

滚动轮胎温度场的有限元模拟计算

马连湘¹, 李 晨¹, 刘志春¹, 黄素逸²

(1. 青岛科技大学 机械工程学院, 山东 青岛 266042; 2. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在轮胎热学稳态分析的基础上, 利用有限元非线性分析功能, 开发滚动轮胎温度场有限元模拟计算软件。该软件建立在以下4个假设基础上: ① 轮胎处于动态平衡时的稳态温度场; ② 将轮胎的形状看作以旋转轴对称; ③ 导热系数和比热容等物性视为常数; ④ 不计轮胎接地时以热传导形式发生的接触热量传递。实例验证表明, 数值模拟计算结果与实际测试结果的变化趋势基本一致。

关键词: 轮胎; 温度场; 有限元; 模拟计算软件

中图分类号: TQ336.1; TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-890X(2003)08-0493-05

随着汽车行驶速度的提高, 汽车轮胎的温升幅度大大提高, 但轮胎在使用时不应超过限制温度, 许多国家已经制定或开始制定这方面的标准。在轮胎的设计和使用中, 了解轮胎内部温度场的分布对合理设计轮胎结构和胶料配方、缩短设计周期、降低费用以及在使用中合理安排使用条件等都具有重要的经济价值和社会意义。

与国外相比, 国内对轮胎温度场的研究较少, 国内自行开发的能够进行轮胎温度场计算的专用软件几乎仍是空白。针对这一现状, 我们在热学稳态分析的基础上, 利用有限元非线性分析功能, 自行开发了滚动轮胎温度场有限元计算软件。以下详细阐述几何建模和物理建模的全部过程, 并举例说明。

1 轮胎有限元分析模型

1.1 轮胎的几何模型

由于轮胎结构的几何对称性, 只需选取轮胎某一断面的一半作为研究对象。为了实现对研究对象的自动网格划分, 首先需要实现轮胎断面结构的计算和自动绘图。为此, 采取了以下3项措施。

(1) 利用 Visual Basic 6.0 编制成参数化的轮

胎系列断面图形库(如图1所示), 方便用户依照国家标准选取轮胎型号。

(2) 考虑到各种轮胎断面材料分布情况不尽相同, 例如带束层宽度增量及层数、帘布反包端点高度等, 将各种材料的厚度参数和形位参数在交互式界面上给出, 方便用户对细微差别进行修正。参数修正界面如图2所示。

(3) 轮胎断面图形库的设计采用尺寸驱动方式, 使轮胎断面轮廓各图元具体尺寸在合理的数据范围内任由用户修改, 直至生成令人满意的轮胎断面轮廓图为止。263/60R14 子午线轮胎断面图形如图3所示。

1.2 轮胎有限元网格模型^[1~3]

为便于进行轮胎断面有限单元网格划分, 我们根据轮胎材料分布的特点, 将同种材料划归为一层单元, 很厚的部件按用户提出的单元边长要求划分为几层单元, 较薄的同种材料单元合并为一层单元。依据相邻两层线上节点个数的对应关系和层线所处的特殊位置, 程序会在有限元网格库中搜索这两条层线间区域所适合的规格化层, 自动完成有限元网格划分过程。

依据图形中关键点之间的位置关系编制程序, 进行多点间选择优化网格图形。同时, 用户可对轮胎经常发生破坏的危险区域进行网格加密, 提高计算精度。因此, 我们在确定全局网格尺寸和划分特殊区域的网格设定数目时加以综合考虑, 避免因生成的网格单元严重畸变而得不到收

基金项目: 山东省教育厅资助项目(J02A04)

