基于工程应用的断路器动态气流场计算及其试验验证

针对工程应用中经常遇到的动态流场计算问题，并基于工程应用对仿真时间、计算准确度和人员经验的现实要求，采用一种基于Workbench平台的CFX求解器进行求解，并引入一套计算监控理论对整个计算过程进行了监控和评估，结合某高压断路器灭弧室中动态气流场计算，进一步验证了这套方法及其过程控制的正确性和实用性；计算结果的准确度则通过仿真计算与实验测量进行对比，说明该计算准确度的工程可行性。该动态流场计算方法对CFX原有算法中的某些不足进行了改善，同时第一次引入了一套动态流场计算的过程控制体系，便于应用人员在软件使用过程中快速而便捷地了解动态计算过程、控制计算过程，满足工程应用对仿真计算的要求。

张震锋　阮艳丽　惠　伟/西安西电开关电气有限公司

张震锋/高级工程师

关键词/Keywords
Workbench平台·
动态流场·
计算控制系统·
计算流体动力学（CFD）·

0　引言

动态流场计算作为工程中经常遇到的研究课题，它不仅是一种瞬态流动问题，更是一种涉及部件运动的动网格流动问题。目前的动态流场计算多采用基于Fluent的动网格方法，并借助自定义编程（UDF）实现，该方法在进行计算时，对网格划分、参数设置和编程经验有特定的要求。

有限体积（Finite Volume Method，FVM）作为CFD中最为常见的一种数值方法，对其区域的离散基本可分为内节点法和外节点法两种[1]，商用软件Ansys Fluent采用了前者的离散方法，而Ansys CFX则应用了后者。关于这两种方法在非机构网格中的计算收敛性和准确性，文献[2-3]中提出了自己的观点，即外节点法比内节点法在收敛速度和截断误差上方法更好。

随着“中国制造2025”对中国企业在创新机制和人才建设方面提出更高的要求，CAE仿真在制造企业中所起的作用越来越大，尤其是在产品的结构设计和优化方面。以笔者所在的企业为例，通常试品在试验之前都要经过几种甚至几十种试验方案的对比分析。更为复杂的是，所遇到的产品问题需要采用三维动态流场计算来实现，这使得整个产品设计周期大大延长。而且计算中常常出现各种问题（如出现负体积，时间步长很难控制，实际运动并未按照预期进行，模型复杂导致边界条件赋值错误，网格过于粗糙导致计算出现奇异值，计算不收敛，相关设置出现问题等），一旦计算出现问题，了解具体是哪方面的问题并加以解决往往对仿真人员的经验要求较高，因而进一步导致花费较长时间。

基于企业产品生产研发的迫切性，其仿真计算的周期要尽可能短，而计算结果的准确性只要能够在工程应用的范围之内即可。此外，计算程序更简单，使用人员经验要求更少，特别是在计算过程中一旦出现问题，能够快速找到问题所在并加以解决，也逐渐成为趋势。

因此，对企业仿真计算而言，在保证计算结果收敛且具有一定准确性的前提下，尽可能缩短计算时间，减少人员的使用经验，并能快速解决出现的各类问题，是其仿真计算的重点。本文正是基于这样的课题背景提出了自己的一套

动态流场计算方法及计算控制系统。

1 求解理论

本文基于以上动态流场计算中所遇到的问题，提出一种基于Workbench平台的CFX求解器并进行了求解，同时引入一套计算监控理论对整个计算过程进行监控和评估，其计算流程和相关模块如图1所示。

