



## 车轮运动问题

杨 蕾 黄亦斌

(江西师范大学 江西 南昌 330022)

(收稿日期:2015-11-13)

**摘 要:**主要探讨了汽车主动轮在运动中所受的摩擦,首先明确滚动摩擦的产生原理和适用范围,缩小问题范围,将车轮运动看做刚体运动,得出静摩擦力的作用.最后,讨论汽车在提速前进运动中,引入驱动力,解释不做功的静摩擦力是如何对汽车动能变化起作用,得出加速度与做功力的区别.

**关键词:**主动轮 滚动摩擦 动能 静摩擦 做功

汽车前进过程是中学物理中常常讨论的问题,尤其是汽车车轮所受摩擦力与其运动之间的关系,是一个具有实际意义和理论意义的问题.然而,汽车运动中究竟是滚动摩擦,还是静摩擦起作用常常难以解释.本文以汽车的主动轮为研究对象,先讨论车轮运动中滚动摩擦的作用,明确中学阶段车轮问题所研究的摩擦范围,并对车轮的运动过程进行解释.

### 1 滚动摩擦

车轮滚动前进,在这个滚动运动中是否有滚动摩擦力呢?事实上,并不存在滚动摩擦力的概念.滚

点的速度逐渐增大,感受手与重物间作用力的效果.

**案例评析:**情境教学的核心是让学生主动参与、自主研究,要求学生用科学的思维方式去解决情境中的任务,在研究过程中掌握物理学习的基本方法,主动获取物理知识<sup>[3]</sup>.在学生的最近发展区设置问题串,通过互动问答实现师生间的情感交流不失为一种很好的模式.在创设情境和设置疑问的过程中,要循序渐进,层层深入,步步拓展,同时给学生提供充足的主动参与和自主思考的空间,强烈的好奇心会“逼”着学生去探寻这些问题的答案,学生在付出一定的脑力劳动并获得成功之后,学习物理的兴趣和信心也会大大增强.

### 4 总结

认知学习理论认为,知识存在于我们所生存的环境及我们所从事的活动中,学习者要学习某种知

识,必须要进入相应的情境中<sup>[3]</sup>.也就是说,认知是人与情境互动的产物,学习者只有融入实际情境中,才能建构出有意义的知识.而我们的学生普遍缺乏的就是诸如这一类的生活体验,这就需要我们广大教师积极地去创设各种有助于学生理解的问题情境,努力尝试让物理问题从文字描述回归真实,课堂上应尽量多地增加学生的体验,在创设的情境中逐步实现对物理模型的构建.

假设车轮和地面为系统内的两个刚体,在不受外力的情况下,轮子在地面上无滑滚动运动时,如图1所示,车轮受到的重力 $G$ 和地面对车轮的支持力 $N$ 都在通过质心的竖直直线上,这两个力大小相等、方向相反.假设地面粗糙,没有驱动力作用的轮子是否受摩擦力?若假设车轮受到向前的摩擦力,根据质心运动定理,轮子将在水平方向加速运动,速度为 $v$ ;此外,摩擦力矩对轮子的转动起着阻碍作用,减弱

识,必须要进入相应的情境中<sup>[3]</sup>.也就是说,认知是人与情境互动的产物,学习者只有融入实际情境中,才能建构出有意义的知识.而我们的学生普遍缺乏的就是诸如这一类的生活体验,这就需要我们广大教师积极地去创设各种有助于学生理解的问题情境,努力尝试让物理问题从文字描述回归真实,课堂上应尽量多地增加学生的体验,在创设的情境中逐步实现对物理模型的构建.

### 参考文献

- 1 张振新,吴庆麟.情境学习理论研究综述.心理科学,2005,28(1):125~127
- 2 张丹彤.从理想回归真实——高考物理题背景真实化倾向对高中物理习题设计的启示.物理教师,2013(6):77~79
- 3 夏焰.物理课堂教学中的情景教学.中学物理教学参考,2013(4):21~22

轮子转动的角速度  $\omega$ . 做无滑滚动的车轮需要满足  $v = \omega R$ , 若存在上述向前的摩擦力, 则破坏无滑滚动的前提条件; 同理, 做无滑滚动的车轮也不存在向后的摩擦力. 那么, 无滑滚动的车轮将在惯性的作用下一直匀速滚动下去.

