

煤矿用电磁铁结构改进及仿真研究

郭大勇,唐兵,司国雷,王嘉磊,张文启

(四川航天烽火伺服控制技术有限公司,四川 成都 611130)

摘要:目前煤矿用电磁铁多为带导向筒的,在控制电压 12 V 情况下启动电流为 120 mA;结构复杂;启动电流大,在阀芯吸合后需要持续通电维持吸合状态,功耗大。针对上述问题,经过结构改进优化,研发一种单线圈永磁式自锁电磁铁,省去原电磁铁结构中的导向筒部分。仿真计算表明:在 12 V 控制电压下,电磁铁启动电流为 81.5 mA,阀芯吸合后由永磁力保持吸合状态,不需给电磁铁持续通电,实现结构简单和低功耗要求。

关键词:煤矿用电磁铁;单线圈永磁式自锁电磁铁;结构改进;仿真分析

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)02-0085-04

Research on Structure Improvement and Simulation of Coal Mining Electromagnet

GUO Dayong, TANG Bing, SI Guolei, WANG Jialei, ZHANG Wenqi

(Sichuan Aerospace Fenghuo Servo Control Technology Co.,Ltd., Chengdu 611130, China)

Abstract: In order to simplify the complex structure of coal mining electromagnets mostly installed with guide tubes with 120 mA starting current of the electromagnet under the control voltage of 12 V, and reduce enormous power consumption due to large starting current and continuous power energizing to maintain valve core pulling-in state, a single coil permanent magnet self-locking electromagnet which eliminates the guide cylinder in the original electromagnet structure is developed through structural improvement and optimization. The simulation calculation shows that under the control voltage of 12 V, the starting current of the electromagnet is 81.5 mA, and when the valve core is pulled in, the permanent magnetic force maintains the pull-in state without continuously energizing the electromagnet, which achieve the goals of simple structure and low power consumption.

Keywords: coal mining electromagnet; single coil permanent magnet self-locking electromagnet; structural improvement; simulation analysis

0 引言

近几十年来,液压支架电液控制技术是世界上煤炭开采机电一体化领域的一项重大技术成果,是煤炭综采工作面的安全性和工作环境改善的一个重要保障^[1-3]。液压支架是煤炭综合自动化开采的重要设备,它主要是通过液压泵输出乳化液产生的压力,可靠并且有效地支撑和控制工作面顶板,隔离采空区,保证煤矿工人的安全作业^[4-5]。电液换向阀是液压支架控制的核心元件之一,在煤矿生产中通过控制电液换向阀的动作,实现液压支架的升降和平移动作^[6]。在电液换向阀中起重要作用的是先导阀,而先导阀主要通过电磁铁控制动作,当电磁铁通电时阀芯吸合,推动杠杆动作,杠杆推动先导阀芯,先导阀打开,控制乳化液体进入主阀;当电磁铁断电时,先导阀芯在液压力和复位弹簧力的作用下复位。其结构如图 1(a)所示。

目前煤矿用的电磁铁多为带导向筒的,其结构如图 1(a)所示,其中导向筒主要由上下导磁体和中间隔磁环组成,通过隔磁环改变磁路方向,从而起到增大电磁力作用,但该种电磁铁由于增加了导向筒及一些附属零部

件,因此增加了产品成本;另一方面,该电磁铁的使用工况为控制电压 12 V,启动电流 120 mA,电磁先导阀阀口值一般为 0.2 mm,且用杠杆放大系数为 10,故初始行程为 2 mm,电磁铁动阀芯受到的杠杆力为 4 N。在阀芯吸合后需要持续通电维持吸合状态,功耗比较大。由于长期在井下工作,供电不是很方便,因此市场前景不是很广阔,对于众多厂商来说,研制出低功耗的电磁阀产品已成为今后的发展方向。

