

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.012

直流断路器快速电磁机构分合特性研究

王海燕¹, 袁端磊¹, 费翔¹, 朱志豪¹, 吴翊², 杨飞²

(1. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要:文中基于某轨道交通直流断路器的总体结构模型,设计了一种快速电磁操动机构,对其结构和工作原理进行了阐述。基于电磁场分析理论,利用有限元分析软件ANSYS对电磁机构的静态特性进行了仿真分析,得出了在合闸状态下磁场分布和动铁心所受电磁吸力情况,并对其影响因素进行了分析。然后对电磁操动机构在不同电流条件下的电磁吸力随气隙变化进行了仿真分析,得出了机构空载条件下的动态输出插值数据。最后建立直流断路器动力学分析模型,借助动力学分析软件ADAMS,将建立的动态离散数据导入其中,对直流断路器动态分合特性进行了仿真,得出了机构分合机械特性曲线,结合试验样机测试结果进行对比分析,验证了整个直流断路器电磁与机械特性耦合分析计算方法的正确性。

关键词:快速电磁操动机构;电磁场仿真;动力学分析;分合特性;直流断路器

Design of Rapid Electromagnetic Mechanism of Direct-current Circuit Breaker and Research of the Dynamic Characteristics

WANG Haiyan¹, YUAN Duanlei¹, FEI Xiang¹, ZHU Zhihao¹, WU Yi², YANG Fei²

(1. Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A rapid electromagnetic mechanism is designed in this paper based on a direct-current (DC) circuit breaker for rail transit, and the composition and principle of operation is described. Based on the analysis of electromagnetic field theory, using finite element analysis software ANSYS, the steady characteristics of electromagnetic mechanism and find magnetic distribution and electromagnetic force of moving iron are simulated when switching on and the influencing factor is also analyzed. Secondly, the electromagnetic force of the electromagnetic mechanism based on different current and air gap is also simulated and the distributed data of dynamic characteristics are obtained. Lastly, the dynamic characteristics of the DC circuit breaker by means of software ADAMS during switching on and off are simulated. Therefore, the mechanical characteristic of the mechanism are obtained too. Testing results indicate the above coupled method of mechanic and electromagnetic is correct and feasible.

Key words: rapid electromagnetic mechanism design; electromagnetic field simulation; kinetic analysis; dynamic characteristic; DC circuit breaker

0 引言

直流牵引供电系统是城市轨道交通牵引设备的重要组成部分,直流开关设备是直流牵引供电系统的核心设备,目前主要以进口品牌设备为主^[1]。直流断路器工作环境要求其能够进行频繁的操作,具备高机械寿命并且能够断电自动分闸。电磁操动机

构能够提供较大的合闸力,并且在合闸状态下,合闸线圈一直带电来提供合闸保持力,因此可以作为直流断路器操动机构的首选^[2-4]。

随着数值算法的发展,特别是有限元方法和动力学仿真技术的推广和应用,利用ANSYS对电磁操动机构的静态电磁特性进行分析,寻找动态特性计算的插值数据,再利用ADAMS对电磁操动机构的动力学特性进行分析,最终基于电磁、机械耦

合计算得出直流断路器整体运动过程并用于指导电磁操动机构设计已经成为工程领域中常用的手段^[5-9]。文中旨在借助此方法对配直流断路器电磁操动机构的动态分合特性进行研究。

1 直流断路器模型

直流断路器的主要结构有动触头、静触头、出线母排、灭弧栅、电磁操动机构和柜体框架,见图1。其中,动、静触头和出线母排构成直流断路器的一次主导电回路,灭弧栅构成断路器开断过程中电弧的磁吹通道,用于加快电弧熄灭速度,而电磁操动机构为断路器的分、合闸提供机械动力。从图1中可以看出,直流断路器的动触头在电磁操动机构的带动下完成分闸与合闸的工作,因此电磁操动机构的机械输出特性将决定着直流断路器能否顺利完成额定、故障电流条件下的关合与开断功能。

