

地面-轮胎力学特性

轮胎是连接汽车车身与道路的唯一部件,其基本职能是支撑车辆重力、传递驱动和制动力矩、吸振以及保证转向稳定性。轮胎力学是研究轮胎受力、变形和运动响应之间的关系,它的主要任务是建立精确的数学模型,以描述轮胎的力学特性以及分析汽车的运动特性。

1.1 作用在轮胎上的力和力矩

1.1.1 轮胎的坐标系

为了讨论轮胎的力学特性,需要建立一个坐标系,如图 1-1 所示。垂直于车轮旋转轴线的轮胎中分平面称为车轮平面。坐标系的原点 O 为车轮平面和地平面的交线与车轮旋转轴线在地平面上投影线的交点。车轮平面与地平面的交线取为 x 轴,规定向前为正。 z 轴与地平面垂直,规定指向上方为正。 y 轴在地平面上,规定面向车轮前进方向时指向左方为正。图中还画出了侧偏角 α 与外倾角 γ 。侧偏角是轮胎接地印迹中心(即坐标系原点)位移方向与 x 轴的夹角,图示方向为正,外倾角是垂直平面(xOz 平面)与车轮平面的夹角,图示方向为正。

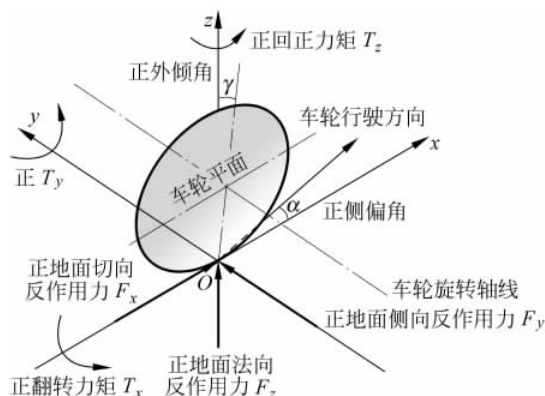


图 1-1 轮胎的坐标系与地面作用于轮胎的力和力矩



1.1.2 轮胎六分力

汽车通过轮胎与路面发生力的作用。地面通过接地印迹作用在轮胎上的应力既有垂直于路面的正应力,也有沿着地面的切向应力(切应力),切应力可分为沿 x 方向的纵向切应力和沿 y 方向的侧向切应力。如果将印迹上各点的应力向印迹中心(轮胎坐标原点)简化,可得到沿轮胎坐标系的作用在轮胎上的力和力矩。

在轮胎坐标系中,地面作用在轮胎上的主要力和力矩包括:地面切向反作用力沿 x 轴的分力——纵向力 F_x ;地面切向反作用力沿 y 轴的分量——侧向力 F_y ;地面法向反作用力 F_z ;地面反作用力绕 x 轴的力矩——翻转力矩 T_x ;地面反作用力绕 y 轴的力矩——滚动阻力矩 T_y 和地面反作用力绕 z 轴的力矩——回正力矩 T_z 。它们均按轮胎坐标系规定的方向确定正、负方向,见图 1-1。

纵向力按照作用方向的不同或作用形式的不同可以称为驱动力或制动力。驱动力源于发动机。发动机产生的有效转矩经过传动系传到驱动轮上,因此地面反作用力——驱动力作用在车轮上。驱动力是维持汽车行驶的外力,它与汽车行驶方向相一致。而制动力为作用在车轮上阻碍汽车行驶的纵向力,制动力的方向与汽车的行驶方向相反。

侧偏力是地面作用在车轮上的切向力沿 y 轴的分量。汽车作曲线行驶时会受到离心力的作用,为了维持汽车的曲线运动,路面作用在车轮上有与离心力相平衡的力,即侧偏力。

地面的法向反作用力反映了各个车轮所承受的轴重的大小。一般来说,作用在各个车轮上的地面法向反作用力的大小与汽车的纵向加速度、侧向加速度以及汽车的总体布置有关,同时地面的法向反作用力的大小也将影响汽车的纵向力和侧向力的大小。

