

# The Simulation Calculation of Electromagnetic Suction of Double-coil Electromagnetic System

Chen Yang / Guo Qiyi / Huang Shize

## 双线圈电磁系统电磁吸力仿真计算

陈 杨<sup>1</sup>/ 郭其一<sup>1</sup>/ 黄世泽<sup>2</sup>(1. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200331; 2. 同济大学交通运输工程学院, 上海 200331)

**摘 要** 介绍双线圈控制与保护开关的结构以及节能工作原理, 建立双线圈控制与保护开关电磁机构的三维静态磁场模型。仿真求出电磁吸力与工作气隙的关系, 对不同匝数的吸合线圈和保持线圈进行仿真, 研究两个线圈匝数对电磁吸力的影响, 为双线圈匝数选型提供理论指导。

**关键词** 双线圈 节能 电磁吸力 线圈匝数

DOI:10.13857/j.cnki.cn11-5589/tu.2015.05.026

**Abstract** The structure and energy-saving principle of double-coil control and protective switch are introduced, and the three dimensional static magnetic field model is built, the relationship of electromagnetic suction and air gap by simulation is calculated, and the different number of turns of pull-in coil are simulated and the effect to the electromagnetic suction is obtained, thus the theory guidance for the selection of number of turns of double coils could be provided.

**Keywords** double-coil, energy-saving, electromagnetic suction, turns of coil

### 0 引言

在低压电器产品中, 控制与保护开关的使用范围越来越广。近年来, 电器产品不断取得新的发展, 控制与保护开关作为一种电磁开关电器, 其使用数量日益增加, 同时产品的节能越来越受到重视。为了实现节能的目标, 许多学者做了大量研究, 设计了电磁铁机械自锁装置<sup>[1]</sup>, 在接触器接通时利用机械力使得电磁线圈断电, 而此时接触器仍然是接通的, 从而达到节能的目的。其缺点是对机械锁扣的工艺性提出了很高的要求, 在电磁系统需要释放时, 必须能可靠、快速地解除锁扣环节, 否则将不能快速分断电路。采用电力电子技术, 利用电子元器件的功能与特性, 实现电磁系统线圈上电

压、电流波形的自动控制与调节, 实现了对接触器性能指标要求的灵活控制, 达到了节能目的<sup>[2-6]</sup>。但是安装节能附加装置要占用低压电器的辅助触头作为启动阶段和保持阶段的转换开关, 给用户的安装、维修带来不便。永磁交流接触器解决了接触器发热、噪音、掉闸等问题<sup>[7]</sup>, 但其缺点是复位弹簧保持力较小, 易受外力的影响, 且越来越多的人对双线圈控制与保护开关通过两个线圈的转换实现节能。本文的研究对象是双线圈控制与保护开关, 对双线圈控制与保护开关的电磁结构以及工作原理进行了介绍, 使用 ANSYS 软件参数化设计语言 (APDL) 建立三维静态电磁系统模型, 利用 ANSYS 寻优功能求解励磁电流, 并求解电磁吸力与工作气隙的关系, 对不同匝数的吸合线圈和保持线圈进行

仿真,研究两个线圈匝数对电磁吸力的影响,并通过调节线圈匝数实现降低损耗的目的,为产品设计提供理论指导。

## 1 双线圈控制与保护开关的结构和工作原理

双 E 型电磁铁的电磁结构如图 1 所示,主要包括动、静铁心和反力弹簧。线路中接入电流后动静铁心开始吸合,电流切断后动静铁心开始释放。其中 a 轴将动铁心与线圈骨架相约束,使得动铁心沿着骨架滑槽运动; b 轴将动铁心和触头支持相约束,使得动铁心的运动能带动接触组主触头的运动; c 轴将动铁心和主反力弹簧相约束,动静铁心的电磁吸力和弹簧反力完成吸和反力的配合。

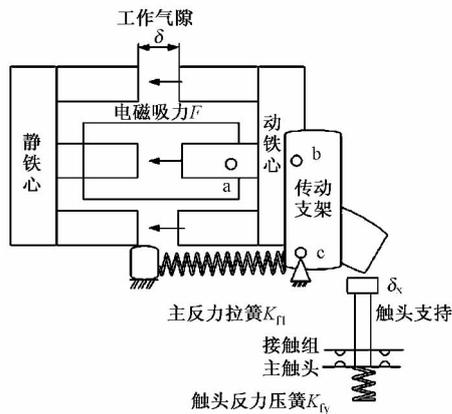


图1 双 E 型电磁铁结构图

双线圈技术是指电磁系统中的启动线圈和保持线圈,通过常闭辅助触头装置的切换,分别工作在启动吸合和保持闭合这两个阶段。启动线圈工作在启动吸合阶段,产生较大吸力使动静铁心快速吸合;保持线圈工作在保持闭合阶段,能够减小线路中的电流,降低损耗。两个线圈在动铁心吸合过程中进行转换,线圈有两种转换方式:一种是通过机械按钮控制转换;另一种是通过电子延时线路进行转换。本文所采用的转换方式是第一种,在气隙值达到 1.7mm 时通过机械按钮辅助触头进行转换。

