

# 应用有限元法优化带束层结构 减轻轮胎重量

Weiss M. et al. 著 刘大众译 夏松茂校

**摘要** 应用有限元法研究一种高性能 225/50R 16 92V 轿车子午线轮胎的 5 种带束层结构对其高速耐久性、乘坐舒适性和滚动阻力的影响。带束层结构是由带束层的不同端部形状(露边和包边)和不同骨架材料(钢丝和芳纶)组合而成。研究目标是找出一种优化的带束层结构,以减轻轮胎重量,同时保持轮胎高速耐久性、乘坐舒适性和滚动阻力等重要性能。选用由一层包边带束层包裹一层露边带束层的全芳纶带束层结构,计算改变设计参数对降低滚动阻力的影响。由此优化的轮胎的带束层较窄,包边宽度较大,附加中心冠带层以及减小了的花纹沟深度和基部胶厚度。评价了这种结构轮胎的充气压力和速度对滚动阻力的影响。

随着日益加重的环境问题,人们越来越关注减轻轮胎重量和降低滚动阻力。这是当前轮胎制造商面临的最重要的课题之一。以芳纶带束层代替钢丝带束层使轮胎轻量化的技术已得到广泛应用。本研究选用一种高性能轿车子午线轮胎(225/50R16 92V),因为对于这种规格和断面高宽比的轮胎,减轻轮胎重量和降低滚动阻力尤为重要。本研究的主要目标是寻找一种轮胎结构,该结构能减轻轮胎重量,降低滚动阻力,而对其它性能无不利影响。

研究过程包括 3 个主要步骤:第 1 步是带束层结构对轮胎重量、成本、高速耐久性、乘坐舒适性和滚动阻力的影响;第 2 步是根据第 1 步得到的最佳带束层结构,计算不同的设计参数对滚动阻力的影响;第 3 步是研究滚动阻力与诸如速度和充气压力等使用条件之间的关系。

选择一种流行的高性能轿车子午线轮胎——东洋牌 Omnicent 型 225/50R16 92V 作为对比轮胎,该轮胎有两层露边钢丝带束层,一层尼龙端部冠带层和一层整幅冠带层,以及两层聚酯胎体层。

学条件,计算轮胎沿纵断面半边的应力应变。对比轮胎的二维横断面有限元模型如图 1 所示。规定胎体和带束层骨架材料为二维 2 节点薄膜单元,由橡胶材料构成的胎面、胎侧和胎圈三角胶为二维 4 节点实体单元。对比轮胎的三维有限元模型如图 2 所示。三维模型是由二维断面绕轮胎旋转轴旋转一周形成的。在施加充气压力、垂直负荷和旋转条件下,各种有限元计算均采用非线性的材料模型。

为了通过有限元分析评价高速耐久性,需考虑在高速使用条件下的参数。第 1 个参数是 De Eskinazi 等人<sup>[1]</sup>论文中所建议的轮胎周向应变能密度(SED)的最大值,第 2 个参数是轮胎表面的径向位移。

