

2693

第七届“认证杯”数学中国

数学建模网络挑战赛 承 诺 书

我们仔细阅读了第七届“认证杯”数学中国数学建模网络挑战赛的竞赛规则。

我们完全明白，在竞赛开始后参赛队员不能以任何方式（包括电话、电子邮件、网上咨询等）与队外的任何人（包括指导教师）研究、讨论与赛题有关的问题。

我们知道，抄袭别人的成果是违反竞赛规则的，如果引用别人的成果或其他公开的资料（包括网上查到的资料），必须按照规定的参考文献的表述方式在正文引用处和参考文献中明确列出。

我们郑重承诺，严格遵守竞赛规则，以保证竞赛的公正、公平性。如有违反竞赛规则的行为，我们接受相应处理结果。

我们允许数学中国网站(www.madio.net)公布论文，以供网友之间学习交流，数学中国网站以非商业目的的论文交流不需要提前取得我们的同意。

我们的参赛队号为：2963

参赛队员（签名）：

队员 1：周桐

18729535938

队员 2：张志宏

18792798203

队员 3：刘絮

18789479811

参赛队教练员（签名）：

参赛队伍组别(中学|专科|本科|研究生)：

2693

第七届“认证杯”数学中国

数学建模网络挑战赛 编号专用页

参赛队伍的参赛队号：（请各个参赛队提前填写好）：

竞赛统一编号（由竞赛组委会送至评委团前编号）：

竞赛评阅编号（由竞赛评委团评阅前进行编号）：

2693

2014 年第七届“认证杯”数学中国 数学建模网络挑战赛第二阶段论文

题 目 轮胎花纹设计关 键 词 接地印痕模型 规划模型 优化设计 lingo

摘 要：

轮胎不仅承载着全车的重量，而且还起着避震和缓冲的作用，因此它是陆地交通工具最重要的部件之一。轮胎上的花纹是轮胎牵引力、制动力、耐磨性、操控稳定性、排水、静音性等的来源，采用不同的花纹设计也很大程度上影响了轮胎综合性能。所以根据性能的需要，轮胎表面常会加工出不同形状的花纹。

设计轮胎花纹时，需要综合考虑多种因素对花纹形状及参数的限制，对花纹进行合理设计和优化。本文旨在已知车辆情况、路面条件、用户使用需求的基础上，合理利用第一阶段结论，并且进行设计和优化，建立合理的数学模型，设计出合适的轮胎花纹。

结合第一阶段论文模型改进，利用得到的花纹综合性能指标对花纹进行设计。利用该指标可以分析轮胎花纹深度、花纹块和花纹沟宽度、密度系数等参数与限制条件之间的关系。

设计过程中首先分析限制条件，依据车辆情况主要有轻载汽车轮胎和载重汽车两种；由路面条件有好路面、坏路面和无路面；用户使用需求主要有舒适性（噪音）以及安全性（湿地性能）等。

从而由以上限制条件分析参数对性能的影响。具的步骤如下：依据路面确定花纹类型，依据车型设计轮胎花纹需要确定的参数范围，即轮胎花纹类型以及花纹深度、花纹沟宽度、花纹块宽度和花纹密度系数，以及花纹沟形状等参数。在求出这些参数的合理范围之后，建立的规划模型，意在合理范围内对各花纹参数进一步优化。

最后，依据安全性（湿地性能）、舒适性（低噪音性）等对现有方案进行优化设计，而且，在求解问题的最后加入了轮胎花纹沟形状这一因素，进而得到最适合的轮胎花纹。

具体结果表示如下：

| 使用条件 | 花纹类型 | 花纹深度 | 花纹纵沟宽 | 花纹横沟宽 | 花纹块宽 |
|-----------|------|-------|----------|----------|----------|
| 轻载汽车、好路面 | 普通花纹 | 10.92 | 7.862400 | 6.552000 | 26.20800 |
| 载重汽车、复杂路面 | 混合花纹 | 15.75 | 10.39500 | 9.450001 | 47.25000 |
| 载重汽车、无路面 | 越野花纹 | 17.78 | 24.07717 | 21.88834 | 53.34000 |

本文对轮胎花纹结构参数的关系表达式求取合理并且具体，利用全面的综合分析，成功的针对给定的具体使用环境及性能，完成了合适的轮胎的花纹的设计。

参赛队号： 2693所选题目： A 题

参赛密码

(由组委会填写)

The design of tires' pattern

Abstract

Tires could not only bear the weight of the whole vehicle but also be used as a suspension system or buffer, so they are one of the most important components of land transport. The patterns of tires are the source of tires' traction and braking force, abrasion resistance, handling stability, the source of the drainage and so on. The patterns of tires have a giant influence on the performance of tires. As a result this fact, we always design different patterns according to the needs of performance.

We are supposed to take various factors on shape and parameters into consideration and make reasonable design and optimization of pattern when decorating patterns. This article aims to establish a reasonable mathematical model and then design a suitable pattern for tires with given road conditions, vehicle users' demand and the result of the first question.

In combination with the first question' models, it is time to design the patterns of tires with comprehensive performance concluded from former results. The results can also be used to analyze the tire tread depth and pattern and decorative pattern groove width, the relationship between the density coefficient and other parameters and restriction conditions.

First of all, we analysis the constraints which are necessary. Based on the vehicle condition, the cars are mainly be divided into two kinds called light load cars and trucks. By the road conditions, the road can be divided into good road, bad roads and without road surface. As for users demand, the performances we care about are mainly include comfort (noise), and safety performance (wetland), etc.

Thus, by analyzing the influences of parameters on the performance, we can receive the steps of design. based on the road to determine pattern types, according to the models need to determine the parameters of tire design decorative pattern, namely the tire type and pattern, a pattern of width and depth and pattern groove width pattern density coefficient. After the reasonable range of these parameters, we can establish a programming model and make further optimization within a reasonable range of pattern parameters.

Finally, on the basis of security (wetland) performance, comfort, low noise), etc. We can finally solve the problem and receive the pattern wanted. Specific results are as follows:

In this paper, the relationship between the structural parameters of the tire tread and specific expression are specific and reasonable. The use of a comprehensive and integrated analysis of success for a given specific use of the environment and performance .And we complete the appropriate tire tread design.

| Using condition | Type of pattern | Depth of pattern | Vertical groove width | Transverse groove width | Width of pattern |
|-----------------|-----------------|------------------|-----------------------|-------------------------|------------------|
| Good road | Ordinary | 10.92 | 7.862400 | 6.552000 | 26.20800 |
| Complex road | Mixed | 15.75 | 10.39500 | 9.450001 | 47.25000 |
| Without road | Cross-country | 17.78 | 24.07717 | 21.88834 | 53.34000 |

Keys words: Grounding mark model; planning model; optimization design; lingo

2693

轮胎花纹设计

一 问题重述

轮胎上的花纹是轮胎牵引力、制动力、耐磨性、操控稳定性、排水、静音性等的来源，采用不同的花纹设计也很大程度上影响了轮胎综合性能。设计轮胎花纹时就要根据路况、用途等要求兼顾上述性能。

在上题研究花纹种类对轮胎各个性能的影响的基础上，继续进行设计和优化，完成以下要求：建立合理的数学模型，当给定车辆情况、路面条件和使用需求时，设计出合适的轮胎花纹。

二 问题分析

轮胎含有四大设计要素即花纹(表面形状)、轮廓、结构和材料。在上一问题研究中，我们已经深知其中花纹设计的重要性。根据轮胎的花纹形状分类，即普通花纹、越野花纹和混合花纹。设计轮胎花纹时要在保证轮胎抓地力、排水性、噪音性能耐磨性基础上合理选择花纹种类并进行相应参数设计。

当给定车辆情况、路面条件和使用需求时，要求建立合理的数学模型，设计出合适的轮胎花纹。花纹设计时，主要考虑的结构参数为条纹数量、花纹沟间距、海陆比（无接触区域）、直沟、肩部沟槽、花纹间取向、节数、加强筋、细花纹/刀槽等。在建立对应重要参数的数学模型后，即可根据车辆情况、路面条件和使用需求时，设计出合适的轮胎花纹。

三 符号说明

| 符号 | 说明 |
|--------|----------|
| s | 花纹沟纵向宽度 |
| t | 花纹沟横向宽度 |
| h | 纵向花纹沟深度 |
| ρ | 密度系数（轮胎） |
| n | 纵向条纹数量 |

2693

| | |
|-------|---------------|
| m | 花纹周节数 |
| T_c | 花纹节距值 |
| T_e | 花纹块宽度 |
| b | 轮胎宽度 |
| a_i | 第 i 个限制条件下限 |
| b_i | 第 i 个限制条件上限 |