作者简介: 马连湘(1962-), 男, 河北南宫人, 青岛科技大学教授, 博士, 主要从事强化传热及轮胎热学的研究。

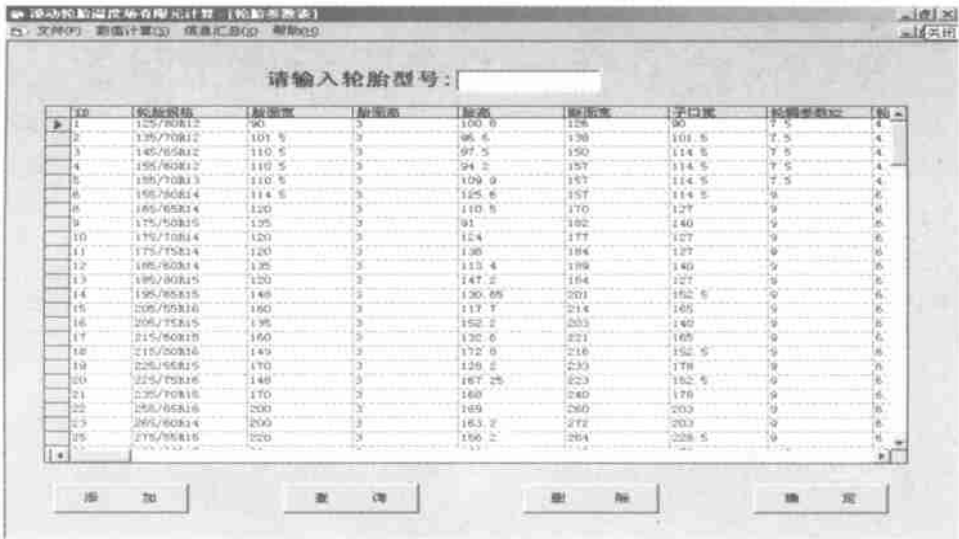


图1 轮胎断面图形库

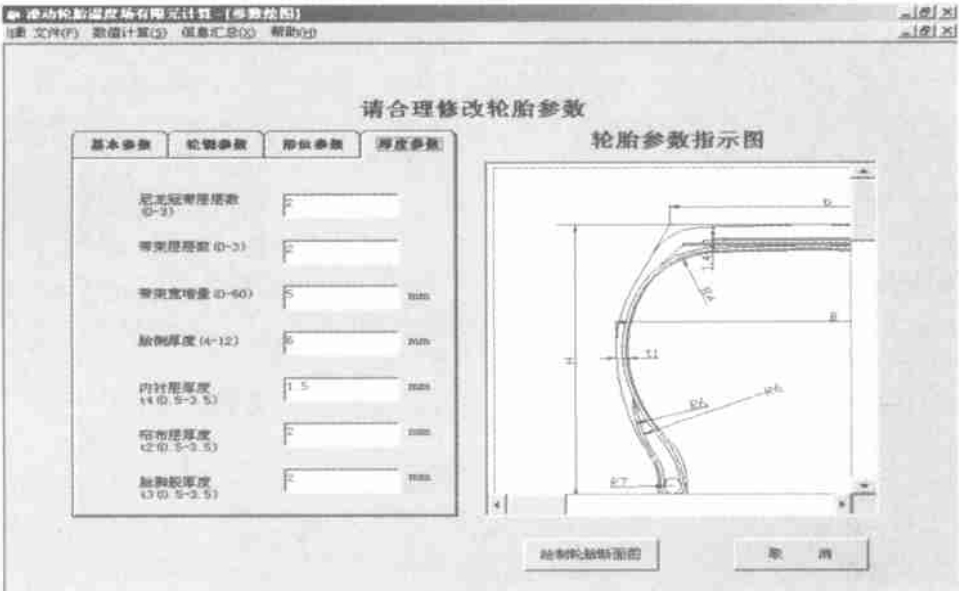


图2 轮胎断面参数修正界面

敛解。

利用 Visual Basic 与 AutoCAD 的接口技术实现轮胎材料断面图与有限元网格模型图在 AutoCAD2000 平台下的输出功能, 轮胎断面边界如图 4 所示。该功能为更直观和方便地检查网格的合理性提供了条件, 生成的 DXF 接口文件也可为其大型通用有限元软件读取, 为使用软件的用户省去繁琐的前处理工作。

