

移动带系统升力实验与数值研究

杨志刚, 丁宁, 李启良, 庞加斌

(同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 对空载时移动带系统所产生升力进行实验测量和数值计算, 两者得到的升力相差很小, 表明所使用的数值计算方法具有可行性, 并利用数值计算分析移动带系统与车型的关系. 结果表明: 对于不同车型, 移动带系统给车身升力系数测量带来的影响均在 0.040 左右. 风洞实验可利用该关系对测量结果进行修正.

关键词: 移动带系统; 升力; 风洞实验; 数值模拟

中图分类号: U467.1+3

文献标志码: A

Experimental and Numerical Studies on Moving-belt System Lift Force

YANG Zhigang, DING Ning, LI Qiliang, PANG Jiabin

(Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A void load test of moving-belt system was carried out respectively by wind tunnel test and numerical simulation and the results were compared. The comparison result indicates that the test results agree well with the numerical results, which proves the numerical simulation is feasible. The relationship between the moving-belt system and the vehicle body shape was also studied by numerical simulation. The result shows that the effects of the moving-belt systems of different vehicles on the measurement of lift force are almost the same, and the ΔC_L is about 0.040. The relationship can be adopted to modify the test result of lift force.

Key words: moving-belt system; lift force; wind tunnel test; numerical simulation

近些年研究表明, 汽车所受到的空气阻力, 大部分来自于汽车底部和轮胎部分^[1]. 因此, 在实验过程中, 如何正确模拟汽车底部的流场就显得尤为关键.

所以, 越来越多的汽车风洞安装地面模拟系统, 其中应用较为广泛的是五带地面模拟系统^[2-6]. 它由一条中央移动带和四条处于轮胎位置的小移动带组成. 通过转动单元带动皮带, 使其移动速度与来流速度一致, 这样就真实再现了路面上汽车与空气和路面间的相对运动情况, 同时移动带的运动也控制了边界层在被测车辆位置处的发展^[7].

但凡是实验设备都会带来系统误差. 移动带的运转使得周围的流场发生变化, 在移动带附近产生压力差, 从而导致移动带产生升力. 在风洞实验中, 由于测力传感器位于车轮转动单元下部, 这样在测量时所得的数据实为被测物体所受升力与转动单元处移动带所受升力之和, 因此五带系统会对物体升力测量带来的一定误差. 随着车型的变化, 这种误差如何变化, 这在国内外的研究中均没有涉及. 由于现有的测量系统难以测量到整车实验时移动带自身升力情况, 因此本文以数值模拟为主, 实验为辅来明确汽车外形与移动带升力关系, 从而给出整车升力修正结果.

1 数值方法的验证

1.1 空载实验

风洞实验中, 在有被测物体时, 移动带系统所产生升力的测量以目前的技术条件不可能实现. 为此, 只能测量空载时移动带产生的升力. 在实验中车轮转动单元开启, 地板抽吸关闭, 偏角为 0° , 来流风速为 $38.89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 工况 1 为中央移动带开启运行, 工况 2 为中央移动带关闭运行.

1.2 数值模型与数值模拟方法

按照实验工况对移动带系统进行建模. 中央移动带长为 7 m、宽为 1 m, 四条小移动带长为 0.3 m、

收稿日期: 2012-06-10

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划 (2011CB711203)

第一作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为风洞技术与汽车空气动力学.

E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

通讯作者: 李启良(1980—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学与气动噪声. E-mail: lq10804@hotmail.com

宽为 0.28 m,转动单元模型如图 1 所示。

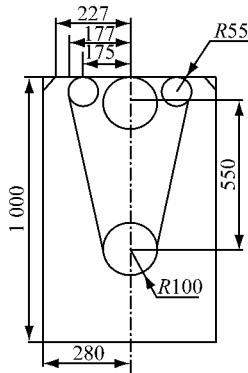


图 1 转动单元模型(单位:mm)
Fig.1 WSU model

运用 FLUENT 软件,选用 Realizable $k-\epsilon$ 两方程湍流模型^[8]和非平衡的壁面函数,压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法,动量、湍动能和耗散率采用二阶迎风格式,当残差收敛至 10^{-5} 数量级,且监控物理量数值基本不随迭代发生改变时,认为计算收敛。

