

横风作用下高速列车气动阻力

毛军¹, 郝艳红¹, 高亮¹, 杨国伟²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京, 100044;
2. 中国科学院 力学研究所, 北京, 100190)

摘要:采用真实的列车模型对横风作用下气动阻力进行数值模拟, 对不同列车速度、不同横风风速及横风风向角下列车阻力的变化规律、列车各部件的阻力构成及分布进行研究, 并利用量纲分析 π 定理, 提出列车的阻力系数与风速、风向角及车速之间的综合表达式。研究表明: 阻力系数与风速、风向角和列车车速分别呈三次函数关系; 压差阻力为总阻力的主要部分, 其所占比例为 75%~85%, 远大于黏性摩擦阻力所占比例。

关键词: 高速列车; 横风; 风向角; 气动阻力; 数值模拟

中图分类号: U238

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2014)11-4059-09

Aerodynamic drag of a high-speed train under cross wind conditions

MAO Jun¹, XI Yanhong¹, GAO Liang¹, YANG Guowei²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The simulation was carried out on the aerodynamic drag of train in crosswind with different velocities, wind angles and train speeds. The variation, composition and distribution of train drag and pressure were studied. Finally, the integrated expression between drag coefficient and wind speed, wind angle and train velocity was obtained based on dimensional analysis π theorem. The results show that the drag coefficient with wind speed, wind angle and train speed is a function of three times. The proportion of the pressure drag is 75%–85%, which is far higher than the viscous frictional drag.

Key words: high-speed train; cross-wind; wind angle; aerodynamic drag; numerical simulation

随着列车运行速度的提高, 列车受到的空气阻力以速度的二次函数关系快速增加, 列车的能耗和所需的牵引功率以速度的三次函数关系迅速增长。例如, 在列车时速超过 250~350 km/s 时, 空气阻力占整车阻力的 80%~90%^[1-2]。遭遇横风时, 列车的气动阻力变化更加明显, 引发的噪声、震动等将显著影响高速列车的运行品质。因此, 有效地减少气动阻力不仅能减少能源消耗, 获得更高的能效比, 还能大大提高列车

运行的安全性、经济性和舒适性。各国学者对高速列车气动减阻问题进行了大量研究。如 Raghunathan 等^[3]研究了 ICE 车底结构对气动阻力的影响; 姚拴宝等^[4]研究了 CRH3 型动车组在无风环境中的气动阻力分布及其在列车总气动阻力中所占的比例; 田红旗等^[5]研究了不同流线型头部长度的列车气动阻力, 得到了气动阻力与列车头部流线型长度之间的关系; Schuitem-Werning 等^[6-9]研究了转向架对气动阻力的影响; 黄志

收稿日期: 2013-11-16; 修回日期: 2014-01-22

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51278032); “十一五”国家科技支撑计划重大项目(GTYZ200902); 中国博士后科学基金资助项目(2013M530520) (Project(51278032) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (GTYZ200902) supported by the National Science & Technology Pillar Program during the 11th Five-year Plan Period; Project (2013M530520) supported by China Postdoctoral Science Foundation)

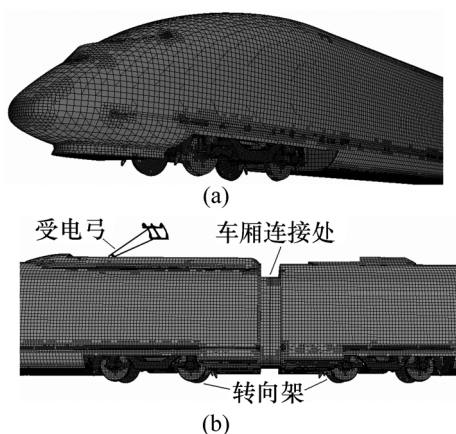
通信作者: 毛军(1966-), 男, 湖北公安人, 教授, 博士生导师, 从高速列车空气动力学研究; 电话: 010-51688339; E-mail: jmiao@bjtu.edu.cn

祥^[10-11]用风洞实验研究了空调导流罩和风挡等对高速列车气动阻力的影响。目前,关于高速列车横风效应气动阻力,尤其是列车速度、横风风速及风向角对气动阻力规律影响的研究较少。而了解不同列车速度、不同横风风速及横风风向角下列车阻力的变化规律、列车各部件的阻力构成等对减小阻力至关重要。为此,本文作者以某型高速列车在平原上运行为例,根据其真实外形和细部结构建模,采用更接近实际的指数风风场,对高速列车以不同速度运行在不同风向角和不同横风风速中的场景进行数值模拟计算,分析了列车各部位的阻力构成、不同风速、风向角和列车运行速度下阻力的变化规律,并利用量纲分析 π 定理,提出了列车的阻力系数与它们之间的综合表达式,为减小列车阻力提供参考。

1 计算模型

由于列车中部截面不变,缩短的模型不改变列车流场结构的基本特征^[12],因此采用 3 辆车编组,头车、中间车和尾车的长度分别为 25.675, 24.775 和 25.675 m,列车宽度为 3.265 m,高度为 3.89 m,考虑转向架、受电弓、风挡、空调导流罩等细部结构,头车和尾车均为流线型,列车模型和计算域如图 1 和 2 所示。采用 trim 网格,加密受电弓、转向架及尾流区域,网格总量为 3 100 万。计算的边界条件设定和数值模拟方法的适用性和准确性验证参见文献^[13]。

