

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.01.010

# 汽车外流场数值仿真 $k-\varepsilon$ 模型适用性研究

宋亚豪<sup>1</sup>, 谷正气<sup>1,2</sup>, 刘水长<sup>1</sup>, 石佳琦<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 生物质纤维功能材料湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412007;

2. 湖南文理学院, 湖南 常德 415000)

**摘要:** 由于目前的湍流模型并非针对汽车空气动力学进行数值仿真, 因而造成潜在的计算误差。因此, 为探寻适合的数值计算模型, 以 MIRA 阶梯背汽车 1/3 比例模型为研究对象, 对常用的 Standard  $k-\varepsilon$ 、RNG  $k-\varepsilon$  和 Realizable  $k-\varepsilon$  3 种  $k-\varepsilon$  涡黏湍流模型进行数值仿真, 以计算所得的气动力系数、尾部流场及表面压力系数为适用性评价指标, 并与 HD-2 风洞试验数据对标。研究结果表明: 3 种模型中, Standard  $k-\varepsilon$  模型收敛速度和效率最优, 但气动阻力的计算精准度最差; RNG  $k-\varepsilon$  模型的表现一般, 而 Realizable  $k-\varepsilon$  模型能获得最高的气动阻力计算精度, 与风洞试验结果对比, 误差在 5% 以内, 但收敛速度和效率相对较差; 同时, 3 种湍流模型对气动升力的计算结果与风洞试验对比存在较大误差。

**关键词:** MIRA 阶梯背汽车模型;  $k-\varepsilon$  涡黏湍流模型; 外流场; 风洞试验

**中图分类号:** U461.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2019)01-0066-07

**引文格式:** 宋亚豪, 谷正气, 刘水长, 等. 汽车外流场数值仿真  $k-\varepsilon$  模型适用性研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(1): 66-72.

## A Study on the Applicability of $k-\varepsilon$ Model for Numerical Simulation of Automobile External Flow Field

SONG Yahao<sup>1</sup>, GU Zhengqi<sup>1, 2</sup>, LIU Shuichang<sup>1</sup>, SHI Jiaqi<sup>1</sup>

(1. Hunan Key Laboratory of Biomass Fiber Functional Materials, College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China; 2. Hunan University of Arts and Science, Changde Hunan 415000, China)

**Abstract:** Due to the fact that the current turbulence model is not intended for the numerical simulation of aerodynamic especially, there will be some potential calculation errors in this process. In order to find the suitable numerical model, taking the 1/3 proportion MIRA ladder model as the research object, a numerical simulation test has thus been carried out of three normal vortex viscous turbulence models, i.e. Standard  $k-\varepsilon$ , RNG  $k-\varepsilon$  and Realizable  $k-\varepsilon$ , with the obtained statistics of the aerodynamic drag coefficient, the tail flow field and the surface pressure coefficient as the applicability evaluation indices, which are then compared with HD-2 wind tunnel test data. The results show that the convergence speed and efficiency of the Standard  $k-\varepsilon$  model are the best among three models, while with the least accuracy in its aerodynamic drag. The performance of RNG  $k-\varepsilon$  model is general. The realizable  $k-\varepsilon$  model has the highest aerodynamic drag calculation precision, with its error less than 5% compared with the wind tunnel test results. However, the convergence rate and efficiency are relatively poor. Meanwhile, the results of the three turbulence models are quite different from those of the wind tunnel experimental data.

**收稿日期:** 2018-08-09

**基金项目:** 2019 年湖南省自然科学基金资助项目 (计及气动升力的电动汽车双向耦合气动稳定性研究, 纯电动汽车电池包散热特性分析与结构优化)

**作者简介:** 宋亚豪 (1989-), 男, 河南商丘人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为汽车空气动力学,

E-mail: songyahaol123@163.com

**通信作者:** 刘水长 (1981-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为机电工程现代设计理论与方法,

E-mail: liushuichang100@163.com

**Keywords:** MIRA ladder model;  $k-\varepsilon$  eddy viscosity turbulence model; external flow field; wind tunnel experiment