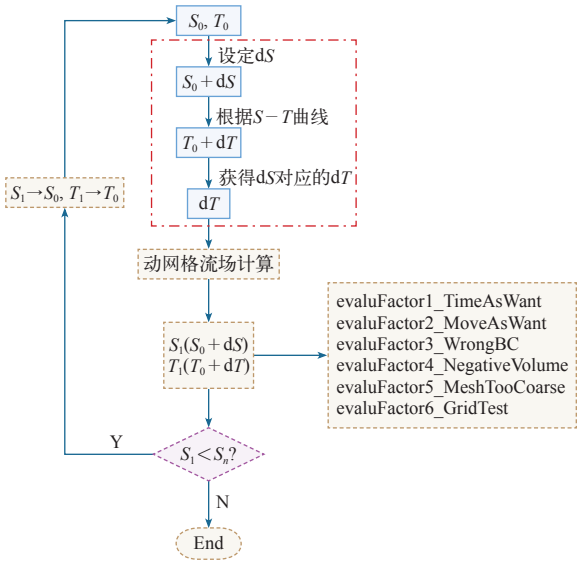

图1 计算流程及控制模块示意图

在动态求解流场中，其最大的特点是可以将动网格计算得到的运动时间和位移反馈给前期设置，并及时更新前期设置。

为了提高计算速度，下一步的时间步长可以根据计算得到的运动件运动情况进行重新计算赋值，即时间步长是随着运动速度时刻变化的；另外，由于采用分区划分网格的方法，能够保证每次重构的网格尽可能少，以进一步提高计算速度。

求解控制模块是在每次求解完成后，通过相关参数对计算结果进行评估，以判断动网格计算是否满足要求。主要包括判断时间预期的参数evaluFactor1_TimeAsWant、位移预期的参数evaluFactor2_MoveAsWant、边界条件预期的参数evaluFactor3_WrongBC、是否出现负体积的参数evaluFactor4_NegativeVolume、网格是否满足预期的参数evaluFactor5_MeshTooCoarse及网格加密的验证参数evaluFactor6_GridTest。

CFX的数据拟合是一种采用拟合函数及表达式的拟合方法，该方法在进行数据拟合时，利用一种基于距离权重的拟合。该方法在实践中通常遇到的问题是实际运动的距离和期望运动的距离不匹配，因而使整个计算存在误差。针对此问题，本文采用CFX求解器外部的数据进行拟合，并利用评估参数evaluFactor1_TimeAsWant、evaluFactor2_ MoveAsWant对计算过程中的时间和位移进行监控，确保每一步都能按照预定的行程进行。而且对于数据拟合的方法，可以在程序中根据自己需要进行选择，它们是保证计算准确性的重要评估参数。

由于实际工程的模型十分复杂，边界条件赋值比较容易出错。对动态计算而言，一旦前一时间步出现了边界条件给错的情况，则可能是CAE人员的粗心或者考虑不周造成的，也可能是模型更新过程中某些突发事情造成的，而往往分析人员对此很难察觉。基于动态计算中固定面和运动面的面积不会发生变化这一原理，本文引入evaluFactor3_WrongBC这一评价边界设定是否正确的评估标准。

evaluFactor4_NegativeVolume是基于动网格中经常出现负体积现象提出的控制和评估参数。CFX由于不具有Fluent的动网格预览功能，因而在计算过程中可能出现负体积现象。通常在计算过程中，即使出现了负体积，动态计算还是会继续下去，从而造成影响，因而本参数主要针对这种情况进行。设定的依据是：一旦出现负体积，本步的计算结果与上一步的计算结果相同，根据此原理本文设置了判断负体积是否存在的标准。

evaluFactor5_MeshTooCoarse主要用于判断所设置的网格是否过于粗糙所导致的结果，导致局部值过大或者过小，因而这种误差的积累对动态计算有较大的影响。通过设定这一个参数，可用于判断是否存在某一个网格过稀疏的情况。

evaluFactor6_GridTest主要用于计算结果无关性的验证。为了在计算过程中验证网格无关性，需要时刻对所关心的数值进行对比，一旦该参数超过一定范围，即可认为采用细网格进行计算是

没有必要的，这样极大地减少了工作量。该参数还可以用于对不同方案进行动态计算时相关参数的对比。

以上动态流场计算流程和求解控制模块相关参数的实现，具体是通过Ansys Workbench自带的脚本语言（Script）和参数化设计工作（DesignExpolrer），并借助编写基于Ironpython的程序来实现的。该方法的优势在于对网格的限制较少，而且充分利用了CFX在计算准确度和收敛性方面的优势。

