

结构设计

低断面轿车子午线轮胎 优化设计方法

何晓玫 刘天臣

(化工部北京橡胶工业研究设计院 100039)

摘要 介绍低断面轿车子午线轮胎的设计原理。它是以薄膜网络理论模型为基础,以带束层的压力分担率及胎侧胶加强部分的压力分担率为原则,根据三弧法的设计原理,利用 C 语言编制设计程序,并采用三维非线性有限元分析程序,高效地进行分析、计算和方案的优选,提供一套完整的设计分析程序。

关键词 低断面轿车子午线轮胎,有限元法,设计理论,压力分担率

1 子午线轮胎设计概况

子午线轮胎结构设计自 80 年代后有了很大的发展,尤其是电子计算机的推广和应用,使得由复合材料组成的轮胎的结构力学分析成为可能,并采用了三维有限元分析方法,模拟轮胎在各种滚动状态下的力学及热学行为,从而推出了许多新的设计理论,如 RCOT, DSOC, CSSOT 等。

国内轮胎设计基本上仍采用 50 年代前苏联传入我国的经验型轮胎结构设计方法(在施工设计时,采用薄膜网络理论计算骨架材料的安全倍数),以致从设计方面已经不能满足现代汽车工业对轮胎提出的要求,如更好的高速性能、抓着力、乘坐舒适性等。因此为提高我国原配胎的质量水平,满足汽车工业的要求,在 PDEP 设计理论^[1]的基础上,开发了该设计分析程序,对轮胎的使用性能提供预见性的数据。

2 低断面轿车子午线轮胎的设计

2.1 设计原理

众所周知,无带束层的子午线轮胎的充气形状,利用薄膜网络理论可以得出满意的解。根据该理论,无带束层子午线轮胎的断面形状计算公式为:

$$y = \int_{z_p}^z \frac{(z_m - z)dz}{[(z_m^2 - z_p^2) - (z_m^2 - z^2)]^{1/2}} \quad (1)$$

由上式可以得出冠部曲率半径为:

$$R_s = \frac{z_p^2 - z_m^2}{2z_p} \quad (2)$$

对无带束层子午线轮胎,其胎体胀大的自然断面形状为高度比宽度大,而低断面轿车子午线轮胎的特点为扁平化,因此它必须通过带束层的箍紧作用来实现,这样带束层必须承受较大的作用张力。为了求出子午线轮胎负荷状态下的形状,首先要考虑冠部带束层与胎体帘布层之间的压力分担率 T_b 以及胎侧加强部分的压力分担率 T_e , 然后计算其断面形状。

在负荷状态下,带束层的压力分担率 T_b 一般为梯形,可以近似用如下 z 的函数表示:

$$T_b = \tau_0 - \frac{a(z_p - z)}{z_p - z_d} \quad (3)$$

对于梯形的压力分布,取 $a=0.375$ 。在外直径和其它参数不变的情况下,带束层压力分担率 T_b 改变将使其断面形状发生变化,如图 1 所示。

在计算下胎侧形状时,还必须考虑胎侧加强部分的压力分担率 T_e 。胎侧加强部分是指承受内压分担率为零的增强部件顶端至承受内压比率达最大值的轮辋点处,其分布近似为线性分布。该值可近似表示为:

$$T_e = \frac{\tau_e(z_e - z)}{z_e - z_b} \quad (4)$$

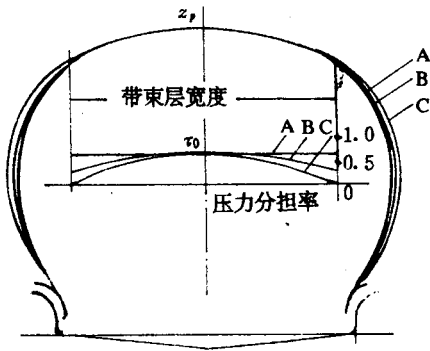


图 1 带束层压力分担率 T_b 改变
其断面形状变化图

$$z_p = 305, z_0 = 0.625$$

其中当 $\tau_e > 0$ 时, 加强胶的作用使轮胎宽度减小; 当 $\tau_e < 0$ 时, 则使轮胎的宽度增大。为了减少负荷状态下胎侧下部的膨胀, 一般取 $\tau_e > 0$ 。

根据帘线张力 t_0 和压力 p 的平衡条件, 任一点必须满足

$$\frac{Nt_0}{2\pi z} = pT_c R_s \quad (5)$$

其中, 在带束层部分 $T_c = 1 - T_b$; 在加强胶部位 $T_c = 1 - T_e$; 其余 $T_c = 1$ 。

由方程(1)、(2)和(5)的几何关系, 式(5)可写成

$$\frac{1}{R_s} = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} = \frac{2\pi z T_c p}{Nt_0} \quad (6)$$

将式(6)进行分段积分, 则得出

$$\int \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} dz = \frac{2\pi p}{Nt_0} \int T_c z dz \quad (7)$$