## 0 引言

近年来, 汽车行业蓬勃发展, 为缩短汽车车身的研发周期, CFD 数值仿真(计算流体力学)因具有成本低廉、计算速度快, 并能获得丰富的汽车车身周围流场信息等优势而被广泛应用。然而 CFD 仿真计算所用的湍流模型, 会直接影响汽车外部流场计算的准确性和时效性<sup>[1-2]</sup>。由于汽车外流场属于极其复杂的高雷诺数近地面钝体扰流(如附着、边界层转捩、局部分离、尾涡分离等)现象, 数值模拟过程中一般选用  $k-\varepsilon$  湍流模型, 而该模型时均化时形成了 Standard  $k-\varepsilon$ 、RNG  $k-\varepsilon$  和 Realizable  $k-\varepsilon$  3 种  $k-\varepsilon$  涡黏湍流模型, 因此, 选择恰当的模型成为影响计算结果的关键。K. Majidi<sup>[3]</sup>、雷林<sup>[4]</sup>、朱晖<sup>[5]</sup> 等分别对离心泵、细长体绕流、乘用车车身数值模拟中的 3 种不同  $k-\varepsilon$  涡黏湍流模型进行了适用性研究, 结果表明, 在进行 CFD 模拟计算时, 不同物理对象  $k-\varepsilon$  涡黏湍流模型模拟的精度不同。这是因为这些湍流模型是由经典简单的物理模型在具体物理现象研究中, 逐渐推演逼近而来的, 而没有针对汽车空气动力学外流场数值进行仿真, 造成了潜在的计算误差。

为探寻适合的数值计算模型, 本文在 HD-2 风洞试验数据对标验证基础上, 分别采用 Standard  $k-\varepsilon$ 、RNG  $k-\varepsilon$  和 Realizable  $k-\varepsilon$  3 种  $k-\varepsilon$  涡黏湍流模型, 对 MIRA 阶梯背汽车 1/3 比例模型进行数值仿真研究, 以气动阻/升力系数、尾部流场和表面压力系数为对比参数, 探讨 3 种  $k-\varepsilon$  涡黏湍流模型在计算精度和效率方面的适用性。

## 1 $k-\varepsilon$ 涡黏湍流模型

最简单的完整湍流模型是两方程模型, 标准  $k-\varepsilon$  模型是个半经验公式, 是从实验现象中总结出来的, 在处理具体流动现象时, 目前有 3 种模型。

### 1.1 Standard $k-\varepsilon$ 模型

Standard  $k-\varepsilon$  模型最早于 1972 年由 B. E. Launder 和 D. B. Spalding 提出<sup>[6]</sup>, 模型本身具有的稳定性和比较高的计算精度, 使其成为目前应用最广泛的模型。该模型通过求解湍流动能  $k$  方程和湍流耗散率  $\varepsilon$  方程, 得到  $k$  和  $\varepsilon$  的解, 然后用  $k$  和  $\varepsilon$  的值计算湍流黏度, 最终通过 Boussinesq 假设得到雷诺应力的解。有效黏性系数  $\mu_e$  等于分子黏性系数  $\mu$  加上湍动涡黏

性系数  $\mu_t$ , 即

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (1)$$

式中:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

其中,  $\rho$  为流体密度;  $C_\mu$  为常数项;  $k$  为湍流动能, 且

$$k = \frac{\overline{u'_i u'_i}}{2} \quad (3)$$

$\varepsilon$  为湍流耗散率, 且

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^* \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

不考虑流体压缩时, Standard  $k-\varepsilon$  湍流模型的湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\varepsilon$  的约束方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho(P_k - \varepsilon) \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho \frac{\varepsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \varepsilon) \quad (6)$$

式(3)~(6)中:  $x_j$  为坐标分量;

$u_i$ 、 $u_j$  为平均相对速度分量;

$P_k$  是湍动能生成项, 定义为

$$P_k = \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$C_1$ 、 $C_2$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  均为常数项。

本模型中, 常数项的取值如下:  $C_\mu=0.09$ ,

$C_1=1.44$ ,  $C_2=1.92$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

### 1.2 RNG $k-\varepsilon$ 模型

RNG  $k-\varepsilon$  模型来源于严格的统计技术, 该模型于 1986 年由 V. Yakhot 等<sup>[7]</sup> 提出, 它在形式上类似于 Standard  $k-\varepsilon$  模型, 但在计算功能上强于 Standard  $k-\varepsilon$  模型。因其采用了重整化群方法, 通过修正湍动黏度, 考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况, 在  $\varepsilon$  方程中增加了一个可以反映主流时均应变率  $S_j$  的附加项, 能更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动, 使得在计算速度梯度较大流场时的精确度更高。湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\varepsilon$  的约束方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_e \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho(P_k - \varepsilon), \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_e \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon}^* P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon), \quad (9)$$