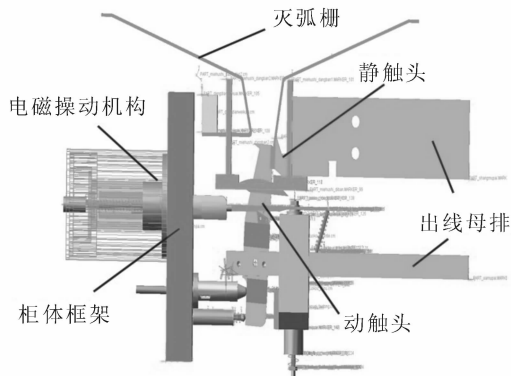


图1 直流断路器模型

Fig. 1 Model of DC circuit breaker

2 电磁操动机构方案

2.1 原理阐述

直流断路器额定电压1 800 V,额定绝缘电压3 000 V,额定电流4 000 A,额定短路开断电流80 kA。由于工作时断路器所处系统会产生高达几十甚至上百千安培的短路故障电流,为克服短路时电力,需要操作机构在合闸时提供很大的触头压力,而且要开断如此大的短路电流就要求操作机构具有很高的分闸速度^[10-12],同时要求机构具有断电分闸的特性并具有较小的体积。

根据直流断路器的特性需求,设计出一种新型快速电磁操动机构,具体结构见图2。合闸电磁铁的动、静铁心为圆筒形,线圈装在动静铁心之间,线圈外面套有一个圆筒形的轭铁;动铁心内部套装合闸推杆,合闸推杆上加工有圆形轴肩,其两侧分别用来配合合闸弹簧与分闸复位弹簧。合闸弹簧的另一端固定在动铁心内部凸台上;分闸复位弹簧的另一

端固定在静铁心内部。其中分闸复位弹簧的刚度远小于合闸弹簧,起到合闸初期缓冲和分闸时使动铁心复位的作用。电磁铁各个部件之间应严密配合减少漏磁,在动铁心和合闸磁铁轭铁之间留一气隙,同时增大动铁心尾部的厚度,使主磁路由轭铁平行动铁心运动方向至动铁心尾部,保证沿受力方向磁极的面积,增加动铁心所受吸力。整个电磁铁安装在断路器支撑板外侧,通过合闸推杆与电磁机构的其他元件相连。

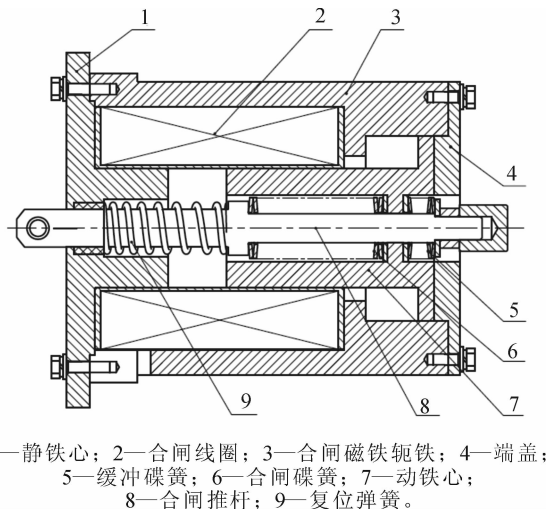


图2 快速电磁机构的方案

Fig. 2 Design of the electromagnetic mechanism

2.2 机构静态特性电磁仿真

文中利用ANSYS对电磁操动机构进行静态电磁分析,它不仅功能强大,而且易于操作,是国内和国际上最为普遍的有限元分析软件^[13-20]。

ANSYS进行电磁分析包括载流导体12内的电流场分析和电磁铁整体部分的磁场分析。载流导体的电流分布计算主要以下面两个基本方程式作为依据:

$$E = -\nabla V, J = \sigma E; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot J = 0. \quad (2)$$

式(1)、(2)中: E 为电场强度; V 为标量电动势; J 为电流密度矢量; σ 为电导率。式(2)涵义为电流的无散度条件,说明在场域的范围,任何封闭面电流净流量为零,即场域内没有电流源。

