

负重轮实心橡胶轮胎滚动状态下接触三维有限元分析

崔玉福 郑慕侨

(北京理工大学车辆工程学院 100081)

摘要 分析负重轮实心橡胶轮胎的三重非线性,论述了相应的有限元分析方法;建立了轮胎几何模型和超弹材料模型,并利用三维非线性有限元分析软件,分析了某履带运输车负重轮轮胎滚动状态下接触区的应力、应变及变形。

关键词 有限元,实心橡胶轮胎,非线性,接触,应力-应变

高速履带车辆负载大,工况恶劣,其负重轮轮胎受力复杂,较其它部件易损坏。传统的轮胎结构设计采用经验与试验方法,有一定的局限性。目前,开始愈来愈多地采用有限元方法对轮胎进行应力-应变分析,进而进行温度场及寿命分析等,为轮胎结构设计提供有效的理论依据。

1 负重轮实心橡胶轮胎的三重非线性及有限元分析方法

负重轮实心橡胶轮胎(以下简称实心轮胎)具有三重非线性,即材料非线性、几何非线性和接触非线性。

1.1 材料非线性

材料非线性是指材料应力与应变呈非线性关系^[1],实心轮胎橡胶材料特性模拟抽象为超弹性;其应变能函数表征为应变或变形张量的纯量函数,应力表征为应变能函数对应变的偏导数;实心轮胎橡胶材料在变形过程中体积没有明显变化,具有材料不可压缩性。

根据橡胶分析唯象学理论,采用 Mooney Rivlin 材料模型,材料应变能 w 为^[2]

$$w = \sum_{i=0}^2 C_{ij} (I_1 - 1)^i (I_2 - 1)^j \quad (1)$$

式中 C_{ij} ——材料常数;

I_1, I_2 ——应变恒量,

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3}$$

其中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为变形率, $\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1$ 。

橡胶类超弹性材料应力表征为应变能函数对应变的偏导数,其本构方程为

$$S_{ij} = \frac{\partial w}{\partial E_{ij}} \quad (2)$$

式中 S_{ij} ——克希霍夫应力;

E_{ij} ——格林 (Green) 应变张量的分量。

有限元分析中,式(2)可导出超弹性材料本构矩阵,并应用于三维有限元分析中。

1.2 实心轮胎几何非线性及有限元分析方法

几何非线性是指研究对象的应变与变形关系呈现非线性,只能用大应变理论进行研究。实心轮胎运转过程中变形较大,对于本研究的某履带运输车,变形高达 15%,特殊工况下变形更大,呈现出严重的几何非线性。

目前,几何非线性有限元分析方法有多种。对于本研究的某履带运输车,着重研究变形结果,发生大变形卸载后结构恢复原形,

作者简介 崔玉福,男,27岁。北京理工大学车辆工程学院博士生。

可采用全拉格朗日 (TL) 法:采用参照描述法,以未变形时结构构形 $0f$ 为参照构形,推导出非线性平衡方程。

根据虚功原理,结构变形在 $t + t$ 时,格林应变与克希霍夫应力间的关系为

$$\int_{0v} {}^{t+t} {}_0 S_{ij} {}^{t+t} {}_0 E_{ij} dV = {}^{t+t} {}_0 w \quad (3)$$

根据 t 时刻与 $t + t$ 时刻的格林应变和克希霍夫应力的表达式,式(3)整理为

$$\int_{0v} ({}^{t+t} {}_0 S_{ij} + {}_0 S_{ij}) ({}^{t+t} {}_0 E_{ij} + {}_0 E_{ij}) dV = {}^{t+t} {}_0 w \quad (4)$$

式(4)的最终矩阵形式表为

$$([K]_0 + [K] + [K]_L) \{q\} = \{F\} + \{T\} - \{P\} \quad (5)$$

式中 $[K]_0$ ——切线刚度矩阵,表征载荷增量与位移的关系;

$[K]$ ——初应力刚度矩阵或几何刚度矩阵,表征在大变形情况下初应力对结构的影响;

$[K]_L$ ——初位移刚度矩阵或大位移刚度矩阵,表征大位移引起的结构刚度变化;

$\{q\}$ ——节点坐标增量矢量;

$\{F\}$ ——体载荷矢量;

$\{T\}$ ——面载荷矢量;