式(8)(9)中： $\alpha_k$ 为常数项；

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta \left( 1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 - \beta \eta^3}, \quad (10)$$

其中

$$\eta = (2S_{ij})^2 \frac{k}{\varepsilon}, \quad (11)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (12)$$

本模型中，常数项的取值如下： $C_\mu=0.0845$ ， $\alpha_k=\alpha_\varepsilon=1.39$ ， $C_{1\varepsilon}=1.42$ ， $C_{2\varepsilon}=1.68$ ， $\eta_0=4.377$ ， $\beta=0.012$ 。

### 1.3 Realizable $k-\varepsilon$ 模型

该模型于1995年由T. H. Shih等提出<sup>[8]</sup>，其满足了对雷诺应力的约束条件，可以在雷诺应力上保持与真实湍流的一致性。另外，该模型改变了湍动涡黏系数 $\mu_t$ 中的系数 $C_\mu$ 的定常值问题，构成了与应变率相关的函数。与标准 $k-\varepsilon$ 模型比较， $\varepsilon$ 方程是依据涡量扰动量均方根的精确运输方程推导出来的， $k$ 方程中的产生项不再包含方程中的产生项 $P_k$ ，Realizable  $k-\varepsilon$ 模型已被有效地用于各种不同类型的流动模拟中，包括旋转均匀剪切流、管道内流动以及带有分离的流动等。湍动能 $k$ 和湍流耗散率 $\varepsilon$ 的约束方程如下：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho(P_k - \varepsilon), \quad (13)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}, \quad (14)$$

式(14)中： $S$ 为模型迎风面积； $\nu$ 为来流速度；

$$C_1 = \max \left( 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right),$$

其中 $\eta$ 为 $C_1$ 方程取值的中项量， $\eta = \frac{sk}{\varepsilon}$ ；

$$C_2 = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k / \varepsilon},$$

其中， $A_s = \sqrt{6} \cos \varnothing$ ，而 $\varnothing = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W)$ ， $A_0$ 为常数

项，此时

$$W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{(S_{ij} S_{ij})^{\frac{1}{2}}};$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}},$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k, \quad \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k,$$

式中 $\omega_k$ 为角旋转速率。

模型中，常数项的取值如下： $\sigma_\varepsilon=1.2$ ， $C_2=1.92$ ， $A_0=4.0$ 。

## 2 模拟仿真

由上述分析可见， $k-\varepsilon$ 湍流模型的3种模型对湍动能 $k$ 和湍流耗散率 $\varepsilon$ 的约束不同，因而会影响计算的收敛速度和效率。MIRA汽车模型是国际上研究汽车空气动力学的通用模型<sup>[9-11]</sup>，其3种车型被广泛应用于汽车空气动力学研究中<sup>[12]</sup>。对此，本研究选用该模型的阶梯背模型研究3种湍流模型的适用性。

### 2.1 物理模型

1/3-MIRA阶梯背汽车模型的国际标准尺寸如图1所示，单位为mm。

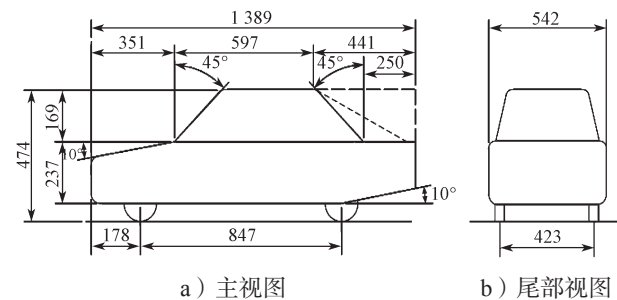


图1 1/3比例MIRA阶梯背模型

Fig. 1 1/3-MIRA ladder model

为减少边界条件对计算结果的影响，建立如图2所示计算域，其长×宽×高尺寸为 $11L \times 7W \times 5H$ （车身尺寸 $L \times W \times H$ ），左右壁面相距 $7W$ ，图中 $X$ 轴方向为空气来流方向。

