

# 考虑电磁铁线圈构型的高速开关阀 动态特性分析

徐纯洁<sup>1</sup>, 谢方伟<sup>1,2</sup>, 凡镭瑞<sup>1</sup>, 魏汝路<sup>1</sup>, 田组织<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学机电工程学院, 221116, 江苏徐州;

2. 中国矿业大学矿山智能采掘装备省部共建协同创新中心, 221116, 江苏徐州)

**摘要:** 为改善高速开关阀的响应特性,以电磁铁线圈构型为切入点,对比研究了线圈构型对高速开关阀动态特性的影响规律。在建立高速开关阀数学模型以及理论分析线圈构型变化对响应时间影响的基础上,采用电磁仿真软件 ANSYS Electronics,构建了高速开关阀二维瞬态仿真模型,分析了单一、叠加式、嵌套式3种线圈构型对电磁铁吸合以及高速开关阀启、闭两个动态过程的影响。仿真结果表明:在不改变其他结构参数与电气参数的情况下,与单一线圈构型相比,叠加与嵌套两种并联线圈构型能够有效缩短电磁铁空载吸合时间,减幅分别为35.1%、34.7%;叠加式线圈构型下高速开关阀的开启延迟时间缩减了4.79 ms,减幅达55.4%;嵌套式线圈构型下高速开关阀的开启延迟时间缩减了4.77 ms,减幅达55.2%。综合响应特性与能耗特性参数来看,采用叠加式线圈构型的高速开关阀具有相对更优的动态特性。该研究可为高速开关阀电磁铁的设计提供参考。

**关键词:** 高速开关阀;电磁铁;线圈构型;动态特性;响应时间

**中图分类号:** TH137.5 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202404020 **文章编号:** 0253-987X(2024)04-0211-10

## Dynamic Characteristics Analysis of the High-Speed on/off Valve Considering Electromagnet Coil Configurations

XU Chunjie<sup>1</sup>, XIE Fangwei<sup>1,2</sup>, FAN Rongrui<sup>1</sup>, WEI Rulu<sup>1</sup>, TIAN Zuzhi<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. Jiangsu Province and Education Ministry Co-Sponsored Collaborative Innovation Center of Intelligent

Mining Equipment, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** To improve the response characteristics of the high-speed on/off valve, the influence of coil configurations on the dynamic characteristics of the high-speed on/off valve was studied with electromagnet coil configurations as the entry point. Based on the establishment of the mathematical model for the high-speed on/off valve and theoretical analysis of the influence of coil configurations on the response time, electromagnetic simulation software ANSYS Electronics was used to construct a two-dimensional transient simulation model for the high-speed on/off valve. The effects of single, superimposed and nested coil configurations on the two dynamic processes of electromagnet suction and high-speed on/off valve opening and closing were analyzed. The

收稿日期: 2023-06-06。 作者简介: 徐纯洁(1995—),男,博士生;谢方伟(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3403005);国家自然科学基金资助项目(52275074);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX22\_2514)。

网络出版时间: 2023-10-30

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231028.1337.002>

simulation results show that without changing structural and electrical parameters, compared with the single coil configuration, the no-load suction time of the electromagnet can be effectively shortened by two parallel coil configurations of superposition and nesting, with a reduction of 35.1% and 34.7%, respectively, the opening delay time of the high-speed on/off valve is reduced by 4.79 ms with a decrease of 55.4% under the superimposed coil configuration, and the opening delay time of the high-speed on/off valve is reduced by 4.77 ms with a decrease of 55.2% under the nested coil configuration. Considering the response characteristic parameters and energy consumption characteristic parameters, the high-speed on/off valve with the superimposed coil configuration exhibits relatively better dynamic characteristics. This study provides a reference for the design of high-speed on/off valve electromagnets.

**Keywords:** high-speed on/off valve; electromagnet; coil configuration; dynamic characteristics; response time

液压阀是实现电液系统控制功能的关键元件,其性能直接影响设备的系统特性与工作效率。长期以来,学者们一直致力于提高液压阀的响应、可靠性与控制精度。随着计算机与微电子技术的迅猛进步,以数字化为核心的智能化正逐渐成为液压阀发展的又一新方向<sup>[1]</sup>。

高速开关阀是数字液压技术的典型代表,其结构简单、控制灵活。不同于传统伺服比例阀,高速开关阀将数字信号转化为液压系统离散的流量信号,并通过脉宽调制技术(PWM)实现比拟连续流体的控制效果<sup>[2]</sup>。卓越的响应特性和较强的抗污染能力让高速开关阀广泛应用于航空航天、汽车机床、工程机械等工业领域<sup>[3]</sup>。为提高高速开关阀的响应并改善其动态特性,学者们已在阀体结构优化<sup>[4-6]</sup>、控制策略创新<sup>[7-9]</sup>等方面开展了大量研究工作。电-机械转换器作为驱动高速开关阀阀芯启闭的关键部件,其响应速度也是影响高速开关阀性能的重要因素。目前,常见的电-机械转换器有高速开关电磁铁<sup>[10]</sup>、音圈电机<sup>[11]</sup>,而超磁致伸缩材料<sup>[12-13]</sup>、压电晶体材料<sup>[14-15]</sup>等新兴功能材料的应用更是拓宽了高速开关阀电-机械转换器的发展方向。

相较于其他几种电-机械转换器,高速开关电磁铁具有结构简单、成本低廉的独特优势。因此,如何进一步提高电磁铁性能一直是学者们研究的热点。Wu等<sup>[16]</sup>创新设计了一种空心柱塞式螺线管,并采用多目标粒子群算法对电-机械转换器进行优化设计,显著改善了高速开关阀的响应时间、尺寸及热性能。Yang等<sup>[17-18]</sup>提出了一种弹簧置顶的新型电磁铁结构,仿真分析了电磁截面积、壳体材料等参数对高速开关阀电磁力的影响规律,并对其动静特性进行了系统的试验研究。刘钰栋等<sup>[19-20]</sup>从结构参

