







T/CSAE 112-2019

# 乘用车空气动力学仿真技术规范

Technical specification of passenger car aerodynamic numerical simulation

2019-07-10 发布

2019-07-10 实施

中国汽车工程学会 发布

## 目 次

前言		II
1 范围		. 1
2 规范性引用文件		. 1
3 术语和定义	·····	. 1
4 仿真的内容及流程.		. 8
5 仿真模型建立		. 9
6 仿真结果后处理		17
7 仿真分析报告	X	18
附录A(规范性附录)	仿真流程	19
附录 B (规范性附录)	仿真模型建立	20
附录C(规范性附录)	仿真后处理	22
附录 D (规范性附录)	仿真分析报告	26
附录 E (规范性附录)	仿真结果与实验对比	28
附录 F (规范性附录)	仿真结果不确定度来源及评定流程	30
参考文献		33

Ι

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

本标准由中国汽车工程学会汽车空气动力学分会提出。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利,本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准主要起草单位:重庆长安汽车股份有限公司、上海汽车集团股份有限公司技术中心、一汽-大众汽车有限公司、中国汽车工程研究院股份有限公司、江铃汽车股份有限公司、清华大学、吉林大学。 本标准主要起草人:孙络典、罗恕燕、左辉辉、王保华、古静、余显忠、徐胜金、胡兴军、赵志明、 何悦、顾彦、王庆洋、王靖宇、李小华、迟启明、王勇、杨坤、席椿富、李启兵、李嵩。

本标准于2019年07月首次发布。

## 乘用车空气动力学仿真技术规范

## 1 范围

本标准用于规范及指导乘用车空气动力学仿真技术以及业内交流。 本标准适用于七座(含七座)以下乘用车。

#### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。 凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 3100-1993 国际单位制及应用

GB 3101-1993 有关量、单位和符号的一般原则

T/CSAE111-2019 乘用车空气动力学性能术语

SAE J2966TM Guidelines for Aerodynamic Assessment of Medium and Heavy Commercial Ground Vehicles Using Computational Fluid Dynamics

#### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

## 空气动力学坐标系 aerodynamic coordinate system

车辆或模型的空气动力学坐标系如图1所示,坐标系原点位于车辆轴距中心线和轮距中心线在地面 上投影的交点。

见图1。



图1 空气动力学坐标系



#### 图2 自由来流速度

## 3.1.1

#### x轴 x axis

x轴正方向为车辆向后,与y轴、z轴形成空气动力学坐标系。 见图1。

## 3. 1. 2

#### y轴 yaxis

y轴正方向为车辆向右,与x轴、z轴形成空气动力学坐标系。 见图1。

## 3. 1. 3

## z轴 zaxis

z轴正方向为车辆向上,与x轴、y轴形成空气动力学坐标系。 见图1。

## 3. 1. 4

```
车辆速度 vehicle velocity
\vec{V}
车辆在x方向的速度矢量。
见图2。
```

## 3. 1. 5

```
风速 wind velocity
\overrightarrow{V_w}
在x-y平面上相对于x方向成\theta角,且大小为Vw的风速矢量。
见图2。
```

## 3.1.6

## 自由来流速度 free stream speed

```
V_{\infty}
大小相对于车辆速度矢量\vec{V}的风速矢量,V_{\infty} = \left| \overrightarrow{V_{W}} - \vec{V} \right|。
见图2。
```

