

论轮胎的自由滚动力学

冯希金^{1,2}, 危银涛¹, 郑小刚¹, 李红卫², 贺灵皓²

[1. 清华大学 汽车工程系, 北京 100084; 2. 特拓(青岛)轮胎技术有限公司, 山东 青岛 266061]

摘要:从轮胎稳态自由滚动的运动特点入手,通过对运动中的车辆和轮胎进行受力分析,得到自由滚动轮胎的受力与力矩平衡条件,建立用有限元方法分析轮胎稳态自由滚动的边界条件和初始条件。结合 Abaqus 软件所提供的子程序二次开发功能,采用 Fortran 语言编写求解轮胎自由滚动状态的子程序,可以实现轮胎自由滚动状态的自动求解,提高了计算精度和计算效率。仿真与轮胎试验结果对比验证了该方法的可靠性。另外,讨论了驱动、制动、自由滚动状态下轮胎接地面内的受力差异,进一步验证了该方法的有效性,为接地面内动态受力研究提供了方向。

关键词:轮胎;自由滚动;子程序;有限元分析

中图分类号: TQ336. 1⁺. 1; Q241. 82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2013)09-0517-10

轮胎的稳态自由滚动状态是指轮胎在外倾角和侧偏角均为零的情况下,也就是轮胎垂直于路面、直线前进时的匀速行驶状态^[1]。对于车辆动力学和轮胎动力学,轮胎的稳态自由滚动状态是一个非常重要的概念,许多车辆和轮胎动力学的重要概念和定义,例如轮胎的纵向滑移率、侧偏角、侧偏刚度、回正刚度等都以稳态自由滚动状态为基础^[2-3]。另一方面,轮胎工业界进行轮胎的动态性能研究时,也是以轮胎的自由滚动状态为基本状态^[4-6]。在这些研究中,为了进行滚动阻力和温度场的仿真研究、稳态转向特性研究、胎面磨耗性能研究等,都需要首先得到轮胎的稳态自由滚动状态。

轮胎稳态自由滚动状态的仿真计算是进行轮胎动态力学性能研究的前提和基础。为了实现轮胎自由滚动状态的仿真,危银涛等^[7]和闫相桥^[8]分别采用自主编写的软件进行了轮胎动态接触和稳态的自由滚动仿真。当前轮胎工业中常用的大型商业软件 Marc 和 Abaqus 也都提供了轮胎的稳态自由滚动仿真计算功能。冯希金等^[9]曾利用 Marc 软件进行自由滚动轮胎的性能仿真,王友善等^[10]采用 Abaqus 软件进行了子午线轮胎的稳态

自由滚动仿真分析。

从当前的文献资料来看,采用大型软件进行自由滚动状态的仿真大体有 4 个步骤:首先进行轮胎的充气 and 静态加载分析,然后进行轮胎的制动状态分析,在此基础上进一步提高轮胎角速度,进行轮胎的驱动状态分析,从制动和驱动分析的结果提取自由滚动状态的角速度,最后是利用所提取的自由滚动角速度进行自由滚动状态的仿真,得到轮胎的稳态自由滚动状态。这个过程比较复杂,尤其是从制动和驱动分析中提取自由滚动角速度比较麻烦,计算精度也受到制约。

本工作从轮胎稳态自由滚动的运动特点入手,通过对运动中的车辆和轮胎进行受力分析,得到自由滚动轮胎的受力平衡条件和力矩平衡条件,找到采用有限元方法求解自由滚动状态的关键条件,结合 Abaqus 软件所提供的子程序二次开发功能,采用 fortran 语言编写求解轮胎自由滚动状态的子程序,实现轮胎自由滚动状态的自动求解,从而提高计算精度并简化仿真过程,使自由滚动状态的计算变得简单易行。

1 轮胎自由滚动状态的特点及运动中的轮胎受力分析

1.1 轮胎稳态自由滚动状态的运动特点

轮胎在自由滚动状态下,角加速度(ω)为零,胎冠中心任一点的切线速度(v)等于车辆的直线

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10872103, 51175286)

作者简介:冯希金(1985—),男,山东济南人,清华大学在读博士研究生,研究方向为车辆轮胎力学,现就职于特拓(青岛)轮胎技术有限公司。

速度(v_0),也就是等于轮胎轴心的平移速度,即

$$v = \omega_0 r_e = v_0 \quad (1)$$

式中, ω_0 为轮胎的自由滚动角速度, r_e 为轮胎的有效滚动半径。

轮胎的有效滚动半径比轮胎的负荷半径大,但比充气半径小。由于轮胎是具有滞后作用的变形体,并且受旋转惯性带来的离心力的影响,因此滚动状态中各点对应于旋转轴心的半径是不一样的,有效滚动半径可以理解为以角速度 ω_0 、线速度 v_0 做纯滚动直线前进的圆的半径。

