

基于UG和Ansys CFX二次开发的灭弧室动态流场研究

王瑞丽¹, 惠 伟^{1,2}, 张 建¹, 张 猛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: 对于高压断路器灭弧室动态流场的数值计算, 往往采用动网格技术进行模拟, 目前众多涉及动网格的流场模拟计算都采用Ansys Fluent来完成的。相比之下, Ansys CFX具有较广泛的应用范围和诸多优点, 能够解决前者的诸多不足, 但其缺点是不能直接解决涉及较大变形的动网格计算。文中针对此不足, 基于UG和Ansys CFX两款商业软件, 通过对它们进行二次开发, 得到了一种适用于动态流场计算程序; 通过对某高压断路器灭弧室实际流场进行动态计算, 验证了该方法的可行性和准确性。该方法在一定程度上解决了Ansys CFX软件在处理具有较大变形的动态流场计算中不足, 补充了动态流场计算的实现平台。

关键词: 灭弧室; 动态流场; 计算流体动力学(CFD); Ansys CFX; 二次开发

Dynamic Flow Field Calculation for Arc Extinguishing Chamber Based on Secondary Development of UG and Ansys CFX

WANG Ruili¹, HUI Wei^{1,2}, ZHANG Jian¹, ZHANG Meng¹

(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 numerical simulation of dynamic flow field in arc extinguishing chamber of high voltage circuit breaker often use dynamic mesh technique for simulation, and a large number of flow field simulations with dynamic mesh technique are completed by Ansys Fluent. Compared with Ansys Fluent, Ansys CFX also has comprehensive application and many other advantages over the former, but it cannot perform the dynamic mesh calculation with large deformation. Therefore, secondary development of UG and Ansys CFX are conducted in this study to obtain a calculation program which is suitable for dynamic flow field. This program is adopted to simulate the dynamic flow field in the arc extinguishing chamber in an actual high voltage circuit breaker, and the result verifies the feasibility and accuracy of the present method. This method can overcome the disadvantage of software Ansys CFX to a certain extent in calculating dynamic flow field with large deformation, complementing the implementation platform of dynamic flow field calculation.

Key words: arc extinguishing chamber; dynamic flow field; computation fluid dynamics(CFD); Ansys CFX; secondary development

0 引言

采用相关动态流场计算方法进行高压断路器灭弧室流场计算研究工作, 对于了解其中存在的复杂流动现象具有十分重要的意义^[1-4], 而该工作主要是通过动网格技术(dynamic mesh technique)来完成的。目前, 诸多涉及动网格的流场仿真计算都采用Fluent来完成的^[5-7]。然而, 采用Fluent进行动网格计

算具有以下缺点: ①需要在Fluent和C语言间建立繁琐的软件连接接口, 以满足动边界运动规律、物性和耦合场计算的需要; ②所采用的UDF方法对应用者编程能力有一定要求, 因而在软件编程、调试等方面带来诸多不便; ③Fluent动网格计算中需要调整大量参数^[8], 如对铺层(layering)法, 需要指定constant height和split factor等参数, 对光滑方法(smooth), 需要指定spring constant factor和boundary node relaxation等参数, 这些参数的选择无疑增加了

该软件的使用难度。因为一旦参数设置的不合理,极有可能导致计算失败、收敛性欠缺或者计算时间过长,对应用者的使用经验有较高的要求,大大加大了其在工程上推广的难度。

Ansys CFX 作为是全球第 1 个通过 ISO9001 质量认证的大型商业 CFD 软件,其基于有限元的有限体积法,在保证有限体积法的守恒特性的基础上,吸收了有限元法的数值精确性,发展和使用全隐式多网格耦合求解技术的商业化软件,这种革命性的求解技术克服了 Fluent 等软件中“假设压力项—求解—修正压力项”的反复迭代过程,而同时求解动量方程和连续性方程。因而 CFX 在实际应用中有着较为广泛的应用,为众多使用者所青睐^[8]。另外,相比于 Fluent 采用外部程序植入方法(UDF),CFX 所具有的内嵌式开发语言(CCL 和 CEL 等)编程更简单,实用性更强。CFX 自身包含电磁场计算模型,因而在进行相关耦合场计算时,无需添加额外程序。CFX 动网格计算是基于单纯的网格压缩和拉伸变形的,因而在实际操作过程中只需要指定相关运动部分的运动规律即可,而不需要过多设置相关参数。