$\{P\}$ ——应力在节点上的等价合力矢量。

式(5)即为几何非线性 TL 法有限元方程。

1.3 实心轮胎接触非线性及有限元分析方法

在车辆行进过程中,负重轮实心轮胎与履带之间不断进行分离、接触、分离,接触问题边界条件不断变化,形成动态接触问题,导致在有限元分析中节点刚度矩阵和组集总体刚度矩阵是节点位移的函数,随节点位移变化而变化,呈现非线性。

本研究从变分原理出发,导出了采用拉

格朗日乘法与罚函数法构成的混合法,它很好地结合了二者优点,在两接触体分离开启时,采用罚函数法;闭合粘式接触时采用拉格朗日乘法;闭合滑移接触中,法向采用拉格朗日乘法,切向采用罚函数法。

根据拉格朗日乘法与罚函数法构成的混合法原理,由变分原理知,系统总势能为

$$= E + W + Q \quad (6)$$

式中, E , W 和 Q 分别为系统内力势能、外力势能和接触力势能。

$$Q = \int_C \{F\}^T \{g\} dC + \frac{a^*}{2} \int_C \{g\}^T \{g\} dC \quad (7)$$

式中 C ——接触边界条件;

$\{F\}$ ——接触力向量,相当于拉格朗日乘子, $\{F\} = \{F_t, F_n\}^T$
 t 和 n 分别表示切向和法向;

$\{g\}$ ——接触间隙向量, $\{g\} = \{g_t, g_n\}^T$;

a^* ——罚函数因子。

随接触状态变化,式(6)取变分及驻值:

$$= E + W + \int_C \{F\}^T \{g\} dC + \frac{a^*}{2} \int_C \{g\}^T \{g\} dC = 0 \quad (8)$$

接触体离散化后,由上式导出以各节点位移和接触力为未知量的有限元平衡方程。

2 有限元建模与求解

本研究利用 ANSYS 分析软件对某履带运输车负重轮实心轮胎进行了三维有限元分析。此负重轮轮胎结构尺寸为:内径 $D_1 = 0.59$ m,外径 $D_2 = 0.65$ m,宽度 $H = 0.09$ m。

2.1 几何建模

履带运输车负重轮的主要作用是支撑车体、减振降噪,是从动轮,故不受扭矩作用。作用于负重轮上的载荷(车体作用于负重轮

的垂向载荷、负重轮的离心惯性力) 是对称的, 负重轮胎的结构也是对称的, 因此取半个轮胎为研究对象。为了便于分析和建模方便, 将半个轮胎的内缘加以固定约束, 断面处加滑动约束, 从履带板下面加均布载荷, 而均布载荷合力为负重轮所承受总载荷的一半; 对轮胎施加转速, 与质量矩阵形成惯性力, 作用于轮胎上 (施加轮胎转速等效于局部坐标系旋转)^[3,4], 如图 1 所示。



图 1 负重轮受力示意图

负重轮实心轮胎仅在接地区产生较大变形、应力和应变, 而在非接触区较小, 因此取负重轮接地区前后的 60° 为研究对象, 进行有限元分析, 以减小计算规模, 同时保证分析精度。本研究所采用的几何模型见图 2。

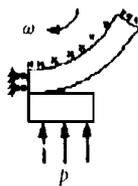


图 2 有限元分析几何模型

2.2 单元生成

负重轮具有三重非线性。采用三种单元进行滚动模拟。

Solid 45 是六面体八节点实体单元, 用于模拟履带板单元; Hyper 58 是六面体八节点单元, 用于模拟三维超弹性材料实体结构, 进行实心轮胎橡胶材料单元计算, 很好地解决了轮胎的大变形及大应变几何非线性; Contac 49 是点-面接触五面体通用接触单元, 用于模拟三维空间中两接触面间的接触

和滑移行为, 解决了负重轮轮胎与履带板间滚动接触问题。

负重轮轮胎 30° 接触区内是研究重点, 从理论上分析, 该范围内应力应变最大, 因此此处网格划分加密, 以提高分析精度, 生成 Hyper 58 超弹性单元。钢板粗分, 形成 Solid 45 单元。选择接触节点及目标面, 使接触点投影完全落在相应的目标面内, 形成接触单元 Contac 49。这样, 网格划分、单元生成符合有限元分析疏密原则, 有限元建模合理。