四 模型的假设

1. 单个轮胎的载荷、直径和宽度均已知并确定；
2. 轮胎的充气压力已知；
3. 轮胎的结构形式为子午胎；
4. 不考虑排气孔、排气性、防擦线、定心分度线、花纹磨耗标志等因素的影响；
5. 假设轮胎的材料为标准材料，不影响花纹的作用；
6. 在使用条件确定的情况下，轮胎规格由厂商给定；
7. 轻载汽车使用平底轮辋的轮胎装配，载重汽车使用 15° 深槽轮辋的轮胎花纹；
8. 研究车辆为标准驱动以及四轮驱动的汽车；
9. 花纹沟宽度可以在花纹形式及其他参数选定后考虑。

五 模型的建立

5.1 接地印痕模型的建立

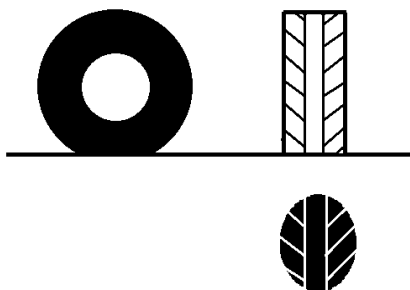
5.1.1 接地印痕形状的分析

通过对接地印痕现象的分析，我们得知，轮胎变形较小时，接地印痕为扁的椭圆，轮胎变形较大时，接地印痕中间部分为矩形，两端有小部分是弧形。根据接地时产生印痕的轮胎的应力、应变特性，为了便于分析，并根据 Julien 的理论[1]，我们可建立自己的轮胎印痕模型，假定胎面是一个弹性带，接地印痕为矩形且法向压力为均匀分布在轮胎产生载荷时。

轮胎胎面花纹沟断面形状变化对牵引力和附着力有重要影响，但是对地面的接地印痕影响却不大，在建立轮胎印痕模型过程中可以假定纹倾斜角在最佳范围内的一个确切的合理值，对接地有效面积没有影响。因为胎面沟槽不接触地面，花纹高度沟高度在合理范围内时，对接地有效面积也没有影响。

2693

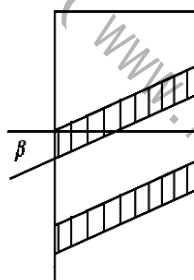
这样，我们可以根据轮胎的花纹沟宽度，花纹的节距、周节数，计算出花纹沟面积，进而计算出轮胎花纹块的总面积，将花纹块的面积比上轮胎总的面积，进行得到花纹的密度系数 (ρ)，再根据模型假设，我们可以求出的接地面积 (A)，进而可以算出有效接地面积 (A_e)，并根据花纹沟宽度、花纹深度等因素对轮胎花纹对磨损性、牵引力、排水性和噪音性能进行分析。



图一

5.1.2 花纹沟宽度等效分析：

对于花纹比较简单的普通轮胎，可以认为在一个节距内花纹主要分为横纹和纵纹，根据花纹的周节数 (n) 条纹的数量 (m) 以及横纵花纹沟的宽度求出有效面积。而有些花纹为了提升轮胎排水性和减少轮胎的噪音，把轮胎的花纹设计的与 呈一定的角度，这个角度就是 β (图二)。



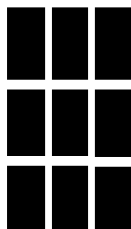
图二

我们可以把均匀，布局合理的斜花纹的等效横向、纵向花纹，根据 β 值，可以把简单的斜纹等效成横纹和纵纹，在单位节距内，对花纹的进行分类讨论：在轮胎 β 值大于 60 度时，可以认为此花纹主要起纵纹的作用，可以将斜花纹的宽度当量成纵花纹的宽度，同理当 β 值小于 30 度时，可以此花纹主要起横纹作用，把斜花纹宽度当量成纵花纹宽度，对于轮胎 β 值在 30 到 60 度之间的花纹，我们可以将斜花纹宽度等分当量成横花纹和纵花纹，横纹当量公式如下，其他当量公式也可以类似的原理得到。

$$t_b = t \cos \beta \quad (1)$$

对于为了减少噪音而设计成的位错花纹，我们可以把节距内横纹之间的位错平移成一条花纹，而对于花纹不连续以及复杂花纹的情况，我们可以根据一个节距内花纹沟面积进行进行宽度的当量。下面是对胎面印痕的简化结果的示意图。

2693



图三

5.1.3 轮胎印痕其他因素的分析：

根据对 5.00-10 型轮胎变形大量实验结果，提出轮胎变形量经验公式[2]

$$\delta = \frac{uW^{b_2}}{p_i^{b_1}}$$

b_1, b_2, μ —实验系数

依靠对不同轮胎实验结果，并根据轮胎变形特点，由地面力学实验的经验公式计算接地长度，宽度：

$$l = 2D\left(\frac{\delta}{D}\right)^s$$

$$b = B_0(1 - e^{-t\delta})$$

t, s —经验系数

接地面积可用以下公式计算：

$$A = \left[\frac{\pi}{2} D \left(\frac{\delta}{D} \right)^s + \lambda \frac{4 - \pi}{4} L_1 \right] B_0 (1 - e^{-t\delta})$$

A —接地面积；

L_1 —接地宽度达到 $0.95B_0$ 时的接地长度；

$$\lambda = \begin{cases} = 0 & b < 0.95B_0 \\ = 1 & b \geq 0.95B_0 \end{cases}$$

5.2 轮胎耐磨性

轮胎的耐磨性直接影响到轮胎所能行驶的距离，轮胎花纹的深度可以根据标准里程要求和轮胎保证的单耗量公里数来预计，按如下公式[2]：

$$h = \frac{\text{标准行驶里程 (km)}}{\text{单耗量 (km/mm)}}$$

式中，单耗量是指消耗 1mm 花纹深度所行驶的公里数。

在欧洲，明确规定轮胎行驶距离应在 30000km 以上，另外，轮胎花纹深度需要根据轮胎类型，车辆情况，路面条件和使用需求等情况来选择。根据以上的要求，并参考美国的 TRAEDI 手册，我们可以选择推荐的花纹深度。

在相同工艺下，行驶距离可用轮胎耐磨性能的计算公式[2]来推算即：

$$\text{胎面花纹深度 (h)} \times \text{宽度} \times \text{周长}$$

2693

在给定车辆情况，路面条件和使用需求，我们就可以根据 TRAEDI 手册查出相应的花纹深度。根据汽车发动机的功率，我们可以确定轮胎的宽度。

可以得出结论：花纹深度（h）以及轮胎的密度系数（ ρ ）对轮胎的耐磨性有着重要影响。

5.3 轮胎花纹对干地牵引力的影响

轮胎在地面上的滚动特性受轮胎刚度和地面强度的制约。当轮胎刚度大于地面强度时，我们将这种路面称为好路面；相反，如果轮胎刚度小于地面强度，这种路面为坏路面；当轮胎刚度和土壤刚度接近时，轮胎与土壤都会发生一定的变形。

汽车在较平整公路上行驶时，一般使用普通轮胎，路面看成硬地面，汽车在路况不好的公路上或者没有修路的土壤上行驶时，一般使用混合、越野花纹。

考虑到当代社会汽车的主要应用范围，我们主要分析在刚性路面上花纹对牵引力的影响，由于天气的影响，路面会有积水，在刚性路面上的研究又分为对干燥路面的牵引力和湿地牵引力。对于混合、越野花纹使用的情况，我们主要分析在柔性土壤上的牵引力，在刚性土壤由于考虑到噪声及磨损性的影响，使用性能下降太多，不做重点考虑。

5.3.1 干地牵引力影响因素推导：

当驱动力矩作用于轮胎时，在接地区间的前端，胎面产生纵向压缩应变 ε ，在接地区间的 ε 值保持不变，轮胎胎面与地面不发生相对滑转， e_0 为接触区前缘轮胎胎面的纵向变形，设 e 为胎面前缘 x 长度处某点的纵向变形，则有

$$e = e_0 + x\varepsilon$$

假设 e_0 正比于 ε ，即 $e_0 = \lambda_t \varepsilon$ ，则：

$$e = (\lambda_t + x)\varepsilon$$

进一步假设，在胎面与地面间无滑动发生在附着区内，每单位接触长度的纵向力与胎面的变形成正比关系，单位接地长度的驱动力为：

$$\frac{dF_x}{dx} = k_{\tan} e = k_{\tan} (\lambda_t + x)\varepsilon$$

式中： k_{\tan} 是胎面的切向刚度； F_x 是驱动力。

那么附着条件（即胎面相对路面不发生滑动条件）为：

$$\frac{dF_x}{dx} = k_{\tan} (\lambda_t + x)\varepsilon \leq pb\mu_p$$

上式表明，如果距前端 x 长的一点在附着区内， x 须小于某一临界长度 l_c ，这也定义了附着区的长度，即：

$$x \leq l_c = \frac{pb\mu_p}{k_{\tan}\varepsilon} - \lambda_t$$

路面情况恶化时，可见不同情况下的 l_c 有所差别， l_c 减少，牵引力会下降。而当发生滑水现象时，由于液体动压的作用，轮胎附着区的长度会减少，由推导式可知，轮胎牵引力会急剧下降，并且会产生扰流阻力，使得实际的牵引力下降较多，需要避免这种情况的发生。