## 3. 1. 7

横摆角 yaw angle *ψ*  车辆行驶方向(-x轴方向)和自由流速度 $V_{\infty}$ 之间的角度,车头向右为正。见图2。

## 3. 2

## 气动阻力 drag

```
D
```

作用在x轴方向的气动力, x方向为正, F<sub>x</sub>=D。

## 3. 3

**气动侧向力** side force S 作用在y轴方向的气动力,y方向为正,F<sub>Y</sub>=S。

#### 3.4

**气动升力** lift *L* 作用在z轴方向的气动力,z方向为正,F<sub>z</sub>=L。

#### 3.5

侧倾力矩 rolling moment *RM* 绕x轴的气动力矩,车辆右侧向下(右倾)为正。

## 3.6

俯仰力矩 pitching moment *PM* 绕y轴的气动力矩,车头抬起为正。

## 3.7

横摆力矩 yawing moment *YM* 绕z轴的气动力矩,车头向右为正。

## 3.8

## 气动阻力系数 drag coefficient

 $C_{D}$ 

表征物体与流体发生相对运动时产生的阻力大小,无量纲参数。

3.9

侧向力系数 side force coefficient  $C_s$  表征物体与流体发生相对运动时产生的侧向力大小,无量纲参数。

3.10

升力系数 lift coefficient

 $C_L$ 

表征物体与流体发生相对运动时产生的升力大小,无量纲参数。

3.11

正投影面积 frontal area

Α

车辆在其正前方平行于x方向的光照射下投射到车后垂直于x方向的屏幕上的投影面积。

3.12

```
轴距 wheel base
```

WB

通过汽车同一侧面相邻两车轮中心,并垂直于汽车纵向对称平面的两垂线之间的距离。

3.13

## 车辆姿态 vehicle altitude

根据车辆设计状态及对应的车辆配重而确定的车辆姿态,以轮眉高度Ht表示。

3.14

```
轮眉高度 trim height
```

 $H_t$ 

车辆水平放置时,轮眉到地面的最大垂直距离。

3. 14. 1

## 前轮眉高度 front trim height

H<sub>ff</sub> 车辆水平放置时,前轮轮眉到地面的最大垂直距离。 见图3。

3.14.2

后轮眉高度 rear trim height H<sub>rr</sub> 车辆水平放置时,后轮轮眉到地面的最大垂直距离。 见图3。



图3 轮眉高度

## 3. 15

## 计算流体动力学 computational fluid dynamics (CFD)

一种使用计算机求解流动、传热和相关传递现象的系统分析方法和工具。

#### 3.16

## 仿真模型 simulation model

用于进行数值模拟的计算机数字模型。

#### 3.17

## 流场 flow field

计算流体介质所占据的空间区域。

#### 3.18

#### 雷诺数 reynolds number

表征流体惯性力与粘性力的比值大小,无量纲数。Re=ρ·V<sub>∞</sub>·d<sub>e</sub>/μ。,d<sub>e</sub>为一特征长度,通常取整车 长度。用以表征流体流动情况,可作为流动特性的判断依据。

