

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.02.006

汽车 CFD 流场仿真集成高效优化技术研究

潘正宇¹, 谷正气^{1, 2}, 张 勇¹, 宋亚豪¹

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007;

2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 为了在汽车造型结构设计中获得理想的气动性能, 必须经过参数化几何建模与修改、网格划分、CFD 流场计算、采样和优化设计等过程, 其过程费时费力。对此, 提出在参数化几何建模的基础上, 基于 UG 二次开发实现几何模型数据交换, 以脚本文件对 ICEM 建立自动网格划分命令, 建立的操作日志文件可实现 CFD 边界条件、控制方程和参数调用等功能。然后, 在 Isight 软件中, 采用批处理文件实现几何模型修改、网格划分、流体分析计算 3 个环节的数据调用、启动、关闭和执行其他相关操作, 从而建立高效的集成优化技术。最后, 以国际标模附加装置气动减阻为例进行了技术实例验证。研究表明: 以 Isight 为集成优化驱动平台, 高度集成 UG、ICEM、FLUENT, 可实现自动三维模型修改、网格划分、流场计算, 减少人工操作与错误, 节省大量设计时间和计算资源, 极大地提高了优化工作效率。

关键词: CFD 流场计算; 汽车造型; 参数化几何建模; UG 二次开发; 集成高效优化

中图分类号: U462.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)02-0031-07

Research on the Simulation Integration and Efficient Optimization of CFD Flow Field in Automobiles

PAN Zhengyu¹, GU Zhengqi^{1, 2}, ZHANG Yong¹, SONG Yahao¹

(1. School of Mechanical and Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to obtain the ideal aerodynamic performance in automobile styling structure design, such process as parametric geometry modeling and modification, meshing, CFD flow field calculation, sampling and optimization design, which are rather time-consuming and laborious, must be carried out. In view of this, based on parametric geometry modeling and on the secondary development of UG, the data exchange of geometric models can be realized, and the automatic mesh command of ICEM is set up based on script files, with the operation log files set up to achieve CFD boundary conditions, control equations and parameter calls. Then, by in Isight software, batch processing files are used to realize such links as data calls, startup, shutdown and other related operations, including geometric model modification, mesh generation and fluid analysis and calculation, so as to establish an efficient integrated optimization technology. This method can be verified by the aerodynamic drag reduction of the international standard

收稿日期: 2017-06-19

基金项目: 中央财政创新团队基金资助项目(0420036017), 湖南省教育厅高等学校科学研究计划基金资助项目(16B072), 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ2074)

作者简介: 潘正宇(1983-), 男, 湖北咸宁人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为车辆工程汽车空气动力学,
E-mail: yu2206@126.com

通信作者: 张 勇(1979-), 男, 陕西汉中, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要从事车辆工程汽车空气动力学方面的教学与研究, E-mail: zhangyong7051678@163.com

mode with attachment. The results show that the Isight integrated optimization platform could highly integrate with UG, ICEM and FLUENT, which could realize automatic three-dimensional model modification, meshing and flow field calculation. It could reduce the manual operation and errors, thus saving a lot of time and computing resources, which will greatly improve the optimization efficiency.

Keywords: CFD flow field calculation; vehicle styling; parametric geometry modeling; secondary development of UG; integrated efficient optimization

1 研究背景

当前,为使汽车获得优良的气动特性,常应用计算流体力学(computational fluid dynamic, CFD)仿真技术对车身几何造型进行优化设计。传统的汽车设计过程必须经过三维数字模型曲面修改、网格划分、CFD 流场计算、采样和优化设计等流程^[1],如图 1 所示。其中,几何模型的修改与网格划分是 CFD 仿真的基础性工作,其实际操作是枯燥、费时的重复性劳动,据统计,这些工作将消耗整个优化时间的 80% 以上^[2]。

