大电流升降装置在断路器EMC测试中的应用

随着断路器产品技术和水平的日益提高，对于产品的EMC指标要求和测试环境要求更加严酷。在进行EMC抗辐射干扰旋转测试时，应力求达到有限空间内屏蔽性能好、连接接线方便以及外形美观等一系列要求。若将用于向被测产品输出大电流的测试电源放置于暗室内，则对测试结果造成一定影响。为满足要求，自主设计研发了一套大电流升降装置。利用这套装置可让被测产品与测试电源达到很好的隔离效果，减少了测试环境对测试结果的影响。

谭　垒/中煤科工集团重庆研究院有限公司

谭　垒/工程师

关键词/Keywords
电磁兼容性·
升降装置·
屏蔽性能·

电磁兼容性（Electro Magnetic Compatibility，EMC）检测是现代电器科学研究与检测技术的一个重要组成部分，其电磁兼容性能、屏蔽室要求、断路器旋转要求以及在规定的狭小空间中如何检测是检测设备的研究方向。现在很多的检测装置只能满足电流不大的断路器产品EMC测试，却无法解决大电流的测试问题，尤其对于大电流产生的大干扰屏蔽问题特别捉襟见肘。因此，在样品通过大电流的测试条件下，对于测试设备的各项指标要求就更加严苛。本文针对于这一现状提出了一种测试方案，引入了一种用于EMC测试的大电流升降装置。

此装置可实现的功能如下：①按照GB 14048.2—2008附录F的要求，实现对断路器样品的射频电磁场抗扰度测试，包括在90%电流整定值条件下的正常工作（不脱扣）测试和在2倍电流整定值条件下的正常脱扣时间测试；②按照GB 14048.2—2008附录B和F的要求，将断路器样品安装在转台上并加载额定电压和电流，控制转台正反180°旋转（以此实现360°的全方位旋转），实现对样品的辐射射频干扰测试。

基本原理与功能

EMC测试是对电子产品在电磁场方面干扰大小（EMI）和抗干扰能力（EMS）的综合评定，是产品质量最重要的指标之一。电磁兼容的测量一般由电波暗室和测试仪器组成，但在对断路器样品进行EMC测试时，需要对断路器通以大电流，因此应在暗室内引入铜排，用于样品与大电流电源装置的连接。由于进行EMC测试时，暗室中铜排产生的信号反射会对测试结果产生影响，为最大程度减少测试结果的影响，并考虑到暗室空间条件限制，设计了一个大电流升降装置，试验电源产生的大电流由铜编织软线经暗室外的设备升降井口引入，并连接到升降装置的铜排组上，需要用时将铜排组升出实验室平面，不用时则下降到平面以下密封起来，以达到其他测试的屏蔽性能要求，EMC实验室布局如图1所示。

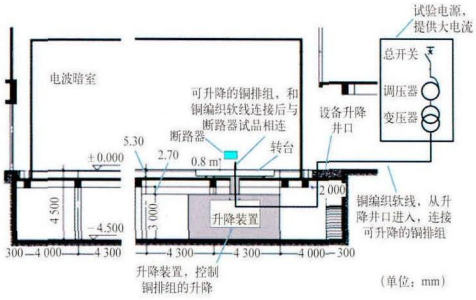

图1　EMC实验室布局

系统的设计

升降装置系统如图2所示。装置主要

中国知网　https://www.cnki.net

由控制系统、伺服控制器、双丝杆顶伸机构和交流三相铜排组构成。在装置运动过程中，伺服电动机M_1和M_2带动丝杠G_1和丝杆G_2在垂直方向做直线运动，从而推动铜排组从实验室平面上半径为0.5 m的圆孔中升出，升出高度为平面上方0.5 m。