#### 3.19

## 边界层 boundary layer

流体与固体壁面之间因流体粘性力引起的贴附于固体壁面的流体薄层,以0~99%来流速度的梯度层 作为边界层的厚度。

#### 3. 20

#### 计算域 simulation domain

在CFD数值模拟过程中参与数值计算的区域,其几何边界一般包括进口、出口和周围壁面。

## 3. 21

## 加密区域 refined region

针对仿真流场中的关键或流动复杂区域,进行局部网格加密处理的区域。

## 3. 22

## 流场进口 inlet

定义计算域的进口边界上速度、压力、流量或其它相关参数的一种边界条件。主要包括速度进口、 压力进口、质量流量进口等条件类型。

#### 3. 23

#### 流场出口 outlet

定义计算域的出口边界上速度、压力、流量或其它相关参数的一种边界条件。主要包括自由流出口、 压力出口等类型。

#### 3. 24

旋转边界条件 rotational boundary condition

定义车辆上旋转零部件(如风扇、车轮)的一种边界条件,主要有旋转壁面、运动参考坐标系(MRF) 和滑移网格(Sliding mesh)三种设置方法。

3. 25

#### 滑移壁面 slip-wall

滑移壁面的法向速度为零,且压力梯度为零。

#### 3.26

#### 多孔介质 porous media

CFD仿真中针对具有孔隙形态零部件的近似仿真模型。

3. 27

## 稳态计算 steady-state simulation

一种近似计算,在数值仿真中把流动视为稳定流动,假设计算域内任意位置的物理量不随时间变化的计算,求解过程中不包含对时间的离散,所求得的是物理量稳定时的状态。

3.28

## 瞬态计算 unsteady-state simulation

基于流场中的各项变量随时间改变的前提进行的计算,求解过程中包含对时间的离散,所求得的是 物理量随时间发展的过程。

3.29

## N-S 方程 Navier-Stokes equation

描述牛顿流体动量守恒的运动方程组。

3.30

#### LBM 方法 Lattice-Boltzmann method

对波尔兹曼方程进行离散求解,研究流体力学问题的一种方法。该方法在介于微观和宏观的层面, 离散并求解分布函数,进而统计推导出速度、压力、密度等宏观物理量。

3. 31

#### 雷诺平均模型 reynolds averaged N-S model

RANS

工程流体动力计算中使用最为广泛的一种湍流模型,其求解时间均值的N-S方程,其包括**k**-ε模型, k-ω模型及雷诺应力模型。

3.31.1

k-ε模型 k-ε model

两方程模型,求解湍流动能 k 和湍流耗散率 $\varepsilon$ 。

3.31.1.1

标准k-ε模型 standard k-ε model

**k**-ε模型的一种,特点是应用多,计算量适中,有较多数据积累和相当精度,但对于曲率较大、 较强压力梯度、有旋问题等复杂流动模拟效果欠佳。

3.31.1.2

#### 重整化群k-ε模型 renormalization group k-ε model

**k**-**ɛ**模型的一种,特点是能模拟射流撞击、分离流、二次流、旋流等中等复杂流动,但要受到旋 涡粘性各向同性假设限制。

3.31.1.3

可实现k-ε模型 realizablek-ε model

**k**-ε模型的一种,同重整化群**k**-ε模型基本一致,还可以更好地模拟圆孔射流问题,但要受到旋 涡粘性各向同性假设限制。

3.31.1.4

#### 标准k-ε模型 standard k-ε model

**k**-ε模型的一种,特点是对于壁面边界层、自由剪切流、低雷诺数流动较好,适用于逆压梯度存在情况下的边界层流动和分离、转捩。

3.31.1.5

#### 剪切应力传输k-ε模型 shear stress transport k-ε model

与标准k-s基本一致,由于对壁面距离依赖性强,因此不太适用于自由剪切流。

3.31.2

#### 雷诺应力模型 reynolds stress model

是最符合物理解的RANS模型,避免了各向同性的涡粘假设,占用较多的CPU时间和内存,较难收敛,适用于复杂3D流动。

#### 3.32

大涡模拟 large eddy simulation

LES

为获取湍流运动的细节,对在空间上滤波获得的大尺度涡运动使用直接数值模拟,而对滤波获得的 小尺度涡运动对大尺度涡运动的影响使用亚格子模型模拟的方法。

3.33

#### 分离涡流模拟 detached eddy simulation

DES

LES方法与雷诺时均方法的混合,既能有接近于LES的计算精度,又能极大减少对计算节点数量要求。

3.34

#### 交界面 interface

CFD仿真中不同计算域之间的结合面,或者用来定义车辆上能够进行零厚度处理的零部件。

3.35

Y+ Y Plus

表征边界层中某点到壁面的相对距离,用当地壁面切应力归一化的无量纲数。特指近壁第一层网格 节点对应的Y+,用以评估近壁网格法向尺度的大小。  $Y^+ = \frac{\Delta y_p}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_n}{\rho}}, \Delta y_p$ 为近壁面节点P到固壁的

距离, $\tau_n$ 为壁面切应力。

3.36

#### 速度云图 velocity contour

表征给定平面上速度场大小的图。

3.37

**压力系数** pressure coefficient 流体动力学中遍布整个流场的相对压力,无量纲数。

#### 3.38

**压力系数云图** pressure coefficient contour 表征给定平面上压力系数大小的图。

## 3.39

速度矢量云图 vector contour 表征给定平面上速度矢量大小及方向的图。

## 3.40

**面剪切力** shear stress 流体沿着壁面运动时,对壁面产生的切向力。

#### 3. 41

面剪切力云图 shear stress contour 表征给定平面上剪切力大小的图。

#### 3. 42

等值面 ISO surface

空间中由所有点S= { (x, y, z): F (x, y, z) = F<sub>t</sub> } 组成的一个曲面。其中, F<sub>t</sub>为某一给定值。

## 4 仿真的内容及流程

#### 4.1 仿真内容

乘用车空气动力学仿真分析是应用CFD软件对车辆周围的流场进行数值模拟,获得车辆在行驶时所 受到的气动六分力系数、前舱进气量及相关流场信息。通过对这些参数的分析,评价汽车的气动性能。

## 4.2 仿真流程

乘用车空气动力学仿真分析常用流程主要包括几何数据准备、仿真模型建模及检查、生成计算节点、 求解器设置、仿真求解、仿真分析结果评估、仿真结果输出及分析报告编写8个部分,具体参见附录A。

#### 5 仿真模型建立

#### 5.1 仿真模型建模

#### 5.1.1 坐标系

5.1.1.1 乘用车空气动力学坐标系如图1所示。

5.1.1.2 仿真模型建模时采用默认的全局坐标系,对车轮、冷却系统等边界定义坐标系与全局坐标系 不一致时,需增加相应的局部坐标系。

#### 5.1.2 单位制

单位制的选择应按照GB 3100-1993和GB 3101-1993执行。乘用车空气动力学分析建模时推荐采用SI 单位制,如表1所示。

物理是互称	SI 单位制		
初垤里石М	单位名称	单位符号	
长度	*	m	
时间	秒	S	
速度	米每秒	m/s	
密度	千克每立方米	kg/m³	
л	牛	Ν	
力矩	牛顿*米	N <sup>-</sup> m	

表1 SI 单位制系统

#### 5.1.3 仿真模型建模要求

#### 5.1.3.1 一般要求

在仿真模型建模前,应根据仿真目的、预估计算时间和计算资源制定仿真模型建模方案。使用者可 参考特定软件的使用指南或最佳实践进行建模。仿真模型宜按1:1的比例关系建立。仿真模型应准确地 表达设计车的几何信息,基本要求有:

- a) 乘员舱、发动机、油箱、排气系统的内部空间可进行封闭,将其排除在计算域之外,以提高计 算收敛性及节约计算资源。
- b) 发动机舱内部气流流动应被模拟,仿真模型中若为传统格栅,建模时格栅处于开启状态。如果 为外置式主动栅,则不同工况开启不同,也可能是关闭的。所以,格栅状态根据对应工况处理, 符合仿真需求即可。
  - c) 车辆仿真模型按照设计部门提供的车辆姿态进行建模。
  - d) 基于 N-S 方程的软件求解时,在整车模型外部建立长方体计算域,用以模拟风洞试验区域,计 算域模型边界示意图,如图 4 所示。计算域尺寸示意图,如图 5 所示。推荐计算域尺寸应保证 边界不影响车辆周围的流动特性,同时满足在不同横摆角的仿真计算要求。计算域推荐尺寸如 表 2 所示。