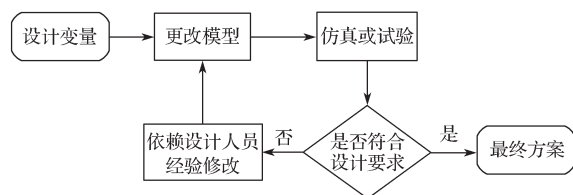


图 1 传统汽车设计流程

Fig. 1 Conventional design flow chart

近年来,随着人力资源成本的增加和技术更新周期的缩短,如何提高优化设计效率、降低人工成本,成为 CFD 技术的热点问题。对此,出现了网格变形技术和计算机辅助设计优化技术(computer aided optimization, CAO)两种代表性的设计优化技术。

1) 网格变形技术。该技术的特点是用户可将已生成好的网格导入网格变形软件中,并建立控制点,通过控制点改变模型特征参数,然后进行仿真计算和优化设计。该方法可大大减少划分网格的时间,从而缩短研发周期。然而此方法具有一定的缺点,即通过用户建立的控制点进行间接网格变形时,对复杂的汽车车身造型不易控制,需增加大量控制点;同时,曲面交界部位的光滑性和均匀性欠佳,变形后的网格质量也较难控制。该方法仅适合于模型的小变形网格驱动,因而适用范围受限^[3-6]。

2) 计算机辅助设计优化技术。该技术主要是以 Isight 软件为代表的计算机辅助集成优化,目前已经被广泛地用于航空、航天、汽车、船舶等领域。

该方法基本能够满足用户的优化设计要求,融合多种优化探索策略提升产品性能和质量,缩短产品研发周期。Isight 软件具广泛的 CAD (computer aided design) /CAE (computer aided engineering) /CFD 以及二次开发接口,可以集成大多数计算分析软件,极大地减少了重复性操作,节省了优化计算时间与计算资源,提高了设计工作效率^[7]。在 Isight 优化设计中,一般的 CAO 方法流程如图 2 所示。

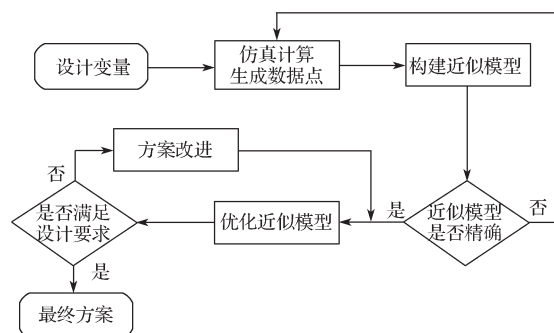


图 2 CAO 方法优化设计流程

Fig. 2 CAO method flow chart

在 Isight 优化设计中,首先需要根据试验设计 (design of experiments, DOE) 样本点需求,人工对汽车车身几何模型进行修改、网格划分和 CFD 仿真计算,生成仿真气动特性样本点,再导入 Isight 软件中进行近似模型优化^[8-9]。显然,这种方法可以得到最优解,但是仍然存在费时费力的重复性人工操作,限制了优化效率的提高。因此,本文提出一种基于 Isight 开展 CAD、ICEM (integrated computer engineering and manufacturing code) 和 CFD 联合集成的优化方法,以提高优化设计工作效率,减少人工操作,缩短研发周期。

2 CAD 参数化建模与二次开发

为获得优良的气动特性,必须经过 CFD 仿真计算,优化几何模型结构,因此在寻优过程中,必须进行汽车车身造型仿真数据多样本点的构建,而要实现高效仿真数据运输,实现参数化驱动模型自动修改是

有效的解决办法。

2.1 CAD 参数化建模

目前, 已开发出较多的 CAD 常用商业软件, 如 UG (Unigraphics NX), 是当前应用较为广泛的一款 CAD 软件。UG 具有参数化技术的功能, 可通过表达式 (expression) 来完成几何模型的设计, 因此, 本研究将以 UG 软件作为 CAD 建模模块的工具。表达式定义了各几何模型特征参数间的约束关系, 因而可以直接或间接地控制一个或多个特征及其相关信息。当一个特征控制表达式被修改时, 就会引起表达式控制的特征改变。参数建模的表达式可以在 UG 环境中导出, 也可以生成表达式输出文件。