将具有带束层和加强胶的子午线轮胎的断面形状按图 2 分为 3 部分, 分别根据每一弧段的特点积分, 即按三弧法绘制 $P-D$ 、 $D-E$ 和 $E-B$ 段的曲线, 可得出胎体帘布层的形状。

(1) 带束层部位 ($P-D$ 段):

$$y = - \int_{z_p}^z G_1(z) dz \quad (8)$$

令 $y'/(1 + y'^2) = A/B$, 则

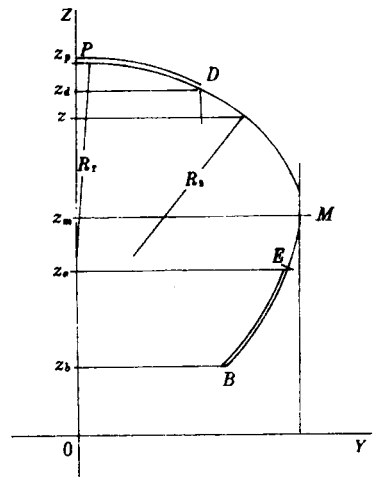


图 2 低断面子午线轮胎的断面形状

$$G_1(z) = \left[z_d^2 - z_m^2 + (1 - \tau_0 + \frac{az_p}{z_p - z_d})(z^2 - z_d^2) - \frac{2a(z^3 - z_d^3)}{3(z_p - z_d)} \right] \left\{ B^2 - [z_d^2 - z_m^2 + (1 - \tau_0 + \frac{az_p}{z_p - z_d})(z^2 - z_d^2) - \frac{2a(z^3 - z_d^3)}{3(z_p - z_d)}]^2 \right\}^{-1/2} \quad (9)$$

(2) 带束层边部至下胎侧部位 ($D-E$ 段):

$$y = - \int_{z_p}^{z_d} G_1(z) dz - \int_{z_d}^z G_2(z) dz \quad (10)$$

$$G_2(z) = (z^2 - z_m^2) [B^2 - (z^2 - z_m^2)^2]^{-1/2} \quad (11)$$

(3) 下胎侧加强部位 ($E-B$ 段):

$$y = - \int_{z_p}^{z_d} G_1(z) dz - \int_{z_d}^{z_e} G_2(z) dz - \int_{z_e}^z G_3(z) dz \quad (12)$$

$$G_3(z) = \left[z_e^2 - z_m^2 + (1 - \frac{\tau_e z_e}{z_e - z_b})(z^2 - z_e^2) + \frac{2\tau_e(z^3 - z_e^3)}{3(z_e - z_b)} \right] \left\{ B^2 - [z_e^2 - z_m^2 + (1 - \frac{\tau_e z_e}{z_e - z_b})(z^2 - z_e^2) + \frac{2\tau_e(z^3 - z_e^3)}{3(z_e - z_b)}]^2 \right\}^{-1/2} \quad (13)$$

根据上述设计原理,利用电子计算机,采用 C 语言编制出设计程序,我们便可模拟出低断面子午线轮胎的断面曲线。

符号说明:

- R_s ——胎冠部曲率半径;
- z_p ——带束层中心的半径坐标;
- z_d ——带束层边缘的半径坐标;
- z_m ——断面最宽点的半径坐标;
- z ——断面任一点的半径坐标;
- T_b ——带束层的压力分担率;
- a ——带束层的压力分担系数;
- T_e ——胎侧加强部分的压力分担率;
- z_e ——加强胶上端的半径坐标;
- z_b ——胎圈中心的半径坐标;
- τ_e ——胎侧加强部分的压力分担系数;
- τ_0 ——带束层压力分担系数的最大值;
- t_0 ——帘线张力;
- p ——轮胎的充气压力;
- T_c ——帘布层的内压分担率;
- N ——胎体帘线根数。

2.2 设计和计算程序

2.2.1 轿车子午线轮胎设计程序(程序 1)

根据设计原理中的式(8)、(10)和(12),用 C 语言编制成计算机程序,在达到要求的外直径、断面宽和带束层宽度所要求的压力分担率的前提下,进行反复的收敛计算,求得所需的断面形状。对式(8)进行积分,可得出 $P-D$ 段的圆弧曲线;按式(10)对胎侧积分,得出 $D-E$ 段的圆弧曲线;按式(12)积分,得出加强胶部分 $E-B$ 段的圆弧曲线。上述每段曲线达到收敛准则,即可终止计算,这时便可求出符合要求的断面形状。

2.2.2 三维非线性有限元分析程序(程序 2)

由程序 1 绘制出的断面形状曲线,通过微机与工作站的接口,直接传送给非线性有限元程序的前处理。该非线性有限元分析程序主要包括前处理、计算和后处理 3 部分。前

处理主要进行三维有限元模型的建立、网格划分、材料模型的建立、边界条件的确定等;计算部分根据不同的使用条件进行结构力学分析,它包括线性和非线性分析两部分;后处理包括应力、变形分布的彩色显示、各种曲线的绘制等,它可将分析的全部数据转换成曲线或图形方式,并可对计算结果进行优化,从而达到提高设计的准确性、降低成本、节省时间的目的。