T/CSAE 112-2019



Н	W	$L_1$	$L_2$
14m	28m	15m	40m
(≥7倍车高)	(两侧均≥7 倍车宽)	(≥3倍车长)	(≥8倍车长)

e) 在确保分析精度的前提下,可对模型中不影响计算结果的几何细节进行简化,模型的简化应符 合以下要求:

1) 去除模型中对气流流动影响小的细小零件,如螺栓、卡扣、垫片、线束等。

- 2) 整车模型表面对于后视镜区域、A 柱区域及侧窗密封条区域,应保留缝隙;对于模型中小于 3mm 的凹槽和缝隙可以用平滑的曲面补平,但不能存在尖角、干涉、重叠、扭曲的面。
- 定位孔、螺栓连接孔,可直接密封;乘员舱地板以及前壁板上,有较多连通内外的缝隙或 孔洞,根据分析要求进行简化处理,推荐直径大于 30mm 的孔应保持原有特征。

## 5.1.3.2 冷却系统建模要求

冷却系统,如散热器、冷凝器、中冷器(涡轮增压发动机)等,均采用相似的处理方式。如图6所示为散热器的建模方式,将散热器划分为三部分:迎风面、背风面及四周壁面。



说明:

1—迎风面; 2—四周壁面; 3—背风面。

#### 图6 散热器建模示意图

#### 5.1.3.3 车轮建模要求

如需模拟车轮旋转工况,常用的建模方式有2种:

a) 基于 N-S 方程的软件求解时,轮胎与地面可保持原状态建模,在车轮轮辐周围建立旋转区域的 交界面,如图 7 所示。



2—轮辋旋转域模型。

#### 图7 车轮旋转域建模示意图

b) 基于 LBM 方法的软件求解时,可按照车轮的数模建模,车轮和地面可以干涉,无需做特殊处理。 干涉的尺寸建议在实车上测量轮心到地面的高度。

## 5.1.3.4 冷却风扇建模要求

模型中冷却风扇有无扇叶,不同车型风阻计算结果影响不同。推荐冷却风扇设定为静止状态。

## 5.2 生成计算节点

仿真模型应保证各个重要的局部流场的真实模拟。可根据各自的计算资源等条件,合理设定生成计 算节点的尺寸,计算节点规模。

## 5.2.1 基于 N-S 方程网格划分要求

- a) 整车模型面网格划分以保持原有几何形状为前提,为保持网格重构时的车体几何特征,可主要 针对计算域、冷却模块交界面、车体表面的关键特征,生成特征线、设置防接触。面网格推荐 尺寸如表3所示。
- b) 整车体网格类型有四面体、多面体、切割体,推荐使用切割体网格类型,采用稳态计算时,体 网格数目推荐不少于 3000 万,采用瞬态计算时,体网格数目推荐不少于 6000 万。
- c) 合适的 Y+值要依据雷诺数及壁面处理方式来确定。对于可实现的k ε湍流模型,车体表面的 Y+值应低于 300(推荐值是 30 到 100 之间);对于 DES 湍流模型,车体表面的 Y+值约为 1。

区域	部件	最小推荐尺寸 (mm)	最大推荐尺寸 (mm)	
计算标	计算域底部加密区域	8	32	
订异坝	其他计算域边界	256	256	
动力系统	动力系统主要部件	8	16	
<u> </u>	管路部件	4	8	
	车身主要部件	8	16	
左自至弦	<b>治技</b> 押	2(更小的尺寸设置,	Λ	
牛牙尔尔	則作的加	视格栅造型而定)	4	
	后视镜及其他小部件	2	4	
<b>应</b> 舟亥纮	底盘主要部件	8	16	
成鈕尔沉	底盘小部件	4	8	
山乙山思乏法	电子电器较大部件	4	8	
电丁电奋尔坑	线束管路等较小部件	2	4	
冷却模块	散热器、冷凝器、中冷器等热 交换部件。	2	4	

表3 网格尺寸设定推荐值

d) 车体附近的气流受车体的影响会产生速度梯度,设置4级体网格加密区,加密区网格尺寸分别 为 8mm、16mm、64mm 及 128mm 的加密域控制,如表4所示。图8、图9所示为某轿车加密区域 范围示意图。

表4 加密区尺寸推荐值

加密区域	推荐尺寸(mm)
进气格栅、A 柱、尾柱、后视镜、后保、行李 箱盖及底盘	8
车前及车侧面 0.5m,车后 5m,车高 0.5m 区域	16
车前及车侧面 1m,车后 8m,车高 1.5m 区域	64
车前及车侧面 2m,车后 12m,车高 3.5m 区域	128