电流产生的磁场由式(3)获得。

$$\nabla \times (\nu \times A) = J, B = \nabla \times A. \quad (3)$$

式(3)中: A 为矢量磁位; ν 为磁导率; B 为磁感应强度。

计算完电磁场的三维磁场以后,其与载流导体相耦合的磁链采用式(4)进行计算。

$$\Psi = n \frac{2W}{l}. \quad (4)$$

式(4)中: n 为载流导体匝数; W 为磁场能量; I 为载流导体中流过的电流。

根据电磁铁的动作要求,在分析电磁特性时重点关心合闸速度和合闸可靠性,而这两个物理量与电磁铁动作过程中的一系列相关物理量相关,包括运动部件(可动衔铁)的速度、加速度、轭铁对它的电磁吸力和反力弹簧对其施加的反力,气隙的大小以及载流导体中流过的电流值等。很显然电磁铁的工作过程是动态的,但是动态过程的求解跟多个物理量有关,很难直接求解。因此建立以下思路:首先利用有限元分析软件 ANSYS 计算出电磁铁在合闸状态下的静态特性,对影响其特性的各个因素进行逐个分析,依据分析所得结果对设计进行改进。最后再计算出电磁铁的电磁吸力与气隙和电流关系的二维静态数据表格,之后在求解动态电磁力时根据气隙和激磁电流在已知表格中进行插值获得。静态电磁特性分析可以作为动态特性分析数据基础。

该模型主要由可动铁心、线圈和铁磁材料几部分组成。铁磁材料和动铁心采用的材料是电工纯铁,线圈为铜,另外电磁铁还需要有足够大的空气模型。为使仿真计算结果更为精确,根据模型的结构和材质特性,需要定义网格划分单元的形状,在磁场分析时采用基于 PLANE53 单元的矢量法。PLANE53 单元的理论基础为磁矢量势理论,其应用场合包括各种低频磁场分析,该单元具有非线性磁体建模能力,能够进行 $B-H$ 曲线或永磁体退磁曲线建模。网格划分结果见图 3。

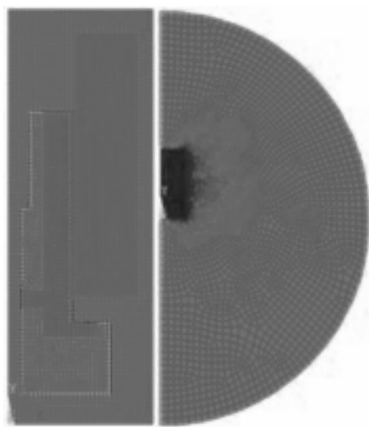


图 3 网格划分后的有限元模型

Fig. 3 Finite element model after meshing

由于电磁铁结构轴对称,为了减小计算量,建立了二维对称模型。为了给电磁铁动态仿真提供数据,需要计算电磁铁在不同气隙下的电磁吸力,故采用 ANSYS 的编程语言 APDL 命令流进行参数化建模。文中首先设定线圈匝数为 3 000 匝、填充系数

为 0.85、载荷为 110 V 电压载荷,对电磁铁在合闸位置的情况进行静态电磁仿真,获得电磁铁磁场分布矢量图,见图 4。另外,为了计算电磁吸力,需对动铁心单元定义电磁力标记,以便 ANSYS 计算所定义面上各个节点的电磁吸力。此时合闸电磁铁铁心受到的电磁吸力为 2 895.5 N。

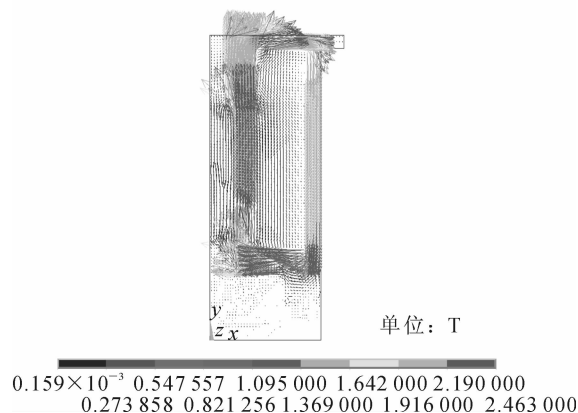


图 4 电磁铁磁场强度分布矢量图

Fig. 4 Distribution of magnetic field strength of electromagnet

3 合闸特性影响因素分析

电磁铁的静态电磁特性受到多个因素的影响,包括线圈的匝数、线圈填充系数以及电磁铁磁路的形态等。为了优化电磁铁设计,需分别对各个因素的影响进行分析。

3.1 线圈匝数影响

文中在设计电磁铁线圈时,避免线圈被击穿,在铁心外面套有绝缘介质的线圈骨架,在骨架上缠绕漆包线。由于空隙的存在漆包线本身的体积必然是小于漆包线所占的空间的,其比值就是该线圈的填充系数 η 。