串联双线圈线路图如图 2 所示。该线路中有两个线圈,左侧和右侧分别是启动线圈和保持线圈,其匝数分别是  $N_1$  和  $N_2$  匝。动铁心刚开始运动时,只有右侧线圈接入线路中,左侧线圈被常闭辅助触头 S 短接,由于右侧线圈的匝数少、导线截面积大,所以线圈的电阻较大,因而能够产生较大的电磁吸

力,吸引动铁心克服弹簧反力运动。当动铁心运动到设定位置时,常闭辅助触头 S 打开,左侧线圈接入线路中,两个线圈串联运行。由于左侧线圈的匝数多、导线截面积小,因此线圈电阻较大,所以线路中电流较小,保持安匝较小,这样可以有效降低功率损耗。

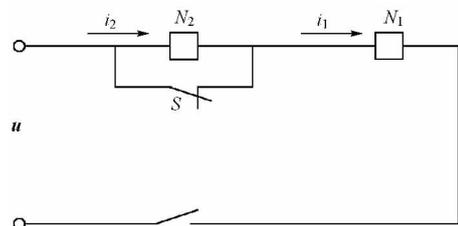


图2 串联双线圈线路图

## 2 双线圈控制与保护开关三维有限元分析

ANSYS 软件是集电场、磁场、流体、结构分析于一体的有限元分析软件。ANSYS 软件有两种操作方式:一种是 GUI 操作方式,即图形模式;另一种是 APDL 参数化设计语言操作方式。前者简单直观,但是对于一些需要重复设计的环节,就显得相当琐碎,相比之下,后者具有明显的优越性。利用 APDL 参数化设计语言设计 ANSYS 的有限元分析命令流,可以实现参数化建模、参数化施加载荷与求解以及参数化显示结果,从而实现参数化有限元分析的全过程,十分便捷,节约了设计周期。

### 2.1 双线圈控制与保护开关模型的建立

为建立模型,首先要知道模型的尺寸,本文双线圈控制与保护开关的主要部件尺寸如表 1 所示。

表1 主要部件尺寸

参数	尺寸/mm	参数	尺寸/mm
铁芯总长度	95	静铁芯总高度	40
动、静铁芯总厚度	50	静铁芯极高	25
铁芯中极长度	25	动铁芯总高度	25
铁芯单边极长度	18.5	动铁芯极高	13
线圈绕制厚度	14	线圈高度	35
线圈截面长半轴	37	线圈截面的宽半轴	22

为了建立双线圈控制与保护开关实体模型,首先建立动铁心和静铁心方块模型,在动铁心外围施加方柱体空气层,作为动铁心施加力的标志。然后在整个模型外围添加圆柱体空气层,为仿真提供空气介质。电流源通过直接生成的方式确定电流源的位置和形状,然后建立跑道型线圈。其中电流大

小由电压电阻关系可以得到。线圈电阻的计算见式(1)。

$$R = \frac{\rho\pi(c+r_c)N^2}{k_{tc}h\Delta} \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为导线的电阻率, 在 20℃ 时的  $\rho = 1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ;  $N$  为线圈匝数;  $c, r_c$  分别为线圈外、内半径,  $m$ ;  $k_{tc}$  为线圈填充系数, 取 0.6;  $h, \Delta$  分别为线圈高度和厚度,  $m$ 。

双线圈控制与保护开关模型如图 3 所示。

## 2.2 双线圈控制与保护开关的材料特性

磁性材料按其特性和用途通常可分为软磁、硬磁两类材料<sup>[8]</sup>。软磁材料和硬磁材料的区别在于外部磁场消失后, 材料的磁性是否快速消失。电磁铁有通、断两个工作状态, 通电时电磁吸力能迅速增加并达到规定值, 断电后电磁吸力快速减小至