数、工作参数以及运动形式等方面对高速开关阀电磁铁进行了特性分析,提出采用软磁复合材料和圆柱叠片式电磁铁的优化方案。陈淑梅等<sup>[21]</sup>建立了耦合磁滞的电-机械转换器模型,通过仿真获得了关键参数对转换器频响的影响规律。李娜娜等<sup>[22]</sup>对影响高速开关阀响应特性的设计参数进行了主次分析,研究发现线圈匝数对响应速度的影响最大。

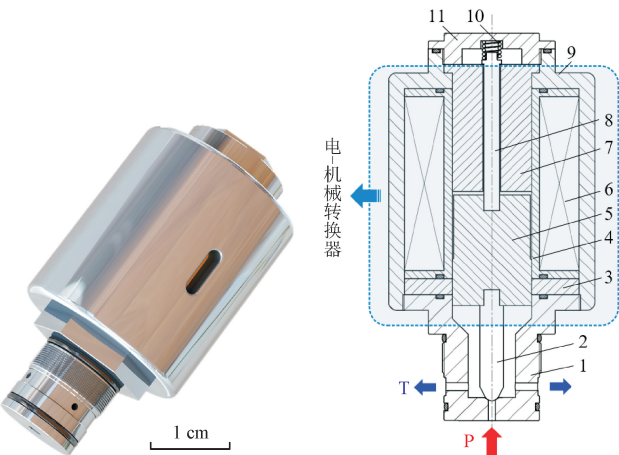
上述研究主要集中在电磁铁结构参数的分析与优化方面,其本质是从形状、尺寸、材料等方面改善磁场强度、分布与稳定性,进而提升电磁铁的性能。线圈作为电生磁的基础,其结构形式也是影响磁场特性的重要因素。Ashigwuike等<sup>[23]</sup>采用堆叠式线圈构型提高了执行器电磁力的大小。Kong和Li<sup>[24]</sup>提出一种电磁铁平行线圈方案,有效降低了高速开关电磁阀的迟滞时间与启闭时间。Aslam等<sup>[25-26]</sup>在优化可变气门机构电磁驱动器的过程中,采用绕组电感较小的内外组合并联线圈方案,在提升电磁力的同时降低了能耗。

探索新的线圈构型为提升电磁铁性能提供了新的设计思路,然而,现有研究缺少有效的横向对比,因此难以确定不同线圈构型中的优选方案。为此,本文在不改变电磁铁结构参数的前提下调整线圈布置形式,考虑不同线圈构型下的电场、磁场特性因素,采用电磁仿真软件分析研究了不同线圈构型对电磁铁以及高速开关阀性能的影响规律,为改善高速开关阀动态响应特性提供了有益参考。

## 1 结构与工作原理

本文以课题组设计的二位二通高速开关阀为研究对象,该高速开关阀在3.5 MPa压差工况下流量能达到2 L/min,其结构如图1所示。当线圈受到

电压激励时,动铁芯便会在电磁力的作用下向上运动,此时阀芯打开,进油口P与出油口T贯通,高速开关阀处于开启状态;当线圈激励电压切断时,电磁力逐渐衰退,压紧弹簧推动动铁芯向下运动,此时阀芯闭合,高速开关阀处于关断状态。



(a) 三维模型

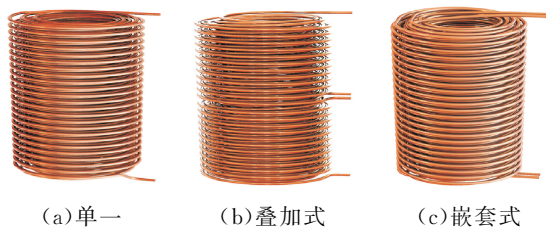
(b) 结构示意图

1—阀座;2—阀芯;3—导磁环;4—线圈骨架;5—动铁芯;6—线圈;  
7—静铁芯;8—推杆;9—壳体;10—压紧弹簧;  
11—压盖;P—进油口;T—出油口。

图1 高速开关阀结构示意图

Fig. 1 Structure of high-speed on/off valve

线圈一般由漆包线缠绕于线圈骨架之上,并与动、静铁芯等共同构成电磁铁。目前,常见电磁铁使用的均为单一线圈。若将单一线圈划分为若干份并联接入电路,同样可以实现驱动动铁芯运动的效果。对于多个线圈并联接入的形式,又可以进一步划分为上下堆叠式和内外嵌套式,其构型如图2所示。



(a) 单一

(b) 叠加式

(c) 嵌套式

图2 电磁铁线圈构型示意

Fig. 2 Schematic of electromagnet coil configuration

## 2 数学模型

高速开关阀阀芯运动是电压激励转化为机械动能的结果,该过程涉及流场、机械场、电磁场的多场耦合作用,因此,其数学模型的建立需同时考虑上述多个物理场。

### 2.1 流场模型

高速开关阀的流量压力方程可表示为

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

式中:  $C_d$  为流量系数;  $A$  为过流面积;  $\Delta p$  为进、出口压差;  $\rho$  为油液密度。

在阀芯的运动过程中,油液方向与速度的改变会导致其动量发生变化,进而形成液动力。作用在阀芯上的液动力可表示为

$$F_d = F_{ds} + F_{dt} = 2C_v C_d A \Delta p \cos\theta + C_d \omega L_d \sqrt{2\rho\Delta p} \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

式中:  $F_{ds}$  为稳态液动力;  $F_{dt}$  为瞬态液动力;  $C_v$  为流速系数;  $\theta$  为射流角;  $\omega$  为阀口梯度;  $L_d$  为油液阻尼长度;  $x$  为阀芯位移。

