

# 耦合气动参数与车身姿态变化的圈速仿真

杨志刚<sup>1,2,3</sup>, 张波<sup>1,2</sup>, 贾青<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 同济大学上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室, 上海 201804; 3. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

**摘要:** 以大学生方程式赛车为对象展开圈速仿真研究, 综合考虑离地间隙和偏航角与阻力系数、升力系数之间的关系, 采用试验和数值仿真相结合的方法, 研究行驶中车身姿态变化对方程式赛车气动特性的影响。首先, 对现有车辆气动模型进行修正, 再利用龙格库塔方法对速度积分进行圈速仿真, 并与商业软件Optimumlap的仿真结果进行对比。结果表明, 基于气动参数与车身姿态耦合关系建立的模型对于圈速仿真有着更为准确的描述; 忽略气动变化影响会高估过弯时轮胎的抓地力, 且在不考虑载荷转移的同时低估赛车的加速性能, 从而高估阻力对于圈速的影响; 考虑载荷转移的模型, 不同赛道对阻力的敏感程度不同。为改进赛车空气动力学设计提供参考。

**关键词:** 赛车; 计算流体力学; 圈速仿真

**中图分类号:** U463

**文献标志码:** A

## Lap Simulation of Coupling Change of Aerodynamic Parameters and Body Attitude

YANG Zhigang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Bo<sup>1,2</sup>, JIA Qing<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

**Abstract:** A lap simulation study was conducted taking Formula Racing of college students as the object. By comprehensively considering the relationship between ground clearance and yaw angle and the drag coefficient and lift coefficient, the influence of body attitude change on aerodynamic characteristics of formula racing was studied combining experiment with numerical simulation. First, the existing vehicle aerodynamic model was modified. Then, the Longge-Kuta method was used to

simulate the lap speed of the speed integral, which was compared with the simulation results of the commercial software Optimumlap. The results show that the model based on the coupling relationship between aerodynamic parameters and body attitude can more accurately describe lap simulation. Besides, ignoring the effect of aerodynamic changes, the grip of the tire during cornering will be overestimated, and the acceleration performance without considering the load transfer will be underestimated, thus overestimating the effect of drag on lap speed. Moreover, considering the model of load transfer, different tracks are found to have different sensitivities to drag. The lap simulation model provides reference for improving the aerodynamic design of racing cars.

**Key words:** racing car; computational fluid dynamics; lap simulation

最早的圈速仿真方法是1982年由Milliken所提出的稳态圈速仿真(quasi-steady-state (QSS) lap time simulation)<sup>[1]</sup>, 该方法相较于其他瞬态的模拟模型对计算资源要求较少, 因此20世纪大部分圈速仿真均采用该方法。

在稳态仿真基础上, 瞬态圈速仿真通过模拟车手的行为来作为获得最小圈速的控制条件<sup>[2]</sup>。将圈速仿真看作在给定的行动轨迹和一系列约束下获得最小圈速的问题, 约束条件包括: 赛车运动的空间约束(赛道边界)与赛车的极限性能。

瞬态MTM(minimum time maneuvering)方法必须使用车辆模型的完整运动方程才能完成上述模拟, 文献[3]所描述的瞬态方法是基于航天应用开发的技术, 在这些应用中, 目标是确定2个状态之间非

收稿日期: 2020-06-28

第一作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为车身与空气动力学。

E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

通信作者: 贾青(1979—), 女, 副教授, 研究生导师, 工学博士, 主要研究方向为车身与空气动力学。

E-mail: qing.jia@sawtc.com



论文  
拓展  
介绍

线性车辆模型运动的最优轨迹,通过最小化某些参数(比如经过这2个状态的时间)来达到最佳轨迹的目的。

然而由于入弯存在动态的车身姿态变化、速度变化等过程,对于空气动力学性能影响较大的气动参数也会随之变化,如果仅将升力系数、阻力系数看作常数处理,而在仿真中忽视气动参数变化的影响,会导致结果存在较大误差,因此本文旨在建立耦合气动参数与车身姿态变化并同时考虑赛道不同赛段极限速度的更准确的圈速仿真模型。

## 1 数值模型

现有的圈速仿真模型与商业软件大多仅使用基础升力系数、阻力系数作为对空气动力学性能的描述<sup>[4]</sup>,然而在实际真实赛道上,动态场景下作用在车身表面的下压力或阻力均存在一定程度的变化,变化的力对姿态同时有着耦合作用<sup>[5]</sup>。这对于此时的过弯速度极限、加速性能极限均有不同程度的影响。因此,耦合姿态与气动力参数,建立车辆空气动力学模型。

基于同济大学翼驰车队 TR16 赛车建立 1:1 仿真模型,流体域参考 Monash 大学设置<sup>[6]</sup>,其中  $L$  为赛车轴距,即赛车前轴中心到后轴中心的距离,如图 1。

采用弧状流体域研究过弯时姿态变化对气动参数的影响<sup>[7]</sup>,流体域参考图 1,自由流矢量与旋转中心相切,因此气流垂直于从旋转中心向旋转中线辐射的任何直线。通过减小参数  $r$  来使  $\theta_{\text{front}}$  (前方来流入射角)和  $\theta_{\text{rear}}$  (后方气流出射角)增加。在此基础上考虑姿态的变化:姿态选取典型工况,根据耐久数据,亮色高频区域为典型工况,如图 2。其中典型速度在  $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  左右,设置仿真来流  $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、典型侧向加速度在  $1.4 g$  左右。 $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的  $415\text{N}$  下压力以及车重  $268\text{kg}$ ,估算得外侧后轮垂向力约  $1\,379 \text{ N}$ ,侧向力约  $1\,625 \text{ N}$ 。计算得整车侧倾角  $1.2^\circ$ 。根据 Hoosier 提供的 13 寸(13 寸指轮毂尺寸,轮胎直径为  $54.2\text{cm}$ )轮胎实验数据,并考虑实际轮胎附着力极限约为实验值的  $74\%$ ,估算得外侧前、后轮侧偏角均为  $3^\circ$ ,因此前轮转角为  $6^\circ$ 。

根据几何关系计算当偏航角度  $6^\circ$  时转向中心在整车坐标系中的  $(x, y)$  位置为  $(-0.80, -14.29) \text{ m}$ 。整车姿态与仿真流体域如图 3 所示。

