

子午线轮胎自动化设计单元和 受力状态的计算

Белкин А. Е. ин др. 著 俞 淇译 唐云峰校

摘要 介绍计算子午线轮胎生热与应力-应变用的 CASCAD 软件包。轮胎应力-应变计算模型以非线性壳理论为基础,既考虑了胎体与带束层的各向异性,又考虑了与路面接触中的大位移。认为负荷下轮胎运行时材料部位的周期性应力是生热的原因。该项问题用稳态下二维轴对称模型来求解。所有的几何前处理在 AUTOCAD 软件包中完成。

在解决缩短新方案轮胎开发周期的迫切任务中,建立自动化设计系统居于首要地位。莫斯科汽车公路学院开发出供准备子午线轮胎设计文件及进行应力-应变和生热状态计算用的固定目标的程序包 CASCAD。

应用该软件包可按下列程序运行:自动绘制模型轮胎断面及材料分布图;准备供下一步进行应力状态计算用的轮胎几何模型;在充气 and 按给定接地面分布的径向力压缩下轮胎受力状态的计算;以求出实际接地面积和实际接地压力分布以及对印痕周围的轮胎状态进行修正为目的的接触问题的解答;计算轮胎装配在轮辋上的胎圈间距的变化和此因素对轮胎变形状态的影响;处理滚动过程

中的轮胎应力变化周期,以找出结构上的危险区并对其应力程度加以评价;计算转动一圈轮胎体积中所损耗的能量以及滚动能量的损失和阻力系数的大小;计算轮胎的生热和温度场。

下面简单分析一下其中的某些程序。

1 轮胎断面图的自动绘制

在 AUTOCAD 软件包中可进行轮胎断面的自动绘图。为绘出参量断面图,此软件包中编制了人机对话的用户菜单。图 1 示出的是绘图的一些阶段。结果是生成传输给程序包的计算程序的带有轮胎几何尺寸的输出文件。

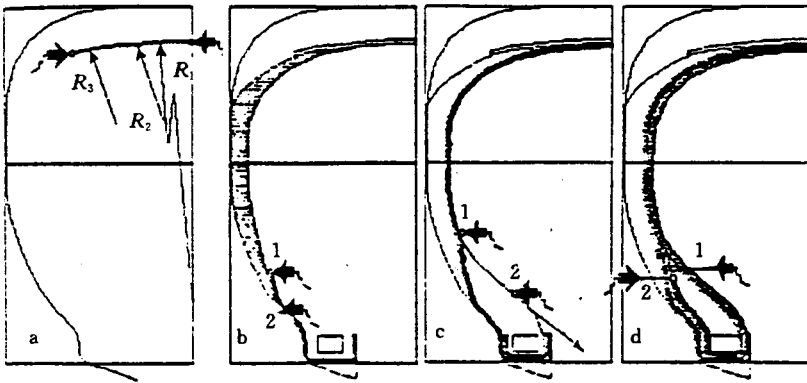


图 1 自动绘图的一些阶段

(a)包括带束层基线布置的外胎内轮廓;(b)添加胎侧橡胶件和胎圈包布;
(c)确定胎体帘布反包层的基线;(d)布置钢丝圈外包布

2 负荷状态的基本平衡方程及其解法

为了计算子午线轮胎的受力状态,采用三层正交各向异性薄壳模型作为基本模型^[1]。可以认为薄壳的行驶面部分是由二层模拟胎体和带束层的硬薄膜层和夹于它们之间的一层柔软橡胶隔离层组成。这样,在所采用的模型中,多层的胎体和带束层实际上是由具有从实际橡胶帘布层有关数据基础上得出的广义力学性能的叠合层所代替。胎圈部位也采用同样的三层方案,这里的胎体层和反包到钢丝圈上的帘布层是由橡胶件隔开的。

现列出在 CASCAD 软件包中使用的三层薄壳的方程式^[2]。这个方程式包括适用于胎体大位移的变形方程式

$$\begin{aligned} \epsilon_{1(k)} &= e_{1(k)} + 0.5(\omega_{1(k)}^2 + \theta_{1(k)}^2) \quad (1 \Leftrightarrow 2) \\ \gamma_{12(k)} &= \omega_{1(k)} + \omega_{2(k)} + \theta_{1(k)}\theta_{2(k)} \quad (k=1,2) \\ \gamma_{13} &= x_1 - \theta_1 + \omega_1 x_2 \quad (1 \Leftrightarrow 2) \end{aligned} \quad (1)$$