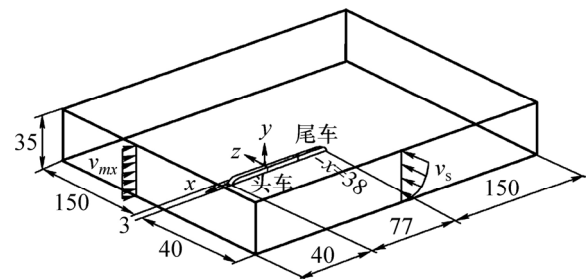
计算工况包括:车速为 400, 380, 350, 320, 300, 250 和 200 km/h,每个车速对应 30, 25, 20, 15 和 10 m/s 等 5 个横风风速,风向角均为 90° ,计 35 个工况;另外,还设定车速 350 km/h、横风风速 15 m/s,



(a) 头车(含转向架);(b) 受电弓及风挡

图 1 列车模型及网格划分

Fig. 1 Train model and grid system



单位:m

图 2 计算域

Fig. 2 Computational domain

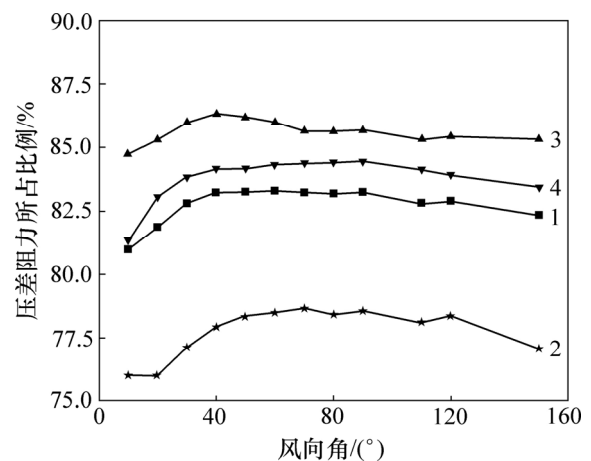
分别计算了风向角为 $10^\circ \sim 120^\circ$ (间隔 10°) 和 150° , 12 个工况, 共计 47 个工况。

2 不同风向角下高速列车气动阻力的构成

列车总的气动阻力由摩擦阻力和压差阻力组成,由垂直作用在列车表面的法向压力和作用在列车表面切线方向的黏性切应力对面积的积分得到。下面以不同横风风向角下列车各部分所受到的气动阻力及其构成为例予以说明。

表 1 所示为车速 350 km/h、指数风速 15 m/s 时、不同风向角下列车各部分所受到的气动阻力及其构成情况,图 3 所示为列车各车辆的压差阻力占总阻力的比例。

由表 1 和图 3 可知,各个风向角下压差阻力在总阻力中均占主要部分,其所占比例为 $75\% \sim 85\%$,远高于黏性摩擦阻力,头车压差阻力占的比例最小,由于



1—整车; 2—头车; 3—中间车; 4—尾车

图 3 列车各车辆的压差阻力占总阻力的比例

Fig. 3 Percentage of pressure drag at each vehicle

中间车带有受电弓装置, 其压差阻力最大。随着风向角的增大, 各节车辆压差阻力所占比例先增大后减小, 但总体变化不大, 最大在 5% 左右, 因此, 通过优化列车几何外形的方法也可以减少在横风中运行的列车压差阻力, 最终减少总阻力。

3 风环境中关键车辆部件的气动阻力分布

列车上的转向架、受电弓装置(包括受电弓、绝缘子和受电弓导流罩等)等局部区域结构极为复杂, 加上地面效应的影响, 绕流经过这些区域时其流线发生改变或出现流动分离现象, 它们对列车及各节车辆的气动特性产生影响, 特别是在横风作用下所造成的影响

可能更加明显。因此, 分析这些局部区域的气动阻力对列车气动阻力的贡献, 对于优化列车的气动外形是非常必要的。

以列车运行速度为 350 km/h、横风为 15 m/s 的指数风、不同横风风向角下气动阻力为例。图 4 所示为承受列车气动荷载的各组成部分的示意图, 图 5 所示为转向架和受电弓装置的阻力分别在总气动阻力中的比例。

由图 5 可知: 3 节车辆上转向架的气动荷载份额并不相同, 在大多工况下相差很大。不同风向角下, 头车转向架的阻力占头车阻力的 45% 左右, 中间车转向架阻力占中间车阻力的 10%~25%, 尾车转向架阻力占尾车阻力的 19%~36%, 可见, 头车转向架阻力的所占比例最大、尾车的次之、中间车的最小。转向架阻

表 1 列车气动阻力的构成

Table 1 Composition of train aerodynamic drag

风向角/(°)	全车		头车		中间车		尾车		受电弓+绝缘子+导流罩		头车转向架		中间车转向架		尾车转向架	
	总力	压差阻力	总力	压差阻力	总力	压差阻力	总力	压差阻力	总力	压差阻力	总力	压差阻力	总力	压差阻力	总力	压差阻力
	10	41.78	33.83	13.21	10.04	16.31	13.82	12.26	9.97	5.070	4.810	6.06	5.95	1.66	1.62	2.29
20	44.93	36.79	13.04	9.91	17.61	15.02	14.28	11.86	5.000	4.710	5.89	5.78	2.91	2.85	4.10	4.03
30	47.74	39.52	13.60	10.49	18.71	16.09	15.43	12.94	4.995	4.708	6.24	6.12	4.01	3.93	4.88	4.79
40	49.20	40.95	13.99	10.90	19.31	16.67	15.90	13.38	5.025	4.746	6.48	6.35	4.55	4.46	5.26	5.16
50	49.10	40.88	14.07	11.02	18.79	16.19	16.24	13.67	4.772	4.521	6.62	6.50	4.59	4.50	5.63	5.53
60	48.94	40.76	13.95	10.95	18.69	16.07	16.30	13.74	4.772	1.502	6.74	6.61	4.90	4.80	5.78	5.67
70	47.75	39.74	13.62	10.71	18.05	15.46	16.08	13.57	4.588	4.320	6.49	6.35	4.80	4.71	5.68	5.57
80	45.84	38.13	12.93	10.14	17.39	14.89	15.52	13.10	4.417	4.168	6.21	6.09	4.66	4.57	5.56	5.45
90	44.06	36.68	12.41	9.75	16.79	14.38	14.86	12.55	4.186	3.942	5.89	5.77	4.49	4.40	5.43	5.33
110	36.91	30.56	10.96	8.56	14.03	11.97	11.92	10.03	3.454	3.242	5.41	5.31	3.67	3.60	4.28	4.20
120	36.99	30.66	10.57	8.28	13.93	11.90	12.49	10.48	3.541	3.331	5.12	5.02	3.68	3.60	4.43	4.33
150	29.38	24.19	8.46	6.52	11.32	9.66	9.60	8.01	2.877	2.707	3.94	3.87	2.69	2.63	3.25	3.19