### 2.2 机械模型

结合机械结构与工作原理可知,高速开关阀启闭过程中,运动部件受电磁力、液压力、液动力、弹簧力及阻尼力的共同作用,因此其动力学方程可表示为

$$m \frac{dx^2}{dt} = F_e + F_p - F_d - F_k - F_f \quad (3)$$

式中:  $m$  为运动部件的质量;  $F_e$  为电磁力;  $F_p$  为液压力;  $F_d$  为液动力;  $F_k$  为弹簧力;  $F_f$  为阻尼力。

当阀芯即将开启但初始位移为零时,电磁力的临界值应大于液压力、液动力、弹力及阻尼力的合力。为简化模型,忽略液动力与阻尼力的影响,电磁力的临界值  $F_{ec}$  可由初始液压力  $F_{p0}$  (驱动力) 与初始弹簧力  $F_{k0}$  (阻力) 的合力确定,表达式如下

$$F_{ec} = F_{p0} - F_{k0} = p_i A_i - kx_0 \quad (4)$$

式中:  $p_i$  为进口压力;  $A_i$  为进口截面积;  $k$  为压紧弹簧刚度系数;  $x_0$  为压紧弹簧的预压缩量。

### 2.3 电磁场模型

根据基尔霍夫定律,高速开关阀的电路模型可表示为

$$U = RI + L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} \quad (5)$$

式中:  $U$  为激励电压;  $R$  为等效电阻;  $I$  为线圈电流;  $L$  为等效电感。

高速开关阀的磁路模型可表示为

$$\begin{cases} L = \frac{N^2}{R_i} \\ \Phi = \frac{IN}{R_i} \\ F_e = \frac{\lambda \Phi^2}{2\mu_0 S} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $N$  为线圈匝数； $\Phi$  为总磁通量； $R_t$  为总磁阻； $\lambda$  为与边缘磁通泄露量有关的常量； $\mu_0$  为空气导磁率； $S$  为气隙横截面积。

将式(4)代入式(6)，可得阀芯开启的临界电流为

$$I_c = \frac{R_t}{N} \sqrt{\frac{2\mu_0 S (p_i A_i - kx_0)}{\lambda}} \tag{7}$$

在阀芯开始运动之前，线圈的等效电阻与等效电感保持不变，因此这一瞬态过程的电流<sup>[2]</sup>可进一步表示为

$$I = I_0 + \left(\frac{U}{R} - I_0\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L}t\right)\right) \tag{8}$$

式中： $I_0$  为线圈的初始电流。

高速开关阀开阀的迟滞时间<sup>[24]</sup>可表示为

$$t_d = \frac{L}{R} \ln\left(\frac{U - I_0 R}{U - I_c R}\right) \tag{9}$$

在不改变线圈匝数的条件下，将单一线圈划分成匝数相等的  $n$  等份子线圈，然后并联接入驱动电路，此时电路的等效电阻  $R'$  与等效电感  $L'$  分别为

$$R' = \frac{R}{n^2}; \quad L' = \frac{L}{n^2} \tag{10}$$

此时，线圈并联构型下的瞬态电流  $I'$  与迟滞时间  $t'_d$  可分别表示为

$$I' = nI_0 + \left(\frac{n^2 U}{R} - nI_0\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L}t\right)\right) \tag{11}$$

$$t'_d = \frac{L}{R} \ln\left(\frac{nU - I_0 R}{nU - I_c R}\right) \tag{12}$$

结合式(9)、式(12)可以看出，高速开关阀开阀的迟滞时间与机械结构、流场、电磁场等参数密切相关。假定电磁铁线圈初始电流为零，在不改变其他参数的条件下，将单一线圈划分为多个线圈，能够降低开阀的迟滞时间，提高高速开关阀的响应。

3 有限元仿真模型

为分析电磁铁线圈构型对高速开关阀动态特性的影响，验证并联线圈构型能够降低开阀迟滞时间，本文采用 ANSYS Electronics 电磁仿真软件中的 Maxwell 2D 模块进行高速开关阀瞬态仿真。仿真模型的结构参数如表 1 所示。仿真过程中，并联线圈构型的子线圈数设置为  $n=2$ 。

表 1 仿真模型关键结构参数

Table 1 Key structural parameters in simulation model

| 参数                                       | 数值    |
|------------------------------------------|-------|
| 线圈内径 $D_i/\text{mm}$                     | 12.0  |
| 线圈外径 $D_o/\text{mm}$                     | 22.0  |
| 线圈长度 $l/\text{mm}$                       | 23.5  |
| 线圈内阻 $R/\Omega$                          | 64    |
| 线圈匝数 $N$                                 | 1 800 |
| 气隙/mm                                    | 0.3   |
| 弹簧刚度 $K/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$ | 70    |
| 弹簧预压缩量 $x_0/\text{mm}$                   | 0.5   |
| 运动部件总质量 $m/\text{g}$                     | 5.0   |

3.1 模型建立

在对机械结构进行适当简化的基础上，充分考虑到高速开关阀的轴对称性与仿真计算效率，建立 3 种线圈构型下的有限元仿真模型，如图 3 所示。

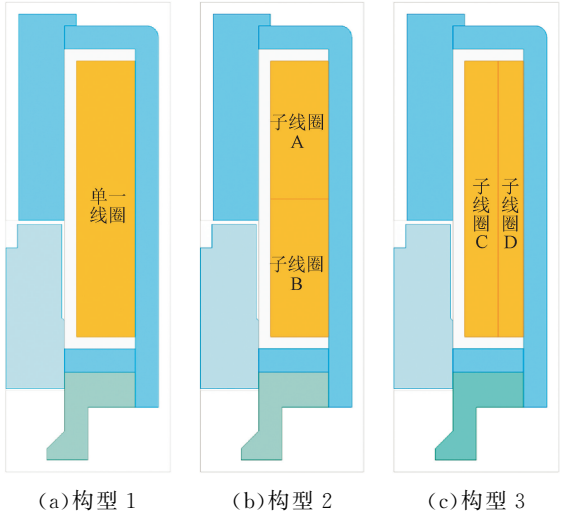


图 3 有限元仿真模型

Fig. 3 Finite element simulation model

图 3 中，构型 1 对应典型单一线圈构型，构型 2 与构型 3 对应并联线圈构型，其中构型 2 采用上下叠加方式对两组子线圈 A、B 进行并联，构型 3 采用内外嵌套方式对两组子线圈 C、D 进行并联。

