

用显式有限元程序分析轮胎转向模拟

Kazuyukikabe 著 朱文华 刘 锋摘译 赵树高校

有限元方法已在轮胎工程中得到了广泛的应用。因为轮胎是最复杂的非线性结构之一，所以大部分有限元方法的轮胎模拟是静态分析。

例如，子午线轮胎由平行于轮胎横断面的帘线胎体层、周向环绕轮胎的带束层和挺性胎面胶构成。轮胎在一定条件下与路面滚动接触。近来，为了精确预测轮胎的响应，已用显式有限元程序进行瞬态分析研究。

在本篇文章中，首先阐述了轮胎有限元分析的特性和轮胎分析的显式有限元程序的潜能，评价轮胎有限元模型的稳定性。在这一轮胎模型中，橡胶部件采用实体单元而纤维增强橡胶部件用壳单元。橡胶材料具有超弹性材料的性能，纤维增强橡胶被认为是复合材料模型。将轿车轮胎的预测转弯侧向力与使用平带式轮胎试验装置 (MTS Flat-Trac Tire Test Systems) 测得的实验结果进行了对比。与应用显式有限元方法相比，轮胎转向模拟的测试是很费时的。

1 轮胎的特性

轮胎的基本功能如下：

- (1) 承受负荷；
- (2) 传递牵引力、转向力和制动力；
- (3) 提供缓冲作用；
- (4) 提供路面抓着力。

除了以上 4 种功能外，轮胎还需具有许多其它性能，如：良好的驾驶响应、足够的里程、尺寸稳定、耗能低、噪声和振动小等。为满足这些功能，轮胎形成了由橡胶和帘线构成的薄壁复合材料环形壳结构，它具有高的柔韧性和相对不可伸张性。

这种轮胎的特性如下(如图 1 所示)：

- ® 大变形和大应变；
- ® 橡胶的不可压缩性；

- ® 橡胶和帘线的材料非线性；
- ® 复合材料结构；
- ® 橡胶的粘弹性；
- ® 轮胎使用中的滚动接触。

当用有限元方法进行轮胎分析时，轮胎对道路响应的分析应当考虑这些特性。

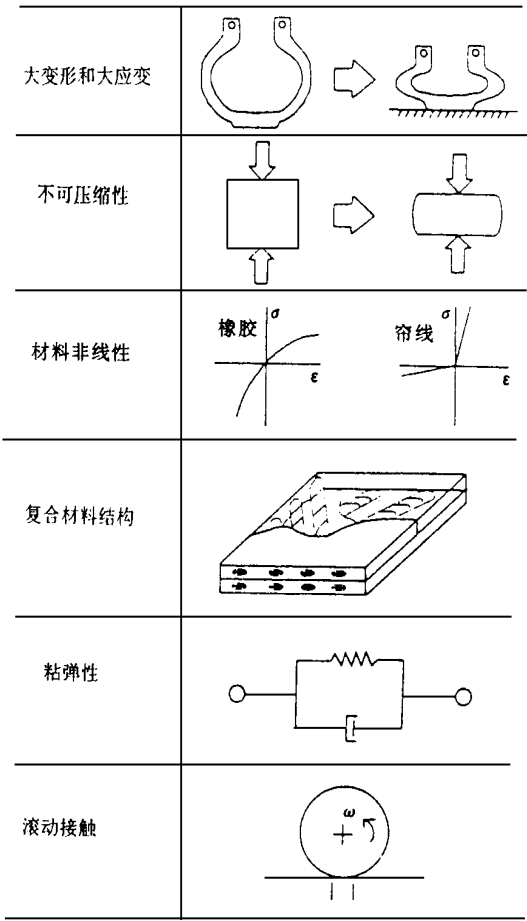


图 1 轮胎的特性

2 轮胎分析的有限元方法

近来，已研究了显式有限元分析程序的瞬态分析。为了计算滚动轮胎的动态响应，提出了两种不同的分析方法。一种方法是隐式时间积分技术：采用一定的动力学关系计算稳定状态下的滚动轮胎动态响应，如 Faria 提出了具有