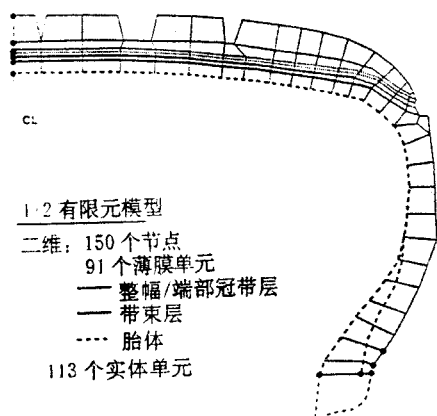


图 1 对比轮胎的二维有限元模型

## 1 有限元分析

轮胎采用三维结构模型,施加非对称力

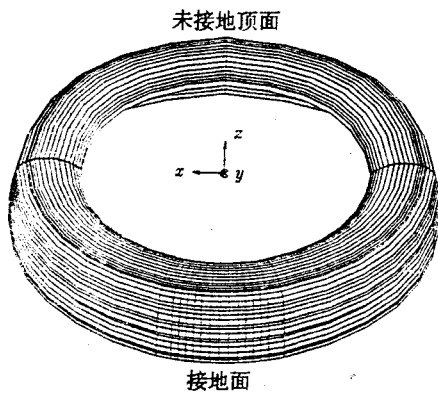


图2 对比轮胎(东洋 225/50R16 92V)  
的三维有限元模型

1/2 有限元模型 三维:3300 个节点,  
1638 个薄膜单元,2034 个实体单元

为进行滚动阻力分析,采用基于 Warholc<sup>[2]</sup>理论的具有滚动阻力预测功能的有限元模型。滚动阻力是由一个根据能耗率、应变率、滚动速度和材料阻尼性质构成的函数推导得出的。通过假设一适当粘弹材料模型,可将阻尼特性包括在该分析中。该分析选用 Kelvin-Voigt 模型。能耗率可直接转换为滚动阻力。

## 2 带束层结构的影响

### 2.1 带束层结构的选择

为研究带束层结构对轮胎重量、成本、高速耐久性、乘坐舒适性和滚动阻力的影响,决定评价由不同的钢丝和芳纶帘线组合而成的 5 种带束层结构。对露边和包边的带束层端部形态也进行了比较。一种由两层露边芳纶带束层、一层端部冠带层和一层整幅冠带层组成的带束层结构,由于刚度较低,使轮胎的操纵性、胎面磨损和高速耐久性大大降低,因此本研究不讨论这种结构方案。通过采用相同的模型轮廓,使除带束层以外的所有轮胎部件具有相同的设计。

### 2.2 带束层结构对轮胎重量和成本的影响

轮胎重量和材料成本的对比如表 1 所示。带束层结构由两层钢丝带束层加一层整

幅冠带层和一层端部冠带层改为一层芳纶带束层包裹一层芳纶露边带束层,轮胎重量可减轻约 20%。与对比轮胎相比,这种芳纶带束层的材料成本增加 25%。

表 1 不同带束层结构的轮胎重量  
和成本对比

| 项目                  | 带束层方案 |      |      |      |      |
|---------------------|-------|------|------|------|------|
|                     | 对比轮胎  | A    | B    | C    | D    |
| 带束层结构 <sup>1)</sup> |       |      |      |      |      |
| 带束层材料               |       |      |      |      |      |
| 第 1 层               | 钢丝    | 芳纶   | 钢丝   | 芳纶   | 芳纶   |
| 第 2 层               | 钢丝    | 钢丝   | 芳纶   | 芳纶   | 芳纶   |
| 轮胎重量 <sup>2)</sup>  | 108.9 | 91.2 | 91.2 | 87.3 | 87.3 |
| N*                  | (100) | (84) | (84) | (80) | (80) |
| 轮胎材料成本              |       |      |      |      |      |
| %                   | 100   | 113  | 113  | 125  | 125  |

注:1)——钢丝,——芳纶,……尼龙整幅/端部冠带层;

2)括号内数字为相对对比轮胎的百分率。

### 2.3 带束层结构对高速耐久性的影响

高速耐久性是根据有限元分析得到的两个特性参数评定的。第 1 个参数是带束层胶料周向应变能密度的最大值,第 2 个参数是轮胎表面的径向位移值。各种带束层结构的应变能密度最大值的位置和量值的对比如表 2 所示。所有的带束层结构,其应变能密度最大值均集中在带束层之间的覆胶上。对于对比轮胎、B 方案和 D 方案轮胎,应变能密度最大值出现在窄带束层的端部;而 A 方案和 C 方案轮胎则出现在带束层的包边折叠部位内。A 方案带束层的计算结果最好。对比轮胎的应变能密度值比其它方案轮胎大得多。计算结果表明,采用第 1 层或第 2 层包边芳纶带束层将大大改善高速耐久性。