H. B. Pacejka^[1]对轮胎的有效滚动半径作了更为精辟的解释,如图1所示。

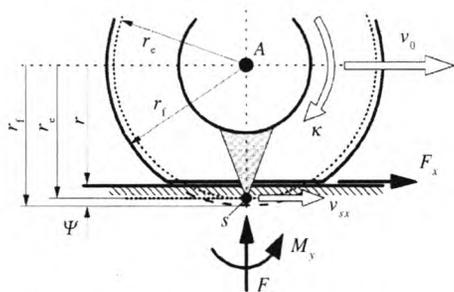


图1 轮胎有效滚动半径和纵向滑移率示意

图1中 M_y 为轮胎由于滞后作用所产生的滚动阻力矩, F_z 为轮胎垂直载荷, F_x 为轮胎所受的地面切向力, r_f 为充气半径, r 为动半径。图中的虚线圆弧即为做自由滚动的轮胎轮廓, s 点为处于该轮廓上与轴心点 A 相垂直的一点, v_x 为 s 点的切线速度与轮胎平移线速度 v_0 之间的差值,称为纵向滑移速度,定义 s 点的纵向滑移率(κ)为

$$\kappa = -\frac{v_x}{v_0} = -\frac{v_0 - \omega r_e}{v_0} \quad (2)$$

当轮胎处于稳态自由滚动状态时, $v_x = 0$,则 $\kappa = 0$;当给轮胎施加制动力矩时,轮胎的角速度立即开始下降,但此时车辆的线速度也就是轮胎的平移速度由于惯性作用还没有开始下降,从而 $\omega r_e < v_0$,造成 $0 > \kappa > -1$,轮胎处于部分制动状态。当制动力矩很大,轮胎被很快抱死时, $\omega = 0$,则 $\kappa = -1$,轮胎处于完全制动状态。当轮胎从自由滚动状态开始加速的时候,驱动力矩使轮胎的转动角速度很快增大,即 $\omega > \omega_0$,则 $\kappa = 0$,而车辆的平移速度由于惯性却没有马上增大,也就是说在加速过程中轮胎轮廓上一点的切线速度大于轮

胎的平移速度,即出现 $\omega r_e > v_0$ 的情况,从而造成 $\kappa > 0$ 。轮胎的纵向滑移率是车辆和轮胎动力学中的一个很重要的概念,轮胎纵向滑移率与轮胎和地面之间的附着力密切相关^[3]。为了行驶安全,一般通过防抱死系统(ABS)来控制制动力矩,使纵向滑移率约保持在 -10% ,以获得最大的抓地力,从而保证不出现甩尾、侧翻等交通事故。

通过上述对轮胎自由滚动状态运动特点的分析看到:当 $\omega < \omega_0$ 时,轮胎处于部分制动或完全制动状态,当轮胎角速度增大时,其线速度逐渐接近车辆平移速度;当 $\omega = \omega_0$ 时,轮胎线速度等于其平移速度,加速度和角加速度均为零,处于自由滚动状态,当角速度继续增大时,轮胎角加速度大于零,轮胎处于加速驱动状态。在求解轮胎稳态自由滚动的问题中,已知条件只有轮胎的线速度 v_0 和三维静态加载构型,因为轮胎的有效滚动半径受载荷、速度、旋转惯性的影响,无法事先确定自由滚动半径,也无从确定轮胎的稳态自由滚动角速度。但通过上述分析可知,稳态自由滚动半径小于充气半径而大于静态加载半径,则可以推断自由滚动角速度处于下式所确定的范围内:

$$\frac{v_0}{r_f} = \omega_1 < \omega_0 < \omega_2 = \frac{v_0}{r} \quad (3)$$

知道了上述角速度范围,在稳态自由滚动状态的求解中,先给定一个初始角速度,然后通过选择合适的控制条件,控制解的收敛精度,就可以求出合理的自由滚动状态。选择控制条件需要对运动中的轮胎进行进一步的受力分析。

1.2 运动中的轮胎受力分析

1.2.1 运动中车辆和轮胎的受力

根据相关的汽车理论^[3],画出运动状态的汽车、轮胎、路面三者的受力关系,如图2所示。

在平直路面上运动的汽车,前进速度为 v ,加速度为 $\frac{dv}{dt}$,车身质量为 m_B ,所受重力为 G_B ,质心高度为 h_1 ,轴距为 L ,质心到前轴的距离为 l_1 ,质心到后轴的距离为 l_2 ,承受的风阻力为 F_w ,前轴上承受的轮胎推力为 F_{p1} ,轮胎作用在轴上的垂直反力为 F_{v1} ,空气升力为 F_{zw1} ,轮胎作用的反力矩为 T_1 。汽车后轴上承受的轮胎垂直反力为 F_{v2} ,轮胎推力为 F_{p2} ,空气升力为 F_{zw2} ,并且有

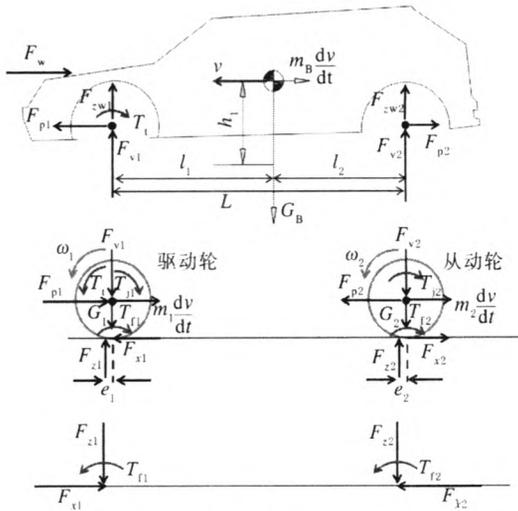


图 2 运动中的车辆、轮胎、地面三者受力分析
 $F_{v1} + F_{v2} = G_B$ 。

驱动轮质量为 m_1 , 所受重力为 G_1 , 转速为 ω_1 , 角加速度为 $\frac{d\omega_1}{dt}$, 平移加速度为 $\frac{dv}{dt}$, 受到地面垂直反作用力 F_{z1} 作用。由于轮胎材料的粘弹性和滞后性, 该垂直反作用力并不通过轮胎轴心, 而是偏离一个小距离 e_1 (拖距, 见图 3)。车身所受重力分配到驱动轮上的力为 F_{v1} , 并且有 $F_{z1} = G_1 + F_{v1}$ 。作用到轮胎轴心上阻碍轮胎前进的力为 F_{p1} , 地面驱动轮胎的力为 F_{x1} , 惯性力为 $m_1 \frac{dv}{dt}$ 。发动机传递的驱动力矩为 T_1 , 旋转惯性阻力矩为 T_{j1} , $T_{j1} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}$, J_1 为轮胎转动惯量; 拖距引起的阻力矩为 T_{f1} 。

