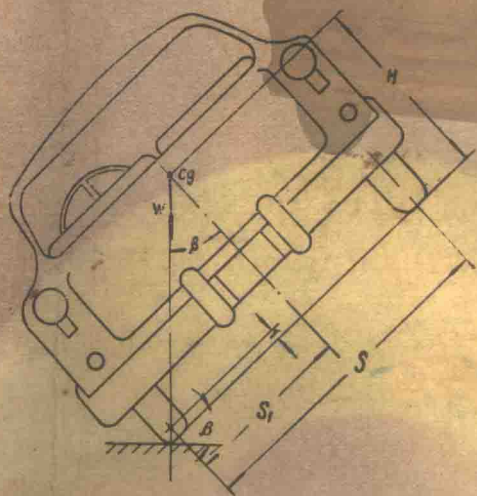




塔布萊克著

汽车力学



机械工业出版社

汽 車 力 学

塔 布 萊 克 著

張 羨 曾 譯



机 械 工 业 出 版 社

1 9 5 9

NO. 2530

1959年3月第一版 1959年3月第一版第一次印刷

850×1168 $1/32$ 字数129千字 印張5 $1/16$ 0,001—5,550册

机械工业出版社(北京阜成門外百万庄)出版

机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

北京市書刊出版业营业許可証出字第008号 定价(11)0.57元

目 次

序言	4
一 車輪的運動和它的力學	5
二 輪胎的轉向及方向性的控制	15
三 汽車轉向的作用力和穩定性	25
四 汽車曲綫行駛時的穩定性	40
五 運動的各項阻力	49
六 汽車的阻力	58
七 汽車的重心	71
八 縱向穩定性	79
九 汽車性能的極限	91
十 汽車性能的極限 (續)	101
十一 制動的動力學	108
十二 制動性能的極限	118
十三 發動機的特性	133
十四 汽車性能的預計	142

序 言

本論文集內收集了十四篇有关汽車力学的文章，作者有系統地闡明了汽車的基本力学，以及操縱方面的有关力学，最后談到汽車性能的極限条件、發动机的选择、汽車性能的預算方法等。这本小冊子給汽車工作者、汽車設計師們一个清楚的概念，对汽車可以有更明确的認識和了解。

目前祖国正处在大跃进时代，汽車工业正在一日千里的向前迈进，汽車工作者对汽車的一些根本問題能全面而有系統的了解将是必要的。汽車設計并不神秘，只要我們能够脚踏实地的工作，再配合一些理論學習，是不难很快地掌握这門學問的。

为了这个目的，特将这些論文譯出，以給汽車工作者参考。

本書根据J. J. Taborek, "Mechanics of vehicles" Machine Design, may 30, 1957—Dec. 1957譯出。

譯 者

1958年4月

一 車輪的運動和它的力學

古老運輸車輛的牽引力，例如牛車，都是從外界施加的。對這些拖曳式車輛來說，車輪的基本作用不外：作為車身結構的著地支座，以阻力大為減小的滾動代替摩擦很大的滑動。

但在本身推動的車輛中，對滾動的車輪則要求有某些附加的特性：要求把車輛本身所產生的扭矩轉化為推動車輛的推力，並對側向力具有高的摩擦阻力。後者可以保證車輛結構中轉向操縱的有效工作。本文先討論剛性車輪的有關運動學及力學，然後從這個簡單的例子中再引伸到較為複雜的彈性車輪或橡膠輪胎。