## 5.2.2 基于 LBM 方法计算节点划分要求

对车身壁面的面网格, 仅需要能体现面的特征以及贴体度要求, 主要通过控制加密区的尺寸来控制 求解域, 单元尺寸设定推荐值如表5所示。体网格数目推荐不少于1亿。

加密区域	推荐尺寸(mm)
冷却孔及热交换器	2.5
机舱(热交换器的下游)	10
复杂的格栅区域	1.25
车身周围到地面	10.0
车身以及轮胎周围	5.0

## 表5 加密区尺寸推荐值

A 柱	2.5
前舱/发动机舱	2.5
SUV 以及商务车的通风口	2.5
车尾后分离边-仅限圆弧边	2.5
冷却孔及热交换器之间	2.5
引擎盖主要边	2. 5

#### 5.3 物理模型设置

计算方案有稳态计算和瞬态计算两种,采用稳态计算时,常用的湍流模型有 模型,k-ω模型 及雷诺应力模型;采用瞬态计算时,常用的湍流模型有DES湍流模型、LES湍流模型。物理模型设置及使用推荐详见附录B.1。

#### 5.3.1 计算域

- a) 流场进口(计算域进口)边界条件设置为速度进口,速度大小设置为120km/h,通过湍流强度 加特征长度的方式设置湍流属性,湍流强度推荐设置为0.01,特征长度推荐设置为0.001m。
- b) 流场出口(计算域出口)边界条件设置为压力出口,压力设置为 0 Pa,通过湍流强度加特征 长度 Length 的方式设置湍流属性,湍流强度推荐设置为 0.01,特征长度推荐设置为 0.001m。
- c) 计算域侧面和顶面推荐设置为滑移壁面或对称边界条件,车后地面及整车都为非滑移壁面。

## 5.3.2 冷却系统

冷凝器、散热器、中冷器等冷却模块采用多孔介质进行模拟,在多孔介质与主流场之间建立交界面 处。并根据冷却系统单体性能试验数据,获得压降与风速之间的关系,从而计算出多孔介质的惯性系数 和粘性系数,输入模型。多孔介质的惯性系数和粘性系数求取方法可参见附录B.2。

#### 5.3.3 车轮

车轮旋转的边界条件有三种设置方法,分别是旋转壁面、运动参考坐标系(MRF)和滑移网格(Sliding mesh)。对于稳态计算,推荐轮辋区域设置运动参考坐标系,胎面设置成旋转壁面;对于瞬态计算,推 荐轮辋设置成滑移网格,轮胎设置成旋转壁面。

#### 5.3.4 其余

仿真模型其余设定为壁面边界条件。

#### 5.4 求解过程

#### 5.4.1 求解器设置一般要求

5.4.1.1 在求解计算过程中,若出现计算收敛性较差或发散问题,可通过降低松弛因子提升稳定性。 若依旧出现收敛问题,则应检查模型的单元质量和边界条件。

5.4.1.2 求解计算的过程中,应关注残差值的收敛性和气动力系数的收敛性。

5.4.1.3 使用者可结合求解软件的最佳实践进行设置。

#### 5.4.2 基于 N-S 方程求解器设置

5.4.2.1 基于 N-S 方程的求解软件,可进行稳态或瞬态求解计算。通过残差监测图和气动阻力系数监测图监测求解情况,需要计算的迭代步数或总时间步依赖于问题本身。

**5.4.2.2** 采用稳态求解计算时,风阻系数的结果是随迭代步数变化的曲线,残差值小于 10<sup>-4</sup>,气动阻 力系数在最后迭代步数 500 步内,气动阻力系数的波动值小于 0.001,则可视为计算稳定。收敛较好的 残差曲线如图 10 所示,气动阻力系数监控曲线如图 11 所示。





5.4.2.3 对于瞬态求解计算,推荐先进行稳态计算,再进行瞬态计算。稳态计算步数及收敛停止判定 同稳态计算;进行瞬态计算时,风阻系数的结果是随时间步变化的曲线,需要计算的总时间步依赖于问 题本身。推荐计算时间步长设置为 0.0005s,根据单个时间步内的收敛情况,调整内迭代步数,计算物 理时长建议不小于行驶过 2 个车长距离的时间。在停止前至少 0.5s 时长内,气动阻力系数处于周期性 稳定波动。计算残差、气动阻力系数监控曲线分别如图 12、图 13 所示。



图13 瞬态气动阻力系数监测图

## 5.4.3 基于 LBM 方法求解器设置

基于LBM方法,风阻系数的结果是随时间步变化的曲线,一般采用向后平均的方法来判定结果的收 敛以及获取较为合理的分析值,需要计算的总时间步依赖于问题本身。如图14所示,2个flow pass(1 个flow pass代表车行驶过2个车长距离的时间)的时间段内,风阻系数的方差梯度在±0.001可认为结 果收敛。