翻转力矩也称为侧翻力矩,它的大小说明了汽车将发生翻转趋势的大小。特别是汽车作曲线行驶时,由于离心力的存在而形成翻转力矩使得汽车发生侧倾现象。

滚动阻力矩描述了阻碍轮胎滚动的力矩的大小,它与路面的状态、轮胎的结构以及行驶车速等有关。

回正力矩是在汽车作曲线运动时使车轮恢复到直线行驶位置的力矩。汽车在曲线行驶时,轮胎将发生侧偏现象,因此将产生作用于轮胎上绕 z 轴的力矩。

1.2 轮胎的纵向力学特性

主要从轮胎在纵向的受力情况进行轮胎特性的分析,研究滚动阻力、转弯阻力、穿水阻力和前束阻力等与轮胎的参数以及路面的关系。另外,驱动力和制动力将在后面章节介绍。

1.2.1 滚动阻力

轮胎滚动时,与支承地面的接触区产生法向和切向相互作用力,并使接触区的轮胎和地面发生相应的变形。这种变形取决于轮胎和地面的相对刚度。轮胎在硬路面上滚动时,轮胎变形是变形的主要成分;而当轮胎在松软地面滚动时,主要变形为地面的沉陷变形。轮胎在滚动过程中,轮胎的各个组成部分间摩擦以及橡胶元、帘线等分子之间的摩擦,产生摩擦热而耗散,这种损失称为弹性元件的迟滞损失。

图 1-2 为 9.00-20 轮胎在硬支撑路面上受径向载荷时的变形曲线。图中 OCA 为加载变形曲线, 面积 $OCABO$ 为加载过程中对轮胎做的功; ADE 为卸载曲线, 面积 $ADEBA$ 为卸载过程中轮胎恢复变形时放出的功。由图可知, 两曲线并不重合, 两面积之差 $OCADEO$ 即为加载与卸载过程中的能量损失。

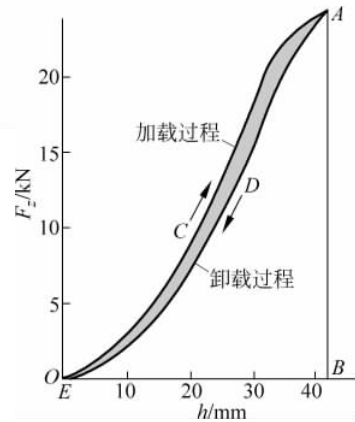


图 1-2 9.00-20 轮胎的径向变形曲线

进一步分析, 便可知这种迟滞损失表现为阻碍车轮滚动的一种阻力偶。当车轮不滚动时, 地面对车轮的法向反作用力的分布是前后对称的; 但当车轮滚动时, 在法线 $n-n'$ 前后相对应的点 d 和 d' (图 1-3(a)) 变形虽相同, 但由于弹性迟滞现象, 处于压缩过程的前部 d 点的地面法向反作用力就会大于处于恢复过程的后部 d' 点的地面法向反作用力, 这可以从图 1-3(b) 中看出。设取同一变形 δ , 压缩时的受力为 CF , 恢复时受力为 DF , 而 CF 大于 DF 。这样, 就是地面法向反作用力的分布前后并不对称, 而使它们的合力 F_z 相对于法线 $n-n'$ 向前移了一个距离 a (图 1-4(a)), 它随弹性迟滞损失的增大而增大。合力 F_z 与法向载荷 W 大小相等, 方向相反。

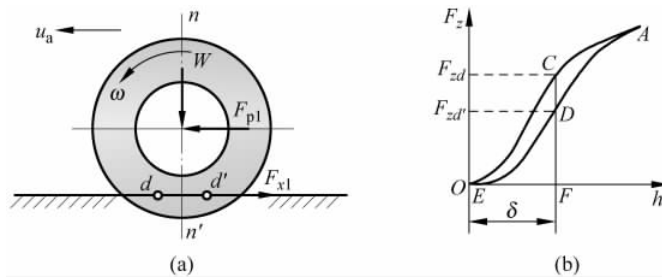


图 1-3 弹性车轮在硬路面上的滚动

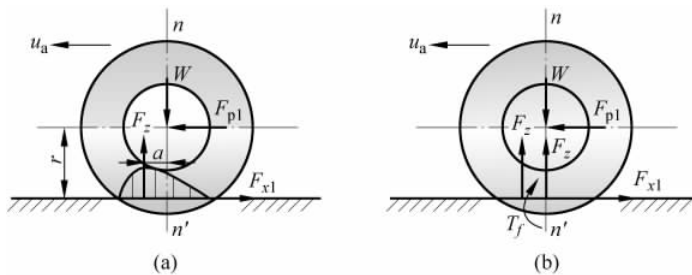


图 1-4 从动轮在硬路面上滚动时的受力情况

如果将法向反作用力 F_z 平移至与通过车轮中心的垂线重合, 则从动轮在硬路面上滚动时的受力情况可画成图 1-4(b) 所示的形式, 即滚动时有滚动阻力偶矩 $T_f = F_z a$ 阻碍车轮的滚动。

