

文章编号:1001-1609(2003)01-0034-03

真空断路器永磁机构设计与分析软件的开发

李岩, 王胜辉, 林莘, 徐建源, 安盛民

(沈阳工业大学, 沈阳 110023)

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE FOR THE DESIGN AND ANALYSIS OF THE PERMANENT MAGNETIC ACTUATOR FOR VACUUM CIRCUIT BREAKER

LI Yan, WANG Sheng-hui, LIN Xin, XU Jian-yuan, AN Sheng-min

(Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

摘要: 针对 12,40.5 kV 和 72.5 kV 户内、外真空断路器, 研究开发了永磁操动机构设计与分析软件。该软件工作于 Windows 操作系统平台, 适用于单、双稳态两种结构与直流和电容两种供电方式的永磁操动机构的机械和电磁设计以及相应的电子控制部分设计。可以仅仅根据用户给出的几个主要技术参数要求, 完全自动地进行永磁机构的结构参数设计、静态和动态电磁和机械特性的计算、电子控制线路和元件的设计、可变参数的机械零件和装配图的绘制、产品技术文件生成等的工作。

关键词: 永磁操动机构; 真空断路器; 分析软件

中图分类号: TM561.2 **文献标识码:** A

Abstract: A computer analysis and design software for permanent magnetic actuator(PMA) of 12, 40.5 kV and 72.5 kV indoor and outdoor vacuum circuit breaker are presented. Based on the Windows operation system, the designs of mechanical, electromagnetic and electronic control system can be conducted for two types of single and double stabilization PMA while the actuator is powered either by DC battery or by capacitor discharge. The structure parameter, mechanical and electromagnetic dynamic behavior, as well as electronic control circuit can be derived automatically, and the constructional draw and technique documents of PMA can be given too.

Key words: permanent magnetic actuator; vacuum circuit breaker; design software

1 前言

在中压开关领域, 由于断路器的使用量大面广, 操作频繁, 可靠性就更成为重要问题。近年来, 一种电磁操动、永磁保持、电子控制的操动机构受到广泛关注。这种操动机构由于取消了脱、锁扣装置, 而采用永久磁铁进行终端位置的保持, 动作元件和零部

件数目明显减少, 因而可靠性大大提高。然而, 与以往电磁操动机构和弹簧操动机构不同的是, 永磁操动机构对负载特性十分敏感, 不同的开关设计, 有不同的保持特性和负载特性, 因此, 每一种型号的断路器要做大量不同的研究开发工作。这使断路器生产厂家开发研制特性优良、体积小巧、参数合理的永磁操动机构有很大困难^[1]。

为了使各生产厂家能够自选设计出配断路器的永磁机构系列产品, 笔者在大量设计、研制、调试、试验的基础上, 开发了永磁操动机构的设计与分析软件。该软件系统包括: 友好的前处理人机界面、永磁机构电磁场数值计算模块、机械磁场动态耦合场计算模块、AutoCAD 机械设计模块、电子控制系统设计模块、材料器件明细表和技术文档建立模块等。该软件适用于 12,40.5 kV 户外真空断路器, 72.5 kV 真空断路器、真空负荷开关永磁操动机构的设计, 可以缩短设计周期, 提高产品性能。

2 软件的功能与框图

该软件工作于 Windows 操作系统平台, 适用于单双稳态两种结构、直流和电容两种供电方式的永磁操动机构的机械和电磁设计以及相应的电子控制部分设计。

软件在功能上可以仅仅根据用户给出的几个主要技术参数要求, 完全自动地进行永磁机构的结构参数设计、静态和动态电磁和机械特性计算、电子控制线路和元件设计、可变参数的机械零件和装配图绘制、产品技术文件生成等工作。用户可直接用软件输出的机械设计图纸、电磁参数和电子线路板图进行生产和调试。软件采用了下拉菜单式中文界面, 一般设计人员均可方便使用。软件在结构上采用了模块化结构。主要分为技术参数输入模块、基于专家知

收稿日期: 2002-10-26

识的机械结构参数和电磁参数设计模块、电磁场数值计算模块、电磁和机械动态特性分析模块、电子控制设计模块、变参数机械零件和装配图绘制模块、设计结果输出模块和生成产品技术文档模块。各模块间可实现数据共享和处理。软件结构见图1。软件采用了专家设计系统方法确定结构参数,采用有限元方法计算电磁场和电磁力,采用 AutoLISP 语言编程绘制机械零件图,采用 Visual Basic 语言完成软件界面设计工作。