剛性車輪

車輪的主要作用雖然是減輕摩擦，但滾動的所以能夠產生則又依靠高值靜摩擦的存在，這是一個矛盾問題。車輪的運動經常地以兩種形式出現：

1. 像其他任何被推動的或拉動的物體一樣產生滑動。

2. 滾動 它的定義是：一個圓柱體的連續運動，其中車輪和地面的瞬時接觸點與地面無相對運動。在滾動中車輪中心的移動速度等於車輪外圓的圓周速度或切綫速度。

問題是在什麼物理條件下兩種形式的運動才產生呢？車輪的滾動最主要的是依靠靜摩擦力的存在，它作用在地面與車輪的接觸點上以阻止車輪的滑移。如這個摩擦力過小而而

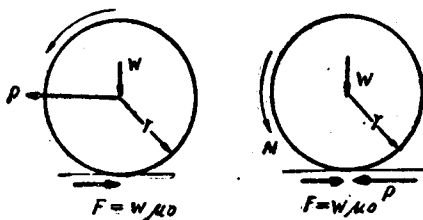


圖 1 一個滾動輪上的牽引力可能是一個外在的拖力（見左圖）或由於內在扭矩所形成的（如右圖）。只要牽引力小於靜摩擦阻力，滾動即可繼續存在。

能平衡牽引力時車輪的滾動將不能保持而開始滑移。

本章公式中所用的符號：

B = 制動力 (磅);	R_f = 滾動阻力 (磅);
E = 能量 (呎磅);	r = 滾動半徑 (呎);
F = 摩擦力 (磅);	S = 車輪滑移係數 (%);
f = 滾動阻力係數;	V = 速度 (呎/秒);
f_0 = 滾動摩擦係數 (吋);	W = 重量 (磅);
g = 重力加速度 (呎/秒 ²);	μ = 摩擦係數;
M = 扭矩或力矩 (呎磅);	μ_0 = 靜摩擦係數;
m = 質量 (磅秒 ² /呎);	μ_s = 滑動摩擦係數;
P = 推動力或牽引力 (磅);	ω = 角速度 (弧度/秒)。

靜摩擦 根據摩擦定律，可以用算式來說明滾動過程並計算滾動過程的極限條件，它的關係公式是

$$F = W\mu \quad (1)$$

摩擦係數有兩種形式：靜摩擦係數 μ_0 和滑動摩擦係數 μ_s 。從圖 1 中力的平衡和公式 (1) 來看，滾動的条件是

$$P_{\max} \leq W\mu_0. \quad (2)$$

如公式 (2) 所示，當牽引力 P 小於靜摩擦力時，車輪的滾動即能存在。

滾動和滑移的主要區別在於車輪對地面摩擦力有效利用的形式。靜摩擦係數較滑動摩擦係數有較高的數值，因此一個滾動的车輪比一個滑動的车輪允許傳遞較大的力。這在制動時是特別重要的。滾動的车輪並能保持它的運行方向，而在車輪滑動時將不能保持方向的穩定性。

推動力可以有兩種形式：

1. “外力，推力或拉力，作用在車輪的中心上。
2. 內力，由車輛本身所產生的，並以扭矩的形式傳到驅動輪上。這樣在地面上所產生的摩擦作用力是實際的驅動力。

在流動中，力作用在車輪的中心或圓周上都無關重要。但是，

一个自动車輛的內在牽引力直接受到地面摩擦的限制，超过这个限度的扭矩对推动力來說将变为毫无作用。很明显，車輛动力性能的最大極限受着車輪与地面所产生的摩擦力的大小而决定。

公式 (2) 可以写成另外一个形式，以便得出車輪傳到地面上的最大內扭矩：

$$M_{\max} = rW\mu。 \quad (3)$$

滚动阻力 对滑动來說，摩擦力 $W\mu$ ，是被牽引所克服的阻止运动的力。靜摩擦力对一个滑动的車輪來說仅仅是一个極限力的数值，它在实际的滑动运动中并不参予作用。抗拒一个車輪进行滚动的阻力叫做滚动阻力。

一个重量为 W 的車輪被一个牽引力 P 在它的軸心处推动的情况如图 2 所示。为了按照一般的方法推演滚动阻力的产生，假定車輪是剛性的，它对地面形成变形。作用在地面接触面积压力中心的是力 N 。这个力 N 可以分解为垂直分力，和車輪重力 W 互相平衡，另外一个水平分力 R_r ，代表滚动阻力。假設地面的变形高度与車輪的滚动半径 r 来比較可以略去不計，則对于地面反作用力的作用点上的力平衡