摩擦阻力的滚动接触问题的稳定状态公式,可以进行自由滚动、转向、加速和制动分析。另一种方法是显式时间积分技术,如作为商业软件的 LS/DYNA3D 和 PAM-SHOCK。Kamoulakos 和 Kao 研究了在有楔障的自由转鼓上的轮胎滚动的瞬态动力响应。

下面将阐述显式有限元程序和 PAM-SHOCK 模拟轮胎转向的潜能。

3 显式有限元方法的转向模拟

3.1 有限元模型

轮胎有限元模型的断面如图 2 所示,规格为 175SR14,其三维有限元模型如图 3 所示。橡胶部分,包括胎面胶和胎侧胶,采用实体单元。纤维增强橡胶复合材料,包括带束层和胎体层,采用多层壳单元。模型中采用 Belytschko-Wong-Chiang 单元。如图 2 所示,在胎

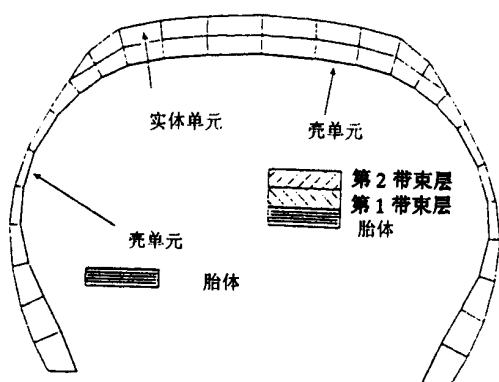


图 2 轮胎有限元模型断面

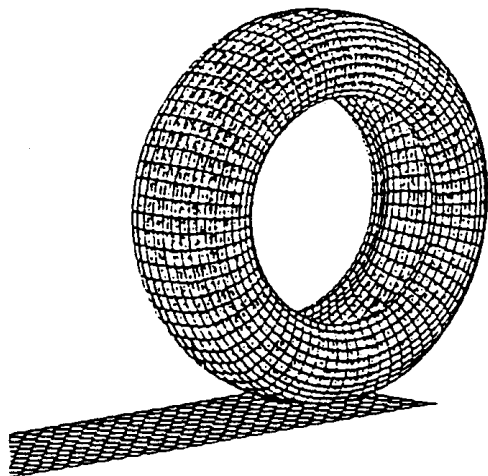


图 3 三维轮胎有限元模型

冠部,这些单元包括 3 层:胎体、第 1 带束层和第 2 带束层;在胎侧部,这些单元由胎体层构成。这一模型有 5 580 个单元和 5 670 个节点。为节省 CPU 时间(机时),采用这种有限元模型不能充分计算轮胎的详细响应,如应力和应变分布。

橡胶材料的性能用 Mooney-Rivlin 超弹性材料模型表示。纤维增强橡胶复合材料的性能用多层双相正交材料模型表示,其中纤维的压缩模量假定为其拉伸模量的 5%。路面假定为刚性表面。根据 MTS Flat-Trac Tire Test Systems 实验结果,摩擦因数被定为 1.0。

转向模拟的轴向系统如图 4 所示。充气压力(200 kPa)和垂直负荷(3.3 kN)同步加载于轮胎。它们在 0.3 s 内逐步增加到指定值。轮胎模型与移动路面接触,其移动速度为 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。路况和边界条件与实验条件相同。为达到一定侧滑角度下的转弯侧向力,模拟需要重复进行。每次模拟耗时 1.2 s,轮胎转动 1.5 c。

