

控制与保护开关电磁机构静态特性仿真研究

建立了控制与保护开关电磁机构三维静态非线性磁场模型。考虑到有限元方法仿真分析静磁场是在给定电流条件下进行,而计算中则是给定电磁机构线圈电压,利用ANSYS寻优功能优化求解励磁电流并以此激励磁场。仿真验证了非线性磁系统线圈电流与工作气隙的关系以及线圈冷态下静态吸、反力特性配合,研究了线圈位置对吸力特性的影响,为电磁机构性能改进及实际产品优化设计提供仿真环境下的理论支持。

■ 窦晓斌 黄世泽 郭其一/同济大学电子与信息工程学院
仇仙者/浙江中凯科技股份有限公司

控制与保护开关电器 (Control and Protective Switching Device, CPS) 是一种新型功能集成型低压开关电器,具有短路保护、自动控制、就地操作与指示等功能,其主体主要由电磁传动机构、主电路接触组和操动机构等部件构成。双E型电磁机构作为CPS电磁传动机构的核心部件,其工作特性直接影响到产品乃至整条工作线路的正常运行。电磁机构的动作过程包括了电磁和机械的过渡过程,对电磁机构的动态过程进行研究,既可以保证动作的可靠性,又能改善机械碰撞,提高电气和机械寿命。然而电磁机构的动作过程中存在各种碰撞、弹跳和摩擦等影响机构机电寿命的动作,所以通常以电磁机构的静态特性分析为基础进行电磁机构的特性研究。即不考虑各种过渡状态,当动铁心处于某一位置时,给定线圈电压使电磁系统达到稳态,以此时的线圈稳态电流值为激励,计算动铁心承受的电磁吸力 F 与工作气隙 δ 的关系 $F=f(\delta)$ 。通过判断电磁吸力特性与反力特性配合的适当与否分析整个运动过程,从而决定各种性能指标。

本文以控制与保护开关电器电磁传动机构双E型电磁铁为研究对象,借助ANSYS的参数化设计语言 (APDL) 建立三维静态非线性磁场模型,利用ANSYS寻优功能优化求解励磁电流,计算给定电压(吸合电压、释放电压)时不同电流和工作气隙下电磁吸力,生成线圈冷态下静态吸力曲线,以反力曲线为主要依据,合理调整线圈位置等参数以实现电磁机构优化设计。

1 电磁机构工作原理及静特性计算方法

1.1 电磁机构与主电路接触组联动工作

CPS的电磁机构主要是由动、静铁心,线圈,主反

力弹簧系统和分磁环(由于是对电磁机构进行三维静磁场分析,故本文不考虑分磁环的作用)等构成。当电磁机构线圈通入交流电时,其在动铁心上会产生电磁吸力,并随通电时间增大,当该电磁力足以克服机构的主反力弹簧的反力时,动铁心开始向着静铁心运动,直至吸合后释放对接触组顶杆的压力,使主电路接触组触头闭合。当线圈断电时,铁心上的磁力消失,在反力弹簧的作用下动铁心回到原位,将接触组的顶杆下压,使主触头开断,断开主电路。

1.2 磁场方程

交流电磁铁的电磁吸力包括一个不变的平均吸力和一个交变分量,在电磁铁工作过程中,决定动铁心能否可靠吸合的是平均吸力的大小。因此对交流电磁铁而言,其吸力(或吸力特性)均是指它的平均吸力 F 。

对交流电磁铁的励磁线圈来说,磁链幅值 φ_m 和电磁吸力平均值 F 都由一定的励磁电流 I 和气隙值 δ 唯一确定,都只是 I 和 δ 的二元非线性函数

$$\varphi_m = f_1(I, \delta) \quad (1)$$

$$F = f_2(I, \delta) \quad (2)$$

此函数目前仍不能用数学表达式表示,但可用离散数据来表示,即在给定电流和气隙时由磁场计算求得。其中励磁电流 I 通过ANSYS寻优功能优化循环可得。

1.3 电路方程

现有的静态特性计算方法认为电流、磁通等变量在正弦电压激励下都是正弦变化的,将磁场看作似稳场,忽略铁心的涡流损耗,则线圈电压与电流的关系可表示为

$$U = \sqrt{E^2 + (IR)^2} \quad (3)$$

在励磁电压 U 以某一恒定值给定的情况下, E 为线圈反电势, I 为线圈稳态电流有效值。

实际情况下交流电磁铁瞬时动作, 线圈发热很小, 电阻几乎不变, 励磁线圈电阻值与直流线圈热态电阻计算方法近似, 即

$$R = \frac{\rho l_{pj} N}{q} = \frac{\rho \pi (c+r_c) N^2}{k_{lc} h \Delta} \quad (4)$$