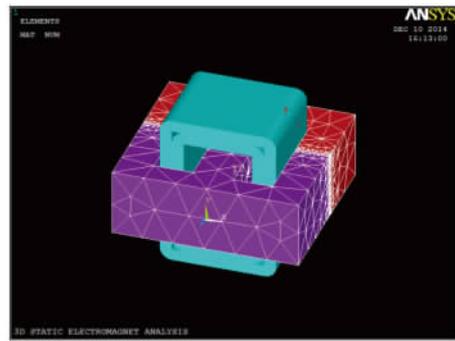


图 3 双线圈控制与保护开关模型

零, 因为软磁材料在外部磁场消失后材料磁性会快速减小, 且剩磁很小, 因此电磁铁选择使用软磁材料。

双线圈控制与保护开关的动静铁心、磁极的磁化曲线数据如表 2 所示。

表 2 动静铁心、磁极的磁化曲线数据

动铁心	$H/(A/m)$	30	44	52	62	68	74	82	92	103
	$B/T$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
静铁心	$H/(A/m)$	120	139	170	230	400	1 000	3 000	6 000	10 000
	$B/T$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8

由 BH 数据得 BH 曲线如图 4 所示。

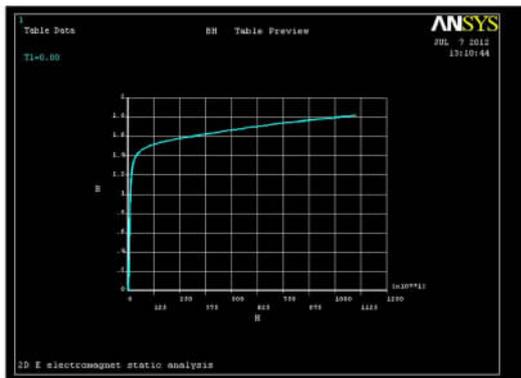


图 4 动静铁心、磁极的 BH 曲线

另外, 设置空气的相对磁导率为 1, 而电流源不需要输入材料性质。

## 2.3 双线圈控制与保护开关的网格剖分

在 ANSYS 软件分析过程中, 模型的剖分直接影响到计算结果的精度。本文仿真设定的网格划分等级为 6, 自由划分类型选择“Free”, 单元划分形状选择四面体“Ted”, 将连续系统转化为离散系统。双线圈控制与保护开关网格剖分图如图 5 所示。

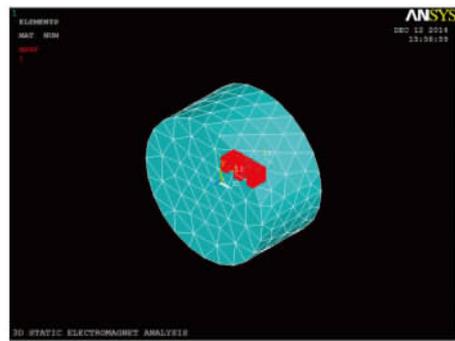


图 5 双线圈控制与保护开关网格剖分图

## 2.4 后处理

后处理 POST1 模块具有强大的图形显示能力, 所需结果存入数据库后, 可以将读取的数据结果通过图形直观地显示出来, 图形显示磁场分布如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 绝大部分磁通集中在动、静铁心中, 周围空气中只分散少量磁通。同时 E 型电磁铁铁芯中极内的磁通要比其他两极要多, 其工作气隙区域内所含磁通较其他两极间工作气隙要多。