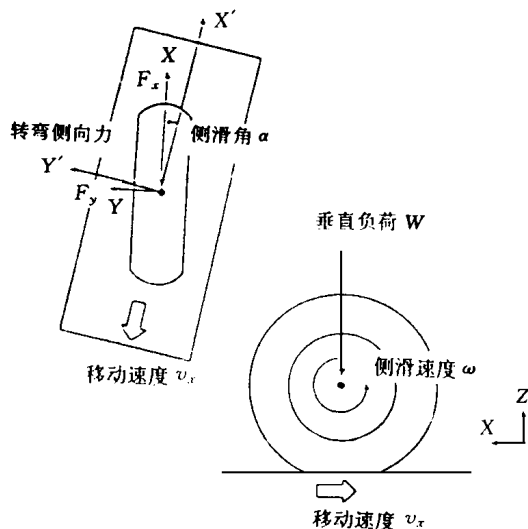


图 4 轮胎轴向系统

3.2 多层单元的特性

多层单元通常用来模拟轮胎的增强层。评定了 3 种类型有限元的特性:薄膜单元、4 节点壳单元和 3 节点壳单元。从两个方面来检验:有限元的数值稳定性和模拟轮胎角度效应现象的能力。沙漏与缩减积分单元相比有其特有的数值不稳定性。另一方面,轮胎的角度效应是由带束层的角度引起的。另外,在 0 侧滑角

下,角度效应引起了非零转弯侧向力。如表 1 所示,从数值稳定性和潜能两方面考虑,轮胎的转向模拟采用 3 节点壳单元最为有效。图 5 所示的是 4 节点壳单元模拟的增强层沙漏,沙漏产生于带束层端部。

表 1 多层单元的特性		
单 元	沙漏	角度效应
薄膜单元	无	无
4 节点壳单元	有	有
3 节点壳单元	无	有

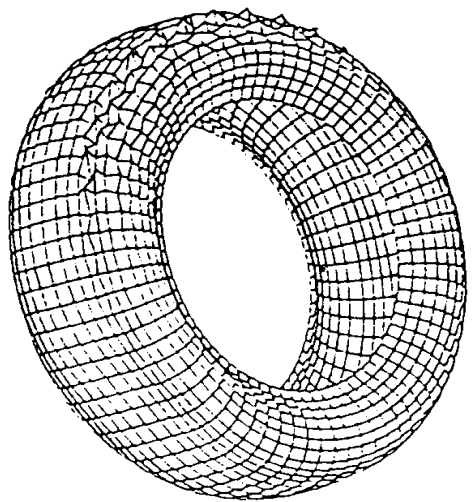


图 5 4 节点壳单元轮胎模型增强层的沙漏

4 结果与讨论

图 6 所示为在不同侧滑角度下转向时的轮胎变形情况。观察图中 0° 侧滑角下的结果,由于轮胎的角度效应,滚动轮胎被扭转,轮胎有限元模型中的水平直线变形后不再保持直线状态。

图 7 所示为外部载荷加载 0.3 s 后,计算转弯侧向力随时间的变化历程。0.4 s 后,转向力保持恒定。自此,假定计算转弯侧向力为稳定区的平均值。

图 8 所示为计算的转弯侧向力与用 MTS Flat-Trac Tire Test Systems 实验所得数值的比较。在 0° 侧滑角时,由于角度效应,轮胎有非零转弯侧向力。虽然轮胎有限元模型比较粗糙,但研究结果与实验结果还是相一致的。

使用两种计算机,一种为 IBM RS6000 工作站,另一种为 Fujitsu VX-2 向量计算机。VX-2 的速度大约为 RS6000 的 5 倍。VX-2 模拟 1.2 s 内的动力响应大约需要 7 h (而 RS6000 工作站需要 32.5 h),与其它显式有限元方法相比用时还是较长。可是计算费用在不

