

轮胎轮廓设计技术

中岛幸雄著 钟莹摘译 刘登祥校

在开发技术和产品时,可以采取试制和计算机模拟两种方法。这两种方法相比,计算机分析方法的成本要高得多,因此直到目前还主要采用试制的方法来进行产品的开发 and 设计。但是由于近年来计算机技术的进步,计算机的计算速度按照3年提高4倍的穆尔法则飞快增长,从而使计算机分析的成本低于试制的成本,因此引起技术开发和产品设计的重大变革,使得过去仅用于飞机、火箭、原子反应堆和超高层建筑等难做试验场合的计算机计算力学,现在也开始用于成本较低的产品领域。

利用计算机计算力学不但可以节省大量试制费用和试验设备,而且可以缩短开发周期,飞机界和汽车界尤其如此。用以代替风洞试验的数值流体分析和代替冲撞试验的数值结构分析是其中的典型例子。而且预计今后计算机成本仍将持续降低,因此用计算机计算力学代替试制的方法将削减初次开发的成本。

此外,和其它制品相比,橡胶制品多用于变形较大的领域,利用计算机计算力学很难进行定量预测,而试制的方法则可以很低的成本进行。因此,在橡胶制品业界,计算机计算力学仅限于起辅助作用,而不能成为代替试制的手段,即使在制品性能分析阶段使用了计算机计算力学,在制品设计阶段也不能得到有效应用。因为制品性能分析通过定性预测即可灵活运用,而制品设计必须通过定量预测才能确定其尺寸,所以,与汽车界相比,橡胶制品业界则很难充分利用计算机进步所带来的实惠。但是由于以有限元(FEM)为代表的橡胶及橡胶复合材料分析

方法的进步,再加上超级计算机的出现,已经能够定量预测橡胶制品的物理性能,于是利用计算力学开发橡胶制品的事例也逐渐增多。

今后在将计算力学应用于橡胶制品设计当中,使之成为代替试制的手段方面,以下两点将成为橡胶制品业界的重要技术战略课题:

- (1)通过计算力学拓宽制品设计领域,缩短开发周期,而且与制品设计自动化相结合;
- (2)用计算机力学代替试验,从而缩短取得数据的周期,而且减少试验设备和工作人员,降低试验成本。

本文仅对以计算力学为基础的新型轮胎轮廓设计技术进行详细叙述。

1 计算力学在轮胎轮廓设计中的应用

1.1 以往的轮胎轮廓设计法

关于轮胎的轮廓设计,在过去长达半个世纪期间,一直占据主流的是美观实用的帕迪(Puady)轮胎轮廓设计理论。根据该理论,向空心的环形膜体中充入空气后得到的轮廓可按式表示:

$$r_1 = \frac{r_0^2 - r_m^2}{2r} \quad (1)$$

轮胎的自然平衡形状如图1所示, r_1 是轮胎断面胎侧部的曲率半径。以该理论为基础的轮胎轮廓称为自然平衡轮廓,其特点是,向轮胎充气时,轮胎轮廓不变,且胎体帘布层所受张力很均匀。

为轮胎轮廓设计理论开辟了新天地的是非自然平衡轮廓理论(RCOT)。如图2所示,在该理论中,建立了与自然平衡轮廓理论迥然不同的非自然平衡轮廓理论,大大增加

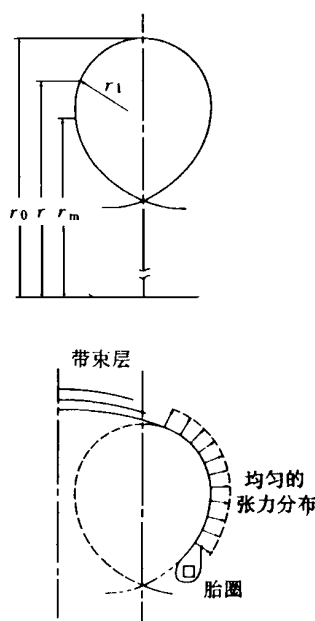


图1 轮胎的自然平衡形状

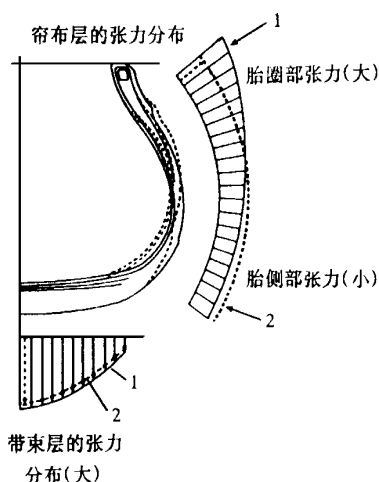


图2 非自然平衡形状理论(RCOT)