高速行驶的轮胎表面绝对和相对径向位移的分布如图 3 和 4 所示。径向位移是在轮胎模型冠部断面中的轮胎表面上一个节点沿 z 轴方向的变形值。将轮胎在充气压力、垂直负荷和旋转条件下产生的位移减去在垂直负荷时的垂直位移,得到径向位移的绝对值。虽然轮胎的位移变形随芳纶帘布用量的增加而增大,但是胎冠中心外侧的位移变化有所减

\* 原文如此——编者。

表 2 应变能密度对比

| 带束层方案 | 最大应变能密度位置 | 最大应变能密度<br>$\times 10^4 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}(\%)$ |
|-------|-----------|-------------------------------------------------------------|
| 对比轮胎  |           | 8.11(100)                                                   |
| A     |           | 2.68(33)                                                    |
| B     |           | 3.53(44)                                                    |
| C     |           | 3.81(47)                                                    |
| D     |           | 3.07(38)                                                    |

注：充气压力 300kPa，负荷 4500N，  
速度 280km·h<sup>-1</sup>。

小。在图 4 中，胎冠中心部位相对位移是 100%；在胎肩部位，对比轮胎的相对位移大于其它方案轮胎。随着芳纶帘布用量的百分比增大，这种趋势变得更加明显。

对比轮胎的应变似乎集中在带束层的端部区域，因为胎肩部位的相对径向位移较大。因此，对比轮胎的高速耐久性低于其它方案轮胎。按照 EC-30 试验的延伸条件，在耐久性试验机上得到的高速耐久性试验结果如表 3 所示。具有芳纶包边带束层的轮胎的最大破坏速度远高于对比轮胎。

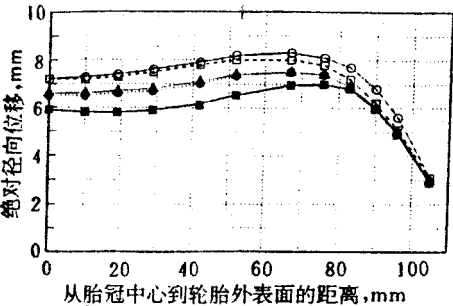


图 3 胎冠区域绝对径向位移的对比

充气压力 300kPa；负荷 4500N；速度 280km·h<sup>-1</sup>；

■—对比轮胎；▲—A；●—B；□—C；○—D

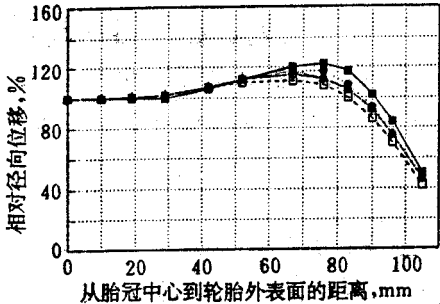


图 4 胎冠区域相对径向位移的对比

试验条件和图中符号同图 3

表 3 在 EC-30 试验的延伸条件下高速  
耐久性的试验结果对比

| 带束层方案 | 最大破坏速度，<br>km·h <sup>-1</sup> | 在破坏速度下的<br>运行时间，s |
|-------|-------------------------------|-------------------|
| 对比轮胎  | 290                           | 15                |
| A     | 310                           | 590               |
| B     | 340                           | 120               |
| C     | 320                           | 580               |
| D     | 340                           | 480               |

\* 充气压力 300kPa，负荷 4500N。

2.4 带束层结构对乘坐舒适性的影响

通过有限元分析和试验，研究表 1 示出的 5 种带束层结构对乘坐舒适性的影响。为了评价乘坐舒适性，选用垂直刚度作为与乘坐相关的重要参数进行分析，结果如表 4 所示。C 方案和 D 方案的垂直刚度低于其它方案，而且随着芳纶帘线用量百分比的增大，垂直刚度减小。具有芳纶包边带束层轮胎的乘坐舒适性优于对比轮胎。

