

基于 Fluent 软件的汽车空气动力学前处理的二次开发方法

Secondary Development of Fluent Software on Meshing of Vehicle

Aerodynamic CFD Analysis

周晓利 杨坤

上海汽车集团股份有限公司技术中心

摘要: 本文提供了一种新的网格自动化处理的开发方法。基于 ANSYS Fluent 软件的 Mesh 模块, 使用 Scheme 语言组织并执行软件 TUI 命令, 结合实际工作需要, 完成简化外造型空气动力学网格自动化的二次开发工作, 解决了车身及尾部的贴体加密问题, 尤其是车底网格加密问题, 网格质量得到控制, 提高了分析的效率及结果的准确性。

关键词: Fluent 二次开发 scheme 语言 汽车空气动力学

Abstract: This paper provides a new method of mesh automation. Based on ANSYS Fluent Mesh mode, it has organized and compiled TUI commands in Scheme language. Combined with the needs of practical work, it has finished mesh automation secondary development on Aerodynamic of simplified external design, which has not only solved local refinement surrounding vehicle body, especially underbody mesh refinement, but also controlled mesh quality and improving analysis efficiency and result accuracy.

Key words: Fluent, Secondary Development, Scheme, Vehicle Aerodynamic

1. 前言

ANSYS Fluent 是目前国际上比较流行的商用 CFD 软件包, 用来模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动。它具有丰富的物理模型、先进的数值方法和强大的前后处理功能, 在航空航天、汽车设计和涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。

Fluent Meshing[1]的前身是 TGrid——一款体网格填充及表面网格编辑工具, 广泛用于航空和汽车领域, 可生成高质量的、大规模的、混合类型体网格。Fluent Meshing 内嵌到 Fluent 用户界面中, 具有现代感的用户界面、模型树和图标, 是一款稳健而强大的非结构化网格建模软件, 包含以下各种功能: 处理、修复及改善表面网格; 包面功能可从高度复杂或质量很差的几何生成 CFD 网格; 业界领先的分布式并行边界层网格生成功能, 可协助捕捉复杂几何边界层流动; 高质量的四面体网格和六面体核心网格生成算法; 多面体网格生成功能可生成数量更少的高质量网格; 支持脚本化批处理网格生成的执行模式。

汽车空气动力学的仿真分析过程包括前处理、计算与后处理。分析工程师使用 Fluent 软件可以完成相关分析, 进行性能摸底与性能优化。

2. 二次开发

2.1 概述

CFD 分析的前处理为将几何模型转变为可以用来求解计算的网格模型, 该阶段是最耗时间, 工作最为重复繁琐的。一般来说, 分析工程师近一半时间是花费在网格模型的建立上。

二次开发, 是指利用 CAE 软件的脚本语言或者其他程序语言来实现软件原有功能的扩展, 或者是将复杂的操作过程高度参数化、流程化、自动化。不同程度的二次开发, 能够在

建模、分析流程、使用方法、结果统计分析等各方面更好的满足工作要求。对企业来说，二次开发可以将成熟的经验或者实验验证的案例模块化、规范化，降低对软件使用人员的经验要求，节省时间。使用自动化脚本或者命令流文件，简化了很多重复性工作，使得类似工作通过稍微修改几个命令就可以重现，大大提高了工作效率，这有利于企业形成系统的标准或者流程。

2.2 Fluent 二次开发现状

目前，基于 Fluent 软件的二次开发主要集中求解器上，一种为减少人员参与，后台启动软件，根据命令流文件，进行边界条件设置，自动提交[2]，自动后处理出图；另外一种为常见的 UDF（用户自定义函数）应用，解决一些标准模块不能解决的问题[3]，主要体现在：处理边界层（特定的速度或者温度分布），修改源项，定义材料属性；变量初始化；表面和体积反应速率；处理与多相流相关的问题；求解 UDS（用户自定义标量方程）等等。而对 Fluent mesh 模块的二次开发在相关文献中并不常见，目前流行的版本为软件供应商提供的自动化脚本[4]。

现有的自动化脚本，必须严格按照特定的步骤及部件命名方式，一步一步进行操作，不能跳过某个步骤，由于自动化脚本内部过程封装，一旦出错，查找原因耗时长。现有脚本的高级设置一般建议采取默认值，具有通用性，作为汽车外流场仿真工程师，希望脚本能够贴近工作要求，需要调整部分参数设置，由于程序封装，无法进行修改。