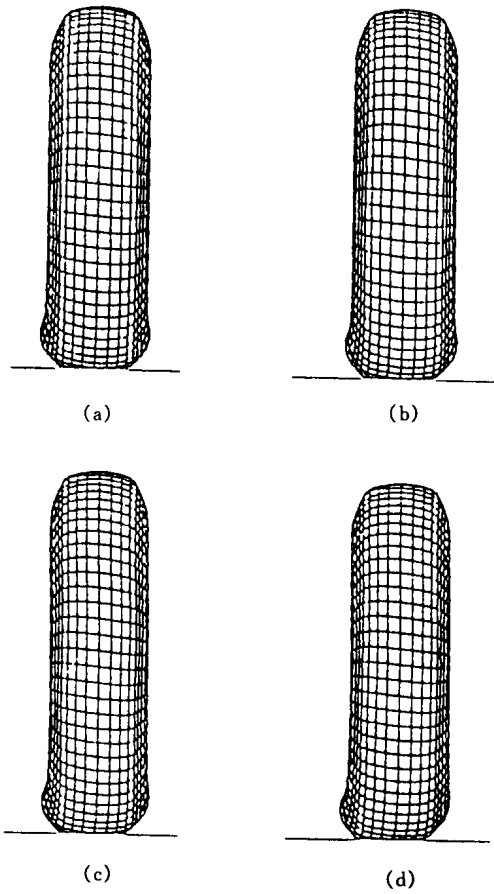


图 6 不同侧滑角转向时轮胎的变形
侧滑角:(a)0°;(b)1.0°;(c)2.0°;(d)3.0°

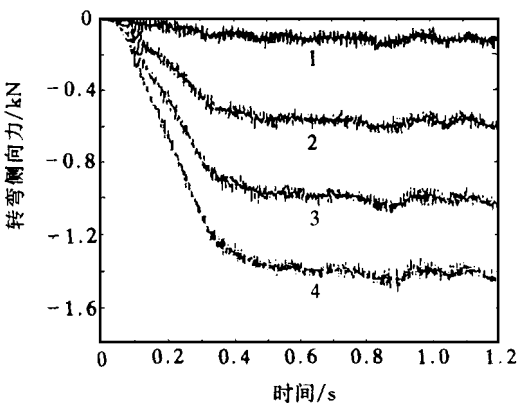


图 7 转弯侧向力(计算值)随时间的变化
侧滑角:1-0°;2-1.0°;3-2.0°;4-3.0°

久将会得到解决。

5 数值分析和参数研究

5.1 充气压力的影响

图9所示为在垂直负荷3.3 kN和移动速度 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 条件下,充气压力分别为200和230 kPa时计算和实验转弯侧向力的对比。转弯侧向力随着侧滑角度的增大而线性增大,高充气压力引起高的转弯侧向力。计算和实验结果具有相同的趋势。