表 4 垂直刚度的对比\*

| 带束层方案 | 80km·h <sup>-1</sup> 下的计算值<br>N·mm <sup>-1</sup> (%) | 静负荷下的试验值<br>N·mm <sup>-1</sup> (%) |
|-------|------------------------------------------------------|------------------------------------|
|       |                                                      |                                    |
| 对比轮胎  | 233.4(100)                                           | 248.6(100)                         |
| A     | 228.5(98)                                            | 239.4(96)                          |
| B     | 228.5(98)                                            | 240.9(97)                          |
| C     | 222.6(95)                                            | 235.8(95)                          |
| D     | 222.6(95)                                            | 238.0(96)                          |

\* 充气压力 200kPa，负荷 4400N。

2.5 带束层结构对滚动阻力的影响

通过有限元分析和试验，研究表 1 示出的 5 种带束层结构对滚动阻力的影响。轮胎各部件的滚动阻力也采用有限元分析一节中提到的同样方法进行计算。计算值和实测值

如图 5 所示。对比轮胎总滚动阻力最低,其它带束层结构轮胎的滚动阻力变化很小。值得注意的是,带束层覆胶对滚动阻力的影响比预计的大。

### 3 轮胎设计参数对滚动阻力的影响

由上所述,通过一层芳纶包边带束层和一层芳纶露边带束层组合,得到一种适用的带束层结构。这种结构有助于减轻轮胎重量,获得良好的高速耐久性和乘坐舒适性。然而,试验测得的滚动阻力对比轮胎增大 6%。因此,决定采用 C 方案轮胎研究轮胎设计参数对滚动阻力的影响。

#### 3.1 轮胎设计参数的选择

采用原有 C 方案带束层结构轮胎,按表

5 所示调整轮胎 8 个设计参数(参见图 6)。

在为得到一组能最大幅度降低滚动阻力

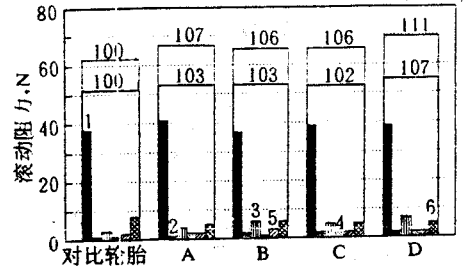


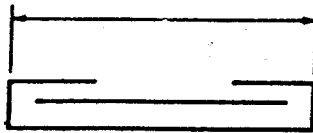
图 5 各种带束层结构的滚动阻力对比

充气压力 200kPa, 负荷 4400N, 速度  $80\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 1—胎面,