1.3 数值结果与实验结果对比

数值结果与实验结果均为四个车轮转动单元处移动带所受升力的合力。从实验结果可以看出,对于两个工况,对应的升力分别为 15.52 N 与 15.32 N。其中,工况 2 相对于工况 1 要小 1.29%,也就是说中央移动带的运转与否对于转动单元上的最终测力并没有特别大的影响。从表 1 可以看到数值结果与实验结果相差较小,其误差都在 9.0%之内。可见本文采用的数值模拟方法正确可行。

表 1 升力数值结果与实验结果对比

Tab.1 Experimental and numerical results

工况	模拟值/N	实验值/N	相对误差/%
1	14.22	15.52	8.4
2	14.50	15.32	5.2

2 车身外形与移动带的关系

图 2 给出五个整车模型,其中模型 1 和 2 是简化 Sedan 模型与皮卡模型,不考虑后视镜、车灯、车窗接缝等处的影响。模型 3~5 是更为真实的 Sedan, SUV 和赛车模型。

采用来流速度为 20,30 和 40 $m \cdot s^{-1}$ 对上述模型进行计算,考虑地面边界层效应。计算域由风洞实验段的长方体区域和转动单元区域组成,长方体区域的大小以保证阻塞比符合计算条件所定,五个模型的阻塞比最大为 2.47%,阻塞干扰产生的误差可以不用修正^[9]。移动带系统数值计算方法的选择与

上文相同。

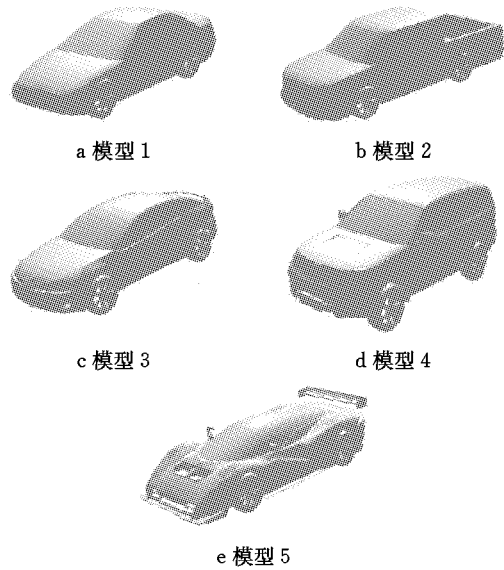


图 2 整车模型

Fig.2 Vehicle models

2.1 模型 1 和 2

在风洞实验中,升力系数 C_L 用来考察被测物体的空气动力学特征。移动带对汽车测量升力系数的影响可用 ΔC_L 来表示,计算式如下:

$$\Delta C_L = \frac{\text{移动带所产生的附加升力}}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S} = \frac{\sum_{i=1}^{42} P_i S_i}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S}$$

式中: P_i 为测点静压, Pa; S_i 为测点面积, m^2 ; ρ 为空气密度, $kg \cdot m^{-3}$; V_∞ 为来流速度, $m \cdot s^{-1}$; S 为移动带总面积, m^2 。

模型 1 和 2 的数值模拟结果见表 2 和 3。可以看出,前部移动带所受升力均高于后部移动带所受升力。受到前端边界层去除的影响,移动带系统自身运转所产生升力的合力趋势都是变小,且量纲为一的 ΔC_L 为一定值。模型 2 的移动带所受升力与模型 1 近似相等,但由于模型 2 的迎风面积大于模型 1 的迎风面积,其 ΔC_L 显得更小。

表 2 不同来流风速下模型 1 升力数值模拟结果

Tab.2 Numerical simulation results of Model 1 at different wind speeds

速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	前部/ N	后部/ N	合力/ N	ΔC_L	备注
20	17.36	8.04	25.40	0.049	未去除前端边界层
30	38.88	18.12	57.00	0.049	
40	71.08	32.24	103.32	0.050	
20	16.72	7.94	24.66	0.048	去除前端边界层
30	37.66	17.94	55.60	0.048	
40	67.10	32.00	99.10	0.048	

表 3 不同来流风速下模型 2 升力数值模拟结果

Tab. 3 Numerical simulation results of Model 2 at different wind speeds

速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	前部/ N	后部/ N	合力/ N	ΔC_L	备注
20	17.76	7.58	25.34	0.037	未去除前 端边界层
30	40.42	17.20	57.62	0.038	
40	72.20	30.72	102.92	0.038	
20	17.24	7.42	24.66	0.036	去除前端 边界层
30	39.06	16.82	55.88	0.037	
40	69.88	29.98	99.86	0.037	

