。采用参数化分析法, 获得了在不同工作气隙、不同弹簧预紧力、不同衔铁细直径以及不同线圈匝数的因素影响下的响应特性结果。将响应特性结果结合试验设计法得出电磁阀开启响应时间与各独立影响因素及其交互作用因素之间的联系, 并进行相关性分析。结果表明, 各独立影响因素及其交互因素对电磁阀开启响应时间具有不同程度的影响, 且与开启响应时间的相关性存在不同的规律特征和非线性关系。

**关键词:** 高速电磁阀; 开启响应特性; 独立影响因素; 交互作用因素

## Study on opening response characteristics of solenoid valve for oil supply circuit

Jia Xue, Ying An

School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201

**Abstract:** To investigate the mechanism of the response characteristics of a high-speed solenoid valve for a certain type of fuel supply circuit affected by various influencing factors, a dynamic simulation structural model of the solenoid valve was established using the finite element software Ansoft. By comparing the experimental results with the simulation results, it was found that the error between the experimental and simulation results of the opening response time of the solenoid valve was about 3%, which verified the reliability of the dynamic simulation model. The parameter analysis method was used to obtain the response characteristic results under different working air gaps, different spring pre-tightening forces, different armature core diameters, and different coil turns. By combining the response characteristic results with the experimental design method, the relationship between the opening response time of the solenoid valve and each independent influencing factor and its interaction factor was obtained, and the correlation analysis was carried out. The results showed that the independent influencing factors and their interaction factors had different degrees of influence on the opening response time of the solenoid valve, and there were different regular characteristics and nonlinear relationships with the opening response time.

**Keywords:** High speed solenoid valve; Enable the response feature; Independent influencing factors; Interaction factor

### 引言

由于电磁阀使用工况环境复杂, 使得对电磁阀工作性能分析显得尤为重要。在以往的研究中, Clark R E 等<sup>[1]</sup>采用有限元法基于 Flux 软件建立了其二维静态模型, 分析了衔铁与铁芯部分参数对电磁力工作特性的影响。汤洁, 高倩雯<sup>[2]</sup>利用 Ansoft 对电磁阀的线圈匝数、铁芯宽度和气隙等关键参数进行计算仿真, 分析了阀芯运动轨迹和电磁力随时间的变化情况。周斌, 曾东建等<sup>[3]</sup>研究比例电磁阀开启响应特性的影响及交互作用规律, 分析了各影响参数对电磁阀开启响应时间的影响。范立云, 刘鹏, 马修真等<sup>[4]</sup>利用有限元分析软件分析了残余气隙、最大升程、运动件质量、弹簧刚度和弹簧预紧力等参数对电磁阀动态响应特性的影响, 得出残余气隙、最大升

程和弹簧预紧力是主要影响因素。张功晖, 黎志航等<sup>[5]</sup>利用有限元软件对不同主工作气隙、不同驱动电压条件下的模型计算得到电磁阀开启过程的各种动态特性曲线, 并从中分析判断出电磁阀完全开启所需时间。何佳议<sup>[6]</sup>利用 Ansoft 软件分析了动铁芯质量、线圈匝数和铁芯厚度等参数的变化对电磁力的影响, 并通过 AMESim 软件进行了特性仿真分析。

上述文献对大部分影响电磁阀动态特性的参数进行了分析, 但还存在一些未考虑的因素。本文利用 Ansoft 软件进行电磁阀仿真运算分析, 在接近工况条件下分析电磁阀响应性能变化, 将仿真结果和试验结果对比, 验证了供油回路用高速电磁阀仿真模型的可靠性。采用试验设计的方法, 对影响电磁阀开启响应时间一次独立因