式中, ρ 为导线电阻率, 20℃时取 $\rho = 1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$; l_{pj} 为线圈平均匝长, $l_{pj} = \pi (c+r_c)$; N 为线圈匝数; q 为线圈截面积, $q = k_{lc} h \Delta / N$; c 、 r_c 分别为线圈外、内半径; k_{lc} 为线圈填充系数, 取 $k_{lc} = 0.6$; h 和 Δ 分别为线圈高度和厚度。按照本文所仿真电磁传动机构线圈参数可得 $R = 18.33 \Omega$, 与所取实测值 $R = 17.68 \Omega$ 相近。

用矢量图表示式(3)关系如图1所示。

由图1以及电阻计算可知, 线圈电阻较小, 又因为励磁电流与气隙大小有关, 因此外加电压主要用于平衡线圈中的感应电动势。若忽略励磁线圈电阻和漏磁通, 则

$$U \approx E = \omega \phi_m / \sqrt{2} \quad (5)$$

磁场的能量是在建立磁场的过程中从产生磁场的外电源或其他能源中转化而来的, 储藏在具有磁场的介质中, 本文仿真电磁机构磁场能量主要储藏在空气隙中。考虑到能量是有限元分析中最精确的量, 因此在有限元分析中用能量方法计算励磁电流, 首先给定初始电流 I 和气隙值 δ , 可求得整个磁系统的磁场能量(幅值)

$$W = 1/2 \iiint B_m H dV \quad (6)$$

式中, 磁场强度 H 为有效值, 磁通密度 B_m 为幅值。由于磁能又可以表示为

$$W = 1/2 I_m \phi_m \quad (7)$$

因此

$$E = \frac{\omega \phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\omega W}{\sqrt{2} I_m} = \frac{\omega W}{I} \quad (8)$$

求得反电势 E 之后就可以根据式(3)求得相应的线圈电压 U 。然后将该 U 与给定的线圈电压 U_e 作比较, 若精度不能满足要求, 则校正电流值

$$I_1 = I U_e / U \quad (9)$$

利用ANSYS寻优功能重复上述计算, 直到精度达

到要求。将满足精度要求的电流值作为激励源加载, 就可得到电磁机构磁场分布图及动铁心受力值。

2 电磁机构三维有限元分析

ANSYS静态磁场分析针对动铁心整个运动的时间历程, 将其离散为若干个静态的时间点, 在每个离散点处即给定动、静铁心间气隙和线圈电流的情况下, 得到不同状态下的磁场分布图和电磁吸力值。标量法分析三维静态磁场主要步骤及注意事项如下。

2.1 有限元建模及材性赋值

采用自顶向下的建模方法并使用布尔运算来组合数据集, “雕刻”出动、静铁心实体模型。考虑到需要为动铁心组件添加力标志, 因此需要在动铁心周围添加方柱体空气层。此外, 在整个模型外围添加圆柱体空气层, 为仿真分析提供空气介质。在三维标量位方法分析中, 电流源不是有限元模型的一个组成部分, 因此无需也不能通过实体建模的方式为其建立模型和划分网格, 只能通过直接生成的方式来指明电流源的形状和位置, 从而建立跑道型线圈, 在三维磁标量位方法分析中以基元的方式得到单独处理。建立好的电磁机构模型如图2所示。