公式是

$$P = R_r = \frac{Wf_0}{r} \quad (4)$$

运动方向

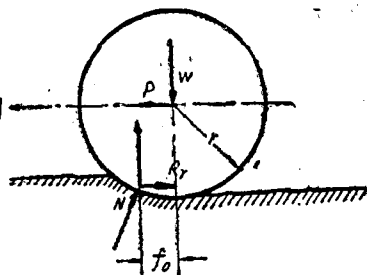


圖 2 剛性車輪在松软地面上的滚动情况。
滚动摩擦阻力系数 f_0 用長度單位来代表。

在这个公式中的比例系数 f_0 是滚动摩擦系数。它的数值由互相接触的材料性質而定。这个系数的單位用長度来代表，它的物理含义有如力臂，代表地面

反作用力的作用点与通过車輪垂直中心綫間的水平距离 (圖 2)。对 f_0 的精确测量是很困难的，一般被公認的数据很少。

彈性車輪

彈性車輪，例如橡胶輪胎，將不能准确地按照為剛性車輪所推出的摩擦和滾動規律而進行工作。其中主要的區別在於地面接觸部分的型式。在剛性車輪中，地面接觸部分在理論上是一條綫；在橡胶車輪上則變為一個相當大的面積（見圖3）。

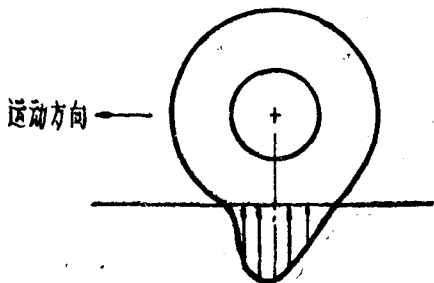


圖3 彈性車輪（橡胶胎）在硬地面上的滾動情況。在輪胎與地面的印痕中，壓力的分布是不平衡的。輪胎圓周的收縮帶來了輪胎滑移的作用。

滾動阻力 由於橡胶車輪有彈性，故在確定它的滾動阻力時不能採取用

於剛性車輪的同樣方法。對彈性輪胎來說，公式(4)可以寫成

$$R_r = Wf, \quad (5)$$

其中滾動阻力僅是徑向重量 W 和滾動阻力系數的函數。這個系數是一個無因次的因素，它本身是滾動半徑以及輪胎、地面的材料和彈性的複雜的函數。

輪胎的滑移 試驗證明，一個彈性輪胎的靜摩擦不是在理論上所需的純粹滾動狀態下達到最高值，而是在部分滑動時才達到最高值。我們引用滑移率的符號 S 來代表滑移與滾動的百分比：

$$S = \left(\frac{v - r\omega}{v} \right) \times 100, \quad (6)$$

式中 v 是車輪的移動速度， $r\omega$ 是車輪的圓周速度。

滑移可能以兩種形式出現：1）當車輪鎖止不轉動而在地面上被拖移時（如制動時），這時車輪的移動速度大於旋轉速度（ $v > r\omega$ ）；2）當車輪轉動但向前移動的進度不能得到相應的數值（如在滑路上加速）時，這時 $r\omega > v$ 。

滾動半徑 r 通常按照輪胎在名義靜載荷下的負荷半徑計算。

这个略值对計算車輛的性能來說已足够精确。但实际的滚动半径比这个数值要大些，这是由于离心力的关系，特别是高速低压輪胎将更为显著。

輪胎的变形 在观察一个橡胶輪胎在硬地面上的滚动状态时，一定可以看出輪胎表面有收缩现象发生。因为接触面积的投影弦长很明显地较輪胎充气状态下的弧长短些，見圖3。輪胎与地面接触面积上的压力分布中心移向滚动方向，而在接触面积的后面形成一个显著的輪胎微粒压缩的胎面拱起。輪胎表面上的收缩部分当越过接触面积以后由于它的弹力作用而又膨胀。这个膨胀实际上就是一种滑移运动，它的结果减低了車輪对滚动速度所应有的移动速度，这个现象也可以称作輪胎变形的滑移。因此通过一个輪胎所傳遞的任何大小的扭矩，均将形成某种程度的滑移，相反也是一样。这和刚性車輪是相反的，在刚性車輪中当滑移为零时，静摩擦达到最高值，但在一个空气輪胎上能够傳遞的最大的力是发生在10~20%滑移率时。根据一些实际的结果，20%的輪胎变形滑移是一个极限数值，因为在这个点上摩擦系数 μ_s 达到最大值。滑移再向上增加将形成一种不稳定状态， μ 的数值将迅速下降到纯滑移摩擦系数 μ_s 。为了着重说明弹性輪胎的特性，橡胶輪胎的摩擦系数已经更为确切地称为道路附着系数。