$$\eta = \frac{V_{\text{WIRE}}}{V_{\text{COIL}}} \quad (5)$$

式(5)中: V_{WIRE} 为漆包线体积; V_{COIL} 为漆包线缠绕总体积。

在对线圈的匝数进行研究的时候,由于漆包线线径的变化较小,假定填充系数不变,且线圈所占空间不变。利用 ANSYS 仿真软件对线圈进行仿真时,需要将线圈匝数、线圈电阻、以及线圈截面积等参数通过编写 APDL 命令流,对线圈进行电磁仿真。获得在同一电压下,不同匝数下电磁吸力变化见图 5。

分析图 5 可知,在填充系数与漆包线所占体积不变的情况下,电磁吸力随着匝数的减小而增加。这是由于电磁力的影响因素是线圈剖面的电流密度,在线圈的填充系数以及漆包线缠绕体积一定的

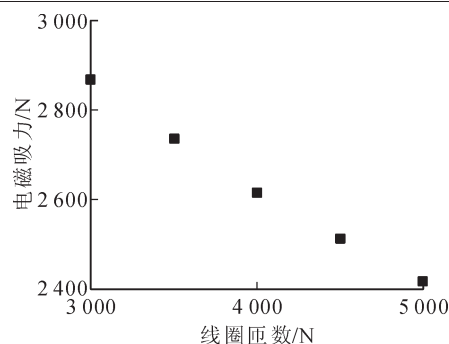


图5 电磁吸力随匝数的变化

Fig. 5 Variety of electromagnetic force with numbers of coil turns

情况下,匝数减少,会造成线圈线径的增大,从而使电流密度增大、电磁吸力变大。但是在实际情况中,在相同的缠绕工艺下,线径的大小又会影响填充系数的大小,所以在确定线圈参数时需要全面考虑各个因素。

3.2 填充系数的影响

在分析填充系数时,使线圈的匝数和漆包线缠绕体积为定值。分析填充系数为0.65、0.7、0.75、0.8、0.85的情况下电磁铁电磁吸力和气隙的关系。ANSYS仿真计算结果对比见图6。

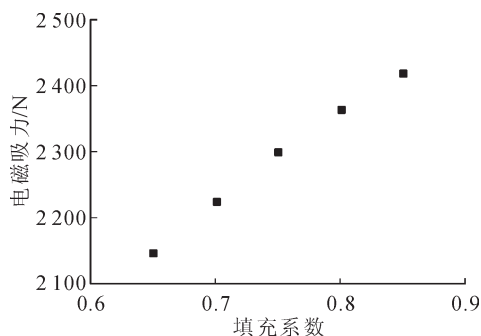


图6 电磁吸力随填充系数的变化

Fig. 6 Variety of electromagnetic force with filling coefficient

由图6可知,在线圈匝数和漆包线缠绕体积不变的情况下,填充系数越高,电磁吸力越大。

综上所述,电磁吸力会随着匝数的减少而增加,但是匝数减少、线径增大又会使填充系数减少。故而在线圈设计时,一方面需要尽量提高缠绕工艺,提高填充系数;另一方面,在既定的缠绕工艺下,需权衡考虑,找出最优化的匝数。文中根据电磁机构尺寸限制,为满足合闸接触力要求,且在现有填充工艺的条件下,选定电磁操动机构的线圈匝数为4000匝,填充系数为0.85。

3.3 磁路形态的影响

文中设计的电磁铁,其磁路由动、静铁心及外壳等组成。磁路形态势必对电磁铁的电磁吸力产生

影响,电磁铁设计形态见图1。

简化考虑问题,忽略漏磁、散磁和磁阻,电磁铁吸力式^[12]为

$$F = \left(\frac{B}{5000} \right)^2 \cdot 10S. \quad (6)$$

式(6)中: B 为磁感应强度; S 为磁极的面积; F 为动铁心所受电磁吸力。式(6)中常数为单位换算产生。由此可知,电磁吸力的主要影响因素为磁感应强度 B 和磁极面积 S 。增大 B 的途径主要有:增大铁心尺寸,增大线圈安匝数,增大线圈电压等。采用这些措施会产生一些不利影响,例如增大机构功率或者增大电磁铁尺寸。

