基于Ansys－Maxwell的高压开关操动电磁铁优化和仿真

薛宏图[1,2]，胡 标[2]，范承勇[2]，杨 和[2]

（1. 同济大学机械与能源工程学院，上海 201804；2. 库柏（宁波）电气有限公司，浙江 宁波 315300）

摘要：高压开关操动电磁铁是连接设备控制系统和机械系统的关键元件，对其进行设计优化十分必要。根据用户实际需求，以现有产品为例，分析电磁铁线圈布线结构，在既定线圈功率和线圈尺寸的前提下，给出线圈安匝数的最优化设计方法；并应用有限元仿真软件Ansys－Maxwell，分别对电磁铁的不同衔铁半径和衔铁端面结构方案进行参数化仿真计算，比对仿真结果得到优化方案。经实验验证新设计方案性能优于原设计方案，实现了线圈功率由370 W降低至220 W，且在整段脱扣工作行程中输出力与负载力更具匹配性。

关键词：电磁铁；Ansys－Maxwell；参数化；高压开关

Optimization and simulation of operating electromagnets in high-voltage switches based on Ansys－Maxwell

XUE Hongtu[1,2], HU Biao[2], FAN Chengyong[2], YANG He[2]

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Cooper (Ningbo) Electric Co., Ltd., Ningbo 315300, China)

Abstract: Operating electromagnets in high-voltage switches are the key components connecting control systems and mechanical systems. It is necessary to optimize the design of electromagnet. Through the example of an actual product, the winding method of electromagnet coil is analysed, is proposed a way to optimize the ampere-turns of coil this paper also focus on when the power and shape size are given. And simulating parametrization designs of different armature radiuses and end face structures are carried out with finite element analysis software Ansys－Maxwell. The optimized design can be obtained by comparing the simulation results. Experiment shows that the new design is superior to the original design on power and output force. The rated power is reduced from 370 W to 220 W, and the output force and load force are more matched.

Key words: electromagnet; Ansys－Maxwell; parametrization; high-voltage switch

0 引言

高压开关作为电力系统的重要通断元件而得到广泛应用，其操动电磁铁一般为短时工作制螺线管式直流电磁铁，用以连接高压开关的控制系统和机械系统，并实现电动合分闸操作[1]。随着高压开关应用领域和运行工况的拓

展，一些电力用户对操动电磁铁也提出了更高的性能要求。其中，南方电网公司为了降低控制电源系统的功率配置，并提高电磁铁的操作寿命，其招标文件明确规定电磁铁线圈额定功率不超过220 W。

高压开关常用操动电磁铁线圈额定功率范围一般为350~500 W。基于电磁铁静态电磁力设计，最大化静态电磁力，并在此前提下，提高电磁力和脱扣负载力的匹配度，从而保证电磁铁在降低额定功率至220 W的条件下仍能使高压开关顺利脱扣，是本文需要解决的主要问题。

电磁铁静态电磁力的工程计算方法主要分为三种，即经验公式法、磁路分割法和有限元法[2-3]。由于计算过程涉及材料、结构和位置等，依靠经验公式法和磁路分割法得到的静态电磁力值往往具有较大的误差。本文在原电磁铁设计参数的基础上，以电磁场有限元分析软件Ansys－Maxwell的参数化建模仿真为优化手段，对电磁铁部件进行设计调整，并给出优化方案[4]。

1　电磁铁的结构和工作原理

1.1　电磁铁结构

高压开关用圆形螺线管式电磁铁结构示意图如图1所示。其主要由推杆、静铁心、励磁线圈、衔铁和衔铁复位簧五个部件组成。电磁铁利用得电的励磁线圈产生电磁吸力作用于衔铁，以推杆输出外向力而操纵机械装置完成预期动作。