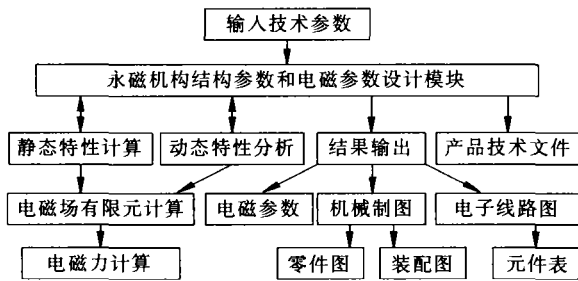


图1 永磁操动机构设计软件的结构

3 永磁机构电磁场模型和计算方法

由麦克斯韦方程组可推得非线性磁场的偏微分方程为:

$$\nabla^2 A = -\frac{J}{v}$$

对于圆柱形永磁机构,可采用轴对称场计算,在圆柱坐标系 (z, r) 下,上式可展开为^[2]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial (rA_{\theta})}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial (rA_{\theta})}{\partial z} \right) = -J_{\theta} \quad (2)$$

边界条件为:

$$\begin{cases} \text{一类边界上: } rA_{\theta} = rA_{\theta 0} \\ \text{二类边界上: } \frac{v}{r} \frac{\partial (rA_{\theta})}{\partial n} = -H_t \end{cases} \quad (3)$$

由于机构中存在永磁体,在永磁操动机构电磁场计算时可采用面电流模型进行模拟。假设永磁体被均匀磁化,永磁体内部各点上的磁化强度 M 的大小及方向都相同,永磁体内的等效体电流密度为零,在平行于 M 的永磁体侧面上,等效面电流可用面电流密度 J_s 来表示:

$$J_s = \frac{M \times n}{\mu_0} \quad (4)$$

式中: n 为永磁体侧面外法向单位向量。

在模拟永磁体的等效面电流层与其他媒质的交界处,满足以下交界条件:

$$\left(\frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A}{\partial n} \right)^- - \left(\frac{1}{\mu_2} \frac{\partial A}{\partial n} \right)^+ = J_s \quad (5)$$

在永磁操动机构磁场中,作用在动铁心上的电

磁吸力 F 可以通过计算包围动铁心的任意表面 S 上的应力 p 的面积积分得到,即:

$$F = \int_S p dS \quad (6)$$

在用有限元方法计算电磁场时,场域被离散成很多单元,单元 E 中的表面应力 p 为:

$$p = \frac{1}{\mu_0} (n \cdot B) B - \frac{1}{2\mu_0} B^2 n \quad (7)$$

式中: n 为沿积分表面 S 法线方向的单位向量。

永磁操动机构的合闸和分闸是由电磁和机械综合的过渡过程。在这个过程中,铁心受到电磁吸力克服负载反力而带动其它部件运动。对这个过程的机构动态特性研究,一是可以计算机构的动作时间,进而计算开关触头的动作时间及触头的运动速度;二是确定动作过程中吸力与反力的合理配合,使之既保证动作的可靠性,又能改善机械碰撞,提高电气和机械寿命。动态特性研究的复杂性不仅在于磁路参数的分布性及磁化特性的非线性,还存在着多变量的相互影响,衔铁的快速运动将在线圈中引起反电势,改变了电压平衡时各参量的关系,增加了永磁机构动态特性计算的难度。该软件采用了数值分析方法求解麦克斯韦方程组来获得机构的动作规律。通过建立动态数学模型描述运动过程中电、磁、机械力、机械运动,由一组微分方程式及初值条件来描述动态问题。

永磁操动机构的动态过程,在电路上必须遵循电压平衡方程,在运动上遵循达朗贝尔运动方程,在磁场上遵循麦克斯韦方程,这些方程间存在相互的联系,构成了描述动态过程的微分方程组^[2,3]。

对于直流电压激磁下的机构,描述机构吸合特性的状态方程组如下^[4-6]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = U - iR \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_{mg} - F_t(x, \frac{dx}{dt})}{m} \\ \frac{dx}{dt} = v \\ \psi|_{t=0} = \psi_0 \\ v|_{t=0} = v_0 = 0, x|_{t=0} = x_0 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: U 为直流电压; i, ψ 分别为线圈电流和电磁系统全磁链; t 为时间; m 为系统运动部件归算为铁心处的质量; x 为动铁心位移; F_{mg}, F_t 分别为铁心受到的电磁吸力和运动反力。弹簧负载反力是位移 x 的函数,而空气阻力则是速度 dx/dt 的函数。