素和二次交互因素进行了相关性分析, 得出各因素与开启响应时间的联系规律。本文对今后类似电磁阀的优化和改进提供了一定的依据。

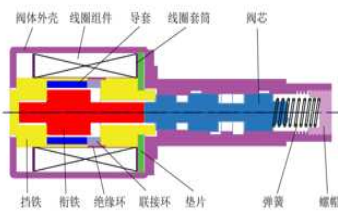


图1 高速电磁阀结构示意图

## 一、原理分析

### 1.1 电磁阀结构及工作原理

该型电磁阀是应用于汽车发动机供油回路的关键部件, 电磁阀主要结构由衔铁、挡铁、垫片、线圈套筒、线圈套筒、导套、隔磁环、联接环构成, 其结构如图1所示。当线圈通电时, 随着电流增大, 衔铁受到足够大的电磁力后, 推动阀芯轴向运动。

### 1.2 特性分析理论依据

电磁阀的通电线圈是电感元件, 其工作原理是, 当线圈通电后, 电磁线圈中的电流会以指数曲线得形式从零逐渐增大, 且随着线圈中电流的加大, 电磁阀中的衔铁上所受到的电磁力会随着电流的增大而增大。当电磁力增大超过衔铁受到的阻力后, 衔铁就会产生位移并最终达到额定最大行程。电磁阀衔铁位移响应与时间的关系特性曲线, 如图2所示。

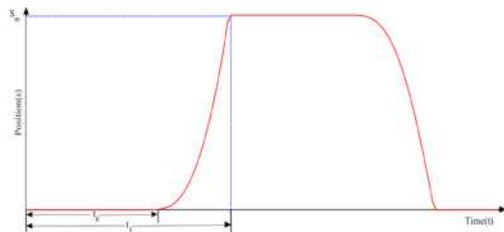


图2 位移-时间特性曲线

其中,  $t_0$ —衔铁开始响应时刻;  $t_1$ —衔铁达到最大位移时刻, 此刻称为开启响应时间。本文主要对影响电磁阀衔铁开启响应时间  $t_1$  的各参数进行分析研究。

## 二、有限元模型的建立

### 2.1 数学模型

著名的麦克斯韦方程组是电磁场理论分析的基础, 有限元法求解电磁场问题的基本公式为麦克斯韦磁场微分方程组, 即:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot D = \rho \\ \nabla \cdot B = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $H$  为磁场强度, 单位为  $A/m$ ;  $J$  为电流密度,

单位为  $A/m^2$ ;  $D$  为电通密度, 单位为  $C/m$ ;  $E$  为电场强度, 单位为  $V/m$ ;  $B$  为磁感应强度, 单位为  $T$ ;  $\rho$  为电荷体密度, 单位为  $C/m^3$ 。

电磁阀阀芯受到组合力进行平移, 需要计算衔铁受电磁力的大小, 而机械运动方程是计算电磁力的关键。根据实验发现, 衔铁运动受阻尼影响远低于弹簧预紧力和弹簧弹力的影响, 因此在不考虑阻尼力情况下, 机械运动方程的表现形式为:

$$m \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = F_m - k\alpha - F_{load} \quad (2)$$

式中,  $F_m$ —电磁力,  $N$ ;  $K$ —弹簧弹性系数,  $F_{load}$ —弹簧预紧力,  $N$ ;  $m$ —运动件质量,  $kg$ ;  $\alpha$ —衔铁位移,  $mm$ 。

### 2.2 有限元仿真模型

该电磁阀结构关于轴对称, 为了提高仿真效率减少仿真时间, 采用二分之一模型进行仿真运算。激励源采取外电路方式, 脉冲电压为频率  $72Hz$  的  $12V$  方波电压; 阀体外壳、挡铁, 导套及垫片均为  $10$  号钢, 导线线圈材料为铜, 绞线型; 其他材料均为非导磁材料, 可视为空气; 动态仿真网格由静态网格导入。围绕衔铁四周建立形状相似的  $Band$  域。