然而,目前针对 CFX 的动网格研究,由于自身软件的问题,还几乎不能直接采用具有网格变形和重构功能的动网格技术。相关论文也较少,而当计算过程中存在网格重构等大变形的模拟研究几乎没有^[9-12]。

文中基于 UG 和 Ansys CFX 两款商业软件,通过对它们进行一定的二次开发,得到了一种适用于动态流场计算的应用程序,并通过对其某高压断路器灭弧室分闸过程进行了数值模拟,验证该方法的可行性和准确性。该方法在一定程度上解决了 CFX 软件在处理具有较大变形的动态流场计算中不足,扩展了通过 NG 和 Ansys CFX 的二次开发的应用范围;另外该程序所涉及到的命令流与批量处理思想对于 Workbench 平台的其他模块开发应用提供了借鉴。

1 程序的实现

该程序充分利用了 UG 和 CFX 的命令流语言,将其应用于流场动网格计算,其计算流程图见图 1。求解的基本思路是,在运动边界的运动规律已知的前提下,将流场大变形划分为一系列确定只涉及变形不涉及重构的小变形,而每次小变形通过一次动网格流场计算求解获得,且前一次计算的结果文件作为后一次计算的初场进行插值计算;为方便起

见,小变形的位移尽可能设定为定值。

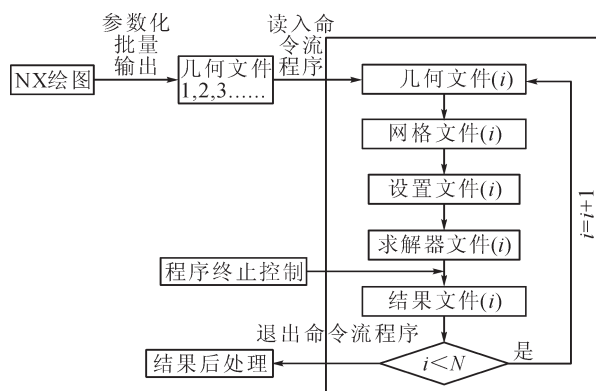


图 1 计算程序流程图

Fig. 1 Calculation programming flow chart

如图 1 所示,采用 UG 进行流场计算几何区域的绘图,同时利用其二次开发功能实现设定几何文件的几何输出;接着,通过 Workbench 基于 Python 语言的命令流功能,实现流场计算能按照程序有序进行。另外,通过 CFX 自身的表达式语言控制每次网格变形的大小,可保证后计算能够采用前次计算的结果作为初场进行插值计算。在计算过程中,由于不同的算例几何具有相似性,因而可以采用相同的网格划分策略、流场计算设置及求解方法,保证 Workbench 命令流功能的实现。

UG 作为一款 EDS 公司(已被 SIEMENS 公司收购)一个产品工程解决方案,广泛应用于各个行业。其所具有的独特二次开发功能,为不同企业的具体产品设计提供了重要方法。UG 的二次开发分为内部参数化功能模块的开发和应用接口的开发,Journal 是后者中一种重要而简易的方法,其特点是开发难度低、效率高、对编程人员要求低^[13]。该开发工作是通过 Vb.net 进行编写的,同时可利用该语言进行必要的编辑修改,实现预期几何文件输出。Vb.net 做为 VB 语言中的一种,具有诸多优点和广阔的应用范围^[14]。文中集成了以上 UG 二次开发的两种方法,通过表达式实现运动部件在不同时刻的几何更改,在此基础上应用外部 Journal 程序进行相关操作,实现几何文件的生成及导出。

Python 语言是一种开放源码软件,其代表简单主义思想的语言,Workbench 通过采用这种程序,能够记录操作者通过 GUI 界面进行的相关操作,并进行简单而必要的修改,实现命令流的功能^[15]。

CEL 语言是 CFX 的一种内部二次开发语言,其允许用户创建方程用于 CFX 的前后处理中,以实现求解过程的编辑和控制。由于其充分利用 Perl 语言的编程优势和能力,因而在 CFX 内部的二次开发