求解上述方程组可以获得永磁操动机构的动

态特性。

4 参数化 CAD 绘画设计

该模块的功能是在确定了设计参数和结构尺寸后,能够自动地绘制相应的机械零件图和装配图用于加工生产。在永磁机构零部件和装配图绘图程序的研究与开发中,采用了 AutoLISP 语言开发了该系统的绘图软件,通过应用高级语言编写适用于专用图形应用的宏命令和函数,用来实现“设计计算-绘图”一体化。在编程中充分考虑到软件的适用性和可移植性,采用了多模块和参数化编程技术。绘图程序设计分为图形数学处理、图形分析处理、编写流程图、编写源程序和具体调试程序几个阶段。程序中首先读入部件的结构参数,然后确定图纸大小、确定基准点。利用这个基准点和结构参数可以计算出零部件中各关键点坐标,从而进行基本图形的绘制。当基本图形完成后,进行尺寸、粗糙度、形位公差、汉字符号等的标注,获得完整的零件和装配设计图纸。软件给出的设计图纸对用户是开放的,如果用户需要,可用 AutoCAD 中的交互式命令进行局部修改和其他操作。

5 电子控制线路和设计调试

永磁机构的控制系统是用来接受电信号,并通过逻辑判断最终给出指令控制操动机构动作的装置,一般分为继电器控制和电子控制两类。由于继电器控制线路比较简单,该软件除了可以给出继电器控制线路设计图,还重点进行了电子控制线路和元件设计。

图 2 是永磁机构电子控制示意图。其中,模拟输入信号一般是电流、电压、温度等信号,这些信号进入放大比较环节,和整定值进行比较,结果与手动信号一起进入或门。为了防止外界干扰的影响,在或门后加入数字滤波环节。当发生短路等故障时,放大比较环节对模拟信号进行分析处理,并和整定值进行比较,判断故障类型和处理方法。如发生过流故障,由于不要求速动,延时环节将起作用,当达到延时时间时,阶跃动作信号将输出至或门,如发生短路信号,断路器需迅速开断,则阶跃动作信号不经过延时直接输出至或门。动作信号经过滤波触发单稳触发器,再由隔离驱动送至可控硅的触发电路。图 3 给出了双稳态双线圈的控制原理图。图中 C 为充放电电容,用来储备分合闸所需的电能。以双稳态双线圈结构为例, L_1 为合闸线圈, L_2 为分闸线圈,开关 K_1, K_2 为大功率晶体管,由外部触发电路控制其导通或关断。当 K_1 触发瞬时导通,电容对 L_1 放电,线圈流过

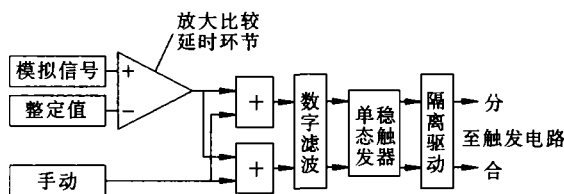


图 2 永磁机构电子控制示意图

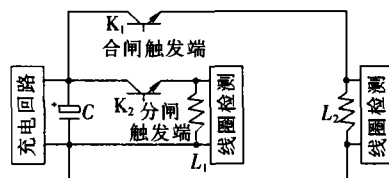


图 3 分合闸线圈控制原理图

瞬时大电流,其产生的磁场力克服永久磁铁合成磁场的力与触头弹簧反力的合力时,动铁心开始运动,完成合闸操作。同样,当 K_2 触发瞬时导通时, L_2 也流过瞬时大电流,提供分闸所需的力。线圈通电时间的长短可以由硬件控制或由软件调整。

6 设计实例

目前,永磁机构设计与分析软件已先后用于多个型号的户内外 12,40.5 kV 真空断路器用永磁操动机构的设计和研制。下面以 VS1 型真空断路器用永磁机构设计为例,给出使用该软件的设计和计算结果。图 4 给出了合闸后由永磁体磁势产生的磁场分布,由于这个磁场的存在,铁心与下端盖产生吸力,使得在合闸线圈断电后能保持断路器触头处于可靠合闸状态。图 5 表示永磁机构合闸和分闸时铁心运动速度曲线。通过对铁心运动速度的分析,可以确定断路器的触头合、分闸速度是否能够满足要求。图 6 给出了机构合闸时线圈电流和触头动作测试曲线。图 7 给出了用该软件设计研制的配 12 kV,31.5 kA 真空断路器的圆柱形双线圈永磁操动机构在线圈不通电情况下动铁心在行程中的受力曲线。图中实线为采用有限元以数值模拟方法计算出的操动机构动铁心受力曲线,