合成的摩擦力 作用在一个橡胶輪胎上摩擦力的力学可以用一例子来说明。圖4的右边是一个輪胎的顶视图，它在纵向（滚动方向）受到制动力 B ，同时受到垂直于滚动方向的横向力 S 。这种情况当車輛在弯路上行駛而制动时是可能发生的。摩擦力的极限值与现有的摩擦系数 μ 的数值成比例，它们用各个圆圈来代表，以表示輪胎对摩擦力的方向并无选择。

制动力 B 和横向力 S 形成合力 R ，只要是合力 R 位于圆周 μ_s 以内，滚动将继续存在。当 B 或 S 增加到使合力 R 超出 μ_s 圆以外时，摩擦系数将急速下降到 μ_s 的数值，輪胎即开始滑动。这时横向力 S 即不能再保持而完全消失； B 的方向也将丧失了它原来

的滚动方向，仅能与瞬间的运动方向相反。

这些分析对车轮的制动是特别重要的。为使车轮锁止不转

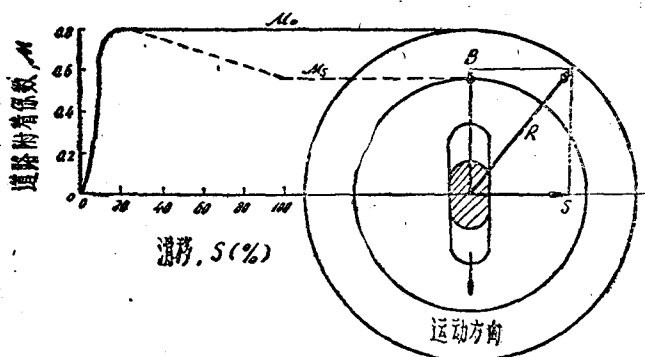


图4 道路附着系数与轮胎滑移的函数关系。最大的直座标值——静摩擦系数 μ_0 ——出现在轮胎滑移为10~20%时。超过这个数值即形成不稳定状态，轮胎的运动迅速地变成纯滑动，摩擦系数降为 μ_s 。作用在接触面积处的力示出制动力 B 和横向力 S 的合力 R 。两个圆代表滚动和滑动时轮胎所受的力，它们与直径 μ_0 和 μ_s 成比例。如欲滚动继续存在，合力 R 必不能超出 μ_0 。

动，则只能利用摩擦系数的较低数值 μ_s ，并完全失去了用滚动阻力作为制动力的可能。更进一步来看，也是更为重要的，是锁止不转的轮胎失去了承受横向推力的能力而变成方向的不稳定。

制动的稳定性 横向推力可能由以下原因造成：离心力，道路横向的倾斜，车辆中重量分配得不对称，或制动力的分配不均衡。例如一个具有四轮制动的汽车，当其中一个轴上的两个车轮变为锁止不转时（见图5），这两个车轮即失去吸收横向推力的能力，所有反作用力被其余的车轮承受。这个作用将形成以下两种情况不同的稳定状态：

1. 如后轮锁住（见图5a），则运动中汽车的惯性力 mb 对前桥车轮形成一个推力。任何不对称的重量分配即对前桥中心造成一个本身逐渐增长的转动力矩，汽车发生无法稳定的状态。因此后轮锁住的情况必须设法选择适当的制动力分配而加以避免。