### 2.3 求解器及影响参数设置

在对电磁阀的结构和开启响应时间作分析时, 需要对相应的变化参数和条件进行参数化处理, Ansoft Maxwell 自带参数化处理功能。将工作气隙, 弹簧预紧力, 衔铁细直径及线圈匝数进行参数化分析, 能够有效的分析其与响应时间的关系。仿真域边界设定为典型的气球边界, 衔铁额定行程为  $2mm$ , 线圈匝数  $S$  初值为  $550$  匝, 衔铁受到的总阻力大小为  $-(k \cdot \alpha + F)$ , 其中  $k$  为弹簧弹性系数, 其值为  $1500N/m$ ,  $F$  初始值为  $1N$ ; 设置衔铁初始工作气隙为  $0.1mm$ , 对衔铁进行轴向  $move$  操作, 设置轴向位移参数  $-H$ ,  $H$  初值为  $0mm$ ; 分别设置衔铁细直径  $Y$ ,  $Y$  的初始值均为  $4mm$ 。参数取值范围如下表1所示。

表1 各参数取值范围

| 参数名称           | 基准值 | 范围      |
|----------------|-----|---------|
| 工作气隙 $H$ [mm]  | 0.1 | 0.1-0.4 |
| 弹簧预紧力 $F$ [N]  | 1   | 0.5-2.0 |
| 衔铁细直径 $Y$ [mm] | 4   | 4-4.8   |
| 线圈匝数 $S$       | 550 | 450-750 |

### 2.4 数值仿真模型

在图3所示的电磁阀专用测试台上进行电磁阀位移响应特性测试, 将试验电磁阀整体固定到夹具上, 并将移动衔铁对准激光位移传感器的激光感应方向, 根据衔铁高度调整传感器的底部高度, 让传感器的激光发射高度和衔铁处于同一水平线上。对位移传感器进行调零后, 将电源信号输入示波器生成电磁阀开启响应过程随时间变化的曲线, 将该电源信号曲线输入与专用测试台相连的计算机上, 在计算机上启动采集程序。随着电流的增

大，衔铁进行移动，试验台同时进行数据收集，当衔铁达到最大行程时，切断电源信号，结束一次电磁阀开启过程数据收集的试验。结果对比如图 4 所示。可以发现试验与仿真结果走线趋势相近，取值分析计算后得到电磁阀开启响应时间的最大误差接近 3%。误差产生的原因是：由于衔铁和定铁等材料是使用材料特性曲线来近似其电磁铁的磁化过程，且仿真过程未考虑电磁阀的漏磁和磁滞的影响。



图 3 动态特性测试平台

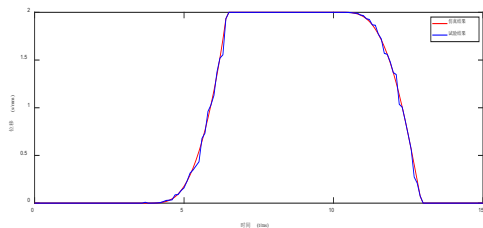


图 4 频率 72Hz, 占空比 50% 时仿真结果与实验结果对比

### 三、参数化结果分析

每次分析过程中，只分析某个独立参数，而保持其余参数为基准值。

#### 3.1 衔铁工作气隙 H 对阀开启响应时间的影响

衔铁工作气隙对阀开启响应时间影响较明显，如图 5 所示。已知初始工作气隙为 0.1mm。当  $H=0.3\text{mm}$  时衔铁最快达到最大行程。而当工作气隙维持在初始工作气隙 0.1mm 时，衔铁响应速度最慢。产生这一现象的原因是衔铁工作气隙在 0.4mm 位置时，电磁场磁力线较为集中的穿过衔铁横截面，使得电磁力迅速增大，从而使得衔铁响应速度较快。