1.3 轮胎热学模型

Trivisonno^[4] 是提倡轮胎热学模型分析的代表, 本工作继承了他以热传导问题为基础建立轮胎热学模型的思想, 摒弃了其沿径向单元有相同热生成率的假设, 也无需测定轮胎胎面温度, 直接从热平衡方程式入手求解滚动轮胎内部的温度场。确定合理的边界条件是提高模拟计算精度的前提。利用风洞中旋转圆盘的蔡升华热质比拟试

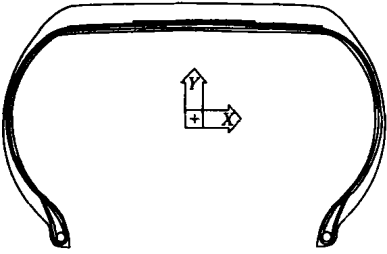


图 3 265/60R14 子午线轮胎断面图形示意

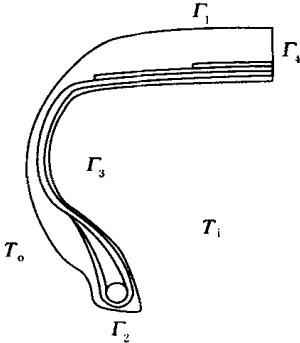


图 4 轮胎断面边界示意

验模拟滚动轮胎的表面对流换热的方法,可以由试验得出不同行驶速度或风速条件下轮胎外部轮廓与来流空气间的对流换热系数。确定外部轮廓至轮辋交界处为传热学第三类边界条件。风洞热质比拟试验结果的精确性已得到充分证明^[4,5],根据文献取轮胎内部壁面与内部空气间的对流换热系数为表面的 0.7 倍^[9]。汽车行驶过程中,轮胎会因为内部生热而导致温度升高,轮胎腔体内的气体最终达到热平衡,使温度恒定。由于轮胎腔体容积变化较小,可将这一过程看作理想气体等容变化,即

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \tag{1}$$

式中 P_1 ——轮胎运行前腔内气体压强, kPa;
 P_2 ——轮胎运行至动态热平衡后腔内气体压强, kPa;
 T_1 ——轮胎运行前腔内气体温度, K;
 T_2 ——轮胎至动态热平衡后腔内气体温度, K。

总体边界条件的数学表达式如下(边界示意图见图 4):

$$-k_1 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = \alpha_1 (T - T_0) \Big|_{\Gamma_1} \tag{2}$$

$$-k_2 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q \Big|_{\Gamma_2} \tag{3}$$

$$-k_3 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \alpha_3 (T - T_i) \Big|_{\Gamma_3} \tag{4}$$

$$-k_4 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_4} = 0 \tag{5}$$

式中 k ——材料的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$;
 α ——各边界上的对流换热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$;
 q ——热流密度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$;
 T_0 ——外部环境温度, K;
 T_i ——轮胎内部热平衡时空气温度, K。

1.4 几点重要假设^[7]

根据以上分析可见,本研究建立在以下假设的基础上:

- (1)所研究的温度场是轮胎处于动态平衡时的稳态温度场;
- (2)将轮胎的形状看作以旋转轴轴对称的;
- (3)导热系数、比热容等物性参数随温度变化不大,视为常数;
- (4)不计轮胎接地时以热传导形式发生的接触热量传递,将接地表面视作与来流空气对流换热的传热学第三类边界。

2 求解器的设计

2.1 滚动轮胎稳态温度场有限元算法

对于轴对称问题,固体导热偏微分方程的形式如下:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_v}{k} \right) \tag{6}$$

式中 ρ ——密度, $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$;
 c_p ——定压比热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$;
 t ——时间, s;
 q_v ——内热源的单位体积生热率, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

利用 Galerkin 法将式(6)转化成有限元积分表述形式:

$$\int_D W_l \left[k \left(r \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_v r - \rho c_p r \frac{\partial T}{\partial t} \right] dx dr = 0 \tag{7}$$