仿真基础设置与赛车在直道中的仿真设置类

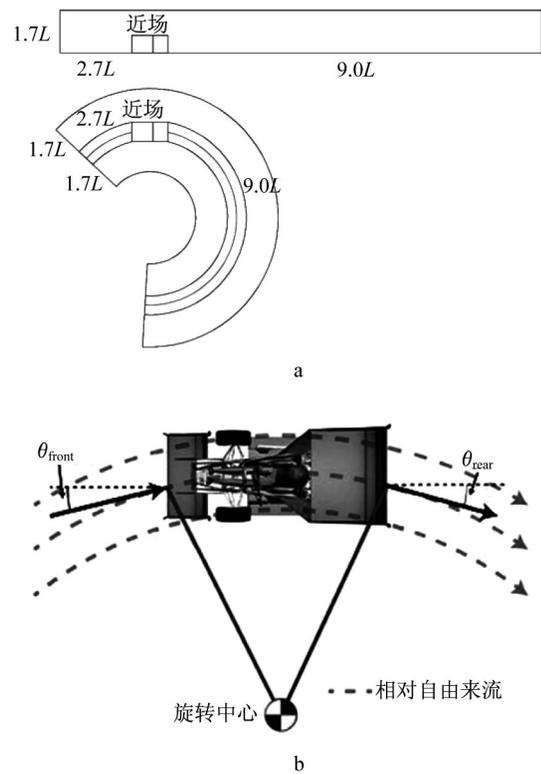


图 1 流体域参数设置

Fig. 1 Parameter setting of fluid domain

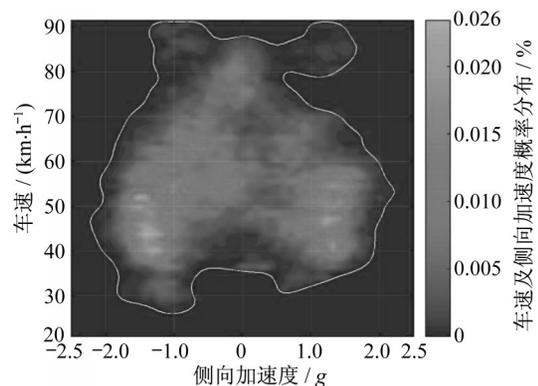


图 2 耐久赛车速、侧向加速度概率分布

Fig. 2 Probability distribution of lateral acceleration and speed in endurance

似:采用  $y+$  值为 50 的目标设计棱柱层高度,根据网格无关性设置网格基础尺寸  $0.15\text{cm}$ ,仿真模型采用隐式格式,二阶迎风,选用 Realizable  $k-\epsilon$  模型<sup>[7]</sup>。

## 2 试验验证

对同济大学翼驰车队 TR16 赛车发动机进行限转速使得最高转速下车速为  $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,车手油门踩到底以保持恒定的  $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  车速沿着直线来回行驶进

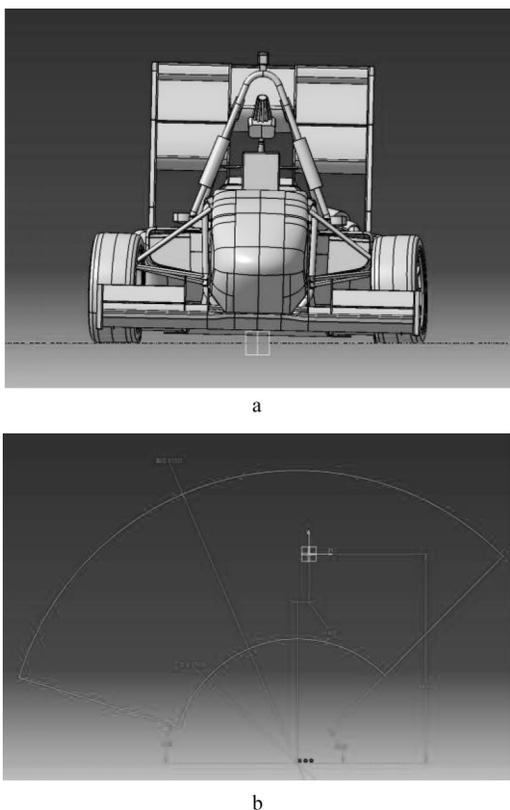


图3 整车姿态与仿真流体域。

Fig. 3 Vehicle attitude and fluid domain

行测试,通过平均来回2次的数据平衡风速的影响。

通过稳速行驶时的车轮载荷增量测量下压力值,利用悬架位移传感器采集的数据,根据式(1)计算得到4个车轮上的负载,在静态下将其校准为零。之后用高斯函数(标准偏差0.1s)对负载进行过滤。筛选出有效数据点,如图4所示。最终,根据这些有

效数据点确定适用于总体下压力的函数关系式,并进行二次回归后得到最终函数关系式(2)。

$$f_{\text{wheel}} = \frac{f_{\text{spring}}}{c} = \frac{k_{\text{spring}} \times x_{\text{spring}}}{c} \quad (1)$$

其中, $f_{\text{wheel}}$ 为作用在轮胎上的载荷, $f_{\text{spring}}$ 为作用在悬架弹簧上的载荷, $c$ 为力从悬架到车轮的传递系数, $k_{\text{spring}}$ 为悬架弹性系数, $x_{\text{spring}}$ 为悬架位移值。确定了适用于总体下压力的曲线,二次回归的结果:

$$f_{\text{downforce}} = 1.744v^2 + 4.154v \quad (2)$$

其中, $f_{\text{downforce}}$ 为整车下压力,N; $v$ 为车速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

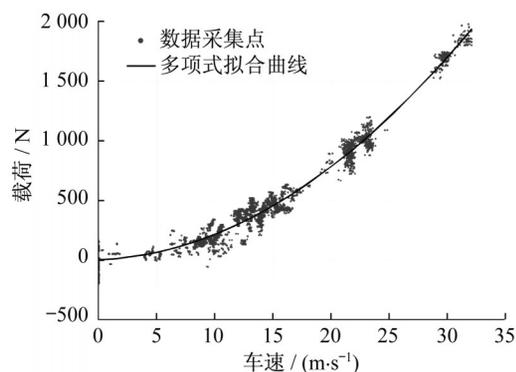


图4 有效载荷拟合

Fig. 4 Fitting of payload

利用实验得到的回归曲线与仿真得到的下压力值进行对比,结果如表1(直线工况下迎风面面积变化较小,因此取静止时的迎风面积),其中 $C$ 为升力系数, $A$ 为迎风面积。可见在最常见的行驶工况 $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,误差仅有2.7%,仿真较为准确,因此采用该仿真设置进行气动仿真。

表1 不同车速下仿真与实验的气动参数

Tab. 1 Aerodynamic parameters of simulation and experiment at different speeds

车速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$C \times A$ 路测值	$C \times A$ 仿真值	路测值的前轴载荷占比	仿真值的前轴载荷占比
14	3.58	3.68	48.6	46.1
17	3.49	3.75	48.5	46.0
20	3.42	3.76	48.5	46.0

### 3 模型修正

#### 3.1 离地间隙影响修正

方程式赛车的赛道大部分以弯角组合为主,存在大量入弯出弯工况,因此俯仰横摆等姿态的变化尤其常见。俯仰可简化为赛车前后离地间隙的非同步状态变化,这种变化会导致空气动力学特性的变化,进而引起赛车前后载荷大小与比例的改变,载荷