从动轮质量为 m_2 , 所受重力为 G_2 , 转速为 ω_2 , 角加速度为 $\frac{d\omega_2}{dt}$, 平移加速度为 $\frac{dv}{dt}$, 受到地面垂直反作用力 F_{z2} 作用, 其拖距为 e_2 。车身所受重力分配到从动轮上的力为 F_{v2} , 并且有 $F_{z2} = G_2 + F_{v2}$ 。推动轮胎前进的力为 F_{p2} , 地面切向力为 F_{x2} , 惯性力为 $m_2 \frac{dv}{dt}$ 。旋转惯性阻力矩为 T_{j2} , $T_{j2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}$, J_2 为从动轮转动惯量; 从动轮所受的轮胎滚动阻力矩为 T_{f2} 。

1.2.2 驱动轮和从动轮的力与力矩平衡

1.2.2.1 从动轮

根据从动轮的受力分析, 得到水平方向的力

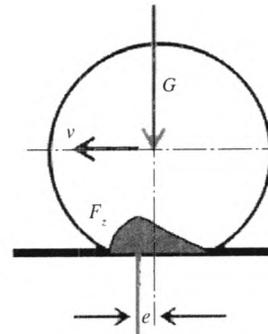


图 3 轮胎拖距示意

平衡方程为

$$F_{p2} = F_{x2} + m_2 \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

从动轮的力矩平衡方程为

$$F_{x2} r = T_{j2} + T_{f2} = T_{f2} + J_2 \frac{d\omega_2}{dt}$$

由此可得
$$F_{x2} r - T_{f2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \quad (5)$$

从式(4)和(5)可以看到, 当轮胎处于稳态自由滚动状态时, 其线加速度和角加速度必定为零, 从而作用在从动轮上的力矩之和必定为零。这是一个重要信息, 在 Abaqus 软件中进行轮胎滚动分析时, 只要控制作用在车辆参考点上的力矩为零, 就可以得到稳态滚动状态。可以从式(5)得到自由滚动状态下从动轮上的地面切向力:

$$F_{x2} = \frac{T_{f2}}{r} = F_{z2} \frac{e}{r} = F_{f2} \quad (6)$$

式中, F_{z2} 就是轮胎滚动阻力, 轮胎的滚动阻力系数就是 e/r 。由此可见, 自由滚动时作用在轮胎上的地面切向力等于轮胎的滚动阻力, 式(6)也正是 ISO 28580:2009 中所给出的力法测量轮胎滚动阻力的原理。

由式(5)求出运动状态的 F_{x2} , 并将其代入式(4)可以得到

$$F_{p2} = F_{f2} + \frac{J_2}{r} \cdot \frac{d\omega_2}{dt} + m_2 \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

1.2.2.2 驱动轮

为了求驱动轮上的地面切向作用力 F_{x1} , 先考虑整车的受力平衡, 由整车受力分析可得

$$F_{p1} = F_{p2} + F_w + m_B \frac{dv}{dt} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)可得

$$F_{p1} = F_{f2} + F_w + \frac{J_2}{r} \cdot \frac{d\omega_2}{dt} + (m_B + m_2) \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

由驱动轮的受力平衡可得

$$F_{x1} = F_{p1} + m_1 \frac{dv}{dt} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)可得

$$F_{x1} = F_{f2} + F_w + \frac{J_2}{r} \cdot \frac{d\omega_2}{dt} + (m_B + m_2 + m_1) \frac{dv}{dt} \quad (11)$$

式(11)中的 F_{x1} 就是作用在驱动轮上的地面切向力,当匀速自由滚动时,惯性力项和旋转惯性阻力项都为零,此时作用在驱动轮上的驱动力为

$$F_{x1} = F_{f2} + F_w \quad (12)$$

由驱动轮的力矩平衡得

$$T_t = T_{f1} + T_{f2} + F_{x1}r = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + T_{f1} + F_{x1}r \quad (13)$$

从而可以进一步得到

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = T_t - T_{f1} - F_{x1}r \quad (14)$$

当匀速行驶时,角加速度等于零,作用在轮胎上的合力矩等于零,此时:

$$T_t = T_{f1} + F_{x1}r \quad (15)$$

将式(12)代入式(15),得到匀速行驶时发动机提供的驱动力矩:

$$T_t = T_{f1} + (F_{f2} + F_w)r = T_{f1} + T_{f2} + F_w r \quad (16)$$

式(16)说明匀速直线行驶时发动机提供的驱动力矩主要用来抵消轮胎的滚动阻力矩和空气阻力矩。

从上述分析得出结论:轮胎做匀速滚动时,作用在轮轴上的力矩之和等于零,从动轮上的地面切向力等于轮胎滚动阻力;驱动轮上的地面切向力等于从动轮的滚动阻力加空气阻力。

2 轮胎自由滚动状态的子程序求解方法

采用 Abaqus 有限元软件进行轮胎稳态自由滚动过程仿真通常分三步:首先给定轮胎的制动角速度 ω_1 和驱动角速度 ω_2 ,采用这两个角速度利用 Abaqus 软件的 * STEADY STATE TRANSPORT 功能进行轮胎的驱动和制动过程仿真;然后打开 ODB 文件,得到扭矩和角速度之间的关系数据,导入到 Excel 文件作出扭矩-角速度关系图,并得到近似的关系式,通过求解这个关