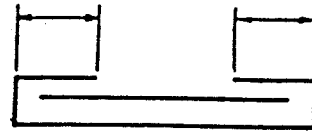
2—第 2 层带束层, 3—带束层覆胶, 4—第 1 层带束层,

5—胎侧和胎圈三角胶, 6—其它; 下行数字

为计算值, 上行数值为试验值



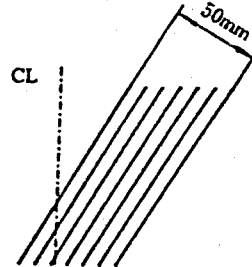
1) 带束层总宽度



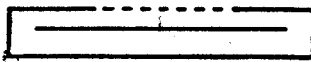
2) 带束层包边宽度



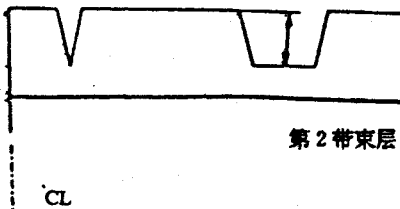
3) 胎冠带束层帘线角度



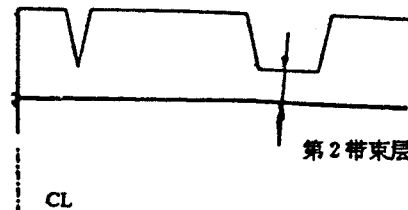
4) 胎冠带束层帘线密度



5) 附加中心冠带层



7) 胎面花纹沟深度



6) 基部胶厚度

8) 带束层胶料损耗角正切

图 6 8 个轮胎设计参数的调整

表 5 轮胎设计参数的调整

| 设计参数        | 调整后改量, % | 原有数据                      |
|-------------|----------|---------------------------|
| 带束层总宽度      | -6.4     | 188mm                     |
| 带束层包边宽度     | +25.0    | 40mm                      |
| 胎冠中心带束层帘线角度 | -20.0    | 20°                       |
| 胎冠中心带束层帘线密度 | +17.4    | 0.92 根 · mm <sup>-1</sup> |
| 附加中心冠带层     | 使用       | 不用                        |
| 基部胶厚度       | -12.0    | 2.5mm                     |
| 胎面花纹沟深度     | -12.8    | 7.8mm                     |
| 带束层胶料损耗角正切  | -25.0    | 0.176                     |

的最终设计参数而连续进行的参数调整过程中,每个有利于降低滚动阻力的参数值都将用于下一个调整步骤。这一过程将继续进行,直到全部选择的参数在该计算过程中都调整一次。这个过程结束时,即得到各参数的一个优化组合。

### 3.2 结果分析

计算结果如图 7 和 8 所示。图 7 表明,原有轮胎经改变设计参数后,滚动阻力约下降 16%。图 8 示出的计算结果表明,带束层宽度、胎面花纹沟深度、带束层胶料的损耗角正

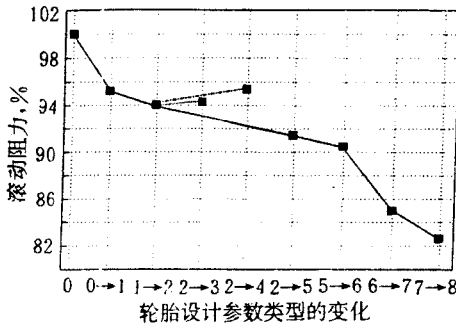


图 7 调整轮胎设计参数引起的滚动阻力变化

充气压力 200kPa; 负荷 4400N; 速度 80km · h<sup>-1</sup>

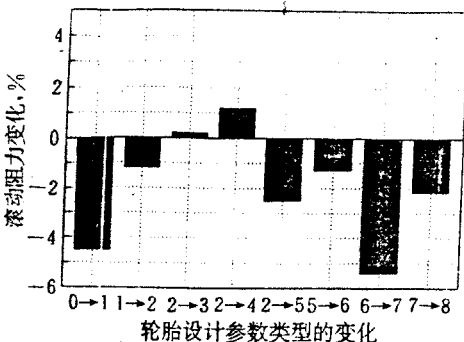


图 8 轮胎设计参数变化对滚动阻力的影响

充气压力 200kPa; 负荷 4400N; 速度 80km · h<sup>-1</sup>

切和一个附加中心冠带层具有更显著的影响,而下面的调整将改善滚动阻力:①减小带束层宽度;②增大带束层包边宽度;③附加中心冠带层;④减小基部胶厚度;⑤减小胎面花纹沟深度;⑥减小带束层胶料损耗角正切值。

此外,值得注意的是采用一个中心冠带层降低了滚动阻力。可以认为这种效果是由于减小轮胎周向应变而产生的。显然,中心冠带层改变了轮胎的变形特征,并导致了这种引人注意的结果。

## 4 充气压力和速度对滚动阻力的影响

### 4.1 充气压力和速度的选择

经过前两步的研究,已找到可减轻轮胎重量、提高高速耐久性和降低滚动阻力的适宜的带束层结构和经过调整的轮胎设计参数。第 3 步的研究目标是寻找降低滚动阻力的最佳充气压力和确定速度对滚动阻力的影响。前面的参数经过调整的优选方案作为本阶段新的有限元分析的输入数据。

选择 3 个充气压力 200, 250 和 300kPa 作为充气压力调整值。对于每个充气压力,速度在 80—160km · h<sup>-1</sup> 间变化。另外,对应每个充气压力,测量速度为 280km · h<sup>-1</sup> 时的滚动阻力。