若 $l \leq l_c$ ，则整个轮胎接地区均为附着区。令 $x=l$ ，则驱动方程为：

2693

$$F_x = k_{\tan} \lambda_l \varepsilon \left(1 + \frac{l}{2\lambda_l}\right) \quad (2)$$

5.3.2 干地牵引力影响因素的分析：

(2) 式中的 k_{\tan} 为关键因素，是轮胎面的切向刚度，对驱动力有直接影响，同时 k_{\tan} 过小会影响到磨损性能，使磨损性能下滑，而 k_{\tan} 减小的物理原因是花纹打断了材料的连续性。

k_{\tan} 影响因素有轮胎胎面材料，沟纹高度，花纹断面形状，以及花纹的密度系数决定，根据模型假设，以及之前的分析，不考虑材料选择，沟纹高度与断面形状给定， k_{\tan} 主要由密度系数决定，假设 k^* 为轮胎密度系数对切向刚度影响因子， ρ 在合理取值范围内，可以得到：

$$k_{\tan} = k^* \rho \quad (3)$$

那么可以得出结论：对某种特定类型的轮胎，在该型轮胎花纹块密度系数在设计范围内，轮胎牵引力与花纹密度系数正相关。

5.4 轮胎花纹对湿地性能的影响

汽车轮胎最怕在湿地上高速行驶，由于水膜的润滑作用，其与路面间的摩擦系数将显著下降。当轮胎的滚动速度超过某一极限值时，又会产生滑水现象，是轮胎完全丧失驱动型和制动性。

5.4.1 在湿地上速度对滑动摩擦系数的影响

根据大量的测试结果，在湿的路面上滑动摩擦系数 μ 的平均值随速度 V 的变化大致上可表示为

$$\mu = \mu_0 - kV$$

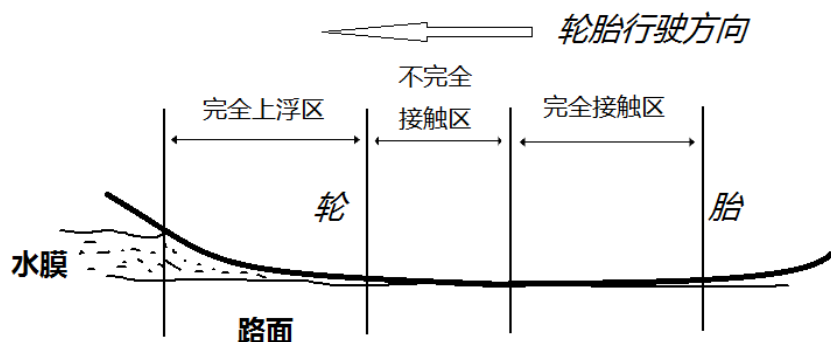
式中 $k = 0.0052$;

难滑路面 $\mu_0 = 0.90$

一般路面 $\mu_0 = 0.77$

易滑路面 $\mu_0 = 0.64$

图 1 为实验测得在湿的普通混凝土路面上测得的滑动摩擦系数随速度的变化情况。



图四

2693

可见，速度越高，滑动摩擦系数值的降低幅度越大。

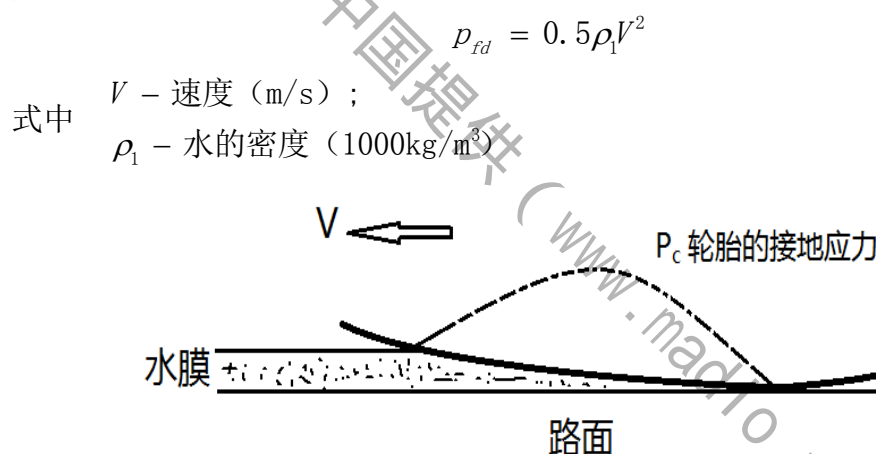
5.4.2 滑水现象

当轮胎在水膜覆盖的路面上高速行驶时，由于流体的压力是轮胎上浮的现象称为“滑水现象”。如果滑水现象一旦发生，轮胎就非常容易打滑，因此是很危险的。

图 2 表示发生部分滑水现象的状态，这里存在三个区域：第一个区域在接触前部为完全上浮区，在此区域内水的流体压力足以把胎面举起，并使之与路面完全脱离；

第二个区域表示水大量流散，但仍然留有一层水膜，为不完全接触区，胎面与路面部分地隔开；第三个区域在接触后部，为胎面与路面完全接触的区域。当然，随着速度变化，上述三个区域的相互关系也会发生变化。例如，提高速度，第一、二区域就会沿接触长度扩展，直到胎面与路面彻底分离，这时轮胎就将发生完全的“滑水现象”。

图 3 表示在即将发生完全滑水现象之前后端部尚接触路面时的状态。如果从固定于轮胎轴的坐标来看，路面和水膜以高速 V 向右方向前进。而且水膜变成楔子状，进入台面内，设胎面为平板状，并且倾角非常小，那么从前方进入的水被路面和胎面的后端拦住。这时水的流线，如图 3 中的下图所示，从胎面的两侧流出。在停滞点，水的动压根据伯努利定理为：



图五

轮胎面的接地压力在中心部为最高，设此压力为 p_{cr} ，而且等于内压 p 的 1.55 倍，即：

$$p_{cr} = 1.55p_1$$

若流体压力比上式中心部的接地压力还要高，那么轮胎就会完全浮起来。所以发现完全滑水现象的条件为：

$$\frac{1}{2} \rho_1 V^2 \geq 1.55p_1$$

考虑到量纲关系，得出如下的最小极限上水滑行速度：

$$v_p = 6.35p_1^{0.5}$$

式中： v_p - 速度 (km/h)
 p - 轮胎内气压 (kPa)

图 8 表示了不同气压下的 v_p 值，这样，轮胎的接地压力越低越容易发生滑水现象。

2693

此外，根据轮胎的接地压力分布，若在中心部的压力并不高，那么如图 4-31 所示，由于水的楔子状进入，也容易发生局部的滑水现象。然而，当胎面两侧分布的接地压力非常高时，虽然部分的滑水现象容易发生，可是要发生完全的滑水现象却不容易。

根据已提出的发生滑水现象的最低速度计算公式：

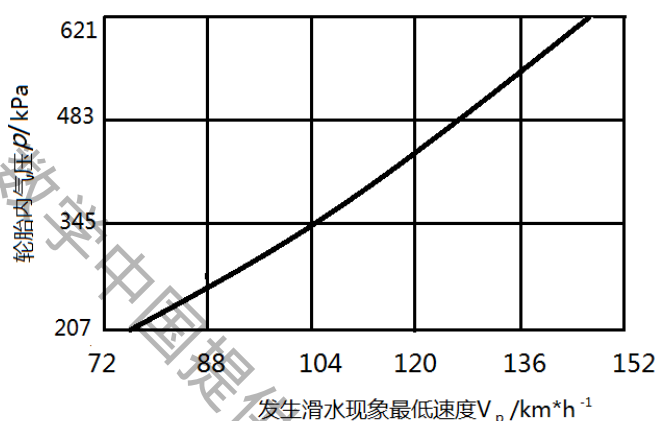
$$V_p(c) = 5.55 \left[\frac{p}{(w/l)} \right]^{0.5} \quad (4)$$

