

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.11.024

一种基于参数化设计的Workbench CFX动态流场计算方法

王瑞丽¹, 惠 伟^{1,2}, 张 建¹, 杨 龙¹

(1. 西安西电开关电气有限公司, 西安 710077; 2. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 笔者从Ansys CFX软件流场计算的优势出发,说明了其是一款优良的计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)软件,并介绍该软件的一种动态流场计算方法及其可能存在的问题,即绘图软件与计算软件对几何面的识别存在误差。针对该问题,文中集成Workbench 几何处理模块(design model, DM)、参数化驱动模块(parameter set)和脚本语言(scripting)进行解决。最后,以某高压断路器灭弧室实际流场动态计算为例,说明了该方法的可行性和合理性,可满足灭弧室设计初期工程设计需求。该方法有效避免了动网格计算中相邻时间步几何模型的识别问题,拓展了优化模块的使用功能,实现了运动部件的参数化;对于一般意义下的优化分析问题,该方法也提供了一种很好的参考思路。

关键词: 灭弧室; 动态流场计算; Ansys CFX; 参数化设计; 几何识别

Dynamic Flow Field Calculation Method of Workbench CFX Based on Parametric Design

WANG Ruili¹, HUI Wei^{1,2}, ZHANG Jian¹, YANG Long¹

(1. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The advantages of the CFD software Ansys CFX in the flow field calculation are described. However, a possible problem may exist in a certain dynamic flow field calculation method of the software, i.e. there is an geometry identification error between CAD and CAE. In order to solve this problem, the Workbench geometric processing module, set parameter module and scripting command are integrated. Moreover, the actual dynamic flow field in arc interrupter of a high voltage circuit breaker is calculated, and the result verifies the feasibility and rationality of the proposed method. It is concluded that this method can effectively avoid the geometry identification error between two near calculation steps in the dynamic flow field calculation, extend the function of parameter set to achieve parametric design of relevant motion component, and provide a reference for common optimization problem.

Key words: arc interrupter; dynamic flow field calculation; Ansys CFX; parametric design; geometry identification

0 引言

Ansys CFX 作为是全球第一个通过 ISO9001 质量认证的大型商业 CFD 软件^[1]。该方法融合了有限元和有限体积方法,从而同时兼顾了“守恒性”和“精确性”,同时默认采用全隐式算法,应该比其他流场软件(如 Fluent)具有很大的优势。而同时求解动量方程和连续性方程;因而可以看出,CFX 采用了一种更加稳健的算法,对于一般的 CFD 分析问题,不需要进行参数的过多设置,而软件自身可智能化选择,因而使得其在实际应用中更加广泛地被应用,容易被大

众所接收。这是 Fluent 软件无法拥有的优越性^[2-3]。

相比于 Fluent 采用外部程序植入方法(UDF)^[4-5], CFX 的 CEL 语言和 CCL 语言很好解决了开发接口问题,对编程者的要求大大降低。同时 CFX 内嵌电磁场相关模块,因而避免了同类软件在计算时的诸多额外工作量。

然而,由于自身软件的问题,CFX 的动网格功能,只能够直接处理具有网格变形的小变形问题的研究,而不能像 FLUENT 那样实现网格较高级别的变形^[6-10]。针对具有大变形的 CFX 的动网格技术,目前存在几种网格重构方法^[11-14],但由于编程、环境变量设置等种种原因增加了应用难度,其普遍应用还

无法展开。

其对网格的变形只是基于简单的压缩和拉伸过程。将大变形分解为较小的变量进行“接龙力棒”式的计算式目前一个很好的计算思路。这里具有微小差别的几何体,需要在外部 CAD 文件中处理后逐个输入到 CAE 软件中。

但是,由于不同软件间对几何面识别的差异,在 CAD 软件中绘出的几何模型,无法在 CAE 软件中被完全识别,因而可能造成相关面在边界定义时出现失败。具体来说,上一步定义好的相关面,在输入下一步发生微小变形后的几何体后,由于 CAE 软件自身无法实现相关面的自动识别,经常在网格划分时还需要重新定义相关面,因而导致计算程序化无法实施,而不得不采用手动方式完成,这将大大降低计算效率。