几何模型参数化建模的具体要求和目的如下:

1) 开展汽车车身三维几何模型草绘, 构建特征约束关系的参数化表达式;

2) 提取设计变量;

3) 将表达式导出, 并另存为表达式 *.exp 文件。

一般特征约束表达式应保证不能增加或减少几何模型曲面数量, 以便准确驱动后续的 ICEM-CFD 命令流及对几何模型参数修改的调用。

2.2 UG 二次开发

2.2.1 二次开发模块

UG 二次开发模块有 UG/OPEN API (应用程序接口)、UG/OPEN Menu Script (菜单开发工具)、UG/OPEN UIStyler (对话框编辑器)、UG/OPEN GRIP (图形交互编程语言)、UG/OPEN GRIP NC (图形交互数控编程语言) 和 UG/OPEN C++ (面向对象的编程接口)。每个模块实现的功能和使用的计算机语言不尽相同, 应根据需要选择相应的模块, 以满足设计需求。

本文采用 UG/OPEN API 模块, 该模块是 UG 与外部应用程序之间的接口, 是 UG/Open 提供的一系列函数和过程的集合。可通过 C 语言或 Visual C++ 6.0 编程调用函数和过程, 该模块可以实现 UG 系统的所有功能^[10]。

UG/OPEN API 包括内部模式和外部模式。其中, 内部模式为内部环境编写的应用程序, 是动态链接库 (DLL 文件), 只能被加载到 UG 环境下运行, 不能脱离 UG 界面运行; 外部模式为独立的可执行程序 (exe 文件), 它不需要在 UG 环境中作为子程序运行, 可以脱离 UG 独立运行, 即后台运行。UG/OPEN API 的外部模式独立运行的特性为联合集成仿真提供了便利通道。

2.2.2 二次开发基本流程

在 Visual C++ 6.0 开发环境中, 进行 UG 的二次

开发。

利用 UG/OPEN API 外部模式进行编译, 其流程如下:

1) 读取并后台打开参数化几何模型文件及 *.prt 文件;

2) 读取表达式 *.exp 文件 (表达式文件中的设计变量由 Isight 中的 DOE 所提供的样本点对其进行赋值);

3) 根据表达式文件中的设计变量赋值, 对几何模型进行变形更新;

4) 自动识别几何模型片体组成, 然后将更新后的几何模型以 *.prt 文件保存, 并另存为适用于网格划分的片体标准格式 *.x_t 文件;

5) 程序执行完毕后, 自动退出。

根据上述流程思想进行程序编译, 将代码生成的程序文本命名为 ugupdate.exe 文件。

以上流程可用如图 3 所示的流程图表示。

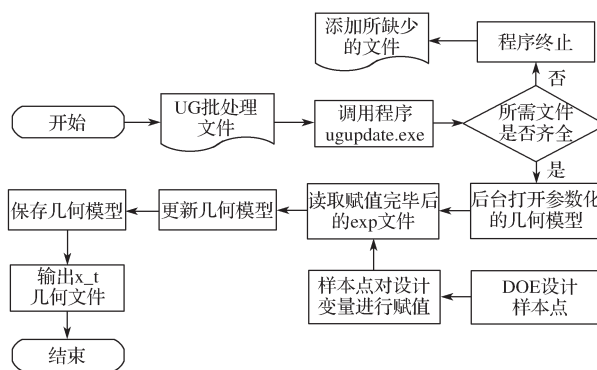


图3 UG 二次开发流程图

Fig. 3 Detailed flow chart of UG secondary development

3 自动化的网格划分

利用有限体积法进行网格划分, 以实现 CFD 仿真中的空间离散。然而修改一次几何模型就必须重新对几何模型进行一次网格划分, 因此, 实现自动化的网格划分也是 CFD 仿真优化效率提升的一个重要途径。

ICEM 是 CFD 计算所必需的网格划分模块, 网格划分的操作命令采用脚本录制方式进行, 脚本录制后可生成 *.rpl 文件, 该文件也称命令流文件。该文件由 ICEM 软件自身所带菜单完成, 且文件可用文本编辑器打开并进行编辑。