非自然平衡形状;...以往形状。1—非自然平衡形状的张力分布;2—以往形状的张力分布

了轮胎轮廓设计的自由度。其特点是,带束层端部附近的帘布层曲率半径小,而胎圈部的帘布层曲率半径大。因此,与以往轮胎轮廓的帘布层张力相比,以非自然平衡轮廓理论设计的轮胎,带束层附近的帘布层张力变小,而胎圈部的帘布层张力变大,进而带

束层部位的张力也增大。这样一来,由于提高了必要部分的张力,既可保证乘坐舒适性,又可提高操纵稳定性。

此后,利用非自然平衡轮廓理论的轮胎轮廓设计越来越多,例如基于该理论的轮胎轮廓被称为U线型,继U线型以后又提出多种轮胎轮廓方案。

该理论产生以后,轮胎轮廓增多的理由有以下两点:第一,由于非自然平衡轮廓理论有相当大的自由度,因此,各种不同的技术人员为了解决自己的课题提出了各自不同的轮胎轮廓。第二,定义非自然平衡轮廓理论的计算公式和具体程序并不是在所有情况下都是很明确的。

由于在自然平衡轮廓理论中通过式(1)已经定义了轮胎轮廓,不同的技术人员设计的轮胎轮廓也没什么区别。但由于非自然平衡轮廓理论没有轮廓定义,即使要设计同一轮廓,技术人员不同,其设计的轮廓也不尽相同。为了解决这些问题,已着手开发一种必要的新型轮胎轮廓设计法,但要满足以下两个要求:

- (1) 要给通过不同方程式或数值方法优选得到的最佳断面轮廓一个统一的定义;
- (2) 该法应是满足任何轮胎、任意性能的最佳轮廓设计法。

1.2 新型轮廓设计法——最佳轮廓设计理论

对于新的设计法,上述两项要求是非常苛刻的,这从该理论产生后经过近10年的研究仍未能满足此条件就可以想象得到。为了建立满足此条件的最佳轮廓设计理论(GUTT),必须引入和以往方法不同的新技术,使之来一次大飞跃。为此,我想到了最近再次受到瞩目的优选法和FEM相结合的方法。

人类总是具有使事物达到最佳程度的欲望,早在1854年,Maxwell曾就最佳结构设计在某负荷条件下如何使其元素体积和达最

小值进行了分析。而且,在70年代初,通过数值计算得到的最佳化方法也同FEM研究一起活跃起来。用FEM可以简便求得最佳必要结构物的灵敏度,将其结果与数理方法结合起来,从而飞跃性地提高了应用范围。由于最佳化研究需要近百次的结构分析,从实用观点出发,最佳化研究的进步只是在最近能够自由使用超级计算机后才实现的。

以前,所谓的最佳化是先给出某个目标函数 $f(x)$,以及满足定义为 $g_i(x)$ 和 $h_k(x)$ 的约束条件,同时求得使 $f(x)$ 为最小值的设计变量。如下所示:

(1) 目标函数: Minimize $f(x)$ (2)

(2) 约束条件:

不等式约束条件

$$g_i(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

等式约束条件

$$h_k(x) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (4)$$

侧面约束条件

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

(3) 设计变量

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (6)$$

这里所指的最佳轮廓设计理论的具体程序可按图3所示的程序图进行说明。

(1) 由标准轮胎作出FEM模型,定义初始轮廓。

(2) 输入作为最佳化必要的最佳性能项目——目标函数和约束条件。在目标函数和约束条件中必须指定用FEM能够预测的物

理量,例如,在目标函数中,要按照非自然平衡轮廓理论给定在轮胎充气时带束层和胎圈部的张力;要给定不使轮胎尺寸发生变化且符合标准规定的最大宽度。

(3) 通过FEM进行灵敏度分析。在轮廓最佳化的情况下,设计变量是帘布层的FEM模型的节点坐标值。而且灵敏度必须进行多(设计变量+1)次的FEM分析,并按下式定义:

$$\text{灵敏度} = \frac{f(x_i + \delta x_i) - f(x_i)}{\delta x_i} \quad (7)$$

(4) 由灵敏度可知,为了既满足约束条件又使目标函数为最小值,设计变量应向某一方向变化。通过一维探索可求得向该方向变化的程度。

(5) 当前后两次得到轮廓的差值较小,且目标函数改变幅度也较小时,即可认为收敛于最佳解,然后输出该最佳解。如果其差值和目标函数的改变幅度超过某允许值时,则用这次得到的轮廓置换初始轮廓,再次从灵敏度分析开始进行迭代循环。