该三维非线性有限元分析已与我院开发的低断面子午线轮胎设计程序有机地结合起来。根据我院多年低断面子午线轮胎的设计经验,提供给该程序所必需的检验准则,达到分析设计一体化的目的。目前我们已根据这一设计程序进行了不同规格的低断面轿车子午线轮胎的三维实体分析和三维非线性接触分析,其结果与实际有较好的吻合性,其详细内容见 1996 年第 1 期《轮胎工业》“三维有限元分析(3D-FEA)在轿车子午线轮胎接触问题中的应用”一文。

2.2.3 计算机辅助完成技术、施工设计程序(程序 3)

根据程序 2 的优化分析结果,将确认的轮廓曲线反馈到微机上,利用 Auto CAD 完成外胎花纹总图。根据确认的轮廓曲线,程序将执行第 3 部分,自动完成一段机头及二段机头上的材料布置图,并绘制出外胎材料分布图。

3 低断面轿车子午线轮胎设计程序的特点

(1)重视乘坐舒适性的断面形状。设计轮胎时,一般事先给定外直径、断面宽和轮辋规格,大幅度改变带束层的压力分担率和压力分布形状,断面形状会有相当大的变化。因而在设计上采用降低带束层张力的断面形状,从而减少轮胎的振动,达到改善乘坐舒适性的目的。利用本程序,我们分别计算了 $\tau_0=0.625$, $a=0.375$ 和 $\tau_0=0.55$, $a=0.375$ 时的轮廓。计算结果表明,胎体帘布层长度一定

时,带束层压力分担率提高,胎肩形状接近屈挠形状,胎面接地印痕呈向内凹陷形,轮胎的乘坐舒适性差。这与 PDEP 理论减小行驶面宽度的结果是一致的。

(2)重视胎肩轮廓线的形状。与传统的設計相比,PDEP 理论轮廓曲线向内,以弥补轮胎动态下的不正常变形。该设计是在此基础上,考虑轮胎负荷状态下的屈挠变形;屈挠变形集中部位曲率变化较大,其半径变化最小。所以设计时将胎面和胎肩的形状设计成与负荷下的屈挠形状相近似的形状,则可减小屈挠时的变形。

(3)该设计与 PDEP 设计理论的区别。PDEP 设计理论是在施工设计的基础上,利用二维非线性有限元分析程序,分析计算轮胎各部分的应力-应变、接地压力等,从而达到优化设计的目的。本设计是利用三维非线性有限元分析程序,从实验和分析角度研究低断面轿车子午线轮胎胎体和带束层及加强胶之间的压力分布规律,分析研究了不同情形的三维受力及变形情况,重点分析低断面子午线轮胎的接触压力和接触区的变形,从而获得更为理想的设计。

4 结语

随着计算机技术的不断提高,计算机软硬件适用范围的改进,描述具有复杂结构的轮胎用有限元模型的进一步深化,使采用计算机进行轮胎设计、分析、绘图一体化成为可

能,从而使轮胎的设计水平摆脱了以往的凭经验、半经验手段的局面。使用该设计方法具有以下优点:

(1)低断面轿车子午线轮胎与 70 和 80 系列子午线轮胎的设计有较大区别,因此在设计上重点考虑了带束层的压力分担率 T_b 及胎侧加强部分的压力分担率 T_s ,从而改变轮胎的肩部设计,提高轮胎乘坐舒适性。

(2)三维非线性有限元程序的应用,不仅可以预测轮胎三维充气变形及受力,而且可以预测轮胎接触状态下的变形及受力、轮胎的接地印痕及接地压力,并可将全部数据图形化,使轮胎设计者可以直观地得到分析结果,判断简单易行。

(3)三维非线性有限元程序的应用,对轮胎的设计和发展起了促进作用。它减少了轮胎的设计时间,降低了成本,缩短了信息反馈周期,同时应用生产前的优化分析,还大大提高了设计质量。

(4)从初步设计、分析到绘图是一个完整的密不可分的设计过程,全部数据可用直观清晰的图形显示,产品开发的成功率高,周期短,对轮胎的结构设计及新型轮胎的开发起着越来越大的作用。

参考文献

- 何晓玫等. 低断面轿车子午线轮胎 PDEP 设计理论. 橡胶工业,1995;42(2):67-71

收稿日期 1995-09-07

统计资料

子午线轮胎在日本汽车轮胎销售量中占的比例

%

轮胎类型	1990 年		1991 年		1992 年		1993 年		1994 年	
	原配胎	替换胎	原配胎	替换胎	原配胎	替换胎	原配胎	替换胎	原配胎	替换胎
载重轮胎	34.0	72.4	46.2	76.9	50.1	78.1	54.1	80.6	64.8	82.7
轻载轮胎	62.9	53.9	63.3	63.4	66.6	71.0	69.0	73.3	73.1	76.2
轿车轮胎	83.4	96.2	84.2	97.6	86.2	98.5	86.5	98.8	86.6	99.1
合计	77.9	80.1	78.6	85.2	81.0	89.1	82.0	90.3	83.0	92.1

相泰摘自日本“月刊タイヤ”,[5],47(1995)