

自然风对汽车空气阻力系数路试结果的影响

钟声龙¹⁾ 吴诒珪¹⁾ 莫春柳²⁾

1) 华南理工大学交通学院, 广州, 510641

2) 广东工业大学工程及计算机绘图室, 广州, 510900

摘要 推导自然风对汽车空气阻力系数 K_F 道路试验的测量误差修正公式, 结合模拟计算和实车试验结果的分析, 阐述了自然风影响 K_F 试验结果的规律以及在 K_F 试验及其数据处理时减小自然风对试验结果影响的方法。

关键词 自然风; 汽车; 空气阻力系数; 测量误差

中图资料分类号 U461.1

汽车的空气阻力系数 K_F 是汽车产品开发及研究中, 计算汽车行驶阻力、预测汽车性能、汽车试验台架上实现汽车行驶工况模拟、评价汽车减阻节能产品的效果等不可缺少的重要参数。用道路试验的方法来测定汽车实车的空气阻力系数 K_F , 简单直接、经济有效。道路试验的最大特点是接近汽车的实际情况、最具真实性。然而, 道路试验的影响因素很复杂, 如果试验条件控制得不好, 试验结果的精确度会很低。自然风是影响 K_F 道路试验结果精确度最重要的因素之一。本文结合理论分析、模拟计算和试验实例分析, 讨论用道路试验方法测定 K_F 时, 自然风对试验结果的影响规律及提高 K_F 测定精度的方法。

1 自然风影响 K_F 的理论分析

1.1 无自然风的 K_F 试验及数据处理方法

在无自然风条件下, 汽车在水平路面上滑行时, 其运动微分方程可以写为^[1]:

$$-\delta m dV/dt = mgf + K_F V^2, \quad (1)$$

式中: m 为汽车质量(kg), δ 为汽车旋转质量换算系数, $g=9.801\text{m/s}^2$, V 为汽车速度(m/s), t 为时间(s), f 为汽车滚动阻力系数(由低速滑行法或底盘测功机试验测得), K_F 为空气阻力系数(kg/m, 由 $\text{N} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-2}$ 化简而得)。

式(1)是一个可分离变量的一阶微分方程。可以直接积分或者用龙格-库塔法作数值积分求出 $V-t$ 关系。根据此关系, 通过滑行试验得到的 $V-t$ 关系数据, 用试算法或麦夸特法作非线性曲线拟合即求出空气阻力系数 K_F ^[2,3]。式(1)亦称为汽车滑行的基本动力学模型, 其等号右边是汽车的滑行阻力, 记为 F_R , 即

$$F_R = mgf + K_F V^2. \quad (2)$$

如果在滑行试验进行时有自然风存在, 这自然风会干扰滑行 F_R-V 曲线的整体变化趋势,

使试验及数据处理的结果偏离 K_F 的真值. 因此, 自然风对试验及数据处理结果影响的性质和大小必须研究清楚.

1.2 恒定自然风对 K_F 试验结果产生的影响

恒定自然风是指风速的大小和方向都不发生变化的自然风. 假定在滑行试验进行时有恒定自然风, 其风速为 w , 且风向与车速方向平行, 则式(2)变为:

$$F_R = mgf + K_F (V \pm w)^2 = mgf + K_F V^2 \pm 2 K_F V w + K_F w^2, \quad (3)$$

式(3)中的“ $\pm$ ”号: 逆风时取“ $+$ ”号, 顺风时取“ $-$ ”号.

比较式(2)和式(3)很容易看出其不同之处来. 这差别正是使试验结果产生误差的原因. 不妨假定有恒定自然风时仍按式(2)考虑而使 K_F 的试验结果产生的误差为 $d K_F$, 那么, 在有恒定自然风时:

$$F_R = mgf + (K_F + d K_F) V^2 = mgf + K_F V^2 + d K_F V^2, \quad (4)$$

如果汽车由某一初速度 V_o 滑行到另一速度 V_n , 则其功率消耗可由图 1 中 $ABV_n V_o$ 所包围的面积(设为 E)来表示. 分别对式(3)和式(4)从 V_n 到 V_o 作定积分可得 E 的两个表达式:

$$E = \int_{V_n}^{V_o} (mgf + K_F V^2 \pm 2 K_F V w + K_F w^2) dV, \quad (5)$$

$$E = \int_{V_n}^{V_o} (mgf + K_F V^2 + d K_F V^2) dV. \quad (6)$$

积分并整理式(5)、(6)可得:

$$d K_F / K_F = \frac{3 w^2 \pm w (V_o + V_n)}{V_o^2 + V_o V_n + V_n^2}, \quad (7)$$