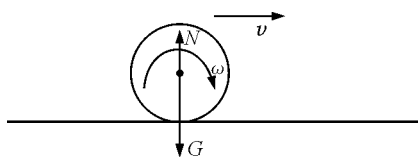


图 1

然而, 在实际情况下, 车轮在不受外力时, 会慢慢减速而停下, 这是为什么呢? 因为在实际情况下, 车轮和地面都是会发生形变的非刚体, 当两者有形变时, 会产生滚动摩擦力偶矩, 阻碍物体的滚动.

如图 2 所示, 设坐标系  $xOy$  为与水平面固定相连的静止坐标系, 地面受车轮压力而发生形变, 地面部分下陷, 当车轮向前滚动时, 前方支持面凸起, 接触面给车轮的作用力已经不再通过质心, 受力点由 B 点移动到 C 点, 在这块小的接触面积上, 受到的作用力为  $F$ , 将作用力分解为竖直方向支持力  $N$  和水平方向的摩擦力  $f$ , 车轮受到的支持力  $N$  与重力  $G$  组成了一对大小相等, 方向相反, 不是同一条直线上的力偶矩, 这就是滚动摩擦力偶矩, 满足公式  $M = dN$ ,  $d$  为滚动摩擦系数, 具有长度的量纲, 其数值大小主要取决于相互接触的物体的材料性质和表面状况(粗糙程度、湿度等), 正是这个滚动摩擦力偶矩阻碍了轮子的转动.

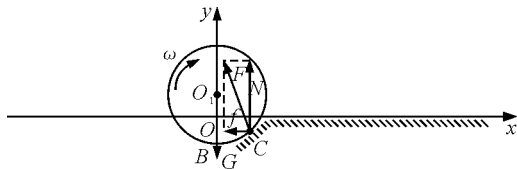


图 2

当解释轮子在向前滚动的运动中会慢慢减速停下时, 必须考虑水平方向上的摩擦力  $f$ , 根据质心运动定理, 这个摩擦力  $f$  与质心运动方向相反, 对车轮的平动起到阻碍作用.

可见, 在刚体滚动中, 不存在滚动摩擦力偶矩. 在非刚体滚动中, 滚动摩擦力偶矩才起作用, 该滚动摩擦力偶矩做负功, 使车轮的转动动能减小, 阻碍物体的转动, 使车轮在不受外力时慢慢减速. 但若有外

力如发动机提供的驱动力作用, 这个驱动力矩往往数值很大, 滚动摩擦力偶矩相对于发动机提供的驱动车轮转动的力矩来说很小, 常常忽略. 并且中学阶段我们进行受力分析的多为大小不可改变的理想物体.

## 2 解车轮运动

通过上述的分析, 我们可以将车轮运动中的滚动摩擦忽略, 把车轮和地面都视为理想刚体, 讨论在车轮不打滑的情况下(无滑动摩擦力), 解车轮的运动, 分析车轮运动中各部分相对地面的运动情况, 再将力与运动联系, 得出产生这种运动的原因.

### 2.1 车轮运动

如图 3, 在不打滑的情况下, 车轮以角速度  $\omega$  向前滚动. 将车轮的平动看成是质心  $O_1$  的运动, 设转动一圈时间为  $T$ , 转动一圈后车轮质心运动位移为  $L$ , 则质心  $O_1$  相对地面的速度

$$v_0 = \frac{L}{T} = \frac{2\pi R}{\frac{2\pi}{\omega}} = \omega R \quad (1)$$

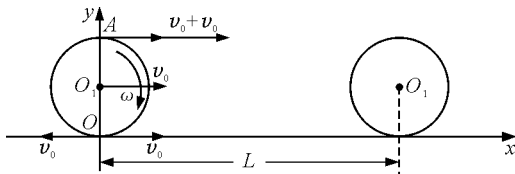


图 3

车轮以角速度  $\omega$  转动, 则车轮顶端 A 相对于质心的速度

$$v'_A = \omega R \quad (2)$$

从地面坐标系  $xOy$  观察, 根据速度叠加公式, 结合式(1)和式(2), 可得车轮顶端 A 相对地面的速度为

$$v_A = v'_A + v_0 = 2\omega R$$

同理可得轮子底端 B 点, 从地面系中观察到的速度  $v_B$  为零. 这也是不打滑的真正含义, 即车轮和地面之间没有相对速度.

这里, 还可以通过动能的角度进行分析, 汽车车轮运动可以看做平动和转动的结合.