2 算例验证及其试验验证

2.1 计算算例

高压断路器灭弧室气流场计算是动态流场计算的一个重要应用，同时在高压开关产品制造企业中的应用广泛。其灭弧室运动合闸状态相关部件示意图如图2所示。

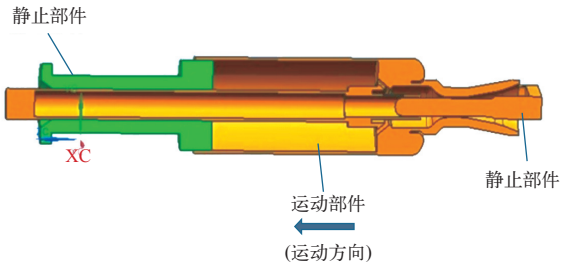

图2 灭弧室运动合闸状态相关部件示意图

其运动特性和速度特性曲线分别如图3和图4所示。

从图4可以看出，对运动部件而言，其速度在整个运动过程中变化是十分剧烈的，运动开始和结束阶段速度为2～4 m/s，而15～20 s阶段速度最大可达到18 m/s，因而在整个运动过程中，采用变时间步长的动网格算法是十分必要的。

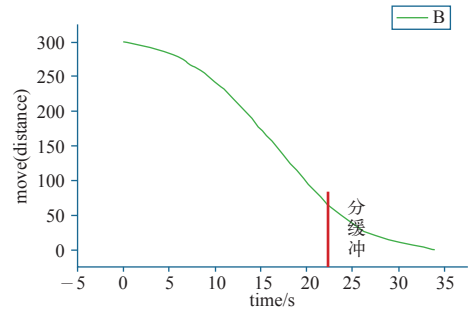

图3 运动行程特性曲线

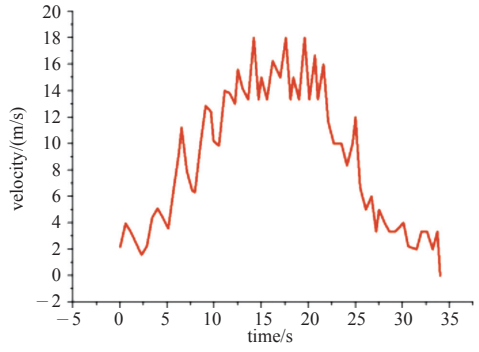

图4 速度特性曲线

基于文献[4-6]，本文在保证相关部件准确性的前提下，利用三维CAD软件强大的模型处理功能，对其他部件的细节部分进行近似和简化处理，同时，基于断路器工作原理，在整个部件（运动件和静止件）外部存在一圆柱外壳包裹。Workbench平台相关计算模块结构如图5所示，输入和输出参数列表如图6和图7所示。