如图4所示,最佳化方法就好像闭着眼睛登山似的。山的顶端是最佳解,围绕着山的栅栏则相当于约束条件,最初从某个地方开始向各方向一点一点地攀登,找到坡度最陡的方向。这就是灵敏度分析。接着当然是沿灵敏度分析中所决定的方向攀登,由于过犹不及的道理,我们要确认是到达了山顶,还是到达了栅栏,并决定前进到什么程度为好。这就是一维探索。重复灵敏度分析和一维探索就能够到达山顶。

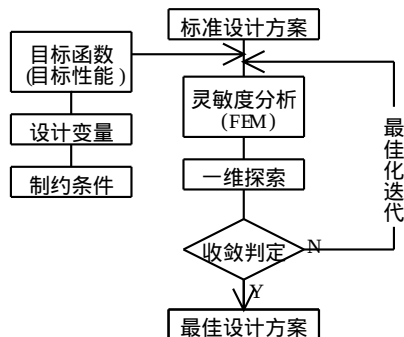


图3 最佳形状设计理论的程序图

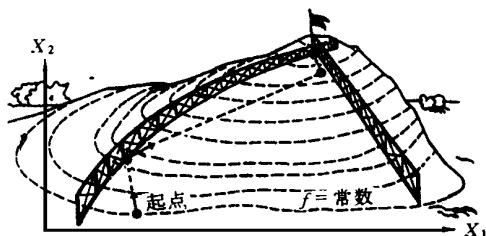


图4 最佳化的思考方法

2 最佳轮廓设计理论在轮胎设计中的应用

2.1 扁平轮胎

由于高宽比较小的轮胎其高度也较低,因此用非自然平衡轮廓理论控制张力分布比较困难,其效果将大大降低。如果将最佳轮廓设计理论应用到扁平轮胎轮廓设计中去并能取得效果的话,那么最佳轮廓设计理论将不仅包括非自然平衡轮廓理论,而且是比其更优越的方法。于是我们首先在 205/60R15 规格轮胎中应用了最佳轮廓设计理论。和非自然平衡轮廓理论一样,其目标函数要使带束层张力和胎圈部帘布张力为最大,制约条件是轮胎断面内的周线必须不变。轮胎轮廓如图 5 所示。用拉格朗日多项式表示:

$$r(\theta) = \sum_{i=1}^n r N_i(\theta) \quad (8)$$

$$N_i(\theta) = \prod_{j \neq i} \frac{\theta - \theta_j}{\theta_i - \theta_j} \quad (9)$$

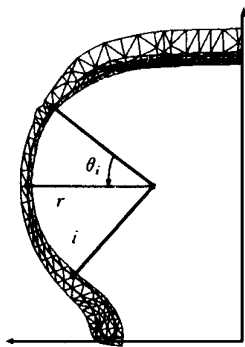


图5 轮胎轮廓的表示方法

如图 6 所示,用最佳轮廓设计理论得到的轮胎轮廓,带束层端部附近向外突出,而胎圈附近则向里凹陷。最初看到该轮廓时,不敢相信这就是最佳轮廓,因为它与以往传统的自然平衡轮廓及非自然平衡轮廓都相距甚远。于是测试作为设定目标函数的带束层张力和胎圈部的帘布张力变化情况,结果如图 7 所示。与以往的轮廓相比,带束层张力和胎圈部的帘布张力大幅度增大。看到这个结果后才开始相信最佳轮廓设计理论。最佳轮