由图 1-4 可知, 欲使从动轮在硬路上等速滚动, 必须在车轮中心加一推力 F_{p1} , 它与地



面切向反作用力构成一力偶矩来克服上述滚动阻力偶矩。由平衡条件得

$$F_{p1}r = T_f$$

故

$$F_{p1} = \frac{T_f}{r} = F_z \frac{a}{r} \quad (1-1)$$

若令 $f = \frac{a}{r}$, 且考虑到 F_z 与 W 的大小相等, 常将 F_{p1} 写作

$$F_{p1} = Wf \quad \text{或} \quad f = \frac{F_{p1}}{W} \quad (1-2)$$

式中, f 称为滚动阻力系数。

滚动阻力系数是车轮在一定条件下滚动时所需之推力与车轮负荷之比, 即单位汽车重力所需的推力。也就是说, 滚动阻力等于汽车滚动阻力系数与车轮负荷的乘积, 即

$$F_f = Wf \quad (1-3)$$

且

$$F_f = \frac{T_f}{r} \quad (1-4)$$

这样, 在分析汽车行驶阻力时, 不必考虑车轮所受到的滚动阻力偶矩 T_f , 而只要知道滚动阻力系数就可求出滚动阻力 F_f 。注意: 滚动阻力 F_f 无法在受力图上表现出来, 只是为了便于计算分析, 而引进的一个在数值上等于轮缘地面切向反作用力 F_x 的值, 这将有利于动力学分析。

图 1-5 是驱动轮在刚性平直路面上等速行驶时的受力分析图。图中 F_{x2} 是车轮驱动力矩 T_t 对支承路面作用力在轮缘上的切向反作用力, W 为重力, F_{p2} 是车轴对轮胎中心的水平作用力。法向反作用力 F_z 也由于轮胎迟滞现象而使其作用点向前移了一个距离 a , 即在驱动轮上也作用有滚动阻力偶矩 T_f 。由平衡条件得

$$\begin{cases} F_{x2}r = T_t - T_f \\ F_{x2} = \frac{T_t}{r} - \frac{T_f}{r} = F_t - F_f \end{cases} \quad (1-5)$$

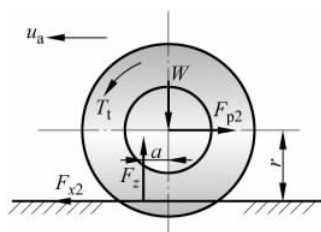


图 1-5 驱动轮在硬路面上滚动时的受力情况

滚动阻力的系数由试验确定。滚动阻力与路面的类型与路况、行驶车速以及轮胎的结构、材料、充气压力、磨损情况等有关。表 1-1 给出了汽车在不同路面上以中低速度前进时, 滚动阻力系数的大致数值。

表 1-1 不同道路条件下的滚动阻力系数

道路类型	滚动阻力系数	道路类型	滚动阻力系数
良好的沥青或混凝土路面	0.010~0.018	泥泞土路(雨季或解冻期)	0.100~0.250
一般的沥青或混凝土路面	0.018~0.020	干砂	0.100~0.300
碎石路面	0.020~0.025	湿砂	0.060~0.150
良好的卵石路面	0.025~0.030	结冰路面	0.015~0.030
坑洼的卵石路面	0.035~0.050	压紧的雪道	0.030~0.050
压紧土路(干燥)	0.025~0.035	压紧土路(雨后)	0.050~0.150

行驶速度对滚动阻力系数有很大影响。图 1-6(a)说明,这两种轿车轮胎在车速 100km/h 以下时,滚动阻力逐渐增加但变化不大;在某一车速(如 140km/h)以上时增长较快。车速达到某一临界车速(例如 200km/h)左右时,滚动阻力迅速增长,此时轮胎发生驻波现象,轮胎周缘不再是圆形而呈明显的波浪状。出现驻波后,不但滚动阻力逐渐增加,轮胎的温度也会很快上升到 100℃ 以上,胎面与轮胎帘布层脱落,几分钟内就会出现爆破现象,这对高速行驶的车辆是一件非常危险的事。

轮胎的结构、帘线和橡胶的品种,对滚动阻力都有影响。图 1-6(b)给出了几种不同轿车轮胎的滚动阻力系数随车速与充气压力而变化的曲线。可以看出,轮胎充气压力对 f 值影响很大。气压降低时 f 值迅速增加,这是因为气压降低时,滚动的轮胎变形大,迟滞损失增加。从图中还可以看出,子午线轮胎的滚动阻力系数较低。