接触单元实常数的选取具有较高技巧性, 分析者需具有一定的非线性有限元分析经验, 选取不合适, 将导致 CPU 运行时间过长或收敛失败。

2.3 有限元约束加载与求解

根据几何建模分析知, 实心轮胎与轮辋结合处节点 X, Y, Z 三方向施加零约束; 实心轮胎上端因变形、应力、应变均较小, 可以忽略, 故上端面节点 X, Y, Z 三方向也施加零约束; 在实心轮胎接触区下端面, 由于结构对称性, 端面切向不发生任何变形, 故施加 Z 向零约束; 均布载荷 p 作用于钢板下表面; 轮胎转速为 ω (即局部坐标系绕轴心线旋转); 有限元单元划分如图 3 所示。

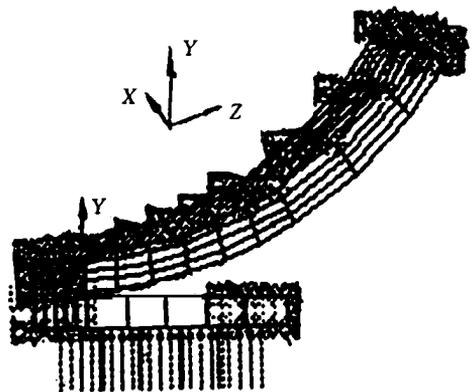


图 3 有限元单元划分

橡胶材料常数为: $C_1 = 0.604\ 4\ \text{MPa}$, $C_2 = 0.328\ 9\ \text{MPa}$ (试验测得); 泊松比 $\nu = 0.499\ 7$ 。

钢板材料常数为: 杨氏模量 $E = 2 \times 10^5$

MPa,泊松比 $\nu = 0.33$ 。

接触单元常数为:法向刚度 $k_s = 2 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$;粘性刚度 $k_N = 2 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$;法向穿透容差为 $D_{\text{ToIn}} = 0.02$;接触点偏离容差 $D_{\text{ToIs}} = 0.01$;动静摩擦因数比 $f = 1.2$ 。

均布载荷 $p = 0.3 \text{ MPa}$,其合力等于每个负重轮所承受的载荷。

转速 $\omega = 29.92 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ (即车辆行驶速度为 $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)。

利用 ANSYS 有限元分析软件求解器进行运算。模型具有 341 个单元,422 个节点,在奔腾-166/32 微机上运行 35 min (图 1 所示的半个轮胎模型计算需 80 min)。

3 有限元分析结果

3.1 轮胎变形分析

履带输送车辆实心轮胎(负重轮)的变形主要发生于负重轮与履带板的接触区域(以下简称接地区)。

图 4 为接地区中心断面的 Y 向变形。图中黑色三角区变形最大,最大值为 4.5447 mm 。由图 4 可知,在轮胎接地区中心断面的中心宽度线上具有最大的变形,同时具有最大的变形梯度(即在轮胎径向单位长度上的变形量);这是因为轮胎存在工艺拔模斜度,轮胎外缘尖端最先与履带板接触。

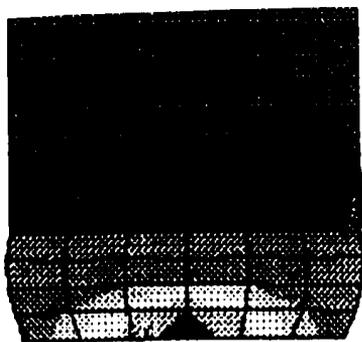


图 4 轮胎接地区中心断面 Y 向变形

图 5 为接地区最大位移与载荷的关系曲线。由图 5 可知,位移随着载荷的增大而增大。载荷较小时,压缩变形(位移)增长很快;

随着载荷增大,变形速度减小。由弹性力学分析,一方面加载初期与履带板接触的橡胶较少,位移的增大趋势大于载荷的增长趋势;随着载荷的增大,参与接触的橡胶增多,总刚度增大,导致位移的增大趋势小于载荷的增长趋势。这反映了轮胎的接触非线性。另一方面,由于橡胶材料本身的特性,在参与接触的橡胶不变情况下,其刚度也随着载荷增大而增大,从而使变形增大趋势减小,这反映了轮胎的材料非线性。