式(7)中“ $\pm$ ”号: 取“ $+$ ”号表示逆风时测得的 K_F 的相对误差, 记为 D_1 ; 取“ $-$ ”号表示顺风时测得的 K_F 的相对误差, 记为 D_2 ; 如果取逆风和顺风时测得的 K_F 值的平均值为 K_F 的测定值, 其相对误差记为 D_o , 则有:

$$D_1 = d K_F / K_F = \frac{3 w^2 + 3 w (V_o + V_n)}{V_o^2 + V_o V_n + V_n^2}; \quad (8)$$

$$D_2 = d K_F / K_F = \frac{3 w^2 - 3 w (V_o + V_n)}{V_o^2 + V_o V_n + V_n^2}; \quad (9)$$

$$D_o = d K_F / K_F = \frac{3 w^2}{V_o^2 + V_o V_n + V_n^2}. \quad (10)$$

式(8)(9)(10)显示: 在滑行试验进行时由于恒定自然风 w 存在, 干扰了滑行 $F_R - V$ 曲线的整体变化趋势, 使试验及数据处理的结果偏离 K_F 的真值, 产生了形如 D_1 和 D_2 的相对误差. 由于相对误差 D_1 和 D_2 的不对称性, 即使试验时汽车滑行方向往返地进行, 取往返试验结果的平均值也不能将误差抵消, 而产生形如 D_o 的相对误差. 理论上, 式(8)(9)(10)可以用来修正恒定自然风 w 对试验结果产生的影响.

1.3 分段自然风对 K_F 试验结果的影响

恒定自然风的情况是存在的. 然而, 笔者在大量试验实践中碰到的却大多数是自然阵风的情况. 为了使分析简化, 假定在滑行试验中自然风的方向保持不变(实际情况大都是这种情况). 但风速 w 在整个滑行过程中是变化的.

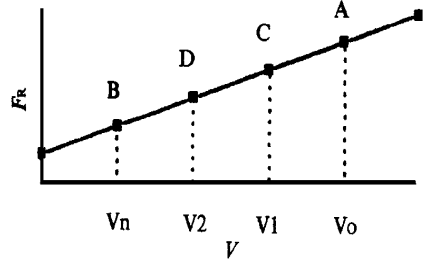


图 1 汽车滑行曲线示意图

设汽车在 V_o 到 V_n 的滑行过程中,在 V_1 到 V_2 段有一风速为 w 的自然阵风,如图1,其中 $V_o \geq V_1 \geq V_2 \geq V_n$,则式(2)变为式(11)和式(12):

$$F_R = mgf + K_F V^2, V_o \geq V > V_1 \text{ 或 } V_2 > V \geq V_n, \quad (11)$$

$$F_R = mgf + K_F (V \pm w)^2, V_1 \geq V \geq V_2, \quad (12)$$

式(12)中的“ $\pm$ ”号:逆风时取“ $+$ ”号,顺风时取“ $-$ ”号。

式(2)和式(11)、(12)的差别,正是使试验结果产生误差的原因。假定有分段自然风时仍按式(2)考虑而使 K_F 的试验结果产生的误差为 dK_F ,逆风时测得的 K_F 的相对误差为 D_1 ,顺风时测得的 K_F 的相对误差为 D_2 ,测得的 K_F 往返方向平均值的相对误差为 D_0 ,则依1.2类似的方法积分并整理可推出:

$$D_1 = dK_F / K_F = \frac{3w^2(V_1 - V_2) + 3w(V_1^2 - V_2^2)}{V_o^3 - V_n^3}, \quad (13)$$

$$D_2 = dK_F / K_F = \frac{3w^2(V_1 - V_2) - 3w(V_1^2 - V_2^2)}{V_o^3 - V_n^3}, \quad (14)$$

$$D_0 = dK_F / K_F = \frac{3w^2(V_1 - V_2)}{V_o^3 - V_n^3}. \quad (15)$$

式(13)、(14)、(15)可以用来修正一个分段自然风 w 对 K_F 试验结果产生的影响。理论上还可以依上法推导出多个分段自然风 w 对 K_F 试验结果产生影响的修正公式,其形式与式(13)、(14)、(15)相似。

2 K_F 试验实例与模拟计算结果的讨论

2.1 实车试验结果实例

为了研究自然风对 K_F 试验结果的影响,我们专门选择有比较大的自然风的条件下进行 K_F 的实车道路试验。试验车型为 EQ1092F;车速仪为日本小野测器的 LC660s,其精度为 0.5%;风速仪为天津气象海洋仪器厂生产的 EY3-2A 电子微风仪,精度为 0.5%。用这种精度的车速仪来研究风速对 K_F 的影响,因仪器产生的误差可以忽略不计^[4]。表1是试验结果。(表中:为了便于分析,对顺风的风速用负数表示;“瞬时最大风速”指 2s 的风速平均值、“平均风速”指 30s 的风速平均值)。可见:(1)瞬时最大风速和平均风速两者相差很大,不是恒定风的情况;各次试验的平均风速相差很大,且 10 次试验平均风速的总和不为 0,但其值不大。这是一种很有代表性的气象情况。(2)各次试验的残差、相对误差和平均值的极限误差 $\Delta_{\text{lim}} = 0.282$ 都很大。(3)试验结果可以表示为:

$$K_F = K_{Fa} \pm 1\sigma = 2.251 \pm 0.094 = 2.251 \times (1 \pm 4.17\%), \text{可信度为 } 68.26\%$$

$$K_F = K_{Fa} \pm 2\sigma = 2.251 \pm 0.188 = 2.251 \times (1 \pm 8.35\%), \text{可信度为 } 95.45\%$$

$$K_F = K_{Fa} \pm 3\sigma = 2.251 \pm 0.282 = 2.251 \times (1 \pm 12.5\%), \text{可信度为 } 99.73\%$$

K_F 算术平均值的最大极限相对误差为 12.5%,这个误差值令人难堪。(4)基于下列的分析数据,平均值的不同取法其相对误差也很不一样,且平均风速之和和大者相对误差也大。实际上,这个车型经无风时精确测量的真正 $K_F = 2.243$ 。用本次试验的算术平均值 $K_{Fa} = 2.251$ 来评价本试验车型的空气阻力系数 K_F ,只有 0.36% 相对误差,可以忽略不计。

- 前 4 次 $K_{Fa}=2.330$;与真值相比较,相对误差为+3.88%;平均风速之和为+1.3m/s
- 后 4 次 $K_{Fa}=2.171$;与真值相比较,相对误差为-3.21%;平均风速之和为-1.2m/s
- 逆风的 $K_{Fa}=2.500$;与真值相比较,相对误差为+11.5%;平均风速之和为+6.0m/s
- 顺风的 $K_{Fa}=2.002$;与真值相比较,相对误差为-10.7%;平均风速之和为-5.7m/s
- 全体的 $K_{Fa}=2.251$;与真值相比较,相对误差为+0.36%;平均风速之和为+0.3m/s

表 1 有自然风时的实车 K_F 试验结果

序号	风向	瞬时最大风速 $w/(m\cdot s^{-1})$	平均风速 $\bar{w}/(m\cdot s^{-1})$	$K_F/(kg\cdot m^{-1})$	残差	残差平方	相对误差/%
1	逆风	2.0	0.9	2.469 5	0.218 2	0.047 6	9.69
2	顺风	-2.1	-1.2	2.018 6	-0.232 7	0.054 1	-10.34
3	逆风	2.9	2.1	2.709 5	0.458 2	0.210 0	20.35
4	顺风	-2.0	-0.5	2.124 1	-0.127 2	0.016 2	-5.65
5	逆风	1.8	0.9	2.467 3	0.216 0	0.046 7	9.59
6	顺风	-2.0	-0.7	2.041 1	-0.210 2	0.044 2	-9.34
7	逆风	0.6	0.2	2.254 2	0.002 9	0.000 0	0.13
8	顺风	-1.8	-1.3	2.009 7	-0.241 6	0.058 4	-10.73
9	逆风	2.8	1.9	2.601 8	0.350 5	0.122 9	15.57
10	顺风	-3.0	-2.0	1.816 8	-0.434 5	0.188 8	-19.30

2.2 模拟计算结果的讨论

表 2 是恒定自然风对 K_F 试验结果产生误差的计算结果。可见:(1)恒定自然风 w 对 K_F 的试验结果影响很大,在风速 $w>0.5\text{ m/s}$ 时对单次 K_F 试验结果产生的误差达到了不能容忍的程度。(2)用往返平均值的办法不能完全消除 w 产生的影响。但当风速 $w<1\text{m/s}$ 时,用平均值来表示 K_F 的真值,其误差很小,可以忽略不计。(3)提高滑行初速度和减小滑行速度间隔(即缩短滑行时间)可以适当减小 w 对 K_F 试验结果的影响。

表 3 是分段自然风对 K_F 试验结果产生误差的计算结果。可见:(1)分段自然风 w 对 K_F 的试验结果影响也很大,在风速 $w>1.0\text{ m/s}$ 时对单次 K_F 试验结果产生的误差也达到了不能容忍的程度。(2)与表 2 比较,分段自然风比恒定自然风对 K_F 试验结果的影响要小些,用往返平均值的办法虽然不能完全消除 w 产生的影响,但当风速 $w<2\text{ m/s}$ 时,用平均值来表示 K_F 的真值,其误差很小,可以忽略不计。(3)有风的 V_1-V_2 速度间隔越大(有风的时间就越长), w 对 K_F 试验结果的影响也越大。