具体使用局限性体现在：使用简化外造型模型进行空气动力学性能评估与外造型优化时，由于模型对称性，通常采用半车模型进行仿真分析。使用半车的 CAS 模型，直接调用脚本受限；使用对称处理的模型后，又由于封装过程未考虑到计算域与车身中截面相交处理，无法建立半车模型，使用受限；自带计算域的半车模型由于计算域的存在无法自动生成加密区域，导致自动化脚本无法运行。直接按照说明步骤，进行全车模型分析，又存在车底网格加密不均匀问题，尤其是车底凹区较深或者离地间隙较大车型更为严重，如图 1，图 2 所示。图 2 为车身周边细节放大图，可以明显看到加密未达到要求。若仅通过直接调整比例参数，放大 Z 向延伸比例来解决车底问题，又会出现车上方加密区过大，导致网格数量巨大。

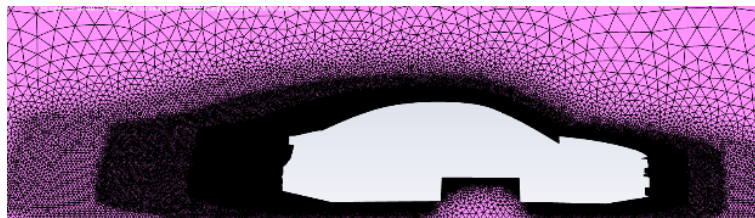


图 1 对称面网格分布图

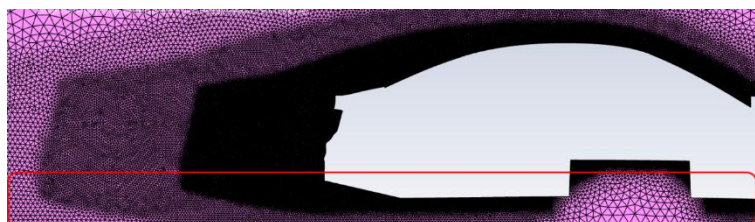


图 2 对称面车身周边加密区网格分布图

实际项目开发工作中需要使用半车模型进行汽车外造型的空气动力学仿真，为简化繁琐的前处理工作，需要一套适合半车模型的自动化网格流程。受之前自动化脚本启发，结合工作实际需要，从零开始依赖帮助文档，使用 TUI 与开放的有限的 API 命令，使用 scheme 语言来组织前处理开发的命令流，尝试做出一套适合工作前处理需求的网格自动化脚本流程。

3. 开发语言

3.1 TUI (文本用户界面)

Fluent mesh 模式包含一系列文本化命令流[5]，文本用户界面是用 Scheme 语言编写的。熟悉该语言的用户能够根据已有界面生成定制化命令流。

狭义的 TUI，是指在 Fluent 控制窗口中直接输入命令，或者回车就能显示出下一级可进行的操作命令，通过输入 q 返回上一级菜单，基本和界面操作一致，略有区别。

```
Meshing> mesh

Meshing/mesh>
auto-mesh          domains/          pyramid/
auto-mesh-controls/ hexcore/          repair-face-handedness
auto-prefix-cell-zones laplace-smooth-nodes reset-mesh|
cavity/            list-mesh-parameter reset-mesh-parameter
check-mesh          manage/          scoped-prisms/
check-quality        modify/          selective-mesh-check
check-quality-level non-conformals/ separate/
clear-mesh           poly/          tet/
create-heat-exchanger prepare-for-solve thin-volume-mesh/
cutcell/            prism/

Meshing/boundary/manage> q

Meshing/boundary> q
```

图 3 TUI 命令操作示意图

广义的 TUI 命令还包括 Fluent 帮助文档中提供的一些脚本命令，即 API（应用程序接口）。软件所提供的前处理查询与实用程序包括：

- (1) 列表查询和实用程序函数，比如获取特定边界类型或者特定名称后缀的对象或者表面列表信息，如图 4，通过对特定函数返回的列表执行布尔运算，使用实用程序函数确定特定操作期间创建的区域；
- (2) 标签实用程序，比如对特定表面增加标签，返回特定表面的标签信息，特定表面标签删除；
- (3) 报告网格质量、统计信息、面/单元分布实用程序
- (4) 根据诊断标准（如面连续性和质量）标记表面的实用程序，比如标记出特定区域内有自由边的表面，发现自相交的表面，标记处边界区域质量差的单元；
- (5) 网格设置，比如网格划分过程中取消某些或所有保留的单元区域的设置，网格类型设置，创建加密区域与根据需要为加密区域设置尺寸函数；
- (6) 网格操作，比如重命名表面，改变 ID，重命名对象，合并区域，分割区域，优化标记表面等；
- (7) 其他功能程序，比如字符串操作，文件夹与路径管理，文件管理；