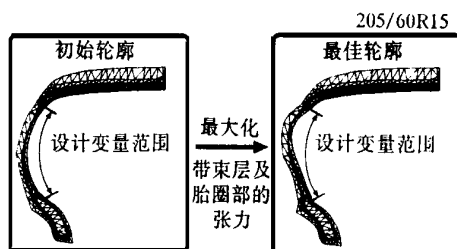


图6 轿车用扁平轮胎

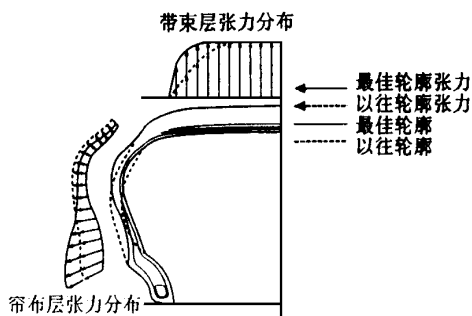


图7 最佳轮廓的张力分布

廓设计理论创造了其开发者都意想不到的轮廓效果。在这个例子中,通过 9 次迭代求得最佳解,随着轮廓的变化,带束层附近逐渐凸起,而胎圈附近则逐渐凹陷。

我们实际试制了按照最佳轮廓设计理论设计的最佳轮廓轮胎,并对其进行了各种性能的测试。用平板试验机测定的操纵稳定性能的室内评价情况如图 8 所示。最佳轮廓轮胎在微小侧偏角时的转弯稳定性对比轮胎提高 3%,大侧偏角时的转弯稳定性则提高 4%,而且在试验场的实车评价中,如表 1 所示,最佳轮廓轮胎的干、湿路面的操纵性和稳定性均得到改善。不过,乘坐舒适性多少有些欠缺(稍硬了一点)。在表 1 中,+3 的意义是普通的司机能够感到的性能差,-1 的

表1 最佳轮廓轮胎的实车评价

性能	以往轮廓	最佳轮廓
舒适性	6	-1
干滑性	6	+3
湿滑性	7	+3

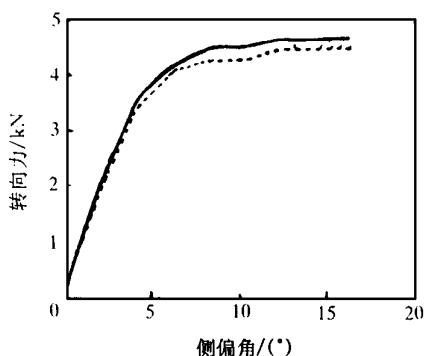


图8 室内操纵性能转鼓机床试验

.....以往轮廓;——最佳轮廓。轮胎规格:

205/60R15, 试验速度: $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,

内压: 200 kPa

意义是受过特殊训练的司机可以感到的性能差。而且参加试验的司机说,由于最佳轮廓改善了操纵性及稳定性,感觉好像驾驶着完全不同的车辆。

2.2 载重车和公共汽车轮胎

图9显示了最佳轮廓理论在降低载重车和公共汽车轮胎滚动阻力的轮廓设计中的应用。该理论被开发以后,若作为载重车和公共汽车轮胎的轮廓设计理论,要经过数年的TCOT开发。但是,最佳轮廓设计理论不仅改变了轮胎模型和目标函数,而且,也改善了不同轮胎的任意性能。在这一例子中,目标函数要使变形能变为最小,其制约条件设定为帘布长度不超过初期长度的2%。采用最佳轮廓的轮胎,其滚动阻力降低了8%,特别是胎面附近的变形能大大减小。

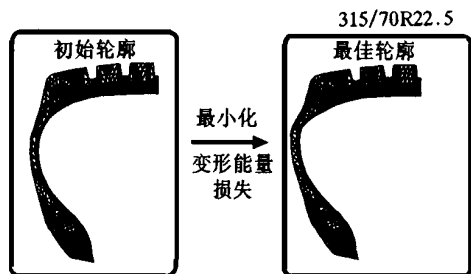


图9 载重车和公共汽车轮胎

2.3 低滚动阻力轮胎

当作用在轮胎上的负荷一定时,使滚动阻力为最小的轮胎规格是什么呢?改变轮胎规格,则轮胎的轮廓形状和构造也相应发生改变,这是长期困扰轮胎设计者的问题。应用最佳轮廓设计理论可以解决这个问题。如图10所示,将轮胎胎面宽度 W_T 和轮胎断面高度 H 加入到设计变量中去。在此,为了减少轮胎轮廓形状对滚动阻力的影响,使该轮廓表现为连续的圆弧。而且,假定轮辋直径是固定的,且轮辋宽度 W_R 和轮胎最大宽度 W_S 与 W_T 成正比。

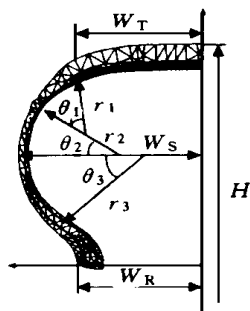


图10 轮胎规格的最佳化

目标函数:滚动阻力(变形能量损失);设计

变量: r_i, θ_i, W_T, H ; 制约条件:

$W_T/W_R, W_S/W_R$ 一定

选择 165R13 为初始规格,在优选滚动阻力后,轮胎规格改为 225/60R13。滚动阻力降低了 25%。增加轮胎胎面宽度时,可产生以下两种效果:一种是胎面质量增大,滚动阻力增大;另一种则由于轮胎内部的空气体积增大,轮胎胎面的变形减小,其结果导致滚动阻力降低。对两者综合考虑,最佳轮胎规格的断面高宽比应确定为 60%,即采用 60 系列。为了验证该结果,我们改变胎面宽度,且试制了带有块状花纹的轮胎,测试其滚动阻力,结果如表 2 所示。正像预测的那样,最佳轮胎规格以取 60 系列为宜。这样一来,就可以通过选取设计变量从而解决以往不明确的问题。

表 2 不同的轮胎高宽比在各种内压下的滚动阻力

高宽比/ %	轮胎内压/ kPa			N
	170	210	250	
82	35	31	29	
76	34	30	28	
67	32	28	26	
62	31	28	26	

注:轮胎行驶速度为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3 结语

本文对采用计算力学和优选法相结合的轮胎轮廓设计技术进行了叙述,并揭示了今后设计技术的方向。最佳轮廓设计理论对于任何轮廓的轮胎,在结构设计、花纹设计、橡胶物理性能的优化方面均具有通用性。

运用最优化方法,可以设计出令人意想不到的方案来。但是,运用计算机最优化设计方法,要经过数十次计算机计算才能进行实际设计,与其说不能否认经验和试验的重

要性,还不如说,如果我们能够充分活用计算机最优化系统,将使人们从以往采取尝试法寻求设计方案的烦琐工作中解放出来,并将时间用于人类的创造性活动中去。而且,建立最优化系统,意味着将现在的设计过程输入计算机中,在设计时,只要指令“将某物理量控制在某数值以下”等技术诀窍即可,可谓集现代技术之大成。

此外,以计算机力学为基础的新的设计方法是否能被承认并深入下去,关键在于能否证明运用计算机力学在数量和质量两方面均取得了成功。要想通过计算机力学真正取得效果,主要取决于具有清醒问题意识和目的意识的研究者的热忱和努力。应该注意给予大力支持,使制品设计中的计算机力学得以继续兴旺发展,而不是昙花一现。为此更应脚踏实地,切实工作。

译自“日本ゴム协会誌”,69[11],

723 ~ 729 (1996)

瑞翁公司轮胎用溶聚丁苯橡胶

日本瑞翁公司生产了多种牌号的溶聚丁苯橡胶(S-SBR),其中 NS110 具有低苯乙烯、高乙烯基质量分数,经过化学改性,在湿抓着性和滚动阻力之间具有良好的平衡性,适用于低油耗轮胎;NS112 具有低苯乙烯、中乙烯基质量分数,经过化学改性,滚动阻力和耐磨性优异,适用于全天候轮胎;NS116 具有中苯乙烯、高乙烯基质量分数,经过化学改性,在湿抓着性和滚动阻力之间具有较好的平衡性,适用于低油耗轮胎和全天候轮胎;NS210/NS218 未经化学改性,用于普通轮胎和工业制品;NS412 具有高苯乙烯、高乙烯基质量分数,充油且未经化学改性,抗湿滑性极佳,适用于高性能轮胎;NS420 具有高苯乙烯、中乙烯基质量分数,充油且未经化学改性,在高抗湿滑性和高耐磨性之间具有良好的平衡性,适用于高性能轮胎。

(本刊编辑部 董屹供稿)

用聚氨酯翻新轮胎

英国 CIL 公司和美国 Syhair 公司开发出以聚氨酯材料翻新载重轮胎的原料体系。该体系由一浇注聚酯型聚氨酯弹性体外胎面 Tyrkast 及一种特殊的单组分聚氨酯胶粘剂 TyrBond RC-1 组成。胶粘剂是翻胎新技术的关键,采用通常工艺,聚氨酯胶粘剂 TyrBond RC-1 即可使轮胎外胎面粘接良好。据称该体系能使翻新轮胎寿命延长 1 倍。试验表明,聚氨酯胎面轮胎能行驶 14 万 ~ 15 万 km,而普通胶轮胎仅行驶 7 万 ~ 8 万 km。该体系主要用于客车轮胎、载重轮胎及工业车辆轮胎的翻新。尽管聚氨酯比常用的 NR, SBR 贵得多,但翻新的聚氨酯胎面的轮胎成本仅为 NR, SBR 胎面轮胎的 1.5 倍。聚氨酯胎面的轮胎经 5 个月的使用,未磨损。

CIL 公司已申请了聚氨酯翻新外胎面的专利。

{摘自《聚氨酯工业》,[1],48(1998)}