录制完的 *.rpl 文件, 可在划分网格时对其直接调用。由于对不同几何参数的同一模型进行网格划分的操作和参数设置完全相同, 因此, 按照录制完的 *.rpl 文件进行网格离散, 可实现自动划分网格,

无需人工干预。

在 *.rpl 文件编写过程中, 为了和 CAD 模型中每一个点、线、面、体特征表达式对应, 系统默认自动建立特征编号。因此, 在 UG 几何模型特征参数变形更新后, 模型的点、线、面和体数量不应发生变化, 以便于划分网格时与几何模型特征编号匹配, 实现一一对应。否则, 会因特征驱动空缺或错位而导致运算自动终止。

4 CFD 高效运算技术

每一个汽车车身几何模型的结构修改和网格划分, 对应一次 CFD 仿真计算。在 CFD 仿真中, 需要进行边界条件、湍流模型选择及其他诸多参数定义的设置。同时, 多个样本点 CFD 计算结束后, 需要提取计算结果, 并处理成样本点。因此, CFD 高效运算技术应包括实现求解过程的自动化设置和求解结果的自动化处理采样。

4.1 求解过程的自动化设置

FLUENT 是目前国际上主流的商用 CFD 软件包, 为满足用户需求, 该软件提供了 JOURNAL (操作日志) 和用户自定义 (user-defined function, UDF) 两种自动化操作模式。

4.1.1 录制 JOURNAL 文件

JOURNAL 文件也叫操作日志文件, 即在边界条件等参数设置中, 利用自身操作工具记录并保存操作过程, 并以操作日志文件形式录制设置参数。

4.1.2 UDF 技术

在一些特殊的 CFD 仿真计算中, 定义的边界条件、材料属性设置的参数是变量或者需要修改计算模型等情况时, 录制的 JOURNAL 文件将无法完成自动变量设置。而 FLUENT 平台下的 UDF 功能允许用户通过接口编译代码, 使用 DEFINE 宏定义程序, 进行个性化设置和满足一些标准 FLUENT 菜单不能模拟的功能。

一般汽车空气动力学的 CFD 仿真计算都是单相流, 所用到的设置比较简单, 均有对应的操作菜单, 很少涉及自编程序。可见, JOURNAL 操作日志不仅方法简单, 而且可以满足 CFD 自动设置的高效运算需求。

4.2 求解结果的自动化处理采样

FLUENT 结果文件也称为 *.trn 文件, 同样可以通过自身菜单中获取这一文件。*.trn 文件是求解结束后用户导出所需的任一数值结果, 如计算汽车的气动阻力、升力或温度等的数值, 并作为优化时近似模型所需要的样本数据, 从而完成数据采样。

5 批处理文件与 Isight 集成优化

5.1 批处理文件

在集成优化时, 要实现不需人工干预情形下不间断地进行仿真计算, 则需要批处理文件。这些批处理文件对 UG、ICEM、FLUENT 软件和优化过程中的一些文件有调用、启动、关闭和执行相关操作等功能。

5.2 Isight 集成优化

Isight 是目前国际上主流的综合计算机辅助工程软件之一, 可以将大量需要人工完成的工作由软件实现自动化处理, 从而替代工程设计者进行重复性、易出错的数字和设计处理工作, 因此称之为“软件机器人”^[7]。

基于数值分析软件的工作过程, Isight 通过搭积木的方式快速集成和耦合上述各种仿真软件, 将所有设计流程组织到一个统一、有机和逻辑的框架中自动运行仿真软件, 并自动重启设计流程, 从而消除传统设计流程中的“瓶颈”, 使整个设计流程实现全数字化和自动化, 因而大大提高了仿真效率。

在 Isight 集成优化平台中, 还需要采用试验设计的方法对特征参数的设计变量进行敏感度分析。在此基础上, 建立相关的近似代理模型, 并分析近似代理模型和实际仿真结果之间的误差, 以验证近似代理模型的可靠性, 进而进行全局寻优, 最后得到最优设计方案。