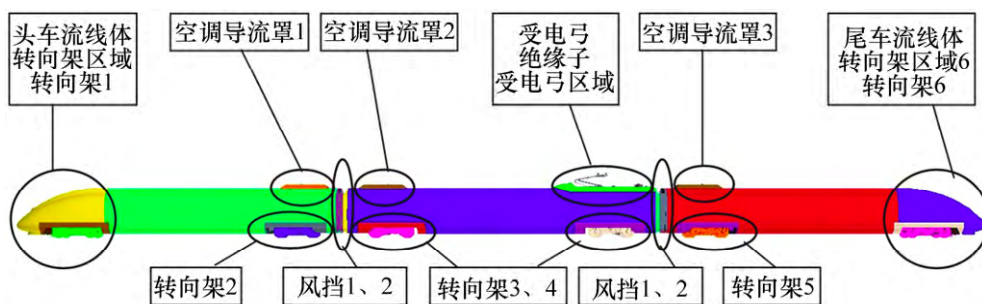


图 4 列车各组成部分的气动荷载分区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of aerodynamic load of train components

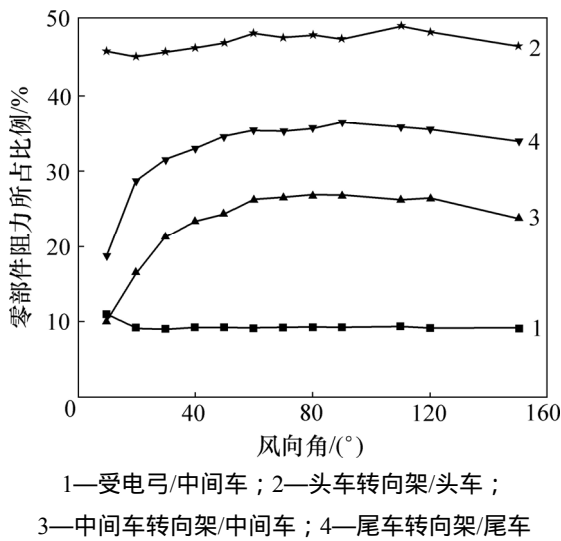


图 5 列车零部件的阻力占各车辆气动阻力的比例
Fig. 5 Drag proportion of parts and at each vehicle

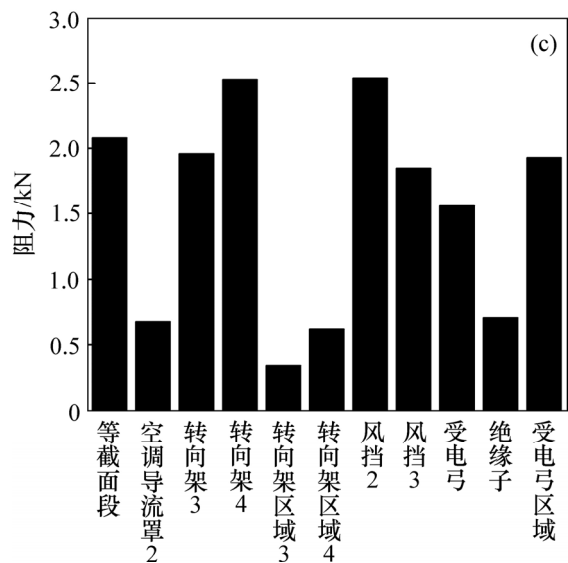
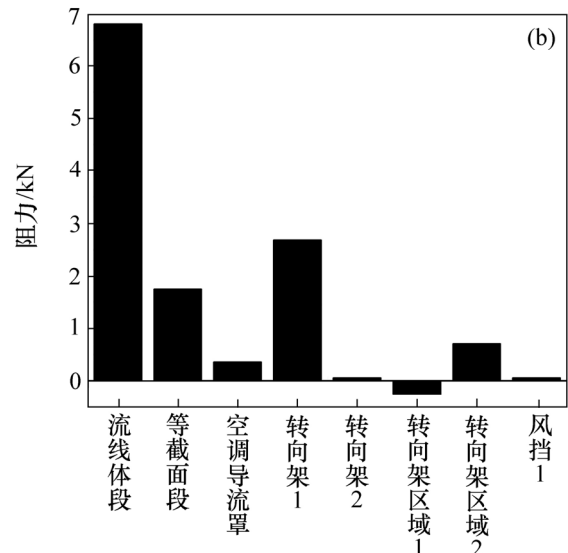
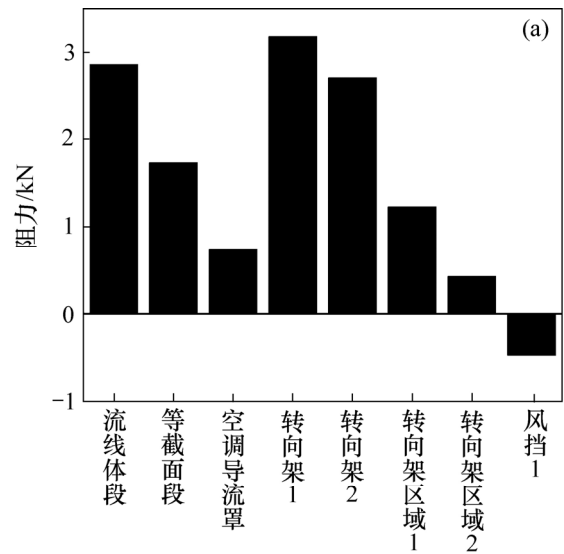
力占整车阻力的比例较大, 因此, 在列车减阻优化时, 有必要考虑转向架区域的减阻, 在转向架的设计制造中, 在工艺条件允许的条件下尽可能考虑转向架结构的优化, 以减小转向架阻力, 从而减小列车的总阻力。受电弓装置位于中间车, 其所占阻力为 10%左右, 且基本不随风向角变化。