## 2.5 仿真结果

ANSYS 计算得到的电磁吸力仿真结果如图 7 所示。

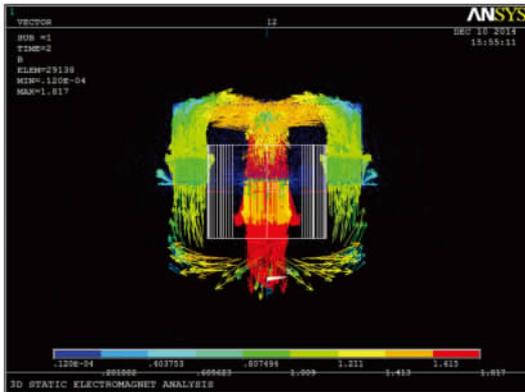


图6 220V电压、5mm气隙电磁机构磁场分布图

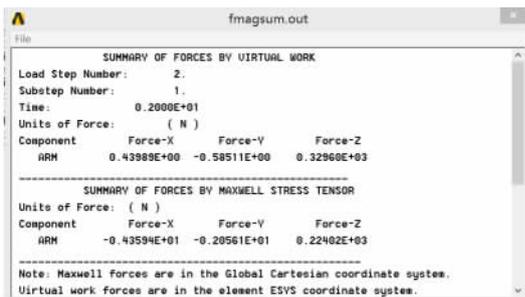


图7 电磁吸力仿真结果

### 3 仿真结果与分析

本文通过机械按钮控制的方式,在气隙值达到1.7mm时接入保持线圈,并对不同线圈匝数的电磁吸力进行仿真,研究两个线圈匝数对电磁吸力的影响。

#### 3.1 吸合线圈500匝,保持线圈500匝

在额定电压220V,吸合线圈与保持线圈各500匝时的电磁吸力与气隙关系如图8所示。气隙最大值为6mm,此时电磁吸力为160.24N,随着气隙间隙的减小,电磁吸力越来越大,在1.7mm时达到1310N,如前面所介绍,本文通过机械按钮的方式进行电路转换,保持线圈在气隙值到达1.7mm时接入电路,此时线路中总电阻值增加,电流减小,电磁吸力降为430.9N,动铁芯依靠动能继续吸合。

#### 3.2 吸合线圈300匝,保持线圈700匝

在额定电压220V,吸合线圈300匝,保持线圈700匝时的电磁吸力与气隙关系如图9所示。由于吸合线圈匝数较小,电路中电流较大,气隙间距6mm时电磁吸力就达到为1172.9N,随着气隙间隙的减小电磁吸力不断增加,在1.7mm时达到

2610N,而此时保持线圈通过机械按钮接入电路,因为保持线圈匝数较多,此时线路中总电阻值增加较大,电流迅速减小,电磁吸力降为405.9N,动铁芯依靠动能继续吸合。

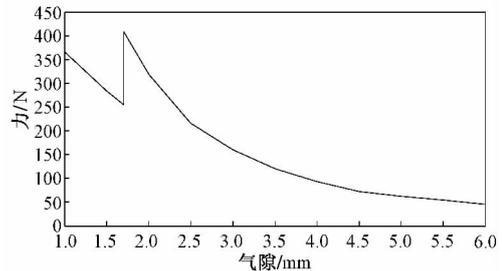


图8 静态吸力特性(吸合线圈500匝,保持线圈500匝)

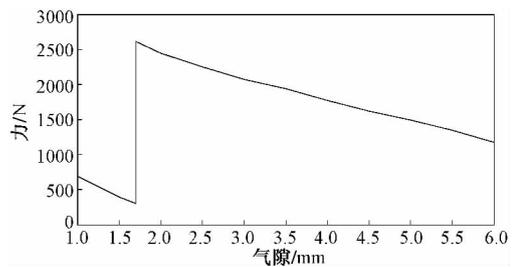


图9 静态吸力特性(吸合线圈300匝,保持线圈700匝)

#### 3.3 吸合线圈700匝,保持线圈300匝

在额定电压220V,吸合线圈700匝,保持线圈300匝时的电磁吸力与气隙关系如图10所示。由于吸合线圈匝数较多,电路中电流较小,气隙间距6mm时电磁吸力仅为45.6N,随着气隙间隙的减小电磁吸力不断增加,在1.7mm时达到409N,此时保持线圈通过机械按钮接入电路,因为保持线圈匝数较少,此时线路中总电阻值增加较小,电流小幅减小,电磁吸力降为254.5N,动铁芯依靠动能继续吸合。

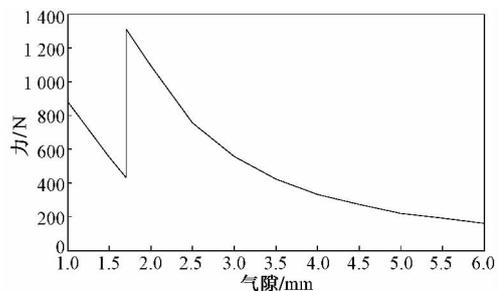


图10 静态吸力特性(吸合线圈700匝,保持线圈300匝)