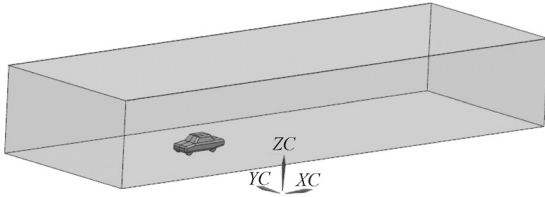


图2 计算域分布图

Fig. 2 Distribution map of the computational domain

2.2 网格划分

采用四六混合网格进行空间离散, 以保证几何模型的贴体性<sup>[13]</sup>, 图3为网格纵对称剖面, 网格数量和节点分别达到500万和100万个。

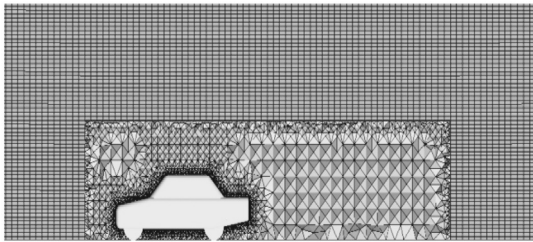


图3 纵对称面网格分布

Fig. 3 Grid distribution of vertical symmetric plane

2.3 仿真方法与边界条件

仿真以 ANSYS14.0 为求解器, 采用隐式求解、标准壁面函数、二阶中心差分法, 速度项、紊动能项和紊黏系数项采用二阶迎风差分格式, 其边界条件设置如表1所示。

表1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

计算域边界	边界条件设置	
入口	速度入口	$U=30\text{ m/s}, V=W=0$
	湍流强度	0.5%
	水力直径	2.73 m
出口	压力出口	一个标准大气压
	湍流强度	5%
	水力直径	2.73 m
地面边界	滑移地面	
车身壁面	No-slip	
其余壁面	Symmetry	

3 试验

以 HD-2 风洞试验数据为基础, 进行仿真结果验证。对标参数包括气动阻/升力系数、尾部流场及表面压力系数。

3.1 风洞试验

HD-2 风洞试验段横截面为矩形, 宽 3.0 m, 高 2.5 m, 高速试验段长 17 m, 最大风速为 58 m/s, 收缩比为 3.2。风洞动力系统由功率为 620 kW 的直流电机驱动, 风扇系统由 9 片玻璃钢桨叶组成, 调速系统采用西门子 6RA7090 型直流调速装置, HD-2 风

洞试验如图4所示。



a) 风洞试验段

b) 模型安装摆放

图4 HD-2 风洞试验图

Fig. 4 HD-2 wind tunnel test

天平是风洞中最主要的气动力测量装置之一, 其功能为测量作用在汽车或汽车模型上的气动力和气动力矩。本次试验的天平为六分量浮框式应变汽车专用天平, 如图5所示。

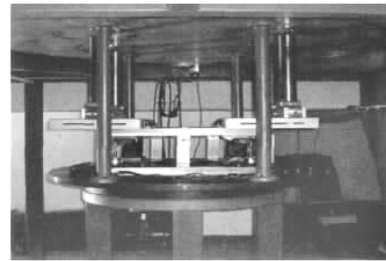


图5 汽车专用天平

Fig. 5 Special balance for automobiles

3.2 流场与表压测量

图6为尾部流场 PIV 测量现场。

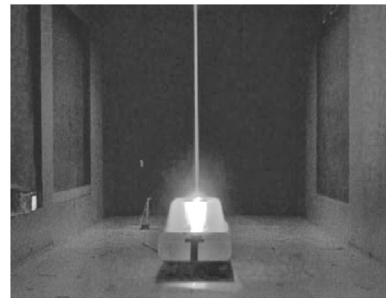


图6 PIV 测量流场

Fig. 6 Flow field of PIV measurement

在流体中, 运动物体表面的静压强通常用压力系数  $C_p$  表示:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{(1/2)\rho v_\infty^2}, \quad (15)$$

由伯努利方程可得:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = P_\infty + \frac{1}{2}\rho v_\infty^2, \quad (16)$$

式(15)(16)中:  $P$ 、 $v$  为当地压强和流体速度;

$P_\infty$ 、 $v_\infty$  为来流压强和来流速度。

将式(15)代入式(16)得:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{(1/2)\rho v_\infty^2} = 1 - (v/v_\infty)^2. \quad (17)$$