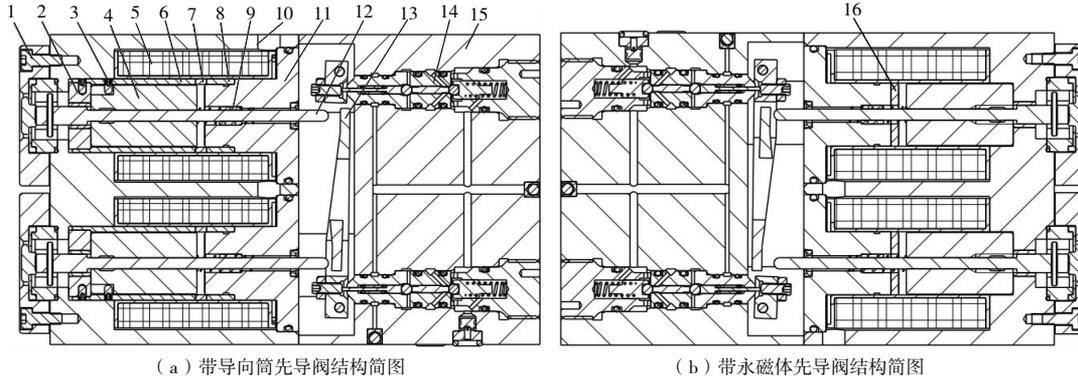
1 结构改进和原理分析

1.1 单线圈永磁式自锁电磁铁结构及工作原理

单线圈永磁式自锁电磁铁结构如图 1(b)所示,与图 1(a)对比可以看出,单线圈永磁式自锁电磁铁省去了铜基垫片、内六角平端紧定螺钉、导向筒上段、隔磁环和导向筒下段,只在电磁铁的磁回路中增加一小段永磁体,与之前的电磁铁相比,结构更简单。

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB2005100)

第一作者简介:郭大勇(1989—),男,山西运城人,工程师,硕士,研究方向为液压元件设计及仿真。



1—电磁铁部分;2—铜基垫片;3—内六角平端紧定螺钉;4—动阀芯;5—励磁线圈;6—导向筒上段;7—隔磁环;8—导向筒下段;
9—复位弹簧;10—外壳;11—轭铁;12—推杆;13—杠杆;14—先导阀芯;15—先导阀部分;16—永磁体。

图1 优化改进前后先导阀结构图

1.2 单线圈永磁式自锁电磁铁工作原理

如图1(b)所示,单线圈永磁式自锁电磁铁的工作原理是:当电磁铁不通电时,动阀芯受到向右的弹簧力和杠杆力作用以及向左的永磁力作用,但在阀芯初始位置永磁力小于弹簧力和杠杆力之和,先导阀处于关闭状态;当电磁铁通电后,动阀芯受到向右的弹簧力和杠杆力作用以及向左的永磁力和电磁力作用。随着电磁力的不断增加,当永磁力和电磁力的合力大于弹簧力和杠杆力时,动阀芯吸合,先导阀打开;当电磁铁断电后,动阀芯受到向右的弹簧力和杠杆力作用以及向左的永磁力作用,但在阀芯吸合位置处气隙磁阻很小,此时永磁力大于弹簧力和杠杆力之和。因此,虽然电磁铁已经断电,但阀芯会一直保持吸合状态;当给电磁铁通入反向电压后,动阀芯受到向右的弹簧力、杠杆力和电磁力作用,以及向左的永磁力作用,随着电磁力的不断增加,当电磁力、弹簧力和杠杆力的合力大于永磁力时,动阀芯在复位弹簧的作用下复位。

