# 27．汽车启动时的牵引力是主动轮受到的地面施加的静摩擦力吗？

在汽车的启动过程中，首先是车内的发动机带动车轮（主动轮）转动，而地面施加的静摩擦力阻碍车轮向后滑动，从而在车轮上产生了一个力矩（扭矩），使得汽车整体向前运动。这个过程中，做功的是发动机，它提供了能量。地面施加的静摩擦力虽然方向向前，大小 *f* = *ma*，但这是根据质心运动定理得出的结论，静摩擦力本身不做功，因此把它称为汽车的牵引力不合适。

牵引力一般指的是外力，而汽车的动力来源于内部，是内力。地面对车轮的静摩擦力是不做功的，而牵引力是要做功的，因此把车轮受到地面的静摩擦力称作牵引力是不准确的。

## 一、汽车启动过程的动力学分析

汽车运动过程中，除了整体的运动以外，还有车轮的转动，以及内部许多部件的相对运动，因此汽车既不能看作质点，也不能看作刚体，而必须作为一个系统——质点组对待。

汽车静止在水平地面时，车轮与地面的接触点不受地面的摩擦力。开始启动时，内部发动机先开始启动，挂上挡后，通过复杂的传动系统把动力传递到车轮的转轴上，转轴开始转动，产生一个扭转力矩，简称扭矩，带动车轮转动。如果车轮与地面间没有摩擦，则车轮空转，汽车不能启动，陷在稀泥塘里的汽车遇到的就是这种情况。车轮与地面接触点处的静摩擦力阻止了车轮的空转，这个接触点就成了转动中心（瞬时转动中心，简称瞬心），车轴处施加的扭矩就成了对瞬心的转动力矩，该力矩使得汽车（包括车轮在内的整体）产生相对瞬心的角加速度，该角加速度乘车轮的半径即是汽车质心的加速度，因此汽车整体向前加速启动。

汽车的最大扭矩是汽车发动机的重要参数，它反映了该汽车启动时的加速能力及爬坡能力，而与汽车所能达到的最大速度关系不大。发动机的最大扭矩与发动机的进气系统、供油系统和点火系统的设计有关，在某一转速下，这些系统的性能匹配达到最佳，就可以达到最大扭矩，汽车出厂时铭牌上都标注着最大扭矩及最大扭矩转速。汽车运动时，扭矩并不是固定不变的，一般也达不到最大值。扭矩与转速有关，一般情况下转速过大或过小，实际扭矩都较小，其最大扭矩一般出现在中低转速的状态，即铭牌上标注的最大扭矩的转速区域。

设某汽车车轮半径为 *r*，由于车轮的转轴是随汽车一起运动的，因此车轮转轴的速度及加速度与汽车质心的速度与加速度相等，我们可建立这样一个简单的模型：如图 1 所示，一个半径为 *r* 的圆盘，整个汽车的总质量 *m* 都集中在轴心处，则该圆盘相对车轮与地面的接触点的转动惯量 *I* = *mr*2，若此时施加在车轮转动轴处的扭矩为 *M*，则以车轮与地面的接触点为转动中心的角加速度

图 1 把汽车看作质量集中于圆盘中心的
质点，在扭矩作用下产生加速度

*a*

*r*

*m*

瞬心

*β* = ①

质心的加速度

*a* = *βr* = ②

请注意：①②两式中的 *M* 是施加在车轮转轴处的扭矩，而不是汽车发动机产生的扭矩，更不是发动机的最大扭矩。

## 二、汽车启动过程中静摩擦力的作用

对于质点组，有一个重要的定理——质心运动定理，其数学表达式为 ∑*F*外 = *ma*C，式中 ∑*F*外 是质点组受到的外力的矢量和，*m* 是质点组的总质量，*a*C 是质点组质心的加速度。

质心运动定理表明：将全部质量 *m* 集中到质心上，将全部外力平移到质心处，其合力为 ∑*F*外。从形式上看，就像一个力（∑*F*外）作用在一个质量为 *m* 的质点上，产生的加速度为 *a*C 一样。

汽车就是这样的质点组，它的总质量为 *m*，受到的外力共有三个：重力 *mg*、地面对车轮的支持力 *N* 和地面对车轮的静摩擦力 *f*静，其中重力与支持力都沿竖直方向，而且二者大小相等、方向相反，在一条直线上，处于平衡状态，因此对加速度有贡献的只有沿水平方向的静摩擦力，其大小就表示为 *f*静 = ∑*F*外 = *ma*C。但并不能说该静摩擦力就是质点组受到的所有外力的合力，因为我们将全部外力平移到了质心上，而这种平移产生的效果——改变运动状态的效果，会发生改变，不符合合力的定义。因此我们只能说静摩擦力与使汽车质心产生加速度的力的大小和方向相同。

为什么对于质点组来说，只有外力才对质心产生加速度有贡献，而内力则没有贡献呢？这是因为内力总是成对出现的，每一对内力都满足大小相等、方向相反、作用在一条直线上，而且它们的作用时间一定相等，这一对内力在任意时间段的冲量的矢量和一定为零。而外力是指外部物体对质点组的作用，是一个力的作用，不是一对力的作用，所有外力在某段时间里的冲量的矢量和，就起到了改变整体运动状态的作用，表现为使整体具有随质心作平动的加速度 *a*C。