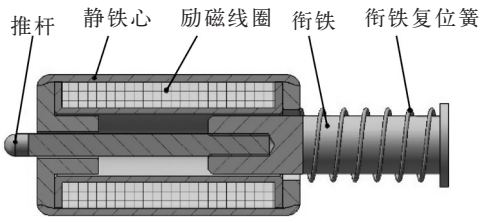


图1　螺线管式电磁铁结构

Fig. 1 Structure diagram of solenoid electromagnet

1.2　电磁铁的工作原理

VS1－12型真空断路器合闸状态下的分闸脱扣系统如图2所示。当分闸操动电磁铁的励磁线圈得电时，其衔铁向上运动，使电磁铁推杆顶着脱扣弯板并带动半轴转动，当扣接量c=0 mm时，扣板和半轴脱开，断路器灭弧室的动触头在分闸弹簧和超程碟簧的作用下往分闸位置运动，实现断路器的分闸操作。在分闸过程中机构带动辅助开关切断分闸回路，使分闸操动电磁铁失电复位。

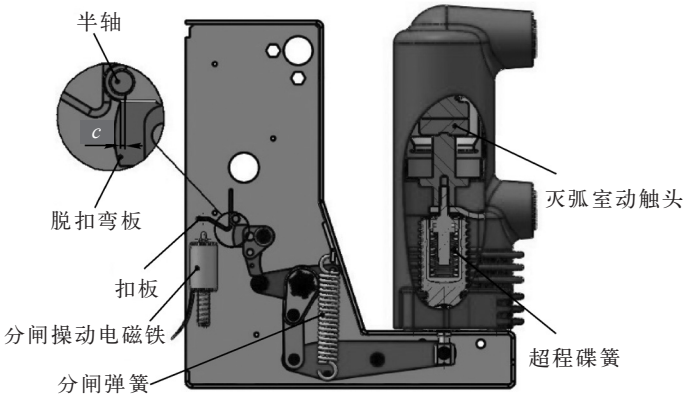


图2　断路器分闸脱扣系统示意图

Fig. 2 Diagram of circuit breaker tripping system

1.3　原电磁铁的出力分析

原电磁铁的电磁输出力和负载力趋势如图3所示。其衔铁总行程为25 mm，可分为前段空行程、脱扣工作行程以及末段空行程三部分，行程的正方向为静铁心与衔铁之间空气间隙减少的方向。整个运动过程如下：

1）从A点到B点，在电磁力作用下，衔铁克服复位簧向前加速运动。

2）C点时（行程为14 mm），衔铁负载力主要为半轴和扣板之间的最大静摩擦力。

3）从C点到D点（行程为24 mm），衔铁克服滑动摩擦力和扣板复位力的合力，并带动半轴转动。

4）半轴和扣板在D点脱开，而衔铁继续前进直至走完行程。为保证脱扣操作可靠性，电磁铁末段空行程EF约为1 mm。

结合图3可得出，原电磁铁的负载力在整段

脱扣工作行程中较为稳定，而输出力随着行程的增大而增大，且在行程的后半段，输出力的增加尤为快速。因此，原电磁铁输出力与负载力匹配度不高，存在优化可能性，以降低线圈功率。

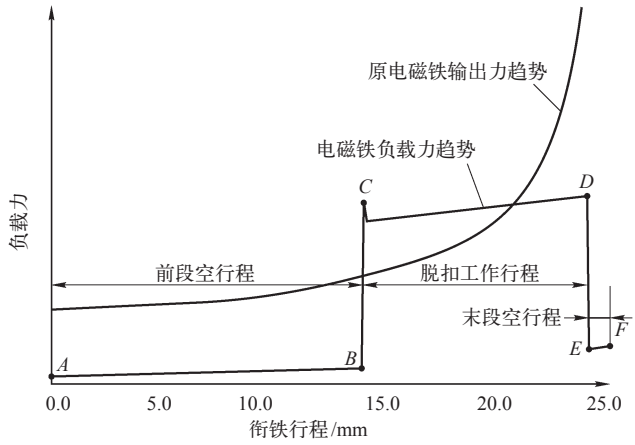


图3　电磁铁输出力和负载力趋势

Fig. 3 Output force & load force trends

2　电磁铁的静态力有限元仿真优化

2.1　仿真的前提设定

电磁铁的静态力仿真的前提设定有如下三点：

1）考虑优化后的电磁铁与断路器框架的安装匹配，保留其静铁心外形尺寸不变（外径32 mm，壁厚1.6 mm，高度60 mm）。

2）高压开关分闸操动电磁铁为电压型电磁铁，在外施低操作电压（65%U_r）时，应满足电磁铁仍可顺利完成脱扣[5]。仿真励磁应设置为电磁铁最低工作电压下的等效安匝数。

