

基于 Ansys-Maxwell 的矿用电磁铁优化和仿真

郭大勇, 司国雷, 唐兵, 王嘉磊

(四川航天烽火伺服控制技术有限公司, 四川 成都 611130)

摘要:针对某型号矿用电磁铁启动电磁力低、不足以驱动控制阀的问题,在控制电压、电磁铁外形尺寸和阀芯行程不变的前提下,应用有限元仿真软件 Ansys-Maxwell 分别对电磁铁中隔磁环长度和隔磁环位置对启动电磁力的影响进行参数化仿真分析。仿真结果表明:隔磁环长度对启动电磁力影响不大,隔磁环位置对启动电磁力有重要影响。研究得到的最终优化方案是当隔磁环位置左移 3.0 mm 后,矿用电磁铁的启动电磁力由 3.47 N 增加到 13.9 N,远大于控制阀的开启液压力 4.12 N。通过试验验证了仿真分析的正确性。

关键词:电磁阀;启动电磁力;Ansys-Maxwell;隔磁环长度;隔磁环位置

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)06-0123-04

Optimization and Simulation of Mining Electromagnet Based on Ansys-Maxwell

GUO Dayong, SI Guolei, TANG Bing, WANG Jialei

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

Abstract: With regard to the deficiency of driving the control valve of a certain type of mining electromagnet due to its low starting electromagnetic force, and on the premise that the control voltage, the outline dimension of the electromagnet and the stroke of the valve core remain unchanged, the finite element simulation software Ansys-Maxwell is used to carry out parametric simulation analysis on the influence of the length and position of the magnetic separator ring in the electromagnet on the starting electromagnetic force. The simulation results show that the length of the magnetic separator has little effect on the starting electromagnetic force, the position of the magnetic separator, however, has an important effect on the starting electromagnetic force. The final optimization scheme obtained from the research is that when the position of the magnetic separator ring is moved to the left by 3.0 mm, the starting electromagnetic force of the mining electromagnet increases from 3.47 N to 13.9 N, which is far greater than the opening hydraulic pressure of the control valve of 4.12 N. The validity of the simulation analysis is verified by experiments.

Keywords: electromagnet; the starting electromagnetic force; Ansys-Maxwell; magnetic separator length; magnetic separator position

0 引言

液压支架电液控制系统是煤炭综采工作面的重要组成部分,对保证煤矿工人的安全作业起着重要作用。矿用电磁先导阀是电液控制系统中重要组成部分,通过控制主阀的通断使油液进入液压支架的液压缸,使液压支架实现升降运动,隔离采空区,保证煤矿工人的安全作业^[1]。电磁铁作为一种电-机械转换装置,是电磁先导阀的核心控制部分,其性能的好坏直接影响整个液压支架系统的正常工作。

由于矿用环境的特殊性,为保证安全,矿用电磁铁一般为本质安全型,控制电压为 DC12 V,阀芯行程(2±0.06) mm,电流一般不超过 200 mA。在如此小功率的条件下获得较大推力有较大难度^[2]。在电磁铁性能参数中,电磁力是重要的一项考核指标。近年来,许多研究人员对电磁力进行理论分析和试验研究。魏列江等^[3]建立了高速开关阀数学模型,研究了线圈匝数对电磁力的影响。黄路路等^[4]采用有限元方法研究了不同安匝数对电磁铁静态特

性的影响,并阐述了电磁衔铁在不同位置时的静磁场分布规律。毛乐园等^[5]研究了衔铁端面与极靴端面的距离、极靴内侧锥面端部半径、衔铁锥面和极靴内侧锥面的锥角对电磁铁吸力的影响,并通过正交试验验证了仿真结果,试验结果与仿真结果相符。

上述文献就重要结构参数对电磁力的影响进行了研究。本研究按照某煤矿公司要求,在控制电压、电磁铁外形尺寸和阀芯行程不变的情况下,通过 Ansys-Maxwell 有限元软件分析隔磁环参数对启动电磁力的影响,得到提高启动电磁力的最优化方法,从而提高矿用液压支架的工作可靠性。