在 Isight 平台上搭载几何模型更新、网格划分、CFD 计算涉及 UG、ICEM 和 FLUENT 3 个模块软件。整个流程可描述如下:

- 1) 通过 Isight 软件中的 DOE 模块对设计变量进行样本点设计, 并赋值到表达式文件中;
- 2) 通过表达式文件与 UG 二次开发得到的执行程序 ugupdate.exe, 完成几何模型文件的修改与更新;
- 3) 在 ICEM 模块中, 调用命令流 *.rpl 文件进行网格划分;
- 4) 在 FLUENT 模块中, 通过 *.jou 文件与 *.trn 文件, 完成 CFD 仿真计算与导出仿真数值结果;
- 5) 在 DOE 模块中, 对结果数值进行采样;
- 6) 通过采取的样本点构造近似模型, 并分析其可靠性;
- 7) 对可靠的近似模型进行全局寻优, 得到最优设计方案。

上述工作过程可以用图 4 所示 CFD 仿真集成高效优化技术流程图表示。由图 4 可知, 通过本文提出的 CFD 仿真集成高效优化技术, 实现了仿真处理过程的自动化, 极大地提高了仿真效率。

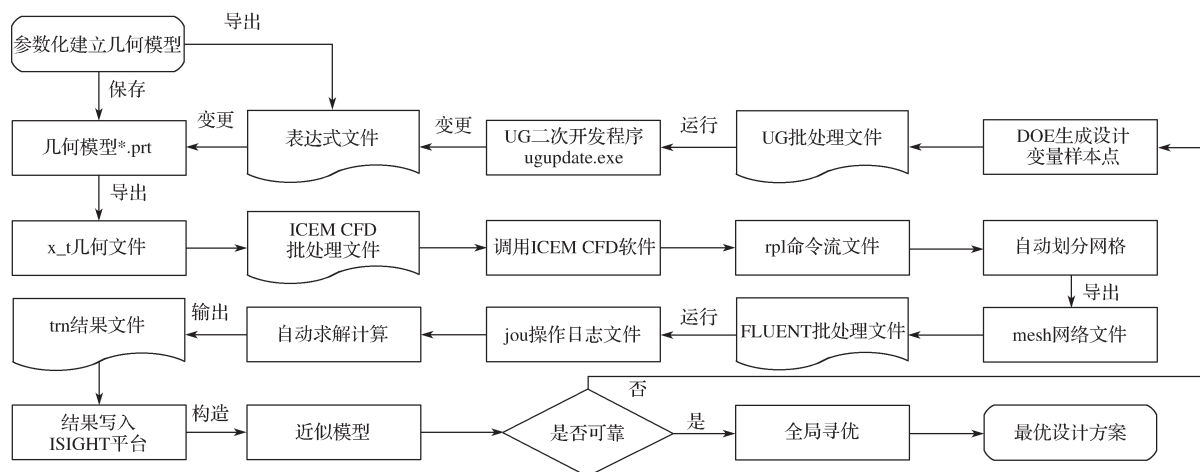


图4 CFD 仿真集成高效优化技术流程

Fig. 4 Integrated optimization strategy flow chart

6 实例

为了进一步验证和说明本文提出的 CFD 仿真集成高效优化技术的可靠性,以国际标准 MIRA 阶背型车模(见图5)附加装置(见图6)减阻优化为例,进行试验验证。

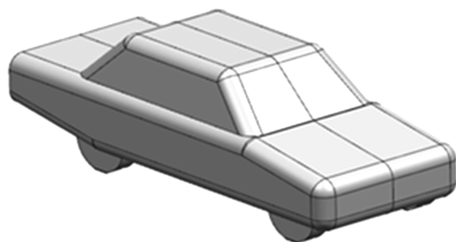


图5 国际标准 MIRA 阶背车模

Fig. 5 International standard model of MIRA

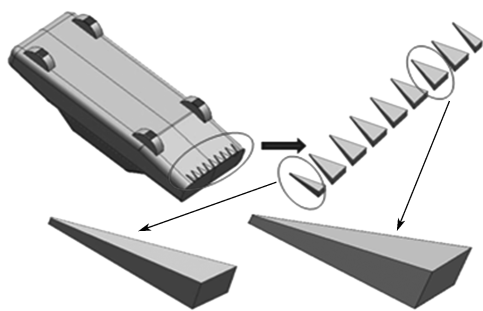


图6 附加装置位置

Fig. 6 Position of the attachment devices

1) UG 参数化建模。通过在汽车尾底部放置一种鱼鳍形仿生附加装置,改善汽车尾部气流,以达到减阻效果。由于鱼鳍形状较为复杂,因此本文对其进行简化设计,参数化建模设计方案如图7所示,取前端高度 a 、后端高度 b 、中间7个部件后端宽度 c ,两侧后宽度 d 共4个参数进行优化,且总长度 L (1200 mm)和总宽度 W (200 mm)不

变。初始设计时 $a=20$ mm, $b=50$ mm, $c=100$ mm, $d=50$ mm。导出表达式文件,并命名为 youhua.exp。

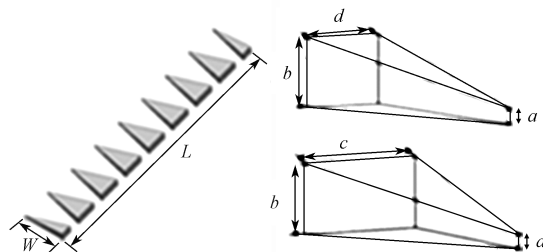


图7 简化设计附加装置模型

Fig. 7 A simplified design of attachment device model

2) ICEM 自动划分网格。汽车外流场计算中,流体区域的大小决定了计算精度。在此模型中所使用的尺寸如下:车前为车长的3倍,车后为车长的7倍,总高度为车高的5倍,左右均为车宽的4倍。