图 6 所示为车速 350 km/h、横风风向角 90°、风速 15 m/s 下列车阻力分布。由图 6 可知: 转向架、受电弓、风挡、空调导流罩等细部结构的阻力较大, 对列车整体气动阻力有显著影响, 因此可以考虑通过对转向架区域、受电弓区域等局部区域的优化设计改善此处的流场分布, 达到减小阻力的目的。另外, 既有研究的绝大多数数值模拟在高速列车的几何建模时将转向架和受电弓等予以忽略或充分简化, 这一处理对列车气动阻力的精确分析有较为明显的影响。

4 横风风速、风向角及列车速度对列车气动阻力的影响

图 7~9 给出了车速为 350 km/h 时不同风速、不同风向角和不同列车车速下气动阻力的变化情况。

由图 7 可知: 中间车和尾车的阻力系数随着横风风速的增加而增大, 头车的阻力系数略有不同, 但总的阻力系数随着风速的增加而增大, 全车的阻力系数在风速达到 30 m/s 时不超过 0.75。其中, 头车的阻力系数最小, 风速较低时, 中间车的阻力系数大于尾车的阻力系数。



(a) 头车; (b) 尾车; (c) 中间车
图 6 列车阻力分布

Fig. 6 Drag distribution of train

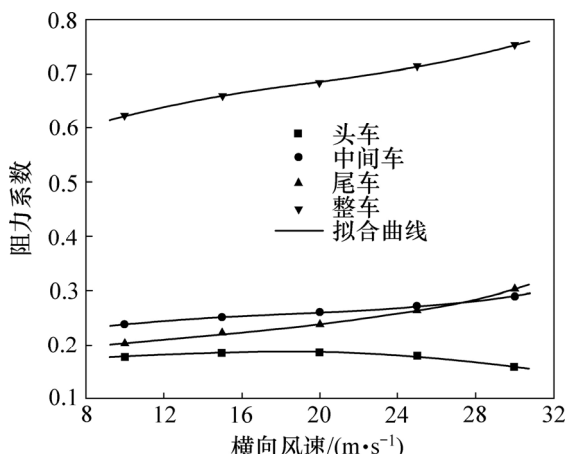


图 7 阻力系数与横风风速的关系曲线

Fig. 7 Variation of drag coefficient with wind velocity

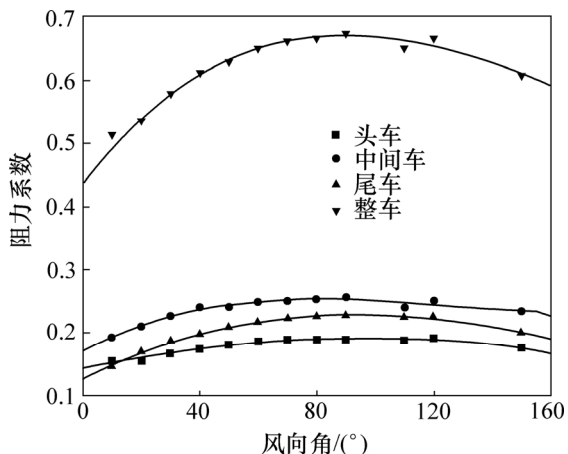


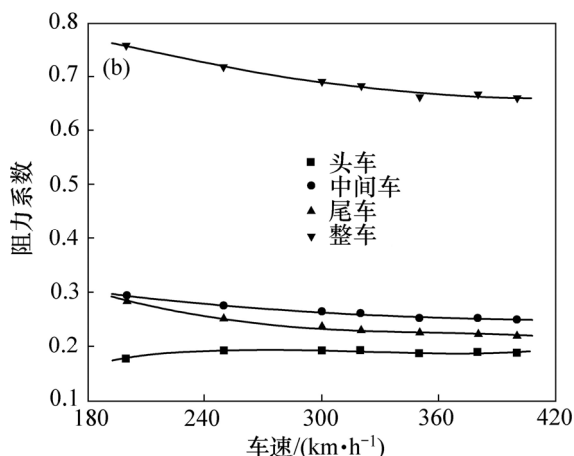
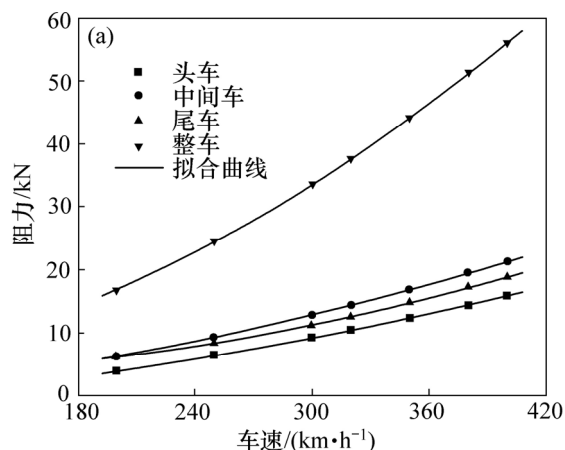
图 8 阻力系数与横风风向角的关系曲线

