

轮胎摩擦力简介

volcanostar

0 引言

高中时代，我们都学过经典摩擦学定理，这另许多 F1 车迷感到困惑，明明摩擦力只与两物体接触表面的摩擦系数和物体所受的正压力相关，为什么 F1 赛车从使用坑纹胎改为使用光头胎后，赛车的整体抓地力水平增加了呢？没错，这的确是个好问题，整个赛车界以及轮胎开发商都不断致力于对橡胶摩擦特性的研究，又由于赛车界竞争如此激烈，这些研究结果往往都作为机密并不会公开发表。那么，作为一个赛车运动业余得不能再业余的爱好者，我们共同探讨一下光头胎能够提高赛车抓地力的原理。

注：需要理论证明的位置，我均标上了参考文献出处。

1 库仑摩擦

早在 17 世纪，法国物理学家阿蒙顿（Guillaume Amontons）就提出了摩擦基本定律：摩擦力与所加载荷成正比，与接触面积 A 无关，其实这也是我们所熟知的库仑（Coulomb）摩擦定律。库仑摩擦理论用于研究刚性材料之间的干摩擦特性，：

(1) 若物体静止，则摩擦力（ F_s ）由静平衡条件确定，它与最大静摩

擦力（ $F_{s\max}$ ）的关系是： $0 \leq F_s \leq F_{s\max}$ ；

(2) 在临界情况下，动摩擦力（ F_k ） $= f_k N$ ，其中 f_k 为动摩擦因数。

动摩擦因数和静摩擦因数与作用在物体上的载荷、两物体间的接触面积以及相对滑动速度无关，且 $f_k < f_s$ 。到目前为止，与我们高中学习的摩擦学完全相同，是我们所熟悉掌握的，那么我们来看看橡胶的摩擦力。

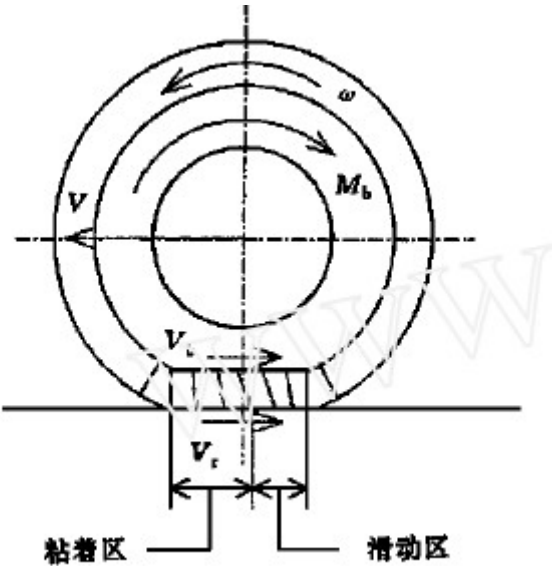
2 橡胶摩擦力概述

橡胶是弹性材料，不遵守传统的库仑摩擦理论^[1]。与大多数固体的摩擦特性相比，橡胶的摩擦特性有点特殊，因为橡胶是弹性模量较低的粘性可变形结构，在较宽的频率范围内均具有很高的内摩擦，这使得摩擦力大小不仅与真实接触面积 A 有关，而且还呈非线性关系（但通常都用线性的简化模型研究）。仅仅看看参考文献中国外 1981 年的研究，就已经知道轮胎的性能表现完全与库仑摩擦理

论无关，所以不用再纠结于高中的摩擦理论，那么接下来我就同大家一起分析一下轮胎摩擦力问题。

3 轮胎摩擦力简化模型分析

橡胶露台与路面之间产生的摩擦大致可分为粘附摩擦和滞后摩擦^[2]。滞后摩擦通常表现为：随着轮胎前端不断压入地面产生变形，能量将以热的形式损耗，有一定的滞后时间，研究此区域时，主要表现为滑动摩擦。另外，也有国外文献将轮胎与路面间的摩擦机理分为四个方面^[3]：轮胎与路面间的分子引力作用；轮胎与路面间的粘附作用；胎面橡胶的弹性变形；路面上小尺寸微突体的微切削作用。下面以轮胎制动时的模型为例，简单介绍一下轮胎的粘附摩擦和滞后摩擦。