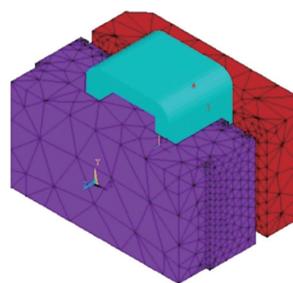


图2 电磁机构有限元模型

设置材料属性并将其赋予给各模型区域, 其中空气设置相对磁导率(MURX)为1, 铁心区赋予能够全面反映电磁机构的励磁作用的 $B-H$ 特性曲线。用伪单元SOURC36生成的电流源不需要输入材料性质。

2.2 边界条件施加及网格剖分

用ANSYS进行三维磁场有限元分析, 模型的剖分对计算结果的精度有至关重要的影响。本文仿真分析设定智能划分网格等级为6, 选择四面体“Ted”单元划分形状及“Free”自由划分类型对实体模型进行自动划分网格, 将连续的电磁场转化为离散系统。

选择动铁心上的所有单元并将所选单元生成一个组件, 给动铁心施加麦克斯韦力标志以在后处理中取出动铁心吸力值, 并将其存储在临近空气与铁区界面的空气单元中。用磁标量位(MAG)来说明磁力线垂直、磁力线平行边界条件, 其中磁力线平行自然满足不用说明, 而磁力线垂直边界条件需要通过在任一节点上施加磁标

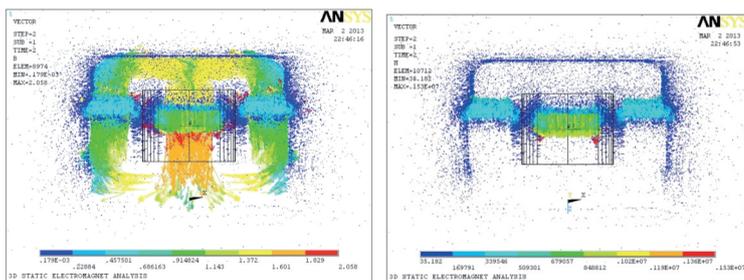
量位MAG=0来完成节点约束，避免了病态矩阵的出现。

2.3 差分标势法 (DSP) 求解

电磁机构同时含有铁心和空气区，不能为电流源所产生的磁通量提供闭合回路，属于“单连通”区域模型。因此需要采用差分标势法 (DSP) 进行三维有限元静态非线性分析。DSP方法需要两步求解：在第一个载荷步中，近似认为铁区中的磁导率无限大，只对空气求解；在第二个载荷步中，恢复原有的材料特性，从而得到最终解。根据DSP方法的第一个载荷步求解方式以及电磁机构铁心磁导率远大于空气这一非铁磁性物质的相对磁导率的特点，导致求解结束后出现诸如“Coefficient ratio exceeds 1.0e8—Check results.”的警告信息，可以忽略其影响。

2.4 后处理

在通用后处理模块POST1中，提取结果并赋值给状态变量和目标函数。同时在本步操作中可以利用宏FMAGSUM求得动铁心承受电磁吸力，利用宏LMATRIX求得线圈磁链及电感值，利用宏SENERGY求得磁场能量。也可以利用图形显示观察磁场分布如图3所示。



(a) 磁通密度B (b) 磁场强度H

图3 320 V电压、4 mm气隙磁场分布图

从图3可看出，动、静铁心及两者间气隙分布了大部分磁通量，电磁机构周围空气隙只零星分散少许。铁心中极较其他两极所含磁通密度要大，线圈围绕工作气隙区域较其他两极间工作气隙所含磁通量要大。

2.5 优化求解激励磁电流

交流电磁铁的静态吸力特性是在给定外施电压下电磁吸力与工作气隙的关系，而在利用有限元分析软件进

行分析时，只能在给定线圈电流和工作气隙时计算电磁吸力，因而不能直接计算交流电磁铁的静态吸力特性，必须耦合求解三维磁场方程 (1) 和电路方程 (3) 才能完成计算任务。本文利用ANSYS寻优功能优化求解激励磁电流，假设初始电流，采用逐次近似的迭代方法求解电路和磁场方程，认为线圈的电流、磁通都是随着线圈电压作正弦变化。在分析吸力特性时将电流用有效值进行了直流等效。以初始电流值作为设计变量，以前后两次计算的电流差值作为状态变量，以计算电压和给定电压差值作为目标函数。