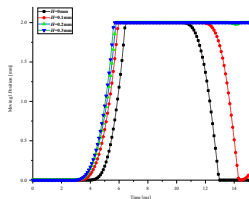


图 5 衔铁工作气隙对位移 - 时间响应的影响

#### 3.2 弹簧预紧力 F 对阀开启响应时间的影响

弹簧预紧力对阀开启响应时间影响较明显，如图 6

所示。弹簧预紧力在 0.5N 时衔铁最快达到最大行程。当弹簧预紧力达到 2N 时，电源激励在一个周期内所形成的的电磁力已经不能使衔铁正常响应，当弹簧预紧力达到 2.5N 时，衔铁在一个电压周期内几乎没有响应。产生这一现象的原因是弹簧预紧力越大，电磁力克服阻力产生响应越难，从而导致衔铁响应速度降低。

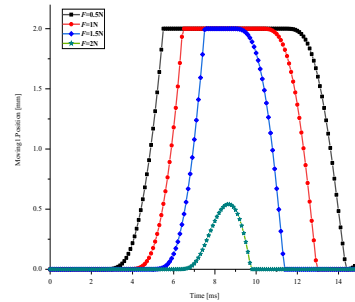


图 6 弹簧预紧力对位移 - 时间响应的影响

#### 3.3 衔铁细直径 Y 对阀开启响应时间的影响

衔铁细直径对阀开启响应时间影响较明显，如图 7 所示。衔铁细直径大小在 4mm 时衔铁最快达到最大行程。当弹簧预紧力达到 4.8mm 时，电源激励在一个周期内所形成的的电磁力已经不能使衔铁正常响应，可知衔铁细直径的改变对阀开启响应的影响较大。产生这一现象的原因是由于衔铁细直径增大，衔铁质量和衔铁与挡铁间的摩擦力增加，从而使得衔铁达到响应所要克服的阻力变大，使得衔铁响应速度变慢。

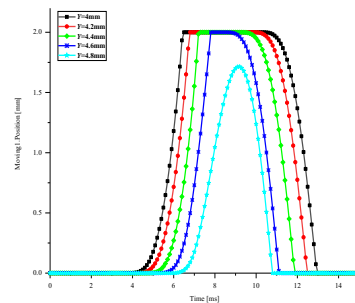


图 7 衔铁细直径部分对位移 - 时间响应的影响

#### 3.4 线圈匝数 S 对阀开启响应时间的影响

线圈匝数对阀开启响应时间影响较明显，如图 8 所示。线圈匝数在 450 匝时衔铁最快达到最大行程，而线圈匝数在 750 匝时衔铁响应速度反而较慢。产生这一现象的原因是线圈匝数增多，导致线圈电阻增大，在电压不变的情况下减小了线圈电流，导致了电磁力克服阻力达到衔铁响应的的时间较长。

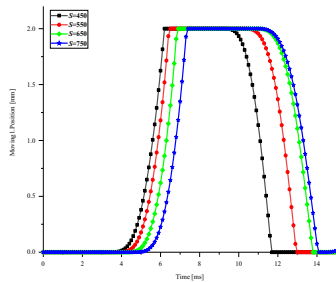


图 8 线圈匝数对位移 - 时间响应的影响

#### 四、电磁阀开启响应时间的相关性分析

为了深入分析各独立参数及其交互作用对电磁阀开启响应时间的影响程度, 本文基于试验设计方法研究各独立参数对电磁阀响应时间的影响, 对各独立参数及其交互作用与电磁阀开启响应时间之间的关系进行相关性分析。

##### 4.1 相关性分析的原理

相关性分析是利用统计学原理对具有相关性的变量 A 和 B 进行考察分析, 并根据简单相关系数 R 的值来确定 A 和 B 之间的相关性程度<sup>[7]</sup>。