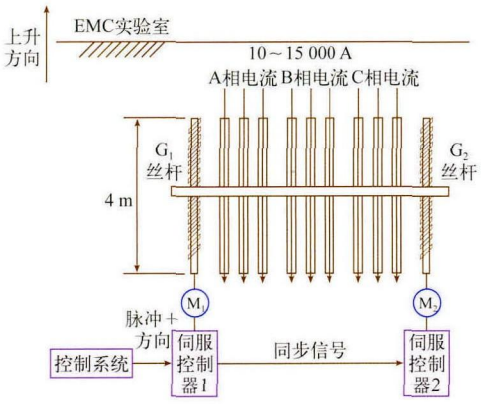

图2　升降装置系统

升降装置安装有限位传感器，利用传感器来设置铜排的位移，以达到上升或下降特定高度的要求。在准备断路器样品的EMC测试时，为了接线便利，首先控制装置将铜排组升起，将三相铜排组的一端与样品用铜编织软线连接，其另一端与电源装置的多磁路变压器二次侧也用铜编织软线连接。测试开始前，控制铜排组下降到实验室平面下；测试过程中，电源装置可按照测试要求向样品提供10～15 000 A的电流。

1. 丝杆的同步

由于本装置采用了升降式的机械机构，使得EMC实验室内连接样品的铜排长度较短，降低了大电流发生时对试品的电磁干扰，提高了测试准确度。交流三相铜排组由9根10 cm×1.5 cm×40 cm的铜排组成（每相3根铜排），铜排组的总质量$M=\rho V=8.9\ \mathrm{g/cm^3}\times(10\ \mathrm{cm}\times1.5\ \mathrm{cm}\times40\ \mathrm{cm})\times9=48\ 060\ \mathrm{g}=48.1\ \mathrm{kg}$。由于铜排组质量较重，且机构需推动铜排组进行垂直运动，因此在设计过程中采用双丝杆推动的方式，由伺服电动机M_1带动丝杆G_1、伺服电动机M_2带动丝杆G_2，从而带动铜排组同步上升。由于同步性要求较高，而传统的采用PLC向伺服电动机输出脉冲的方式可能会造成单位时间内脉冲数不同步，所以本装置采用具有同步功能的伺服电动机。

2. 电气连接方式

由于装置上的铜排组需经常上下升降，因此无法使用常规的铜排连接，而常规使用的软电缆也无法承受最大15 000 A的电流。故安装在转台上的试品与高出实验室平面0.5 m的铜排组之间、多磁路变压器引入暗室的出线端与未升出实验室平面的铜排组另一端均使用铜编织软线连接。铜编制软线抗疲劳能力强，且软线两端的连接面与铜排组或断路器试品完全贴合，所有连接面均镀银，实现了电气连接的高度电导率，减小了接触电阻，有很好的导电效果。铜编织软线与断路器的连接方式简单轻便，在用螺栓与断路器的接线端子固定之前，提供编制铜线零时挂靠到断路器铜排端子的挂钩，以便在与断路器铜排端子定位对孔时，减轻提拿铜排重量。测试结束可以便捷地将铜编织软线放进台面下的软线堆仓内。铜编织连接软线示意图如图3所示。

图3　铜编织连接软线示意图

3. 电动力对系统的影响分析

断路器在测试过程中的最大通电电流可达15 000 A，通电过程中会对机构产生很大的电动力，如果在通电时产生振动，导体和电器可能会产生变形或损坏。刀开关可能自动断开而产生误动作，也有可能使开关电器触头压力明显减少，造成触头熔化或熔焊，以上这些原因会影响设备的正常工作，并可能引起重大事故。因此需要对系统铜排组所受电动力进行分析，确保试验中该装置的安全性。

每一相输出铜排组共有3根铜排承载输出电流，每根铜排长$L=40$ cm。试验过程中，铜排两端分别与铜编织软线的连接面完全贴合，连接面

中国知网　https://www.cnki.net

的长×宽=12.5 cm×10 cm，连接面厚度正好能够填充铜排之间的间隙。由于铜排两端与铜编织软线的连接面共有8颗ϕ8的螺母紧固（每端4颗），且为了升降三相铜排组，装置的顶伸机构与铜排组中部牢牢紧固，使同一相的3根铜排之间间隙较少且端部紧固牢固，所以可以认为，在通电过程中，同一相铜排组的任意1根铜排在另外2根铜排所产生的磁场中受到的电动力基本对系统无影响。