针对上述 Ansys CFX 动态流场计算中存在的这一潜在问题,文中提出了一种解决方法。即将各个时间步骤下的几何模型导入,变为只导入同一几何模型,然后利用 Workbench 中 DM 模块的几何处理能力,通过将涉及变动的相关位移通过 parameter set 模块实现参数化。这里,实施动态流场计算,只需导入最初始的几何体而不必输入批量输入,因而有效避免了将具有微小差别的批量几何体导入 CAE 软件时存在的相关面的识别问题;整个计算过程的实现是通过 scripting 程序化完成。该方法有效地解

决了 Ansys CFX 动态流场计算中几何面的识别问题,因而避免了上述潜在的流场计算失败;通过参数化驱动模块实现相关参数的几何驱动,来实现动态流场计算,也为动态流场计算提供了一种新的思路。对于 Workbench 其他模块的优化,如强度计算,电场计算等,这种思路也可以进行推广。

因而,在该平台下,各子模块连接示意图见图 1。

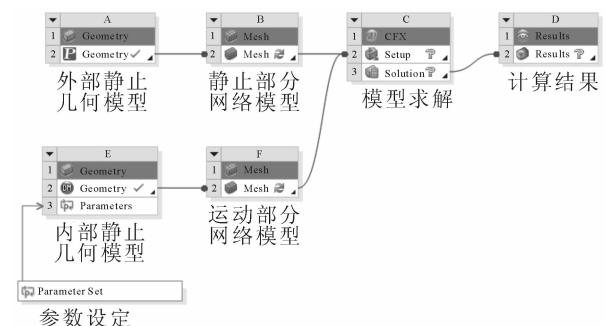


图 1 Workbench 连接流程图

Fig. 1 Workbench flow chart

1 参数化计算原理

该程序充分利用了 Workbench 中 DM 模块的几何处理能力,通过将其中几何处理涉及到的变量参数化,即引入 parameter set 模块,从而在 Workbench 软件内部便可实现模型的几何改变,故而解决了 CAD 和 CAE 软件不兼容问题对动态流场计算造成的可能问题。其计算流程图见图 2。

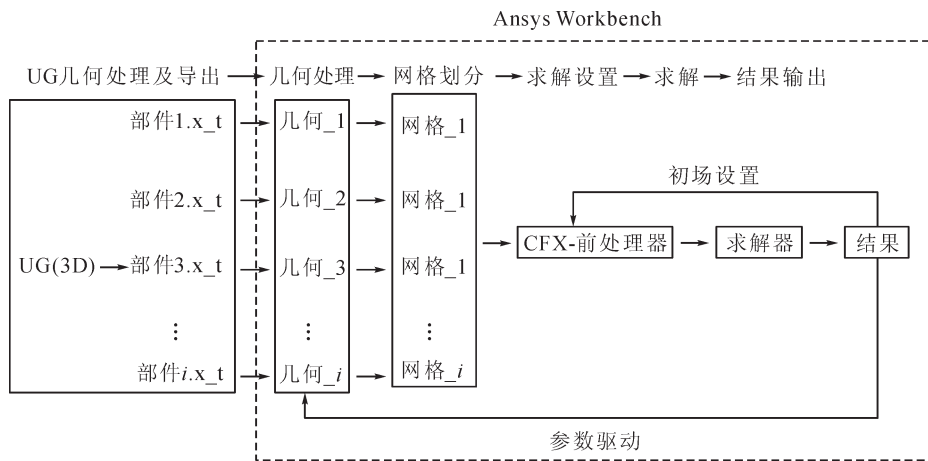


图 2 计算程序流程图

Fig. 2 Calculation programming flow chart

在该研究方法中,首先应用了 DM 中的几何处理能力。DM 作为 Workbench 的专业几何处理软件,虽然没有专业 CAD 软件强大的绘图和几何处理能力,但是其在三维几何生成、几何修改和实体操作方面具有一定的功能,可以实现几何体的镜像、移动、复制和布尔运算等,笔者主要应用了其阵列

(pattern)命令。在该命令中,通过对运动相关部件进行线性阵列从而达到移动的目的。而且在该命令中,可以将移动的距离参数化并传输 parameter set 中。对于初始输入的几何体,采用几何抑制(suppress)功能可使其不会出现在后续的流场计算流程中。

在 Workbench 平台中,parameter set 模块本身

是主要用于模型参数优化设计,它能够将其他模块中相关变量参数化。在文中,笔者将 DM 中相关运动部件的运动距离参数化,并通过 parameter set 模块实现对该参数的改变,具体操作过程则是通过 scripting 程序来实现的。

scripting 是 Workbench 自身的一种基于 python^[15] 语言的开发工具,Workbench 可以基于其对相关界面上的操作进行录制、修改、编辑和应用,从而实现更复杂的功能。