3.2 求解设置

首先，对仿真模型中的各个零件进行定义，并根据表 2 添加材料属性。由于动铁芯为运动部件，需在模型中设置能够包围整个动铁芯运动过程的运动域，如图 4(a)所示。同时考虑到机械特性，在运动设置中定义运动部件的质量，除动铁芯之外还包括仿真模型中未显示的阀芯与推杆的质量。忽略液动

力及阻力的影响,根据式(3)对负载力进行赋值。其次,设置仿真求解域并添加气球边界条件。然后,根据线圈构型的不同添加激励,其中构型 1 设置 1 根绕组,匝数为 1 800;构型 2 与构型 3 设置 2 根绕组,每根匝数为 900。3 种线圈构型下的绕组均采用 Maxwell Circuit 模块搭建的外电路进行控制,如图 4(b)所示。接着,对模型进行网格划分,为提高计算精度,对运动域的网格进行了加密处理。最后,针对电磁铁空载吸合以及高速开关阀启闭两种工况,定义不同的外电路激励电压,并设定合适的时长与步长完成仿真模拟。

表 2 仿真模型关键零件材料属性  
Table 2 Material properties of key parts in simulation model

| 名称   | 材料                         |
|------|----------------------------|
| 动铁芯  | 工业纯铁 DT4                   |
| 静铁芯  | 工业纯铁 DT4                   |
| 壳体   | 工业纯铁 DT4                   |
| 导磁环  | 工业纯铁 DT4                   |
| 线圈   | 铜 H96                      |
| 线圈骨架 | 环氧树脂                       |
| 阀座   | 冷作模具钢 Cr <sub>12</sub> MoV |

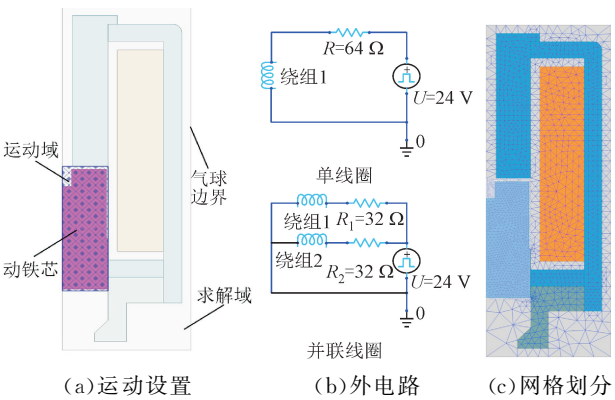


图 4 瞬态仿真求解设置  
Fig. 4 Settings of transient simulation solution

4 仿真结果分析

4.1 电磁铁吸合特性

在不考虑动铁芯负载力的情况下,设置外部电路激励电压为 24 V,模拟电磁铁空载状态下的吸合运动。图 5 所示为不同时刻 3 种线圈构型下,电磁铁吸合过程的磁场强度云图。由图可见,对于同一线圈构型的电磁铁,随着时间的推移,动铁芯、静铁芯、导磁环以及壳体逐渐由内向外磁化,磁感应强度

不断增加,且气隙处的磁感应强度明显高于其他位置,动铁芯在电磁力的作用下向静铁芯方向吸合。对比不同线圈构型可以看出,同一时刻下并联线圈构型气隙处的磁感应强度要明显高于单一线圈构型,且构型 2 气隙处的磁感应强度略微高于构型 3。磁感应强度的差异导致电磁铁电磁力的差异,进而呈现出构型 2 动铁芯最先吸合、构型 1 动铁芯最后吸合的现象。

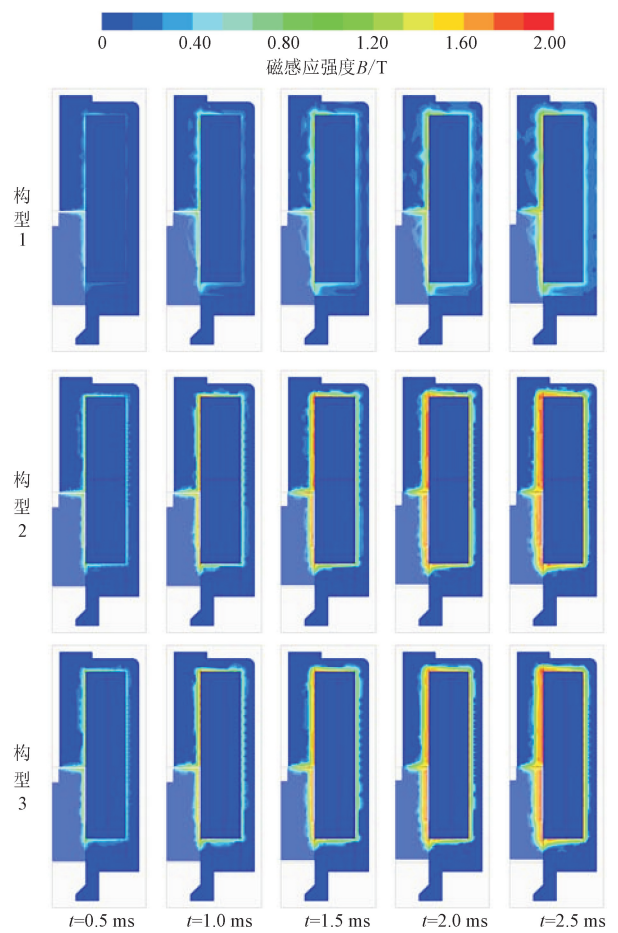


图 5 不同线圈构型下电磁铁动态磁感应强度云图  
Fig. 5 Dynamic magnetic induction intensity cloud diagram of electromagnet under different coil configurations