表 2 模拟计算结果:有恒定自然风时 K_F 的相对误差 $v/(km\cdot h^{-1}), D/\%$

风速 $w/(m\cdot s^{-1})$	$V_o=80, V_n=65$			$V_o=80, V_n=50$			$V_o=100, V_n=85$			$V_o=100, V_n=70$		
	D_1	D_2	D_o	D_1	D_2	D_o	D_1	D_2	D_o	D_1	D_2	D_o
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	5.0	-4.9	0.05	5.5	-5.4	0.05	3.9	-3.8	0.05	4.2	-4.1	0.05
1.0	10.1	-9.6	0.25	11.2	-10.6	0.30	7.9	-7.6	0.15	8.6	-8.2	0.20
2.0	20.8	-18.8	1.00	23.0	-20.6	1.20	16.1	-14.9	0.60	17.5	-16.1	0.70
3.0	31.9	-27.5	2.20	35.4	-30.0	2.70	24.7	-21.9	1.40	26.8	-23.6	1.62

表 3 模拟计算结果:有分段自然风时 K_F 的相对误差

$v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1}), D/\%$

风速 $w/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_1=80, V_2=75$			$V_1=75, V_2=70$			$V_1=70, V_2=65$			$V_1=75, V_2=65$		
	D_1	D_2	D_o	D_1	D_2	D_o	D_1	D_2	D_o	D_1	D_2	D_o
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	1.8	-1.7	0.05	1.7	-1.6	0.05	1.6	-1.5	0.05	3.2	-3.1	0.05
1.0	3.6	-3.4	0.10	3.4	-3.2	0.10	3.2	-3.0	0.10	6.5	-6.2	0.15
2.0	7.4	-6.7	0.35	6.9	-6.3	0.30	6.5	-5.8	0.35	13.4	-12.1	0.65
3.0	11.3	-9.8	0.75	10.6	-9.2	0.70	10.0	-8.5	0.75	20.6	-17.6	1.50

3 结论

3.1 自然风对 K_F 道路试验结果的影响

(1) 当恒定风速大于 0.5m/s 或分段自然阵风在风速大于 1.0m/s 时,对单次 K_F 试验结果产生的误差达到不能容忍的程度. 顺、逆风产生的误差不对称,即使试验时汽车滑行方向往返地进行,试验结果的往返平均值也不能将误差抵消;

(2) 在风速比较稳定且能正确测得时,可以用本文提供的公式来修正 K_F 测定值. 这些公式揭示了自然风对 K_F 试验结果影响的本质. 但自然风常常是不稳定的,因而理论修正实际上也是难于实现或者不可靠的;

(3) 当恒定风速小于 1.0m/s ,或者分段自然阵风风速小于 2.0m/s 且各次测得的平均风速的代数和接近 0 时,用多次往返试验的平均值来代表最后的试验结果,产生的误差实际上可以忽略不计;

(4) 试验时有风的速度间隔越大(或时间越长)产生的误差越大;提高滑行初速度和减小滑行速度间隔(即缩短滑行时间)可以适当减小自然风对 K_F 试验结果的影响.

3.2 在 K_F 试验及其数据处理时减小自然风对试验结果影响的方法

- (1) 尽量在风速小于 1.0m/s 的条件下进行试验;
- (2) 取多次往返测量处理结果的平均值为最终试验结果;
- (3) 多次往返试验的“平均风速”的代数和尽量接近 0, (尤其是当试验风速大于 1.0m/s 时,所取试验序列的这个代数和必须接近 0);
- (4) 可能情况下,适当提高滑行初速、缩短每次滑行试验记录的时间.

参 考 文 献

1 余志生. 汽车理论. 北京:机械工业出版社,1981.23
2 倪佑民. 汽车滑行试验方法的改进和数据处理. 汽车工程,1982,(4):35~43
3 刘德贵,费景高. FORTRAN 算法汇编(第二分册). 北京:国防工业出版社,1983.129~134
4 钟声龙. 车速随机误差对两段滑行法试验结果的影响. 汽车科技,1994,2 (2):51~56

Effect of Natural Wind on Error of Aerodynamic Drag Coefficient Measured by Road Test of Motor Vehicle

Zhong Shenglong¹⁾ Wu Gaogui¹⁾ Mo Chunliu²⁾

1) College of Traffic and Communications, SCUT Guang Zhou, 510641

2) Dept. of Engineering and Computer Graphics, GDUT, Guangzhou, 510090

Abstract This paper presents the effect of natural wind on the error of aerodynamic drag coefficient (K_F) measured by road test of a motor vehicle. The law of the effect is established. This is based on the theoretical analysis, calculation and experimental results of a full-scale motor vehicle. The methods are given to reduce the error.

Key words natural wind; motor vehicle; aerodynamic drag coefficient; measured error