图14 瞬态计算的气动阻力系数监测图

#### 6 仿真结果后处理

#### 6.1 仿真结果输出

仿真分析可输出拟关注的分析结果,如输出气动六分力系数、前舱进气量及关键仿真信息如仿真车 速、迎风面积,如表6所示。

表6 仿真分析结果

车速 (km/h)	迎风面积(m <sup>2</sup> )	前舱进气量(kg/s)	侧倾力矩系数	俯仰力矩系数	横摆力矩系数
阻力系数	升力系数	侧向力系数	2//7		

## 6.2 仿真结果评价方法

#### 6.2.1 速度云图

根据仿真分析结果输出坐标系三个方向的截面速度云图,附录C中图C.1为Y=0截面速度云图。根据 车辆周边的速度分布,以及速度梯度变化判断分析结果的有效性。车辆周边流速越高,速度梯度变化越缓,整车阻力呈现减小趋势。

#### 6.2.2 压力系数云图

根据仿真分析结果输出整车表面压力分布云图,附录C中图C.2为车体表面压力云图。减小迎风正压 区,增大逆风正压区。迎风面正压越小,逆风面正压越大,整车阻力呈现减小趋势。

#### 6.2.3 速度矢量云图

根据仿真分析结果输出坐标系三个方向的截面速度矢量图,附录C中图C.3为Y=0位置截面速度矢量 图,根据矢量图分析整车周围流场结构,获得整车周围涡系形态与分布。减少车辆前部气流分离,加速 尾部气流分离,整车阻力呈现减小趋势。

#### 6.2.4 流线

根据仿真分析结果输出整车周围的流线图,附录C中图C.4为车轮附近流线图。流线紧贴整车表面,快速顺畅通过车辆,整车阻力呈现减小趋势。

#### 6.2.5 面剪切力云图

根据仿真分析结果整车壁面剪切应力图,附录C中图C.5为整车表面壁面剪切应力云图。根据剪切应 力分布,以及应力梯度变化判断分析结果的有效性。

#### 6.2.6 等值面云图

根据仿真分析结果输出整车总压为零的等值面,附录C中图C.6为整车总压为零的等值面。根据等值面云图获得整车等值面的大小以及分布形态。总压为零等值面反应流动分离区域的大小,总压为零等值面小,整车阻力呈现减小趋势。

#### 6.2.7 阻力系数累积曲线

根据仿真分析结果输出整车风阻系数累积曲线,附录C中图C.7为阻力系数累积曲线。根据阻力系数 累计曲线获得整车风阻系数增长趋势,根据风阻系数变化以及增长变化梯度,判断分析结果的有效性。

### 7 仿真分析报告

## 7.1 报告一般要求

根据分析对象及分析内容,制定分析报告的名称、编号、分析标准、报告编写人员信息。

#### 7.2 仿真分析模型

对仿真分析模型应对的车辆的制造商、生产年份信息进行说明,记录整车数据的版本,如CAS面版本、机舱、底盘数据状态信息。

## 7.3 仿真分析软件

记录仿真软件的官方名称、版本信息、软件类型。

#### 7.4 仿真任务概述

对分析任务进行背景介绍,并说明本报告分析的内容及拟关注的分析结果。

#### 7.5 仿真分析过程

对车辆数模信息、模型简化、模型状态、边界条件、求解方式逐个进行必要的说明。

#### 7.6 结果分析与结论

分析结果应至少输出气动六分力系数、前舱进气量及关键仿真信息如仿真车速、迎风面积。根据仿 真后处理结果,总结分析结论。对分析对象的空气动力学性能给出客观、综合评定。

#### 7.7 分析报告

仿真分析报告详见附录D。



图A.1 仿真流程图



表B.1 物理模型设置及使用推荐

求解方法	计算节点规模	计算方法推荐	湍流模型推荐
基于 N-S 方程求解	不少于 3000 万	稳态计算	可实现的 <b>k – </b> 8湍流模型
	不少于 6000 万	瞬态计算	DES 湍流模型
基于 LBM 方法求解	不少于1亿	瞬态计算	LES 湍流模型

#### B.2 冷却模块参数选择

B.1 物理模型

物理模型设置及使用推荐见表B.1。

冷却模块单体性能实验数据不少于六组,如表B.2所示。

表B.2 冷却模块单体性能实验数据

散热器/冷凝器/中		风速(m/s)					
冷器	风速 1	风速 2	风速 3	风速 4	风速 5	风速 6	•••
风阻(Pa)	测试结果1	测试结果2	测试结果 3	测试结果 4	测试结果 5	测试结果 6	•••
芯体尺寸(m)	宽度 w: 高度 h: 厚度 d:						

根据冷却模块单体性能试验数据, 拟合一条二次多项式曲线, 截距为零, 记录 $R^2$ 值, 推荐 $R^2$ 值>0.99, 误差在5%以内。散热器的压降与风速的关系曲线,  $y = ax^2 + bx$ 。



图B.1 某散热器压降与风速的关系曲线

根据系数a、b及冷却模块厚度等参数,求出多孔介质的惯性阻尼系数 $P_i$ 和粘性阻尼系数 $P_v$ 。为冷却模块交界面建立局部坐标系,如图B.2所示。若Z方向为冷却模块进风面的法线方向,则Z方向的惯性