系式得到扭矩为零时的角速度;最后将该角速度作为稳态自由滚动角速度重新进行稳态自由滚动状态的仿真计算,从而得到稳态下的轮胎变形和受力。

上述方法的缺点是步骤较多、所需计算时间较长,通过曲线拟合的方法得到的自由滚动角速度存在一定的误差。下面介绍采用子程序进行稳态自由滚动状态求解的方法,Abaqus 软件中也提供了该方法的简单例子,本工作在 Abaqus 例子的基础上进行了进一步完善。

2.1 Abaqus 用户子程序和应用程序接口

Abaqus 软件提供了 71 个用户子程序接口 (user subroutine),其中用于 standard 分析的有 51 个,用于 explicit 分析的有 20 个,这些用户子程序可以完成边界条件、材料模型、加载方式等各种用户自定义功能。用户子程序是用户根据自己的需要采用 Fortran 语言编写的一组用户代码,在一个算例中可以包括多个用户子程序,这些子程序必须封装在同一个以 .for 为扩展名的 Fortran 文件中。应用程序接口是用户用来访问 Abaqus 核心的一个程序接口,它只能被访问,不能被编辑,用户不能对应用程序接口编写代码。

2.2 稳态自由滚动状态求解所用到的用户子程序和应用程序接口

稳态自由滚动状态的求解用到 Abaqus 的 2 个用户子程序 (urdfil 和 umotion) 及 2 个应用程序接口 (dbfile 和 posfil)。

2.2.1 用户子程序 urdfil

urdfil 用户子程序用来在分析过程中访问结果数据文件,采用 dbfile 和 posfil 两个应用程序接口来访问结果数据文件,从中提取有用的信息,然后执行一定的操作。它可以用来得到感兴趣的结果,也可以用来根据结果判断是否允许程序继续运行,如果不需继续运行,可以终止整个程序的运行。稳态自由滚动的求解正是利用该用户子程序来提取程序运行中的轮轴点扭矩,然后判断扭矩是否达到设定的计算精度,从而命令程序终止运行。该用户子程序的通用代码为

```
SUBROUTINE URDFIL(LSTOP,LOVRWRT,
  KSTEP,KINC,DTIME,TIME)
  INCLUDE'ABA_PARAM.INC'
```

```

DIMENSION ARRAY(513), JRRAY(NPR-
  ECD,513), TIME(2)
EQUIVALENCE(ARRAY(1), JRRAY(1,1))
      用户自定义代码部分
RETURN
END

```

上述代码中用户只可以在用户自定义部分进行编辑,其他部分是该子程序与 Abaqus 求解主程序的接口,不可删除、更改。

用户调用该子程序是为了从结果数据文件中读取有用信息,然后对该信息进行处理,从而用这些信息控制 Abaqus 分析过程的运行。用户需要通过编程确定如下变量的取值并返回到主程序。

LSTOP——该变量用来控制 Abaqus 程序是否继续进行,如果用户通过信息处理和判断,认为不需要继续计算,则令 $LSTOP=1$,Abaqus 读到这个信息后就会终止分析过程。

LOVRWRT——该变量控制像结果文件写数据的方式,如果 $LOVRWRT=1$,表示后来的数据覆盖原先的数据,以节省空间。该变量一般缺省是覆盖的,用户可以不去操作这个变量。

DTIME——该变量表示时间增量,用户可以根据自己的需要设置大小。

其他变量和数组都是 Abaqus 主程序传递来的数据,比较重要的是 **KSTEP** 和 **KINC**,分别表示当前分析步序号和当前增量步序号。**ARRAY** 数组和 **JRRAY** 数组分别用于从结果数据文件中读取节点编号、单元编号、应力、应变、位移等各种有限元分析信息。

2.2.2 用户子程序 umotion

umotion 子程序用来给指定节点的指定自由度施加角速度(稳态滚动分析)或者施加位移(腔体热辐射分析)。该用户子程序的通用代码为

```

SUBROUTINE UMOTION(U, KSTEP, KINC,
  TIME, NODE, JDOF)
INCLUDE 'ABA_PARAM. INC'
DIMENSION U, TIME(2)
      用户自定义代码
RETURN
END

```

其中 **U** 是用户根据计算过程得到的数据信

息进行确定的一个变量,它是该子程序向 Abaqus 主程序传递回去的唯一变量。其他 **KSTEP**, **KINC** 和 **TIME** 等都是 Abaqus 主程序传递到子程序中的。

2.2.3 应用程序接口 dbfile 和 posfil

应用程序接口 **dbfile** 和 **posfil** 在子程序 **urdfil** 中被调用。

dbfile 接口是从结果数据文件*.fil 中读取数据记录,有 3 个参数,第 1 个参数是用户指定的,如果是零,表示从当前指针位置读取数据,如果是 2,表示在读取数据前先将文件指针回卷到文件开头。数组 **array** 是读取到的一组数据,包含了各种信息,详细说明可参见 Abaqus 帮助文档。**jrkd** 是文件末尾标识,如果还没有读到文件末尾,那么 **jrkd** 的返回值为零,否则不为零。

posfil 接口用来确定数据记录位于结果数据文件*.fil 的位置,具体是返回 **jrkd** 的值。

这 2 个应用程序接口总是成对出现的,调用方法为

```

call dbfile(2,array,jrkd)
call posfil(kstep,k1,array,jrkd)