变化又使得悬架发生压缩位移从而导致赛车姿态的耦合变化<sup>[8]</sup>。

因此必须考虑离地间隙变化的影响,这里采用气动图谱(aero map)的方法:通过定义前、后离地间隙的二维表格,表格中每个点对应一个前、后离地间隙的组合和这一姿态下的下压力、阻力和气动平衡等,通过这一表格可以快速插值计算任意离地间隙的气动力及其分布,快速有效地估算赛车在行驶时

的离地间隙和气动平衡。参考中国赛赛道练习和高速避障的数据,得到前后离地间隙的分布特点如图5,离地间隙减小为正方向。

根据图5中离地间隙变化的分布情况,确定初步的气动图谱网格,其中离地间隙减小悬架弹簧压缩为正方向,离地间隙增大悬架弹簧拉伸为负方向。

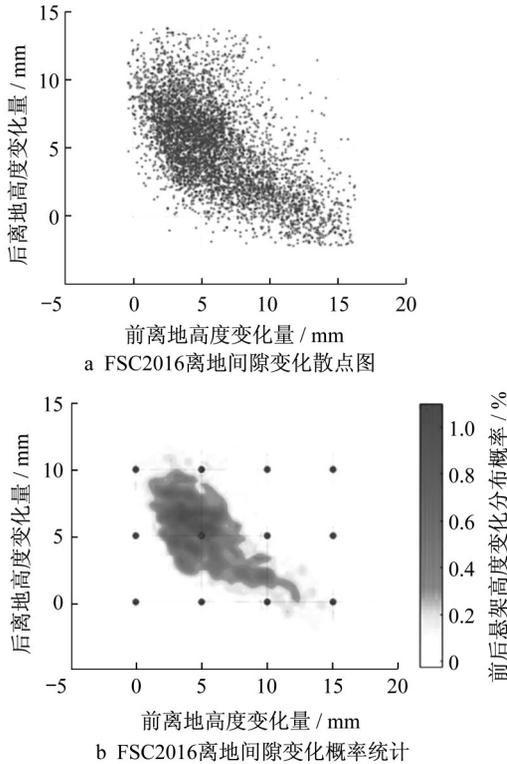


图5 离地间隙变化分布

Fig. 5 Distribution of ground clearance variation

根据图4b,选取12个典型工况的前后离地间隙组合分布进行CFD仿真,最终得到TR16赛车的负升力系数乘迎风面积的差值图谱(图6a)及前轴的气动占比(图6b)。在圈速仿真中,根据式(3)、式(4)确认每个赛道点上对应的前后悬离地间隙,并根据离地间隙值在气动图谱中找到对应的气动数据,其中 $f_{load}$ 、 $r_{load}$ 分别为前、后轮载荷, $f_{wheelrate}$ 、 $r_{wheelrate}$ 分别为前、后轮悬架弹性系数。

$$f = \frac{f_{load}}{f_{wheelrate}} \quad (3)$$

$$r = \frac{r_{load}}{r_{wheelrate}} \quad (4)$$

### 3.2 横摆力矩影响修正

赛车在弯角组合的赛道中由于存在大量横摆运动,大部分时间都受到侧向气流的影响,而侧向气流

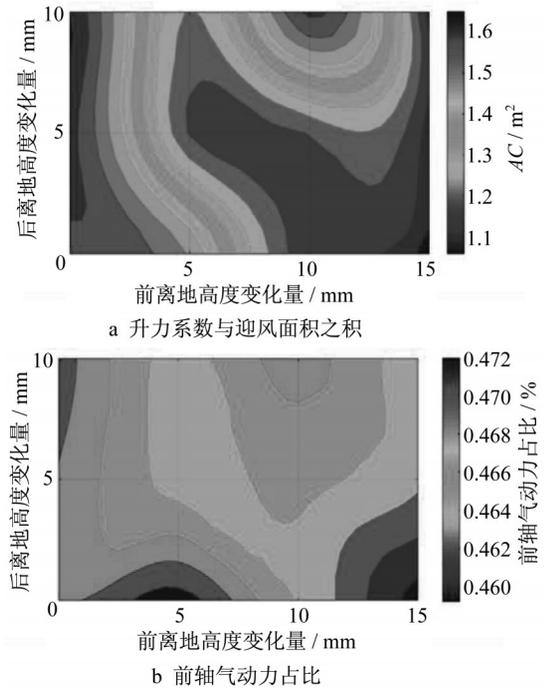


图6 气动图谱

Fig. 6 Aerodynamic map

不仅仅产生作用在赛车上的横摆力矩还会改变车辆周围的流场结构,导致赛车的阻力和升力的衰减,进而导致圈速仿真中抓地力、阻力的预估误差。

因此,圈速仿真时需考虑横摆对于赛车气动特性的影响,首先,在MTM的基础上确认赛道上每个点所对应的来流方向,即偏航角度 $\beta$ 。因前轮转角约为轴距比转向半径,故与偏航角度近似线性相关<sup>[9]</sup>。接着,路测确定赛车TR16的偏航角与轴距、转向半径间的关系<sup>[10]</sup>。然后,通过将皮托管、双压力管和压力传感器等测量装置安装到赛车车身前端<sup>[11]</sup>,得到偏航角度与测得压力的关系,如式(4)、式(5)所示,并得到偏航角度与偏航系数关系(图7),发现两者在赛车的工况下基本呈线性相关。

$$C_{yaw} = \frac{p_{left} - p_{right}}{p_{dynamic}} \quad (5)$$

$$a_{yaw} = 15.41 \times C_{yaw} = 15.41 \times \frac{p_{yaw}}{p_{dynamic}} \quad (6)$$

其中, $C_{yaw}$ 为偏航系数, $p_{left}$ 、 $p_{right}$ 、 $p_{dynamic}$ 分布为双压力管左侧、右侧、远侧的压力度数, $a_{yaw}$ 为偏航角。

然后取典型的八字绕环工况,在规定的2个定半径为17m的圆形赛道内进行顺时针逆时针各2圈的驾驶,由于逆时针顺时针的绕圈时间基本相同,因此得到车速范围20~60km·h<sup>-1</sup>内的偏航角概率分布直方图8。