1 电磁先导阀结构及工作原理

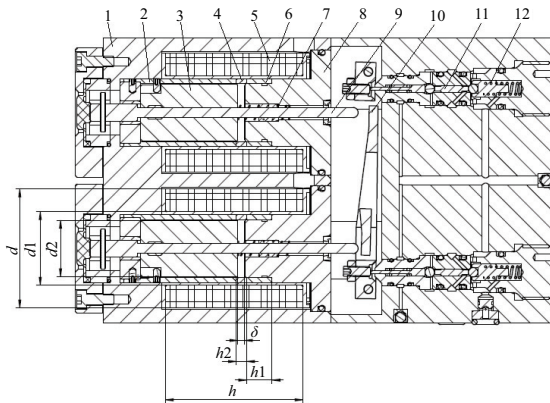
1.1 电磁先导阀结构

电磁先导阀结构如图 1 所示,其中电磁铁的主要作用

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—),山西运城人,工程师,硕士,研究方向为微小型液压元件设计。

是控制先导阀的导通与关断,该电磁铁主要由导磁外壳、导向筒、隔磁环、阀芯组件、轭铁、线圈组件和电磁铁复位弹簧组成。电磁铁的结构参数如表 1 所示。



1—电磁铁外壳;2—导向筒上段;3—阀芯组件;4—隔磁环;5—线圈组件;6—导向筒下段;7—电磁铁复位弹簧;8—轭铁;9—推杆;10—杠杆;11—先导阀芯;12—先导阀复位弹簧。

图 1 电磁先导阀结构图

表 1 矿用电磁铁的结构参数

参数	量值	参数	量值
线圈外径 d/mm	35.0	隔磁环位置 $h1/\text{mm}$	7.5
线圈内径 $d1/\text{mm}$	21.6	隔磁环长度 $h2/\text{mm}$	3.0
线圈高度 h/mm	40.5	阀芯行程 δ/mm	2 ± 0.6
衔铁直径 $d2/\text{mm}$	16.6	激励安匝数/A	380

1.2 电磁先导阀的工作原理

电磁先导阀的工作原理为:当电磁铁通电时,随着电磁力的不断增加,当电磁力大于复位弹簧力时,阀芯吸合(电磁铁阀芯与推杆之间为螺纹配合连接),推杆推动杠杆,使对侧的先导阀芯运动,先导阀芯克服弹簧力和液压力,先导阀打开;当电磁铁断电时,先导阀芯在液压力和先导阀复位弹簧力的作用下复位,电磁铁阀芯也在复位弹簧力作用下复位。

1.3 先导阀打开作用力测试

由于电磁铁的主要作用是控制先导阀启闭,因此需要对先导阀打开时的作用力进行检测,其测试试验如图 2 所示,首先在先导阀入口通入 35 MPa 的工作压力,用测力计推动先导阀芯,当先导阀入口压力下降代表先导阀导通,此时测力计上的值即为先导阀打开时作用力大小。从图 2 可以看出,打开先导阀需要的作用力为 4.12 N。因此电磁铁的启动电磁力必须大于 4.12 N。

1.4 原电磁铁启动电磁力测试

电磁铁启动电磁力测试试验如图 3 所示,其中测力计和位移计固定在固定板上,固定板通过转动手轮上下移动,行程尺与固定支架连接在一起。测试开始时,使电磁铁通电吸合,然后转动手轮使固定板向下移动,当测力计

探头与电磁铁推杆刚好接触(测力计示值为 0,下移一点则示值不为 0),把位移计示值调 0;然后电磁铁断电复位,转动手轮使固定板向下移动,观察位移计示值,当示值为 (2 ± 0.06) mm(阀芯行程)停止转动;最后给电磁铁通电,阀芯吸合,此时测力计上示值即为电磁铁启动电磁力大小。



(a) 先导阀打开前作用力值 (b) 先导阀打开后作用力值

图 2 先导阀打开作用力测试试验

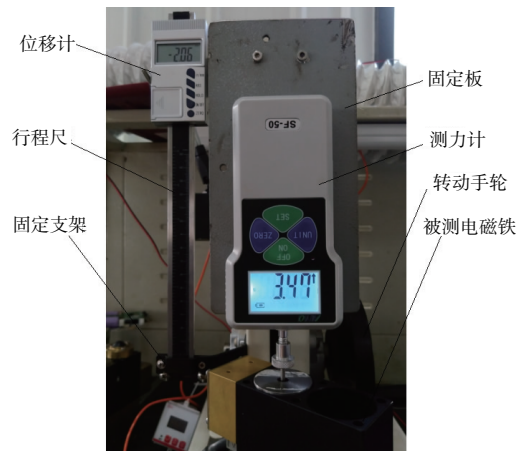


图 3 电磁铁启动电磁力测试试验

从图 3 的测试结果中可以看出,原电磁铁的启动电磁力为 3.47 N,小于先导阀打开时的作用力,不能控制先导阀正常打开关闭,因此需要对原电磁铁进行优化改进,提高电磁铁的启动电磁力。