可将笔者参数化动态流程计算方法的实现,主要集成以上 3 个模块,即 DM 几何处理、parameter set 参数化驱动及 scripting 编程。

2 一般步骤

文中基于参数化的动态流场计算,在其实施过程中,主要有几个步骤。

1)数据预处理。基于原始机械特性曲线,采用数学插值的方法,获得等位移运动的时间间隔及其对应时间点。

该方法采用 Ansys CFX 进行动态流场计算的原理,就是基于每次计算的运动距离相等,这即保证了在参数不变的情况下,网格质量不会出现问题,也实现了前一步计算的结果能够作为后步计算的初场使用。

2)UG 处理及文件导出。在对实际三维模型进行简化整合处理后,可以将模型分为两部分,即运动和静止部分,并采用“分区域”划分原理进行几何“分区域”。最终,整个几何模型分为 3 部分:①罐体大空间内流动静止区域;②内部包含运动件的静止域;③运动部件。

通过后两者相减,可以得到流场计算中包含动边界的流体区域。

在将生成的几何导出时,首先将模型①导出至一个几何,而将模型②和③导出至一个几何中。

3)Ansys CFX 平台设置。该部分的主要工作是,根据上文所述的参数化计算原理,搭建诸如图 1 所示的计算流程图,并依据流体计算的基本步骤分别在 DM, meshing, setup 和 solution 中进行相关操作。

4)计算流程控制。采用 scripting 对相关操作进行录制,并利用 python 对其进行修改,以实现循环操作功能。

3 应用举例

为证明文中所述方法的正确性,以某高压断路器灭弧室的动态流场计算做为算例进行了研究。

目前工程上对 CAE 软件的应用要求,更多的集中在软件智能化高、人员经验少、计算可行性高、计算容错率高及具有一定的准确性,因而进行冷态计算在整个断路器的设计初期具有重要指导意义,特别是在目前热态计算理论不太成熟,软件计算周期过程,对人员知识背景要求过高的情况下,采用该方法进行流场冷态计算无疑具有一定意义^[16-19]。

相关运动部件按照图 3 所示曲线进行运动,罐体内气体为 SF₆,并设定初始压力为 0.6 MPa。

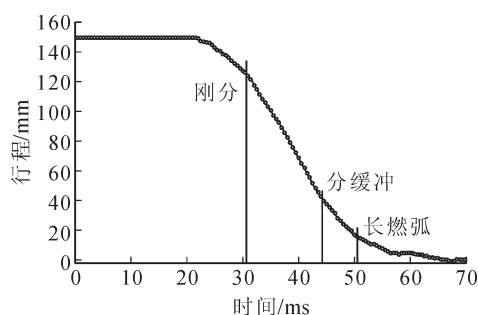


图 3 动触头行程曲线图

Fig. 3 Curve graph of moving contact stroke

3.1 数据预处理

文中所涉及的流体(SF₆)相关物性参数需要重新设定,采用 MATLAB 软件^[20]对文[16]中的相关物性数据进行拟合,可得到各参数随压力和温度变化的表达式。最后,相关物性参数的定义通过 CFX 的表达式功能实现。同时,由于触头分闸前后几何模型差别较大,尤其是某些细小的间隙,因而分闸前后单次几何变形不同。最终,综合利用 MATLAB, excel 等数据处理软件,可得到图 4 所示对应表格,并将其带入到 CFX 软件中。

3.2 UG 处理及文件导出

在进行实际计算时,对实际模型中相关细节进行了简化处理,但对于喉道和动静触头上的几何并没有进行处理,以保证计算的准确性。

在此基础上,通过必要的布尔运算,整个模型分为了 3 部分,即内部静止部分、内部运动部分和外部壳体,见图 5。

在此基础上,用图 5 中(c)和(a)相减,便可将模型分为运动部分和静止部分,为提高网格划分效率,在进行几何处理中采用几何分域示意图见图 6。

在几何模型导出时,首先将图 6 模型(a)导出至一个单一几何(命名为 outside-fix.x_t),而将图 6 模型 (b)和(c)导出至一个单一几何体(命名为 inside-move.x_t)中。