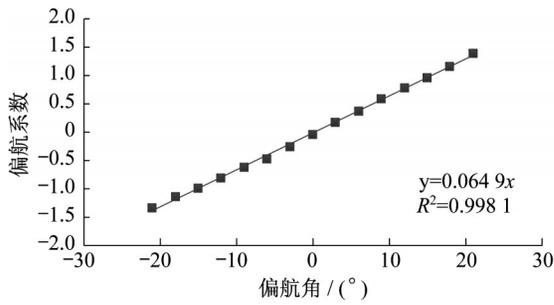
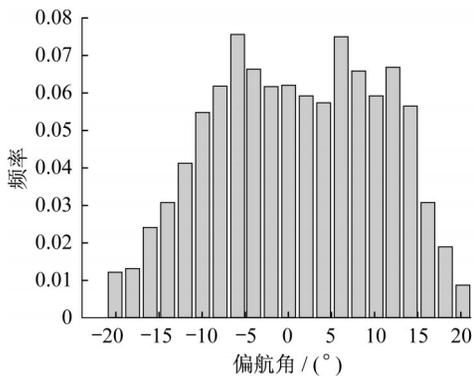
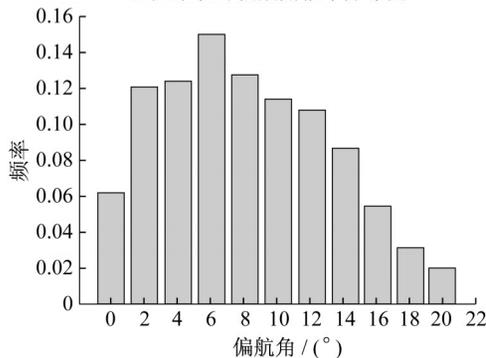


图7 偏航系数与偏航角的对应关系

Fig. 7 Correspondence between yaw coefficient and yaw angle



a 八字绕环偏航角概率分布图



b 八字绕环偏航角绝对值概率分布图

图8 偏航角统计直方图

Fig. 8 Histogram of yaw angle statistics

可见17m转向半径下的典型偏航角为 $6^\circ$ ,由于测试中车辆并不是中性转向且实测难以完全控制转向的半径,所以存在修正方向盘及偏离正圆行驶路径的情况导致测得数据波动较大。用6拟合得到偏航角关于轮距与转向半径的关系为

$$\beta = \frac{0.62 \times l}{R} \quad (7)$$

其中, $\beta$ 为偏航角, $l$ 为赛车轮距, $R$ 为当前偏航角下的转向半径。对偏航工况进行CFD仿真获得此时的下压力衰减,得到图9的仿真结果。

可见,赛车下压力随着偏航角增加逐步衰减。

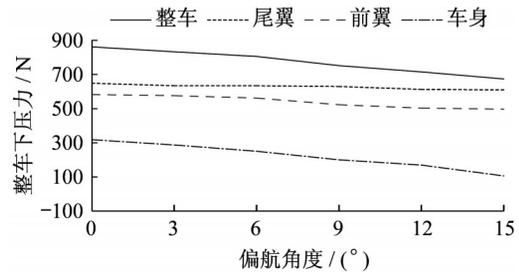


图9 偏航角统计折线图

Fig. 9 Line chart of yaw angle statistics

随着偏航角从 $0^\circ$ 到 $9^\circ$ ,下压力的衰减超过100N,可见偏航角对于赛车下压力的影响较为显著。这一下降趋势总体近似线性变化,因此可通过线性插值估计各偏航角下的气动力。对其进行回归得到衰减系数0.02,由此得到气动力随偏航角变化的函数关系式(7),其中 $C_{\text{initial}}$ 为典型速度 $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下仿真得到的初始升力系数, $C_{\text{lift}}$ 为当前偏航下的升力系数。

$$C_{\text{lift}} = C_{\text{initial}}(1 - 0.02\beta) \quad (8)$$

### 3.3 离地间隙及横摆力矩综合影响下的修正

综合考虑离地变化及偏航角的影响,对气动参数(升力,阻力)进行修正,首先考虑偏航角的影响对气动参数进行修正,其中 $S_{\text{lift}}$ 为升力系数考虑偏航的修正系数, $S_{\text{drag}}$ 为阻力系数考虑偏航的修正系数。

$$S_{\text{lift}} = 1 - 0.02\beta \quad (9)$$

$$S_{\text{drag}} = 1 + 0.03\beta \quad (10)$$

考虑离地间隙的影响对气动参数进行修正:

$$C_{\text{lift}} = S_{\text{lift}} \times f_{\text{griddata}}(f, r, C_{\text{lift}}, F_{\text{clearance}}, R_{\text{clearance}}) \quad (11)$$

$$C_{\text{drag}} = S_{\text{drag}} \times f_{\text{griddata}}(f, r, C_{\text{drag}}, F_{\text{clearance}}, R_{\text{clearance}}) \quad (12)$$

其中, $C_{\text{lift}}$ 为升力系数, $C_{\text{drag}}$ 为阻力系数, $f$ 为前悬离地变化高度, $r$ 为后悬离地变化高度, $F_{\text{clearance}}$ 、 $R_{\text{clearance}}$ 为初始前后悬架离地间隙, $f_{\text{griddata}}$ 为MATLAB软件中griddata插值方法。

插值所用的离地间隙计算方法如式(12)、式(13),其中 $f_{\text{load}}$ 、 $r_{\text{load}}$ 分别为前、后轮载荷, $f_{\text{wheelrate}}$ 、 $r_{\text{wheelrate}}$ 分别为前、后轮悬架弹性系数。

$$f = \frac{f_{\text{load}}}{f_{\text{wheelrate}}} \quad (13)$$

$$r = \frac{r_{\text{load}}}{r_{\text{wheelrate}}} \quad (14)$$

由此形成了综合考虑离地间隙变化及偏航角变化影响的较准确的瞬态气动图谱,通过对偏航角度与离地间隙的动态修正得到赛道每个离散点上的气动参数,从而更为准确地得到每个赛道离散点上的极限轮胎抓地力与气动阻力,作为圈速仿真的前置

边界条件。

### 4 车辆动力学建模

建立简化车辆动力学模型, 对轮胎计算垂向、纵向及横向受力, 并在每一个离散点根据轮胎受力极限进行求解, 得到此时的速度及加速度极限作为约束条件。

TR16 赛车采用的是 hoosier13 寸轮胎, 气动特性变化导致轮胎垂向载荷变化, 而垂向载荷增加会导致轮胎的附着系数降低, 因此对赛道上的每个点轮胎特性需进行更正。虽然轮胎同时受胎温、胎压和磨损等因素的影响, 但这些因素通常与天气、赛道、车手策略相关, 难以控制或预测, 因此仅关注气动特性变化引起的垂向载荷变化, 根据其变化规律, 见式(14), 其中  $\mu_{\text{instant}}$  为轮胎附着系数,  $l$  为垂向载荷, 得到轮胎垂向载荷与附着系数关系如图 10a, 同时对所用的 GSX-R 600 发动机进行台架试验, 得到轮胎特性图与发动机特性曲线如图 10b。

$$\begin{aligned} \mu = & \mu_{\text{instant}} \times 9.1129 \times 10^{-11} \times l - \\ & 7.0271 \times 10^{-8} \times l + 1.6161 \times 10^{-5} \times l - \\ & 1.7813 \times 10^{-3} \times l + 26.989 \end{aligned} \quad (15)$$