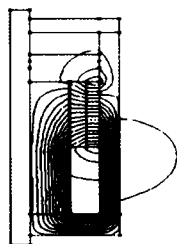


图 4 永磁机构磁场分布

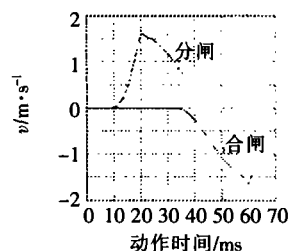


图 5 机构动铁心运动速度

(下转第 39 页)

表4 色拉菜籽油与PEPE油的指标^[5]

性能	PEPE油	色拉油
密度/g·mL ⁻¹	0.970	0.913
运动黏度	3.28 (40 °C)	35.82 (40 °C)
凝固点/°C	<-63	-30
闪点/°C	143	143
ϵ_r (25 °C)	2.45	2.81~3.00
$\tan\delta/\%$ (80 °C)	0.036	0.025
$\rho_v / \Omega \cdot \text{cm}$ (20 °C)		9.94×10^{11}
比色散	188	105
交流击穿电压/kV	60.5 (2.5 mm)	57.2 (2.5 mm)

化碳,其黏度和表面张力非常小。由于国内尚未见到这种浸渍剂,这里采用的浸渍剂仍为色拉菜籽油。

3 结论

通过对比试验研究了不同喷金结构对金属化膜电容器端部接触的影响,发现通过减小喷金面积来改善端部浸渍效果,而提高电容器耐受脉冲能力的方法是不可取的。

对不同浸渍剂对金属化膜电容器端部接触的影响进行了试验,浸渍 PEPE 油的试品性能远远低于

浸渍色拉菜籽油的试品。在开发适合金属化膜电容器的浸渍剂时,必须对浸渍剂与基膜之间的溶胀问题加以特别考虑。

参考文献:

- [1] C A Nucci, S Pirani and M Rinaldi. Electrical-end Contact Degradation of Metallized Polypropylene Capacitors in Power Applications[A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials [C], Tokyo, Japan. 1991.
- [2] 代新,林福昌,李劲,等. 高场强下金属化膜脉冲电容器失效的原因[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 27-29.
- [3] C W Reed, S W Cichanowski. The Fundamentals of Aging in HV Polymer-film Capacitors[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 904-922.
- [4] 张先伟. 高储能密度金属化膜脉冲电容器寿命与绝缘特性的研究[D]. 华中科技大学硕士学位论文, 1999.
- [5] 电机工程手册 第二十九篇 电力电容器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1978.

作者简介:林福昌(1969-),男,博士,副教授,从事高电压技术的研究。

(上接第36页)

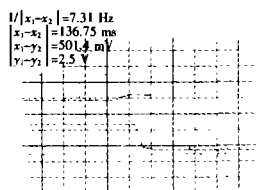


图6 机构合闸时线圈电流和触头动作测试曲线

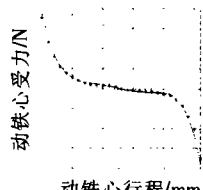


图7 保持力计算与试验对比曲线

*为在液压试验机上实测的机构动铁心受力值。可看出,计算曲线与实测值之间具有较好的一致性。同时由于设计上采用了上下近似对称的结构,永磁操动机构在动铁心处于上下极限位置时具有近似相同的出力特性。

7 结语

(1)该软件可为断路器生产企业设计永磁操动机构系列产品提供实用的设计手段。

(2)使用该软件对多种型号真空断路器进行了永磁操动机构的设计和研制,产品性能满足技术要求。

参考文献:

- [1] 林莘,高会军,铁切. 永磁操动机构磁场数值计算[J]. 高压电器, 2000(3):3-6.
- [2] 高会军,林莘,蔡志远. 永磁操动机构磁场计算及动特性分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2000(6): 490-493.
- [3] Lin Xin, Gao Huijun, Xu Jianyuan. Calculation and Analysis of the Coupled Problem in the Permanent Magnetic Actuator for Vacuum Circuit Breaker[A]. IEEE CEFC [C], Milwaukee, USA, 2000.
- [4] Lin Xin, Gao Huijun, Cai Zhiyuan. Magnetic Field Calculation and Dynamic Behavior Analyses of the Permanent Magnetic Actuator[A]. XIXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum[C]. Xi'an Jiaotong University, 2000.
- [5] 费鸿俊,张冠生. 电磁机构动态分析与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [6] Lech Nowak, Krzysztof Kowalski. The 3D Coupled Field-circuit Simulation of Transients in Nonlinear Systems[J]. IEEE Trans. Magn., 1996, 32(3): 1 078-1 081.

作者简介:李岩(1962-),男,博士,教授,从事电磁场理论分析计算及电器开关研究。

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!