胎体与缓冲层切线方向的平衡方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(rT_{1(k)}) + \frac{\partial}{\partial \varphi}S_{2(k)} - T_{2(k)}\cos\theta + \frac{rP_{1(k)}}{R_1} \\ \pm \frac{r}{h}(Q_1 + Q_2\omega_2) + rg_{1(k)} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial x}(rS_{1(k)}) + \frac{\partial}{\partial \varphi}T_{2(k)} + S_{2(k)}\cos\theta + \frac{rP_{2(k)}}{R_2} \end{aligned}$$

$$\pm \frac{r}{h}(Q_2 + Q_1\omega_1) + rg_{2(k)} = 0 \quad (k=1,2) \quad (2)$$

法向的平衡方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(rP_1) + \frac{\partial}{\partial \varphi}P_2 - r\left(\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} - g_3\right) = 0 \quad (3)$$

胎体和带束层中薄膜应力与橡胶隔离层侧向力的弹性关系式为:

$$\begin{aligned} T_{1(k)} &= C_{11(k)}\epsilon_{1(k)} + C_{12(k)}\epsilon_{2(k)} \quad (1 \Leftrightarrow 2) \\ S_{(k)} &= C_{33(k)}\gamma_{12(k)}, Q_1 = Ghr_{13} \quad (k=1,2) \end{aligned} \quad (4)$$

圆括号中 $k=1$ 的标记表示该数值是对应胎体的, $k=2$ 的标记表示该数值是对应带束层的,无标记的表示对应隔离胶。帘线-橡胶层的弹性系数按文献 3 的公式计算。

按上述方程式的轮胎计算分阶段来完成。第一阶段计算充气压力下轮胎的对称受力状态。非线性边值问题采用牛顿-坎托罗维奇逐步逼近法并结合数值积分法解决。第二阶段计算由负荷在接地面上引起的轮胎非对称受力状态。此时在充气轮胎受力状态的周边上要对方程式(1)~(3)进行线性化。为求解线性化的方程,采用单一三角级数法。当然,这种对数字模型的简略化会引起计算结果的误差。但是,对比子午线轮胎按非线性和按线性化理论计算的结果^[4]表明,这种误差

并不很大,而且简化的解法又具有实用价值。如果要求更精确,则在第三阶段用有限元法对从轮胎上截取的大位移部段进行计算^[2]。

3 接触问题的处理

稍微详细地分析一下轮胎压在平面或转鼓上的接触问题的解法。

将行驶面宽度所限区域的几何条件用下式表达:

$$f(x, \varphi) = \rho \cos \varphi - \nu \sin \varphi - \rho_0 - R_m + r \cos \varphi - rR^{-1} \sin \varphi (\rho \sin \varphi + \nu \cos \varphi + 0.5r \sin \varphi) = 0 \quad (5)$$

式中 $\rho(x, \theta)$ ——胎面胶各点的径向位移;
 $\nu(x, \varphi)$ ——胎面胶各点的周向位移;
 ρ_0 ——接地印痕中心的轮胎下沉量;
 R_m ——未变形轮胎的胎冠半径;
 r ——胎面任意一点到轮胎轴心的距离;
 R ——转鼓半径。

为了近似完成接触条件,可采用影响函数法。将轮胎行驶面部分平行地分割成 n 个小条,并假设接触压力在每一小条的整个宽度上不变。小条纵向压力变化规律的近似表达式为:

$$g_i = \begin{cases} q_i \Phi(\varphi, \alpha_i) & \text{当 } |\varphi| \leq \alpha_i \\ 0 & \text{当 } |\varphi| > \alpha_i \end{cases} \quad (6)$$

式中 q_i ——表示压力比例的参数;
 α_i ——第 i 个小条的接地纵向半角;
 $\Phi(\varphi, \alpha_i)$ ——预先给定的表示压力图形的周缘坐标函数。

根据已有的压力分布概念,作者在实际计算中应用了下列函数中的一种: $\Phi = 1 - (\varphi/\alpha_i)^2$, $\Phi = 1 - (\varphi/\alpha_i)^4$, $\Phi = 1$ 。

接地压力函数(6)包括两个未定参数 q_i 和 α_i , 这些参数的确定方法是,要使接触条件(5)能在第 i 个小条预先选好的两点(即所谓的配置节点)上得到精确的完成。