MIRA 阶梯背模型表面测量压力点分布如图 7 所示, 模型纵对称面共设 78 个测压点, 为保证所测气动阻力数据的准确性, 模型前部、发动机舱盖、挡风玻璃连接处、背部及底部均布置了较密集的测压点。表面压力测量选用 PSI-DTCnet 压力扫描阀。

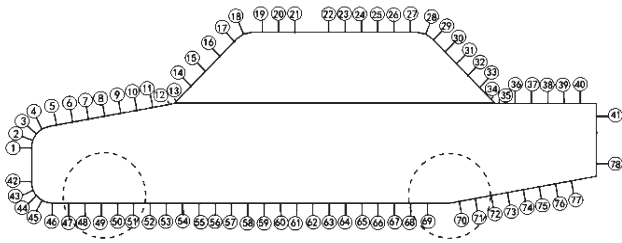


图 7 MIRA 阶梯背模型纵对称面测压点分布

Fig. 7 MIRA ladder model distribution of pressure measuring points on longitudinal symmetry plane

### 4 结果分析

应用如图 3 所述的网格模型, 分别对 3 种湍流模型进行数值仿真, 并以 HD-2 风洞试验结果作为对标数据, 分析其对外流场计算的适应性。

#### 4.1 收敛性

3 种湍流模型的收敛性以及计算效率如表 2 所示。

表 2 3 种湍流模型收敛性对比

Table 2 Comparison of convergence between three turbulence models

湍流模型	迭代步数	收敛步数	耗时 / h
Standard $k-\epsilon$	3 000	1 000	20
RNG $k-\epsilon$	3 000	2 800	36
Realizable $k-\epsilon$	3 000	2 600	32

由表 2 可知, 3 种湍流模型在迭代步数相同时, 其收敛的步数和计算时间并不相同。其中 RNG  $k-\epsilon$  模型的收敛速度最慢, 耗时最长, 而 Standard  $k-\epsilon$  模型的收敛速度最快, 耗时最短。这是由于 Standard  $k-\epsilon$  模型仅需要通过求  $k$  和  $\epsilon$  的解便可以得到雷诺应力的值, 而 RNG  $k-\epsilon$  模型不仅考虑了旋流流动的情况, 同时在  $\epsilon$  方程中增加了一个反应主流时均应变率的附加项  $S_{ij}$ , 使其计算能力强于 Standard  $k-\epsilon$  模型的, 但计算过程耗时相对较长。

#### 4.2 阻 / 升力系数

3 种  $k-\epsilon$  湍流模型仿真与 HD-2 风洞试验的气动阻力和气动升力结果分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 阻力系数对比

Table 3 Comparison of the drag coefficient

湍流模型	仿真 $C_d$	风洞 $C_d$	误差 / %
Standard $k-\epsilon$	0.332 7	0.318 8	4.36
RNG $k-\epsilon$	0.327 5	0.318 8	2.73
Realizable $k-\epsilon$	0.321 9	0.318 8	0.97

表 4 升力系数对比

Table 4 Comparison of the lift coefficient

湍流模型	仿真 $C_L$	风洞 $C_L$	误差 / %
Standard $k-\epsilon$	-0.130 1	0.038 9	-434.44
RNG $k-\epsilon$	-0.117 3	0.038 9	-400.54
Realizable $k-\epsilon$	-0.098 8	0.038 9	-353.98

由表 3 可知, 对比风洞试验结果, 3 种湍流模型的阻力系数  $C_d$  均在工程允许的误差范围 5% 以内, 其中 Realizable  $k-\epsilon$  模型与风洞试验值的误差最小, 相对而言, Standard  $k-\epsilon$  模型的误差最大。这主要是因为 Realizable  $k-\epsilon$  模型中  $k$  方程不再包含产生项  $P_k$ , 且在雷诺应力上可以保持与真实湍流的一致性。

由表 4 可知, 3 种湍流模型的气动升力系数  $C_L$  的误差均超过 5%, 无法有效模拟计算升力系数的精准性。这是因为汽车外流场属于极其复杂的高雷诺数近地面钝体扰流范畴, 气动升力对于车身周围的气流异常敏感<sup>[14]</sup>, 致使数值仿真无法有效模拟气动升力系数。