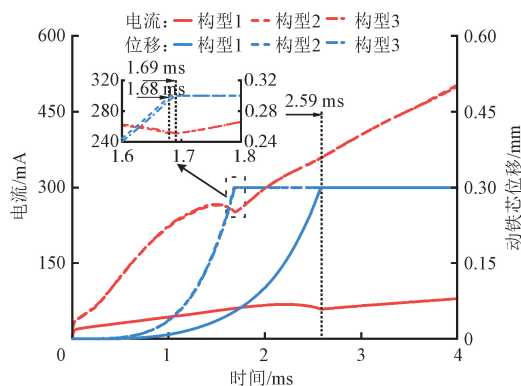
为定量对比分析 3 种线圈构型下电磁铁吸合过程的差异,提取仿真过程中电流、电感、电磁力等电磁特性参数及动铁芯位移、速度等运动特性参数,分别绘制了不同线圈构型下电磁铁吸合过程的动态特性曲线及电感特性曲线,如图 6、图 7 所示。

图 6(a)所示为电磁铁吸合过程中,位移、电流随时间的变化曲线。从图中可以看出,当线圈受到电压激励时,电流呈现指数形式上升,一旦大于临界电流,动铁芯便开始运动。由于线圈存在电感,动铁

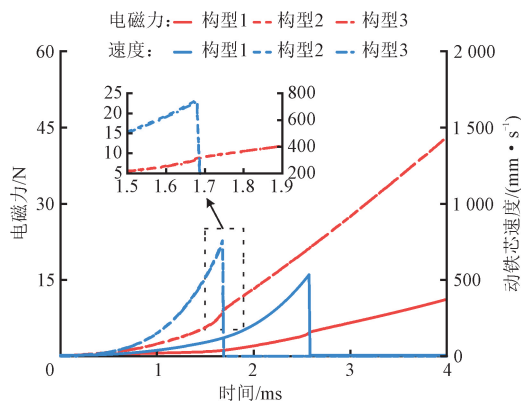
芯运动导致了电感变化进而引起反电动势,这是造成线圈电流出现暂短下降的原因。当动铁芯完全吸合后,线圈中的电流会继续缓慢上升。对比3种线圈构型可知,同一时刻下并联线圈构型下的电流要大于单一线圈下的电流。在保持电磁铁结构参数及电气参数不变的情况下,并联线圈构型降低了电路的等效电阻,因此构型2与构型3的线圈电流大于构型1的线圈电流。从动铁芯位移来看,线圈构型1下电磁铁的吸合时间为2.59 ms,而线圈构型2与线圈构型3下的电磁铁吸合时间分别为1.68、1.69 ms,降幅分别为35.1%、34.7%,这表明并联线圈构型能够显著提高电磁铁的动态响应及缩短吸合时间。根据式(10)可知,在相同的线圈并联数下,叠加与嵌套两种构型理论的等效电阻与等效电感相同,因此这两种线圈构型下仿真得到的电流曲线几乎重合,构型2与构型3下电磁铁吸合时间仅存在微小差异。

下并联线圈构型的电磁力要大于单一线圈构型,这是并联线圈电流更大所导致的。较大的电磁力致使相同时刻动铁芯具有更大的速度与加速度,因此,并联线圈构型下电磁铁的吸合时间小于单一线圈构型。

不同线圈构型下,电磁铁吸合过程中电感的变化情况如图7所示。可以看出,3种线圈构型下,构型1的电感及变化范围最大,而构型2与构型3的电感相对要小很多,两者电感的变化范围约是构型1的1/4,与理论值基本保持一致。对于给定的激励电压,电感增加会导致线圈内电流变化速率减缓,由于整个吸合过程时间较短,线圈内的电流还未达到稳态,较小的电感使得同一时间内并联线圈电流的上升比单一线圈更快,最终呈现出同一时刻下构型2与构型3的线圈电流大于构型1线圈电流的现象。由此可以看出,叠加与嵌套这两种电感小、电流上升更快的构型能使电磁铁具有更好的响应特性。



(a) 电流-位移变化曲线



(b) 力-速度变化曲线

图6 不同线圈构型下电磁铁的动态特性

Fig. 6 Dynamic characteristics of electromagnet under different coil configurations

图6(b)所示为电磁铁吸合过程中,电磁力、动铁芯速度随时间的变化曲线。可以看出,同一时刻

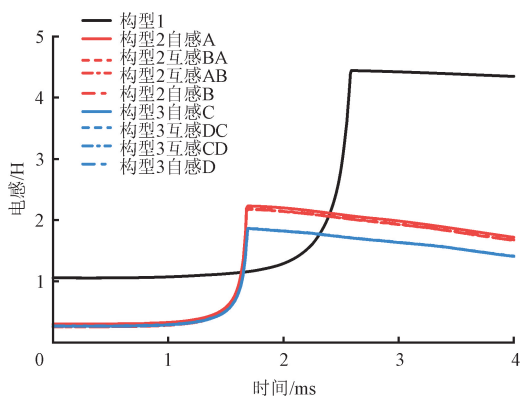


图7 不同线圈构型下电磁铁电感特性的对比

Fig. 7 Comparison of inductance characteristics of electromagnet under different coil configurations