4 空载动态输出特性分析

机构动作过程中,电流和气隙都是随时间变化的,要对电磁操动机构的动态过程进行研究分析,不能只是计算其在合闸状态下的静态电磁分布。需要分别计算不同气隙、不同电流下的电磁吸力。所以利用ANSYS软件中的APDL语言编写命令流文件,循环计算可动衔铁运动的不同气隙、不同电流下受到的电磁吸力。在建模时,可以利用设定参数的办法实现气隙的规律性变化。定义可动衔铁和轭铁端面之间的气隙为变量 x ,改变工作气隙和载流大小,分别计算电流峰值从0.9 A开始以0.3 A的增量增加到6.9 A,气隙值从28.5 mm开始,以0.5 mm的增量减小至0.5 mm时的静态电磁吸力,构成一个23×26的静态数据网格。图7为使用APDL命令流循环计算不同电流条件下获得的电磁铁吸力随气隙变化的曲线。

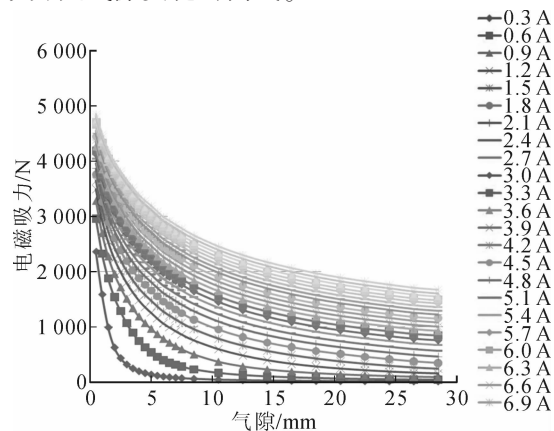


图7 不同电流下动铁心受到的吸力随气隙的变化

Fig. 7 Variety of electromagnetic force of moving iron with air gap based on different current

从图7可以看出,合闸过程中电磁力在各个电流情况下,都是随着气隙的减小而增大,在同一个气隙的情况下,电流越大,电磁吸力也越大。但是随

着电流不断增大,电磁力增加的速度在不断变慢。这是由于电磁场趋于饱和,曲线上升趋缓。对电磁铁进行静态电磁场计算,获得的数据为后续直流断路器机构进行动态特性分析提供了基础。

5 直流断路器动态过程仿真研究

文中利用 ADAMS 对直流断路器的动态过程进行仿真。在简化模型建立之后,首先需要对各个部件添加运动副,设置各个部件的材料,然后添加载荷。根据前述计算结果,将 ANSYS 对机构的电磁特性仿真结果导入 ADAMS 中,进行机械、电磁耦合分析。

5.1 分合特性仿真

在模型建立完成后,利用 ADAMS 仿真模型对断路器的机构特性进行动态的仿真,获得了断路器分、合闸的运动过程。

5.1.1 合闸过程的仿真与试验结果

合闸过程开距随时间变化曲线见图 8。

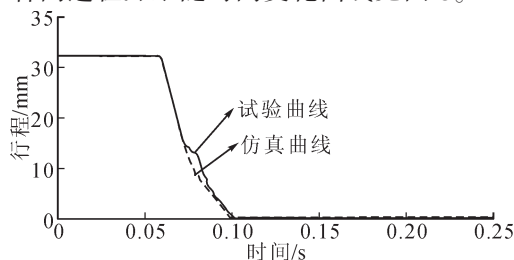


图 8 合闸过程开距随时间变化曲线

Fig. 8 Variety of opening range with time based on switching on

从图 8 开距随时间变化的曲线可以看出合闸时间共 38 ms,图中试验测得的合闸时间为 43 ms,符合直流断路器技术指标要求。

合闸过程动触头速度随时间变化曲线见图 9。

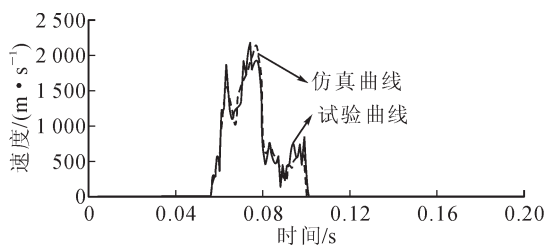


图 9 合闸过程动触头速度随时间变化曲线

Fig. 9 Variety of moving contact speed with time based on switching on

观察图 9 可以看到动触头速度有多次波动,这是在合闸过程中,拨叉撞击卡扣后,动导杆快速运动脱离拨叉,后又在分闸弹簧的反力作用下与拨叉再次接触造成的。在合闸过程中,动触头的速度最大达到了 2.2 m/s,最小速度为 0.2 m/s。上述分析与图中机械特性试验中速度传感器测得的动触头速