式中：

$V_p(c)$ —轿车轮胎的最小极限水上滑行速度（km/h）；

w —轮胎接地面宽度（m）；

l —轮胎接地面长度（m）；



图六

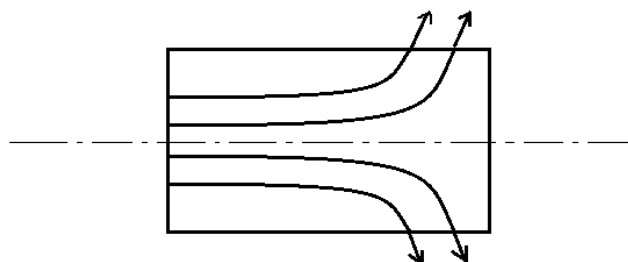
根据观察，一个气压为 193kPa, 接地宽度 95mm, 长度 152mm 的轮胎， $V_p(c)$ 约为 100Kmh，而根据上式计算结果为 97 Km/h。由已知实验得出：

$$V_p(T) = 29.4 p^{0.21} \left[\frac{1}{(w/l)} \right]^{0.5} \quad (5)$$

易知，在实际选择中，发生滑水现象的最低速度越高越好。

5.4.3 轮胎花纹的排水性能

胎面花纹对湿地牵引性的影响也很重要，因为花纹中的沟既能给移动的水提供存贮空间，又能给排出水提供通道，下图是排水过程的示意图



图七

纵向沟纹主要起到存贮水的功能，汽车经过水层，水会随着轮胎旋转带动起来存储在纵向沟纹中；横向沟纹主要起到排水功能，贮藏在纵向沟纹中的水会随着车轮转动向

2693

两边挤压，有一定的压力差，水会通过横向沟纹排出胎面。

经过上述分析，可以假设胎面纵向花纹沟宽度 s ，横向花纹沟宽度 t ，纵向花纹沟长度 πD ，横向花纹沟长度(即轮胎宽度) B_0 ，横向花纹沟数(即轮胎节数) n ，纵向花纹沟数 m 。纵横向的花纹沟深度分别为 l_1 和 l_2 ，则轮胎的储存水体积即纵向花纹沟体积为：

$$V_1 = \pi n s h D \quad (6)$$

同理，轮胎排水体积即横向花纹沟体积为：

$$V_2 = m t h B_0 \quad (7)$$

V_1 越大则表明轮胎的存水能力强， V_2 越大表明轮胎的排水能力强，当 $V_1 > V_2$ 时轮胎处于正常排水状态，当水面较高时不易发生划水现象；当 $V_1 < V_2$ 时，水面较高时就容易发生滑水现象。

那么可以得出结论：通过对同尺寸轮胎不同花纹沟的纵向和横向宽度 (s 、 t) 比较，就可以得出改型花纹在湿滑路面防滑性能，随着参数 s 、 t 的增加，轮胎花纹密度系数减小。对具体类型轮胎，轮胎花纹密度系数在一定范围内与湿地性能负相关。

5.5 轮胎花纹对噪声的影响

由于对轮胎花纹噪声的和上述模型有些差异，需要一些特殊参数分析，可以看做是在原有设计上的优化。

轮胎花纹噪声主要有三种：泵气噪声、花纹撞击路面噪声和节距噪声。其中，花纹撞击路面噪声是指胎面花纹接地时还产生连续打击路面的噪声，与花纹的结构参数和路面情况均有紧密关系。所以本文中主要讨论论外两中花纹噪声。

首先，分析人类对噪声的感觉。人对噪声的感觉大小 ΔS 用相对值表示，即 $\Delta S = \Delta I / I$

则对其积分，得 $S = \log I = \log p^2 = 2 \log P$

并用分贝表示为 $S_{dB} = \log(P/P_0)$

如果有 k 个生源，在某点产生噪声声压级分别为 L_k ；则由此可以得到这点的总声压级 L_{sum}

$$L_{sum} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{m=1}^k p_m^2}{p_0^2} \right)$$

则表征噪声的大小即可用总的声压级来表示，即 L_{sum} 的大小来表示。

5.5.1 泵气噪声

发生机理：胎面花纹的泵气噪声是由于花纹间槽腔体中的气体在轮胎滚动的很短时间内被挤压和释放而产生气压变化，从而引起声音。目前已有论著推荐轮胎泵气噪声的声压级公式，在推导声压级公式时，需要做如一些假设，花纹间槽强中的气体完全被挤出或吸入；每一个花纹间槽腔体是一个单极子源；花纹间槽腔之间没有干涉作用；轮胎运动时，某一花纹沟被挤压，则另一侧的花纹沟被释放。花纹沟体积 V_2 为：

$$V_2 = a s t$$

其中系数 a 根据假设为 $\begin{cases} 1 & \delta \geq 1 \\ \delta & \delta < 1 \end{cases}$

2693

其中 δ —轮胎最大下沉量 l_1 —轮胎花纹沟深度
 s —花纹沟纵向宽度 t —花纹沟横向宽度

一个花纹沟挤出（或吸入）气体过程所需要时间（ t_2 ）为：

$$Q_2 = \frac{nV_2}{t_2} = \frac{nastv}{s + t \sin \beta}$$

式中 β —花纹沟与轮胎轴线的夹角
 v —轮胎径向振动速度

根基假设花纹沟中的气体被完全挤出（或吸入）和花纹之间没有干涉作用，某方向花纹由于被挤压（或释放），此过程中的气体流量为：

$$t_2 = \frac{s + t \sin \beta}{v}$$

将其考虑为单极子源，可以得到某方向花纹沟所产生的平均声压（ P_2 ）为：

$$P_2 = \frac{\rho Q_2}{4\pi R t_2} = \frac{\rho}{4\pi R} \frac{nastv^2}{(s + t \sin \beta)^2}$$

这样，可得到平均声压级（ L_2 ）为：

$$L_2 = 20 \lg \frac{P_2}{P_0} = 20 \lg \frac{\rho}{4\pi R} \frac{nastv^2}{(s + t \sin \beta)^2} \frac{1}{P_0} \quad (8)$$

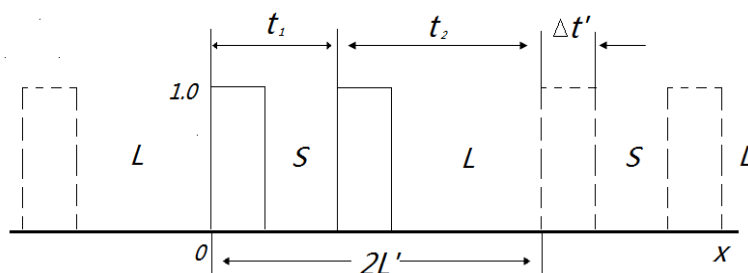
根据以上式子可知，若要降噪则 L_2 在满足条件的情况下尽量小些即可。可以通过改变参数 s 和 t 的比值来减少平均声压级。

那么可以得出结论：在 β 角度给定的情况下，减少泵气噪声要通过设计合理的比值参数 $\frac{s}{t}$ ；合理的增加 β 值可以减少泵气噪声。

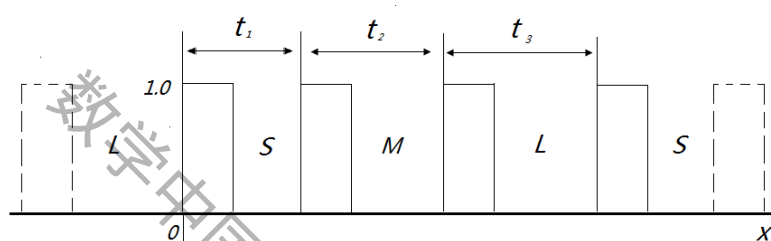
5.5.2 节距噪声

花纹节距是指组成轮胎圆周整体花纹具有的相同结构、形状分布的单元花纹在圆周方向的宽度，周结数是指这样重复的个数。

节距噪声主要指横沟花纹噪声。分析易知，如果胎面花纹有一定节距数，并且此节距在轮胎圆周上均为等长，那么在特定的频率下，噪声水平出现峰值。在此种情况下音的能量集中，并且容易进入人耳，甚至非常刺耳。为了减轻刺耳程度，通常多采用结距变化的方法。此方法就是把胎面的花纹节距分为好几种长度，并且在轮胎的圆周上适当排列，如图八、图九所示。