3.3 Ansys CFX 平台设置

根据上文所述的参数化计算原理,搭建

时间/s	位移/mm	位置/mm	时间/s	位置/mm	时间步长/s
0.000 0	0.0	0	0	1	0.000 7
0.000 5	0.5	1	0.000 7	1	0.000 2
0.001 0	2.2	2	0.000 9	1	0.000 9
0.001 5	2.6	3	0.001 8	1	0.001 0
0.002 0	3.2	4	0.002 8	1	0.000 3
0.002 5	3.5	5	0.003 1	1	0.000 2
0.003 0	4.6	6	0.003 3	1	0.000 2
0.003 5	6.9	7	0.003 5	1	0.000 2
0.004 0	8.8	8	0.003 7	1	0.000 8
0.004 5	9.0	9	0.004 5	1	0.000 3
0.005 0	11.3	10	0.004 8	1	0.000 1
0.005 5	11.9	11	0.004 9	1	0.000 6
0.006 0	13.8	12	0.005 5	1	0.000 3
0.006 5	15.6	13	0.005 8	1	0.000 3
0.007 0	17.4	14	0.006 1	1	0.000 2
0.007 5	18.6	15	0.006 3	1	0.000 3
0.008 0	20.5	16	0.006 6	1	0.000 3
0.008 5	22.2	17	0.006 9	1	0.000 4
0.009 0	23.5	18	0.007 3	1	0.000 3
0.009 5	26.0	19	0.007 6	1	0.000 3
0.010 0	28.2	20	0.007 9	1	0.000 2
0.010 5	32.0	21	0.008 1	1	0.000 3
0.011 0	35.0	22	0.008 4	1	0.000 4
		23	0.008 8	1	0.000 3
		24	0.009 1	1	0.000 2
		25	0.009 3	1	0.000 2
		26	0.009 5	1	0.000 2
		27	0.009 7	1	0.000 3
		28	0.010 0	1	0.000 1
		29	0.010 1	1	0.000 1
		30	0.010 2	1	0.000 2
		31	0.010 4	1	0.000 1
		32	0.010 5	1	0.000 2
		33	0.010 7	1	0.000 1
		34	0.010 8	1	0.000 2

原始数据

整理后数据

图 4 时间、位移和时间步长对应关系表

Fig. 4 Corresponding relation table for time, distance and time step

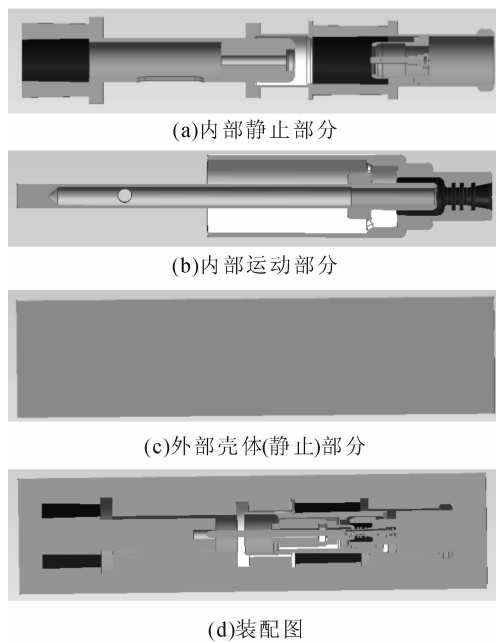


图 5 简化后的几何模型 3 部分及其装配图

Fig. 5 Geometric models after simplified and their assembly

Workbench 流程计算平台,如图 1 所示。将 outside-fix_x_t 导入至 outside-fix-geometry 模块中,而将 inside-move_x_t 导入至 inside-move-geometry 模块中。

