# 25．自行车运动员在高速转弯时为什么要向内侧倾斜？

水平弯路转弯时的自行车运动员（包括人和车）不能看作质点，其所受的外力有：重力 *G*、地面给的支持力 *N* 及地面给的静摩擦力 *f*。三个力不共点，重力 *G* 作用于重心，方向竖直向下；地面给的支持力 *N* 和静摩擦力 *f* 都作用于自行车与地面接触的位置，方向分别为竖直向上和水平向内侧，它们的合力可认为沿车身斜向上，其作用线与重力作用线交于重心。该合力与重力的合力则沿水平方向指向内侧，充当向心力。

自行车和摩托车运动员在高速骑行过程中，如果遇到**水平**弯路，都要整体向内侧倾斜，对于以上情境如何进行受力分析，是教学中必然会遇到的问题。

## 一、建立什么模型？

若把运动员和自行车作为研究对象，会将问题复杂化。在他们整体向前运动时，车轮、齿轮等绕各自的转动轴转动，车轮与地面的摩擦是滚动摩擦而不是滑动摩擦，同时，还有人体不同部位的不同运动，特别是下肢用力蹬踏的动作更为复杂。如果要深入研究和讨论各部分的运动，将是非常复杂和困难的，对中学生而言是不可能完成的任务。因此我们只能大大简化，首先忽略各部分的转动，把复杂的研究对象视为一个整体，随质心一起运动。

最简单的理想模型是质点，而一个实际物体能木能看作质点，与所研究和讨论的问题有关，要具体问题具体分析。

我们把水平面上的这段弯路看作一段圆弧，认为人和车在这段弯路上做圆周运动，在已知弯路的半径以及车行驶速度、人和车的总质量的情况下，求所需的向心力，这就需要把人和车作为一个质点对待。

在对它进行受力分析的时候，由于外力的作用点不同，不能像对质点那样把各力都画到一点上，因而，必须要把它看作一个刚体。

## 二、简化的受力分析

一个物体，包括可以忽略形变的刚体和不能忽略形变的弹性体，其质心的运动改变只决定于外力而与内力无关，当我们把人和自行车看作一个整体时，它在水平路面上转弯受到的外力有地球施与的重力 *G*，地面施与的弹力 *N* 和静摩擦力 *f*，如图 1（a）所示。需要说明的是，图中的 *f* 只是地面摩擦力垂直于前进方向的分量，摩擦力的另一分量跟运动方向在一条直线上，与研究对象做圆周运动所需的向心力无关，因此没有画出。

图 1 人和自行车转弯时受外力示意图

（a）受三个外力

（b）*N* 与 *f* 的合力指向质心

（c）*F*地面 与 *G* 的合力是向心力

*N*

*f*

*G*

*N*

*f*

*θ*

*F*合力

*G*

*F*地面

*F*地面

图 1（b）中把 *N* 与 *f* 按照平行四边形定则合成，它们的合力 *F*地面 的方向指向质心，在图中沿表示研究对象的杆。再把 *F*地面 平移到质心处，与重力 *G* 按照平行四边形定则合成，其合力 *F*合力 沿水平方向指向弯路的圆心，其大小与地面给予的静摩擦力 *f* 大小相等，它就是所需的向心力。

## 三、人与自行车倾斜为什么不倒？

图 1 中地面对车轮的支持力 *N* 竖直向上，大小与 *G* 相等，但二者不在一条直线上，它们形成一对力偶，有沿顺时针方向转动的趋势，从而车轮与地面的接触点有向外侧滑动的趋势，因此地面对它产生了向内侧的箭摩擦力 *f*。

那么，倾斜的研究对象（人与车的整体）为什么不倒下呢？通俗的解释是：合力 *F*合力产生加速度，该加速度指向圆心，而研究对象正在做圆周运动，因此不会倒下。这就与人造卫星绕地球转动而不会掉下来是一样的。地球对人造卫星的吸引力指向地心，使卫星产生加速度，卫星由于做圆周运动，因此不会掉下来。

这个问题还可以从转动的非惯性参考系去理解：人与车作为一个整体，在水平地面上做圆周运动，以它为参考系，即是转动的非惯性系，在这个参考系中，人与车整体是静止的，它除了受到 *G*、*N*、*f* 三个力以外，还要加上惯性离心力 *f*惯，其大小为 *f*惯 = （式中 *m* 为人与车的总质量，*v* 为它的行驶速率，*ρ* 为弯路作为一段圆弧的半径），方向指向圆心的反方向，如图 2 所示。