图八



图九

得出推论：通常多采用结距变化的优化设计方法可以减少轮胎节距噪声。

5.6 轮胎花纹类型与适用范围

轮胎花纹类型很大程度上决定了轮胎的性能，进而决定了轮胎的适用范围。轮胎花纹主要分为普通花纹（纵向、横向花纹），混合花纹，以及越野花纹。经过调查，不同的花纹类型主要是针对不同的路面条件而设计，而根据车辆情况以及使用需求可以更进一步确定具体参数。

以下是一些经典的花纹类型，可以供设计花纹时选用。



图十

5.6.1 普通花纹轮胎

普通花纹轮胎也称公路花纹轮胎，下面对普通花纹轮胎进行性能分析。假设此轮胎的花纹沟纵向宽度，花纹沟横向宽度，纵向条纹数量，花纹周节数，花纹沟与轮胎轴线

2693

的夹角等轮胎参数已经给出，可以根据上文对各个性能的分析结论对此类型轮胎进行评估。

先分析轮胎的干地性能。普通花纹中纵向花纹轮胎的花纹宽度主要是纵纹宽度(s)，横向花纹轮胎花纹沟宽度主要是横沟宽度(t)，横向花纹沟通常与径向呈 $10^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 角度。根据设计手册[1]，该型轮胎花纹的密度系数在65%~80%左右，相对其他类型轮胎密度系数较高，轮胎的牵引力、耐磨性能优异，有良好的高速性能。但是较高的花纹密度系数使得花纹沟较窄，花纹沟较窄易夹石子并且底部容易开裂。

花纹的密度系数小，由花纹沟宽度主要决定的排水性能一般，自洁性较差，不适合在较为复杂的路面行驶。花纹噪音较小，有着较好的舒适度，适合长途旅行。

综上所述，普通花纹轮胎适合路面质量较好路面，一般用于经常在国道，高速公路等水泥柏油路面上行驶的汽车。

5.6.2 混合花纹轮胎

混合花纹轮胎是现在轿车最常用的轮胎，它兼备了纵沟和横沟花纹，对排水性有较大提升，轮胎干地性能虽然有所下降，但是其他性能有所改善，综合性能提高，适合多种路面的中短途运输，因而得到广泛应用。

同5.6.1对普通花纹分析，先分析混合花纹轮胎的干地性能。混合花纹轮胎既有足够的纵向花纹沟，同时兼具大量的横向花纹，所以需要同时考虑纵沟宽度(s)和横沟宽度(t)。根据设计手册[2]，该型轮胎花纹的密度系数在55%~70%左右，相对其他类型轮胎，密度系数处于中等水平，轮胎的牵引力、耐磨性能良好，有中等的高速性能。除此之外相对普通花纹较低的花纹密度系数使得花纹沟得以增宽，花纹沟变宽使得轮胎自洁性较好，沟底不易开裂。

综上所述，混合花纹轮胎适合路面质量复杂的路面，一般用于经常在城市路面、城乡道路、乡镇道路及有着复杂天气情况下行驶的汽车。

5.6.3 越野花纹轮胎

顾名思义，这类轮胎是越野车及一些工程车辆的最佳选择，越野花纹亦称高行驶性能花纹。该花纹有横纹纵纹，花纹沟宽度较大，花纹较为复杂。

同5.6.1对普通花纹分析，先分析越野花纹轮胎的干地性能。越野花纹轮胎有着较大的纵沟宽度(s)和横沟宽度(t)。根据设计手册[2]，该型轮胎花纹的密度系数在40%~50%左右，相对其他类型轮胎，密度系数处于较低水平，通过自身的啮合效应增加牵引力，以适应野外的复杂情况，是一种专用的轮胎。轮胎自洁性较好，排水性能好，但是在硬路面上有较大的噪声，同时存在较大的磨损性。

综上所述，越野花纹轮胎适合路面质量较差的路面，一般用于经常在矿区、崎岖不平的山路等不好的路面下行驶的汽车。

5.6.4 花纹分析的总结：

根据以上分析，我们可以得到轮胎花纹性能特性，通过反推可以得到不同路面情况下的合适花纹类型，及该类型花纹的特点，结果如下表：

2693

| 路面类型 | 路况较好的公路 | 路况复杂的城市道路 | 路况较差的极端路面 |
|--------|---------|-----------|-----------|
| 花纹类型 | 普通花纹 | 混合花纹 | 越野花纹 |
| 花纹自洁性 | 差 | 较好 | 好 |
| 花纹舒适性 | 好 | 较好 | 差 |
| 花纹干地性能 | 好 | 较好 | 无关 |
| 花纹湿地性能 | 差 | 好 | 无关 |

表一

我们可以根据上表来确定不同路况下轮胎花纹类型。

六 模型的分析与求解

轮胎花纹形状对轮胎的性能有着重要的影响，每当推出新轮胎时，需要对花纹形状进行认真的设计和优化。认为轮胎依据车辆情况主要分为轻载汽车轮胎和载重汽车/客车轮胎，路面条件主要分为好路面（公路型），坏路面（牵引型）以及无路面（加深牵引型），根据用户使用需求可将轮胎大致分为三类，公路型花纹，牵引型花纹和加深牵引型花纹，使用需求还需要从舒适性（噪音）以及安全性（湿地性能）考虑。设计方案主要确定轮胎花纹类型以及花纹深度、花纹沟宽度、花纹块宽度和花纹密度系数等参数。使用需求满足很大程度上依赖优化设计方案。

6.1 步骤一：依据路面状况选择轮胎花纹类型

轮胎胎面花纹形式众多，归结起来主要有三种基本类型，普通花纹、混合花纹以及越野花纹。在本文第五部分，确定了这三种花纹适合的路面条件，现在进行进一步的分析。

汽车行驶的路面条件主要有三类：水泥，柏油等硬路面，路面条件较好情况，把这一类路面称之为好路面；还有的轮胎就是在土路和泥路等地面较为松软的路面使用，把这一类地面称之为坏路面；还有一种情况是在崎岖不平的山路、沙地以及建筑工地上使用，把这种路况称之为无路面。

在给定车辆使用需求的情况下，可以根据这种需求下对应的路面以及上文的分析选择出一种适合该路面条件下的轮胎类型进而进行详细的设计。

1. 在车辆主要行驶在好路面时，该类车辆主要在国道和高速路上行驶，可以认为普通花纹比较适合该车辆，普通花纹又称公路花纹，此时使用公路型花纹有助于车辆整体性能提升。实际情况普通花纹轮胎中纯粹的纵纹花纹轮胎和横纹花纹轮胎很少，一般是以纵纹为主，辅之以必要的横纹。普通花纹的花纹块面积占行驶面积（轮胎密度系数 ρ ）较高，具体数值为 65%~80%。

2. 在车辆既行驶在好路面又行驶在坏路面时，该类车辆主要在城市道路、城乡间道路和乡镇道路上行驶，这也是绝大多数车辆行驶路况，可以认为混合花纹比较适合该类车辆，混合花纹结合了普通花纹和越野花纹的优点，并且适合复杂的下雨天气的情况使用。普通花纹的花纹块面积占行驶面积（轮胎密度系数 ρ ）中等，具体数值为 55%~70%。

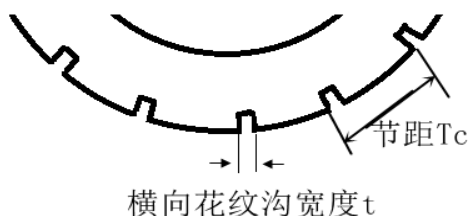
3. 车辆行驶在无路面情况时，该类车辆主要在路况不好的山路、沙地上行驶，越野花纹比较适合这种路况，越野花纹主要用于特殊情况的车辆，如军用越野车和各种工程车辆。越野花纹的花纹块面积占行驶面积（轮胎密度系数 ρ ）较低，其具体的数值为 40%~50%。

2693

6.2 步骤二：依据车辆类型及使用需求选择具体花纹参数

在由路面条件确定花纹类型后，我们需要根据确定轮胎花纹具体的一些参数，比如花纹深度、花纹沟宽度和密度系数，这时我们需要加入新的影响因素进行设计。

以下是轮胎花纹参数的一个示意图



图十一

6.2.1 花纹深度 h 的确定：

根据 TRAEDI 手册查可以得不同规格轮胎对应于不同载重车辆花纹沟深度 h 。

在设计轻载汽车轮胎花纹深度时，TRAEDI 分别给出了装配不同深槽的花纹沟深度推荐表。我们选用装配 15° 深槽轮辋的子午线宽基轮胎花纹深度表进行设计，根据目标用户使用需求在公路型花纹、牵引型花纹和加深牵引型花纹中选择，由此可以确定轻载汽车具体花纹深度。