上图为轮胎制动时的简图，由于车手在刹车时，只有在极端状态下才会将轮胎完全锁死（滑动摩擦），其他状况下车手在入弯过程中，轮胎制动均表现为滑转摩擦。在弹性滑转时，地面纵向反力为粘附区的静摩擦力和滑动区的摩擦力之和。假设忽略掉赛车在制动时的重量转移因素，那么轮胎所受的垂直方向反力就是赛车的自身重量。对于滑动区来说，在不同滑动速度时，轮胎橡胶的摩擦因数并不是常量，而是随赛车的滑动速度变化。但更关键的是粘附区（附送：国外科学家研究，赛车过弯时受到的横向载荷大部分都由粘付区承受，滑动区很少承受赛车的横向载荷，此研究对车手过弯提高操控技巧并保护轮胎有决定性意义），发生在粘附区内的轮胎前后方向的力（现在就讨论标量，不管方向了，不然太复杂了）

$F_x = \frac{C_x s W l_h^2}{6}$ ，式中， W 表示轮胎接地宽， l_h 表示起始点处的周向位移。至

此轮胎与地面接触区域的长度和宽度都已经出现，那么找到了关于轮胎摩擦力与接地面积相关的理论支持。（请不要纠结于 F_x 到底是增函数还是减函数，因为上文已经提到，如果真正研究此模型，那么一切关系都是非线性的，这里只是简化到底层的定性说明，国外已经有定论当其他条件不变时，轮胎与地面接触面积增加，摩擦力增大）

上述为为理想状态下赛车制动时的轮胎模型，其实当赛车加速轮胎承受牵引力时的模型也可以根据此为基础进行拓展讨论，但还是逃不过研究轮胎所有的摩擦力、剪应力和横向载荷。

4 光头胎与坑纹胎

上面一节已经谈到，轮胎接地宽度 W 和接地长度都会影响轮胎所受的摩擦力大小。这也是为什么如果您接触任何一本轮胎教材，首先接触到的名词就是轮胎与地面的接触面积（contact patch, print, footprint, tread pattern 等等）以及轮胎与地面接触长度（pneumatic trail and mechanical trail）引起的力矩。

光头胎比坑纹胎抓地力大，除了接地面积大之外，还有其他一些因素。由于光头胎没有表面坑纹，那么在承受相同的垂直载荷时，光头胎的变形量要小于坑纹胎。这允许光头胎采用质地更软的材料进行制造。此类较软的橡胶会带来更大的地面粘附力，但带来的相应问题是胎面耐磨度降低。

还有朋友提出轮胎倾角问题，没错民用车和许多赛车都有倾角设置，但是F1 赛车在技术设计上，轮胎安装的内倾角是非常小的。为轮胎设计内倾角，主要目的还是增加赛车在过弯时轮胎与地面的接触面积，从而增大外侧轮胎的抓地力。由于 F1 赛车资料非常非常难以获得，下面给出某低级别方程式赛车的倾角垫片和角度改变数据。

前轮垫片厚度（mm）	前轮倾角变化（度）
+1.0	+0.25
+2.0	+0.5
后轮垫片厚度（mm）	后轮倾角变化（度）
+0.5	+0.14
+1.0	+0.30
+2.0	+0.56

另外这里只是最最简化的模型，而且忽略掉赛车的动态重量转移，对于轮胎抓地力影响的许多其他参数，比如 slip angle, lateral force, various torques, rolling resistance, various moments, load sensitivity, sidewall stiffness, sheer stress 等等，均没有涉及和讲解，请见谅！如果这要是能讲全，那我也不用再为毕业而苦苦挣扎了，呵呵。附：赛道上的侧风或风向改变为什么对 F1 赛车影响很大？主要就在于研究 lateral force 对轮胎性能的影响。

最后，关于轮胎的详细研究，就连西方的大牛学界也没有能够完全研究透彻，最后送上外国原著教材的引用：

The Print and Tire “Grip”

The area of the tread of a tire that is contact with the ground at any given moment is called the print. The rubber elements in the print are either “stuck” to the road or are sliding across the road.

- The rubber is stuck to the road by a variety of mechanisms including mechanical “gearing” to the texture of the pavement and molecular adhesion to the surface. [These mechanisms are not totally understood.](#)
- When the local coefficient of friction is reached, part of the rubber in the print slides across the road. The force generated depends on the sliding velocity, the local load, rubber and surface characteristics and tread pattern, etc. [The sliding process is not fully understood either.](#)

Though the sticking and sliding mechanisms are not fully known yet, luckily not necessary, the acceleration performance of the vehicle at any given instant is limited by the tire print comprehensive forces.

参考文献

1. Sakai H. Theoretical and experimental studies on the dynamics properties of tyre. Part 2: Experimental investigation of rubber friction and deformation of a tyre.[J]. International Journal of Vehicle Design, 1981, 2(2): 182-247.
2. Hans B. Pacejka. Tyre and Vehicle Dynamics. Delft University of Technology, Consultant TNO Automotive Delft: 3-8.
3. Veith A G A Review of Important Factors Affecting Treadwear. Rubber Chemistry and Technology, 1992, 65(3): 601-648.