使用 ICEM14.0 软件进行网格划分,整个计算域分块划分为四六混合格网,车模附近采用非结构化的四面体网格,在车身表面添加三棱柱网格作为边界层以消除壁面函数的影响,并保证模型网格质量在0.15以上。将具体的划分网格操作录制于命令流文件中,命名为 youhua.rpl。网格离散如图8所示。



图8 网格离散

Fig. 8 Grid division

部分命令流的代码如下:

```
ic_csystem_display all 0
ic_csystem_set_current global
```

```
ic_boco_nastran_csystem reset
ic_undo_group_end
ic_undo_group_begin
ic_geo_set_part surface F_4848 IN 0
ic_undo_group_end
```

3) FLUENT 自动求解过程。在 FLUENT14.0 软件中进行求解, 采用 SIMPLE 算法、Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型, 设置入口速度为 30 m/s, 湍流强度为 0.5%, 水力直径为 9 765 mm; 出口为压力出口, 相对压力为 0, 湍流强度为 5%, 水力直径为 9 765 mm; 地面为滑移壁面, 速度为 30 m/s, 方向为 X 轴正方向; 墙壁和车身为固定壁面; 残差设置为 0.000 01; 先一阶迎风迭代 500 步, 然后二阶迎风迭代 3 000 步。本实例设最小气动阻力为研究目标, 将操作日志文件命名为 youhua.jou, 结果文件命名为 youhua.trn。操作日志部分代码如下:

```
(cx-gui-do cx-activate-item "Viscous Model *
PanelButtons*Push Button1(OK)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Navigation Pane*Frame1*
PushButton4(Materials)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Navigation Pane*Frame1*
PushButton6(Cell Zone Conditions)")
```

结果文件部分代码如下:

Forces - Direction Vector (1 0 0) Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
car	280.543 6	35.340 221	315.883 89

4) DOE (试验设计) 设计样本点。在 Isight 软件中搭建集成优化平台, 并采用 DOE 中的最优拉丁超立方设计 (Opt LHD) 获取样本点, 生成的样本点能够直接对表达式文件进行赋值。图 9 为搭载的集成优化平台。