装配 15° 深槽轮辋的子午线宽基轮胎花纹深度 (mm)

| 子午线宽基轮胎规格 | 轮胎花纹设计深度/mm | |
|-------------|-------------|-------|
| | 公路型花纹 | 牵引型花纹 |
| 8.00R16.5LT | 10.92 | 13.97 |
| 8.75R16.5LT | 11.43 | 14.48 |
| 9.5R16.5LT | 11.94 | 14.99 |
| 10R16.5LT | 12.70 | 15.75 |
| 12R16.5LT | 12.95 | 16.00 |

表二

在设计载重汽车、客车和挂车轮胎花纹深度时，TRAEDI 同样给出了不同的推荐，我们选用装配平底轮辋的轮胎设计花纹表进行设计，由此可以确定载重汽车客车具体花纹深度。

装配平底轮辋的轮胎设计花纹深度(单位：mm)

| 子午线轮胎规格 | 公路型花纹 | 牵引型花纹 | 加深牵引型花纹 |
|---------|-------|-------|---------|
| 7.00R | 10.92 | 15.49 | 17.02 |
| 7.50R | 11.18 | 15.57 | 17.78 |
| 8.25R | 11.94 | 16.51 | 18.80 |
| 9.00R | 12.45 | 17.02 | 20.07 |
| 10.00R | 12.95 | 17.53 | 20.57 |

2693

| | | | |
|--------|-------|-------|-------|
| 11.00R | 13.46 | 18.03 | 21.34 |
| 12.00R | 13.97 | 18.54 | 22.35 |
| 13.00R | 14.73 | 19.30 | 23.88 |
| 14.00R | 15.49 | 20.07 | 25.40 |
| 16.00R | 15.75 | 20.32 | 28.45 |

表三

在给定车辆情况时，可以从表二或表三选择花纹深度。详细设计时，只要给出轮胎规格，花纹的使用需求，具体点就是需要公路型还是牵引型还是加深牵引型的情况下，就可以设计出花纹的深度。

6.2.2 花纹块、花纹横沟宽度的确定：

确定花纹深度后，进一步设计其他参数。根据文献[1]中列举的国外资料，可以根据车辆情况和花纹形式确定横纹花纹块宽和花纹沟宽所满足的条件，具体见下表。

胎面花纹参数取值范围

| 项目 | 载重轮胎 | | | 轿车轮胎 | |
|------------------------|---------|-------|-------|---------|-------|
| | 普通花纹 | 混合花纹 | 越野花纹 | 普通花纹 | 越野花纹 |
| 花纹沟宽 (t) /花纹沟深 (h) | 0.5~0.8 | 0.3~3 | 0.5~4 | 0.2~0.6 | 0.5~3 |
| 花纹块宽 (Te) /花纹沟深 (h) | 1.2~3 | 1.5~3 | 1.5~3 | 0.8~2.5 | 1.5~3 |
| 花纹块宽 (Te) /花纹沟宽 (t) | 2~5 | 2~5 | 0.5~4 | 2~4 | 0.8~3 |

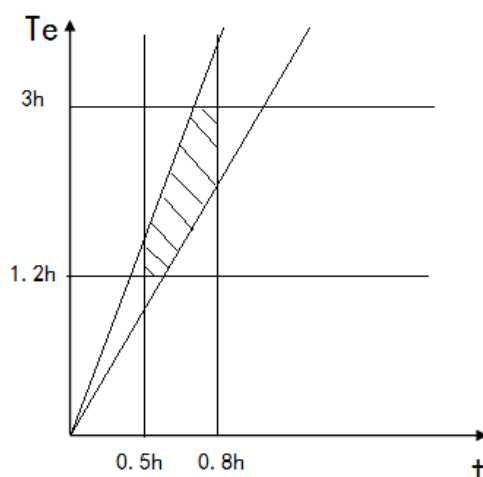
表四

我们将花纹沟宽/花纹沟深，花纹块宽/花纹沟深和花纹块宽/花纹沟宽的上下边界分别定义为 a_1, b_1 ; a_2, b_2 ; a_3, b_3 。根据花纹沟宽和花纹块宽取值范围可以建立三组不等式方程，可以表示为：

$$\begin{aligned}
 a_1 &\leq \frac{t}{h} \leq b_1 \\
 a_2 &\leq \frac{Te}{h} \leq b_2 \\
 a_3 &\leq \frac{Te}{t} \leq b_3
 \end{aligned} \tag{9}$$

根据以上的三组不等式，可以初步选定轮胎的花纹横沟宽 (t) 和花纹块宽 (Te) 的范围，确定 Te 和 t 的可行域。载重轮胎使用普通花纹的参数可行域示意图如下：

2693



图十二

6.2.3 花纹纵沟宽度 s 确定

根据接地印痕模型，纵向花纹沟宽度的取值需要首先确定轮胎宽度 (b) 以及轮胎花纹密度 (ρ)，轮胎宽度在给定发动机功率时已经由表五确定，花纹密度系数在给定花纹类型取值范围由表六给出。通过 6.2.2 的分析，横纹沟宽度 t 、花纹块宽度 Te 初步范围已经确定。

由问题假设，只研究标准驱动和四轮驱动的汽车，车辆发动机功率给定情况下，根据文献[3]选取合适轮胎宽度 b ，具体表格如下：

四轮驱动轮胎宽度表

| 功率/KW | 130 | 150 | 165 | 185 | 200 | 220 | 240 | 260 |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 宽度/mm | 185 | 195 | 205 | 215 | 225 | 235 | 245 | 265 |

表五

同时，根据 6.1，已经得到花纹密度系数的范围：

花纹类型与花纹密度系数

| 花纹类型 | 普通花纹 | 混合花纹 | 越野花纹 |
|-----------------|---------|---------|---------|
| 花纹密度 (ρ) | 65%~80% | 55%~70% | 40%~50% |

表六

给定轮胎类型时，轮胎具体参数的设计需要满足密度系数要求，其他参数和密度系数的关系如下

$$\rho = \frac{Te}{Te + t} \times \left(1 - \frac{n \times s}{b}\right) \quad (10)$$

对花纹密度的上下边界值可以设为 a_4 , b_4 ，这样可以得到限制条件 $a_4 \leq \rho \leq b_4$ 。

表四给出了花纹块宽/花纹沟宽 (Te/t) 的取值范围，令此比值等于 γ 。除此之外，

2693

由于为了保证排水性的设计经验以及绝大多数经典轮胎类型设计方案可以总结出纵向条纹数量一般在 3 到 4 个，设计时根据实际情况来取。在选定 γ 值和 n 的值后，可以由以下不等式确定纵向花纹沟宽 (s) 的范围。

$$a_4 \leq \frac{\gamma}{\gamma+1} \times (1 - \frac{n \times s}{b}) \leq b_4 \quad (11)$$

同时根据 5.4.3 中对排水性的分析，以及实际应用中轮胎尺寸关系与已有方案条纹选择，可以知道花纹沟横沟宽度和纵沟宽度需要相差不要太大，大致满足以下大致要求：

$$t \leq s \leq \eta t \quad (12)$$

其中 η 为参数 s 与 t 的最大偏差量，设计的时候根据实际情况确立。

6.3 步骤三：建立规划模型设计胎面花纹

在步骤一给出了花纹类型的选择，进而确定了轮胎花纹密度系数范围，步骤二给出了花纹块宽，花纹沟宽和花纹深度等参数的取值范围以及它们之间的相互关系的基础上，给定车辆情况、路面条件和使用需求后，我们就可以给出一个大致的设计范围，供轮胎设计作参照。实际设计过程中可以参照已有方案进行设计并且考虑到加工设备情况，结合不同轮胎公司的加工标准，可以在原有基础上进行设计。下面给出一种基于规划模型的参考方案，用于供设计轮胎花纹时作参考。

6.3.1 花纹设计方案建立

方案设计以提升轮胎的性能为目标，轮胎花纹决定的性能主要有干地性能、湿地性能、噪音（舒适性）、磨损性和其他性能，其他性能主要是自洁性。轮胎参数与轮胎性能关系在本文第 5 部分给出了结论性的评价，需要将参数按照一定的标准无量纲化用于不同设计方案之间的比较。

由于设计轮胎时要考虑多个性能指标，各性能指标占比重有所不同，需要对各个性能的重要程度取权值。成立于 1903 年的 ADAC 是一个以公司性质运营的非营利性机构，中文名为全德汽车俱乐部，以 ADAC 对 19 款夏季轮胎产品测试报告为参照，分配各个性能的权值用于设计，考虑到后期优化设计以及参数实际影响力。例如普通轮胎的权值分布为：干地性能权值 λ_1 为 30%，湿地性能权值 λ_2 为 50%，轮胎噪声性能权值 λ_3 为 10%，耐磨性权值 λ_4 为 7%，其他性能权值 λ_5 为 3%。