图 2 在转动非惯性系中的受力示意图

*N*

*f*

*G*

*f*惯

其中 *N* 与 *G* 大小相等而方向相反，是一对沿顺时针方向转动的力偶；*f* 与 *f*惯的大小相等而方向相反，是一对沿逆时针方向转动的力偶。这两对力偶矩大小相等方向相反，满足平衡条件，即合力为零，且合力矩为零，保持静止状态。只是中学不讲非惯性参考系与惯性力，因此这种方法一般来说不适合中学物理教学使用。但对于条件较好的学校，特别是准备参加物理竞赛的学生而言，理解起来是没有问题的。

## 四、对“弯道技术”的讨论

### 1．自行车运动员的“弯道技术”

自行车运动是一种速度竞技运动，比的是谁的速度更快，除了要求运动员具有良好的爆发力和持久力以外，弯道技术也占有重要的地位。所谓弯道技术，主要是指运动员在转弯过程中掌握平衡、保持速度的能力。

从图 1（c）可以看出，*F*合力提供了做圆周运动时所需的向心力，根据向心力公式 *F*向心 = ，在转弯半径 *ρ* 一定的条件下，速度 *v* 越大，需要的向心力越大。而 *F*合力 = *mg*/tan*θ*，在质量 *m* 一定的条件下，*F*合力 的大小随倾角 *θ* 的减小而增大。

自行车运动员的所谓“弯道技巧”，主要就是根据骑行速度和转弯半轻掌握倾斜角度。如果倾角 *θ* 过大，则转弯半径会变大，可能会从内道冲到外道，甚至可能撞到外侧挡板；如果倾角 *θ* 过小，则转弯半径会变小，可能会进入赛道内侧而犯规，也可能因为摩擦因数的缘故使得车轮向外侧打滑而使人摔出。这两种情况在赛场上时有发生，特别是在速度快而转弯急的短道速滑项目中更是屡见不鲜。

摩托车运动员的情况与此类似，转弯时也要向内侧倾斜。不同的是，摩托车运动员的骑行速度是由车辆的性能决定的，运动员不需要付出更多的体力，而“弯道技术”尤其显得重要。当然除了运动员的因素外，增大车轮与地面的摩擦因数也非常重要，但这主要依靠设计家、工程师、材料工艺师们来改进，而不是运动员所能左右的。

### 2．赛车的转弯

F–1 赛车的速度更快、更刺激，但它是四轮行驶，在转弯时不能倾斜，靠的是前轮转向，而在转向过程中，提供向心力的仍然是侧向静摩擦力。为了在高速状态下提高赛车的转弯性能，必须设法增大轮胎与地面间的摩擦因数，因此轮胎制造商在轮胎的材料及表面情况上下足了功夫。与此同时，还设计了特殊的水平尾翼，它利用了空气动力学原理，与飞机的机翼作用相反，不是产生升力，而是在高速行驶时产生空气对车向下的压力，从而增大轮胎与地面间的最大静摩擦力。除了车辆的因素外，运动员的胆识和魄力也是取胜的关键，他们要在高速行驶的情况下，精确把握转弯时方向盘转向的角度，在超车时还要善于把握稍纵即逝的机会。

### 3．滑冰运动员的冰刀

滑冰运动大体可分为三类：速度滑冰、花样滑冰和冰球。这些运动的共同点是都需要运动员高速转向，转向时也都需要身体倾斜。但滑冰与车辆行驶的最大不同是前者与冰面间是滑动摩擦，而后者与地面间是滚动摩擦。车轮在地面上滚动时，接触地面的点不能滑动，因此要求最大静摩擦因数越大越好。而滑冰运动员则希望冰刀与冰面间的摩擦越小越好。

以速度滑冰为例，运动员使用的冰刀底部截面为方形，转弯时用外侧脚的冰刀向外蹬冰面，如图 3 所示，由于冰刀与冰面接触的面积很小，因此产生很大的压强，局部冰面熔化形成薄薄一层水，起到润滑作用，从而大大减小冰刀与冰面间的滑动摩擦力，有利于快速滑行。同时，坚硬的冰面与冰刀接触处形成不对称的“V”宇形缺口，这时冰面对冰刀的侧向作用力不是摩擦力而是弹力。

图 3 速滑用冰刀与冰面的接触面

冰刀截面

冰面