2.2 模型 3, 4 和 5

模型 3, 4 和 5 的数值模拟结果见表 4~6。通过对三种车型的对比,可以看出三种车型对于移动带受力的影响略有不同,模型 3 最大、模型 4 次之、模型 5 最小。三种车型的 ΔC_L 可以认为是近似相等。

表 4 不同来流风速下模型 3 升力数值模拟结果

Tab. 4 Numerical simulation results of Model 3 at different wind speeds

速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	前部/ N	后部/ N	合力/ N	ΔC_L	备注
20	17.50	6.46	23.96	0.042	未去除前 端边界层
30	39.14	14.70	53.84	0.042	
40	69.44	24.64	94.08	0.042	
20	17.96	6.48	24.44	0.043	去除前端 边界层
30	39.18	14.34	53.52	0.042	
40	69.14	25.34	94.48	0.042	

表 5 不同来流风速下模型 4 升力数值模拟结果

Tab. 5 Numerical simulation results of Model 4 at different wind speeds

速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	前部/ N	后部/ N	合力/ N	ΔC_L	备注
20	17.16	5.90	23.06	0.038	未去除前 端边界层
30	38.30	13.16	51.46	0.038	
40	67.68	23.08	90.76	0.037	
20	17.30	5.70	23.00	0.038	去除前端 边界层
30	38.78	12.60	51.38	0.037	
40	68.00	22.10	90.10	0.037	

表 6 不同来流风速下模型 5 升力数值模拟结果

Tab. 6 Numerical simulation results of Model 5 at different wind speeds

速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	前部/ N	后部/ N	合力/ N	ΔC_L	备注
20	10.00	8.68	18.68	0.038	未去除前 端边界层
30	22.80	20.00	42.80	0.039	
40	41.04	36.44	77.48	0.039	
20	12.12	9.10	21.22	0.043	去除前端 边界层
30	27.26	20.60	47.86	0.043	
40	48.56	36.48	85.04	0.043	

模型 3 和 4 前部移动带所受的升力近似相等,而模型 5 明显较低。当前端边界层去除时,模型 5 前部移动带所受升力有小幅增加,缩小了与模型 3 和 4

的差距,但是前端边界层的去除对于模型 3 和 4 前部移动带的受力没有影响;与前部移动带所受升力不同,随着车型的变化,后部移动带所受升力明显不同,模型 5 最大、模型 3 次之、模型 4 最小。对于如模型 5 之类的赛车来说,其流畅的底部气流使得在底部后轮处也有很大负压,因此它后部移动带的升力与前部移动带相比没有变化。但对于模型 3 和模型 4 之类的民用车型,其车身造型并不极端追求空气动力学效应,其后轮处的负压区没有模型 5 大,使得移动带所受的升力较之于前部移动带明显减小。

3 整车升力测量值的修正

通过对五种模型的数值计算,可以发现其 ΔC_L 是一个定值,这就为风洞实验结果的处理提供了便利。在风洞实验中,所测得的升力系数其实包含了 ΔC_L ,在实际工作中减去这部分 ΔC_L ,会使得测量值更为精确。

表 7 给出了五种模型通过数值模拟得到的修正前与修正后的升力系数。从表中可以看出,移动带所受升力对于模型 1 的结果影响最大,修正后与修正前相差了 55%;对于普通民用车如模型 3 和 4,其影响都在 25%左右;对于如模型 5 之类的车型来说,其自身升力系数的绝对值就很大,移动带所受的升力对于其影响低于 5%。可见车型的不同,移动带对于实验测力的影响是不同的。

表 7 五种模型数值模拟得到的升力系数

Tab. 7 Lift coefficients of the numerical simulation of 5 different models

车型	修正前 C_L	修正后 C_L	变化量/%	备注
模型 1	0.086	0.037	57	未去除 前端边 界层
模型 2	0.271	0.233	14	
模型 3	0.180	0.138	23	
模型 4	0.162	0.124	24	
模型 5	-0.930	-0.969	4	
模型 1	0.087	0.039	55	去除前 端边 界层
模型 2	0.275	0.238	13	
模型 3	0.157	0.115	27	
模型 4	0.149	0.112	25	
模型 5	-0.912	-0.955	5	