为了减少手工操作和网格重新划分的时间，将流体计算区域分成若干个子区域，各子区域之间通过交界面链接。

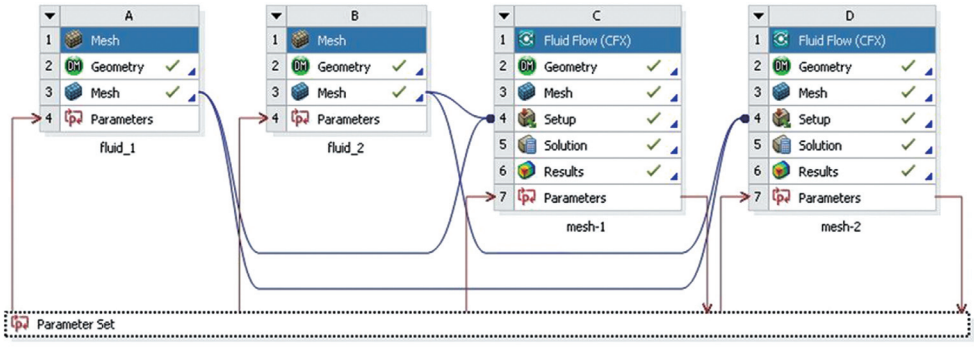

图5 Workbench平台相关计算模块结构

Input Parameters			
mesh-1 (C1)			
P41	dT	0.2	
P44	dMoveNoUnit	-0.4	
P46	main_extrude	0.26316	m
P47	main_move	0.047964	m
P55	N	1	
P56	CaculateTime	2136	
P61	deg	9	
P85	mesh-1-refine	1	
fluid_2 (B1)			
P3	Fluid_2_move	0.047964	m
fluid_1 (A1)			
P53	fluid_1_move	0.26316	m
mesh-2 (D1)			
P68	main_extrude	0.26316	m
P69	main_move	0.047964	m
P70	dT	0.2	
P71	dMoveNoUnit	-0.4	
P72	N	1	
P73	CaculateTime	2136	
P74	deg	9	
P86	mesh-1-refine	1.1	
P14	MoveBeginNoUnit	47.964	
P15	MoveEndNoUnit	47.564	
P16	TimeBeginNoUnit	315.42	
P17	TimeEndNoUnit	315.62	

图6　输入参数列表

Output Parameters		
mesh-1 (C1)		
P35	TimeGet	0.2
P36	dMoveGet	-0.40001
P38	ContactVel	-2
P39	evaluFactor3_ WrongBC	1
P40	MoveEndGet	47.752
P66	evaluFactor4NegativeVolume	1
P67	evaluFactor5MeshTooCoarse	1
P83	keyParameterMesh1	5.0317E+05
mesh-2 (D1)		
P75	TimeGet	0.2
P76	dMoveGet	-0.40001
P77	ContactVel	-2
P78	evaluFactor3_ WrongBC	1
P79	MoveEndGet	47.752
P80	evaluFactor4NegativeVolume	1
P81	evaluFactor5MeshTooCoarse	1
P84	KeyParameterMesh2	5.6317E+05
P30	evaluFactor1_TimeAsWant	1.0208
P31	evaluFactor2_MoveAsWant	0.99932
P82	evaluFactor6_GridTest	1

图7　输出参数列表

将处理好的几何模型导入到WB的DM模块中，并应用Meshing进行四面体网格的剖分。主要包括边界条件、初始条件和物性材料等相关设计。其中各边界均设置为固体壁面条件，初始条件设定为常温300 K，表面压强为5 atm（1 atm＝101.325 kPa）。气体材料根据SF_6物性参数设定，采用瞬态气流场算法进行计算。最终得到的计算结果如图8和图9所示。