同时对变速箱进行建模加入档位的概念, 升档

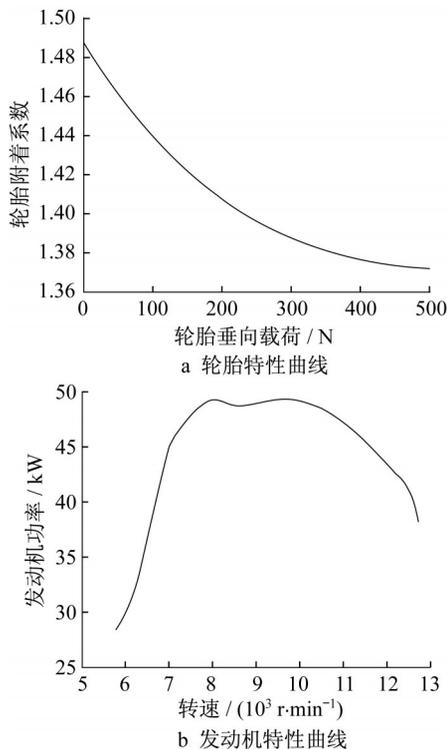


图 10 轮胎特性图与发动机特性曲线

Fig. 10 Diagram of tire characteristic and curve of engine characteristic

的建模逻辑与实际赛道中保持一致, 在达到极限速度之前, 当发动机转速超过该档位的限转时, 进行升档操作(更新升档后的传动比, 并根据此时的发动机牵引力计算得此时的极限加速度), 切换新档位的传动比更新此时的加速度。由此完成车辆动力学部分建模。

### 5 圈速仿真

赛道原始数据来源于 Optimumlap 中的赛道库, 原始数据将赛道分为弯道与直线的组合, 包含的信息为每一段的半径(若为直道则半径为零)、长度与拐向。将赛道按照  $s_{\text{discretized}} = 0.1\text{m}$  ( $s_{\text{discretized}}$  为固定离散长度, 将赛道每 0.1m 分为一段)进行离散, 记录每个点对应的  $x, y$  坐标以及赛道中的半径, 并由此和轴距对应, 得到该路线下的偏航角度。

圈速仿真的基本逻辑为, 在每个离散点取所能获得的最大加速度进行加速, 直到取得在该离散点所能达到的最大速度, 然后保持边界速度行驶到超出速度极限。在临界的离散点处改变策略, 以所能提供的最大制动加速度进行减速, 直到速度达到轮胎抓地力极限, 继续以所能提供的极限速度行驶, 来达到极限圈速<sup>[12]</sup>。图 11 给出了判断轮胎极限速度示意。

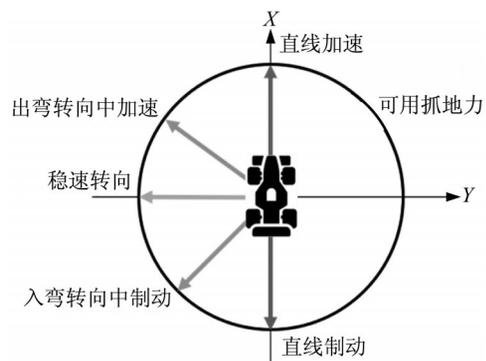


图 11 轮胎可用抓地力示意

Fig. 11 Tire grip available

假设轮胎所有的抓地力都完全被利用, 所对应极限的加速度与减速度计算如下。

直线加速中极限加速度为

$$\begin{aligned} F_{\text{max}} = & \min[F_{x, \text{engine}}, F_{x, \text{tire}}] - D \\ D = & \frac{1}{2} \times \rho \times C_d \times A \times V^2 \end{aligned} \quad (16)$$

直道上的最大制动减速度为

$$F_{\text{max}} = -|F_{x, \text{tire}}| - D$$

$$D = \frac{1}{2} \times \rho \times C_d \times A \times V^2 \quad (17)$$

轮胎所能提供的最大抓地力  $F_{\text{max tire}}$  为

$$F_{\text{max tire}} = \mu |F_z| = m \times \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$

$$a_y = \frac{1}{m} \times \frac{V^2}{R}$$

$$\mu = f(F_z, a, \dots)$$

$$F_z = m \times g - \frac{1}{2} \rho \times C_l \times A \times V^2 \quad (18)$$

以抓地力是否到达极限作为向前亦或向后积分的判断依据,对于车辆的状态方程求解如下:

$$\begin{aligned} a &= \frac{dv}{dt} \\ t &= \frac{ds}{dt} \end{aligned} \quad (19)$$

所以有

$$\frac{ds}{dv} = \frac{ds}{dt} \times \frac{dt}{dv} = \frac{v}{a}$$

$$a_y = \frac{1}{m} \times \frac{V^2}{R}$$

$$\max_a = \frac{(\min [F_{x, \text{engine}}, F_{x, \text{tire}}] - D)}{m} \quad (20)$$

依据四阶龙格库塔公式根据速度初值对路程  $s$  进行积分,有

$$\begin{aligned} s_{n+1} &= \frac{s_{n+h}}{m \times (k_1 + k_2 + k_3 + k_4)} \\ k_1 &= v_n = f(s_n, v_n) \\ k_2 &= f(s_n + \frac{h}{2}, v_n + \frac{h}{2} \times k_1) \\ k_3 &= f(s_n + \frac{h}{2}, v_n + \frac{h}{2} \times k_2) \\ k_4 &= f(s_n + h, v_n + h \times k_3) \end{aligned} \quad (21)$$

具体的仿真流程如图12,仿真流程主要模拟了赛车手的行为,基本逻辑为只要赛车还有剩余的抓地力即以最大的加速度进行加速,对应向前积分,若超过抓地力极限则以最大制动加速度减速。向前积分部分代表抓地力尚有剩余的状态下,采取加速策略,向前进行速度积分并且到达下一个离散点,更新当前的速度、气动力、载荷转移和过弯半径等车辆参数与弯道半径等赛道参数;稳速过弯部分代表已经达到已经抓地力极限的时候,车辆保持常数的过弯速度,以最大侧向加速度下的极限过弯速度进行过弯;向后积分部分代表抓地力不足时,对应到制动阶段,速度超过了在赛道离散点上所能达到的极限速

度,根据最大的制动加速度向后对车速进行积分得到制动长度,即回到上个离散点以最大的制动加速度进行制动。同时,在每个离散点对转速进行考虑,若超过档位限转则升档,低于限转则降档,更新档位即传动比计算新的加速度,直到总距离达到赛道长度即至最后一个离散点,完成仿真。