3 仿真结果与分析

3.1 励磁电流与工作气隙的关系

交流铁心铁磁材料的非线性，决定了动铁心吸合过程中线圈电流随气隙及磁链变化而变化， $i(\varphi, \delta)$ 为磁链和气隙的二元非线性函数。选定某一时刻正弦电压有效值 U_E 给定励磁线圈，以该电压下电流初值 I 作为激励进行仿真优化求取励磁电流值，改变动、静铁心间气隙值，得到固定外施电压、不同工作气隙下稳态电流值。如选取 $U_E = 320 \text{ V}$ ， $I = U_E/R = 18.099 \text{ 55 A}$ ，所得电流及线圈磁链情况如表1所示。

通过具体仿真过程及表1呈现结果可知：

(1) 交流线圈励磁电流随着工作气隙减小而减小。这是因为交流铁心线圈在外加电压有效值一定时，会迫使主磁通的最大值不变，励磁电流与磁路的结构、材料和气隙大小有关，在吸合过程中，磁阻随着气隙的减小而减小，要保证磁通最大值基本不变，故磁动势下降，即励磁电流下降。

(2) 仿真过程中随着气隙的变化需不断调整设计变量的范围，合理的设计空间既可以获得更精确的电流最优值，又可以提高寻优效率。

(3) 优化过程是一系列的前处理—求解—后处理—优化循环，需耗费大量机时。工作气隙比较小时，磁系统接近饱和，激励电流寻优求解变化复杂，往往需要多次优化求解才可确定适合的电流值，令原本已较大的工作量更加烦琐，且求出电流发生畸变，存在误差。

表1 激励电流随气隙及磁链变化表

δ / mm	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϕ / Wb	1.312 7	1.525 0	1.780 3	1.937 8	1.901 4	1.930 7	1.845 7	1.626 1	1.617 4
I / A	3.811 1	5.055 4	6.033 2	7.131 7	7.756 4	8.280 3	8.639 5	8.825 8	9.157 8

3.2 静态吸、反力特性的配合

要使吸力特性和反力特性良好配合,必须以已知反力特性为主要依据合理确定电磁机构的参数。本文分析为不带配套辅助模块的大容量KB0系列CPS,其电磁传动机构的反力主要由2个主反力拉簧和3个接触组触头压簧构成,另一小部分反力是动铁心的销与线圈骨架的限位槽之间的摩擦力。考虑到CPS电磁机构主反力拉簧和接触组触头压簧弹力方向并不与电磁吸力方向在同一直线上,主反力拉簧在拉伸过程中也会以底座支点为原点有细微角度变化,且接触组触头压簧给予动铁心的力须由其直接给予动铁心支架的向上力传递而来,因此电磁机构反力特性为上述几个弹簧反力的综合效应与工作气隙间的关系。

按国家标准要求电磁机构在85%额定控制电源电压与线圈热态下能可靠吸合,但一般为了保证可靠性,设计成线圈冷态时电磁铁吸合电压在68%左右,这样当正常工作时,线圈电压为额定电压,吸力特性就比反力特性高很多。分别就190 V、258 V、285 V和320 V给定电压下不同气隙处优化求取的电流为激励计算电磁吸力,可得线圈冷态下电磁机构静态吸、反力特性配合曲线如图4所示。

通过仿真计算过程及分析图4可知:

(1) 给定恒定电压值条件下,动铁心承受的电磁吸力随着工作气隙的减小即动铁心靠近静铁心而增大,吸合瞬间过大的吸力势必会造成对静铁心的冲击,影响机械寿命。

(2) 保持动、静铁心间气隙大小不变,电磁吸力会随着线圈外施电压的增大而增大。以反力特性为依据,在满足工作可靠性前提下适当降低吸合电压值可以减少动、静铁心间碰撞,降低机械损耗,提高铁心机械寿命。

(3) 吸合电压为300 V时吸力特性在铁心吸合全过程位于反力特性上端,释放电压为190 V时吸力特性在反力特性下端,能够保证动铁心快速而彻底地吸合与释放,不会造成铁心因吸合、释放不彻底而导致的线圈烧毁等后果,与实际现场验证相符。