2 电磁铁启动电磁力有限元仿真优化

由于用户要求电磁铁的外形尺寸不变,因此在仿真优化时需要保留线圈尺寸、衔铁尺寸、阀芯行程和激励安匝数不变。通过对矿用电磁铁结构分析发现,其特殊之处在于导向筒中增加了隔磁环结构,在文献[6-7]中提到:由于隔磁环为非导磁材料,因此其结构参数对电磁铁中磁路流向、工作气隙处磁感应强度大小都有较大影响。本研究通过优化隔磁环参数使矿用电磁铁实现启动电磁力大于 4.12 N 的研究目标。

2.1 Ansys 仿真模型

煤矿用电磁铁为轴对称结构,用二维模型就能反映三

维情况。为了减少计算量,本研究采用 2D 轴对称模型进行磁场仿真计算^[8-10]。为了分析隔磁环参数对矿用电磁铁启动电磁力的影响,建立 2D 轴对称模型如图 4 所示。

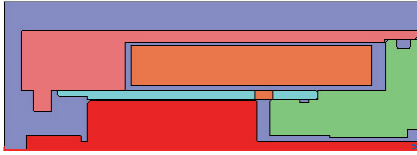


图 4 矿用电磁铁仿真模型

在电磁铁仿真中,电磁铁外壳、衔铁、轭铁、导向筒上段和导向筒下段的材料为 DT4,隔磁环和线圈的材料为铜;边界条件选为气球边界条件^[11],采用自适应网格划分和手动网格划分相结合的方法^[12];激励源定为电流源,线圈安匝数为 380 A,求解设置中最大收敛步数为 10,收敛百分比误差为 1%,每步细化百分比为 30%,非线性残差为 0.000 1。

在原电磁铁结构中隔磁环长度 $h_2=3.0$ mm,隔磁环下端面距导向筒下端面距离 $h_1=7.5$ mm,由于线圈尺寸和衔铁尺寸须保持不变,因此优化设计时不考虑隔磁环厚度影响,仅从隔磁环长度和隔磁环位置两方面分析对启动电磁力的影响。

2.2 隔磁环长度对启动电磁力的影响分析

为了分析隔磁环长度对矿用电磁铁启动电磁力的影响,使隔磁环长度在 8 mm~28 mm 范围内变化,每 2 mm 取个点进行参数化仿真。仿真参数如表 1 所示,得到不同隔磁环长度下启动电磁力变化曲线如图 5 所示。

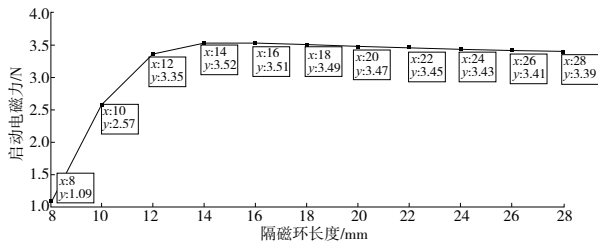


图 5 隔磁环长度对启动电磁力的影响

从图 5 的仿真结果中可以看出,当隔磁环长度在 8 mm~14 mm 范围内变化时,随着隔磁环长度的增加,电磁铁的启动电磁力增加得比较快;而当隔磁环长度在 14 mm~28 mm 范围内变化时,电磁铁的启动电磁力变化不大。产生这种现象的主要原因是:当隔磁环长度在 8 mm~14 mm 范围内变化时,随着隔磁环长度的增加,经衔铁进入轭铁的磁力线数量增加,即主气隙磁通量增加,因此启动电磁力增加,如图 6 所示。而当隔磁环长度在 14 mm~28 mm 范围内变化时,通过主气隙的磁通量基本不变,因此启动电磁力变化不大。

2.3 隔磁环位置对启动电磁力的影响分析

如图 1 所示,以隔磁环下端面距导向筒下端面 $h_1=7.5$ mm 处作为参考零点,隔磁环向左移动为正方向,向右移动为负方向,设定隔磁环位置由 -3.0 mm~+7.1 mm 变