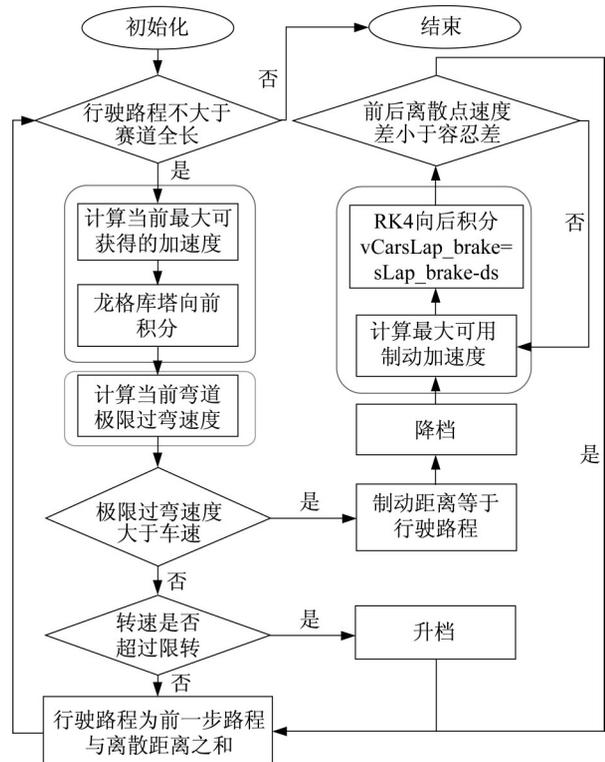


图12 仿真流程

Fig. 12 Flowchart of lap simulation

## 6 圈速仿真结果分析

首先,对比本文算法本身与商业圈速仿真 Optimumlap 算法的差异。为排除由于圈速仿真方法外带来的差异,将2种算法的参数设置保持一致,赛车的升力系数和阻力系数均被设为固定值。对于轮胎参数也都无视垂向载荷的变化而将其设置为常数。同时为了模拟不考虑载荷转移的效果,将赛车重心均设置为零,得到2种算法的圈速仿真对比图13。总体模拟极为相似,但是观察细节,如图13b所示,增加该点对应的过弯半径。可见从制动入弯至行驶距离600m处,弯道半径未发生变化。Optimumlap 的仿真显示已经开始加速,而实际此时理论上已经没有多余的抓地力支撑赛车在弯心加速,显然理论上来说本文模型更为准确。具体的仿真策略及参数设置表2所示。之后进一步综合考虑

载荷转移的影响,重心高度设置为零,以消除负载转移。但是,当重心离地有一定高度时,由于加减速造成的惯性力将产生作用在重心上的惯性力矩,导致载荷在前后悬之间转移。

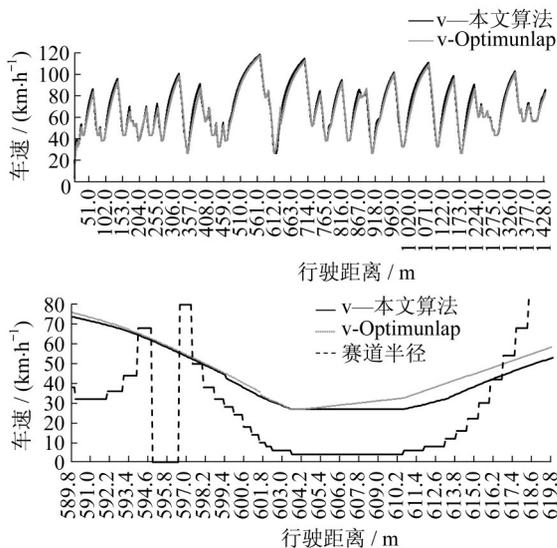


图 13 与 Optimumlap 算法的圈速仿真对比

Fig. 13 Comparison of lap sim with Optimumlap

在基础的仿真之上考虑载荷转移的影响,重心高度设置为零,以消除负载转移。但是,当重心离地有一定高度时,作用在重心上的惯性力将产生转矩有效地将载荷从一个车轮传递到另一个车轮。例如,当汽车向前加速时,载荷中心后移,并在后轴上施加更多负载。后轮为驱动轮,阻力对于加速度存在一定作用。由于载荷转移的作用,阻力对前轮接地点产生的力矩需要一个后轴地面法向作用力施加一个相反的力矩来进行平衡,所以后轴即驱动轮的垂向载荷增加,此时的轮胎极限速度提高。所以单纯将阻力看作纵向加速的阻碍而忽视其对后轮载荷的影响会夸大阻力对于圈速的影响,将导致赛车过分看重减阻而使得下压力降低,而不是选择更为

合适的较激进的赛车设计。

现将考虑载荷转移的圈速仿真及不考虑载荷转移下的圈速仿真结果分别与 Optimumlap 仿真的结果进行对比,结果如图 14 所示。

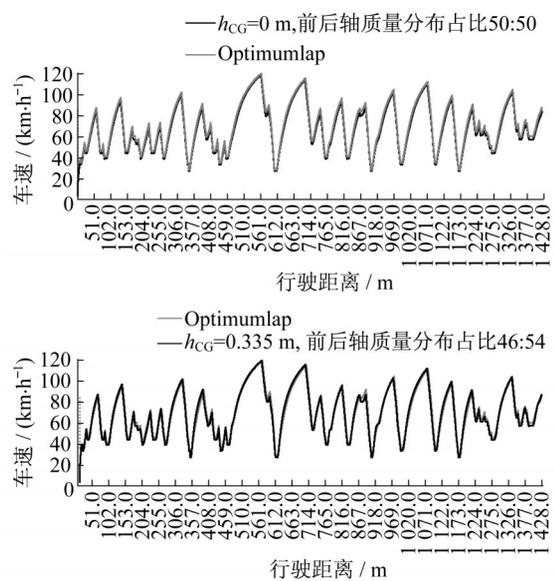


图 14 考虑载荷转移的圈速仿真对比

Fig. 14 Comparison of lap speed simulation considering load transfer

可见考虑到真实的重心高度与前后轴的气动分布情况下,在弯道中的极限车速均存在不同程度的提高,最终的单圈时间如表 3 所示。

考虑载荷转移的情况下的单圈时间要快到 2.1s,虽然这仅是车辆动力学中关于载荷转移的效果,但仍具有空气动力学意义。即使仅考虑恒定的升力和阻力系数,而忽略载荷传递也会低估发动机性能,因此会夸大阻力损失。因此对于不同的赛道应该有不同设计,采用固定升力系数、阻力系数的设置对圈速做等高线图,结果如图 15,图中  $C_L$  为升力系数,  $C_D$  为阻力系数。

表 2 不同车速下仿真与实验的气动参数

Tab. 2 Simulation strategy and parameter setting

仿真设置及结果策略	轮胎方程	载荷转移	重心高度/mm	质量分布	气动图谱	单圈时间/s
基础仿真	$f(F_z)$	是	0.35	动态	$f(\beta, h)$	83.7627
Optimumlap 算法	常数	否	0	固定	常数	83.7138