度变化曲线基本保持一致。

合闸过程动触头上接触力随时间变化曲线见图 10。

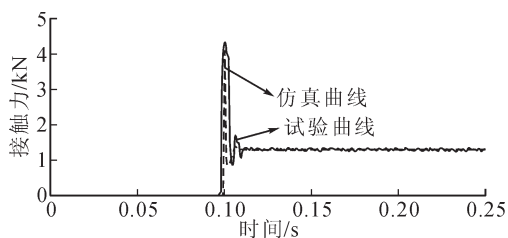


图 10 合闸过程动触头上接触力随时间变化曲线

Fig. 10 Variety of moving contact force with time based on switching on

观察图 10 可以看出在动静触头初始接触时,冲击力接近 4 200 N,后迅速下降至 1 000 N,最后稳定在 1 300 N 左右。通过图 10 可看出合闸过程中,接触力波动过程持续了 4 ms 左右,波动过程中,动静触头之间一直有力,动静触头没有分离,没有发生弹跳。图中所示试验测得的动触头上接触力的变化曲线与仿真结果基本吻合。

5.1.2 分闸过程的仿真与试验结果

分闸过程触头开距与动触头速度变化曲线见图 11。

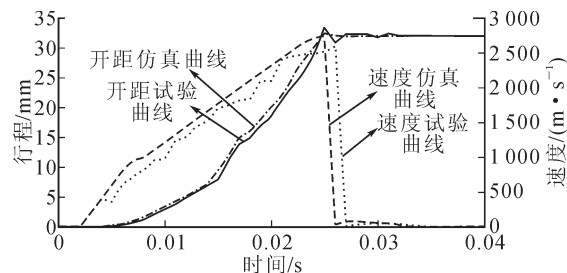


图 11 分闸过程触头开距与动触头速度变化曲线

Fig. 11 Variety of opening range and moving contact speed with time based on switching off

观察分闸的过程,由图 11 可知,以触头刚开始运动为起始时刻,在 22 ms 时,动静触头接触,动触头速度发生突变,随后发生弹跳过程,弹跳过程持续 3 ms 左右。在分闸过程中,动触头速度最高达到 2.75 m/s,在弹跳时,触头速度最高达到 0.12 m/s,弹跳最大幅度为 0.5 mm。仿真结果与图中所测分闸行程曲线结果吻合,且满足直流断路器技术要求。

5.2 试验结果对比

在按照设计图纸加工出样机之后,对样机的机械特性进行测试。所得的测试结果与仿真结果对比见表 1。

对比仿真结果与测试结果,仿真结果与测试结果基本一致。测试结果在合闸时间和分闸时间两项

表1 仿真结果与样机测试结果的对比

Table 1 Comparison of simulation and test results

结果	合闸时间/ms	分闸时间/ms
测试结果	43	25
仿真结果	38	22

上都偏大的原因是由于样机运动过程中的阻尼比仿真时估算的大。从结果上看,运用 ADAMS 软件对直流断路器机构特性的仿真很好的指导和验证了断路器的设计。

6 结语

文中基于某轨道交通直流断路器的总体结构模型,设计了一种快速电磁操动机构的2种方案,利用有限元分析软件 ANSYS,仿真出电磁机构的磁场分布和吸力特性。分析了不同影响因素对电磁机构合闸特性的影响,并根据仿真和样机实测结果的对比,验证出在不改变电磁机构总体结构的前提下,增大动、静铁心的贴合面积,可以大大降低电磁机构吸合时保持功率的优化方案。通过 APDL 参数化的建模分析功能,计算出电磁机构在不同电流条件下电磁吸力随气隙变化的数值离散点,在此基础上建立直流断路器动力学分析模型,借助动力学软件 ADAMS 对整个直流断路器的分合特性进行了仿真,得出机构的机械特性曲线,整个仿真过程实现了机构电磁特性和机械特性的耦合分析。最后通过与试验测试数据的对比,验证了数值计算方法的可行性和正确性。

