

轮胎稳态温度场的计算

陈振艺

[上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司轮胎研究所 200072]

摘要 用有限元方法直接对基于能量守恒的热传导微分方程进行求解,计算出轮胎在恒定速度下的稳态温度场,并用红外热像仪进行了轮胎表面温度场的测量。

关键词 轮胎,温度场(温度分布),有限元,热生成率

轮胎在周期性载荷的作用下,其橡胶和骨架材料的滞后损失、橡胶与骨架材料之间的摩擦等因素会导致生热,使轮胎温度升高。而轮胎所用材料的力学性能和耐疲劳性能与温度密切相关,使用时温升越高,其性能下降就越多,特别是过高的温升会导致相关材料性能严重下降,导致轮胎迅速损坏。目前轮胎的主要质量问题如“肩空”、“胎圈脱层”等主要是由于这些部位的温度过高造成的。因此轮胎设计人员正积极探索降低轮胎在滚动中的生热以延长轮胎使用寿命的途径,其中轮胎温度场的计算就是轮胎设计人员研究的一个重要课题^[1~4]。轮胎升温过快的主要原因是应力集中和材料的滞后损失较大,通过温度场的计算可以在轮胎设计阶段以降低生热为依据具体指导轮胎的设计,包括指导轮胎各个部位几何形状和尺寸的设计以及所用材料性能的选取等,这样可以在很大程度上缩短轮胎试制周期,降低试制费用,以及尽可能提高轮胎的使用寿命等。但由于橡胶材料和“橡胶-帘线”复合材料性能呈现非线性和粘滞性,使得对轮胎温度分布情况(温度场)的求解极为困难,近年来随着计算机性能和测试手段的提高以及有限元方法的广泛应用,求解温度场才得以实现。

计算轮胎温度场首先要确定轮胎在使用

时的受力情况和确定各种材料在不同受力情况下的生热特性。目前国内不少单位都在开展轮胎受力情况的有限元分析,但因测试手段等原因,在材料性能测试方面进展不大,影响了轮胎受力情况有限元分析的进一步深入。上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司轮胎研究所以复合材料力学理论为基础的轮胎受力情况有限元分析工作也已开展多年,这为轮胎温度场的计算和研究创造了必要的条件。在材料热生成性能测试方面,笔者根据本单位实际条件,提出了自己的测量方法并成功地进行了测试,这样就解决了用有限元方法计算轮胎温度场的前期困难。本文介绍了轮胎稳态温度场计算及轮胎表面温度场实时测量方面的情况。

1 稳态温度场计算

1.1 热传导微分方程

由于橡胶和帘线有粘滞性,在周期运动中存在滞后损失,加上橡胶与帘线间的摩擦等因素,轮胎内部有热量产生,因此这是一个有内热源的热传导问题。根据能量守恒原理,对于轮胎中任意一个微元体,单位时间内导入微元体的热流量与微元体内生成的热量之和等于微元体内能的增加与导出微元体的热流量之和。按热传导^[5]写出热传导微分方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\nabla^2 T}{c} + \frac{\dot{Q}}{c} \quad (1)$$

作者简介 陈振艺,男,35岁。工程师。1983年毕业于复旦大学物理系。主要从事轮胎设计和计算机辅助设计工作。

式中 T ——温度, ;
 t ——时间, s;
 λ ——导热系数, W/(m·);
 ρ ——密度, kg/m³;
 c ——比热容 J/(kg·);
 \dot{Q} ——单位体积的生成热, 也称生成热密度, W/m³;
 ∇^2 ——拉普拉斯算子。

这也就是计算轮胎温度场的微分方程, T 就是需要求出的温度值, 在不同的部位温度值是不同的。关于生成热密度 \dot{Q} , 国外通常的处理方法是假设材料有一个损耗之类的生热因子, 由材料的本构关系推导出生热因子与所受应力-应变的解析关系, 用实验测出这个生热因子, 再根据已知的各个部位的应力-应变值来求出各个部位的生成热密度。而笔者认为材料在周期运动中所损失的能量全都转变成了热量, 只要测出其损失的能量, 把热生成率定义为在周期运动中转换成热量的那部分能量与总能量的比率, 这样生成热密度 \dot{Q} 就等于热生成率乘以单位时间内作用在单位体积材料上的能量再乘以热功当量。只是这个方法的工作量非常大, 需要测出不同材料在不同温度、不同频率和不同受力情况下的各种热生成率。