#### 3.4 结果分析

不同匝数线圈的静态吸力特性如图11所示,由图11仿真结果得到以下结论。

1) 电磁吸力值随着气隙间隙的减小不断增大,在保持线圈接入电路后,线路中的总电阻值增大,电流减小,电磁吸力有所下降,但动铁芯此时具有较大动能,可继续吸合。

2) 保持线圈匝数不变时,吸合线圈的匝数越多,其电阻值越大,动铁芯起动吸合时电流较小,电磁吸力较小,反之,电磁吸力较大。

3) 吸合线圈匝数不变时,保持线圈的匝数越多,保持线圈串入电路的电阻较大,线圈电流大幅减小,此时电磁吸力迅速减小,反之,电磁吸力减小较小。

4) 通过调节吸合线圈匝数,使电磁吸力稍大于弹簧反力,节约能量;也可以调节保持线圈,使电流较小且能保证动铁心有效吸合,降低能量损耗。

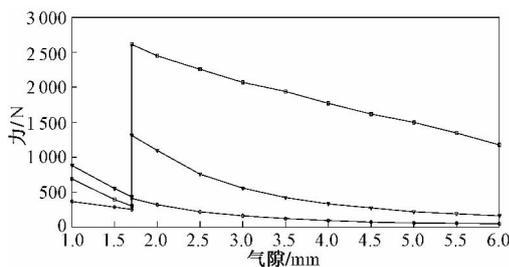


图 11 不同匝数线圈的静态吸力特性

#### 4 结束语

本文利用有限元计算方法对双线圈控制与保

(上接第 83 页)

(3) 按发电机母线允许电压降计算发电机容量

$$S_{st\Delta} = 6.5 \times \frac{1}{3} \times \frac{90}{0.9 \times 0.8} = 270.8 \text{ kVA}$$

$$S_{G3} = \frac{1 - 0.2}{0.2} \times 0.2 \times 270.8 = 216.6 \text{ kVA}$$

根据以上计算结果得  $S_{G1} > S_{G2} > S_{G3}$ , 因此所选柴油发电机容量  $S \geq S_{G1}$  即可, 即选用一台 750kVA 柴油发电机则可满足本工程需求。

#### 3 结束语

算法一和算法二的区别仅在于发生火灾时, 是考虑本工程内所有消防设备都有使用的可能还是按照暖通专业“一次火灾”原则考虑消防设备使用。由于电气专业规范内并没有明确要求火灾时消防

护开关电磁机构静特性进行仿真, 在 ANSYS 软件中建立双线圈控制与保护开关电磁机构模型, 利用寻优功能优化求解电流励磁下的磁场分布和动铁芯所受电磁吸力。分析仿真结果得到电磁机构吸力特性与工作气隙的关系, 并且对不同匝数的吸合线圈和保持线圈进行仿真, 研究各自线圈匝数对电磁吸力的影响, 通过调节线圈匝数降低能量损耗, 为产品的设计优化提供理论支持。

#### 参考文献

- [1] 张鲁江, 姜培刚, 朱慧强, 张慧慧. 基于机械自锁装置的节能接触器设计方法[J]. 绿色科技, 2012, 12: 256-258.
- [2] 翟国富, 邹帆, 阮永刚. 大功率直动式接触器节能控制策略研究[J]. 电器与能效管理技术, 2014, 10: 28-31+36.
- [3] 张新华, 朱建新. 基于线圈电流反馈的新型节能接触器的研制[J]. 电源技术, 2010, 12: 1299-1301+1305.
- [4] 韩雁, 丁晨, 彭成, 范镇淇, 郭行干. 交流接触器节能专用芯片的设计与实现[J]. 中国集成电路, 2011, 05: 31-35.
- [5] 寿鑫朋, 余庆, 张世峰, 陶翔, 韩雁. 交流接触器节能芯片 ZDLX-4H 的设计研究[J]. 电源学报, 2014, 05: 12-18.
- [6] 独田娃, 颜晨艳, 李阳, 何海龙, 吴翔. 交流接触器节能控制模块的研究[J]. 低压电器, 2011, 13: 12-15+37.
- [7] 肖克坚, 徐建军. 永磁式交流接触器的节能效果及在工业生产中的应用[J]. 资源节约与环保, 2006, 05: 27-30.
- [8] 苏昆朋. 软磁和硬磁纳米粉末及纳米复合 NdFeB 永磁材料的制备和性能研究[D]. 华南理工大学, 2011.

设备按“一次火灾”原则考虑消防设备容量, 且火灾时烟雾的蔓延具有不确定性, 消防人员或逃生人员有可能手动启动非着火区域的防排烟设备。并且由计算结果可看出两种情况柴油发电机容量只相差 200kVA, 对工程造价没有太大影响。因此出于对规范的执行及火灾时最大可能保证人员安全的原则, 笔者建议按照算法一来选择柴油发电机容量。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. 民用建筑电气设计规范 (JGJ 16-2008) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 供配电系统设计规范 (GB 50052-2009) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.