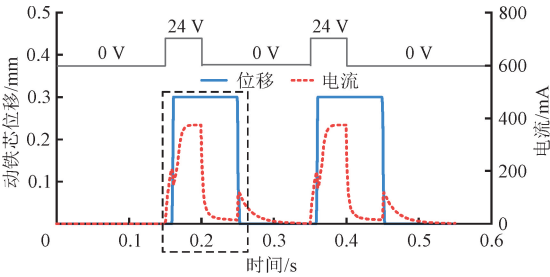
## 4.2 高速开关阀启闭特性

为更好地评价高速开关阀的启闭特性,引入4个量化指标:开启延迟时间 $t_{do}$ 、开启时间 $t_o$ 、关闭延迟时间 $t_{df}$ 以及关闭时间 $t_f$ ,其中开启延迟时间 $t_{do}$ 与开启时间 $t_o$ 之和即为高速开关阀的响应时间。

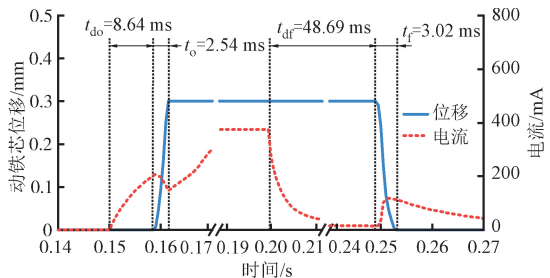
在运动设置中对动铁芯添加负载力表达式,并将外电路设置成激励周期为0.20 s、脉冲宽度为0.05 s、幅值为24 V的脉冲电压,模拟单电压驱动下的高速开关阀启闭过程。

图8所示为构型1下高速开关阀启闭过程动铁芯位移以及电流随时间的变化曲线。由图可见,0.15 s时获得电压激励后,线圈电流开始逐渐上升,大约在8.64 ms后动铁芯开始移动,此过程中电流

下降,经过 2.54 ms 之后高速开关阀完全开启,此后电流继续上升直至稳态。0.20 s 时电压激励消失,由于存在退磁过程,此时线圈电流缓慢减小,大约在 48.69 ms 后电磁力小于负载合力,动铁芯开始脱离静铁芯,高速开关阀在 3.02 ms 之后完全关闭。



(a) 电流-位移变化曲线



(b) 图 8(a) 的局部放大

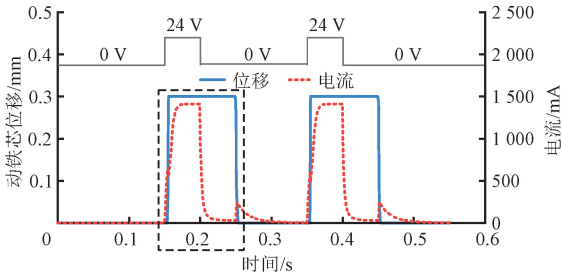
图 8 构型 1 下高速开关阀的动态特性

Fig. 8 Dynamic characteristics of high-speed on/off valve under configuration 1

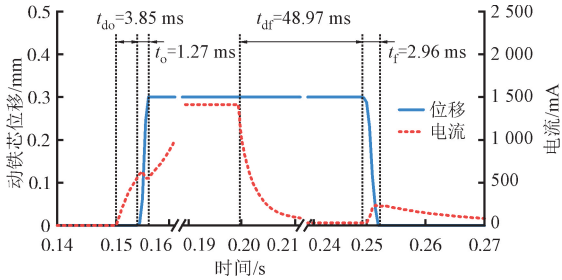
图 9 所示为构型 2 下高速开关阀启闭过程动铁芯位移以及电流随时间的变化曲线。由图可见,当 0.15 s 时受到电压激励后,线圈电流开始上升,且上升速度要略快于构型 1 中线圈电流的上升速度,3.85 ms 后动铁芯开始运动并经过 1.27 ms 完全开启。0.2 s 时,电压激励消失,动铁芯大约滞后 48.97 ms 开始复位,2.96 ms 之后高速开关阀完全关闭。与构型 1 相似,在动铁芯复位的过程中电流会出现短暂上升,这也是由于线圈电感的存在导致动铁芯运动过程中产生反电动势所造成的。相比构型 1,构型 2 下高速开关阀开启延迟时间减小了 4.79 ms,减幅达 55.4%,关闭延迟时间几乎不变,但从单位时间内的电流变化幅值来看,构型 2 因电感值较小,其电流下降速率更快。此外,构型变化也一定程度缩短了高速开关阀启闭运动过程阀芯吸合与复位的时间,与构型 1 相比,构型 2 的开启时间减幅为 50.0%,关闭时间减幅为 2.0%。

图 10 所示为构型 3 下高速开关阀启闭过程动铁芯位移以及电流随时间的变化曲线。相较于构型 1,

构型 3 的开启延迟时间降至 3.87 ms,减幅达 55.2%,开启时间与关闭时间分别缩减至 1.27、2.99 ms,减幅分别为 50.0%、1.0%,而关闭延迟时间同样变动较小。相较于构型 2,构型 3 的位移及电流变化趋势与构型 2 基本一致,略有区别的是 4 个动态特性量化评价指标不同程度地略高于构型 2,这是两种并联线圈构型下微小电感差异所导致的。