参考文献:

- [1] 张刚,袁铎宁.城市轨道交通直流开关柜的国产化探索[J].都市轨道交通,2011,24(6):96-99.
ZHANG Gang, YUAN Duoning. Exploration of the localization of rail transit direct-current switchboard[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011, 24(6): 96-99
- [2] 钱家骊.高压断路器中直流电磁铁设计的讨论[J].上海电器技术,2001(1):36-38.
QIAN Jiali. Discussion on design of DC electromagnet in HV breakers[J]. Shanghai Electric Technology, 2001(1): 36-38.
- [3] 周小擎.直流电磁铁的优化设计[J].华南理工大学学报(自然科学版),1994,22(5):138-146.
ZHOU Xiaoqing. Optimal design of DC electromagnetics[J]. Journal of South China University of Technology (Science and Technology), 1994, 22(5): 138-146.
- [4] 李泉凤.电磁场数值计算与电磁铁设计[M].北京:清华大学出版社,2002.

- LI Quanfeng. The numerical calculation of electromagnetic field and electromagnetic design [M]. Beijing. Tsinghua University Press, 2002
- [5] 魏俊梅,林莘,魏长宇.550 kV SF₆ GIS 用母线罐体电磁感应分析研究[J].高压电器,2007,43(6):416-419.
WEI Junmei, LIN Xin, WEI Changyu. Analysis and research on electromagnetism induction of busbar tube for 550 kV SF₆ GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(6): 416-419.
- [6] 向洪岗,陈德桂,李兴文,等.基于三维磁场分析建立电磁铁等效磁路的研究[J].西安交通大学学报(自然科学版),2003,37(8):808-811.
XIANG Honggang, CHEN Degui, LI Xingwen, et al. Construction of equivalent magnetic circuit for electromagnet based on 3-D magnetic field[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Science and Technology), 2003, 37(8): 808-811.
- [7] 胡义军,吴海鹰.轴向磁场永磁同步发电机的三维电磁场计算[J].船电技术,2012,32(4):42-46.
HU Yijun, WU Haiying. Calculation of three dimension electromagnetic field of axial flux PM synchronous generator[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2012, 32(4): 42-46.
- [8] 李润华,余卓平,熊璐.ESP 液压单元电磁阀电磁场动态特性分析[J].机电一体化,2012,18(7):23-26.
LI Runhua, YU Zhuoping, XIONG Lu. Dynamic characteristics analysis of electromagnetic field of ESP solenoid valve[J]. Mechatronics, 2012, 18(7): 23-26.
- [9] 史宗谦,贾申利,朱天胜,等.真空直流断路器高速操动机构的研究[J].高压电器,2010,46(3):18-22.
SHI Zongqian, JIA Shenli, ZHU Tiansheng, et al. Investigations on high-speed actuator of vacuum DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 18-22.
- [10] 贺开华,彭海波.直流断路器大容量试验室的现状与进展[J].船电技术,2012,30(9):55-57.
HE Kaihua, PENG Haibo. Development of DC circuit breaker high power test lab[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2012, 30(9): 55-57.
- [11] 周宏宇,罗隆福,许加柱,等.改进型地铁用直流断路器[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(2):127-130.
ZHOU Hongyu, LUO Longfu, XU Jiazhu, et al. Improved DC breaker for metro system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(2): 127-130.
- [12] 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.
XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Theories and applications of high voltage circuit breakers[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [13] 李平,蒋丹.基于 ANSYS 参数化语言 APDL 对折流板的分析与优化[J].东华大学学报(自然科学版),2012,38(5):546-551.
LI Ping, JIANG Dan. Analysis and optimization of baffles