式中, W_l 为加权函数, $l = 1, 2, \dots, n$ 。

利用格林公式将边界条件引入式(7)得:

$$\frac{\partial J^D}{\partial T_l} = \iint_D W_l [kr(\frac{\partial W_l}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_l}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r}) + \rho c_p W_{lr} \frac{\partial T}{\partial t} - q_v W_{lr}] dx dr - \oint_{\Gamma} k W_{lr} \frac{\partial T}{\partial n} ds = 0 \quad (8)$$

($l = 1, 2, \dots, n$)

式(8)就是轴对称温度场整体区域 D 的变分计算基本方程。

如果区域 D 划分为 E 个单元和 n 个节点, 则温度场 $T(x, y, z)$ 离散为 T_1, T_2, \dots, T_n 等 n 个节点的待定温度值。这时变分计算可在单元中进行。即

$$\frac{\partial J^e}{\partial T_l} = \iint_e W_l [kr(\frac{\partial W_l}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_l}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r}) + \rho c_p W_{lr} \frac{\partial T}{\partial t} - q_v W_{lr}] dx dr - \oint_{\Gamma} k W_{lr} \frac{\partial T}{\partial n} ds = 0 \quad (9)$$

($l = i, j, m$)

将式(9)代入式(8)中得到总体合成的代数方程组如下:

$$\frac{\partial J^D}{\partial T_l} = \sum_{e=1}^E \frac{\partial J^e}{\partial T_l} = 0 \quad (10)$$

($l = 1, 2, \dots, n$)

方程组(10)有 n 个代数式, 故可求解 n 个节点的温度。

2.2 程序流程

根据以上的理论分析和具体程序组织方式, 得出求解器设计的流程如图5所示。

3 计算实例

对 205/75R15 子午线轮胎在气压 280 kPa、行驶速度 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的情况下进行分析计算, 几条层线的节点温度示于图6^[3]。

为验证轮胎稳态温度场的计算结果, 我们采用在轮胎内部埋入热电偶的方法实测了 205/75R15 半钢子午线轮胎在速度 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、气压 280 kPa、载荷 478.24 N 时的温升情况, 试验结果如图7所示^[1]。