3）优化目标为将原电磁铁（370 W）的额定功率降低至不超过220 W。

2.2　参数化建模

在Ansys－Maxwell中建立操动电磁铁关于坐标轴Z的轴对称2D模型，如图4所示。

1）设置衔铁和静铁心材料为DT4E型电工纯铁，设置线圈材料为铜。

2）对衔铁直径和衔铁与静铁心的接触端面作参数化设计，设定衔铁半径为r，衔铁端面凸台高度为a，端面限位沿面宽度为b。

3）设定静铁心与衔铁端面之间的空气间隙为变量gap。

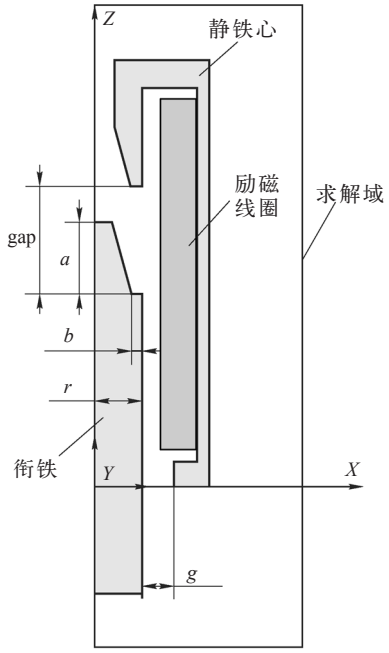


图4　电磁铁2D仿真模型

Fig. 4 2D simulation model of electromagnet

各变量的取值依据如下：

1）若衔铁端部过于尖锐，当接触面产生少许污秽时，衔铁不易复位，则a值和b值不能过大，确定$a \leqslant 8.0$ mm，$b \leqslant 2.0$ mm。

2）静铁心和衔铁中的剩磁会导致电磁铁断电后延迟复位。在静铁心下端增设空气间隙g是解决该问题的常见措施。为使g足够大，衔铁半径r值不能过大，确定$r \leqslant 7.0$mm。

3）由电磁铁脱扣工作行程确定gap取值范围为1～11 mm。

参数化仿真计算时，各变量取值如表1所示。

表1　变量取值

Tab. 1 Values of variables

No.	变量	取值范围 /mm
1	a	0,1,2,3,4,5,6,7,8
2	b	0,1,2
3	r	5.0, 5.2,5.4,5.6,5.8,6.0 6.2, 6.4,6.6,6.8,7.0
4	gap	1,2,3,4,5,6,7,8, 9,10,11

2.3 励磁的参数化设置

电磁铁的励磁为施加在线圈上的安匝数NI，其数值等于线圈匝数N和线圈电流I的乘积。其中，N取决于线圈的内径D_1、外径D_2、高度H、漆包线线径d和线圈满槽率k[6]。线圈布线示意如图5所示。

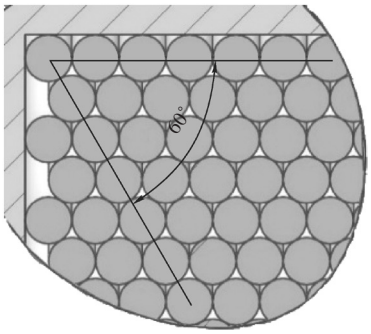


图5　漆包线布线示意图

Fig. 5 Winding method of coil

则线圈匝数为

$$N=k\frac{H}{\sqrt{3}d}\cdot\frac{D_2-D_1}{d}=\frac{kH(D_2-D_1)}{\sqrt{3}d^2} \quad (1)$$