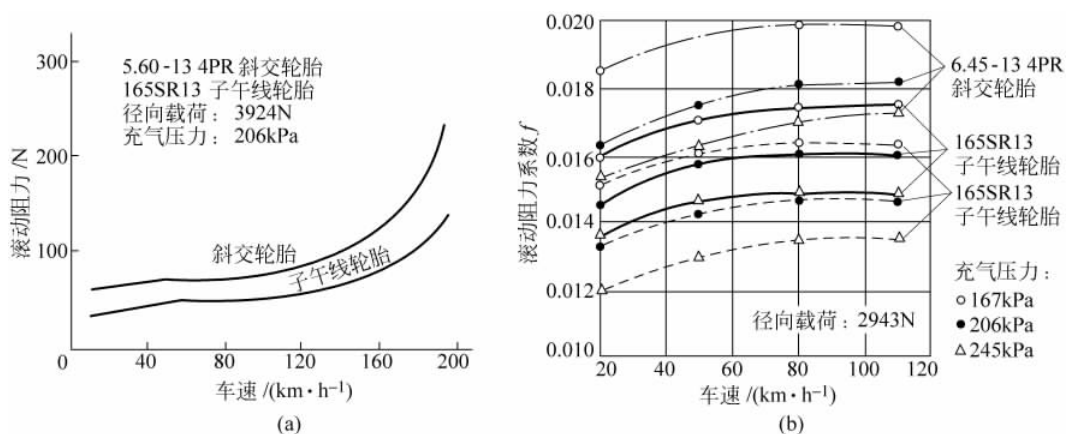


图 1-6 轿车轮胎滚动阻力及滚动阻力系数与车速及充气压力关系曲线
(a) 滚动阻力—车速; (b) 滚动阻力系数—充气压力

驱动状况下的轮胎,作用有驱动转矩,胎面相对于地面有一定程度的滑动,增加了轮胎滚动时的能量损耗。图 1-7 是由试验得到的滚动阻力系数(包含胎面滑动损失)与驱动力系数的关系曲线。驱动力系数为驱动力与径向载荷之比。可以看出,随着驱动力系数的增加,滚动阻力系数迅速增加;从图中还可以看出,子午线轮胎的滚动阻力系数较小,驱动力系数变化对它的影响也较小。

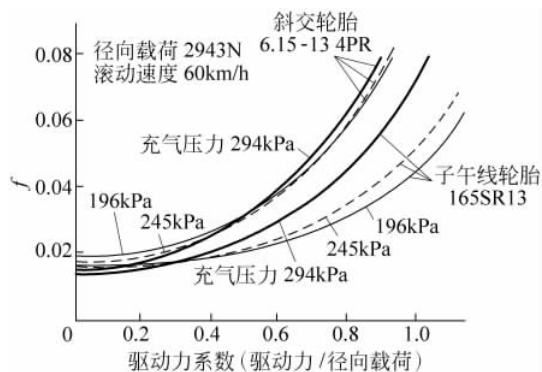


图 1-7 滚动阻力系数与驱动力系数的关系曲线

货车轮胎的滚动阻力系数与车速的关系接近于直线,滚动阻力系数的数值较小,车速对滚动阻力系数的影响也不大。

在进行动力性分析时,若无试验得到的准确滚动阻力系数值,可以利用经验公式大致估算。例如,有人推荐用下式计算良好道路上货车轮胎的滚动阻力系数:

$$f = 0.0076 + 0.00056u_a \quad (1-6)$$

图 1-8(a)给出了根据此式计算得到的滚动阻力系数,图上还有依据其他经验公式计算得到的滚动阻力系数值。

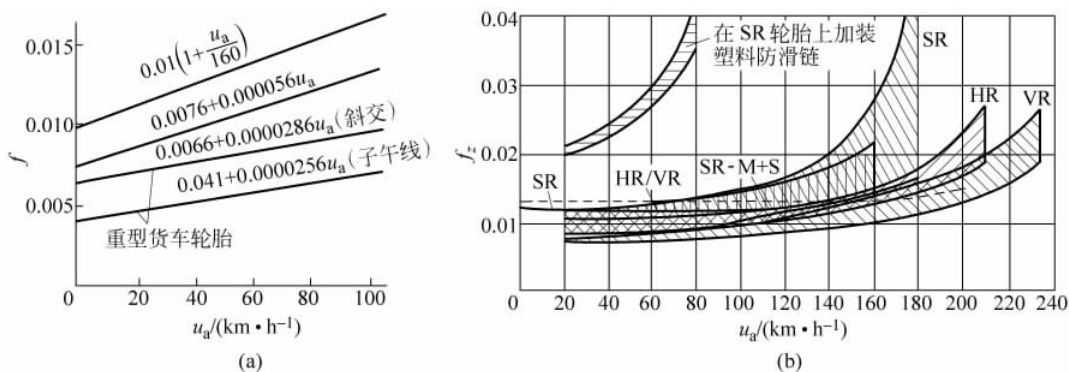


图 1-8 轮胎的滚动阻力系数

(a) 货车轮胎滚动阻力系数的估算公式; (b) 轿车轮胎在转鼓试验台上的滚动阻力系数 f_z

有人推荐用下面的公式估算轿车轮胎在良好路面上的滚动阻力系数:

$$f = f_0 + f_1 \left(\frac{u_a}{100} \right) + f_4 \left(\frac{u_a}{100} \right)^4 \quad (1-7)$$

德国布伦瑞克工业大学车辆研究所在直径 2m 的钢鼓试验台上进行了各种轮胎的滚动阻力系数测定工作,图 1-8(b)中是 SR 级(允许最高速度 180km/h)、HR 级与 VR 级(允许最高速度分别为 210km/h 与大于 210km/h)子午线轮胎滚动阻力系数与车速关系曲线的范围。图中还有 SR-M+S 级(用于泥浆和积雪覆盖路面)、装有塑料防滑链的 SR 级轮胎的滚动阻力系数曲线的范围。

轮胎在实际道路上的滚动阻力系数 f 大于在转鼓上的滚动阻力系数。若令 $f = cf_z$,则在良好的沥青路面上 $c=1.2$,在粗糙的水泥路面上 $c=1.3 \sim 1.4$ 。

在转弯行驶时,轮胎发生侧偏现象,滚动阻力大幅度增加。图 1-9 画出了总质量 34.5t 的半挂车绕半径为 33m 的圆周行驶时,滚动阻力的增长情况。试验表明,这种由于转弯行驶增加的滚动阻力已接近直线行驶时的 50%~100%。但在一般的动力性分析中,常不考虑由于转弯增加的阻力。

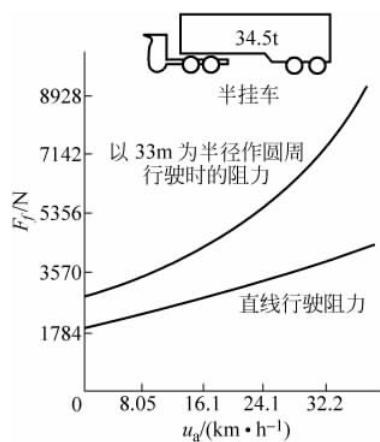


图 1-9 转弯时的滚动阻力与车速的关系

1.2.2 穿水阻力

前面主要分析的是干路面上汽车直线行驶时的滚动阻力,而在湿路面上汽车直线行驶时滚动阻力将发生变化。图 1-10 为在湿路面上轮胎的滚动状态。

在湿路面上,即路面有一定的积水层的情况。当汽车在有积水层的路面上行驶时,必须排挤水层,因此滚动阻力将增加,存在附加的穿水阻力 F_w 。同时,由于路面的积水,汽车行驶时会比较危险的滑水现象。穿水阻力是汽车行驶阻力的一个有效的补充,一般认为存在如下的关系:

$$F_w = Cbu^n \quad (1-8)$$

式中, C 为比例常数; b 为轮胎宽度; u 为汽车的行驶车速; n 为幂指数,当水层厚度大于 0.5mm 时,幂指数近似等于 1.6。

单位轮胎宽度的穿水阻力与行驶车速的关系如图 1-11 所示。随着水层厚度的增加,所需克服的穿水阻力也越大。

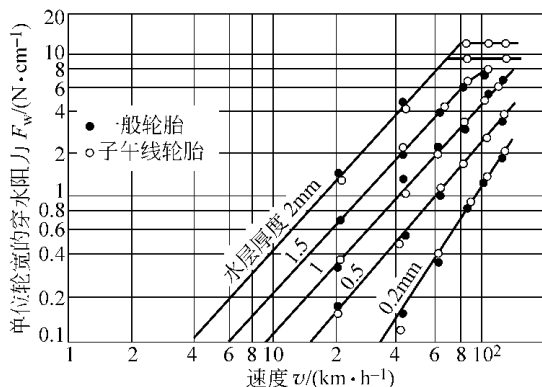


图 1-11 单位轮胎宽度的穿水阻力与行驶车速的关系

1.2.3 前束阻力

在进行汽车设计时,为了保证车辆直线行驶的稳定性 and 操纵的轻便性,一般前轮(转向轮)都要有一定的定位角。为了保证汽车稳定地直线行驶,应使转向轮具有自动回正作用,即当转向轮在偶然遇到外力作用(如碰到石头)发生偏转时,在外力消失后能立即自动回到直线行驶的位置。这种回正作用是由转向轮的定位参数来实现的。前轮前束就是这些定位参数

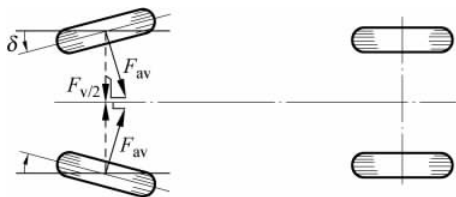


图 1-12 汽车的前束阻力

中的一种。前轮前束的作用是抵消汽车在行驶过程中,两前轮遇到冲击后产生的向外张开的趋势。

前束阻力就是因为车轮的前束角造成的。因为车轮与行驶方向存在一定的偏角致使车轮产生附加的侧向力 F_{av} ,如图 1-12 所示。侧向力的大小可近似表示为

$$F_{av} = K_c \delta \quad (1-9)$$

故前束阻力为

$$F_v = 2F_{av} \sin \delta = 2K_c \delta^2 \quad (1-10)$$

1.3 轮胎的侧向力学特性

1.3.1 轮胎的侧偏特性

1. 轮胎的侧偏现象

汽车在行驶过程中,由于路面的侧向倾斜、侧向风或曲线行驶时的离心力等的作用,车轮中心沿 y 轴方向将作用有侧向力 F_y ,相应地在地球上产生地面侧向反作用力 F_Y , F_Y 也称为侧偏力。当有地面侧向反作用力时,若车轮是刚性的,则可以发生两种情况:

当地面侧向反作用力 F_Y 未超过车轮与地面间的附着极限时,车轮与地面间没有滑动,车轮仍在其自身平面 cc 内运动,如图 1-13(a) 所示。当地面侧向反作用力 F_Y 达到车轮与地面间的附着极限时,车轮发生侧向滑动,若滑动速度为 Δu ,车轮便沿合成速度 u' 的方向行驶,偏离了 cc 平面,如图 1-13(b) 所示。

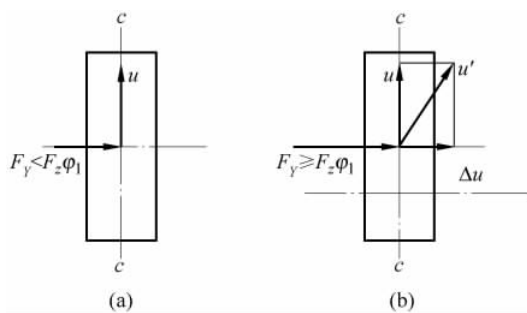


图 1-13 有侧向力作用时刚性车轮的滚动

(a) 没有侧向滑移; (b) 有侧向滑移

当车轮有侧向弹性时,即使 F_Y 没有达到附着极限,车轮行驶方向亦将偏离车轮平面 cc ,这就是轮胎的侧偏现象。为了说明侧偏现象,我们讨论具有侧向弹性的车轮在垂直载荷为 W 的条件下,车轮中心受到侧向力 F_y ,地面相应的有侧偏力 F_Y 时的两种情况。一是车轮静止不滚动。由于车轮有侧向弹性,轮胎发生侧向变形,轮胎胎面接地印迹的中心线 aa 与车轮平面 cc 不重合,错开 Δh ,但 aa 仍平行于 cc ,如图 1-14(a) 所示。二是车轮滚动。接触印迹的中心线 aa 不只是和车轮平面错开一定距离,而且不再与车轮平面 cc 平行, aa 与 cc 的夹角 α ,即为侧偏角。此时,车轮就是沿着 aa 方向滚动的,如图 1-14(b) 所示。