1.2 方程求解

将上述热传导微分方程改写为:

$$\nabla^2 T + (\dot{Q} - c \frac{\partial T}{\partial t}) = 0 \quad (2)$$

自然边界条件为:

$$-\frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) \quad (3)$$

式中 h 是边界上的换热系数, T_0 为环境温度, n 代表法向。则泛函 J 为:

$$J = \int_V [\frac{1}{2}(\nabla T)^2 - (\dot{Q} - c \frac{\partial T}{\partial t}) T] dv + \int_S \frac{h}{2}(T - T_0)^2 ds \quad (4)$$

通过形函数单元上任何一点的温度 T 可以用其点上的温度来表示:

$$T^i(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^{n_i} N_j^i(x, y, z) T_j^i(t) \quad (5)$$

式中上标 i 表示第 i 个单元, n_i 为第 i 个单元的节点数, N_j^i 为第 i 个单元的形函数, T_j^i 为第 i 个单元各个节点的温度, 这时泛函 J 近似为 \tilde{J}

$$\tilde{J} = \sum_{i=1}^m \int_{V_i} [\frac{1}{2}(\nabla T^i)^2 - (\dot{Q}_i - c_i \frac{\partial T^i}{\partial t}) T^i] dv + \sum_{s_i} \frac{h_i}{2}(T^i - T_0)^2 ds \quad (6)$$

式中 m 为单元数。微分项 $(\nabla T^i)^2$ 可写成

$$(\frac{\partial T^i}{\partial x})^2 + (\frac{\partial T^i}{\partial y})^2 + (\frac{\partial T^i}{\partial z})^2$$

现以式中的第一项 $(\frac{\partial T^i}{\partial x})^2$ 为例, 假设第 i 个单元为 3 节点的三角形单元, 为书写简便, 忽略上标 i , 由公式(5)可得

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

(安装 次

则

$$(\frac{\partial T}{\partial x})^2 = [T_1 \ T_2 \ T_3] \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} \\ \frac{\partial N_2}{\partial x} \\ \frac{\partial N_3}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(谢馨

上式中间两个矩阵相乘为 1 个三阶矩阵, 记为 K_x , 对已划分好的单元来说, 其值是确定的, 所以

$$(\frac{\partial T}{\partial x})^2 = [T_1 \ T_2 \ T_3] K_x \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

表 4

这样微分项化成了代数项。根据泛函理论, 当 T 为其真实解时泛函为极小值, 泛函对所有节点温度的偏导数都为零, 即

$$\frac{\partial \tilde{T}_j}{\partial T_j^i} = 0 \quad (10)$$

这样就得到了一组方程,每个方程里还有一项微分项 $\frac{\partial T_j^i}{\partial t}$,它可以用向后差分法来处理,即

$$\frac{\partial T_j^i}{\partial t} = \frac{T_j^i(t) - T_j^i(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (11)$$

至此,所有微分项都变成了代数项,即一组微分方程变成了代数方程组,在最初的时候($t = 0$ 时)所有部位的温度都等于环境温度,这样就可以用迭代法从环境温度开始逐步求出稳态时的温度。

1.3 边界条件

目前轮胎的受力分析都不考虑轮胎花纹的影响,这样轮胎各个断面的温度分布情况是一样的,且断面左右对称,因此取半个断面计算就可以了。

设初始时刻轮胎全场温度为环境温度,根据不同的热交换形式可以把轮胎断面边界分成 5 个部分。第一部分为处在断面对称轴上的胎冠部位,因不与外界接触,且轮胎断面左右对称,所以热传导动态平衡,即流进和流出的热量相等;第二部分是轮胎的胎冠部位与大气作热交换(对流换热)和辐射换热,因辐射换热相对于对流换热来说有数量级之差,因此可以忽略。当胎冠与路面接触时,与路面有热传导;第三部分是胎肩和胎侧部位,与外界存在对流换热及辐射换热,同样忽略辐射换热;第四部分是轮胎胎圈与轮辋接触的部位,考虑到轮辋是金属的,是热的良导体,因此认为轮辋的温度是均匀的;第五部分是轮胎的内表面与内腔气体作对流换热,由于内腔气体是封闭的,体积也极有限,而且气体的比热容很小,因此认为内腔气体温度随着轮胎内表面温度的变化而变化,这样轮胎内表面与内腔气体所作的对流换热和辐射换热都可忽略。限于试验条件,热传导系数和换热系数等由文献中查得。