```

2.3 采用子程序求解稳态自由滚动状态的程序流程

上述用户子程序 **urdfil** 和 **umotion** 是封装在同一个名称为 **freeroll.for** 的 Fortran 程序文件中的,在自由滚动状态求解的 **inp** 文件中,用户子程序是采用 ***TRANSPORT VELOCITY,USER** 格式被调用的,在 **inp** 文件提交计算时其命令格式为

```

abaqus job = rollingtire _ freeroll user = free-
roll.for int

```

任务提交后,Abaqus 首先对子程序文件 **freeroll.for** 进行编译,然后进入正常计算,当 $inc=0$ 时不调用 **freeroll.for**,当 $inc=1$ 并且进入确定滚动角速度环节时开始调用 **freeroll.for**,调用 **freeroll.for** 的过程就是先后调用 **urdfil** 和 **umotion** 两个用户子程序的过程。注意应先调用 **urdfil**,然后调用 **umotion**,2 个都调用完成后返回到 Abaqus 主程序运行。

调用 **urdfil** 和 **umotion** 的唯一目的是确定下一次迭代计算的角速度。

3 算例及与试验结果对比分析

轮胎自由滚动状态的计算可以得到轮胎的各种信息,包括整体稳态变形、轮胎周向各截面变形、动半径、有效滚动半径、自由滚动角速度、稳态滚动接地印痕和压力分布、扭矩随角速度的变化及内部各层材料的应力应变等。

根据 ISO 颁布的最新轮胎滚动阻力试验标准 ISO 28580,轮胎以规定负荷、标准速度 ($80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) 在转鼓试验机上进行滚动阻力试验时,可以直接得到轮胎的动半径,它等于轮胎轴心到转鼓面的垂直距离^[11],由于滚动阻力试验过程就是一个稳态自由滚动过程,因此可以以相同的充气压力、载荷、速度条件进行自由滚动仿真,将自由滚动仿真的动半径与试验动半径进行比较,验证仿真结果的可靠性。

本研究以 205/55R16 子午线轮胎为例,进行静态充气、静态加载(平直路面和转鼓路面)、驱动制动(平直路面和转鼓路面)、自由滚动(平直路面和转鼓路面)7种工况的分析,并将充气外缘尺寸、自由滚动的动半径与试验数据进行对比。轮胎静态充气外缘尺寸试验数据和稳态滚动试验数据来源于山东出入境检验检疫局检验检疫技术中心(以下简称青岛商检局)所提供的试验报告。

3.1 有限元模型和边界条件

本研究轮胎二维和三维有限元模型如图 4~6 所示,二维模型共有 642 个 rebar 单元用来模拟骨架材料,1 042 个橡胶实体单元用来模拟橡胶。三维模型轴向等分成 120 份,因此三维模型的总单元数达到 202 080。

计算加载条件:轮辋类型 6.5 J,充气压力 210 kPa,负荷 4 821.6 N,速度 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, ω_1 和 ω_2 分别为 70.540 和 $73.524 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,自由滚动的角速度由子程序计算。

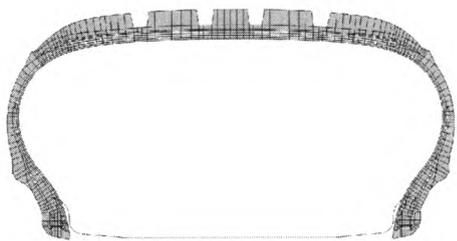


图 4 轮胎二维有限元模型



图 5 平直路面上轮胎三维有限元模型

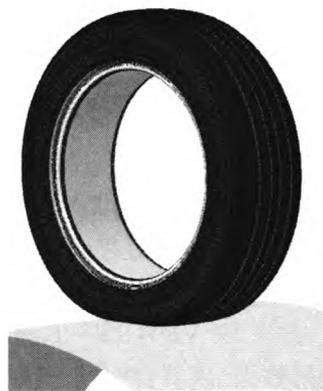


图 6 转鼓面上轮胎三维有限元模型

3.2 结果与讨论

3.2.1 轮胎充气外缘尺寸

轮胎充气状态的半径和断面宽的仿真结果与试验结果对比如表 1 所示。

表 1 充气状态轮胎外缘尺寸和质量对比

项 目	材料分布图	仿真	试验(商检结果)
充气半径/mm	314	314.6	315.2(3次平均)
充气断面宽/mm	228	215.0	215.2(3次平均)
质量/kg		9.84	9.40

从表 1 可以看出,充气状态轮胎半径仿真结果比试验值小 0.6 mm,而断面宽小 0.2 mm,可以说精度非常好。轮胎质量比实测值大 0.44 kg,这是由于模型中只考虑了纵向花纹沟而没有考虑横向花纹沟所致。

3.2.2 自由滚动状态下轮胎的动半径、有效滚动半径和角速度

自由滚动状态下轮胎的动半径、有效滚动半径和角速度仿真与试验结果对比如表 2 所示。从表 2 可以看出,平直路面上轮胎动半径仿真结果

误差只有 0.03 mm, 在转鼓面上的误差为 1.42 mm, 试验结果与仿真计算结果非常接近。

表 2 自由滚动状态下轮胎的动半径、有效滚动半径和角速度仿真与试验结果对比

项 目	平直路面仿真	转鼓面仿真	转鼓面试验 (商检结果)
动半径/mm	289.75	288.30	289.72 (3次平均)
有效滚动半径/mm	306.062	304.281	
角速度/(rad·s ⁻¹)	72.607	73.032	