2. 如前輪鎖住 (見圖 5 b), 則對后橋中心產生一個轉動力矩。由於慣性力成為一個拉力, 故這種現象是一個本身穩定的作用。

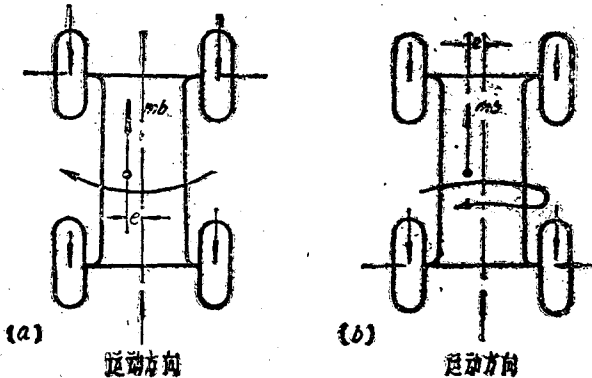


圖 5 四輪制動汽車的方向性穩定情況。在 (a) 中后輪鎖住, 后橋上的橫向力反作用消失。汽車的慣性力成為一個推力, 任何重量上的不對稱 (力臂 e) 即造成一個本身增長的轉動力矩, 或滑移力矩。在 (b) 中前輪鎖住, 慣性力成為一個拉力, 有本身穩定作用。

道路的附着係數 道路附着係數的精確測量非常困難, 由於許多因素的變化很大, 同時很難控制和明確解釋, 只能給出一般的數值如表 1。但對有關的物理現象和過程加以理論分析將對汽車牽引問題得到更好的了解。

下面是影響道路附着係數的主要因素:

路面材料 柏油、水泥和石子鋪面的道路一般是公路汽車所行駛的路面, 它們在乾燥時的附着係數 μ 都很接近。不在公路上行駛的汽車, 可能碰到的路面情況變化很大, 從土路到各種堅實程度不同的泥濘和冰雪, 它們的組成結構無法確定, 因此附着係數 μ 的測定只能得出一個粗略的平均值。

路面的條件 路面的潤滑情況一般由下雨造成, 這是需要考慮的主要因素。潮濕公路上的附着係數 μ 變化很大, 某些路面材料發生這些變化的原因, 特別是石鋪路面和某些柏油路面, 被解

釋如下：这些路面当剛剛湿润时，会形成一層特別滑的塵土及浮游的油粒層。在大雨时这个薄層通常被冲洗掉，因而可能形成一个新的条件，使附着系数 μ 的数值重新接近于干路面的情况。

輪胎的設計 影响輪胎彈性的主要因素，如胎压和花紋的形状，是最重要的問題。这些輪胎的特性对牵引的影响非常复杂，通用的正确答案尚无法求出。但某些輪胎的花紋型式有显著的影响。細花紋平正胎面的輪胎对硬而平滑的路面，如柏油路面，有很好的牵引性能，但对深而松软的路面（如雪和泥）來說，寬而深的人字花紋則有最好的性能。目前各厂所出的輪胎，虽然广告上各有宣傳，但实际上牵引性能的差別是很小的。可靠的、比較性的技术数据几乎还找不到。輪胎牵引性能的增加往往带来了滚动阻力的增加和耐磨性能的降低，这一事实非常重要。解决这些問題的方法一般是在各优缺点中找出一个折衷的办法。

汽車行駛速度 随着車速的增高，附着系数 μ 的值肯定的要减小。但在高速下，因为受到輪胎振动、路面冲击和升高力的影响，精确的測量非常困难， μ 的数值还没有得出数据上的正确关系。

表 1 道路附着系数的平均值

路 面		μ_0	μ_s
柏油或水泥	(干燥)	0.8~0.9	0.75
水泥	(湿润)	0.8	0.7
柏油	(湿润)	0.5~0.7	0.45~0.6
砂層		0.6	0.55
土路	(干燥)	0.68	0.65
	(湿润)	0.55	0.4~0.5
雪	(紧压)	0.2	0.15
冰或雨雪		0.1	0.07

輪胎的滑移 圖 4 給出 μ 与輪胎滑移的函数关系，一般的給出两个代表值，即最大摩擦系数 μ_0 和純滑动摩擦系数 μ_s 。

道路附着系数的选定 由于各种变化的因素影响着摩擦力，并且不可能精确地使这些因素标准化，因此只能考虑有代表性的摩擦系数 μ 值。路面的质量和条件是主要的可变因素，车速和轮胎设计对 μ 的影响通常略去不计。