图10所示为充气压力对侧偏刚度的影响。

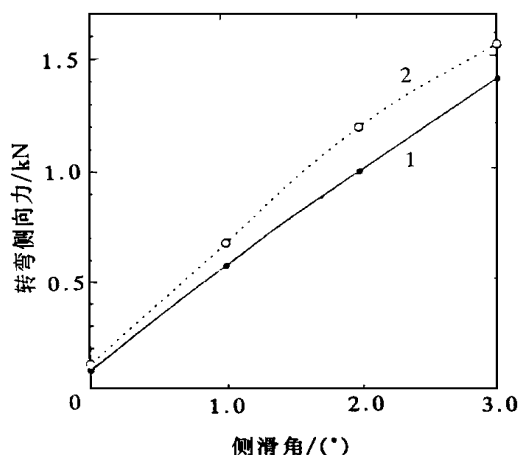


图8 转弯侧向力的计算值与实测结果的比较

负荷 3.0 kN, 气压 200 kPa, 速度 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

轮胎规格 175SR14。

1—有限元计算值, 2—实测值

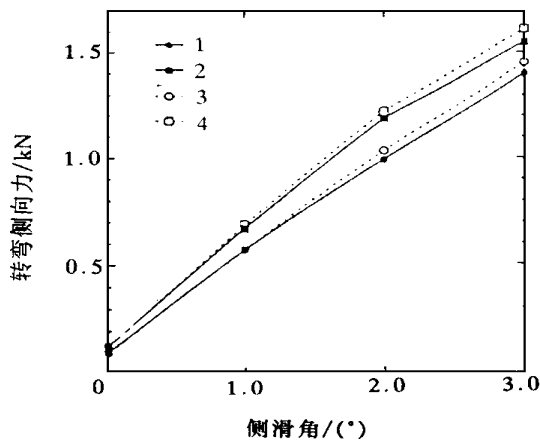


图9 气压对转弯侧向力的影响

负荷 3.3 kN, 速度 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1—气压 200 kPa, 有限元计算值; 2—气压 200 kPa,

实测值; 3—气压 230 kPa, 有限元计算值;

4—气压 230 kPa, 实测值

侧偏刚度定义为1侧滑角时的转弯侧向力。垂直负荷小于3.0 kN时,侧偏刚度随垂直负荷的增加而线性增加;垂直负荷大于3.0 kN时,侧偏刚度保持不变或降低。另外,垂直负荷小于3.0 kN时,高的充气压力导致低的侧偏刚度。在这一范围内,高的侧偏刚度由长的接触长度引起。另一方面,垂直负荷大于3.0 kN时,高的充气压力导致高的侧偏刚度。在这一范围内,高的侧偏刚度由轮胎的高刚性引起。模拟结果与实验具有好的关联性。

5.2 带束层角度的影响

图11所示为在垂直负荷3.3 kN、充气压

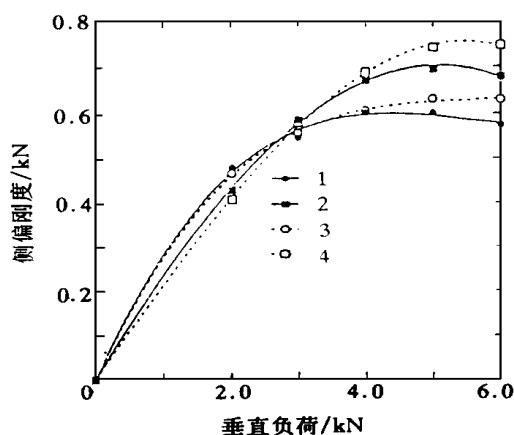


图10 气压对侧偏刚度的影响

速度 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1—气压 200 kPa, 有限元计算值; 2—气压 200 kPa,

实测值; 3—气压 230 kPa, 有限元计算值;

4—气压 230 kPa, 实测值

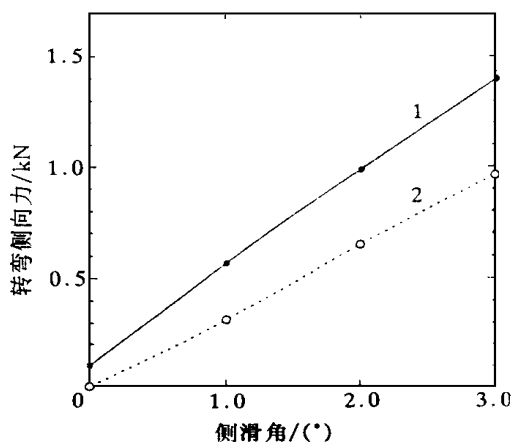


图11 带束层角度对转弯侧向力的影响

负荷 3.3 kN, 气压 200 kPa, 速度 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1—带束层角度 $\pm 20^\circ$; 2—带束层角度 0°

力 200 kPa、移动速度 10 km h^{-1} 条件下,两种不同带束层结构的计算转弯侧向力,其带束层角度分别为 20° 和 0° 。 0° 带束层轮胎的转弯侧向力为 20° 带束层轮胎的 67%,这由轮胎接触长度的不同引起。