表 3 考虑载荷转移的圈速仿真结果对比

Tab. 3 Comparison of lap speed simulation results considering load transfer

载荷转移	重心高度/m	单圈时间/s
否	0	85.9854
是	0.335	83.8852

由等高线图可得到如何获得最快圈速的设计。可见不管是哪种赛道升力系数的提高对于圈速而言有着显著的提高,  $C_L$  每提高 0.5, 单圈至少可以快 0.5s。但是阻力与赛道本身关系密切,其中 Austria 和 Lincoln 对于阻力并不敏感,尽管阻力提升接近 1

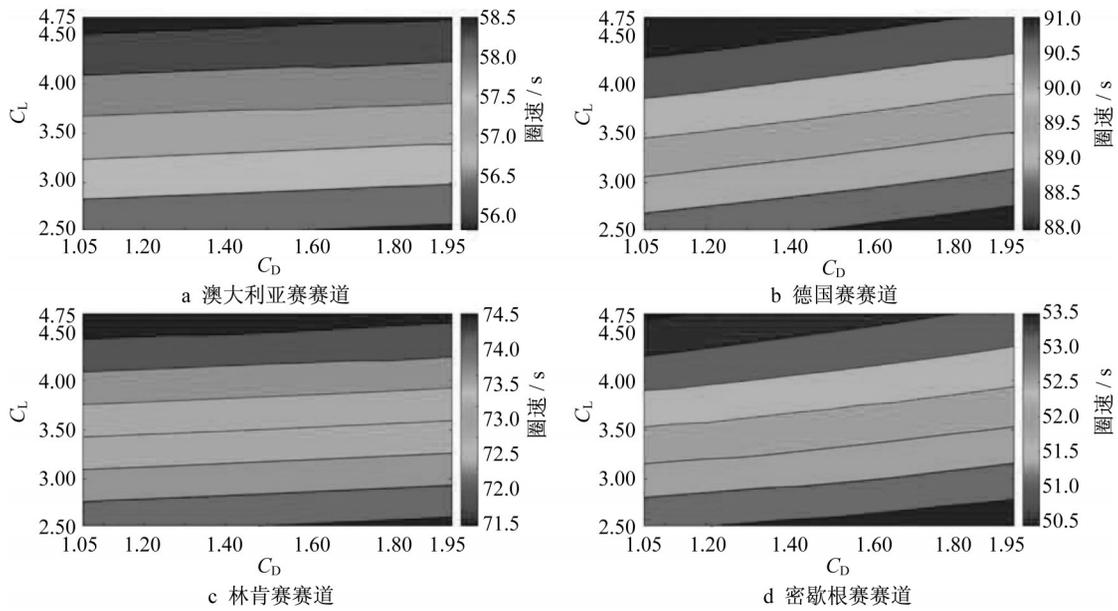


图 15 不同赛道的圈速等高线图

Fig. 15 Contour map of laps of different tracks

倍( $C_D$ 从1.0到2.0),单圈的损失不到0.25s,固定升阻比下升力系数从2.5变为5.0,带来的圈速收益明显更高,适合更为激进的设计与调教。对比图16对应的4个赛道图样可发现:对于阻力并不敏感的赛道以弯道居多,所以牺牲部分的加速能力而补强了制动能力与过弯的极限速度,所以阻力的提高对圈速的影响较弱。具体的影响程度则需要准确的圈速仿真结果来进行指导设计。

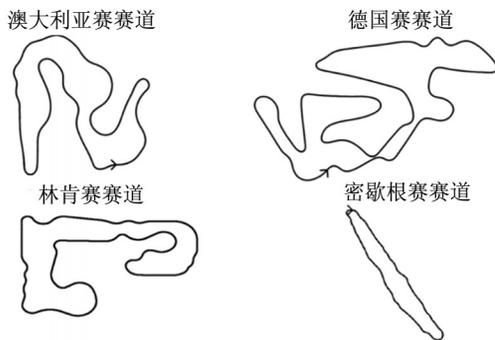


图 16 赛道图样

Fig. 16 Pattern of tracks

对于气动力与姿态耦合的影响,分别对考虑偏航角带来的气动变化与综合考虑偏航与离地间隙变化带来的影响,仿真结果如图17。其中 $f(\beta)$ 为考虑偏航角影响对气动参数进行修正的气动模型(如式(8)), $f(\beta, h)$ 为考虑偏航角与底盘高度变化影响对气动参数进行修正的气动模型(用式(12)进行修正)。

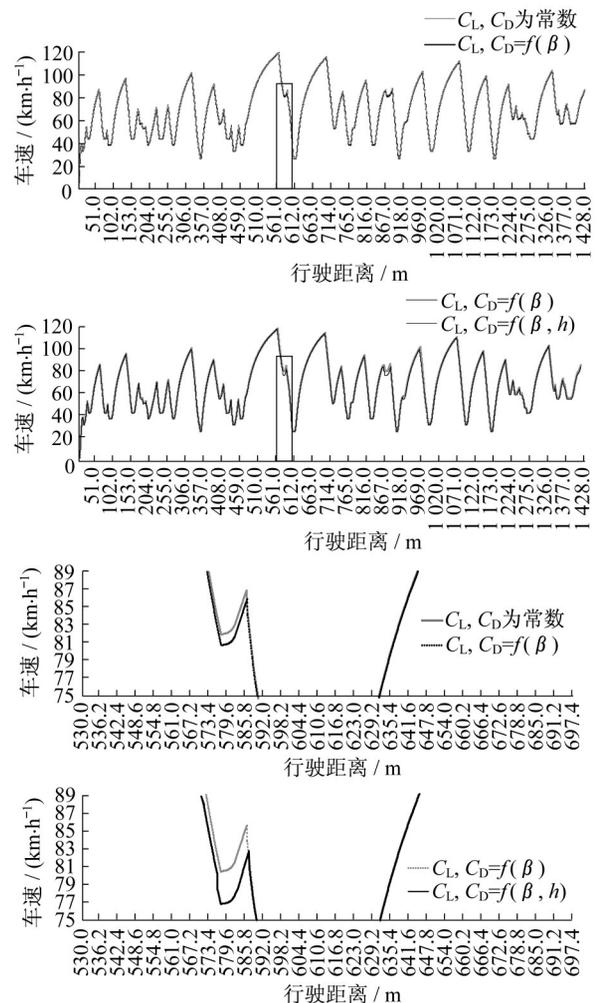


图 17 考虑气动特性变化的圈速仿真对比

Fig. 17 Comparison of lap speed simulation considering changes in aerodynamic characteristics

可见考虑偏航角对于阻力与下压力的衰减作用,弯道中的极限速度均出现不同程度的降低尤其体现在高速过弯的场景,而在出弯入弯的制动与加速瞬间,离地间隙的变化也导致下压力的急剧变化,对车速也产生了较大的影响。具体造成的单圈时间差异如表 4。