下面确定各个性能的指标用于设计。

对于干地性能，由 5.3 中式 (3) 以及相应结论，轮胎干地性能 F_1 指标为：

$$F_1 = (\rho - a_4)/(b_4 - a_4) \quad (13)$$

对于湿地性能，由 5.4 中式 (6)、(7) 以及相应结论，轮胎湿地性能 F_2 指标为：

$$F_2 = 0.5 \times [(s - ha_1)/\eta(hb_1 - ha_1) + (t - ha_1)/(hb_1 - ha_1)] \quad (14)$$

对于噪音性能，由 5.5 中式 (8) 以及相应结论，并且需要考虑到 (12) 限制条件，在 β 角为零时，轮胎噪音性能 F_3 指标为：

$$F_3 = (s/t - 1)/(\eta - 1) \quad (15)$$

对于耐磨性，由于决定耐磨性的很多参数已经在设计初固定，只考虑密度系数对耐磨性的影响，轮胎耐磨性能 F_4 指标为：

$$F_4 = (\rho - a_4)/(b_4 - a_4) \quad (16)$$

对于其他性能，主要考虑花纹密度主要决定的自洁性，轮胎耐磨性能 F_5 指标为：

2693

$$F_5 = (b_4 - \rho)/(b_4 - a_4) \quad (17)$$

接下来需要通过各个参数设计使综合性能 F 提升，我们建立轮胎花纹对性能影响的数学模型来定量计算，式 (13) ~ (17) 为目标函数，(9) (11) (12) 为限制条件。

以下为建立的模型：

$$\begin{aligned} \max F &= \sum_{i=1}^5 \lambda_i \times F_i \\ s.t. &\begin{cases} a_1 \leq \frac{t}{h} \leq b_1 \\ a_2 \leq \frac{Te}{h} \leq b_2 \\ a_3 \leq \frac{Te}{t} \leq b_3 \\ a_4 \leq \frac{\gamma}{\gamma+1} \times (1 - \frac{n \times s}{b}) \leq b_4 \\ 1 \leq \frac{s}{t} \leq \eta \\ s \geq 0, t \geq 0, Te \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

6.3.2 花纹设计方案结果

我们利用 6.3.1 的模型对一些常用情况下的轮胎进行设计。

在路面情况较好，车辆类型为轻载的汽车时，我们根据模型首先选择普通花纹，使用需求决定花纹是公路型的，选取轮胎规格 8.00R16.5LT 型花纹。根据表二，花纹深度为 10.92mm，选用三条纵沟 ($n=3$) 的形式以便于排水，轿车发动机功率较小，轮胎宽度根据表五去取 195mm，根据表四，表六可以得到边界条件，取 $\eta=1.2$ 作为偏差量，使用 Lingo 编程求解。

在路面情况较为复杂时，车辆类型为载重汽车时时，我们根据模型首先选择混合花纹，使用需求决定花纹是牵引型的，选取轮胎规格 8R19.5 型花纹。根据表三，花纹深度为 15.75mm，选用三条纵沟 ($n=3$) 的形式以保证排水性，载重车辆轮胎发动机功率大，轮胎宽度根据表五去取 245mm，根据表四，表六可以得到边界条件，同样可以使用 Lingo 编程求解。

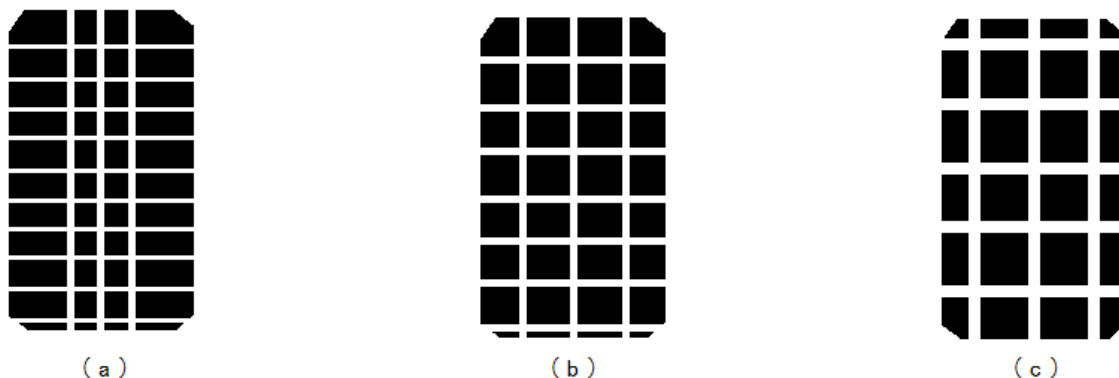
在路面情况较为差时，车辆类型为载重汽车时时，我们根据模型首先选择越野花纹，使用需求决定花纹是加深牵引型的，选取轮胎规格 8R19.5 型花纹。根据表三，花纹深度为 17.78mm，选用三条纵沟 ($n=3$) 的形式以保证排水性，载重车辆轮胎发动机功率大，轮胎宽度根据表五去同样取 245mm，并对评价系数进行调整以保证在无路面情况下的性能需求。根据表四，表六可以得到边界条件，同样可以使用 Lingo 编程求解。

以下是 Lingo 软件进行编程求解得到以上选中花纹的主要结果 (单位 mm)：

| 使用条件 | 花纹类型 | 花纹深度 | 花纹纵沟宽 | 花纹横沟宽 | 花纹块宽 |
|-----------|------|-------|----------|----------|----------|
| 轻载汽车、好路面 | 普通花纹 | 10.92 | 7.862400 | 6.552000 | 26.20800 |
| 载重汽车、复杂路面 | 混合花纹 | 15.75 | 10.39500 | 9.450001 | 47.25000 |
| 载重汽车、无路面 | 越野花纹 | 17.78 | 24.07717 | 21.88834 | 53.34000 |

表七

花纹接地印痕的对比示意图（只考虑主要参数）：



6.4 步骤四：对现有方案进行优化设计

在选择轮胎时，使用需求还有有舒适性及安全性等方面的考虑，主要是针对普通花纹和混合花纹进行优化。以下分别从不同角度对花纹提出要求进行设计。

6.4.1 依据舒适性（低噪音性）进行优化设计

在 5.5 中，我们已经对噪音性进行了较为细致的分析，根据对此性能的分析，对轮胎花纹设计进行进一步的优化。

汽车在行驶时，特别在高速行驶时轮胎面与地面相互作用产生噪声主要有三种：泵气噪声、节距噪声和花纹撞击路面噪声。其中，与花纹设计优化相关的是前两种噪声。泵气噪声产生的原因是花纹沟槽腔体中的空气被挤压，释放形成“气泵效应”而产生噪声。节距噪声主要指横沟花纹噪声，如果胎面花纹有一定节距数，并且此节距在轮胎圆周上均为等长，那么在特定的频率下，噪声水平出现峰值。在此情况下音的能量集中，并且容易进入人耳，甚至非常刺耳。

消除这两种噪声采用优化方法：

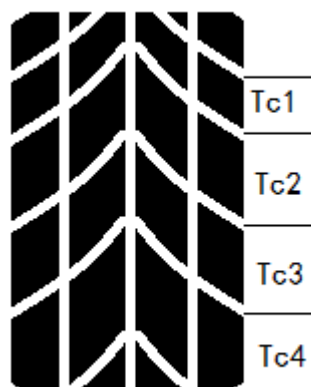
1. 花纹沟的横向沟槽会产生较大的噪声，这点 5.5 中的分析结论有涉及，在 6.3 中设计中已经有较多考虑。

2. 花纹沟槽要相通，不要造成窝气现象，可以进一步减少噪音。

3. 在原有设计方案基础上采用不等节距（变节距）花纹，即在轮胎圆周上将花纹分割成不等尺寸的花纹块，一般选用 3~5 个不等节距（图八、图九），最大和最小的节距差 20%~50%，并在圆周上交错无序的排列。