阻尼系数为 $P_i = ma/d$ ,粘性阻尼系数为 $P_v = nb/d$ ,系数m、n取值以及另外两个方向的惯性阻尼系数和粘性阻尼系数的求取请参考特定软件使用指南求解。



图B.2 冷却模块交界面坐标参考系设置





图C.2 整车表面压力系数分布云图

C.3 Y=0 位置截面速度矢量图





C.4 车轮附近的流线图



图C.4 车轮附近的流线图

C.5 整车表面壁面剪切应力云图



图C.5 整车表面壁面剪切应力云图

C.6 总压为零的等值面



## 图C.6 总压为零的等值面

C.7 整车风阻系数积分曲线



表D.1 仿真分析报告

						17 OONE 112 2
			附 〔规范性 仿真分	录 D 挂附录) 析报告		
			表D.1 仿〕	真分析报告		
报告名	称					
报告编	号				Å	
仿真分析	对象				YIN-	
仿真分析	时间				4-7	
报告编制	人员			1		
报告审核	人员			-///		
报告校核	人员			$\sqrt{7}$	$\wedge$	
报告批准	人员					
仿真分析:	软件	软件名称: 软件类型: 版本日期:				
仿真模型	文件					
仿真分析	标准	11				
仿真分析	内容					
仿真模型:						
1、 车辆信息						
公司名称		$\overline{\mathbf{A}}$	车辆类型		上市时间	
车辆长度		$\nabla$	车辆宽度		车辆高度	
发动机		$\overline{\mathcal{N}}$	变速箱		驱动形式	
悬挂类型			格栅开口面积		轮辋开孔率	
轮胎规格	前:		轮辋类型	前:	轮辐数量	
	后:			后:	轮胎品牌	
X						
2、 模型气动套体	+					
前保气帘			冷却系统导流板		主动格栅	
机舱下护板		A 柱装饰条		车身下护板		
前唇		油箱下护板板		尾翼		
备胎下护板			侧翼		前轮扰流条	
空气悬架			后轮扰流条		其它	
3、仿真工况						
前轮眉高度			后轮眉高度		车速	
横风速度			横摆角度		车轮转速	
地面状态			风扇状态		其它	
仿真分析结果:						

## T/CSAE 112-2019

1、气动力参数:		
整车迎风面积	阻力系数	整车阻力面积
侧向力系数	前舱进气量	升力系数
侧倾力矩	俯仰力矩	横摆力矩
<ol> <li>2、仿真分析结果:</li> <li>3、仿真分析结论:</li> </ol>		AN A

## 附 录 E (规范性附录) 仿真结果与实验对比

#### E.1 状态确认

仿真模型应与设计数据、风洞实验车辆状态保持一致,主要包括:

- a) 上车体外造型及细节。
- b) 底盘降阻套件如前后轮扰流条、底盘护板的安装位置、设计尺寸、安装状态。
- c) 主动气动套件如可变悬架、主动进气格栅、可变尾翼的状态。
- d) 冷却风扇设定状态。
- e) 风速、横摆角、姿态。

#### E.2 仿真结果与试验结果对比分析

a) 气动力参数对比

表E.1给出的是气动阻力对比示例,其它气动力参数(参照本标准6.1 内容)应做相同对比表格。 误差计算以实验结果为基准,得出仿真结果的误差率。

#### 表E.1 气动阻力仿真结果与实验对比

车型	仿真结果		实验结果		误差计算(%)	
	整车阻力系数	整车阻力面积	整车阻力系数	整车阻力面积	整车阻力系数	整车阻力面积
车型1						
车型 2		KX				
	×	11				

b) 车体表面静压对比

在车辆表面上布置压力测点,仿真模型中的测点位置应与风洞实验车辆测点位置保持一致,如图E.1 所示为某车型中截面表面压力系数与实验对比。以实验结果为基准,计算仿真结果中各测点压力误差率。



图E.1 某车型 Y=0 中截面表面测点压力系数与实验结果对比

## 附 录 F

(规范性附录)

## 仿真结果不确定度来源及评定流程

#### F.1 仿真结果不确定度来源

#### F.1.1 CAD建模的不确定性

CAD建模的不确定度来源:

- a) 建模软件里的三维模型不确定。
- b) 通过三维坐标测量仪扫描得到的模型不确定性。
- c) 通过建模软件建立的实车模型一般较为复杂,扫描得到的模型会出现不连续的面。这些都会增加汽车 CAD 建模过程中的不确定度。

#### F.1.2 CFD计算网格的不确定性

CFD空间网格及表面网格不够密或不够光滑所带来的不确定度,包括:

- a) 网格大小设置不合理。
- b) 汽车车身边界层网格设置不合理。
- c) 汽车轮胎与接触地面网格设置不合理。
- d) 后视镜、雨刮器、行李架上的一些尖角处网格不合理。