Feature		Description	Utility Function
Zone query	By location	Return face zone at or closest to a specified location. Note: This function is not applicable to polyhedra meshes.	(get-face-zone-at-location '(x y z))
		Return cell zone at or closest to a specified location	(get-cell-zone-at-location '(x y z))
Zone lists	By zone type	Return a list of zones of the specified default zone type	(get-zones-of-type 'type)
	By default group	Return a list of zones of the specified default zone group or user-defined group	(get-zones-of-group 'group)
	By filter string	Return a list of zones whose names contain the specified filter string	(get-face-zones-of-filter 'filter) (get-cell-zones-

图 4 Fluent 表面对象获取

3.2 Scheme 语言

Scheme 语言是 LISP 语言的一个方言,它诞生于 1975 年的 MIT,有着近三十年的历史。Scheme 是一个小巧而又强大的语言,作为一个多用途的编程语言,它可以作为脚本语言使用,也可以作为应用软件的扩展语言来使用[6]。

Scheme 运行一个列表形式的代码结构时,首先要检测列表第一个元素,或列表头。如果这个列表头是一个过程,则代码结构的其余部分则被当成将传递给这个过程参数集,而这个过程将接收这些参数并运算。

begin 可以让它的子结构可以有序的运算,而最后一个子结构的结果将成为整个代码结构的运行结果。define 会声明并会初始化一个变量。set! 可以给已经存在的变量重新赋值。用户可以使用代码结构 lambda 来创建自定义的过程。If 条件语句,递归语句来实现判断与循环。程序中有使用 define 命令定义全局变量以及使用 lambda 定义过程

当使用 scheme 语言为 Fluent 程序写菜单扩展功能时候需要使用“ti-menu-load-string”,下面以 Fluent 中文件读入为例,使用 scheme 语言执行 TUI 命令,来实现自动化处理。其中“;”后的为注释文件,程序跳过不执行,下面程序定义了几何文件导入的一个过程,涉及到 TUI 的文件导入方式与参数设置,并实现将 wall 的对象信息赋值给 fids 这个变量。

```

;define cadi to import cad data
(define cadi
  (lambda (cadfile)
    (ti-menu-load-string (format #f "/file imp cad-opt one-obj file"))
    (ti-menu-load-string (format #f "/file imp cad yes ~a yes 30 yes m" cadfile))
    (set! fids (get-zones-of-type 'wall))
  )
)

```

图 5 文件读入的 scheme 语言程序

Fluent 可以通过菜单 File → Read → Scheme...读取并加载 scheme 源代码,然后在控制窗口输入(cadi 'test.stl)即可执行文件导入。

4.自动化前处理程序设计

基于 Fluent 软件使用 scheme 语言，结合实际前处理工作需要，完成外造型气动分析模型网格自动化的脚本程序。主程序通过定义主函数来顺序执行所有的命令行，实现自动化。它的运行过程如下：文件导入，读入车辆模型；然后根据导入模型，创建周围的加密区域；接下来，根据车辆的尺寸，创建计算域；并区分不同表面，进行重命名，便于后续边界条件设置；进行相交处理，此时不但处理车轮与地面的相交问题，而且通过车身与计算域的对称面相交，建立半车模型计算域；接下来，根据位置信息识别前后车轮，便于后续边界条件设定；之后需要设置尺寸函数，对不同对象与加密区分别进行网格尺寸设置；进行网格重构；检查表面连续性与质量，进行提高质量的修复工作；设定网格类型与边界层的参数，执行网格生成命令，检查体网格质量，根据需要进行优化，这样就完成了前处理流程。该自动化前处理脚本中的参数来自气动分析工程师多年工作中的经验总结，能够满足气动仿真分析工作的实际需求，使得前处理工作更便捷，更有效率。

主函数程序如下：

```
(define main
  (lambda ()
    (cadi 'test.stl)
    (generate-bois)
    (create-box 3 5 4 4)
    (tunnel-rename)
    (get-wheels)
    (do-inter)
    (surface-remesh)
    (improve-quality)
    (creat-volumemesh)
  )
)
```

Fluent 可以通过菜单 File → Read → Scheme... 读取并加载 scheme 源代码，然后输入 (main) 即可执行。

4.1 加密区域生成方式介绍

进行汽车空气动力学分析时，为了获得更准确的风阻值，需要更好地捕捉到汽车周围流动特性，这就要求车身周围网格细化与加密，故车身周围的贴体加密与尾部加密在网格建模中是尤其重要环节。

该自动化脚本程序的亮点在于生成符合分析实际需求的车身加密区，解决了之前脚本程序存在的车底加密问题。如下图 6，图 7 所示，车身周围网格进行多级加密，车底加密解决之前的问题。