简单相关系数 R 的计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中,  $i$  表示第  $i$  个样本点;  $x_i$  表示所研究的变量 A 在第  $i$  个样本点下的值;  $\bar{x}$  是变量 A 在  $n$  个样本下的均值;  $y_i$  是变量 B 在第  $i$  个样本点下的大小;  $\bar{y}$  是变量 B 在  $n$  个样本下的均值; R 的取值区间为  $[-1,1]$ , 当  $R>0$ , 表示 A 和 B 正相关; 当  $R=0$ , 表示 A 和 B 不相关; 当  $R<0$ , 表示 A 和 B 负相关。R 的绝对值越接近 1, A 和 B 的相关性程度就越高。

##### 4.2 相关性分析的试验设计

在 SPSS 软件中根据响应曲面法, 将各独立参数设为自变量, 各自变量分别取三个不同的水平值, 如表 2 所示。将衔铁开启响应时间作为因变量, 建立正交试验。将从 Ansoft Maxwell 中仿真运算得到的数据导入 SPSS 软件中作相关性分析。

在高速电磁阀系统中, 既要考虑一次独立参数的影响, 也要考虑二阶甚至更高阶的各独立参数之间的交互作用。据以往经验, 大多数二阶以上的交互作用影响远小于一阶独立参数和二阶交互参数作用对开启响应时间的影响, 故本文只对影响较大的一阶独立参数和二阶交互参数的作相关性分析。

表 2 自变量取值范围

| 参数名称 | 低水平 | 中水平 | 高水平 |
|------|-----|-----|-----|
| H/mm | 0.1 | 0.2 | 0.3 |

|      |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|
| F/N  | 0.5 | 1   | 1.5 |
| Y/mm | 4   | 4.2 | 4.4 |
| S    | 450 | 550 | 650 |

其中, H- 工作气隙, mm; F- 弹簧预紧力, N; D- 衔铁细直径, mm; S- 线圈匝数。

表 3 4 个独立参数交互形成的 10 个二次交互参数

| 因素(编号) | H                | F                | Y                 | S                |
|--------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
| H      | $H \times H$ (1) |                  |                   |                  |
| F      | $H \times F$ (5) | $F \times F$ (2) |                   |                  |
| Y      | $H \times Y$ (6) | $F \times Y$ (8) | $Y \times Y$ (3)  |                  |
| S      | $H \times S$ (7) | $F \times S$ (9) | $Y \times S$ (10) | $S \times S$ (4) |

表 3 中, ( ) 内为 10 个二次因素各自对应的编号, 其中 1~4 为各独立参数自身交互作用下的二次交互因素, 5~10 为各独立参数相互交互作用下的二次交互因素。

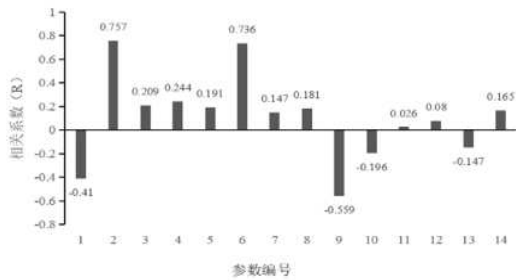
##### 4.3 一次独立因素与开启响应时间的相关性分析

由图 9 可知, 工作气隙、弹簧预紧力、衔铁细直径和线圈匝数对开启响应时间的相关系数较大, 表明这些参数变化对开启响应时间的影响较大。其中, 弹簧预紧力、衔铁细直径和线圈匝数与开启响应时间的相关性呈正相关, 工作气隙与开启响应时间的相关性呈负相关。并且弹簧预紧力与开启响应时间的相关程度相对较高; 而衔铁细直径与开启响应时间的相关程度相对较低。

##### 4.4 二次交互因素与开启响应时间的相关性分析

图 9 中 (5-8) 表示的是各影响因素自交互后形成的影响因素, 由 (5-8) 中对应与自交互因素与开启响应时间所对应的相关系数 R 均大于零, 表明它们相关性为正相关。其中, 弹簧预紧力自交互作用因素