#### F.1.3 CFD计算物理模型的不确定性

物理模型不确定是指CFD控制方程不能充分地描述要模型化的物理现象,包括:

- a) 由于真实流动和模型方程之间的不同所引入的不确定度,如 Euler 方程计算粘性流的误差。
- b) 湍流模型的误差,由于湍流现象尚未充分的了解,湍流模型的不同形式对不确定度影响很大。
- c) 转捩模式的误差。
- d) 边界条件表述的误差,如计算域进口及出口条件。
- e) 粘性项的近似,非牛顿粘性效应的忽略。
- f) 迭代收敛的不确定度,完全收敛的结果与没有完全收敛的结果之间的差别。

#### F.1.4 CFD计算程序的不确定性

CFD计算程序的不确定性主要包括:

- a) 程序计算格式的误差,由于空间离散和时间离散的有限精度以及有限分辨率导致数值解与所求 解方程的精确解之间存在误差。
- b) 程序设计问题,大多属于人为因素,取决于 CFD 代码编制人员的能力与经验。

## F.1.5 计算机存储的不确定性

计算机数据存储字长的限制造成误差,带来不确定度。

#### F.2 仿真结果不确定度的评定流程



图F.1 不确定度评定方法流程图

仿真结果不确定度评定流程如图F.1所示,按照如下顺序进行:

#### F.2.1 建立数学模型

建立满足不确定度评定要求的数学模型,即被评估量Y与影响量  $x_i$  (i = 1, 2, ..., N) 间的函数关系:

$$Y = f(x_1, x_2, ..., x_N)$$
 (F. 1)

式中:

Y为被评估量, *x<sub>i</sub>*为函数的输入量,注意所有对不确定度有影响的输入量都应包含在数学模型中。 被评估量Y的不确定度将取决于*x<sub>i</sub>*的不确定度u(*x<sub>i</sub>*),首先评定*x<sub>i</sub>*的标准不确定度。

#### F.2.2 分析不确定度来源

根据建立的数学模型,分析并列出对被测量有显著影响的不确定度分量,要做到不遗漏、不重复。

#### F.2.3 不确定度的A类评定方法

由一系列测量数据的统计分析来评定的方法称为不确定度的A类评定,其标准不确定度u等同于由系列观测值获得的标准差s。

对被测量x,在重复条件下进行n次独立重复观测,观测值为 $x_i$ (i = 1, 2, ..., N)。且各 $x_i$ 值为不包含系统误差或已进行了修正后的值,也不含有粗大误差。则算术平均值 $\overline{x}$ 为:

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{F. 1}$$

 $\overline{x}$ 作为被测量值的估计值即测量结果, s(x)则为标准差, 由贝塞尔公式得到:

31

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}$$
 (F. 3)

式中:

定义 $s(\overline{x})$ 为平均值的标准差,其值为:

$$s(\overline{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \tag{F. 4}$$

式中:

将 $s(\bar{x})$ 作为测量结果的标准不确定度,即A类不确定度。

测量次数n充分多,才能使A类不确定度的评定可靠,一般n应大于5。但并不是越大越好,因为很难保证测量条件完全一致,要视具体情况而定。

若m个被测量 $x_i$ ,在重复性条件下,均进行了n次独立观测,观测值分别为 $x_{i1}$ , $x_{i2}$ ,……, $x_{in}$ ,其 平均值 $\overline{x}_i$ ,则可得合并样本标准差即合成标准不确定度 $s_p$ 为:

## F.2.4 不确定度的B类评定方法

不进行测量数据的统计分析,而是基于经验或其他信息所认定的概率分布来评定的方法,称为B类 评定法。被测量的估计值为x,其标准不确定度的B类评定是借助于影响x可能变化的所有信息进行科学 判定的。

B类评定的信息来源有:前期的数据;对有关技术资料和计算特性的了解和经验;生产部门提供的 技术说明文件;校准证书、检定证书或其他文件提供的数据、准确度的等别或级别,包括目前正在使用 的极限误差等;手册或某些资料给出的参考数据及其不确定度;国家标准或类似技术文件中给出的重复 性限r或再现性限R。

## F.2.5 合成标准不确定度的计算

A类或B类评定之后得到的不确定度分量通过一定组合方法得到合成标准不确定度;合成时需考虑其 线性特性以及相关性问题,具体可以根据建立的数学模型进行合成。

## F.2.6 扩展不确定度的计算

扩展不确定度用标准差的倍数表述,规定了测量结果取值区间的半宽度,该区间包含了大部分合理的被测量值。

## F.2.7 仿真结果不确定度的报告

根据上述不确定度的评定过程,完成不确定度评定报告。

## 参考文献

[1] GB/T 33582-2017 机械产品结构有限元力学分析通用规则

[2] SAE R-430 Thomas Schuetz, Aerodynamics of Road Vehicles , Fifth Edition, SAE International, eISBN: 978-0-7680-8253-1, 2016.