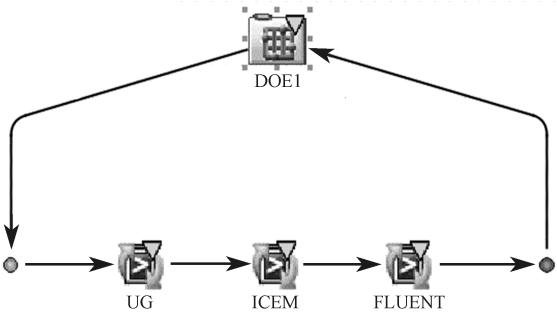


图 9 Isight 软件集成优化平台

Fig. 9 Platform for Isight software integration optimization

5) 数值结果获取与分析。通过 CFD 计算, 将 youhua.trn 文件中的气动阻力值进行采样, 并构建近似模型。表 1 为 20 组设计样本点的 4 个设计变量和相应的 CFD 气动阻力系数 C_d 数值。

表 1 样本点与相应的气动阻力系数数值表
Table 1 Table of sample points and corresponding aerodynamic drag coefficients

序号	a	b	c	d	C_d
1	100	20	52	52	0.311 30
2	71	98	48	18	0.313 42
3	93	78	91	50	0.306 74
4	88	49	141	34	0.316 57
5	44	68	16	66	0.317 75
6	76	24	102	10	0.307 59
7	49	27	138	57	0.310 13
8	34	51	95	73	0.304 73
9	46	85	80	41	0.307 15
10	27	100	23	44	0.316 19
11	61	73	134	59	0.311 34
12	66	32	12	48	0.309 46
13	59	17	62	70	0.309 92
14	54	71	5	32	0.308 32
15	95	59	27	28	0.313 44
16	17	83	123	55	0.308 21
17	63	54	34	5	0.308 53
18	78	15	37	19	0.314 78
19	15	12	84	62	0.309 28
20	5	37	131	46	0.304 07

根据计算出来的气动阻力系数 C_d , 拟合设计变量和结果之间的关系。假设输入变量因子 a 、 b 、 c 、 d 对应近似模型中的 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 , 输出响应值 C_d 对应 y_1 。通过拟合, 得到近似模型中 15 项模型待定系数 (涉及的代理模型系数均保留 4 位小数), 如表 2 所示。

表 2 响应面模型系数表
Table 2 RSM coefficient table

项	系 数	项	系 数
常数	0.308 5	x_4^2	-2.338 9e-7
x_1	4.683 4e-5	x_1*x_2	-1.144 7e-6
x_2	-4.205 1e-5	x_1*x_3	8.370 9e-7
x_3	-5.910 3e-5	x_1*x_4	-2.857 4e-7
x_4	8.497 4e-5	x_2*x_3	-4.954 6e-7
x_1^2	1.050 6e-7	x_2*x_4	-6.973 0e-8
x_2^2	1.216 4e-6	x_3*x_4	-5.988 8e-7
x_3^2	3.921 9e-7		

为了验证近似模型的精确度, 从本次仿真数据中, 随机抽取 5 组数据与近似模型计算结果进行对比, 对比结果如表 3 所示。

表 3 阻力系数验证表
Table 3 Verification chart of resistance coefficients

a/mm	b/mm	c/mm	d/mm	C_d^s	C_d^m	$\left \frac{C_d^m - C_d^s}{C_d^s} \right / \%$
100	20	52	52	0.311 3	0.314 0	0.87
46	85	80	41	0.307 2	0.309 5	0.75
34	51	95	73	0.304 7	0.307 3	0.85
59	17	62	70	0.309 9	0.311 5	0.52
63	54	34	5	0.308 5	0.308 8	0.10

注: C_d^s 为仿真结果, C_d^m 为近似模型结果。

分析表3中数据可知,阻力系数的误差范围都在1%之内,这表明采用此近似模型是可行的。

6) 全局寻优。全局优化方法有多岛遗传算法(multi-island genetic algorithm, MIGA)、自适应模拟退火法(adaptive simulated annealing, ASA)、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)等,本实例采用MIGA方法寻优。图10为在Isight中搭建的全局寻优平台。