为了实行计算,将接地压力和轮胎位移函数展开为三角级数:

$$g_3 = q_i \sum_{k=0}^{\infty} g_k(\alpha_i) \cos(k\varphi)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^n \left[q_i \sum_{k=0}^{\infty} g_k(\alpha_i) \rho_{ik}(x) \cos(k\varphi) \right] \quad (7)$$

$$\nu = \sum_{i=1}^n \left[q_i \sum_{k=1}^{\infty} g_k(\alpha_i) \nu_{ik}(x) \sin(k\varphi) \right]$$

式中,压力的级数系数 $g_k(\alpha_i)$ 为未知自变量 α_i 的已知函数; $\rho_{ik}(x) \cos(k\varphi)$ 和 $\nu_{ik}(x) \sin(k\varphi)$ 为作用于行驶面第 i 个小条上的“单位”压力 $g_3 = 1 \cdot \cos(k\varphi)$ 引起的轮胎点的位移。

称为影响函数系数的 $\rho_{ik}(x)$ 和 $\nu_{ik}(x)$ 的计算方法是将轮胎按三层薄壳模型加以计算并补充以作为弹簧基础的胎面变形。然后借助影响函数将接触条件(5)列成方程。由于给定的接地压力分布的性质是近似的,所以方程(5)在整个接地区域内不可能同样地去完成。因此,在 n 个中的每一小条的两个配置点上规定出它的完成条件:

$$f(x_i, \varphi_1) = 0$$

$$f(x_i, \varphi_2) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中的 x_i 是配置点的坐标,为 $\varphi_1 = \eta_{i1} \alpha_i$, $\varphi_2 = \eta_{i2} \alpha_i$ 的第 i 个小条里面的平行线坐标。数值 $\eta_{i1}, \eta_{i2} \in [0, 1]$, 是该小条接地角 α 内配置点的相对坐标。

$2n$ 系统的非线性方程(8)供用牛顿法求解接地压力 $q_i, \alpha_i (i=1, 2, \dots)$ 的参数之用。如果这些参数求出,则采用已知的影响函数和将每小条上的压力的解加以叠加就可算出薄壳的位移、应变和应力。附表中对比了莫斯科轮胎厂的 165/80R14, 175/70R14 和 175/80R13 轮胎的一些可调整几何参数的计算值和实验值。

4 单数带束层的处理

子午线轮胎的带束层常常具有不成对的帘布层,它们可能放置在工作层的上边,即靠着胎面的一边,也可能在工作层的下面,即靠着胎体的一边。这些隔离层用来保护带束层不受损伤,或者用于使刚性从胎体到带束层

附表 计算结果与实验值的比较

轮胎规格	气压 P MPa	负荷 Q N	静半径 R_{CT} , mm	断面宽 B mm	接地印痕 尺寸(长×宽), mm
165/80R14	0.2	4260	284	189	190×107
			283°	191°	176×105°
175/70R14	0.2	4170	277	188	186×114
			278°	192°	180×115°
175/80R13	0.2	4120	279	195	178×116
			277°	196°	176×118°

* 实验值。

的变化更为平稳,以减轻带束层边部橡胶的受力。

带束层中具有不成对帘布层的轮胎的计算具有某些自身的特点。第一,不成对帘布层破坏了结构的正交各向异性,因为带束层的弹性主方向相对轮胎的经线与纬线出现了一定角度的转向,由于这种原因,在径向和周向上拉伸带束层,会伴随出现角变形,而剪切力作用则会伴随有线性变形。第2和3层薄壳模型用于具有非对称结构带束层子午线轮胎的计算是不合适的,这种模型在假设每一帘布层的变形都是均匀一致的基础上将带束层的所有帘布层合并成一层薄膜层。问题是,当将两个以上不同方向的帘布层进行这样的合并时,合并层的刚度明显高于实际的刚度,因为各参与组成的帘线形成刚性的三角形结构而不是菱形结构,即在合并层中会发生变形的“阻塞”效应。由于带束层每层帘布层覆胶的横向剪切变形,带束层的实际刚度小于代替它的薄膜的计算刚度。

为了对具有非对称带束层结构的子午线轮胎进行计算,在CASCAD软件包中列入了5层的薄壳模型^[5]。在这个模型中带束层由两层薄膜层组成,第1层包括对称裁断的工作层,第2层含有不成对的隔离层。