平动动能

$$E_1 = \frac{1}{2} M v^2 \quad (3)$$

转动动能

$$E_2 = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} M R^2 \omega^2 \quad (4)$$

动能

$$E_k = E_1 + E_2 = \frac{1}{2} \left( M R^2 + \frac{1}{2} M R^2 \right) \omega^2 = \frac{1}{2} J_1 \omega^2 \quad (5)$$

从式(5)中可以发现,车轮在地面的转动和平动等效于一个转动惯量  $J_1$  的物体做纯转动运动,这个新的转动惯量

$$J_1 = \frac{1}{2} M R^2 + M R^2$$

根据平行轴定理  $J = J_c + M d^2$ ,刚体对任一转轴的转动惯量等于刚体对通过质心并与该轴平行的轴的转动惯量加上刚体质量与两轴间距离的平方的乘积.

对比平行轴定理和  $J_1$ ,可以发现,这个纯转动运动可视为质量不变,绕坐标原点(轮子与地面的接触点)以角速度  $\omega$  转动的轮子,转动惯量  $J_1$  满足

$$J_1 = J_c + M R^2$$

那么,这个新的转轴位置也是物体在平面运动过程中某一瞬间,速度为零的点,即为瞬心  $C$ . 还可以根据刚体上两点的速度用绘图的方式确定瞬心  $C$  的位置,如图4所示.

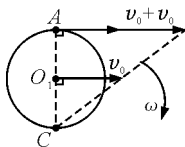


图4

因此,可以想象,对于任何一辆高速行驶的汽车来说,其车轮底部边缘对与地面的接触点没有任何速度和位移,如果此处有摩擦力,那么就只能是静摩擦力.

## 2.2 汽车加速过程的动力学分析

如图5所示,主动轮受到竖直向下的重力  $G$  和汽车对车轮的压力  $F$ ,还受到地面对车轮垂直水平面向上的支持力  $N$  和静摩擦力  $f$ ,以及汽车内部发动机提供使主动轮转动的驱动力矩  $M$ .

主动轮在竖直方向上受力平衡  $F + G = N$ ,车轮运动必须满足质心运动定理和对质心轴的转动定理

$$f = ma \quad (6)$$

$$M - f r = J \alpha \quad (7)$$

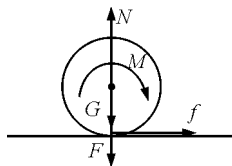


图5

由于在不打滑的情况下,质心平动速度与车轮转动的角速度需满足  $v_c = \omega R$ ,故而,质心加速度与车轮的角加速度必须满足  $a_c = R \alpha$ . 改变系统动量、提供加速度的力只能是系统的外力,而静摩擦力是汽车在水平方向唯一受到的外力. 虽然该静摩擦力没有做功(受力点没有速度),但为车轮向前提供了加速度,为车轮的平动提供了可能. 就像立定跳远运动中,鞋子受到地面的静摩擦力,这个力为人的向前运动提供了加速度,却没有做功.

在不打滑的情况下,若主动轮在向前做匀加速运动时,其角加速度  $\alpha$  必须保持不变,如式(7)所示,静摩擦力产生阻碍车轮转动的力矩,因此必须有其他的力矩提供给车轮,让其保持以角加速度  $\alpha$  加速转动,这就是汽车的动力系统,提供驱动力. 驱动力仅仅在车轮转动上起作用,体现为力矩,提高车轮的转动角速度. 车轮做无滑滚动,角速度和质心运动速度满足  $v = \omega R$ ,驱动力矩通过增加车轮的角速度,改变汽车运动的平动速度. 根据功能关系,内力和外力做功都会改变系统的动能,驱动力作为汽车系统的内力通过做功的方式,只是使车轮的转速增大,配合静摩擦力的作用去改变主动轮向前运动的动能. 若只有驱动力的作用,而无静摩擦力,此时可以想象轮子陷入泥坑的情形,轮子只能在原地加速转动,增加转动的动能,但汽车无法向前运动.

因此,在汽车加速的情境中,加速的力不做功(指静摩擦力),做功的力不加速(指内力或驱动力).

## 参考文献

- 汪志成. 滚动摩擦机理与滚动摩擦系数. 上海机械学院学报, 1993(4): 35 ~ 43
- 梁昆森. 力学(上册). 北京: 人民教育出版社, 1978. 113 ~ 114
- 赵加良. 车轮上的物理 —— 静摩擦力扮演的角色. 物理通报, 2013(1): 34 ~ 35