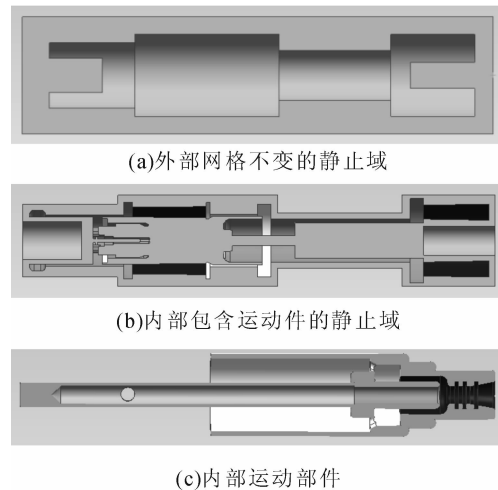


图 6 分域后几何模型及其装配图

Fig. 6 Geometric models after simplified and their assembly

在 inside-move-geometry 中,通过 DM 中必要的几何处理,将内部运动部件的运动距离做为参数进行处理,其网格为非机构网格。

求解连续性方程和动量方程。选择 SST 的湍流模型,并引入非稳态计算方法,流体物性设置按照上文所述进行。动态运动参数见图 4。

在计算过程中,通过对网格变形过程中的网格质量和运动距离进行监控,以保证计算按照预期进行,按照要求设定非稳态计算的初场。

3.4 Workbench 流场计算控制

编写包括循环程序的 scripting 程序,在 Workbench 中读入并运动,以保证整个动态流场计算持续进行下去。

最终计算得到的不同开距 (20%、40%、60% 和 80%) 模型中界面压力(单位: atm, 1 atm=1.013×10⁵ Pa)和速度云图见图 7,这与相关文献^[16,19]中计算结果较为一致。

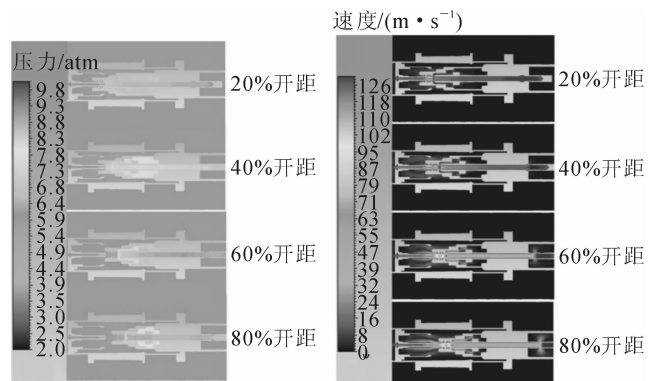


图 7 不同开距中截面压力和速度云图

Fig. 7 Mid-plane pressure and velocity contour at different distance

4 结语

针对动态流场计算中存在相邻计算步中 CAD 与 CAE 软件对几何面的识别误差问题, 笔者通过集成 DM 几何处理模块、parameter set 参数化驱动模块和 scripting 语言, 提出了一种方法, 解决了这一潜在的致命问题; 并将其在某高压断路器灭弧室流场中进行了实例计算, 验证了此方法的可行性和合理性, 以满足目前工程设计中对灭弧室初步计算的要求。

该方法有效地解决了动网格计算中由于相邻时间步几何模型不同造成在 CAE 软件中难以识别的问题, 省去了几何文件的批量导出工作; 同时, 笔者将优化分析模块 parameter set 的功能拓展到了动态流场计算中的参数化设计中, 其结合 DM 中相关的几何处理功能, 为常见的物理问题优化分析提供了一种求解思路。

参考文献:

- [1] 丁源, 吴继华. Ansys CFX 14.0 从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 5-6.
DING Yuan, WU Jihua. From entry to master of CFX Ansys 14.0[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 5-6.
- [2] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 18-19.
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis-principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 18-19.
- [3] 马希金, 王智, 张明紫. 基于 CFX 软件油气混输泵压缩级流场模拟及分析[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(3): 32-36.
MA Xijin, WANG Zhi, ZHANG Mingzi. Numerical simulation and flow analysis on compression stage of oil-gas mixture pump based on CFX software[J]. Oil Field Equipment, 2011, 40(3): 32-36.
- [4] 张晓东, 张培林, 傅建平, 等. 基于 Matlab/Fluent 的协同仿真技术[J]. 计算机工程, 2010, 36(20): 220-221.
ZHANG Xiaodong, ZHANG Peilin, FU Jianping, et al. Collaborative simulation technology based on matlab/fluent[J]. Computer Engineering, 2010, 36(20): 220-221.
- [5] 谢萌. 基于 CFX 接口运用的气动弹性研究[J]. 中国科技信息, 2015(15): 27-28.
XIE Meng. The study on the application of CFX based on the interface[J]. China Science and Technology Information, 2015(15): 27-28.
- [6] 隋洪涛, 李鹏飞, 马世虎, 等. 精通 CFD-动网格工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
SUI Hongtao, LI Pengfei, MA Shihu, et al. Master in CFD-dynamic mesh engineering simulation and case study[M]. Beijing: People's Posts & Telecommunications Publishing House, 2013.
- [7] JIANG Y, VALDIERO A C, ANDRIGHETTO P L, et al. Analysis of pneumatic directional proportional valve with CFX mesh motion technique[J]. ABCM Symposium Series in Mechatronics, 2008(3): 510-518.
- [8] 王阳阳, 王勇. 基于 CFX 动网格技术的大流量开关阀动态仿真[J]. 煤矿机械, 2014, 35(9): 61-62.
WANG Yangyang, WANG Yong. Dynamic simulation for large flux valve based on moving-mesh technology of CFX[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(9): 61-62.
- [9] SRIKANTH C, BHASKER C. Flow analysis in valve with moving grids through CFD techniques[J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(3): 193-201.
- [10] 郭崇志, 朱寿林. 安全阀开启流场机理的数值仿真与实验研究[J]. 液压与气动, 2012(2): 94-99.
GUO Chongzhi, ZHU Shoulin. Numerical simulation and experimental study of safety valve opening flow field mechanism[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2012(2): 94-99.
- [11] 张潇, 王延荣, 张小伟, 等. 基于多层动网格技术的流固耦合方法研究[J]. 船舶工程, 2009, 31(1): 64-66.
ZHANG Xiao, WANG Yanrong, ZHANG Xiaowei, et al. Study on the fluid solid coupling method based on multi-moving grids technique[J]. Ship Engineering, 2009, 31(1): 64-66.
- [12] 李华伦. 发射回收一体化空气炮性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
LI Hualun. Study on the performance of the integrated air gun for the launch and recovery[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [13] 华晔. 基于动网格技术的水轮机瞬态流动分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
HUA Ye. The transient flow in hydraulic turbine dynamic grid based on[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [14] 陈超. 多级罗茨干式真空泵的流动特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
CHEN Chao. The flow characteristics study of roots dry vacuum pump[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [15] 肖建, 林海波. Python 编程基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
XIAO Jian, LIN Haibo. Programming basis of python language[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [16] 姜旭, 贾申利, 李兴文, 等. 基于真实气体模型的 SF₆ 断路器中冷态气流场特性的仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 167-173.
JIANG Xu, JIA Shenli, LI Xingwen, et al. Simulation and

- analysis of cold flow field characteristics in SF₆ circuit breakers with UDRGM[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7):167-173.
- [17] 徐 冲,曹云东. 基于多物理场耦合的 SF₆ 断路器冷态气流场仿真分析[J]. 电气制造, 2013(1):48-52.
- XU Chong, CAO Yundong. Simulation and analysis of cold air flow field of SF₆ circuit breaker based on multi physical field coupled[J]. Electrical Manufacturing, 2013(1):48-52.
- [18] 孙宝龙. 双断口结构对 SF₆ 断路器介质恢复特性影响的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2013.
- SUN Baolong. Study on the effect of double fracture structure on the dielectric recovery characteristics of SF₆ circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [19] 王尔智. 高压 SF₆ 断路器介质恢复特性的数值模拟[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- WANG Erzhi. Numerical simulation of medium recovery characteristics of high voltage SF₆ circuit breaker[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [20] GUIDE M U. The mathworks[J]. Inc., Natick, MA, 1998(5): 333.
- 王瑞丽(1964—),女,工程硕士,主要从事高压断路器及 GIS 设计分析工作。
- 惠 伟(1987—),男,硕士,主要从事高压断路器灭弧室中动态流场设计与优化分析工作。

《高压电器》2016 年第 11 期广告单位

彩色广告

封一: 莱茵技术(上海)有限公司
封二: 前视红外光电科技(上海)有限公司
封三: 珠海思创电气有限公司
封四: 广东吉熙安电缆附件有限公司
前插 1: 北京京东方真空电器有限责任公司
前插 2: 常州市盈能电气有限公司
前插 3: 西安华伟电力电子技术有限责任公司

前插 4: 宁波天安(集团)股份有限公司限
前插 5: 成都凯赛尔电子有限公司
前插 6: 常州帕斯菲克自动化技术股份有限公司
前插 7: 温岭市雅博输送设备有限公司
前插 8: 江苏常新密封材料有限公司
前插 9: 上海乐研电气科技有限公司
前插 10: 陕西斯瑞工业有限责任公司
前插 11: 攀时(上海)高性能材料有限公司
前插 12: 北京研华兴业电子科技有限公司