Fig. 8 Variation of drag coefficient with wind angle

由图 8 可知: 阻力系数随风向角的增加先增大后逐步减小, 存在某一最大作用力系数, 且所对应的风向角不超过 90°, 风向角超过 90°时开始减小, 在风向角 0°~60°的范围内对风向角的正向梯度较大。头车、中间车、尾车的阻力系数梯度比较接近, 而且中间车的阻力系数最大为 0.25, 尾车的次之。

横风一定时, 列车的运行速度对列车的气动特性有决定性的影响。车速变化会使列车前方来流的偏航角发生改变, 从而影响到流场结构和压力分布。图 9 所示为风向角 90°的横风下, 阻力和阻力系数随车速的变化关系。

由图 9 可知: 各节车辆的阻力随车速变化的趋势相同, 但大小各不相同。头车的阻力最小, 中间车的最大, 尾车的居中; 全车及各节车辆的阻力均随车速的增加而迅速增大。而阻力系数则随车速的增加略有下降的趋势, 且变化平滑, 并在一定车速时趋于稳定



(a) 阻力; (b) 阻力系数

图 9 阻力、阻力系数与车速的关系

Fig. 9 Variation of drag and drag coefficient with train speed

值。原因是: 车速增加, 雷诺数也增大, 流动到达完全阻力平方区时, 阻力系数不再与雷诺数相关, 而仅与几何结构尺度相关。

用三次多项式函数对图 8 和图 9 进行曲线拟合, 阻力系数与风速 v_w 、风向角 β 和列车车速 v_t 的表达式可统一表达为三次函数关系:

$$C_{F,n} = a_{3,n}A^3 + a_{2,n}A^2 + a_{1,n}A + r_{F,n} \quad (1)$$

式中: A 代表风速 v_w 、风向角 β 或列车车速 v_t ; 多项式系数与车速、车辆位置等有关, 见表 2。

5 阻力系数与车速、风速、风向角的关系

在线路和几何结构确定的条件下, 高速列车在横风作用下的气动特性与车速、风速和风向角密切相关。为了全面了解作用力系数与车速、风速和风向角对作用力的综合影响, 根据数值模拟的结果, 分析列车的

表 2 阻力系数与横风风速、风向角及列车车速的回归关系

Table 2 Equation of drag coefficient with wind velocity, wind angle and train speed

车体 部位	横风风速/(m·s ⁻¹)				横风风向角/(°)				列车车速/(km·h ⁻¹)			
	$a_{3,n}$	$a_{2,n}$	$a_{1,n}$	$r_{F,n}$	$a_{3,n}$	$a_{2,n}$	$a_{1,n}$	$r_{F,n}$	$a_{3,n}$	$a_{2,n}$	$a_{1,n}$	$r_{F,n}$
头车	-4.720×10^{-6}	1.052×10^{-4}	9.659×10^{-4}	0.163	-2.730×10^{-9}	-3.850×10^{-6}	9.190×10^{-4}	0.143	1.309×10^{-8}	-1.261×10^{-5}	0.004	-0.211
中间车	9.447×10^{-6}	-5.295×10^{-4}	0.012	0.167	5.990×10^{-8}	-2.230×10^{-5}	0.002	0.171	-1.732×10^{-9}	2.262×10^{-6}	-0.001	0.432
尾车	9.020×10^{-6}	-3.915×10^{-4}	0.009	0.146	2.692×10^{-8}	-1.725×10^{-5}	0.003	0.125	-7.954×10^{-9}	9.171×10^{-6}	-0.004	0.702
整车	1.375×10^{-5}	-8.157×10^{-4}	0.021	0.476	4.080×10^{-8}	-3.225×10^{-5}	0.005	0.461	3.406×10^{-9}	-1.166×10^{-6}	-7.330×10^{-4}	0.923

阻力与它们之间的关系, 提出综合表达式。

设列车在风速为 v_w 、风向角为 β 的横风风场中以速度 v_t 高速运行, 则列车的全车阻力 F_D 与 v_w , v_t , β 以及空气密度 ρ 、动力黏性系数 μ 、断面特征尺寸 h 、列车长度 L 、列车表面当量粗糙度 k_s 等有关, 它们的关系可以表述为:

$$f(F_D, v_t, v_w, \beta, \rho, \mu, h, L, k_s) = 0 \quad (2)$$

式中, 风向角 β 的单位为($^\circ$), 在公式推导过程中使用不方便, 因此在后面用三角函数代替之。选择车速 v_t 、密度 ρ 、断面特征尺寸 h 为基本物理量, 由量纲分析 π 定理得:

$$f\left(\frac{F_D}{\rho v_t^2 h^2}, \frac{v_w}{v_t}, \frac{1}{R_{et}}, \frac{L}{h}, \frac{k_s}{h}, \cos \beta\right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{F_D}{0.5 \rho v_t^2 A} = f\left(\frac{v_w}{v_t}, R_{et}, \frac{L}{h}, \frac{k_s}{h}, \cos \beta\right) \quad (4)$$