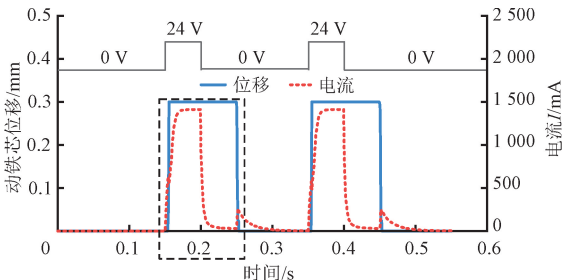
(a) 电流-位移变化曲线



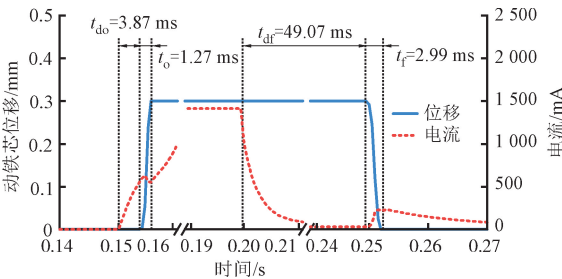
(b) 图 9(a) 的局部放大

图 9 构型 2 下高速开关阀的动态特性

Fig. 9 Dynamic characteristics of high-speed on/off valve under configuration 2



(a) 电流-位移变化曲线



(b) 图 10(a) 的局部放大

图 10 构型 3 下高速开关阀的动态特性

Fig. 10 Dynamic characteristics of high-speed on/off valve under configuration 3

4.3 动态性能综合分析

相较于单一线圈构型,叠加与嵌套两种线圈构型的本质在于不改变槽满率的前提下,通过多股并绕的方式减小支路匝数与阻抗,从而在增大电流的同时提高电磁力,降低响应时间。然而,该方式会受限于能耗与散热的影响,为更加综合地评定线圈构型对高速开关阀动态特性的影响,对仿真过程中高速开关阀一个启闭周期内的特性参数进行记录,详细对比结果如表 3 所示。

表 3 不同线圈构型下的特性参数对比  
Table 3 Comparison of characteristic parameters under different coil configurations

| 参数                               | 构型 1      | 构型 2      | 构型 3      |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 电阻/ $\Omega$                     | 64        | 16        | 16        |
| 电感/mH                            | 732~8 680 | 101~2 207 | 114~2 167 |
| 峰值电磁力/N                          | 123.90    | 170.20    | 170.10    |
| 开启延迟时间/ms                        | 8.64      | 3.85      | 3.87      |
| 响应时间/ms                          | 11.18     | 5.12      | 5.14      |
| 峰值电流密度/<br>( $A \cdot mm^{-2}$ ) | 5.74      | 10.80     | 12.60     |
| 平均涡流损耗/W                         | 0.82      | 3.36      | 3.65      |

从响应特性参数来看,构型 2 与构型 3 下的开阀延迟时间相较于构型 1 明显缩短,这说明采用并联线圈构型可有效改善高速开关阀的响应特性,但叠加与嵌套两种构型方式在响应时间上并未呈现出明显差异。因此,结合电流密度、涡流损耗等能耗参数来看,在同一个启闭周期内,构型 2 较构型 3 具有更低的能量损耗,从而发热量更小。综上分析,3 种线圈构型中,采用叠加并联线圈构型的高速开关阀会具有相对更优的动态特性。

5 结 论

本文在分析高速开关阀结构与工作机理的基础上,以电磁铁线圈构型为切入点,利用电磁仿真软件构建了高速开关阀电磁场瞬态仿真模型,在不改变电磁铁结构参数与电气参数的情况下,对比分析了单一线圈、两种并联线圈构型对电磁铁吸合以及高速开关阀启闭两种工况动态特性的影响,得到的主要结论如下。

(1)并联线圈构型能够有效缩短电磁铁的空载吸合时间。相较于单一线圈,叠加式线圈构型电磁铁的吸合时间缩短了 0.91 ms,减幅达 35.1%;嵌套式线圈构型电磁铁的吸合时间缩短了 0.90 ms,减

幅达 34.7%。

(2)相较于单一线圈构型,并联线圈构型可显著缩短高速开关阀的开启延迟时间,动态响应改善效果明显。叠加式线圈构型下高速开关阀的开启延迟时间缩减了 4.79 ms,减幅达 55.4%;嵌套式线圈构型下高速开关阀的开启延迟时间缩减了 4.77 ms,减幅达 55.2%。

在后续的研究工作中,可在考虑磁热耦合的基础上,从多股线圈及其匝数分配方面进一步探究并联线圈构型中的优选方案,并开展试验研究验证方案的合理性。

参考文献:

[1] WANG He, CHEN Zhen, HUANG Jiahai, et al. Development of high-speed on-off valves and their applications [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1): 67.

[2] 钟麒, 谢耿, 汪谢乐, 等. 多电压复合驱动的高速开关阀性能研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(4): 191-201.

ZHONG Qi, XIE Geng, WANG Xiele, et al. Performance analysis of high speed on/off valve by multi-voltages compound excitation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(4): 191-201.

[3] 杨华勇, 王双, 张斌, 等. 数字液压阀及其阀控系统发展和展望 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(5): 1494-1505.

YANG Huayong, WANG Shuang, ZHANG Bin, et al. Development and prospect of digital hydraulic valve and valve control system [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(5): 1494-1505.

[4] WANG Xiaojing, LI Wenjie, LI Chunhui, et al. Structure optimization and flow field simulation of plate type high speed on-off valve [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(5): 1557-1571.

[5] 桂肃尧, 张轩, 张仕双, 等. 液压伺服阀阀芯的动态特性分析与多目标优化 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(12): 33-45.

GUI Suyao, ZHANG Xuan, ZHANG Shishuang, et al. Dynamic characteristic analysis and multi-objective optimization of hydraulic servo valve spool [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(12): 33-45.

[6] 李雨铮, 王年生, 包振坤, 等. 三通球阀式高速开关阀稳态液动力分析与结构改进 [J]. 工程科学与技术, 2023, 55(2): 298-306.