化,每隔 0.2 mm 取个点,并以此为变量进行参数化仿真,得到启动电磁力变化曲线如图 7 所示。

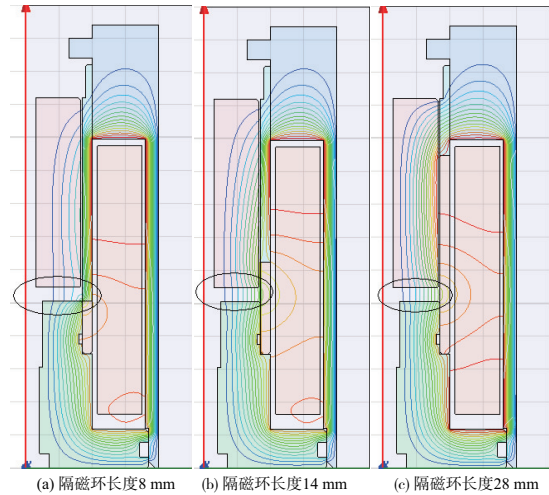


图 6 不同隔磁环长度气隙处磁力线分布

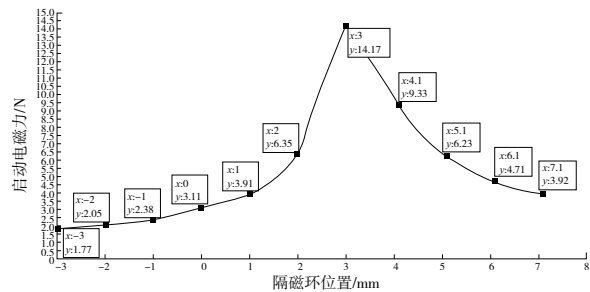


图 7 不同隔磁环位置启动电磁力变化曲线

从图 7 的仿真结果中可以看出,当隔磁环位置在 -3.0 mm~3.0 mm 范围内变化时,随着隔磁环位置的不断左移,电磁铁的启动电磁力不断增加,在 3.0 mm 处达到最大值 14.17 N;当隔磁环继续左移,电磁铁的启动电磁力不断降低,在 7.1 mm 处降为 3.92 N。产生这种现象的主要原因是:当隔磁环位置在 -3.0 mm~3.0 mm 范围内变化时,随着隔磁环位置的不断左移,气隙处的磁感应强度不断增加,因此启动电磁力不断增加,当隔磁环继续左移,气隙处的磁感应强度不断减小,因此启动电磁力不断减小。图 8 为隔磁环在移动过程中 4 个位置处的磁感应强度。从仿真结果中可以看出,当隔磁环位置左移 3.0 mm 时,气隙处的磁感应强度最大,因此该位置处的启动电磁力也最大。

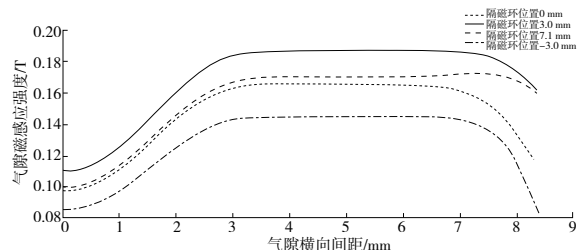


图 8 初始位置气隙磁感应强度

2.4 仿真结果分析

从上面的仿真结果可以看出:

1) 当隔磁环长度在 8 mm~28 mm 范围内变化时,随着隔磁环长度的增加,电磁铁的启动电磁力先增大后基本不变,当隔磁环长度为 14 mm 时电磁铁的启动电磁力为 3.51 N,仍小于目标值 4.12 N,不满足先导阀打开要求;

2) 当隔磁环位置在 -3.0 mm~7.1 mm 范围内变化时,电磁铁的启动电磁力先增大后减小,当隔磁环位置左移 3.0 mm 后,电磁铁的启动电磁力为 14.17 N,远大于目标值 4.12 N,满足先导阀打开要求;

3) 因此原电磁铁最好的优化方案是将隔磁环位置左移 3.0 mm。

3 试验验证

从仿真结果中可以看出,电磁铁最好的优化方案是将隔磁环位置左移 3.0 mm。根据仿真结果对导向筒中隔磁环位置进行调整,优化后的导向筒结构及启动电磁力测试结果如图 9 所示。