静摩擦力是不做功的，因此在汽车启动的过程中，静摩擦力对能量转化不起作用，这就是静摩擦力不能说是汽车启动过程中的牵引力的主要原因。

汽车启动过程中做功的是内力。内力成对出现，并且总是大小相等、方向相反、作用在一条直线上，虽然任意时间段内一对内力的冲量的矢量和总等于零，但一对内力在某过程中所做的功却常常不等于零，这是因为一对内力分别作用在两个不同的质点上，在某个过程中，这两个相互作用的质点的位移一般不相等，因此这一对内力所做的总功的代数和一般不等于零。如果内力所做的总功为正值，则该质点组的总动能增加；反之，如杲内力所做的总功为负值，则该质点组的总动能减小。汽车启动过程中，其内力所做的总功就是正值，使得汽车这个质点组的总动能增加，汽车从静止开始启动。从能量转化的角度看，传统的内燃机汽车消耗的是燃料燃烧释放的化学能，这些化学能中的一部分最终转化成为汽车的动能。

## 三、考虑滚动摩擦的情况

图 1 所示为车轮转动时的简化模型，把车轮与地面的接触处看成平面上的一个点，是完全理想的情况，照这样分析，重力与地面支持力在一条直线上，是一对平衡力，而地面的静摩擦力又不做功，那么当汽车在水平路面上匀速运动时，发动机就可以不工作，只靠惯性就可以维持匀速运动，这显然与实际不符。

实际上，汽车与地面的摩擦是滚动摩擦，必须考虑轮胎的不对称形变。如图 2 所示，在车轮开始有滚动的趋势及滚动过程中，轮胎的形变是不对称的，即轮胎与地面的接触在截面图中不是一个点，而是一段线，即图中的 AʹA 段，并且它们关于通过转轴的竖直线（即图中重力 *G* 的作用线）不对称，前端 Aʹ 距离较远而后端 A 距离较近。这样，地面对车轮的支持力 *N* 与重力 *G* 的作用线就分开了一小段距离，虽然它们仍然大小相等、方向相反，却不作用在一条直线上，由此形成一对力偶，对转动状态的改变起着阻碍作用。（请参看“[什么是滚动摩擦？中学物理教科书为什么删去滚动摩擦这一名词？](https://enjoyphysics.cn/Article3368)”）

*G*

C

A

Aʹ

*d*

*N*

图 2 滚动的轮胎产生不对称形变，重力和
支持力形成一对阻碍转动的力偶

设重力 *G* 与支持力 *N* 的作用线分开的距离为 *d*，则 *G* 与 *N* 二者形成的力偶矩的大小 *M*ʹ = *Gd*，方向沿顺时针转动（*M*ʹ 的矢量方向为垂直于纸面方向向里）。车轮运动时受到的扭矩大小为 *M*，方向沿逆时针方向转动（*M* 的矢量方向为垂直于纸面方向向外），则以车轮与地面的接触前点 Aʹ 为瞬心的转动角加速度

*β* = ③

质心的加速度

*a* = *βr* = ④

若 *M* = *M*ʹ，则加速度 *a* = 0，汽车匀速运动。

③④式与前面的①②式相比较，式中的 *M* 换成了（*M* − *M*ʹ），即要使质心产生相同的加速度，施加在车轮转轴上的扭矩要大一些，因为需要克服滚动摩擦力矩 *M*ʹ 的阻碍作用。

这时仍有静摩擦力 *f*静（即静滑动摩擦力）存在，方向也是沿地面指向前方（图中未画出），其作用同样是阻止车轮空转。不论是启动加速阶段，还是匀速行驶阶段，如果不存在*f*静，车轮仍可相对车身转动，但车辆无法前进。然而 *f*静 对车轮绕瞬心的转动状态的改变却不起作用。滚动摩擦是力矩而不是力，它对改变物体的转动状态起着阻碍作用。

## 四、几点结论及建议

1．牵引力一般是指外力，例如机车牵引拖车的力、飞机牵引滑翔机的力等。说汽车的牵引力，那就是汽车自己牵引自己，实在说不过去。因此建议不用“汽车牵引力”这种说法。

2．汽车靠车轮在地面上滚动前进，它与地面间的摩擦是滚动摩擦，不应该套用滑动摩擦的知识解决问题。

3．汽车的动力来自内部，对于传统的以内燃机为发动机的汽车，在汽缸内燃烧后产生的高温高压气体是动力的来源。汽车启动加速阶段所消耗的能量中，转化为平动动能的只是其中较小的一部分，而当汽车沿水平路面匀速运动时，汽车的平动动能没有增加，却仍然需要发动机工作，消耗的能量最后都转化为内能散失在了大气中。

4．不论是启动加速阶段，还是水平匀速阶段，车轮与地面间的静摩擦力都不做功，它起的作用都是阻止车轮在地面上的空转，从而使车轮与地面接触处形成瞬时转动中心。滚动摩擦对车辆的前进起阻碍作用，克服这种阻碍作用则需要消耗一定的能量。