由电阻定义公式推导出线圈电阻为

$$R=\frac{\rho N\frac{\pi(D_2+D_1)}{2}}{\pi(\frac{d}{2})^2}=\frac{2k\rho H(D_2^2-D_1^2)}{\sqrt{3}d^4} \quad (2)$$

施加在线圈两端的电压为U，则电流为

$$I=\frac{U}{R}=\frac{\sqrt{3}Ud^4}{2k\rho H(D_2^2-D_1^2)} \quad (3)$$

则，线圈安匝数为

$$NI=\frac{Ud^2}{2\rho(D_1+D_2)} \quad (4)$$

表1中每个规格的衔铁半径r都对应一个最优的安匝数NI的设计，即目标函数为

$$F=\max(NI) \quad (5)$$

其约束条件确定如下：

1）D_1由衔铁半径r、线圈支架内壁厚度以及衔铁与线圈支架内壁的运动间隙确定，即

$$D_1=2(r+1.9)\text{mm} \quad (6)$$

2）由电磁铁结构尺寸可分别确定为

$$D_1<D_2\leqslant 28.2\ \text{mm} \quad (7)$$

$$0<H\leqslant 45\ \text{mm} \quad (8)$$

3）电磁铁励磁线圈额定电压为直流U_r=220 V，在最低工作电压下

$$D=65\%U_r=143\ \text{V} \quad (9)$$

4）电磁铁额定功率不大于220 W，在最低工作电压143 V时，线圈电流不大于0.65 A，即

$$0<I\leqslant 0.65\ \text{A} \quad (10)$$

5）漆包线线径范围为

$$d\geqslant 0.1\ \text{mm} \quad (11)$$

6）由实测得出，线圈的平均满槽率为

$$k=0.78 \quad (12)$$

7）忽略镀层厚度，漆包线电阻率为

$$\rho=1.75\times 10^{-5}\ \Omega/\text{mm} \quad (13)$$

根据上述目标函数（5）及约束条件式（6）～式（13），基于模拟退火算法编写程序，循环取r值计算得到各r值对应的安匝数最优解及线圈设计参数值如表2所示。

表2　由r确定的安匝数励磁

Tab. 2 Ampere-turns confirmed by r values

No.	r /mm	D_1 /mm	D_2 /mm	d /mm	H /mm	$NI(65\%U_r)$/A
1	5.0	13.8	26.2	0.20	45	4 085
2	5.2	14.2	26.4	0.20	45	4 023
3	5.4	14.6	26.6	0.20	45	3 964
4	5.6	15.0	26.9	0.20	45	3 904
5	5.8	15.4	27.1	0.20	45	3 847
6	6.0	15.8	27.3	0.20	45	3 790
7	6.2	16.2	27.5	0.20	45	3 735
8	6.4	16.6	27.8	0.20	45	3 682
9	6.6	17.0	28.0	0.20	45	3 629
10	6.8	17.4	26.6	0.19	45	3 352
11	7.0	17.8	26.9	0.19	45	3 303

2.4 参数化设计衔铁半径r

对衔铁半径r做参数化仿真，具体如下：

1）暂不考虑衔铁端面影响，即a=b=0。

2）r和gap的取值见表1。

3）在Maxwell软件中，以表2的“r”列和“NI”列数据建立数据集，运用分段函数从该数据集中选取各r值对应的最优NI作为励磁。

仿真得到各gap值下衔铁所受的电磁力F_z随r的变化趋势，如图6所示。

1）当gap=1～3 mm时，r=7.0 mm对应的

F_z值都为最大值。

2）当gap=4~11 mm时，r=6.6 mm对应的F_z值都为最大值。

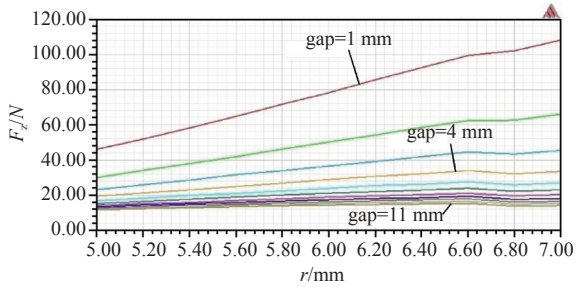


图6 F_z-r关系图（gap=1～11 mm）

Fig. 6 F_z-r Diagram (gap=1～11 mm)