#### 4.3 表压系数

利用式 (17) 模拟计算如图 7 所示分布点位的表面压力系数  $C_p$ , 对比风洞测量数据得出如图 8、图 9 所示的 MIRA 阶梯背模型纵对称面压力系数。

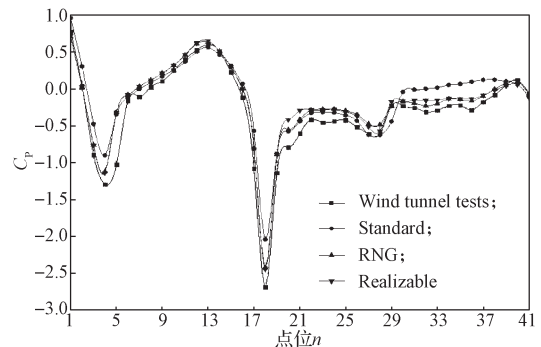


图 8 纵对称面上表面压力系数

Fig. 8 Surface pressure coefficient on longitudinal symmetry surface

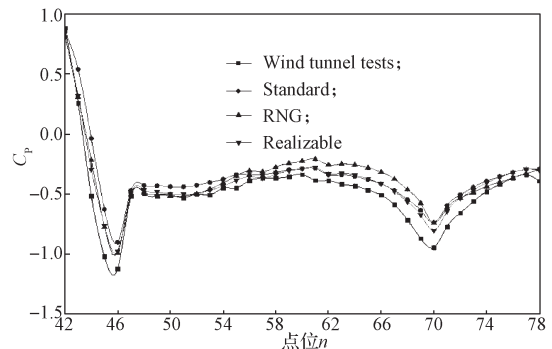


图 9 纵对称面下表面压力系数对比

Fig. 9 Comparison of surface pressure coefficient under longitudinal symmetry plane

如图 8 所示, 对比 3 种  $k-\epsilon$  湍流模型的上表面压

力系数与风洞试验结果的变化趋势可以得出, RNG  $k-\varepsilon$  模型和 Realizable  $k-\varepsilon$  模型与风洞试验值较接近, Standard  $k-\varepsilon$  模型最差, 特别是在点位 4 和点位 18 气流分离处。因为气流在点位 4 和点位 18 处速度较快, 来不及转折即发生局部分离, 气流在近壁面区域的湍流流动发展不够充分, 特别是在黏性底层区域, 导致捕捉表面压力变得比较困难, 另外 Standard  $k-\varepsilon$  模型求解湍流动能  $k$  方程和湍流耗散率  $\varepsilon$  方程过程中对于旋转流动的情况考虑不足, 在雷诺应力上无法与真实湍流保持一致, 所以表面压力系数的仿真数值结果相对风洞试验结果偏大, 特别是在气流分离处, 偏差更为明显。

针对 MIRA 模型表面表压测量的文献相对较少, 本研究针对底部表面压力系数进行了对比研究。如图 9 所示, 气流流向下表面并在拐角处发生分离形成负压区。MIRA 阶梯背模型下表面相对比较平滑, 气流流经较为平顺, 加之没有车轮的旋转, 气流紊乱度较低, 从位于车底部测试点处的压力系数可以看出, 前后轮之间值的范围波动较为平缓, 离去角部位的气流发生小部分分离, 形成负压区, 点位 70 处附近的压力系数出现极小值。3 种  $k-\varepsilon$  湍流模型的下表面压力系数与风洞试验结果的变化趋势与上表面结果基本相同, 同样在点 46 和点 70 气流分离处的偏差最大。