1.4 计算实例

以上轮公司正泰橡胶厂生产的 165SR15 子午线轿车轮胎为实例进行了轮胎稳态温度场的计算,该规格轮胎有两层钢丝带束和两层人造帘布,另外还有 6 种橡胶材料和钢丝圈等。网格划分与计算应力-应变时一样,以便逐点确定热生成率。如图 1 所示,共有 174 个单元和 195 个节点,网格划分的原则是同种材料划一层单元,如帘布、带束、胎侧和气密层等,胎冠则分两层,每一个单元只包含一种材料。计算条件是:轮胎下沉量为 20mm,轮胎转动线速度为 100km/h,充气压力为 0.20MPa,环境温度为 30℃。计算结果表明,轮胎滚动 2h 后基本达到稳定状态,具体计算结果如图 2 和 3 所示。

2 测量和讨论

2.1 测量

为了验证轮胎稳态温度场的计算,用美国 FLIR SYSTEM 公司的 PROBEYE 7300 型红外热像仪对 4 条 165SR15 轮胎进行了测量。该红外热像仪性能优越,并配有录像机和计算机软硬件,可实时显示测量结果,也可录下全过程温度情况,事后用计算机进行分析处理。试验条件与计算条件一致,用红外热像仪监视轮胎表面温度的变化情况,并

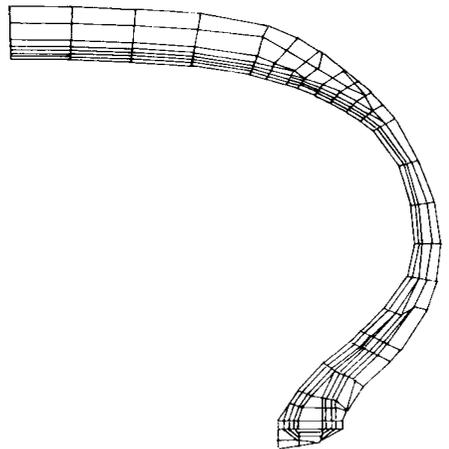


图 1 有限元计算单元的划分

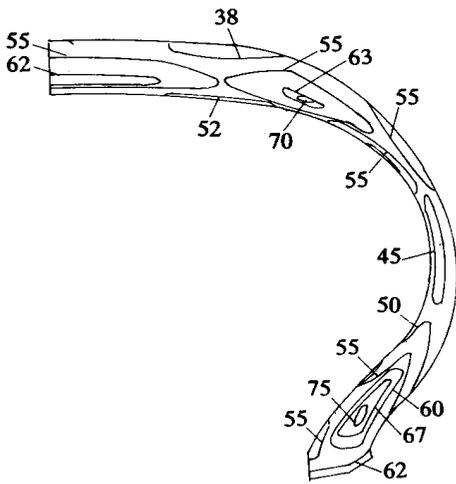


图2 轮胎温度场等温线

记录下全部试验过程中的温度变化情况,试验至2h结束,取结束时的温度数据(4条轮胎的平均值)与计算结果比较,结果如图3所示。

2.2 讨论

从图3的对比结果可看出,计算和测量结果在变化趋势方面是一样的,胎肩和胎圈部位各有一个温度峰,胎肩部位应力集中,出现温度峰值是必然的,而胎圈部位出现温度峰值则加深了人们对轮胎温度分布的认识。从温度的吻合程度来看,大多数部位都有一些差距,特别是胎肩和胎圈部位。造成这些差距的主要原因:一是由各种材料参数值的误差所致;二是因为胎肩和胎圈部位应力复