为了说清楚出现侧偏角 α 的原因,下面具体分析车轮的滚动过程,如图 1-14(b) 所示。在轮胎胎面中心线上标出 A_1, A_2, A_3, \dots 各点,随着车轮向前滚动,各点将依次落于地面上相应的 A'_1, A'_2, A'_3, \dots 各点上。在主视图上可以看出,靠近地面的胎面上, A_1, A_2, A_3, \dots 各点连线在接近地面时逐渐变为一条斜线,因此它们落在地面相应各点 A'_1, A'_2, A'_3, \dots 的连线并不垂直于车轮旋转轴线,即与车轮平面 cc 有夹角 α 。当轮胎与地面没有侧向滑动时, A'_1, A'_2, A'_3, \dots 的连线就是接地印迹的中心线,当然也是车轮滚动时在地面上留下的痕迹,即车

轮并没有在车轮平面 cc 内向前滚动,而是沿着侧偏角 α 的方向滚动。显然,侧偏角 α 的数值是与侧向力 F_y 的大小有关的;换言之,侧偏角 α 的数值与侧偏力 F_y 的大小有关。

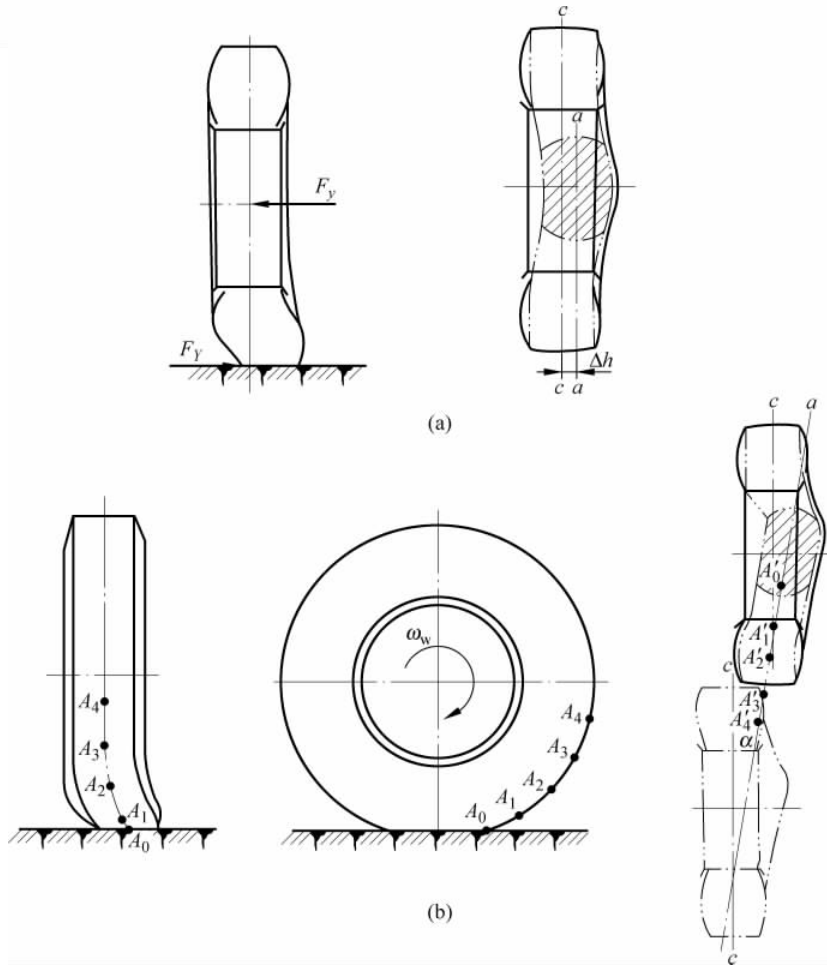


图 1-14 轮胎的侧偏现象
(a) 车轮静止; (b) 车轮滚动

图 1-15 给出了一条由试验测出的侧偏力-侧偏角曲线。曲线表明,侧偏角不超过 5° 时, F_y 与 α 呈线性关系。汽车正常行驶时,侧向加速度不超过 $0.4g$,侧偏角不超过 $4^\circ \sim 5^\circ$,可以认为侧偏角与侧偏力呈线性关系。 F_y - α 曲线在 $\alpha=0^\circ$ 处的斜率称为侧偏刚度 k ,单位为 N/rad 或 $N/(\circ)$ 。由轮胎坐标系有关符号规定可知,负的侧偏力产生正的侧偏角,因此侧偏刚度为负值。 F_y 与 α 的关系式可写作