6 与开启响应时间的相关系数 R 的绝对值最大, 相关程度最高。由图 9 可以得知, 在与开启响应时间的相关性表现上, 工作气隙独立因素 1 的相关系数为负, 而其自身交互作用下的因素 5 的相关系数为正, 呈现相反的情况, 表明一次独立因素产生的影响和二次交互因素产生的影响并不一致。原因是由于独立参数变化直接影响开启响应时间, 而交互因素是独立因素变化率对开启响应时间的影响。编号 (9-14) 表示不同独立参数之间的交互因素, 所对应的相关系数值有正有负, 表明这些交互因素对开启响应时间的影响是非线性的。其中编号 9 对应的的相关系数 R 绝对值较大, 说明该交互因素反映的相关程度较高, 对开启响应时间影响较大; 编号 11 对应的的相关系数 R 绝对值最小, 表明该交互因素反映的相关程度最低, 对开启响应时间影响最小。



1. 工作气隙 2. 弹簧预紧力 3. 衔铁细直径 4. 线圈匝数  
5. 工作气隙 \* 工作气隙 6. 弹簧预紧力 \* 弹簧预紧力 7.  
衔铁细直径 \* 衔铁细直径 8. 线圈匝数 \* 线圈匝数 9. 工  
作气隙 \* 弹簧预紧力 10. 工作气隙 \* 衔铁细直径 11. 工  
作气隙 \* 线圈匝数 12. 弹簧预紧力 \* 衔铁细直径 13. 弹  
簧预紧力 \* 线圈匝数 14. 衔铁细直径 \* 线圈匝数

图 9 一次独立因素和二次交互因素与开启响应时间的  
的相关性

### 五、结论

通过有限元软件 Ansoft 创建高速电磁阀仿真模型，  
经过试验和仿真结果对比，分析出所创建的仿真模型能  
够在容许误差范围内较为准确的反映出电磁阀不同参数  
下对其开启响应时间的影响。由仿真计算得出不同参数  
影响下的衔铁位移达到最大行程处的响应特性曲线。

通过响应曲面法对影响电磁阀开启响应时间的因素  
即一次独立因素数和二次交互因素作相关性分析。结果  
表明：一次独立因素的相关性和二次交互因素的相关性  
均表现出不同的特征规律，并且各影响因素与开启响  
应时间的相关性均呈现非线性关系。

### 参考文献:

[1] Clark R E, Jewell G W, Forrest S J, et al. Design  
features for enhancing the performance of electromagnetic  
valve actuation systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics,  
2005, 41(3): 1163-1168.

[2] 汤洁, 高倩雯. 基于 Ansoft Maxwell 的电磁阀结  
构的优化设计 [J]. 2013 中国汽车工程学会年会论文集,  
2013.

[3] 周斌, 曾东建, 徐晓东, 等. 发动机 VVT 比例电  
磁阀动态响应特性研究 [J]. 机械设计与制造, 2020.

[4] 范立云, 刘鹏, 马修真, 等. 柴油机电控单体泵高  
速电磁阀动态响应特性的影响因素分析 [J]. 内燃机工程,  
2014, 35(4): 114-118.

[5] 张功晖, 黎志航, 周志鸿. 基于 Maxwell 方程的  
电磁阀开启过程动态特性仿真研究 [J]. 液压气动与密封,  
2010 (11): 22-25.

[6] 何佳议 .AT 自动变速器电液控制系统研究分析  
[D]. 湖南大学 .2021.DOI:10.27135/d.cnki.ghudu.2021.001  
441.

[7] 范立云, 许德, 费红姿, 等. 高速电磁阀电磁力全  
工况关键参数相关性分析 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(6):  
89-96.

### 作者简介:

薛加 (1994-), 男, 汉, 江苏沭阳人, 湖南科技大学,  
在读硕士, 研究方向为电液控制系统。

安颖 (1980-), 女, 汉, 湖南长沙人, 湖南科技大学,  
机电工程学院, 工程师, 车辆工程专业工学博士, 研究  
方向为车辆传动系统及其控制理论。