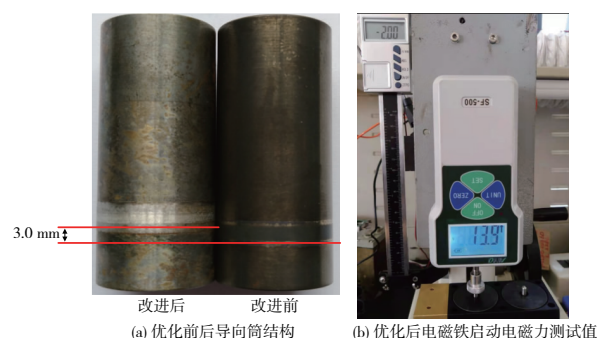


图 9 结构优化及启动电磁力测试试验

从图 9 的测试结果中可以看出,将隔磁环位置左移 3.0 mm 后电磁铁的启动电磁力增加为 13.9 N,与仿真结果基本吻合,相比于原电磁铁启动电磁力 3.47 N 增加了 10.4 N,远大于目标值 4.12 N,满足先导阀打开要求。

4 结语

本文通过对矿用电磁铁启动电磁力仿真优化得到:

- 1) 隔磁环参数对电磁铁的启动电磁力有重要影响;
- 2) 在一定范围内通过增加隔磁环长度可以提高电磁铁的启动电磁力,但影响程度不大;
- 3) 隔磁环位置对电磁铁的启动电磁力有重要影响,通过改变隔磁环位置可以提高电磁铁的启动电磁力。

参考文献:

- [1] 柴伟锋,廖瑶瑶,廉自生,等. 矿用电磁阀动静特性分析[J]. 液压与气动,2020(8):42-48.
- [2] 廖瑶瑶,任怀伟,张德生,等. 液压支架换向阀的液动力计算方法及其应用[J]. 煤炭学报,2019,44(5):1609-1615.
- [3] 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.
- [4] 黄路路,王金林,冀宏,等. 基于 Maxwell 的比例电磁铁有效工作特性研究[J]. 液压气动与密封,2017,37(3):38-42.
- [5] 毛乐园,周连刚. 影响比例电磁铁吸力的结构因素研究[J]. 液压气动与密封,2019,39(2):41-44.
- [6] 马婷,廉自生. 本质安全型电磁铁的性能仿真研究[J]. 矿山机械,2013,41(3):120-123.
- [7] 龚斌. 比例电磁铁静态特性的研究[J]. 流体传动与控制,2017(2):25-32,35.
- [8] 田昊,赵禹任,侯交叉,等. 基于电流调制的电磁开关阀开关特性研究[J]. 液压与气动,2019(5):9-14.
- [9] 吴锐,王仪明,方继根,等. 一种车用高速开关阀电磁力影响因素研究[J]. 液压与气动,2020(9):168-173.
- [10] 王强. 螺管式电磁铁设计与仿真分析[D]. 湘潭:湖南科技大学,2013.
- [11] 谢斌. 阀用直流电磁铁吸力研究[D]. 湘潭:湖南科技大学,2018.
- [12] 丁廷哲,潘孝斌. 高压气动大流量电磁阀设计和仿真[J]. 液压与气动,2017(1):21-25.

收稿日期:2022-07-01

(上接第 110 页)

- [24] 睦石军,廖平. 基于机器视觉的 FPC 缺陷检测系统[J]. 仪表技术与传感器,2020(9):64-68.
- [25] JIAN M Q, XIA K L, WANG Q, et al. Flexible and highly sensitive pressure sensors based on bionic hierarchical structures [J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(9):1606066.
- [26] XIA K L, WANG C Y, JIAN M Q, et al. CVD growth of fingerprint-like patterned 3D graphene film for an ultrasensitive pressure sensor[J]. Nano Research, 2018, 11(2):1124-1134.
- [27] HONG S Y, LEE Y H, PARK H, et al. Stretchable active matrix temperature sensor array of polyaniline nanofibers for electronic skin[J]. Advanced Materials, 2016, 28(5):930-935.
- [28] 邹艳玲,郑聪,江心雨,等. 基于 RFID 技术的无线无源纺织

- 应变传感器研究进展[J]. 丝绸,2021,58(8):53-59.
- [29] 曹鑫林,王先进,郭成东,等. 一种电子皮肤的触觉传感性能研究[J]. 压电与声光,2022,44(1):118-124.
- [30] 徐恒,侯沁. 柔性电子产业发展潜力巨大[N]. 中国电子报,2016-10-28(2).
- [31] 新型. 北大超薄柔性电子器件研究获得重要进展[J]. 化工新型材料,2018,46(4):110.
- [32] 陈婉婉,章韬. 中科大制备新型高性能柔性电子器件[J]. 科教文汇,2022(2):1.
- [33] 姜健. 厦门柔性电子产业现状与发展建议[J]. 厦门科技,2022(1):60-62.

收稿日期:2022-11-02