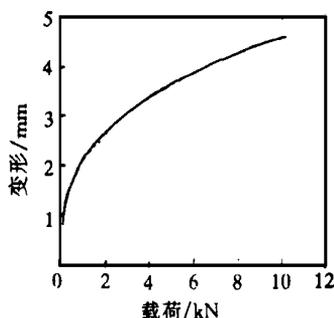


图 5 轮胎接地区最大位移与载荷的关系

3.2 轮胎应力和应变分析

图 6 和 7 为轮胎接地区中心断面 Y 向应力和应变。图中黑色区数值最大,图 6 中最大应力为 2.33 MPa ,图 7 中最大应变为 24.919% 。由图 6 和 7 及其它分析结果看出,接地区轮胎 Y 向应力集中区形状为椭球状,应变集中区形状为细长橄榄状;应力、应变最大值处于中心断面中心宽度的平均半径或略偏外处;同时该处散热条件最差,从而导致负重轮轮胎运行过程中此处产生热,温度过高而出现爆胎现象。因此,负重轮轮胎

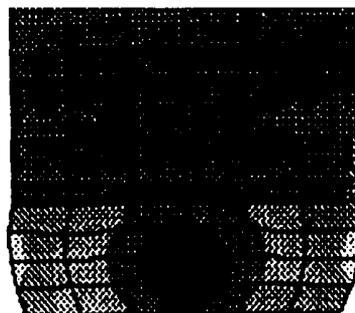


图 6 轮胎接地区中心断面 Y 向应力

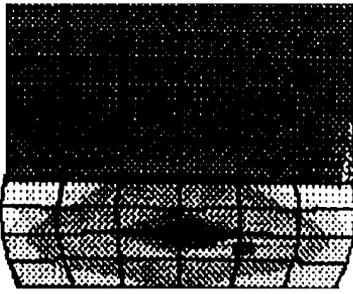


图 7 轮胎接地区中心断面 Y 向应变

的结构设计、材料配方应以降低轮胎最大应力、应变为标准,从而降低负重轮轮胎温度,提高负重轮轮胎寿命。应力和应变研究结果对于轮胎温度场研究、寿命分析是非常重要的。

3.3 轮胎应力、应变和位移与车速的关系

图 8 为轮胎最大应力、应变和位移与车速的关系曲线。由图 8 可知,轮胎接地区最大应力、应变和位移均随车速升高而减小,这与试验结果相一致。由弹性力学分析,车速升高,轮胎离心惯性力增大,接触区橡胶离心扩张趋势增强,从而使负重轮升高,导致轮胎接触区应力、应变和位移不同程度减小。

作为特例,轮胎静止时($\omega = 0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$),接触区最大位移 $y = 4.782 \text{ 44mm}$,最大应

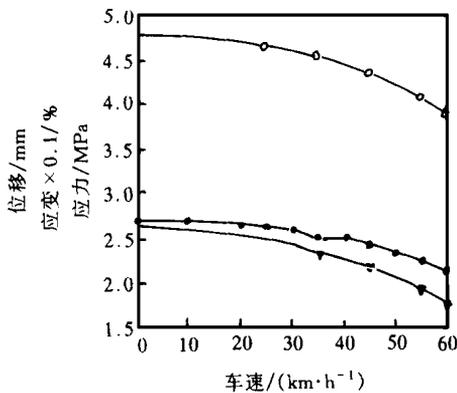


图 8 轮胎最大应力、应变和位移与车速的关系

°—位移; □—应变; ▼—应力

力 $\sigma_y = 2.624 \text{ 1 MPa}$, 最大应变 $\epsilon_y = 26.924 \%$; 轮胎滚动时 ($\omega = 29.92 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$), 最大位移 $y = 4.544 \text{ 7 mm}$, 最大应力 $\sigma_y = 2.33 \text{ MPa}$, 最大应变 $\epsilon_y = 24.92 \%$, 最大位移、应力和应变均减小。而实际现象为: 车辆静止时轮胎下沉量较大, 行驶时轮胎有上浮现象, 轮胎下沉量变小, 最大位移变小, 从而应力和应变减小, 二者一致。这说明: 有限元分析是正确的; 负重轮滚动过程中由于轮胎橡胶的粘弹滞后特性, 交变的应力、应变导致负重轮轮胎温度升高, 故滚动状态下的应力、应变分析结果应用于温度场分析, 寿命分析较静止状态下分析结果更符合实际, 结果将更准确。