式中, 风速 v_w 与车速 v_t 的比值是无量纲量, 定义风速车速比 $\lambda_{wt} = v_w / v_t$, 则阻力系数 C_D 为:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho v_t^2 A} = \left(\frac{v_t}{v}\right)^2 f\left(\frac{v_w}{v_t}, R_{et}, \frac{L}{h}, \frac{k_s}{h}, \cos \beta\right) \quad (5)$$

风向角为 β 时, 合速度关系为

$$v^2 = v_t^2 + v_w^2 + 2v_t v_w \cos \beta \quad (6)$$

代入式(5)得:

$$C_D = \frac{1}{1 + \lambda_{wt}^2 + 2\lambda_{wt} \cos \beta} f(\lambda_{wt}, R_{et}, \frac{L}{h}, \frac{k_s}{h}, \cos \beta) \quad (7)$$

当列车以时速 200~350 km/h 高速运行时, 雷诺数 $R_e = 1.15 \times 10^7 \sim 2.01 \times 10^7$, 流动进入自模区, 阻力系数与雷诺数无关。对于同一列车, 其车头形状是确定的, 相对粗糙度 k_s/h 也是确定的, 列车横断面的水力直径 h 由断面面积和周长决定, $h = 3.2498$ m, 则式(7)可简

化为:

$$C_D = \frac{f(\lambda_{wt}, \cos \beta)}{1 + \lambda_{wt}^2 + 2\lambda_{wt} \cos \beta} \quad (8)$$

考虑到图 8 和图 10 均是在 90° 风向角条件下的曲线, 应保证经验公式在 $\beta = 90^\circ$ 时的阻力系数 C_D 仅与 λ_{wt} 有关。由图 9 可知: C_D 随风向角而改变, 因此, 令

$$f(\lambda_{wt}, \cos \beta) = a \lambda_{wt}^b [1 + m \cdot \lambda_{wt}^c (\cos \beta)^n]$$

代入式(8)得阻力系数:

$$C_D = \frac{a \lambda_{wt}^b [1 + m \cdot \lambda_{wt}^c (\cos \beta)^n]}{1 + \lambda_{wt}^2 + 2\lambda_{wt} \cos \beta} \quad (9)$$

式中: a , b , m 和 n 为待定系数。通过数据拟合处理, 求出 $a = 1.22$, $b = 0.304$, $c = 3.75$, $m = 3$, $n = 1.5$, 从而有:

$$C_D = \frac{1.22 \lambda_{wt}^{0.304} [1 + 3 \lambda_{wt}^{3.75} |\cos \beta|^{1.5}]}{1 + \lambda_{wt}^2 + 2\lambda_{wt} \cos \beta} \quad (10)$$

式(10)即为列车的全车阻力系数与列车车速、横风风速和风向角之间的关系表达式, 为半经验公式。该式考虑了风向角为 0° 和 90° 等特殊风向角的情况。由该式计算的列车阻力系数与数值模拟样本数据的差值绝大多数在 5% 的范围内(样本数据由图 7~9 提供), 表明该式作为半经验公式具有较好的准确性。对于横风风速为 0 m/s 的情况则需另作处理。

6 列车周围和列车表面的压力分布

以车速为 350 km/h、指数风速为 15 m/s、风向角为 90° 的工况为例说明横风作用下高速列车气动阻力在列车各部位变化的原因。图 10 所示为列车纵向的横