计算最大的制动或牵引力时，对 μ 值的选择应该考虑到不可避免的横向力而留出足够的余量，因为轮胎必须传递牵引力和横向力的合力。当选择轮胎的传递力时，为了保留一个安全系数，通常采用 μ_s 值而不用 μ_0 值。

因为汽车将在各种路面上行驶，故需进一步简化。通常只考虑两类路面（公路或越野道路）。在公路上行驶的汽車， μ_s 值一般规定为 0.6~0.7。

在校验传动部件和制动系统的强度时，则采用另外一个极端情况，假定可以达到最高的 μ_0 值。习惯上认为选择 $\mu = 1.0$ 最为适当，这种情况在有利的条件下常会发生。

滚动的动力学 设扭矩 M 加到一个载重为 W 、转动惯性力矩为 I 的车轮上，见图 6，它所形成的运动将具有以下各节中所列出的特征。

加速度 计算加速车轮所需的牵引力时要利用能量公式：一个运动体的动能变化等于作用在这个物体的力对它所作的功，物体的运动方向按照驱动方向。它们的关系是

$$dE = (P - R_r) dS, \quad (7)$$

式中 dE 是能量的变化， dS 是无限小的一段距离。一个运动车轮的能量含有两个组成部分，移动和转动部分，或

$$E = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}, \quad (8a)$$

如把上式微分，则变为

$$dE = mv dv + I\omega d\omega. \quad (8b)$$

把 dE 代入公式 7 经重新排列，并知 $v = \omega r$ ，则得出

$$v dv \left(m + \frac{I}{r^2} \right) = (P - R_r) dS. \quad (8c)$$

因 $v = dS/dt$, $a = dv/dt$, 故产生加速度所需的牵引力将为

$$P = \frac{M}{r} = a \left(\frac{W}{g} + \frac{I}{r^2} \right) + R_r, \quad (9)$$

把公式 5 代入公式 9 以后, 即可看出一个滚动車輪上所能得到的最大加速度是

$$a_{\max} = \frac{W(\mu_0 - f)}{(W/g) + (I/r^2)} = \frac{g(\mu_0 - f)}{1 + (K/r)^2}. \quad (10)$$

傳遞力的最大極限 牵引力如超过靜摩擦所規定的数值以上, 車輪将形成滑动。这时滑动摩擦将变为实际上阻止运动的力, 或

$$P = W\mu_0. \quad (11)$$

制动 假如一个减速或制动力矩作用在滚动的車輪上, 滚动阻力将对这个力矩有帮助作用。所能傳遞的最大制动力将为

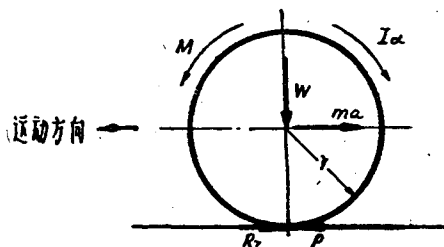


圖 6 滚动的动力学。

$$B_{\max} \leq W(\mu_0 + f), \quad (12)$$

如超出靜摩擦的極限数值, 車輪将开始滑动, 作为加速力的滚动阻力即不再存在, 因此最大的制动力变为

$$B = W\mu_0. \quad (13)$$

参考文献

1. T. R. Agg-Bulletin 88. Iowa State College Eng. Exp. Station. 1928.

2. J. Bradley and R. F. Allen—"Factors affecting the Behavior of Rubber Tired wheels on Road Surface," Proc. of the Inst. of Auto Eng., Vol. XXV.

3. P. Zanke—"Wechselwirkung zwischen Reifen und Fahrbahn beim Bremsen" (Interaction Between Tire and ground During Braking), ATZ, 1939.

4. H. Klaue—"Bremswerkuntersuchungen an Kraftfahrzeugen"

(Analysis of the Braking Process on Automotive Vehicles),
Deutsche Kraftfahrforschung Heft 13, VDI-Verlag.

5. Bauer Schuster—"Der Kraftschluss Zwischen Reifen und Fahrbahn" (The Force Connection Between Tire and Ground).
Deutsche Kraftfahrforschung Heft 72, VDI-Verlag 1940.