表 4 考虑气动特性变化的圈速仿真结果对比

Tab. 4 Comparison of lap speed simulation results considering changes in aerodynamic characteristics

气动修正策略	单圈时间/s
常数修正策略	83.047 6
偏航角修正	83.713 8
偏航角及离地间隙修正	84.529 3

在此基础上做批量仿真,对不同的初始离地间

隙下的赛车设计做不同的圈速仿真,得到不同离地间隙下的圈速等高线图,如图 18 所示,以指导对于不同的赛道应该采用怎么样合适的设计。可见对于不同的赛道而言不同的初始离地间隙设置有着不同的影响,但是影响较小,前后悬架高度变化达到 10mm 时,圈速变化范围仅约 0.2s。

可见对于不同的赛道而言升阻比影响的程度也不完全相同,以 Lincoln 赛道为例,阻力系数从 1.0 到 2.0 增大 1 倍,圈速仅慢 0.3s 左右,若升力系数随之从 2.5 变化至 5.0,圈速变化近 3s,所以对于弯道较多的赛道而言适宜更为激进调教追求更大的升力系数。同样对于离地间隙而言,在一定范围内针对不同赛道的高度调整也会有 0.4s 左右的优势。借助圈速仿真与实时数据采集技术,相信对于赛车运动的极限探索与追求会更为科学与细致。

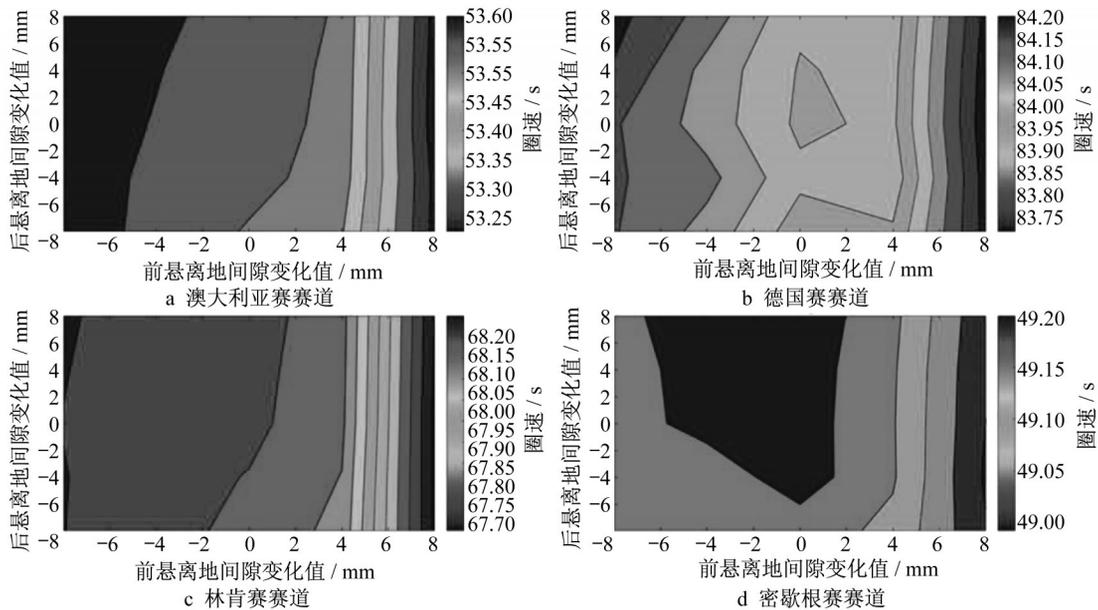


图 18 不同离地间隙下的圈速等高线图

Fig. 18 Contour map of lap speed at different ground clearances

## 7 结论

首先建立弯道下赛车气动特性仿真模型,并且通过路测实验验证仿真的准确性,从而得到赛车弯道偏航下的气动修正方程与离地间隙变化下的气动图谱。再结合整车动力系统建模得到整车模型。对赛道进行离散化之后利用龙格库塔积分进行圈速仿真。对比考虑载荷转移,考虑偏航角、离地间隙的气动特性修正,从而得到更为准确的圈速仿真模型:相比于不考虑载荷转移的仿真模型,考虑阻力在载

转移的作用下,使得后轮垂向载荷增加,后轮所能提供的抓地力极限也随之变高,更为准确的预测了弯道中的速度极限;相比于未进行气动特性修正的仿真模型,更为准确地预测了弯道中的极限车速,从而更为精确地对赛车圈速进行预测仿真。

### 作者贡献申明:

杨志刚:理论指导,提供仿真资源,实验指导。

张波:背景调研,仿真研究,实验验证,数据处

理,论文撰写。

贾青:理论指导,文章修改。

#### 参考文献:

- [1] CASANOVA D. On minimum time vehicle maneuvering: the theoretical optimal lap[D]. Bedfordshire: Cranfield University, 2000.
- [2] CASANOVA D, SHARP R S, FINAL M, *et al.* Application of automatic differentiation to race car performance optimization [C]//Automatic Differentiation of Algorithms. New York: Springer New York, 2000:29-31.
- [3] KELLY Daniel Patrick. Lap time simulation with transient vehicle and tyre dynamics [D]. Bedfordshire: Cranfield University. 2008.
- [4] CASANOVA D. On minimum time vehicle maneuvering: the theoretical optimal lap[D]. Bedfordshire: Cranfield University, 2000.
- [5] OKADA Y , NAKASHIMA T , TSUBOKURA M , *et al.* Aerodynamics evaluation of road vehicles in dynamic maneuvering[C]//Sae World Congress & Exhibition. Detroit : SAE International, 2016 :3-5.
- [6] MONASH Motorsport. The M16 [EB/OL]. [2017-04-23]. <http://www.monashmotorsport.com/the-car/>.
- [7] GU Z, SONG X, JIANG Y, *et al.* Optimization of the realizable  $k - \epsilon$  turbulence model especially for the simulation of road vehicle [C]// SAE 2012 World Congress & Exhibition. Detroit : SAE International, 2012:4-5.
- [8] TROPEA C, YARIN A L, Foss J F, *et al.* Springer handbook of experimental fluid mechanics [M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [9] DOIG G, BARBER T J, NEELY A J. The influence of compressibility on the aerodynamics of an inverted wing in ground effect [J]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133 (6): 061102.
- [10] 余志生. 汽车理论[M]. 3版. 北京:机械工业出版社, 2000. YU Zhisheng. The theory of automobile [M]. 3<sup>rd</sup> ed. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [11] MORRISON G L, SCHOBELI M T, PAPPU K R. Five-hole pressure probe analysis technique [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1998, 9:153.
- [12] SIEGLER B, CROLLA D. Lap time simulation for racing car design [C]// SAE 2002 World Congress & Exhibition. Detroit : SAE International, 2002:8-10.