中占据重要一席^[16]。

文中通过对集成以上相关软件,依据其二次开发原理并进行一定的编辑修改,以在 CFX 中实现了一种适用于动态计算的应用程序。

2 一般步骤

该计算程序主要通过以下几个步骤实现:

1)数据预处理。由于动态流场计算程序中小变形尽量设置为一个可以接受的定值,这是由于在相似模型相似网格划分方法下动态流场计算,流场计算的可接受网格变形是相近的,因而需要根据原始文件中给出的等时间间隔的位移求出等位移的时间间隔,同时求出不同时间下的时间步长。

2)UG 绘图及尺寸参数化。采用 UG 软件实现几何文件的绘制,并利用内部参数化功能模块将其中由于部件运动引起变化的尺寸改写为某重要尺寸的函数关系式,通过修改该重要尺寸即可达到实现相关部件运动后的几何。

3)几何文件批量导出。录制 UG/Journal 文件,该文件中包含的重要命令包括内部参数化功能的实现,文件导出。编辑该文件,以实现导出文件按照某格式批量修改和生成。

4)Workbench 命令流及相关控制输出。采用 Ansys Workbench 中的 CFX 计算模块,根据其计算程序,进行小变形的动态流场计算,并注意在其中设置相关计算控制程序。

5)CFX 流程计算。采用 Workbench 的命令流功能,实现 CFX 动态流场计算。

3 应用举例

为验证该程序的可行性和准确性,文中将其应用于某实际高压断路器灭弧室的动态流场计算,该模型相关视图见图 2。

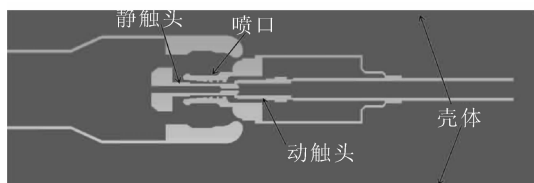


图 2 灭弧室相关视图

Fig. 2 Schematic diagram of arc chamber structure

在操纵机构外界机械力作用下,动触头、喷口及压气室运动件按照一定速度运动,见图 3。压缩压气室内 SF_6 气体,静触头相对动触头运动并逐渐脱离静触头直至完全脱离。初始时刻,整个罐式断路器充满 6 个标准大气压的 SF_6 气体。

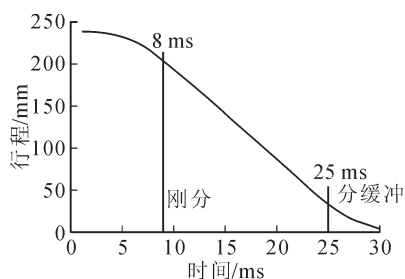


图 3 动触头行程曲线图

Fig. 3 Curve graph of moving contact stroke

1)数据预处理。由于流场计算中介质(SF_6)的物性参数在 CFX 中并未定义,因而需要将其物性参数嵌入到 CFX 中。在该计算中 SF_6 作为实际气体进行计算,需要设置的物性参数主要有密度、比热、粘度和导热系数等,且这些参数可改写为以压力和温度为自变量的二维函数。另外,由于已知的原始 SF_6 物性参数数据点较少,因而需要采用插值方法增加必要的的数据点。这里通过 MATLAB 软件^[17]实现原始物性参数数据的整理,并通过 CFX 内部 CEL 语言编写的自定义函数和表达式功能实现物性参数的整理,嵌入与相关定义。

在该算例中,为了查找合适的文件标号,时间、位移和时间步长对应关系,笔者分别对分闸前后采用合适的网格划分方法进行网格划分并进行计算,即可求得一个保证网格质量的合适单步网格变形量,这是因为分闸前后几何模型间隙尺寸有较大不同,这与网格划分的尺寸有关,继而与模型可接受的网格变形量有关。通过实地计算可知,这里设置分闸前后单次变形分别为 0.5 mm 和 1.5 mm。另外,为了便于几何文件顺次导入 Workbench 进行计算,在此基础上,通过 MATLAB 文件的样条差值的方法并结合 Excel 表格,最后,可通过自带的自定义函数功能将这些生成的数据嵌入到 CFX 中。