- based on ANSYS parameter design language APDL[J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2012,38(5): 546-551.
- [14] 杨勇. 电磁机构的特性研究[J]. 煤炭技术, 2011, 30(4): 46-48.
YANG Yong. Study on characteristics of electromagnetic institutions[J]. Coal Technology, 2011, 30(4): 46-48.
- [15] 刘向军, 许雄, 兰太寿. 电磁机构三维动态特性测试及数据处理分析[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2208-2215.
LIU Xiongjun, XU Xiong, LAN Taishou. Three-dimensional dynamic characteristic testing, and data processing analysis for electromagnetic mechanism[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(10): 2208-2215.
- [16] 吴伟光, 蔡彬, 马履中, 等. 一种新型电磁操作机构及其电磁作用力的计算[J]. 电气应用, 2006, 25(7): 31-33.
WU Weiguang, CAI Bin, MA Lüzhong, et al. Study of a new electromagnetic actuator and calculation of the magnetic power[J]. Electric Application, 2006, 25(7): 31-33.
- [17] 黄世泽, 郭其一, 章敏娟, 等. 控制与保护开关电气电磁机构运动轨迹仿真研究[J]. 低压电器, 2013(11): 5-9.
HUANG Shize, GUO Qiyi, ZHANG Mingjuan, et al. Simulative study on movement trajectory of control and protective switching device electromagnetic body[J]. Low Voltage Apparatus, 2013(11): 5-9.
- [18] 姬丽娟, 苏秀苹, 王丽华, 等. 基于 ANSYS 的交流接触器电磁机构的三维有限元分析[J]. 计算机应用与软件, 2005, 22(7): 136-137.
JI Lijuan, SU Xiuping, WANG Lihua, et al. ANSYS based 3D finite element analysis of the alternating contactor's electromagnetic actuator[J]. Computer Applications and Software, 2005, 22(7): 136-137.
- [19] 姜峰, 贺成柱, 张建峰, 等. AC 接触器电磁机构的三维有限元分析[J]. 研究与分析, 2009(3): 36-37.
JIANG Feng, HE Chengzhu, ZHANG Jianfeng, et al. Electromagnetic mechanism of AC contactor based on 3D finite element analysis[J]. Research and Analysis, 2009(3): 36-37.
- [20] 娄杰, 李庆民, 孙庆森, 等. 快速电磁推力机构的动态特性仿真与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 23-29.
LOU Jie, LI Qingmin, SUN Qingsen, et al. Dynamic characteristics simulation and optimal design of the fast electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 23-29.
- 王海燕(1976—), 女, 工学硕士, 高级工程师, 于 2013 年在西安交通大学电气工程专业获得硕士学位, 主要从事高压电器产品的研发设计工作。
- 袁端磊(1973—), 男, 高级工程师, 主要从事高压电器产品的研发设计工作。
-
- (上接第 78 页)
- [9] 刘卫东, 汪林森, 陈维江, 等. 特高压 GIS 特快速暂态过电压试验重复击穿过程研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 644-650.
LIU Weidong, WANG Linshen, CHEN Weijiang, et al. Investigation of the VFTO related repeated breakdown processes in UHV GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 644-650.
- [10] 卢鹏. 750 kV GIS 变电站 VFTO 特性分析[J]. 电力建设, 2011, 32(1): 86-90.
LU Peng. Analysis on VFTO of 750 kV GIS substation[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(1): 86-90.
- [11] 谷定燮, 修木洪, 戴敏, 等. 1 000 kV GIS 变电所 VFTO 特性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 27-32.
GU Dingxie, XIU Muhong, DAI Min, et al. Study on VFTO of 1 000 kV GIS substation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 27-32.
- [12] 陈维江, 颜湘莲, 王绍武, 等. 气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压研究的新进展[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 1-11.
CHEN Weijiang, YAN Xianglian, WANG Shaowu, et al. Recent progress in investigations on very fast transient overvoltage in gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 1-11.
- 朱跃(1958—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 分别于 1982、1984 年在西安交通大学获得工学学士、工学硕士学位。长期在电力系统从事科学研究工作并曾担任电力科学研究院和供电局生产技术领导职务, 直流输电、开关、变压器、过电压与绝缘配合标委会委员, 电机工程学会陕西高压专委会主任委员, 曾获得电力科技一等奖、陕西省科技进步奖、国网公司科技进步特等奖。主要从事过电压与绝缘配合、电力系统仿真、电气设备在线监测等方面的研究工作。
- 周越(1992—), 男, 西安交通大学电气工程学院研究生在读, 研究方向为电力系统过电压及其绝缘配合。