$$F_y = k\alpha \quad (1-11)$$

小型轿车轮胎的 k 值在 $-28000 \sim -80000 \text{N}/\text{rad}$ 范围内。侧偏刚度是决定操纵稳定性的重要轮胎参数。

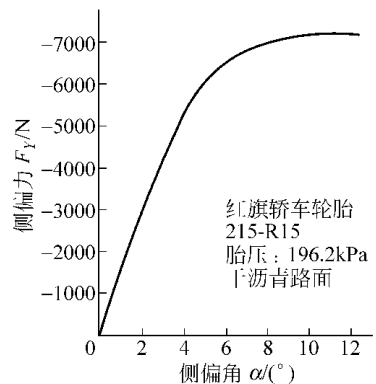


图 1-15 轮胎的侧偏特性

轮胎应有高的侧偏刚度(指绝对值),以保证汽车良好的操纵稳定性。

在较大的侧偏力时,侧偏角以较大的速率增长,即 $F_Y-\alpha$ 曲线的斜率逐渐减小,这时轮胎在接地面处已发生部分侧滑。最后,侧偏力达到附着极限时,整个轮胎侧滑。

显然,轮胎的最大侧偏力决定于附着条件,即垂直载荷,轮胎胎面花纹、材料、结构、充气压力,路面的材料、结构、潮湿程度以及车轮的外倾角等。一般而言,最大侧偏力越大,汽车的极限性能越好,譬如按圆周行驶的极限侧向加速度就越高。

2. 轮胎的结构、工作条件对侧偏特性的影响

轮胎的尺寸、形式和结构参数对侧偏刚度有显著影响。尺寸较大的轮胎有较高的侧偏刚度。子午线轮胎接地面宽,一般侧偏刚度较高。钢丝子午线轮胎比尼龙子午线轮胎的侧偏刚度还要高些。以百分数表示的轮胎断面高 H 与轮胎断面宽 B 之比 $H/B \times 100\%$ 称为高宽比。早期轮胎的高宽比为 100% ,现代轮胎的高宽比逐渐减小,目前不少轿车已采用高宽比为 60% 或称 60 系列的宽轮胎。追求高性能的运动型轿车也有采用高宽比为 50% 甚至 40% 宽轮胎的。高宽比对轮胎侧偏刚度影响很大,采用高宽比小的宽轮胎是提高侧偏刚度的主要措施。图 1-16 给出了四种轮胎的侧偏刚度与载荷的关系曲线,可以看出高宽比为 60% 的 60 系列轮胎的侧偏刚度有大幅度提高。

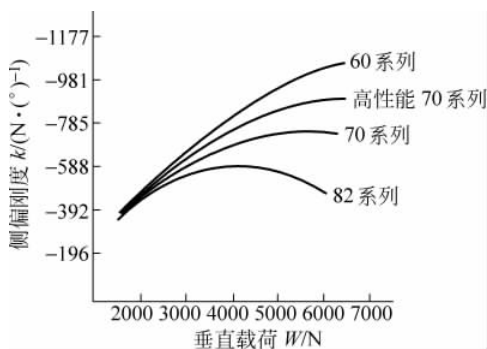


图 1-16 几种不同宽度比子午线轮胎的侧偏刚度与载荷的关系曲线

汽车行驶时,轮胎的垂直载荷常有变化。例如转向时,内侧车轮轮胎的垂直载荷减小,外侧车轮轮胎的垂直载荷增大。垂直载荷的变化对轮胎侧偏特性有显著影响。图 1-17 表明垂直载荷增大后,侧偏刚度随垂直载荷的增加而加大;但垂直载荷过大时,轮胎与地面接触区的压力变得极不均匀,使轮胎侧偏刚度反而有所减小。

轮胎的充气压力对侧偏刚度也有显著影响。由图 1-18 可知,随着气压的增加,侧偏刚度增大;但气压过高后刚度不再变化。

行驶车速对侧偏刚度的影响很小。

上面讨论的是没有切向反作用力作用时轮胎的侧偏特性。实际上,在轮胎上常同时作用有侧向力与切向力。由试验得到的曲线(图 1-19)表明,一定侧偏角下,驱动力增加时,侧偏力逐渐有所减小,这是由于轮胎侧向弹性有所改变的缘故。当驱动力相当大时,侧偏力显著下降,因为此时接近附着极限,切向力已耗去大部分附着力,而侧向能利用的附着力很少。作用有制动力时,侧偏力也有相似的变化。由图还可看出,这组曲线的包络线接近于一椭圆,一般称为附着椭圆。它确定了在一定附着条件下切向力与侧偏力合力的极限值。