6. Kents' mechanical Engineers' Handbook (Power Volume),
John Wiley & Sons Inc., New York, 1953.

7. R. Bussien—"Automobiltednisches Handbuch", Cram, Berlin,
1952.

8. P. M. Heldt—"The Automotive Chassis", Chilton Co.,—1952.

9. W. Kamm—"Das Kraftfahrzeug" (The Automotive Vehicle).
Springer, Berlin, 1936.

10. R. Dean-Averns-Automobile Chassis Design, Iliffe, London, 1952.

11. G. Goldbeck-Die Fahrmechanik des Kraftfahrzeuges (mechanics of Automotive Vehicles), Franckh'sche Verlag Stuttgart, 1949.

12. H. Buerger-Das Kraftwagen-Fahrgestell (Automobile Chassis), Franckh'sche Verlag, stuttgart, 1952.

13. Hutte-des Ingenieurs Taschenbuch, Teil V. A.

二 輪胎的轉向及方向性的控制

汽車駕駛的方向穩定性是利用輪胎能够支承橫向力的能力而獲得的，橫向力由離心力、橫向風力以及路面的傾斜所造成。輪胎轉向的力學研究還是近年來的事情，這項進一步的研究工作仍在不斷的進展中。這個問題異常複雜，此處僅能敘述一些基本理論。詳細的考慮可參閱本章末所列的參考文獻。

轉向時輪胎的作用

剛性車輪在用外力轉向的低速車輛中仍能得到足夠的穩定性，馬拉車輛就是一個例子。但在內部轉向的汽車中，高速時的方向穩定性，只能利用橡膠輪胎的遠較高出的承受橫向推力的能

力才能保持。

偏扭力 很明显，一个車輪的滚动只有沿着它的縱向平面内才可能發生。假如受到外来的橫向力作用时，車輪的运行方向将被迫偏离它的真正的滚动方向，这时橡胶輪胎产生一个摩擦反作用力或叫做偏扭力来反抗它（圖7）。这个情况的产生是由于有路面接触面积，这和剛性車輪与路面的接触情况——綫接触是不同的。輪胎偏扭力的产生，起源于橡胶微粒的彈性力，当这些橡胶微粒通过触地面积时，被迫在滚动过程以外还有橫向移动。从反面来看，輪胎只有在它的行程偏离真正的滚动方向时才能产生偏扭力。偏扭力实际上是和偏移角或滑移角成比例的。

这个現象所造成的結果，是汽車在弯路上行进的軌迹必然和理論上滚动軌迹偏移一个滑移角的方向，用来产生所需的轉向力。滑移角与偏扭力的关系导致前輪或轉向輪的前端向汽車中心傾斜一个小角度的作法，这个角度叫做前束角。在直綫向前行駛时，前束角实际上就是輪胎的滑移角。这个角度使轉向車輪能够吸收橫向推力和路面冲击力而不改变它的直綫方向。假如这些同样的橫向力作用在一个沒有前束的車輪上，輪胎本身必然产生滑移角，結果造成方向的改变。

这个偏扭力假設的作用点落在輪胎投影中心后面（对行程方向而言）的这个事实是有重要意义的。这样偏扭力对輪胎即产生一个水平的扭矩，它驅使現有滑移角有减小的趋势，因此重新使滚动方向和实际行进方向重叠。偏扭力的这个特殊作用被称为自动校直扭矩。

影响偏扭力的因素 从偏扭力的物理現象起源中，可以推引出影响它的大小的因素。輪胎在轉弯时的特性一般可用圖8到12

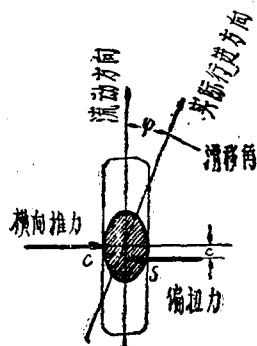


圖7 为了平衡橫向推力C，当行程与真正的滚动平面偏移一个角度 ψ 时，橡胶輪胎产生一个偏扭力S。