截面位置。图 11 所示为沿列车纵向不同位置截面列车周围的压力分布云图和等值线。图 12 所示为该工况的

列车表面压力分布云图。为了显示出局部压力特性, 图中压力显示范围为-2~2 kPa。

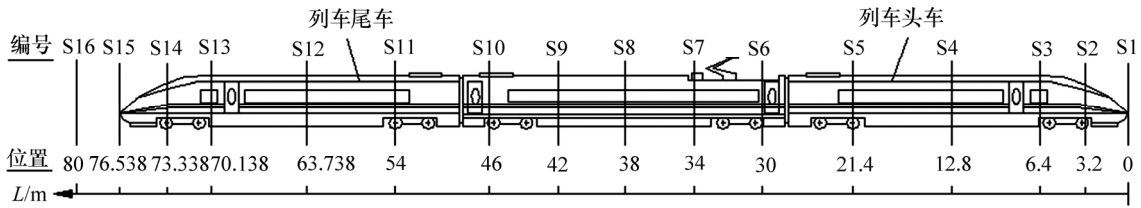
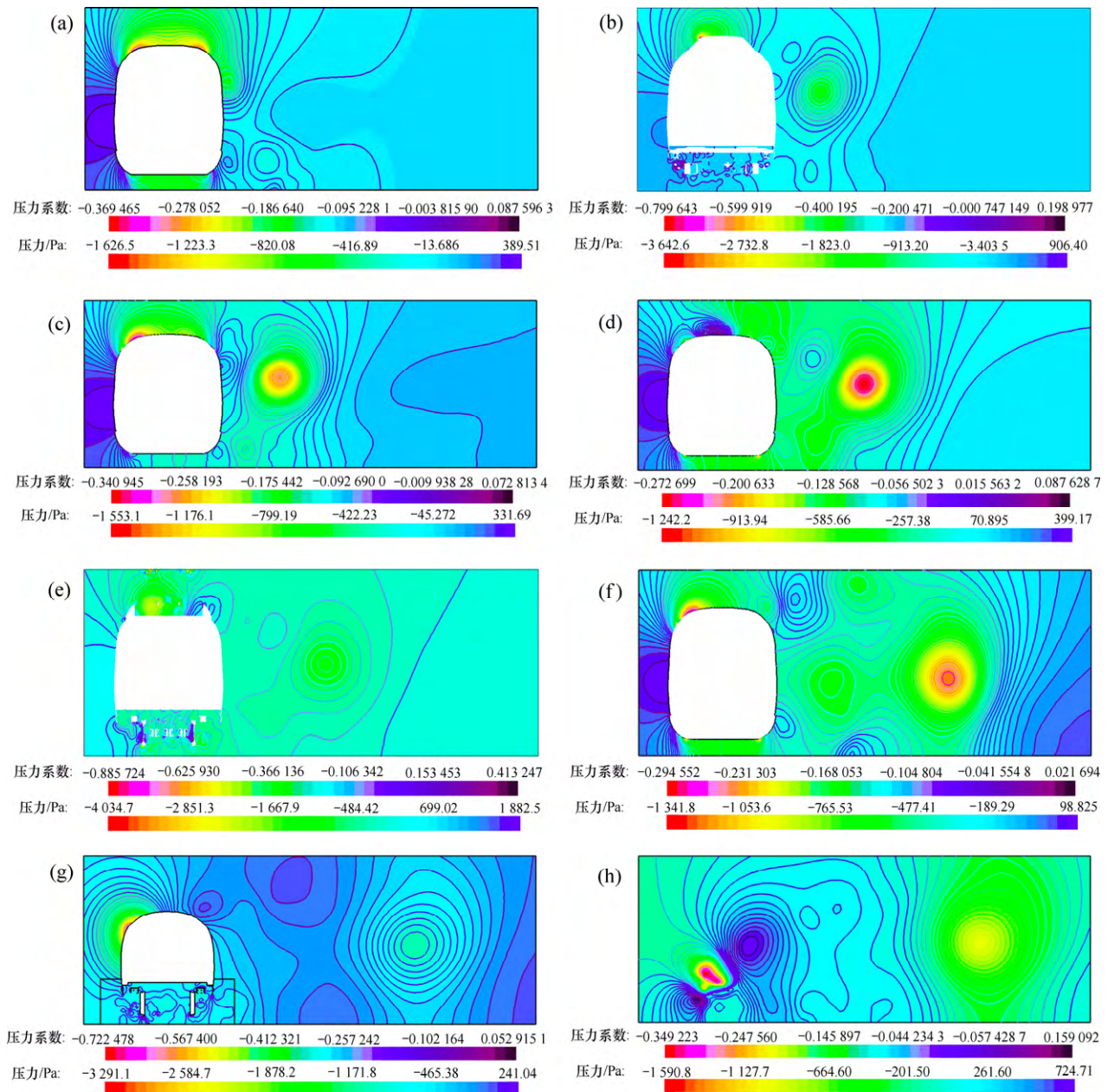


图 10 列车纵向的横截面位置

Fig.10 Longitudinal cross-sectional position of train



(a) S4 : L/D=3.938 ; (b) S6 : L/D=9.231 ; (c) S7 : L/D=10.462 ; (d) S9 : L/D=12.923 ; (e) S10 : L/D=14.154 ; (f) S12 : L/D=19.612 ; (g) S14 : L/D=22.565 ; (h) S15 : L/D=23.550

图 11 列车横截面压力分布图(横风由左向右)

Fig. 11 2-D pressure for different locations on x-axis (crosswind from left to right).

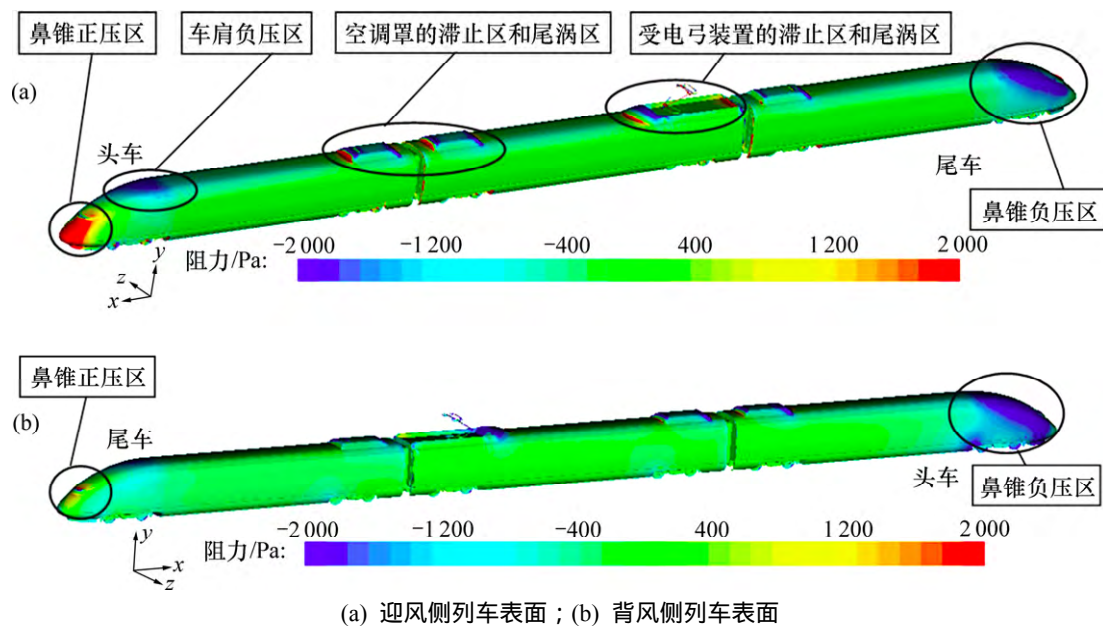


图 12 列车在横风作用下的表面压力分布云图

Fig. 12 Pressure distribution of train surface under crosswind

由图 11 和图 12 可知, 由于空气具有黏性, 空气流过头部鼻锥和导流板凹槽时因气流被滞止, 附近气流速度约为 0 m/s , 压力最大; 在受电弓处表面压力升高; 在列车连接处的端部, 由于风挡和间隙的存在, 使列车端部表面的压力改变; 在列车尾部, 空气流速加快, 列车尾部的压力减小。受到横风作用时, 列车迎风面宽度增加, 会有更多的气流流向车身底部, 造成车身底部气流阻力增大, 速度降低, 压力升高。流向车身顶部的气流虽然也有所增加, 但由于流向顶部的气流在与底部的气流汇合前流经的路程较长, 速度变大, 压力反而降低。