3.3 线圈位置对吸力特性的影响

线圈作为电磁机构的重要部件,其产生的磁动势使电磁铁动作。线圈的匝数、线径及高度等因素会影响电磁机构的吸合特性及温升等性能。同时,线圈位置也会对电磁机构的吸合特性造成影响。现调整线圈位置使其

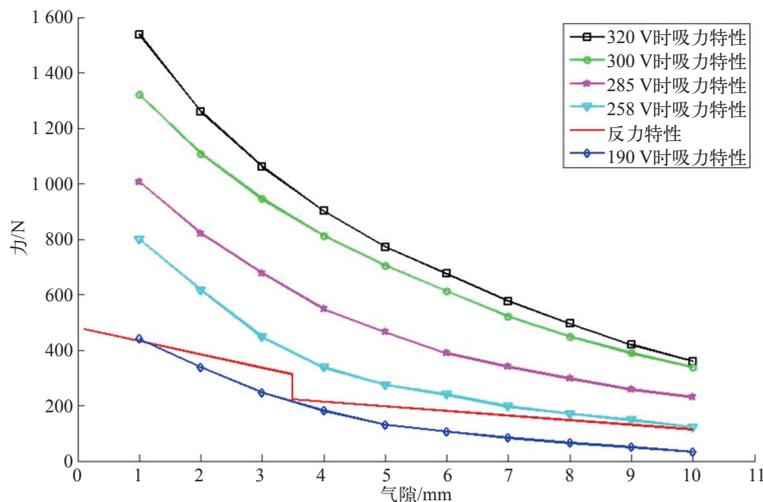


图4 静态吸、反力特性配合

与动铁心位置较原来远2 mm,可得线圈位置调整前、后320 V给定电压下工作气隙为4 mm处吸力特性曲线及电磁吸力矢量图分别如图5、图6所示。

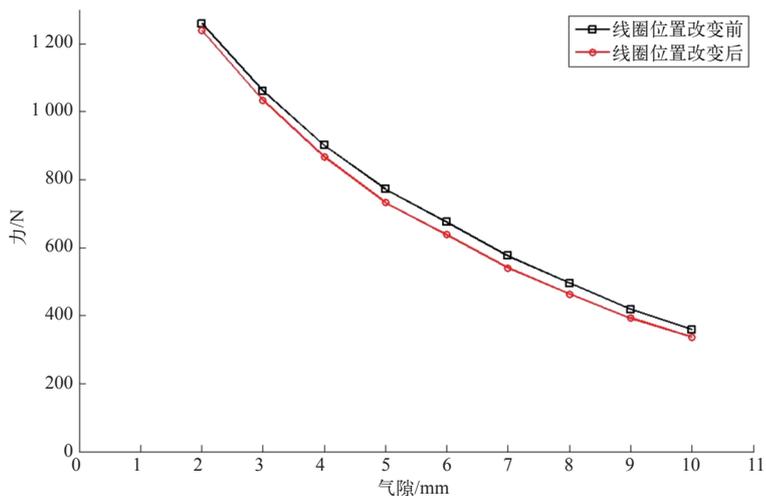
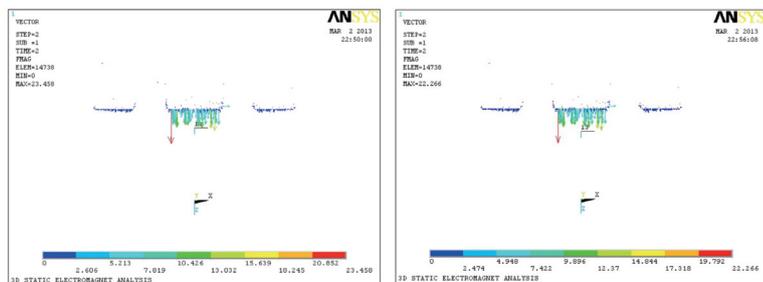


图5 线圈位置调整后吸力特性曲线图



(a) 线圈位置调整前

(b) 线圈位置调整后

图6 320 V电压、4 mm气隙处电磁吸力矢量图

(下转第50页)