需要指出的是,通过对于不同车型的数值计算,其整车 ΔC_L 均很接近,风洞中边界层抽吸系统对于其影响不大。模型 1 的 ΔC_L 为 0.049,模型 2 的 ΔC_L 为 0.038,模型 3 的 ΔC_L 为 0.042,模型 4 的 ΔC_L 为 0.038,模型 5 的 ΔC_L 为 0.040。在实际工作中可将 ΔC_L 近似地以定值 0.040 进行处理。

4 结论

对移动带系统进行空载实验,结果表明当来流速度为 $38.89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,无论中央移动带运转与否,其所测升力近似等于 15.50 N . 数值模拟得到的结果与实验结果相当吻合,验证了本文采用数值模拟方法正确性.

通过使用不同车型对移动带系统进行数值研究,结果表明:随着流速的变化,无论是使用哪种车辆模型进行数值模拟,其量纲为一的 ΔC_L 都近似相等. 风洞中边界层抽吸系统的开启不会对 ΔC_L 的值产生很大的影响. 风洞整车升力测量可根据该数值进行升力修正,从而获得更为准确的结果.

参考文献:

- [1] Cogotti A. Evolution of performance of an automotive wind tunnel [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(6):667.
- [2] Johan Sternéus, Tim Walker, Trevor Bender, et al. Upgrade of the Volvo cars aerodynamic wind tunnel [C] // *Social Automotive Engineering*. [S. l.]: SAE, 2007; 2007-01-1043.
- [3] Kim M, Lee J, Kee J, et al. Hyundai full scale aero-acoustic wind tunnel [C] // *Social Automotive Engineering*. [S. l.]: SAE, 2001; 2001-01-0629.
- [4] Walter J, Duell E, Martindale B, et al. The Daimler Chrysler full-scale aeroacoustic wind tunnel [C] // *Social Automotive Engineering*. [S. l.]: SAE, 2003; 2003-01-0426.
- [5] Duell E, Kharazi A, Muller S, et al. The BMW AVZ wind tunnel center [C] // *Social Automotive Engineering*. [S. l.]: SAE, 2010; 2010-01-0118.
- [6] Wiedemann J, Potthoff J. The new 5-belt road simulation system of the IVK wind tunnels-design and first result [C] // *Social Automotive Engineering*. [S. l.]: SAE, 2003; 2003-01-0429.
- [7] 杨帆. 整车风洞边界层控制系统数值研究 [D]. 上海: 同济大学, 2009.
YANG Fan. Numerical study on boundary layer control system for full-scale automotive wind tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [8] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: model development and validation [J]. *Computers and Fluids*, 1995, 24(3):227.
- [9] 庞加斌, 刘晓晖, 陈力, 等. 汽车风洞试验中的雷诺数、阻塞和边界层效应问题综述 [J]. *汽车工程*, 2009, 31(7):609.
PANG Jiabin, LIU Xiaohui, CHEN Li, et al. A review on Reynolds number, blockage and boundary layer effects in automotive wind tunnel tests [J]. *Automobile Engineering*, 2009, 31(7): 609.
- [5] Berzeri M, Dhir A, Ranganathan R, et al. A new tire model for road loads simulation: full vehicle validation [C] // *SAE Paper*. [S. l.]: SAE, 2004; 2004-01-1579.
- [6] Sui J, Hirshey J. Evaluation on Analytical Tire Models for Vehicle Vertical Vibration Simulation Using Virtual Tire Testing Method [C]. *SAE Paper*. [S. l.]: SAE, 1999; 1999-01-0786.
- [7] Haga H. Evaluation method for road load simulation using a tire model and an applied example [C] // *SAE Paper*. [S. l.]: SAE, 2006; 2006-01-1256.
- [8] da Cruz J, do Espírito Santo I, de Oliveira A. A semi-analytical method to generate load cases for CAE durability using virtual vehicle prototypes [C] // *SAE Paper*. [S. l.]: SAE, 2003; 2003-01-3667
- [9] Bäcker M, Langthaler T, Olbrich M, et al. The hybrid road approach for durability loads prediction [C] // *SAE Paper*. [S. l.]: SAE, 2005; 2005-01-0628.
- [10] Ryu S. A study on obtaining excitation load of virtual test lab using virtual iteration method [C] // *SAE Paper*. [S. l.]: SAE, 2010; 2010-01-0011.

(上接第 899 页)