由图3可知，增加gap=4～11 mm（即行程区间为14～21 mm）的电磁力更有利于提高电磁输出力和负载力的匹配度，因此选取r=6.6 mm。

2.5 参数化设计衔铁端面

衔铁端面设计对电磁力特性具有明显影响[7]。端面的参数变量为图4所示的a值和b值，对这两个变量作参数化仿真的前提如下：

1）已确定r=6.6 mm。

2）查表2得到对应的励磁NI=3 629 A。

3）a、b和gap的取值见表1。

仿真得到，F_z在不同a值和b值下，随间隙gap的变化趋势如图7～图9所示。由图7～图9可知，取a=8 mm时，gap=11 mm处（即脱扣工作行程起始点）的F_z在所有b值下都为最大，且在脱扣工作行程中最为稳定。

仿真同时可得到，当a=8 mm时，F_z在各b值下随间隙gap的变化趋势如图10所示。

1）在gap=7～11 mm区间，b=1 mm方案的F_z比b=0 mm方案大，且与b=2 mm方案十分接近。

2）在gap=1～3 mm区间，b=1 mm方案的F_z优于b=2 mm方案。

综上所述，选取a=8 mm，b=1 mm。

3 性能比对

电磁铁原设计和新设计的主要参数如表3所示。

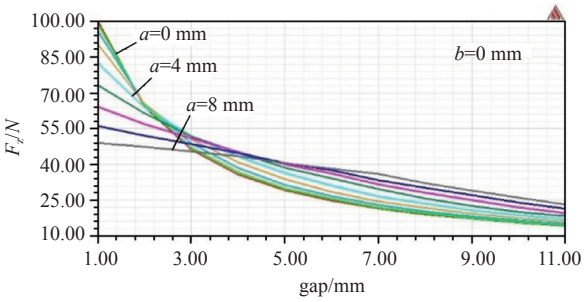


图7 F_z-gap关系图（b=0.0 mm）

Fig. 7 F_z-gap Diagram (b=0.0 mm)

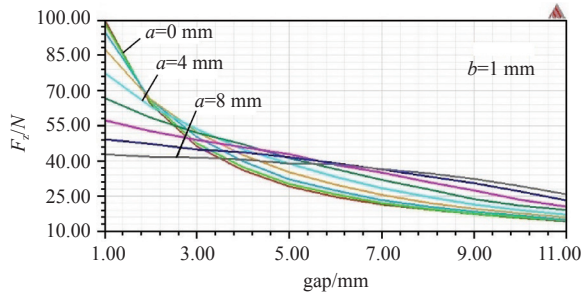


图8 F_z-gap关系图（b=1.0 mm）

Fig. 8 F_z-gap Diagram (b=1.0 mm)

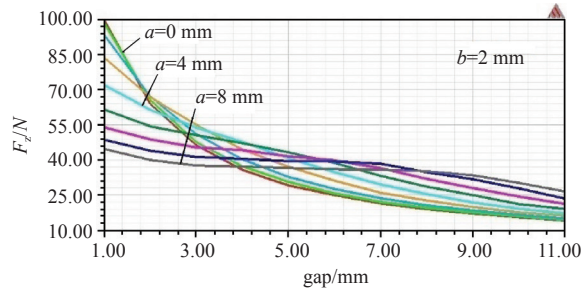


图9 F_z-gap关系图（b=2.0 mm）

Fig. 9 F_z-gap Diagram (b=2.0 mm)