#### 4.4 尾部流场

尾部压差阻力主要体现在尾涡的位置及扩散强度方面, 仿真所得 3 种湍流模型的尾部流场与风洞试验曲线如图 10 所示。

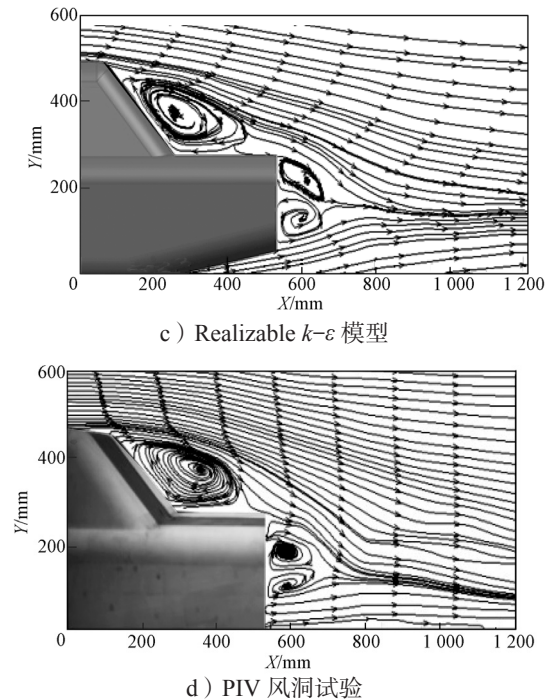
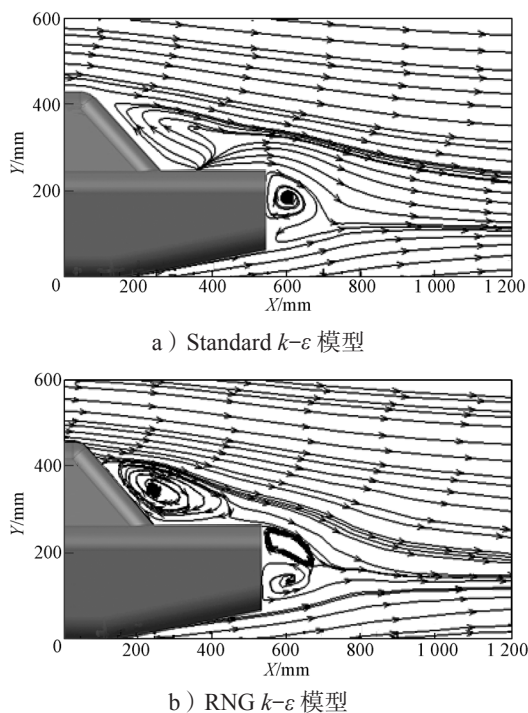


图 10 仿真与风洞试验流线对比图

Fig. 10 Comparison diagram of flow lines between simulation and wind tunnel tests

对比图 10 中的 3 种湍流模型的尾部流场仿真曲线与风洞试验曲线可知, MIRA 阶梯背汽车模型尾涡的形状、大小和涡核位置因选取湍流模型的不同而存在差异。相对于风洞试验 (图 d), 图 a 背部未呈现一个顺时针涡, 尾部两个尾涡也没有完全形成, 这是因 Standard  $k-\varepsilon$  模型是最简单的两方程模型, 当流场中存在较大压力梯度时, 其计算精度便会降低; 图 b 和 c 的尾部尾涡基本上与风洞试验吻合, 但扩散强度存在差异。RNG  $k-\varepsilon$  模型是在 Standard  $k-\varepsilon$  模型的基础上, 通过对 Navier-Stokes 方程进行重新构建形成的, 考虑到湍流中的漩涡, 并在方程中加了一个附加项 (见公式 (9)), 这不仅提高了计算精度和收敛速度, 同时使得该模型能够有效捕捉多个尺度的湍流扩散。但实践表明 RNG  $k-\varepsilon$  模型对模拟结果的改善仍具有局限性<sup>[15]</sup>; Realizable  $k-\varepsilon$  模型尾部流场结果最接近风洞试验数据, 这是因为它在计算湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\varepsilon$  时引入了新的算法, 并将  $C_{\mu}$  不做常数处理, 使得运输方程更加切合湍流的物理特性。

## 5 结论

本文在 HD-2 风洞试验对标基础上, 以 MIRA 阶梯背汽车 1/3 比例模型为研究对象, 探讨了 Standard  $k-\varepsilon$ 、RNG  $k-\varepsilon$  和 Realizable  $k-\varepsilon$  3 种  $k-\varepsilon$  湍流模型的气动阻力系数、尾部流场及表面压力系数计算模拟能力, 得出如下结论:

1) Standard  $k-\varepsilon$  模型收敛速度和效率最快, 但是整体结果与风洞试验偏差较大, RNG  $k-\varepsilon$  模型的表现一般, 而 Realizable  $k-\varepsilon$  模型能获得最高的气动阻力计算精度;

2) 3种湍流模型计算结果整体趋势与风洞试验大致相同, 但由于在近壁面区域的湍流流动发展不够充分, 特别是在黏性底层区域, 湍流切应力几乎不起作用, 导致了阻力系数和表面压力的仿真数值结果偏大, 特别是在气流分离处, Standard  $k-\varepsilon$  模型的偏差最明显。