2)UG 绘图及尺寸参数化。几何模型相关尺寸示意图见图 4。采用 NX 软件绘制几何文件,并利用内部参数化功能模块(UG/Journal),将压气室和静触头相关移动尺寸在 x 轴方向的坐标参数化,以实现修改模型运动核心长度(压气室长度,见图 4 中 276.7 mm)即完成几何模型的变更和生成。

3)几何文件批量导出。录制 UG/Journal 程序,使其能够实现修改内部参数化模块和文件导出的功能,最终生成后缀名为 igs 的导出几何。采用 Vb.net 语言对生成的文件进行修改,实现模型运动核心长度的参数化,导出几何名和保存路径的参数化。最终,通过运行编辑好的程序,即可快速生成批量几何文件。UG 导出的输出文件见图 5。

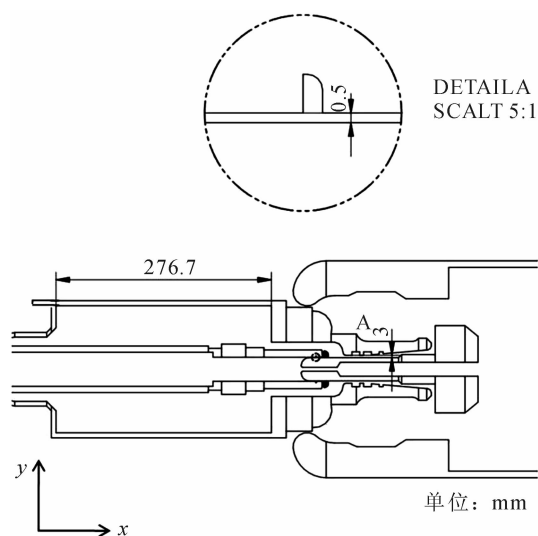


图4 几何模型相关尺寸示意图

Fig. 4 Schematic diagram of relevant geometrical model



图5 UG导出的输出文件

Fig. 5 Output file produced by UG

4)CFX 流程计算及相关控制输出。根据计算流体力学的基本原理,一般的流动传热问题时,需要求解连续性方程,动量方程和能量方程,湍流采用 SST 模型。对流向采用 CFX 特有的 Highresolution 方法,其能够在保证计算求解准确性的基础上提高计算鲁棒性。

采用 Ansys Workbench 中的 Fluid Flow(CFX)模块进行计算。将 3)中生成的 1.igs 导入几何,并采用 meshing 中非结构网格进行自动网格划分。接着,设定该计算为非稳态计算,根据图设定时间步长,并制定相关部分的位移情况,并设定相应的边界条件。流体介质的物性设定为实际气体。

另外,通过编写 CEL 语言各流场计算的相关控制,以达到网格变形按照预定的方式进行的目標。其中,编写判断网格质量的表达式语言以控制网格运动时的质量,这里通过运动区域的最小正交角度判断;编写控制网格变形距离的表达式,以使动网格在运动规定距离后即停止,该规定距离即为图中的位移,即默认区域内最大位移超过该时间步对应的位移则停止。采用默认初场进行第一步的计算。

5)Workbench 命令流。Workbench 中的命令流功能能够将记录在其平台上的相关操作并接受采用 Python 语言的编辑修改,从而达到动态流场计算有序连接进行的目的。通过对几何为 1.igs 的模型进行流场计算,并将上一步的计算设定为结果下一步的初场,并录制计算过程,在简单修改的基础上,即可实现流场计算有序而连续进行。

最终计算得到的不同时刻($t=7.5$ 、 9.5 、 13.0 、 18.5 、 26.6 ms)模型中截面压力和马赫数云图见图 6,其与文[5]中相关结果是较为一致的。