轮胎静态充气外缘尺寸和自由滚动状态的动半径仿真结果与试验结果均非常接近, 证明仿真方法是可靠的。

3.2.3 驱动、制动和自由滚动状态下轮胎整体变形对比

平直路面上制动、自由滚动、驱动状态下轮胎整体变形如图 7 所示。将 3 个状态的胎冠中心点的周向轮廓线叠加到一起观察不同状态对变形的影响, 如图 8 所示。

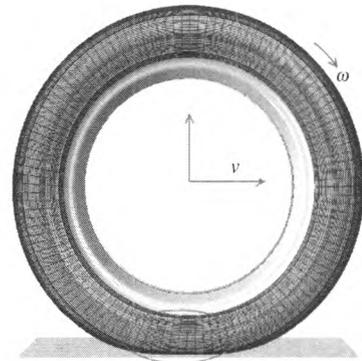
从图 7 和 8 可以看出, 当轮胎处于制动状态时, 整个轮胎的变形向后偏, 尤其是接地区域附近。当轮胎处于自由滚动状态时, 整体变形前后基本对称; 当轮胎处于驱动状态时, 整体变形向前偏。在转鼓面上, 轮胎的不同运动状态具有同样的现象, 这里不再赘述。

3.2.4 驱动、制动和自由滚动状态下轮胎垂直接地压力分布对比

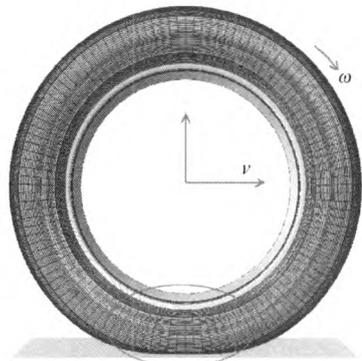
制动、自由滚动、驱动状态下轮胎垂直接地压力分布如图 9 所示。从图 9 可以看出: 在制动状态下, 垂直接地压力的等效作用中心偏向接地前端, 也就是偏向轮胎前进方向; 在自由滚动状态下, 垂直接地压力的等效作用中心也偏向接地前端, 但是不如制动状态明显; 在完全驱动状态下, 垂直接地压力的作用中心偏向轮胎接地后端。

把接触区域内的垂直接地压力分布沿轮胎横向等效到胎冠中心线上, 如图 10 所示。

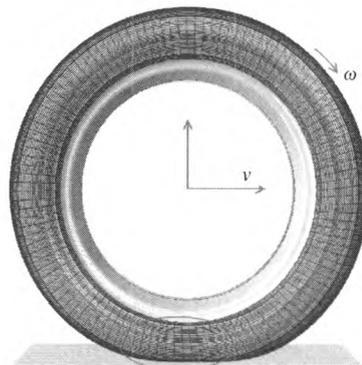
从图 10 可以更清晰地看出不同状态的垂直接地压力分布差异。静态接地压力曲线是前后完全对称的, 制动状态和自由滚动状态接地压力分布偏向接地前端(这与车辆动力学所述现象是一致的), 驱动状态则明显偏向后端。接地压力分布



(a) 制动状态



(b) 自由滚动状态



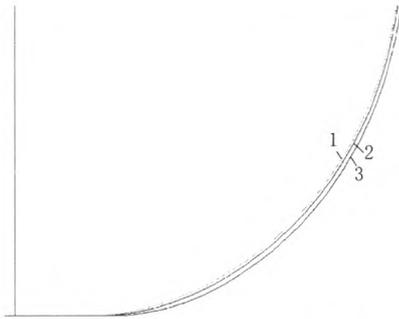
(c) 驱动状态

图 7 轮胎整体变形

偏向前端说明地面对轮胎会产生阻力矩, 接地压力分布偏向后端说明地面对轮胎会产生驱动力矩。从图 10 还可以发现, 静态接地印痕的纵向长度为 160 mm 左右, 而动态下纵向接地长度明显变短, 只有 130 mm 左右。