3) 3种湍流模型对气动升力的计算误差均远超过 5%, 说明 3种湍流模型还无法有效计算对车身周围气流异常敏感的气动升力, 因此对于气动升力的研究还存在很大的研究空间。

#### 参考文献:

- [1] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 1-26.  
GU Zhengqi. Automotive Aerodynamics[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 1-26.
- [2] 谢金法, 张靖龙. 凹坑型非光滑单元体排列方式对汽车气动阻力影响分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(5): 86-90.  
XIE Jinfa, ZHANG Jinglong. Influence Analysis of Pit-Type Non-Smooth Elements Arrangement on Aerodynamic Drag of Vehicle[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2016, 37(5): 86-90.
- [3] MAJIDI K. Numerical Study of Unsteady Flow in a Centrifugal Pump[J]. Journal of Turbo Machinery, 2005, 127(2): 363-371.
- [4] 雷林, 王智祥, 孙鹏, 等. 计算流体力学  $k-\varepsilon$  二方程湍流模型应用研究[J]. 船舶工程, 2010, 32(3): 5-8.  
LEI Lin, WANG Zhixiang, SUN Peng, et al. Application Study on the Turbulence Models of  $k-\varepsilon$  Quadratic Equation on CFD Calculation[J]. Ship Engineering, 2010, 32(3): 5-8.
- [5] 朱晖, 杨志刚. 两方程模型计算轿车气动性能的适用性研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(11): 1283-1287, 1337.  
ZHU Hui, YANG Zhigang. A Study on the Applicability of Two-Equation Models to the Calculation of Aerodynamic Performance of Sedan[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(11): 1283-1287, 1337.
- [6] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence[M]. London: London Academic Press, 1972: 1-169.
- [7] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization-Group Analysis of Turbulence[J]. Physical Review Letters, 1986, 57(14): 1722.
- [8] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A New  $k-\varepsilon$  Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [9] AHMAD N E, ABO-SERIE E F, GAYLARD A. Mesh Optimization for Ground Vehicle Aerodynamics[J]. CFD Letters, 2001, 2(1): 54-65.
- [10] 谷正气, 王师, 仇健, 等. MIRA模型组尾部造型风洞试验研究[J]. 科技导报, 2011, 29(8): 67-71.  
GU Zhengqi, WANG Shi, CHOU Jian, et al. Wind Tunnel Tests of MIRA Model Group for Study of Vehicle's Rear Shape[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(8): 67-71.
- [11] 潘正宇, 谷正气, 张勇, 等. 汽车CFD流场仿真集成高效优化技术研究[J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(2): 31-37.  
PAN Zhengyu, GU Zhengqi, ZHANG Yong, et al. Research on the Simulation Integration and Efficient Optimization of CFD Flow Field in Automobiles[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(2): 31-37.
- [12] 杨易, 刘政, 谷正气, 等. MIRA阶梯背模型尾部非光滑表面优化设计方法[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(4): 10-17.  
YANG Yi, LIU Zheng, GU Zhengqi, et al. Optimization and Design Method of Non-Smooth Surface at Stepped Back MIRA Mode's Tail[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(4): 10-17.
- [13] 谷正气, 赵万东, 张勇, 等. 网格质量评价指标对汽车外流场模拟结果影响的研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(11): 1265-1269.  
GU Zhengqi, ZHAO Wandong, ZHANG Yong, et al. A Research on the Effects Mesh Quality Evaluation Criteria on the Results of Vehicle External Flow Field Simulation[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(11): 1265-1269.
- [14] 张勇. 基于LBM-les法改进与试验数据修正的汽车气动升力研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.  
ZHANG Yong. Vehicle Aerodynamic Lift Study Based on LBM-les Method Improved and Wind Tunnels Experiments Data Correction[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [15] 于丽波, 罗敏. 基于CFD不同湍流模型的超高层连体结构风荷载和流场对比研究[J]. 特种结构, 2017, 34(5): 44-51.  
YU Libo, LUO Min. Research on Wind Loads and Flow Field of High-Rise Tower of Conjoined Buildings Based on Different CFD Turbulence Models[J]. Special Structures, 2017, 34(5): 44-51.

(责任编辑: 廖友媛)