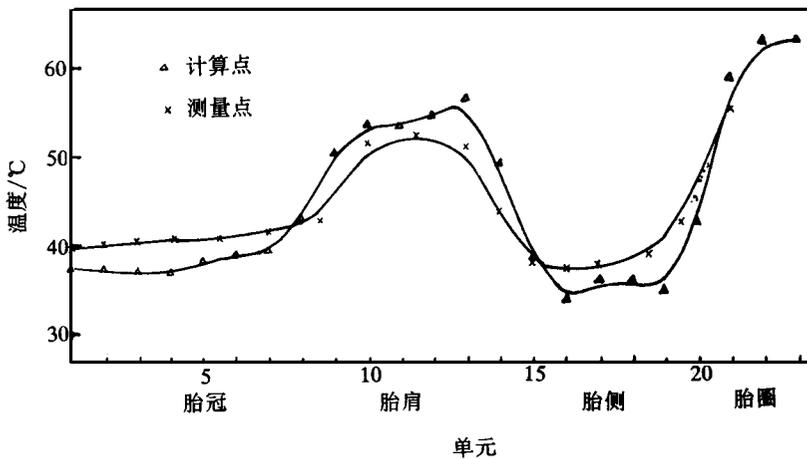


图3 计算和测量结果对比

杂,而相应的网格划分还是不够细;三是计算时忽略了花纹的影响;另外胎圈处因轮辋阻挡,温度测量有困难,难以进行对比。下一步的工作将侧重于材料参数的自行测试,扩大材料参数的自行测试范围,结合实验对花纹的影响进行研究,并对其它应力集中部位的温度进行修正等等,以提高轮胎温度场的计算精度。

3 结语

本文介绍了用有限元方法计算轮胎稳态

温度场的方法,并用红外热像仪验证了轮胎表面温度场的情况。结果对比表明,计算结果能定性和相对定量的反映轮胎温度分布情况。这说明热生成率的测定和稳态温度场的计算有一定的可靠性,同时也是对轮胎受力情况有限元分析计算的一种验证,其结果现阶段可以用作轮胎设计方案优化的参考。

参考文献

1 Sarkar. A new approach for the thermomechanical analysis of tires by the finite element method. TST, 1987; 15 (4) : 261

- 2 Yavari. A thermomechanical model to predict the temperature distribution of steady state rolling tires. TST, 1993; 21 (3) :163
- 3 Oh B S. Internal temperature distribution in a rolling tire. TST, 1995; 23(1) :11
- 4 张士齐. 轮胎力学与热学. 北京: 化学工业出版社, 1988: 280
- 5 杨世铭. 传热学. 第二版, 北京: 高等教育出版社, 1987: 28

收稿日期 1997-01-30

Calculation of Stable Temperature Field of Tire

Chen Zhenyi

(Shanghai Tire and Rubber Group Corp. Ltd. 200072)

Abstract The stable temperature field of tire at a constant speed is calculated by solving a differential equation of the thermal conduction based on the energy conservation law with FEM. The temperature field on the tire surface is measured with an infra-red thermometer.

Key words tire, temperature field, FEM, heat build up

浦东将建设轮胎翻新基地

新加坡摩哆威国际轮胎有限公司抢滩上海浦东, 正筹建大型轮胎翻新基地。

摩哆威国际有限公司采用国际上最先进的翻胎技术及橡胶配方进行生产。经过翻新的轮胎, 使用寿命与新胎相当。

(摘自《中国化工报》, 1997, 1, 31)

普利司通/ 费尔斯通在轮胎 中使用计算机芯片

美国《橡胶和塑料新闻》1996年12月18日23页报道:

普利司通/ 费尔斯通越野轮胎公司正在现场测试一种灵敏的计算机芯片系统, 这一系统可以使矿业和建筑公司通过改善轮胎保养而节省成千上万美元的费用。

该公司是最近在拉斯维加斯举行的 96 矿业展览会上首次推出这一产品的, 预期 1997 年开始商业化生产。

这一系统是将一片计算机芯片(即信息卡)放入越野轮胎的内部, 该芯片自动记录轮胎的气压、胎内空气温度和包括编号、商标、仪器型号、保持的时速、轮位、车种、车型以及

安装数据等在内的信息。当车辆在该系统的天线之间通过时, 计算机芯片将这些信息发送给一台计算机, 计算机的软件系统对这些数据进行记录和分析。

普利司通/ 费尔斯通越野轮胎公司的国内工程部经理 Jack Dutcher 说: “在矿区, 每台机械设备的轮胎费用达到每年 2.5 万美元, 有些机械超载高达 4.5t 时, 轮胎气压仍只有 34.45kPa。如果了解这些情况, 那么定期检查轮胎气压的重要性也就一目了然了。”

计算机芯片的数据还可以提醒维修人员潜在的问题, 包括制动器擦伤、轴承损坏和超载的轮位等。

一位发言人说, 普利司通/ 费尔斯通公司一直在为公路运输车队开发此类系统。

该公司说, 他们正打算将用来转译芯片数据的计算机语言变成在公开市场上可通用的, 这意味着其它品牌轮胎、其它的读出器和任何一种类型的越野机械都可使用这种芯片。

普利司通/ 费尔斯通越野轮胎公司正与位于密执安州利沃尼亚的计算机方法公司共同开发这一系统。

(宋凤珠译 涂学忠校)