除同相之间产生电动力外，相间产生的电动力也会影响装置的安全。通过毕奥－沙伐尔定律可知，电动力$F=BIL\sin\beta$（其中，β角为载流导体中电流方向与磁感应强度B正方向之间的夹角）。当计算平行矩形截面积导体的电动力时，还应考虑截面积系数K_x。交流电流为瞬时值，电流随时间的变化为

$$i=I_m\sin\omega t=\sqrt{2}I\sin\omega t \tag{1}$$

式中，I_m为电流的幅值；I为电流的有效值。

由此可知，在三相交流系统中

$$I_a=I_m\sin\omega t \tag{2}$$

$$I_b=I_m\sin(\omega t-120^\circ) \tag{3}$$

$$I_c=I_m\sin(\omega t-240^\circ) \tag{4}$$

电动力将随时间变化而变化，变化曲线如图4所示。

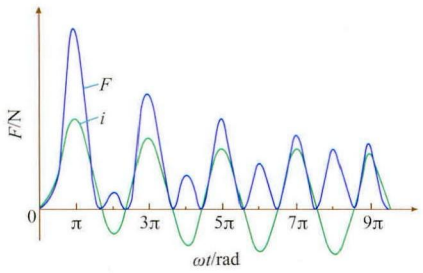

图4 电动力变化曲线

在三相交流系统中，B相所处位置和电流相位角的关系，一般比A、C相所受电动力大。本系统以B相铜排组为例进行电动力受力分析，如图5所示。

若将B相铜排组作为一个受力整体分析，当铜编织软线的连接面与铜排完全贴合后，铜排截面长度为d=5.5 cm。B相铜排组与A相和C相铜排组的中心距离a=43 cm。当铜排组的截面长度d小于

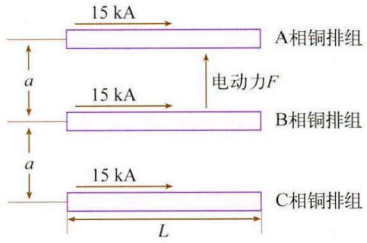

图5 铜排电动力示意图

相间铜排组的中心距离，且远小于铜排组的长度L时，可以理想地认为铜排组中的电流i均集中在各自的几何轴线上。当铜排组通过有效值15 000 A的电流时，每相铜排组理想状态通过的电流为

$$i_A=i_B=i_C=\sqrt{2}\sin\omega t\times15\,000\ \text{A} \tag{5}$$

B相铜排组处在A相和C相铜排组所产生的磁场中，其磁感应强度分别用B_{AB}和B_{CB}表示，单位为T，磁感强度表达式为

$$B_{AB}=\mu_0H_{AB}=4\pi\frac{i_A}{2\pi a}\times10^{-7}=2\times10^{-7}\frac{i_A}{a} \tag{6}$$

$$B_{CB}=\mu_0H_{CB}=4\pi\frac{i_C}{2\pi a}\times10^{-7}=2\times10^{-7}\frac{i_C}{a} \tag{7}$$

式中，μ_0为空气的磁导系数，$4\pi\times10^{-7}$；H_{AB}为A相电流i_A产生的磁场在B相铜排组中的磁场强度；H_{CB}为C相电流i_C所产生的磁场在B相铜排组中的磁场强度。

由于铜排组界面的周长小于相间铜排组的中心距a，则截面系数K_x接近于1，此时完全可以不考虑截面对电动力的影响。由于铜排组处于同一平面，任意一块铜排所产生的磁场方向均垂直于平面，故$\beta=\frac{\pi}{2}$，$\sin\beta=1$。