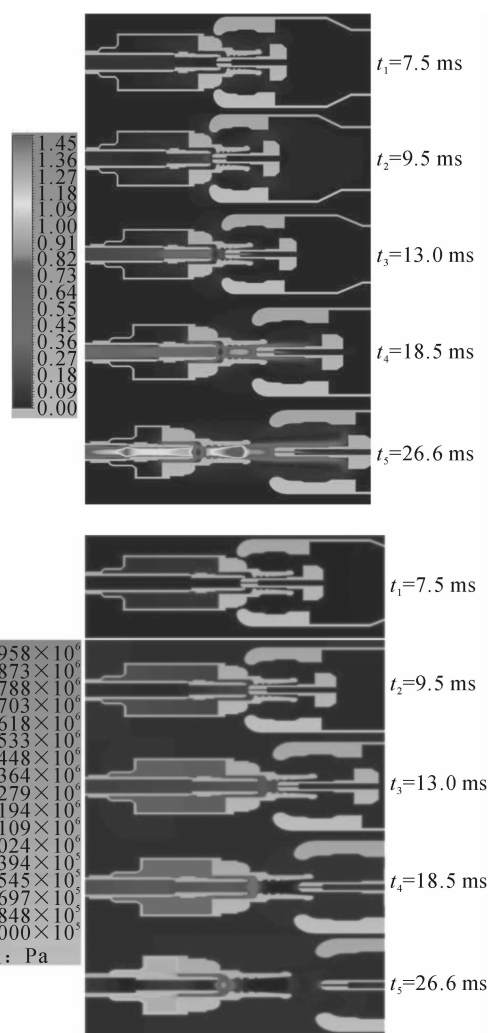


图6 不同时刻中截面压力和马赫数云图

Fig. 6 Mid-plane pressure and Ma number contour at different time

4 结语

文中通过对 NX 和 Ansys CFX 两款商业软件进行二次开发,得到了一种适用于动态流场计算的应用程序,并通过应用于某实际算例验证了该方法的可行性和准确性。

相比于 Ansys Fluent 的动网格计算,该程序中

所应用的 Ansys CFX 软件进行流场计算时结果更精确,也更容易收敛,算法稳定性好,且二次开发的编程难度也较低。

该程序较为准确地解决了 Ansys CFX 软件在处理具有较大变形的动态流场计算中不足,为动态流场计算的实现提供了一种新的研究思路和实现平台。另外,Workbench 下的命令流功能与批量文件的处理思想,对于该平台的其他模块开发应用也具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 唐涛. 高压 SF₆ 断路器介质恢复特性及其影响因素研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2007.
TANG Tao. Investigation of dielectric recovery characteristic and its influencing factors for high voltage SF₆ circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.
- [2] 刘晓明,孙宝龙,王尔智. 双断口结构对特高压 SF₆ 断路器气流量影响分析[J]. 电气开关,2013,51(6):78-83.
LIU Xiaoming, SUN Baolong, WANG Erzhi. Influence of double-break on flow field of UHV SF₆ circuit breaker[J]. Electric Switcher, 2013, 51(6): 78-83.
- [3] 王舒. 高压 SF₆ 断路器灭弧室的喷口优化设计[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2012.
WANG Shu. Nozzle optimization design for high voltage SF₆ circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012.
- [4] 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 recovery medium characteristics of SF₆ in high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [5] 姜旭,贾申利,李兴文,等. 基于真实气体模型的 SF₆ 断路器中冷态气流量特性的仿真分析[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.
- [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] ZHANG Jian, JIA Shenli, LI Xingwen, et al. Simulation of the influences of the pressure ratio and Cu vapour on SF₆ arc characteristics[J]. Plasma Science & Technology, 2009, 11(1):52-56.
- [8] 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,2013:5-6.
DING Yuan, WU Jihua. From entry to master of CFX Ansys 14.0[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 5-6.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] SRIKANTH C, BHASKER C. Flow analysis in valve with moving grids through CFD techniques[J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(3):193-201.
- [12] 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 mechanis[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2012(2): 94-99.
- [13] 唐鑫辉,秦小英,崔洪斌,等. NET 环境下利用 UG/NXO pen 和 UG/Journal 对 UG 的二次开发[J]. 现代制造工程, 2011(4):60-62.
TANG Xinhui, QIN Xiaoying, CUI Hongbin, et al. The re-development of UG combined of UG/NX open and UG/Journal based on NET platform[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2011(4): 60-62.
- [14] BLAIR R, CROSSLAND J B. Visual Basic. NET 入门经典[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
BLAIR R, CROSSLAND J B. Visual Basic. NET[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [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] 施瓦茨,菲尼克斯,福伊,等. Perl 语言入门[M]. 南京:东南大学出版社,2009.
SCHWARTZ R L, PHOENIX T, FOY B, et al. Learning Perl[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2009.
- [17] 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,从事系列化灭弧室流场数值模拟研究。