5.3 橡胶模量的影响

图 12 所示为橡胶模量对转弯侧向力的影响。图中,高橡胶模量导致高转弯侧向力,转弯侧向力与橡胶模量成比例。模拟结果与实验结果定性相一致。

6 结论

提出了用显式有限元分析程序进行轮胎转向模拟。转弯侧向力的计算结果与实验结果有好的一致性。证明了可用显式有限元分析程序进行轮胎的转向模拟。

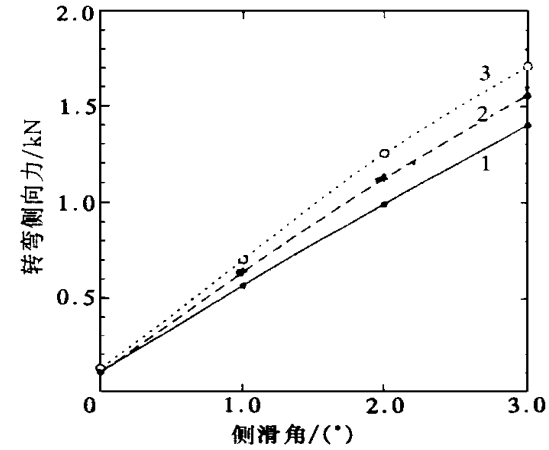


图 12 橡胶模量对转弯侧向力的影响
负荷 3.3 kN,气压 200 kPa,速度 10 km h^{-1} 。
1 — $E_r = E_0$, 2 — $E_r = 1.5 E_0$,
3 — $E_r = 2.0 E_0$
译自 '97 国际橡胶会议论文集,
P883~889

《橡胶工业》《轮胎工业》荣获
支持首都教育事业发展奖

北京市工商行政管理局广告管理服务中心于 1999 年 3 月 5 日在北京龙泉宾馆召开了支持首都教育事业先进单位表彰大会。会上,北京电视台、北京广播电台、北京橡胶工业研究设计院(《橡胶工业》《轮胎工业》编辑部)和《北京日报》、《北京青年报》、《北京广播电视报》、《北京法制报》、《人才市场报》、《电脑爱好者》、《支部生活》、《为你服务》、《安全技术与防范》、《饲料与喂养》、《国际电子测量》、《收藏家》、《市委前线》、《舞魂》等报纸和杂志的出版部门共 20 个单位获得了支持首都教育事业发展奖。

为支持教育事业,北京市政府于 1997 年发布了 9 号令,规定从电视、报纸和杂志等传播媒体的广告收入中抽取 5%(1998 年调整为 2%)来资助本市的教育工作。从 1994 年至今,北京市在广告收入方面上缴的用于北京市教育事业发展的税费已达 1.65 亿元。这笔费用主要用于高中部的教学和设备更新改造及扩大高中部招生比例,并力求尽快在全市普及高中教育,从而全面提高北京市的教育和文化水平。

《橡胶工业》《轮胎工业》能够荣获支持首都

教育事业发展奖,是对《橡胶工业》《轮胎工业》及其广告工作的认可,我们也为两刊为首都教育事业作出了一定贡献,并能与北京电视台、北京广播电台及诸多著名大报和杂志出版单位并列获奖而感到欣慰。

(本刊编辑部 张惠清供稿)

1999 年我国汽车产量预测

车 型	产量/万辆	占总产量比例/ %
汽车总计	170	100
货车	68	40
重型	3.57	2.1
中型	20.06	11.8
轻型	29.58	17.4
微型	14.79	8.7
客车	47.6	28
大型	0.55	0.3
中型	1.87	1.1
轻型	18.7	11
微型	26.48	15.6
轿车	54.4	32
中高级	0.68	0.4
中级	35.19	20.7
普通	4.93	2.9
微型	13.6	8

{摘自《汽车与配件》,[5],2(1999)}