2 设计计算

2.1 线圈参数尺寸计算

根据文献[7-9]可以推导电磁线圈参数的计算公式:

$$b_{xq} = \frac{D_w - d_n}{2} \quad (1)$$

$$R_{xq} = \frac{2\rho_x(D_w + d_n) \times \alpha^2 \times N^2}{b_{xq} \times h_{xq} \times 1000} \quad (2)$$

$$S = b_{xq} \times h_{xq} \quad (3)$$

$$d = \frac{\sqrt{b_{xq} \times h_{xq} / N}}{\alpha} \quad (4)$$

$$I_N = \frac{N \times U}{R_{xq}} \quad (5)$$

$$P = UI \quad (6)$$

式中: b_{xq} 为线圈宽度,mm; D_w 为线圈外径,mm; d_n 为线圈内径,mm; R_{xq} 为线圈电阻, Ω ; ρ_x 为导线电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; α 为线径系数,无量纲; N 为线圈匝数,匝; h_{xq} 为线圈高度,mm; S 为线圈截面积, mm^2 ; d 为导线直径,mm; I_N 为线圈

安匝数; U 为线圈电压,V; P 为线圈功耗,W; I 为线圈电流,A。

在带导向筒电磁铁结构中,线圈骨架尺寸为:线圈外径 $D_w = 34 \text{ mm}$,线圈内径 $d_n = 21.6 \text{ mm}$,线圈高度 $h_{xq} = 40.5 \text{ mm}$,线圈宽度 $b_{xq} = 6.2 \text{ mm}$,控制电压 $U = 12 \text{ V}$,漆包线直径为 0.25 mm ,线圈匝数 3 360 匝。优化后的单线圈永磁式自锁电磁铁,线圈骨架尺寸为:线圈外径 $D_w = 34 \text{ mm}$,线圈内径 $d_n = 17.6 \text{ mm}$,线圈高度 $h_{xq} = 40.5 \text{ mm}$,线圈宽度 $b_{xq} = 8.2 \text{ mm}$,控制电压 $U = 12 \text{ V}$ (考虑电压降,仿真分析时设置为 10.5 V);导线电阻率 $\rho_x = 0.01754 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$,线径系数 $\alpha = 0.136$,漆包线直径为 0.25 mm ,通过式(1)~式(6)计算可得线圈匝数 $N = 4100$ 匝,线圈电阻 $R_{xq} = 123 \Omega$,安匝数 $I_N = 350$ 安匝。

2.2 永磁体结构尺寸计算

根据电磁场原理,按如下公式确定永磁体尺寸^[10-12]。

$$F_N = \frac{(B_\delta + B_m)^2 S}{2\mu_0} \quad (7)$$

$$S_m = \frac{\sigma_m B_m S}{B_q} \quad (8)$$

$$L_m = \frac{K_\Sigma B_m \delta}{\mu_0 |H_q|} \quad (9)$$

式中: F_N 为永磁体和控制线圈对动阀芯的共同作用力,N; B_δ 为控制线圈产生的磁感应强度,T; B_m 为工作气隙处的磁感应强度,T; S 为工作气隙截面积, m^2 ; μ_0 为真空磁导率, $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; S_m 为永磁体截面积, m^2 ; σ_m 为磁钢漏磁系数,无量纲; B_q 为永磁体工作点磁感应强度,T; L_m 为永磁体长度,m; K_Σ 为磁势降系数,无量纲; δ 为工作气隙长度,m; H_q 为永磁体磁场强度,A/m。

在带导向筒的先导阀中,先导阀打开时需要的杠杆力为 4 N ,电磁铁弹簧力为 1.1 N ,为确保先导阀工作的可靠性,设计时永磁体和控制线圈产生的共同作用力 F_N 取 5.5 N ,其中 $B_\delta = 0.158 \text{ T}$, $S = 216 \text{ mm}^2$, σ_m 取 1.2 , K_Σ 取 1.2 , $\delta = 2 \text{ mm}$,永磁材料选用 NdFe35,在该材料的退磁曲线上,选择工作点 $B_q = 0.118 \text{ T}$, $H_q = 1210 \text{ kA/m}$,通过式(7)~式(9)可以确定永磁体的结构尺寸为 $\phi 17 \text{ mm} \times \phi 5.5 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$ 。

3 仿真实验

为了判断优化后的单线圈永磁式自锁电磁铁性能是否满足先导阀打开要求及低功耗目标,需要进行电磁铁静态特性仿真,在 Ansoft Maxwell 仿真中轭铁、动阀芯、外壳材料为 DT4C,永磁体材料为 NdFe35。