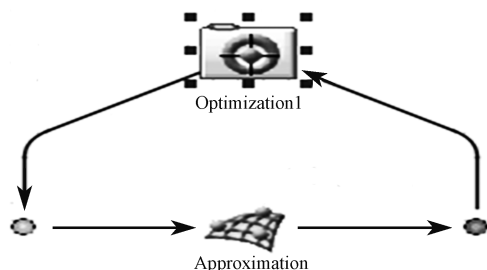


图10 全局寻优平台

Fig. 10 Global optimization platform

通过Isight优化流程中获得的最佳组合参数,将其代理模型优化结果和CFD仿真结果进行对比,所得结果如表4所示。由表4所示优化结果可知,其误差仅为0.60%。可见,本文所提出的方法有较高的可靠性与准确性。

表4 优化结果

Table 4 Optimization results

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	CFD 仿真	近似模型	误差 /%
5	23	115	75	0.303 7	0.305 5	0.60

7 结语

本文通过参数化建模、表达式文件、UG二次开发程序ugupdate.exe、ICEM命令流文件、FLUENT操作日志文件与结果文件和批处理等,在Isight上搭建了集成优化平台,提出了一种基于UG、ICEM和FLUENT联合集成优化方法。该方法在几何模型修改、网格划分、CFD仿真过程中,人工操作只需1次,极大地减少了人工操作与错误,缩短了研发周期,提高了工作效率。国际标准MIRA阶背型车模附加装置减阻优化实例验证了本文提出的CFD仿真集成高效优化技术的可靠性,证实其在生产研发中具有重要的实用价值。

参考文献:

[1] LEE K H. A Robust Structural Design Method Using the Kriging Model to Define the Probability of Design Success[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224(2): 379-388.

[2] 丁源,王清. ANSYS ICEM CFD从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社, 2013: 14.
DING Yuan, WANG Qing. ANSYS ICEM CFD from Entry to the Master[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 14.

[3] 许秋儿. 网格变形技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009.
XU Qiu'er. Research on Techniques of Mesh Deformation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.

[4] 董洪伟. 网格变形综述[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(12): 2095-2104.
DONG Hongwei. Survey of Mesh Deformation[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(12): 2095-2104.

[5] 周璇,李水乡,孙树立,等. 非结构网格变形方法研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(5): 547-561.
ZHOU Xuan, LI Shuixiang, SUN Shuli, et al. Advances in the Research on Unstructured Mesh Deformation[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(5): 547-561.

[6] 郭风华,张彩明,焦文江. 网格参数化研究进展[J]. 软件学报, 2016, 27(1): 112-135.
GUO Fenghua, ZHANG Caiming, JIAO Wenjiang. Research Progress on Mesh Parameterization[J]. Journal of Software, 2016, 27(1): 112-135.

[7] 赖宇阳,姜欣,方立桥,等. Isight参数优化理论与实例详解[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2012: 4-6.
LAI Yuyang, JIANG Xin, FANG Liqiao, et al. Isight Parameter Optimization Theory and Example Explanation[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2012: 4-6.

[8] 赵万东. 纯电动汽车车身减阻与电池散热耦合优化研究[D]. 株洲:湖南工业大学, 2015.
ZHAO Wandong. Research on Coupling Optimization of Car Body Drag Reduction and Battery Heat Dissipation of Pure Electric Vehicles[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015.

[9] 刘水长,谷正气,张勇,等. 自卸车发动机舱内热流场分析及优化[J]. 中国机械工程, 2015, 26(12): 1621-1625.
LIU Shuichang, GU Zhengqi, ZHANG Yong, et al. Thermal Characteristic Analysis of a Mining Dump-Truck Engine Compartment and Optimization[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(12): 1621-1625.

[10] 侯永涛,丁向阳. UG/Open二次开发与实例精解[M]. 北京:化学工业出版社, 2007: 1-5.
HOU Yongtao, DING Xiangyang. UG/Open Secondary Development and Instances of Pure Solution[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 1-5.

(责任编辑:廖友媛)