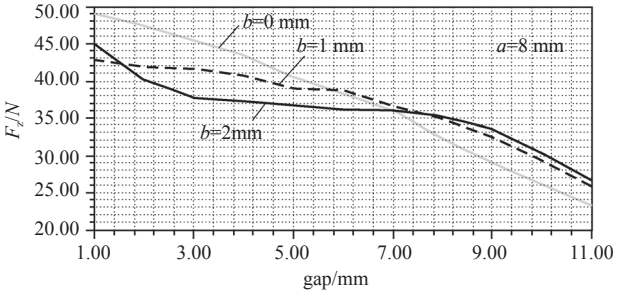


图10 F_z-gap关系图（a=8 mm）

Fig. 10 F_z-gap Diagram (a=8 mm)

3.1 仿真比对

在脱扣工作行程段，即间隙gap=1～11 mm区间分别对两种方案作静态力仿真。如图11所示，在相同励磁电压（143 V）下，新设

表3　电磁铁设计参数

Tab. 3 Design parameters of electromagnets

No.	参数	原设计	新设计
1	静铁心外径	32	32
2	静铁心壁厚	1.6	1.6
3	衔铁半径 *r*/mm	5.8	6.6
4	衔铁端面 *a*/mm	0	8
5	衔铁端面 *b*/mm	0	1
6	线径 *d*/mm	0.23	0.20
7	匝数 *N*/mm	4 600	5 600
8	电阻 *R*/Ω	131	220
9	额定功率 *P*/W	370	220
10	低电压安匝数 *NI*/A	5 021	3 629

计的电磁铁衔铁所受电磁力更稳定，且在脱扣工作行程前段力值更大，其静态力性能优于原设计。

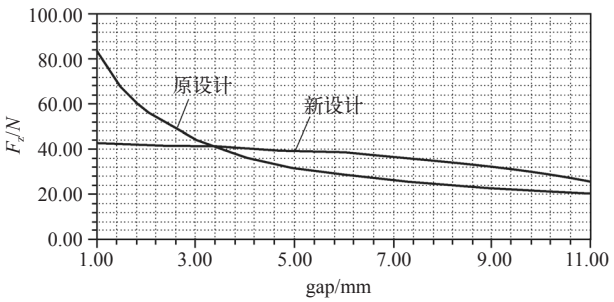


图11　静态力仿真比对

Fig . 11 Comparison of static force (simulation)

3.2　实验比对

如图12所示，将原设计和新设计的电磁铁分别装于静态力测试工装固定板上，并用恒流源对电磁铁线圈施加低操作电压对应各线圈的电流值。同时，测力传感器顶着电磁铁推杆由间隙gap为0 mm处往15 mm处运动，运动速度设置为200 mm/min，记录仪记录传感器所受力值和位移架的位移值。

两个电磁铁的实测静态力曲线如图13所示。由于运动过程中电磁铁推杆和衔铁间的摩擦力、涡流引起电磁材料发热等因素存在，实验结果与仿真结果有所差异，但在同等实验条件下，新设计方案的静态力输出性能优于原设计方案。