由图 12 可知: 头车和尾车流场压力分布较为复杂, 中间段压力分布的变化相对较小。头车鼻锥附近为正压区, 压力较高, 流速相对较低, 且流动滞止点位于其中, 但不在鼻锥尖处。滞止点的流速为 0 m/s , 压力达到最大。沿车身向后, 随着流动的加速, 压力降低, 头车流线体段结束的地方即车肩附近出现负压区。气流沿车身继续流动, 遇到凸出车体表面的空调罩和受电弓装置后再次出现流动滞止区和脱流尾涡引起的负压区, 这些凸出物会增加空气阻力。气流在流经尾车车肩后因产生明显的分离涡而使鼻锥区域出现较强的负压区。

7 结论

1) 阻力系数与风速、风向角和列车车速的表达式

可分别表示为三次函数关系, 且各节车辆的阻力系数所对应的多项式系数与车速大小、车辆位置等有关。

2) 各节车辆总的阻力和压差阻力随风向角的变化较大, 黏性摩擦力随风向角的变化不大。压差阻力在总阻力中占主要部分, 其所占比例为 $75\% \sim 85\%$, 远高于黏性摩擦阻力所占比例, 但摩擦阻力最大可占总阻力的 20% 左右, 在计算总阻力时, 摩擦阻力不宜忽略。

3) 在各个风向角下, 头车转向架的阻力占头车阻力的 45% 左右, 中间车转向架阻力占中间车阻力的 $10\% \sim 25\%$, 尾车转向架阻力占尾车阻力的 $19\% \sim 36\%$ 。受电弓装置位于中间车, 其阻力占 10% 左右, 且不随风向角变化。

4) 建立了列车的阻力系数与横风风速、风向角和列车速度之间的无量纲关系式。

参考文献

- [1] 吴建民. 高等空气动力学[M]. 陈则霖, 吴文正, 译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1992: 1-60.
WU Jianmin. Advanced aerodynamics[M]. CHEN Zelin, WU Wenzheng, trans. Beijing: Beihang University Press, 1992: 1-60.
- [2] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007: 160-161.
TIAN Hongqi. Train aerodynamics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007: 160-161.
- [3] Raghunathan R S, Kim H D, Setoguchi T. Aero-dynamics of

- high speed railway train[J]. Progress in Aero-space Sciences, 2002, 38(6/7): 469-514.
- [4] 姚拴宝, 郭迪龙, 杨国伟, 等. 高速列车气动阻力分布特性研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 18-23.
YAO Shuanbao, GUO Dilong, YANG Guowei, et al. Distribution of high-speed train aerodynamic drag[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7): 18-23.
- [5] 田红旗, 周丹, 许平. 列车空气动力学性能与流线型头部外形[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(3): 47-55.
TIAN Hongqi, ZHOU Dan, XU Ping. Aerodynamic performance and streamlined head shape of train[J]. China Railway Science, 2006, 27(3): 47-55.
- [6] Schuite-Werning B. Research of European railway operators to reduce the environmental impact of high speed trains[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2003, 217(4): 249-257.
- [7] 杨志刚, 高喆, 陈羽, 等. 裙板安装对高速列车气动性能影响的数值分析[J]. 计算机辅助工程, 2010, 19(3): 16-21.
YANG Zhigang, GAO Zhe, CHEN Yu, et al. Numerical analysis on influence on aerodynamic performance of high-speed train caused by installation of skirt plates[J]. Computer Aided Engineering, 2010, 19(3): 16-21.
- [8] 郑循皓, 张继业, 张卫华. 高速列车转向架空气阻力的数值模拟[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(2): 46-51.
ZHENG Xunhao, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Numerical simulation of aerodynamic drag for high-speed train bogie[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(2): 46-51.
- [9] 郝艳红, 毛军, 李明高, 等. 高速列车横风效应的数值模拟[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(1): 14-19.
XI Yanhong, MAO Jun, LI Minggao, et al. Numerical study on the crosswind effects of high-speed train[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(1): 14-19.
- [10] 黄志祥, 陈立, 蒋科林. 高速列车减小空气阻力措施的风洞试验研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 16-21
HUANG Zhixiang, CHEN Li, Jiang kelin. Wind tunnel test of air-drag reduction schemes of high-speed trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 16-21.
- [11] 黄志祥, 陈立, 蒋科林. 高速列车模型编组长度和风挡结构对气动阻力的影响[J]. 实验流体力学, 2012, 26(5): 36-41.
HUANG Zhixiang, CHEN Li, JIANG Kelin. Influence of length of train formation and vestibule diaphragm structure on aerodynamic drag of high speed train model[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(5): 36-41.
- [12] Khier W, Breuer M, Durst F. Flow structure around trains under side wind conditions: A numerical study[J]. Computers & Fluids, 2000, 29(2): 179-195.
- [13] 毛军, 郝艳红, 杨国伟. 横风风场特征对高速列车气动性能作用的研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(2): 22-33.
MAO Jun, XI Yanhong, YANG Guowei. Research on influence of characteristics of cross wind field on aerodynamic performance of a high-speed train[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(2): 22-33.

(编辑 赵俊)