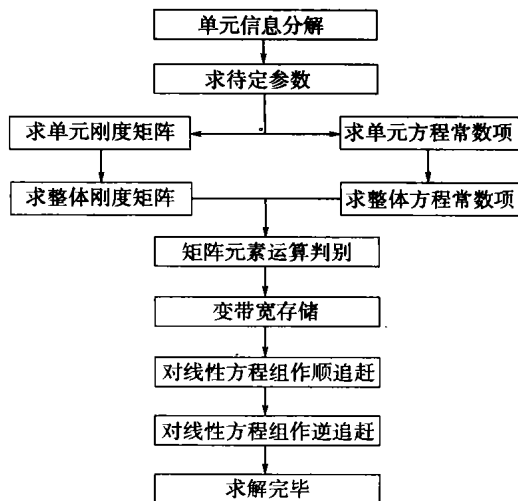


图5 求解器程序流程示意

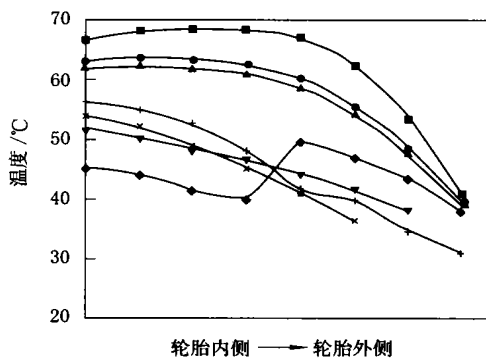


图6 205/75R15 子午线轮胎内部温度场分布示意

■—胎面中部; ●—胎冠左侧; ▲—胎肩上部; ▼—胎肩下部; ◆—胎侧中部; +—胎圈上部; ×—胎圈下部。

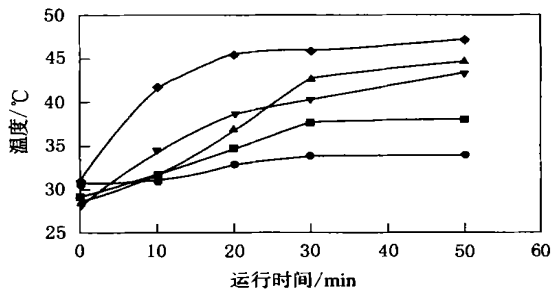


图7 205/75R15 子午线轮胎实测温升曲线

◆—胎冠(钢丝带束层和胎体层之间); ▲—胎体和气密层之间; ▼—胎肩(胎体和胎侧胶之间); ■—胎圈内侧; ●—胎侧最薄处。

从实测和数值模拟计算结果的对比可以看出, 计算和测量结果的变化趋势基本一致, 从温度吻合程度来看, 大多数部位都有一些差距。造成这些差距的主要原因一是建模时忽略了花纹沟的

散热作用, 二是对轮胎内部钢丝、帘线等的复合影响没有考虑。以后将侧重于这些方面进一步开展工作。

4 结语

利用本软件得到的计算结果能较好地模拟轮胎温度场的变化, 所表征的轮胎温度场变化趋势可以对轮胎的结构设计及胶料配方设计起到一定的指导作用。

参考文献:

[1] 马连湘. 滚动轮胎温度场的理论与实验研究[D]. 武汉: 华中

科技大学, 2001.

[2] 孔祥谦. 有限元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 1-127.

[3] 刘江省. 滚动轮胎内部温度场有限元分析及工程应用软件的开发[D]. 青岛: 青岛化工学院, 2001.

[4] Trivisonno N M. Thermal analysis of a rolling tire[Z]. SAE700474. 1970.

[5] 刘志春. 滚动轮胎温度场相关实验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2002.

[6] Schuring D J. The rolling loss of pneumatic tire[J]. Rubber Chemistry Technology, 1980, 53(3): 600.

[7] 陈振艺. 轮胎稳态温度场的计算[J]. 轮胎工业, 1997, 17(5): 273-277.

第 12 届全国轮胎技术研讨会论文

Analysis of temperature field in rolling tire by FEA

MA Lian-xiang¹, LI Chen¹, LIU Zhi-chun¹, HUANG Su-yi²

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China; 2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A software for simulating and calculating the temperature field in rolling tire has been developed by using the analytical function of nonlinear finite element based on the thermal stability analysis. The software is established on the assumption that a) the temperature field is the steady temperature field of the dynamically balanced tire; b) the shape of the tire is rotational symmetric; c) the thermal conductivity and specific heat content etc. are constants; d) the contact heat transfer by conductivity at the ground-contact of tire is neglected. The experimental example confirms that the trend from the calculated results with the software is in accordance with that from the measured results.

Keywords: tire; temperature field; finite element; analogue

2003 年 1~3 月橡胶制品业

经济运行情况统计

中图分类号: TQ336; F407.7 文献标识码: D

据有关部门统计, 2003 年 1~3 月, 橡胶制品业累计完成工业增加值 69.98 亿元, 同比增长 19.98%; 实现产品销售收入 231.77 亿元, 同比增长 25.13%; 利润总额达到 9.84 亿元, 同比增长 70.56%。3 项指标均低于化学工业全行业的平均增长水平。

橡胶制品业 2003 年 3 月末的资产负债率为 62.63%, 比 2002 年年末略有下降, 在化学工业全行业中居第 4 位。

在资产利用和运营效率方面, 2003 年一季

度, 橡胶制品业资产利润率为 0.79%, 流动资产平均余额同比增长 15.84%; 固定资产净值平均余额同比下降 14.58%, 资产总计同比增长 11.58%。资产总计同比增长高于化学工业全行业 9.71% 的平均水平。

2003 年 3 月末, 橡胶制品业应收账款金额为 183.40 亿元, 同比增长 6.99%; 产成品资金总额 104.04 亿元, 同比下降 3.70%。两项指标均低于化学工业全行业平均水平。

2003 年一季度, 橡胶制品业从业人员总计为 613 897 人, 同比增长 4.55%。人均销售收入约 3.8 万元, 较上年同期略有提高。

(本刊讯)