### 4.2 结果

图 9 示出了计算结果。如所预料的,滚动阻力随充气压力的增大而降低。对于每一速度,这种趋势基本相同。随着速度的增加,滚动阻力也显著增大。当充气压力从 200kPa 增至 250kPa 时,滚动阻力的相对下降要比充气压力从 250kPa 增至 300kPa 更大些。考虑到乘坐舒适性,最佳充气压力约为 250kPa。进一步增加充气压力,不仅不能大幅度降低滚动阻力,而且将有损乘坐舒适性。

## 5 结论

有限元模型用于计算最佳带束层结构,以便减轻高性能子午线轮胎的重量,同时改善或保持轮胎高速耐久性、乘坐舒适性和滚

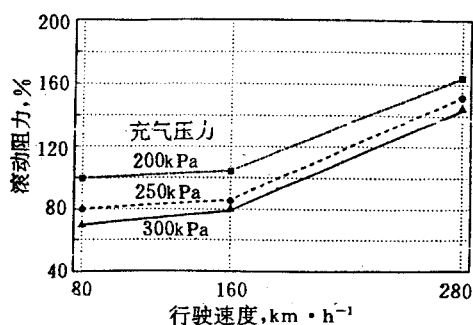


图9 行驶速度对滚动阻力的影响  
负荷 4400N

动阻力等重要性能。计算的轮胎性能变化可与对比轮胎东洋 Omnicent 型 225/50R16 92V 轮胎相媲美。

计算结果表明,优选的以一层芳纶包边带束层包裹一层芳纶露边带束层的新型带束层结构,减轻了轮胎重量,大大改善了高速耐久性和乘坐舒适性。高速耐久性的提高是由于减小了带束层覆胶沿周向应变能密度的最大值和胎肩部位相对径向位移。值得注意的是,芳纶包边带束层轮胎的绝对径向位移大于对比轮胎,但高速耐久性优于对比轮胎。与预料的相反,这种新型带束层结构使滚动阻力增加 2%。

高速耐久性、乘坐舒适性和滚动阻力的

实际试验结果表明,其具有与有限元分析结果相同的趋势。高速耐久性有大大改善,新型芳纶带束层结构的最高破坏速度对比轮胎提高 3 档。研究表明,相对径向位移是评价高速耐久性的一个非常重要的参数。

应用有限元法进行分析,通过改变轮胎设计参数,降低以一层芳纶包边带束层包裹一层芳纶露边带束层轮胎的滚动阻力。计算结果预示,带束层宽度、胎面花纹沟深度、带束层胶料损耗角正切和一附加中心冠带层对降低滚动阻力有显著影响。通过减小带束层宽度,增大带束层包边宽度,附加中心冠带层,减小基部胶厚度、胎面花纹沟深度和带束层胶料损耗角正切,可使滚动阻力降低 16%。

应用有限元法还分析了充气压力和速度对滚动阻力的影响。考虑乘坐舒适性,最佳充气压力约为 250kPa。

按照新的设计参数制造的轮胎,在与分析条件相同的充气压力和速度下的实际试验不久即将进行。

#### 参考文献(略)

译自美国“Tire Science & Technology”,  
21[2],120—134(1993)

\*\*\*\*\*  
\* 专利介绍 \*  
\*\*\*\*\*

#### 具有低噪声胎面花纹的充气轮胎

美国《橡胶世界》1994 年 210 卷 1 期 18 页报道:

日本横滨橡胶公司 1993 年 8 月 31 日获得了有关具有低噪声胎面花纹的充气轮胎的

美国 5240054 号专利。该轮胎胎面周向上有许多长度不同的花纹节;上述花纹节的每一个单元都从最短的花纹节开始,而且这个最短的花纹节与相邻单元的最短花纹节之间至少有一个最长的花纹节;在每个单元中,单元两部分中任何一部分的长度为单元总长度的 15%—30%。

(涂学忠译)