3.3 限位保护功能

限位分为软件限位和硬件限位。软件限位是系统在自动模式下运行时，软件限位有效，当电池组旋转至软件限位处，电池组停止旋转。例外：在正常工作模式中，系统上电重启后，软件限位无效，目的是为了进行位置校正。系统在手动模式下运行时，软件限位无效。硬件限位是硬件限位任何情况下都有效，每当电池组触发限位开关时，故障位即被置1，只有上电初始化或复位后才能清除标志位。例外：如果系统在非调试模式且在自动状态下运行时，上电初始化后需要进行位置校正，在这过程中触发了限位开关，故障位并不置1。

3.4 掉电位置记忆功能

功能设置分为两个阶段。第一阶段，调试模式，记忆限位开关处位置，第二阶段，正常工作模式，位置校正。在调试模式下，首先校正零点，然后分别旋转支架至两侧限位开关处，系统自动把电池组当前位置送给限位开关对应的位置变量。在正常模式下，每当电池组停止旋转时，记录一次电池组当前位置到EPROM中，断电重启后，系统从EPROM中读取数据，初始化电池组当前位置。因为这个值可能不准确（上次掉电时电池组正在旋转），系统需要旋转至限位开关处进行位置校正——系统旋转至限位开关处，系统自动校正。系统校

正完成后，即进入软件限位范围内。

3.5 零点校正功能

系统规定，太阳方位角为 0° （正南方向）时，电池组对准太阳时，电池组位置为 0° 位置。此时电池组被放平。

在调试模式下，放平电池组，通过上位机发送零点校正命令，电池组位置即被强制修改为0，即对光伏电池组进行水平位置校正。

3.6 独立时钟功能

系统安装有独立的时钟系统，对独立时钟的供电也是独立的，保证时钟的精确。

3.7 系统外围部件

为了系统的安全运行和提高跟踪精度，在光伏电池组东西两端和水平位置各设置一个硬件限位开关，另外单独设置一个风速传感器。

4 结束语

本系统是集机电、光学，计算机和控制理论为一体的，体现了电子信息专业多学科相结合，相互渗透的特点。跟踪系统成功应用对创建能源节约型，环境友好型社会具有较大的意义，也有较好的市场发展前景。**EM**

（收稿日期：2013-03-18）

（上接第47页）

由理论分析及图5呈现结果可知，调整线圈位置使其离动铁心较远，则动铁心受到的电磁吸力将变小。

(1) 通过理论分析，得知E型电磁铁的结构是介于Π型电磁铁和螺管式电磁铁之间，因此它的吸力亦由两部分组成，一是磁极表面所产生的表面力（和Π型电磁铁一样），另一是E型电磁铁伸入到线圈中央的一部铁心也产生螺管力（和螺管式电磁铁相像）。线圈位置调整后，动铁心伸入到线圈中的部分较原来减少，故动铁心承受螺管力降低，从而影响到整个电磁吸力的降低，结合图6可得验证。

(2) 结合图3可知，静铁心中极即线圈包围部分磁通密度较动铁心中极大，调整线圈位置后，动铁心所处区域磁通密度降低，势必会降低动铁心所受电磁吸力。

(3) 在保证动铁心有足够运动空间的前提下，结合工厂实际所需吸合电压要求，可适当调整线圈位置以

提高电磁机构性能。

4 结束语

本文利用有限元计算方法仿真分析KB0系列CPS电磁机构静特性，在ANSYS交互式图形界面建立CPS产品电磁机构虚拟样机模型，利用寻优功能优化求解交流线圈励磁电流，从而求得电流激励下的磁场分布和动铁心所受电磁吸力。分析仿真结果得到励磁电流与动、静铁心间气隙的关系以及电磁机构吸力特性与反力特性的配合情况，与实际验证相符；调整参数以获取线圈位置对电磁机构吸合特性的影响，与理论及磁场分析相符。通过三维静态非线性磁场标量法一系列前处理、求解、后处理及优化循环过程，可对实际产品遇到的问题仿真分析并提出优化措施，对物理样机设计与改进提供仿真环境下的指导与验证。**EM**

（收稿日期：2013-03-19）