LI Yuzheng, WANG Niansheng, BAO Zhenkun, et

- al. Steady-state flow force analysis and structure improvement of three-way ball valve high-speed on-off valve [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 55(2): 298-306.
- [7] 钟麒, 张斌, 洪昊岑, 等. 基于电流反馈的高速开关阀3电压激励控制策略[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(1): 8-15, 58.  
ZHONG Qi, ZHANG Bin, HONG Haocen, et al. Three power sources excitation control strategy of high speed on/off valve based on current feedback [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(1): 8-15, 58.
- [8] 钟麒, 何贤剑, 李研彪, 等. 自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(6): 224-235.  
ZHONG Qi, HE Xianjian, LI Yanbiao, et al. Research on control algorithm for high-speed on/off valves that adaptive to supply pressure changes [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(6): 224-235.
- [9] ZHONG Qi, WANG Xiele, ZHOU Hongzhao, et al. Investigation into the adjustable dynamic characteristic of the high-speed on/off valve with an advanced pulse-width modulation control algorithm [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(5): 3784-3797.
- [10] 魏列江, 李彬杰, 严晓岚, 等. 线圈匝数对高速开关电磁铁响应时间影响研究[J]. *液压气动与密封*, 2018, 38(2): 79-82.  
WEI Liejiang, LI Binjie, YAN Xiaolan, et al. Study on the influence of coil turns on the response time for high-speed switching electromagnet [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2018, 38(2): 79-82.
- [11] 刘晓鹏, 聂松林, 纪辉, 等. 音圈电机直驱高速开关阀动态特性研究[J]. *液压与气动*, 2020(3): 37-44.  
LIU Xiaopeng, NIE Songlin, JI Hui, et al. Dynamic characteristics for the voice coil motor direct-driven high-speed on-off valve [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2020(3): 37-44.
- [12] 罗樟, 朱玉川. 智能材料驱动的高速开关阀[J]. *压电与声光*, 2019, 41(4): 575-581.  
LUO Zhang, ZHU Yuchuan. High speed on-off valve driven by smart material [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2019, 41(4): 575-581.
- [13] 朱孙科, 张向飞, 董绍江, 等. 无气隙叠堆式GMA高速开关阀磁场优化设计[J]. *兵器材料科学与工程*, 2022, 45(5): 102-107.  
ZHU Sunke, ZHANG Xiangfei, DONG Shaojiang, et al. Magnetic field optimization design of stack GMA high speed switching valve without air gap [J]. *Ordinance Material Science and Engineering*, 2022, 45(5): 102-107.
- [14] 俞军涛, 焦宗夏, 吴帅. 大流量压电式高速开关阀设计与仿真测试[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(18): 226-234.  
YU Juntao, JIAO Zongxia, WU Shuai. Design, simulation and test of high-flow high-speed on/off valve driven by piezoelectric [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(18): 226-234.
- [15] 俞军涛, 占昊, 王丽, 等. 压电式高速开关阀控液压缸位置系统[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(4): 706-714.  
YU Juntao, ZHAN Hao, WANG Li, et al. Hydraulic cylinder position system controlled by piezoelectric high-speed on-off valve [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(4): 706-714.
- [16] WU Shuai, ZHAO Xiangyu, LI Chunfang, et al. Multiobjective optimization of a hollow plunger type solenoid for high speed on/off valve [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(4): 3115-3124.
- [17] YANG Meisheng, ZHANG Junhui, XU Bing, et al. Study on electromagnetic force of the new micro digital valve [J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25(6): 2399-2409.
- [18] YANG Meisheng. Study on dynamic and static performance of a micro digital hydraulic valve [J]. *Micro machines*, 2022, 13(5): 741.
- [19] 刘钰栋. 车用亚毫秒级高速开关阀电磁铁及驱动技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [20] LIU Yudong, YANG Qingjun, LI Congfei, et al. Analysis and research on high speed on-off valve electromagnets with different electromagnetic drive forms [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2021, 54(10): 215-220.
- [21] 陈淑梅, 柯旭锬, 吴荣钰, 等. 耦合磁滞的电-机械转换器多场建模及参数优化[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(11): 4271-4281.  
CHEN Shumei, KE Xukun, WU Rongyu, et al. Multi-field modeling with hysteresis and optimization for electro-mechanical converter [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(11): 4271-4281.
- [22] 李娜娜, 冀宏, 魏列江, 等. 影响高速开关阀响应特性的主要设计参数分析[J]. *液压与气动*, 2022, 46(10): 78-86.

- LI Nana, JI Hong, WEI Liejiang, et al. Analysis on main design parameters affecting response characteristics of high speed on/off valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46(10): 78-86.
- [23] ASHIGWUIKE E, BALACHANDRAN W, THOMAS S, et al. Improving the Lorentz force amplitude of an EMAT using stacked coil configuration [J]. Sensors & Transducers, 2013, 155(8): 262-270.
- [24] KONG Xiaowu, LI Shizhen. Dynamic performance of high speed solenoid valve with parallel coils [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4): 816-821.
- [25] ASLAM J, LI Xinghu, SUN Hai. The design of hybrid electromechanical valve actuator: effects of construction parameters [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2017, 41(1): 51-64.
- [26] ASLAM J, LI Xinghu, JANJUA F K. Design of a hybrid magnetomotive force electromechanical valve actuator [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(10): 1635-1643.
- (编辑 李慧敏 刘杨)

~~~~~  
(上接第 199 页)

- [23] LI Yong, ASSOUAR B M. Acoustic metasurface-based perfect absorber with deep subwavelength thickness [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(6): 063502.
- [24] LIU Chongrui, WU Jiuhui, YANG Zhengrui, et al. Ultra-broadband acoustic absorption of a thin microperforated panel metamaterial with multi-order resonance [J]. Composite Structures, 2020, 246: 112366.
- [25] YANG Min, CHEN Shuyu, FU Caixing, et al. Optimal sound-absorbing structures [J]. Materials Horizons, 2017, 4(4): 673-680.
- [26] LIU Chongrui, WU Jiuhui, CHEN Xu, et al. A thin low-frequency broadband metasurface with multi-order sound absorption [J]. Journal of Physics: Applied Physics, 2019, 52(10): 105302.
- (编辑 赵炜)