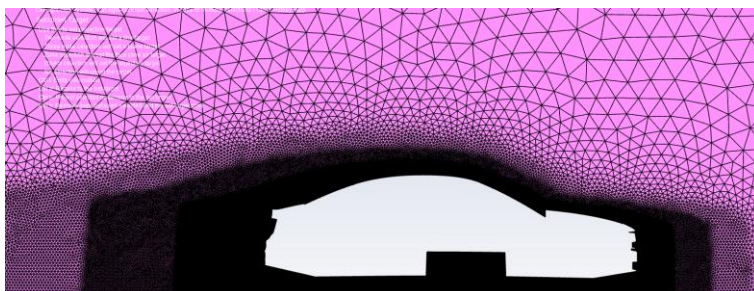


图 6 改进后的中截面网格分布

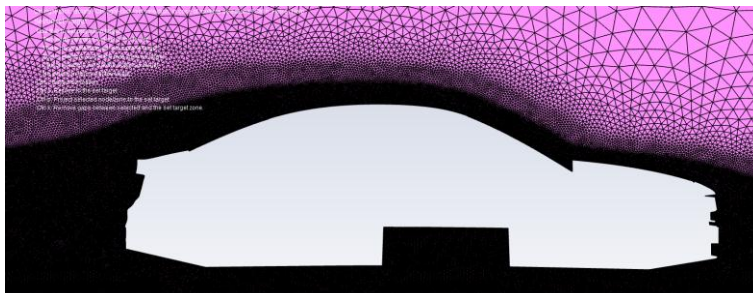


图 7 改进后的车身周边加密区中截面网格分布

下面将对其开发思路与相关的操作命令做详细介绍：

首先定义相关变量，对导入车辆模型进行包面，建议采用较大尺寸对其进行包面处理，这样获得的面将会丢失详细细节特征，得到一个粗略轮廓面。期间涉及的主要是包面操作相关设定，涉及命令为“(ti-menu-load-string (format #f"/bo wrap *"))”；对得到的包面进行位置调整，将其中心移动到原点，然后进行区域标记，通过 `separate` 命令在 X 方向上区域进行切割，分割边界。此时根据车身周边需要几层加密，复制几个包面备用。接下来对各个区域的边界进行比例缩放，此时可以定义三个方向参数，由于每组包面都被分成前后两部分，这样的话，X 方向可分别指定加密区延伸比例参数，然后每组前后区域合并，即可完成贴体尾涡区的加密区域创建，但此时完成的加密区域，对于车底凹凸不平或者离地间隙大的车型时，容易出现车底加密问题，即车底区域未能实现完全加密。为了解决这一问题，后续需要对生成的尾涡区分别按照标记区域进行 Z 向切割，然后使得下部区域在 Z 向进行比例放大，要完全覆盖车底区域，然后将分割好的区域再次合并，并将它们移回原来位置。这样就完成车身加密区域的相关操作。期间有使用到有：

```
(ti-menu-load-string (format #f"/bo man trans *))
(ti-menu-load-string (format #f"/bo sep *))
(ti-menu-load-string (format #f"/bo man copy *))
(ti-menu-load-string (format #f"/bo man scale *))
(ti-menu-load-string (format #f"/bo man merge *))
```

5. 结语

使用开发好的定制化的自动化流程，只需准备一个姿态正确的汽车外造型模型，即可完成网格自动化生成。另外，还可根据需要调整车身周围加密区域的大小，并且可以在 X、Y、Z 三个方向进行参数调整，进行调整加密区域大小，也可作为最佳实践设为固定值。解决的车底网格加密问题，加密区域网格分布合理。

开放的 API 越多，越能激发分析工程师二次开发的积极性，扩大软件的应用范围，提高开发效率，缩短二次开发周期长。

新的二次开发将分析工程师从繁琐的网格生成的重复工作中解放出来，对人员软件熟悉度及相关知识经验要求降低，人员上手快，使得节约的前处理时间用在做后处理或者报告整理工作。开发的自动化前处理脚本可以使特定的性能仿真分析工作参数设置固化，形成企业的流程文件，有利于网格质量控制与提高计算结果准确性。

6. 参考文献：

- [1] IDAJ_Fluent_Meshing_19.3_第 01 讲_简介
- [2] 肖虹等，FLUENT 软件的二次开发及其在火箭气动计算中的应用，航天计算技术，2009

(9): 55-57

[3] 郑朝亮等, 基于 Fluent 二次开发的装甲车辆红外仿真, 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2015 (2): 170-174

[4] IDAJ_Fluent_Meshing_17.0_Module11_FullyAutomatedMeshingScript_CN

[5] ANSYS Fluent User's Guide: ANSYS_Fluent_Text_Command_List

[6] Scheme 语言简明教程