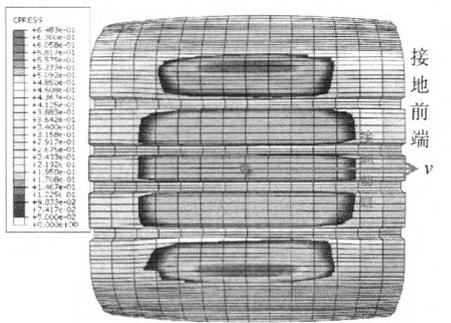
3.2.5 驱动、制动和自由滚动状态下轮胎纵向接地剪切应力对比

制动、自由滚动、驱动状态下地面对轮胎的纵向剪切应力分布如图 11 所示。

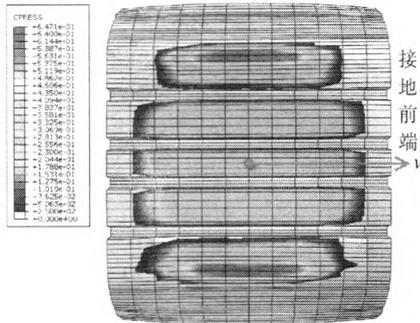


1—制动状态;2—自由滚动状态;3—驱动状态。

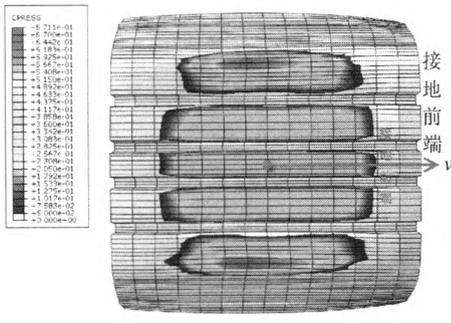
图8 胎冠中心周向轮廓接地区局部放大对比



(a) 制动状态



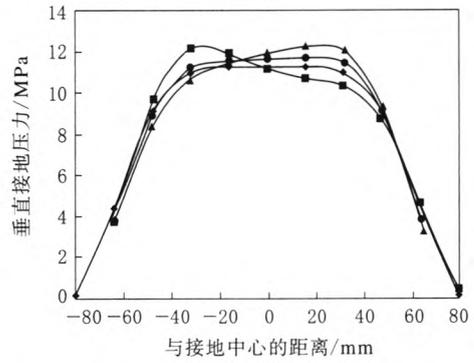
(b) 自由滚动状态



(c) 驱动状态

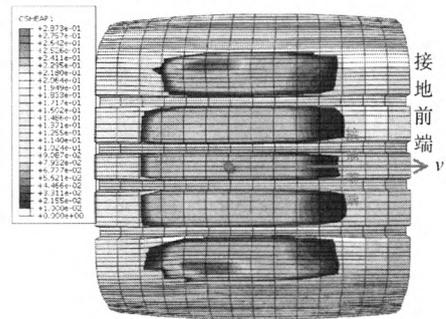
图9 轮胎垂直接地压力分布

从图 11 可以看出:制动状态下地面作用到轮胎上的剪切应力都是正值,也就是说剪切应力的

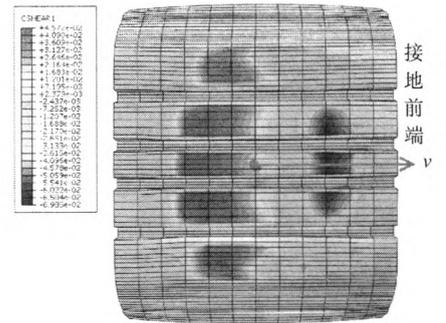


◆—静态;●—自由滚动;▲—制动;■—驱动。

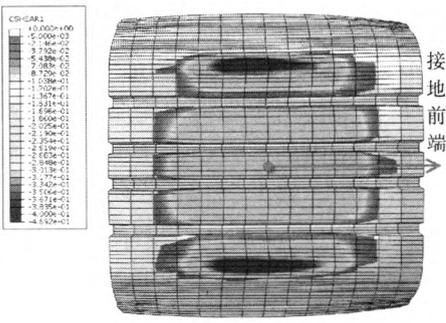
图10 静态、驱动、制动和自由滚动状态下轮胎垂直接地压力分布对比



(a) 制动状态



(b) 自由滚动状态

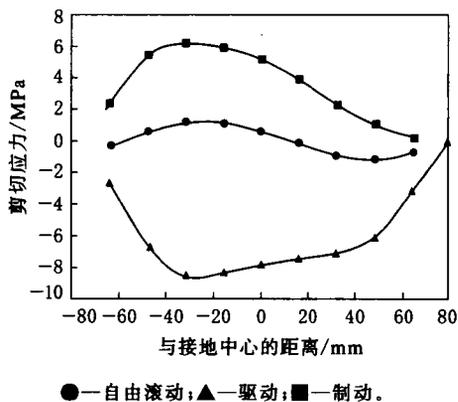


(c) 驱动状态

图11 轮胎纵向接地剪切应力分布

方向指向轮胎前进方向,剪切应力的合力将产生阻碍轮胎前进的阻力矩;驱动状态下地面给轮胎的剪切应力都是负值,也就是说剪切应力的方向与轮胎前进方向相反,剪切应力的合力将产生驱动力矩使轮胎加速前进;在自由滚动状态下,地面作用到轮胎上的剪切应力有正值也有负值,在接地后端大部分是正值,方向指向轮胎前进方向,将产生阻力矩,在接地前端大部分是负值,方向指向轮胎前进的反方向,将产生驱动力矩,而且剪切应力是正值的区域更多,也就是说此时阻力矩占主要地位,实际上这就是轮胎滞后作用产生的阻力矩,也就是轮胎的滚动阻力产生的阻力矩。

同样,把接地区内的每个截面的切向应力等效到胎冠中心线上,如图 12 所示。



●—自由滚动;▲—驱动;■—制动。
图 12 驱动、制动和自由滚动状态下轮胎纵向接地剪切应力分布对比

从图 12 可以看出,制动状态下轮胎剪切应力均为正值,自由滚动状态下剪切应力有正有负,但正的成分比较多,驱动状态下剪切应力均为负值。

4 结论

(1) 可以将作用在轮辋点上的合力矩等于零

作为控制参数,采用子程序方法进行稳态自由滚动状态的求解。

(2) 采用子程序方法可以实现自动求解稳态自由滚动状态,计算精度高,结果可靠。

(3) 驱动、制动、自由滚动状态下轮胎的变形和纵向剪切应力分布规律合理,进一步验证了子程序方法的有效性。

参考文献:

- [1] Pacejka H B. Tyre and Vehicle Dynamics[M]. Second Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006: 2-69.
- [2] 米奇克,瓦伦托维兹. 汽车动力学[M]. 4 版. 陈荫三,余强,译. 北京:清华大学出版社,2009:25-33.
- [3] 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社,2009: 25-142.
- [4] Wei Y T, Oertel C H. FE-based Prediction of Steady-state Tire Behavior. Part I: Structure Model and Interface[R]. Tire Technology EXPO 2011, 2011-02-15.
- [5] Zheng D. Prediction of Tire Tread Wear with FEM Steady State Rolling Contact Simulation[J]. Tire Science and Technology, 2003, 31(3): 189-202.
- [6] Michael K, Zheng D. Efficient Steady-state Rolling Simulation up to High Speed with Dissipative Tire Characteristics[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 40(Suppl.): 175-194.
- [7] 危银涛, 闫相桥, 王友善, 等. 汽车轮胎滚动接触非线性有限元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(2): 42-46.
- [8] 闫相桥. 子午线轮胎稳态滚动的有限元分析[J]. 轮胎工业, 2007, 27(6): 323-328.
- [9] 冯希金, 赵书凯, 李东林, 等. 185/70R14 轮胎的稳态滚动仿真分析及试验对比研究[J]. 橡胶工业, 2009, 56(8): 484-487.
- [10] 王友善, 吴健, 刘连波. 全钢载重子午线轮胎的稳态分析[J]. 轮胎工业, 2008, 28(11): 669-672.
- [11] Passenger Car, Truck and Bus Tyres—Methods of Measuring Rolling Resistance—Single Point Test and Correlation of Measurement Results[S]. ISO 28580: 2009.

收稿日期: 2013-03-10

Study on Mechanics of Steady State Free Rolling Tires

FENG Xi-jin^{1,2}, WEI Yin-tao¹, ZHENG Xiao-gang¹, LI Hong-wei², HE Jiong-hao²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Tire Technology Alliance Co., Ltd, Qingdao 266061, China)

Abstract: The kinetic characteristics of the steady state free rolling tire were discussed firstly, then the force and moment characteristics of the rolling tire and the moving vehicle were analyzed, the balance conditions of the forces and moments of the steady state free rolling tire were obtained, and the

boundary and initial conditions were established in order to apply the FEA method to investigate the steady state of a free rolling tire. Using the subroutine method of Abaqus software, in-house software was developed by using Fortran code to analyze the steady state of a free rolling tire and deliver the results automatically, which improved the computational efficiency and tolerance. The comparison of the numerical data and experimental test results verified the reliability of the method. Furthermore, the forces and deformation of the tire in three conditions (driving, braking and free rolling) were discussed, which further confirmed the effectiveness of the method, and provided guidance for the research of the tire dynamics in the tire/road contact area.

Key words: tire; free rolling; subroutine method; finite element analysis

异戊橡胶困局待解

中图分类号: TQ333.3 文献标志码: D

尽管我国天然橡胶(NR)自给率仅30%,但目前作为替代品的异戊橡胶(IR)企业的日子却很不好过。截至2013年6月底,IR每吨价格降低至1.7万元,创近2年半来新低。目前国内IR装置整体开工率维持在两成以下,有的生产厂家利润已经极低。

我国20世纪60年代开始研究开发IR,但直至2010年才有工业化生产装置,之后我国IR才开始踏上市场开拓的征途。但短短几年间,影响IR盈利的因素就开始显现。相关专家呼吁,要登上IR产业快速前进的列车,满足不断发展的市场需求,需要统筹考虑NR市场、原料、市场开拓等因素的影响,充分做好市场调研,考量好自身优势,谨慎布局,切忌一哄而上、盲目入市。

IR行情走低的首要原因是NR市场不断下跌。由于IR受NR需求影响较大,价格走势与NR的相关度也非常高,NR价格低时,IR的市场价格也会下滑,反之,其生产和应用及市场价格也会大幅回升。

NR的供应受地理位置和气候条件等多种因素影响,加上现在NR具有的期货金融属性,NR的供应和价格走势很难把握,给IR市场需求、市场价格、装置盈利水平带来不确定影响。

另外,IR技术待消缺,产品性能待完善,产品质量还有待进一步提高。我国虽然在稀土IR的研究开发方面取得了很大进展,但是目前合成IR技术还不完善,通过稀土催化合成的IR与NR在性能上还有差距,其顺式1,4-结构质量分数、胶液粘度、门尼粘度等性能指标还有待改善。目前,

IR顺式1,4-结构质量分数普遍在0.95左右,而NR顺式1,4-结构质量分数达到0.99。今后IR生产企业应当通过进一步优化催化剂和工艺,提高顺式1,4-结构的质量分数到0.98,降低粘度,提升IR的综合性能。

IR的原料异戊二烯成本高,是国内产品推广的难题。采用液相法生产异戊二烯单体,即采用异丁烯与甲醛一步法生产异戊二烯,可以联产不同的产品,异戊二烯单体的成本可以大大低于C₅热裂解生产异戊二烯单体的成本,是很有前景的技术,但仍存在技术难题。

近几年,IR被业内外看好,2011年6月1日国家发改委发布施行的《产业结构调整指导目录(2011年本)》,把IR列为鼓励类项目,许多专家也呼吁应该加大该产品的生产,导致国内资本投入IR行业的热情高涨,许多企业准备新建或扩建装置,扩能增速。2012年年底国内装置产能还是7.5万t,到2013年上半年就达到了15.5万t。预计到2015年,国内投产的新装置产能可达39.5万t,较现有产能还要翻一番。

我国NR进口量大,而IR是NR的最佳替代产品,从长远看替代NR的市场潜力是有的。但是,潜在的消费量并不是实际的消费量,不能简单按比例替换,而且IR还面临其他合成橡胶的竞争。

从市场应用来看,IR主要用于两个领域,一是轮胎,二是胶管、胶丝等浅色领域。应用在浅色领域的IR,国内一直依靠进口,国内IR完全工业化才3年,用户接受有一个过程。对处于市场初步开发阶段的IR来说,只有技术完善、降低生产成本、拓展应用服务同步走,才能加快市场推广进程。

(摘自《中国化工报》,2013-07-15)