利用上述轮胎薄壳模型可计算出胎体和

带束层薄膜变形的帘布层方向的平均值,以及覆胶层剪切变形的厚度方向的平均值,因而也就能算出橡胶应力的主要分力和帘线的受力。

5 温度场的计算

滚动时应力的周期变化是轮胎结构单元生热原因。CASCAD软件包是在稳态滚动的假设条件下进行轮胎生热计算的。首先在所得出的车轮旋转一周的应力变化数据基础上算出轮胎三维有限元模型各节点上的生热,此模型是在薄壳模型上增添胎面和胎侧胶而建立起来的。然后用有限元法计算温度场。

计算生热时既要考虑能量在轮胎的橡胶体中的损耗,又要考虑能量在承力的橡胶/帘布层中的损耗。把单位体积中的能量损耗看作是与车轮旋转一周的单位变形能量成正比^[6]。橡胶部件(除胎面外)的单位变形能是在它们在垂直于胎体表面的方向上不被压缩的条件下计算的,胎面的压缩能按接触问题的解答结果来计算。在稳态滚动条件下轮胎接地面中的摩擦功对生热的影响不大,所以这个分量不予以考虑。

简要叙述一下轮胎温度场计算的主要思路。

轮胎的导热问题在二维稳态状况下进行求解,因为在轮胎旋转一周内轮胎任何一点上实际上并不存在温度的周期性变化^[3]。在轮胎的内外表面上都能构成与空气对流的热交换条件,热交换系数是根据气流的速度并按文献7给出的数据确定的。轮胎内腔中的温度按经验关系计算或预测^[8]。对向干道路表面的散热不予考虑^[7]。

解答此问题不仅可以确定燃料的经济性(内摩擦的总功率损耗)和滚动阻力系数,而且还可确定热源功率和温度在整个轮胎体积内的分布。

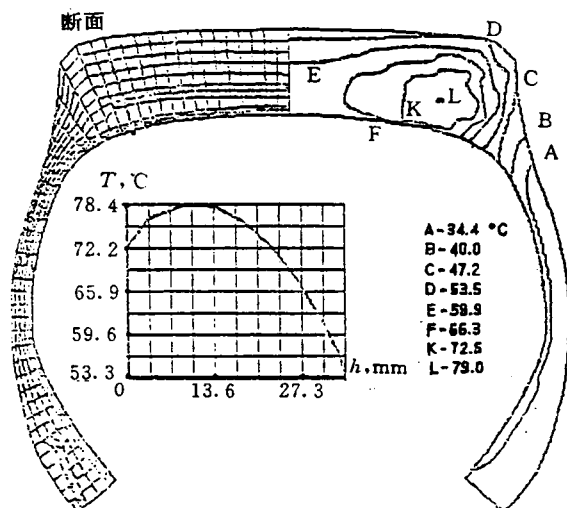


图 2 210-508P 载重子午线轮胎的温度等值线和
计算温度用的有限元网格图

利用 CASCAD 软件包已完成了许多轿车和载重车子午线轮胎的计算。最终得出的最高温度与载荷系数的关系与实际关系相接近,同时还应看到它们反映出了所用轮胎模型的特点和所采用的假设的作用。图 2 为在标准内压 0.6MPa、径向压缩力 12.5kN 和滚动速度 $40\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下载重子午线轮胎 210-

508P 的温度场计算结果。目前 CASCAD 程序包已在俄罗斯和乌克兰的 7 个轮胎厂中使用。

参考文献(略)

译自《1994 年国际橡胶会议论文集第 4 集》,56—63

国内消息

桂林轮胎厂向科技项目要效益

近年来,由于原材料价格不断上涨,致使轮胎生产非常困难。桂林轮胎厂面对 1995 年更为严峻的形势,集思广益,调动科技人员的积极性,深入挖潜,向科技项目要效益。工厂多次召开科技人员会议,从轮胎配方、设计、工艺等方面探讨改进方案和节约措施。针对天然橡胶价格仍居高不下的状况,工厂进一步增大各部件配方中合成橡胶的用量;继续扩大使用粗尼龙帘线和新的帘线品种;调整

半成品工艺标准;各部件减薄、减轻,以保证轮胎轻量优质。对于那些既可保证产品质量,又能降低生产成本的措施,则大力推广。如内胎生产配方,原来仅采用 10 份丁基再生胶,且只用于 6.50—16 以下的小规格内胎,现在扩大了丁基再生胶和三元乙丙橡胶的用量,并且用于所有规格的内胎。该厂将每项改进措施定为一个项目,每个项目都明确负责人。今年已实施和计划实施的项目共计 23 项,其中产品配方 11 项,设计 8 项,工艺 4 项,预计可节约金额约 1000 万元。

(桂林轮胎厂 吴苡仁供稿)