3.1 单线圈永磁自锁式电磁铁静态特性研究

通过 Ansoft Maxwell 对单线圈永磁自锁式电磁铁进行静态特性仿真^[13],通过仿真判断启动作用力是否满足先导阀打开要求,其仿真结果如图 2 所示。

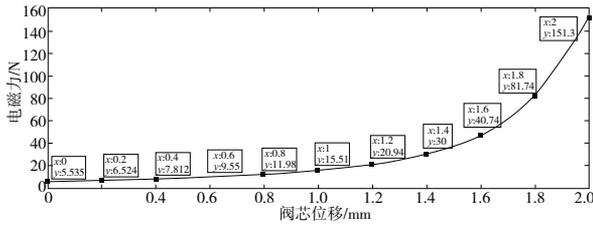
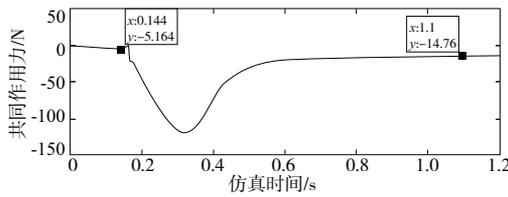


图 2 单线圈永磁自锁式电磁铁静态特性仿真

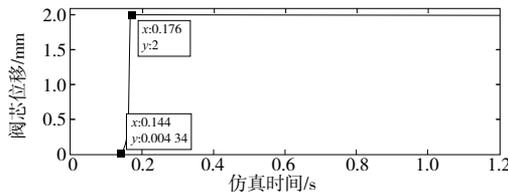
从图 2 的仿真结果中可以看出,单线圈永磁式自锁电磁铁的启动力为 5.53 N,与通过公式计算结果相近,大于杠杆力和电磁铁弹簧力之和,满足先导阀打开要求。

3.2 单线圈永磁自锁式电磁铁动态特性仿真

通过 Ansoft Maxwell 对单线圈永磁自锁式电磁铁进行



(a) 共同作用力变化曲线



(c) 阀芯位置变化曲线

动态特性仿真,进行电磁铁启动电流、阀芯位置变化的仿真计算。动阀芯在运动过程中,励磁线圈和永磁体产生的共同作用力主要用来克服杠杆力和电磁铁弹簧力,因此设置负载条件为 $-(k \times p_{\text{osition}} + F) - 4$,其中 k 为弹簧刚度 $0.16 \text{ N} \cdot \text{mm}$; p_{osition} 为阀芯运动行程 2 mm ; F 为弹簧预紧力 0.78 N 。控制电路和电源时序图如图 3 所示,电磁铁控制电压源参数值如表 1 所示。

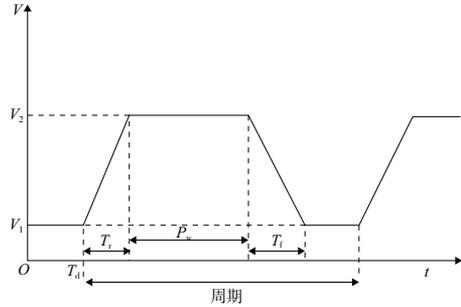
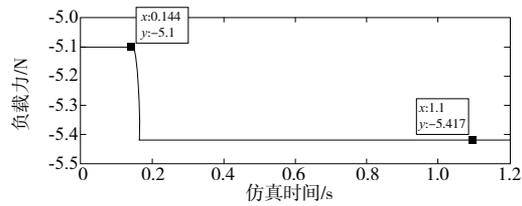