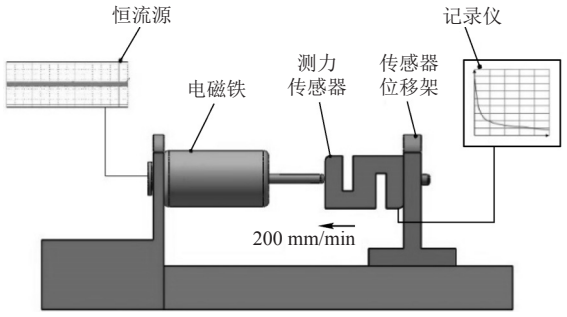


图12　电磁铁静态力测试工装示意图

Fig . 12 Diagram of measuring static force

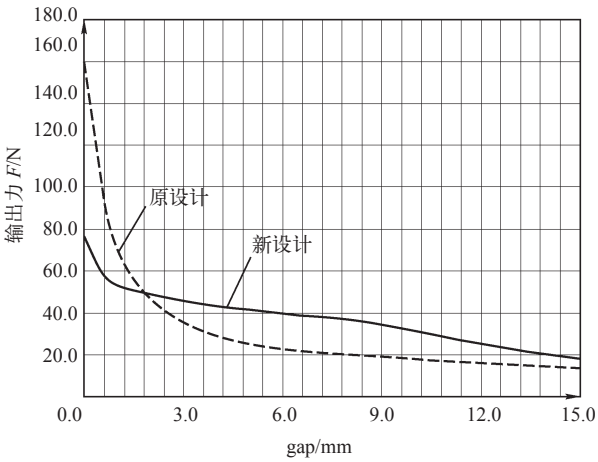


图13　静态力实验比对

Fig . 13 Comparison of static force (experiment)

4　结束语

本文从线圈安匝数、衔铁半径和衔铁端面三个方面进行分析，对已确定外形尺寸的高压开关操动电磁铁进行优化设计，得到的新设计方案具有更低的功耗，且与脱扣负载力匹配度更佳，满足用户的新需求。该方法同样适用于高压开关领域的其他电磁铁的设计和优化，有利于提高电磁铁的运行寿命和操作频率，同时降低开关设备控制电源系统的功率配置，从而节省电力建设成本，具有重要的实践意义。

参考文献

[1]　徐国政，张节容，钱家骊，等．高压断路器原理和应用[M]．北京：清华大学出版社，2000．

[2]　娄路亮，王海洲．电磁阀设计中电磁力的工程计算方法[J]．导弹与航天运载技术，2007(1)：

40-45.

[3] 王宗伟，任志彬，常志鹏，等．基于ANSYS和AMESim的螺管电磁铁吸力仿真研究[J]．导弹与航天运载技术，2017(6)：93-97.

[4] 赵博，张洪亮，等．Ansoft在工程电磁场中的应用[M]．北京：中国水利水电出版社，2010.

[5] 高压交流断路器：GB 1984—2014[S]．北京：中国标准出版社，2014.

[6] 唐康，许益民．高频响阀用比例电磁铁仿真优化及制作[J]．计算机仿真，2019(4)：157-162.

[7] 孙虎胆，刘鸿凌．基于Ansoft的电磁铁建模仿真及结构优化设计[J]．液压气动与密封，2018(8)：32-34.

作者简介

薛宏图

薛宏图（1985－），男，工程师，主要研究方向为7.2～40.5 kV电压等级高压开关设备和控制设备的设计和试验。

(收稿日期：2019－10－29)EA

广告 | AD

全新改版

色彩丰富　凸显主题

2020《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容，力求赏心悦目。

栏目设置　独具风格

坚持继承与开拓并举，以丰富内涵充实经典栏目，持续深化专家访谈、EA经理人等栏目，密切关注电气技术的发展和应用。

专家点评　精辟深刻

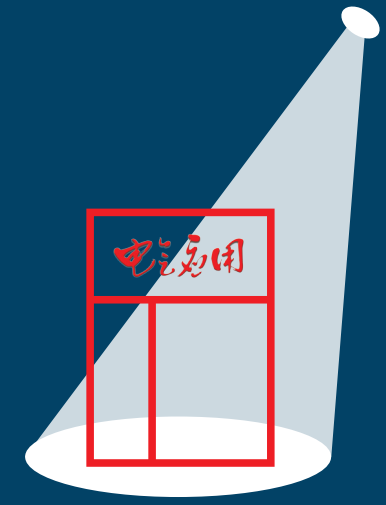
每期都将围绕一个热点话题，隆重推出一场专题讨论的盛宴，共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂，针对焦点问题作出评析。

行业案例　生动丰富

关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用，以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间，促进应用经验交流。

国内邮发代号：82-341　国外发行代号：M1409

每期定价：25.00元　全年定价：300.00元



·电气应用 盛情呈现·

2020