4 结论

- (1) 负重轮实心轮胎的有限元建模、约束与加载是合理的, 大大减小了计算规模, 提高了分析效率和精度;
- (2) 负重轮轮胎滚动状态下有限元分析结果与实际相吻合, 是可信的, 有实用价值;
- (3) 负重轮轮胎结构优化设计、温度场分析、寿命分析应以滚动状态下分析结果为基础。

参考文献

- 1 何君毅, 林祥都. 工程结构非线性问题的数值解法. 北京: 国防工业出版社, 1994
- 2 弗雷克利 P K, 佩恩 A R. 橡胶在工程中应用的理论与实践. 杜承泽等译. 北京: 化学工业出版社, 1985
- 3 Kags H. Stress analysis of a tire under vertical load by a finite element method. Tire Science & Technology, TSTCA, 1977, 5(2): 102 ~ 118
- 4 Shiobara H. One-dimensional contact pressure distribution of radial tires in motion. Tire Science & Technology, TSTCA, 1995, 23(2): 116 ~ 135

收稿日期 1997-12-14

Three Dimensional FE Analysis of Load Bearing Tire in Contact Area under Rolling Condition

Cui Yufu and Zheng Muqiao

(Beijing University of Science and Technology 100081)

Abstract The three fold non-linearity of load bearing solid rubber tire is analysed and the corresponding FE analysis method is described; the geometric model of tire and the model of super elastic material are established; and the stress, strain and deformation of the load bearing tire on a track type truck in the contact area under the rolling condition are analysed with a three dimensional non-linear FE analysis software.

Keywords FE, solid rubber tire, non-linear, contact, stress-strain

固特异的轿车轮胎钢丝帘线

美国《橡胶和塑料新闻》1998年2月16日7页报道:

固特异宣称,其新开发的轿车轮胎钢丝帘线可改善轮胎的耐疲劳性、均匀性、胎面磨损和车辆操纵性能。这种称作超强力钢丝帘线(Ultra-Tensile Steel)的产品已获得了专利权,它将取代人造丝和聚酯并扩大轮胎胶料、部件和设计的选择余地。

该公司开始将把这种质量轻的钢丝帘线用于今春投放市场的 Eagle F1 全钢 EMT(跑气保用技术)轮胎和 Aqasteel 牌号的跑气保用轮胎上。这种材料最终将扩大用于轻型和中型载重轮胎。到 2003 年固特异生产的轮胎中将有 75% 采用跑气保用技术。

固特异跑气保用轮胎的研究推动了将新的轮胎帘线材料用于轿车轮胎胎体和其它部件。新帘线材料可提供跑气保用轮胎所需的结构整体性,而且使用钢丝帘线可不再受海外人造丝生产厂的支配。人造丝以及聚酯和尼龙的性能都不能与固特异的超强力钢丝帘线相比。

迄今,在轿车轮胎中,钢丝帘线只能用于

带束层,而不能用于胎体。固特异的工程师通过采用独特的化学处理、专利拉丝模和热处理工艺,生产出质量小但强力比汽车轮胎用普通钢丝帘线高 40% 的钢丝帘线。固特异拔丝工艺拉拔的钢丝直径仅有 0.0036 mm,即人头发的 2 倍。用 30 根这种钢丝就可以吊起一辆轿车。

超强力钢丝帘线可使胎面磨损性能提高 30%,可提供高性能轮胎需要的低弯曲刚度和在零压下可以 88 km 的时速行驶 80 km 的跑气保用轮胎所需的高尺寸稳定性。

由于种种原因,包括可在较大规格的轿车轮胎和轻型载重轮胎中用一层帘布代替两层帘布,材料的质量和成本下降了。

固特异的发明得到了很好保护,关于钢丝帘线和最近宣布的 IMPACT 单元集合加工工艺,固特异已获得了 100~200 个专利。

在轮胎行业,竞争对手往往花不了多长时间就可以克隆出另一家公司的技术成果。但就超强力钢丝而言,固特异的大量专利和专利制造技术以及专供不外卖制度可使该公司在相当长一段时间内保持竞争优势。

(涂学忠摘译)