图 3 电磁铁控制电路和电源时序图

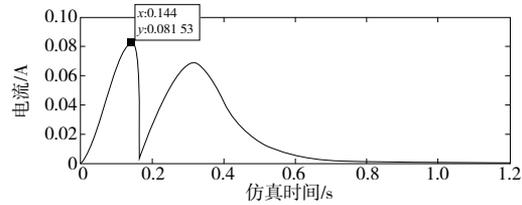
表 1 电磁铁控制电压源参数值

电压初始值 V_1/V	电压稳定值 V_2/V	电压起始时间 T_{ia}/s	电压上升时间 T_{if}/s	电压保持时间 P_w/s	电压下降时间 T_{if}/s	周期
0	12	0	0	0.3	0	1.2

当通入单向电时,单线圈永磁自锁电磁铁动态特性仿真结果如图 4 所示。



(b) 负载力变化曲线



(d) 电流变化曲线

图 4 单线圈永磁自锁电磁铁动态特性仿真曲线

从图 4 的仿真结果中可以看出,当给单线圈永磁式自锁电磁铁通入单向电时,电磁铁的电流不断增加,并在 0.144 s 达到最大值 81.5mA(图 4(d))。随着电流的不断增加,励磁线圈和永磁体产生的共同作用力也不断增加(图 4(a)),当共同作用力在 0.144s 大于负载力时(图 4(b)),动阀芯开始运动,到 0.176s 阀芯运动到位(阀芯吸合),阀芯行程 2mm(图 4(c));当电磁铁在 0.3s 断电后,电流不断减小,并最终降为 0(图 4(d)),但共同作

用力最终为 14.76 N(图 4(a)),仍大于负载力 5.41 N(图 4(b))。因此阀芯并没有复位,始终保持吸合状态(图 4(c))。所以对于永磁式自锁电磁铁来说,即使电磁铁线圈断电后阀芯仍一直保持吸合状态,因此大大降低了电磁铁功耗。

当给永磁式自锁电磁铁通入双向电时,其电源参数设置如表 2 所示,动态特性仿真结果如图 5 所示。

表 2 电磁铁控制电压源参数值

阶段	电压初始值 V_1/V	电压稳态值 V_2/V	电压起始时间 T_d/s	电压上升时间 T_r/s	电压保持时间 P_w/s	电压下降时间 T_f/s	周期
1	0	12	0	0	0.3	0	0.6
2	0	-12	0.7	0	0.3	0	0.6