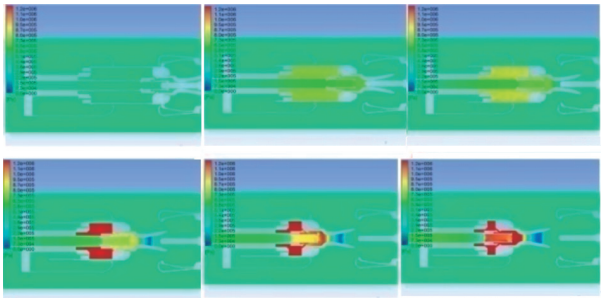

图8　不同时刻中截面压力分布

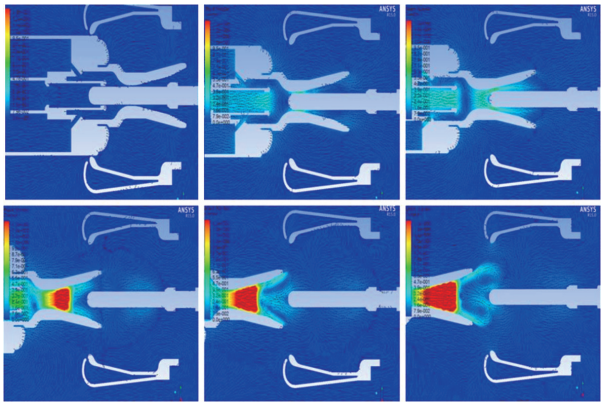

图9　不同时刻中截面速度矢量分布

2.2　试验验证

为了验证计算的准确度在工程应用的合理范围内，通过在灭弧室内植入微型压力传感器来对灭弧室中的压力进行测量[7-8]。在断路器动作过程中，灭弧室内气流变化引起压力传感器感应膜片振动形成电信号，通过外部的断路器型式试验数据采集装置（IED）采集电信号，并通过标定过的电压/电流－气压转换计算出真实气压值，在软件中查看波形读取数据，试验测量装置示意图如图10所示。

最终得到的试验测量结果与通过该CFD方法得到的相同地点的压力值如图11所示。图11中显示了速度分别为9.8 m/s和11.5 m/s的CFD计算结果。由

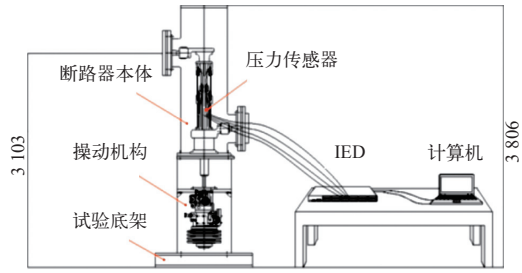

图10　灭弧室压力测量试验装置示意图

此可以看出，虽然计算结果存在一定误差，但总的计算和测量趋势是一致的，也符合理论计算的结果。这种计算误差针对工程应用来说是可以接受的。

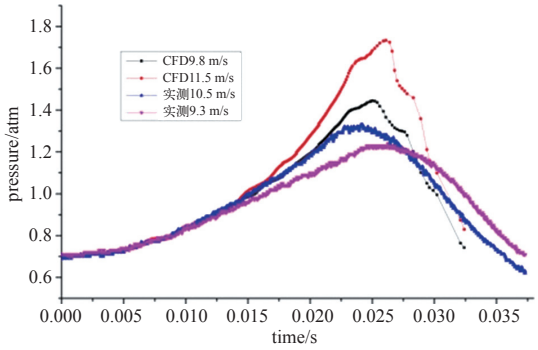

图11　压力值对比（试验 V_s CFD）

3　结束语

针对动态流场计算问题，本文提出了一种基于Workbench平台的CFX求解方法，该方法能够弥补CFX原有算法中的某些不足，同时第一次引入了一套动态流场计算的过程控制体系，便于应用人员在软件使用过程中了解动态计算过程和控制计算过程，从而快速、准确和便捷地进行CFD仿真工作，更好地推广仿真在企业生产实际中的应用。

参考文献

[1] 陶文铨．数值传热学 [M]．西安：西安交通大学出版社，2001．

[2] Yu G，Yu B，Sun S，et al．Comparative study on triangular and quadrilateral meshes by a finite-volume method with a central difference scheme [J]．Numerical Heat Transfer，Part B：Fundamentals，2012，62 (4)：243-263．

[3] Yu G，Yu B，Zhao Y，et al．Comparative studies on accuracy and convergence rate between the cell-centered scheme and the cell-vertex scheme for triangular grids [J]．International Journal of Heat and Mass Transfer，2012，55 (25)：8051-8060．

[4] 王瑞丽，惠伟，张建，等．基于UG和ANSYS CFX二次开发的灭弧室动态流场研究 [J]．高压电器，2017，53 (2)：120-124．

[6] 惠伟，杨龙．一种基于UGNX和Workbench的三维灭弧室动态流场计算方法 [J]．电气时代，2016 (8)：97-101．

[7] 刘卫东，吴俊勇，黄瑜珑，等．SF_6断路器强电流开断喷灌内压力测量 [J]．中国电机工程学报，2010，30 (7)．

[8] 刘克彬，林莘．252 kV SF_6断路器空载时压力特性试验研究 [J]．高压电器，2009，45 (1)：50-52．

（收稿日期：2017－11－14）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告