此时，B相所受的电动力为

$$\begin{aligned}F&=F_{AB}+F_{CB}=\int_0^L(B_{AB}+B_{CB})\,i_B\sin\beta K_x\mathrm{d}x\\&=2\frac{i_B(i_A+i_C)}{a}L\times10^{-7}\\&=\frac{2\times10^{-7}}{a}L\times2\times(15\,000\sqrt{2})^2\times\\&\quad\sin(\omega t-120^\circ)[\sin\omega t+\sin(\omega t-240^\circ)]\end{aligned} \tag{8}$$

由$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}(\omega t)}=0$，得$\tan2\omega t=-\frac{1}{\sqrt{3}}$，即

$\omega t=n\pi+75^\circ(n=0,1,2,\cdots)$或$\omega t=n\pi+$

(下转第115页)

中国知网 https://www.cnki.net

误差。然而，本文也存在一定的局限性，对于安时积分法的累积误差未进行相关处理，导致结果中估计误差不断增大。在今后的研究中，将通过减小电流测量误差或采用其他方法对该累积误差进行修正等举措克服该局限。

参考文献

[1] 陈虹，宫洵，胡云峰，等．汽车控制的研究现状与展望 [J]．自动化学报，2013，39 (4)：322-346.

[2] 吴红杰，齐铂金，郑敏信，等．混合动力电动车电池荷电状态描述方法 [J]．北京航空航天大学学报，2005，31 (2)：223-226.

[3] Jossen A，Spath V，Doring H，et al．Reliable battery operation-a challenge for the battery management system [J]．Journal of Power Sources，1999，84 (2)：283-286.

[4] Aylor J H，Thieme A，Johnso B W．A battery state of charge indicator for electric wheelchairs [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，1992，39 (5)：398-409.

[5] 裴峰，黄向东，罗玉涛，等．电动汽车动力电池变流放电特性与荷电状态估计 [J]．中国电机工程学报，2005，25 (9)：164-168.

[6] Karden E，Buller S，Doncker R W D．A method for measurement and interpretation of impedance for industrial batteries [J]．Journal of Power Sources，2000，85 (1)：72-78.

[7] 雷肖，陈清泉，刘开培，等．电动车电池SOC估计的径向基函数神经网络方法 [J]．电工技术学报，2008，23 (5)：81-87.

[8] 魏克新，陈峭岩．基于多模型自适应卡尔曼滤波器的电动汽车电池荷电状态估计 [J]．中国电机工程学报，2012，32 (31)：19-26.

[9] 于海芳，逯仁贵，朱春波，等．基于安时法的镍氢电池SOC估计误差校正 [J]．电工技术学报，2012，27 (6)：12-18.

[10] 林成涛，王军平，陈全世．电动汽车SOC估计方法原理与应用 [J]．电池，2004，34 (5)：376-378.

[11] 张翔，钱立军，张炳力，等．电动汽车仿真软件进展 [J]．系统仿真学报，2004，16 (8)：1621-1623.

(收稿日期：2014－05－07) EA

(上接第82页)

165°($n=0$，1，2，…)，B相的瞬时电动力F达到最大值。

代入a和L后，$F_{max}=145$ N，远小于升降装置的总重力（控制系统、伺服控制器、双丝杆顶伸机构及交流三相铜排组的重力和）。因此，铜排组相间产生的电动力也基本对系统不造成影响。

结束语

本文基于断路器EMC电流特性测试系统采用一套升降装置，实现对EMC测试中电流的准确测量，被测样品与测试电源的有效隔离解决了丝杆的同步、电气连接方式及其特殊处理和电动力与负重等多种问题，满足了检测系统的设计要求，具有很高的性价比和实用性。

参考文献

[1] GB 14048.2—2008 低压开关设备和控制设备第2本分：断路器 2006，IDT：附录B、附录F、附录J [S].

[2] GB 5585.2—1985 电工用铜、铝及其合金线第2部分：铜母线：I-3 [S].

[3] 李晓艳，班书昊．基于运动稳定性的一种新型升降装置 [J]．机械设计与制造，2005，12 (7)：14-16.

[4] 穆家华．EMC标准与低压电器 [J]．低压电器，1995，6 (3)：57-58.

(收稿日期：2014－12－23) EA

中国知网 https://www.cnki.net