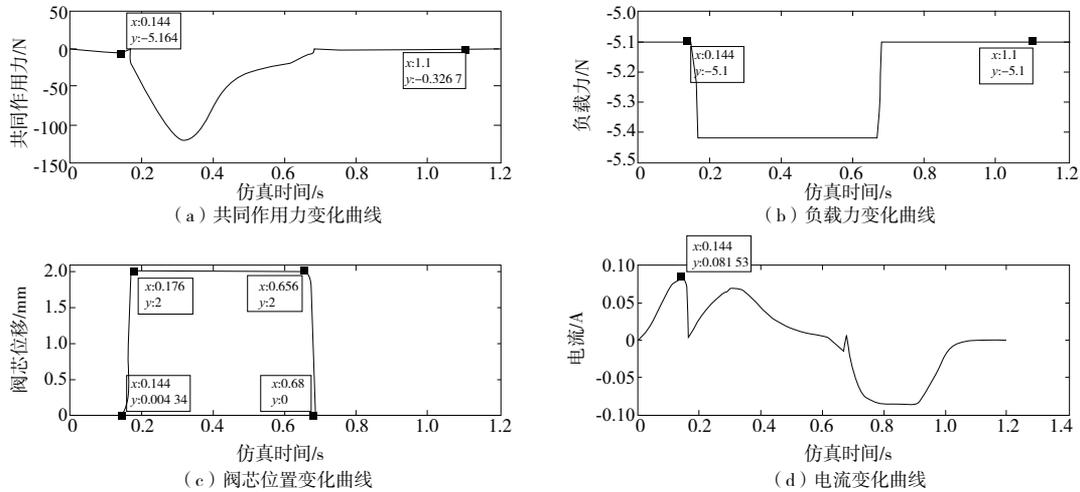


图 5 双向电作用下永磁式自锁电磁铁动态特性仿真曲线

从图 5 的仿真结果中可以看出,当给单线圈永磁式自锁电磁铁通入正向电时,电磁铁的电流不断增加,并在 0.144 s 达到最大值 81.5 mA (图 5(d))。随着电流的不断增加,励磁线圈和永磁体产生的共同作用力也不断增加 (图 5(a)),当共同作用力在 0.144 s 大于负载力时 (图 5(b)),动阀芯开始运动,到 0.176 s 阀芯运动到位 (阀芯吸合),阀芯行程 2 mm (图 5(c));当在 0.7 s 给单线圈永磁式自锁电磁铁通入反向电时,随着反向电流不断增加 (图 5(d)),此时反向电磁力也不断增加,共同作用力逐渐减小,并最终降为 0.32 N (图 5(a)),小于负载力 5.1 N (图 5(b)),阀芯从 0.65 s 开始复位,到 0.68 s 完全复位,阀芯行程 2 mm (图 5(c))。因此当给单线圈永磁式自锁电磁铁通入正反向电压时,永磁式自锁电磁铁能够实现启闭动作,满足普通电磁铁功能。

4 结语

为了使煤矿用永磁式自锁电磁铁实现结构简单和低功耗要求,对其结构进行改进。提出了一种单线圈永磁式自锁电磁铁,通过仿真分析得到如下结论:

1) 优化后的单线圈永磁式自锁电磁铁在漆包线直径和阀芯位移不变的情况下,电磁铁的启动作用力为 5.53 N,满足先导阀打开要求;

2) 在控制电压 12 V 的情况下,启动电流为 81.5 mA,与带导向筒的电磁铁相比,启动电流减小了 38.5 mA;

3) 永磁式自锁电磁铁在线圈断电后仍能够使阀芯保持吸合状态,不需给线圈持续通电维持吸合状态,降低了电磁铁功耗;

4) 通过对永磁式自锁电磁铁通入正反向电压,使自

锁电磁铁实现了启闭动作,满足了普通电磁铁功能。

参考文献:

- [1] 李首滨. 国产液压支架电液控制系统技术现状[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 53-56.
- [2] 刘培云,戴智. 电液控制系统在液压支架中的应用[J]. 矿业快报, 2005, 21(2): 39-40.
- [3] 王国法,朱军,张良,等. 液压支架电液控制系统的分析和展望[J]. 煤矿开采, 2000, 5(2): 5-8, 4.
- [4] 谢嘉成,王学文,杨兆建,等. 综采工作面煤层装备联合虚拟仿真技术构想与实践[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5): 162-168.
- [5] 王国法. 液压支架技术体系研究与实践[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1903-1908.
- [6] 王国法,杜毅博. 智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 1-10.
- [7] 孙晓,栾盈盈,孙柯,等. 高速双线圈开关电磁阀控制策略研究[J]. 液压与气动, 2020(2): 175-182.
- [8] 陈文,吴张永,张莲芝,等. 双线圈磁流变先导阀设计与性能研究[J]. 液压与气动, 2019(1): 110-116.
- [9] 王晓,王庆文,徐瑞银. 基于 AMESim 的液压支架手动先导操纵阀液压系统分析[J]. 液压与气动, 2019(2): 87-91.
- [10] 方洋,肖峻,蔡未末,等. 基于 AMESim 的高速开关阀动态特性仿真研究[J]. 液压与气动, 2019(7): 81-87.
- [11] 赵继国,冀宏. 吸合面位置对比例电磁铁行程-力特性的影响[J]. 液压与气动, 2017(1): 105-108.
- [12] 孙宾,刘连哲,黄礼浩,等. 电磁阀的热物理场数值仿真与试验研究[J]. 液压与气动, 2019(5): 92-97.
- [13] 吴倩,李建,苏秀苹. 一种螺管式电磁铁的静态特性及其影响因素分析[J]. 电器与能效管理技术, 2017(1): 8-12.

收稿日期: 2021-10-28