以下是低噪音花纹的一个设计方案：

2693

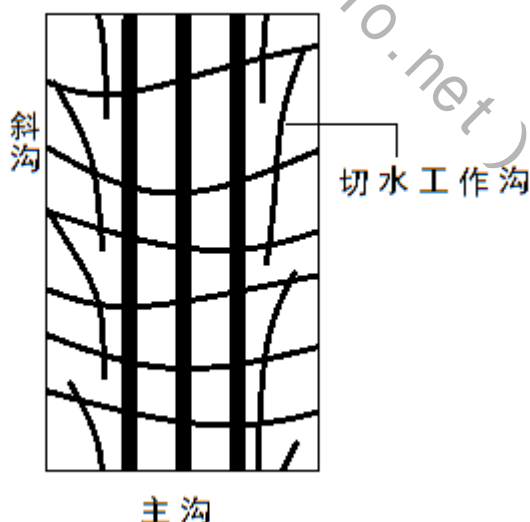


6.4.2 依据安全性（湿地性能）进行优化设计

在 5.4 中，我们详细讨论了轮胎花纹湿地，其中着重对排水性能进行了分析，当轮胎在湿滑路面上转动时，轮胎与水面的接触情况如图四所示，为了减少排水阻力，提升轮胎花纹的安全性能，需要对花纹进行进一步的优化设计。一些现有的方案可供参考：

- 1.纵沟为主的设计方案使得沟纹与转动方向一致，使汽车直线行驶排水迅速。
- 2.通过加入切水工作沟（与纵沟成斜角 β 的横沟），更好适应直线行驶。
- 3.为了适应转向，可以选用与胎肩部转动方向成直角的横向沟槽。
- 4.将纵沟、斜沟、切水工作沟结合起来，在设计时保证密度系数不变。

使用以上设计准则可以提升抗划水膜性能，提升轮胎的排水性并且兼顾了花纹噪音和干地性能，根据不同的轮胎类型进行相应的优化，以下是对一个混合型花纹优化后的示意图：



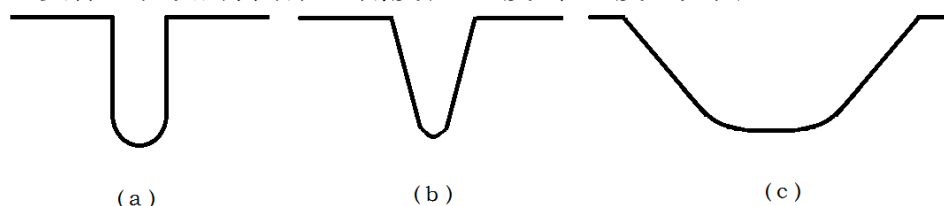
6.5 步骤五：花纹沟形状设计

再设计花纹时，除了胎面表面的设计，花纹沟内部的形状对于轮胎性能也具有重要影响，此部分设计跟前面的设计相对独立。花纹沟形状主要分单层沟和双层沟两种。

6.5.1 单层断面花纹沟

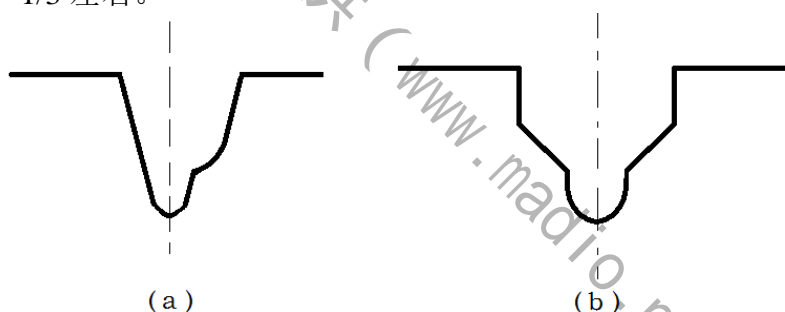
单层花纹沟有 U 型和 V 型两种。U 型的花纹沟壁为直壁型，如下图 (a) 所示，V 型花纹沟壁呈一定角度的楔形，如图 (b) 所示，倾角的大小随花纹类型而有差异。

花纹沟倾角选择与花纹类型相关。对于普通和混合花纹，纵向花纹沟较窄，角度一般在 5 度到 10 度之间；横向花纹沟较宽，应选取较大的角度；越野花纹沟壁倾角前后不一样，为了保证花纹的抓着性能，先着地的以此沟壁倾角可选用 15 度到 20 度，而后着地一侧，主要保证花纹的自洁性，角度在 25 度到 30 度，如图 (c)。



6.5.2 双层断面花纹沟

有的花纹沟深度较深，在行驶过程中会夹入石子，这对行驶是很不利的，一方面造成了轮胎变形，另一方面改变了应力布局，可能产生危险因素，所以应想办法加以解决，最常用的一种方法就是采用双层断面。这种形式分为两种，单壁双层和双壁双层，分别如下图 (a) (b) 所示，花纹沟上层台阶深度可取花纹沟全深的 $\frac{2}{3}$ 左右，台阶宽度为花纹沟宽度的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ 左右。



这样，根据不同的需求，在步骤一到步骤四执行完后，再从五种不同的花纹沟内部的形状供选择一种合适的花纹沟形状。

七 模型的综合评价

7.1 模型综合评价

轮胎花纹的设计其实是花纹分析的逆过程，在第一阶段的论述中我们已经根据模型求解得到了很多关于轮胎性能指标以及与之有关的花纹参数，本文从花纹类型入手，依据不同路面不同车型以及不同需求依次对花纹各参数进行设计和优化。在不同路面中考虑了公路，沙路等情况，这样可以确定大体花纹类型，再根据载重的不同设计花纹沟深度以及花纹块宽度等参数，最后分别从舒适性，安全性等不同行驶需求进一步优化参数。从总体上来说符合题目所给要求，考虑了各种条件下花纹类型和具体形式，从细节上来说设计的过程结合了第一阶段的结论部分以及对第一阶段模型不完善的部分的优化与

2693

改进。而且文章结合了具体数值的计算，搜集了大量国内外有关设计经验与数据资料，并提出了自己的较为合理的设计过程，经过对比，设计结果基本符合实际情况。

7.2 模型优缺点

模型设计过程中，引用了第一阶段的结论，一方面使得模型前后具有连贯性而且进一步验证了上一阶段论文模型的合理性，采用科学合理假设对问题进行了简化，推导合理，假设明确，考虑了多种需求不同情况下花纹的设计方法与设计结果，可以发现花纹的设计和花纹的分析密不可分。文章提出了运用规划的模型进行优化模型，使得花纹参数具体到数值，更加准确，也为今后新的需求下花纹的进一步设计提供了设计思想。但是模型中设计的只是主要的花纹参数，缺乏一些细节的花纹参数，这些参数需要在给出具体使用条件的情况下具体分析进行设计。

八 模型的应用与推广

针对目前国内外的轮胎设计方法和设计依据，文章中提到的模型具有应用的价值，首先，设计依据是基于简化后的接地印痕模型，该模型分析了花纹对轮胎性能的主要影响，具有代表性；其次，之后的设计步骤采用了规划的思想，在一定范围内寻求最优解，这一点会为轮胎设计提供一个标准，具有推广的意义。

参考文献

- [1] 喻凡，林逸，《汽车系统维护学》，北京：机械工业出版社，2005 年。
- [2] 俞淇《子午线轮胎结构设计与制造技术》，北京：化学工业出版社，2006 年。
- [3] 德 G 莱斯特《汽车轮胎研发》，北京：机械工业出版社，2012 年。
- [4] 庄继德，《计算汽车地面力学》，北京：机械工业出版社，2002 年。
- [5] 辛振祥，邓涛，王伟，《现代轮胎结构设计》，北京：化学工业出版社，2011 年。
- [6] 董臻圃，《数学建模方法与实践》，北京：国防工业出版社，2006 年附录
- [7] 王文明，《轮胎花纹》，

<http://wenku.baidu.com/view/bcca68d3195f312b3169a5d9.html>，2014.04.20。

[8] 陈理军，杨光大，董芹，《低噪声轮胎花纹设计原则》，
http://wenku.baidu.com/link?url=K5rNCB_ArdXK6dYuZVpAQQxYNWKxOeUrRmarMvA2sbqTEu-CEn6DjT-mguca1_6mW4cFpJ3ish9iWhWchjKrS97O1T6jjz7DxZBfvuVgLcK，2014.04.20。

附录

```
Model:
data:
h=10.92;
b=195;
n=3;
a1=0.2;
b1=0.6;
a2=0.8;
b2=2.5;
a3=2;
```

2693

```
b3=4;
a4=0.65;
b4=0.80;
enddata
max=0.3*(f-a4)/(b4-a4)+0.5*0.5*((s-h*a1)/(h*b1-h*a1)/1.2+(t-h*a1)/(h*b1-h*a1))+0.1*(s/t-1)*5+0.07*(f-a4)/(b4-a4)+0.03*(b4-f)/(b4-a4);

f=te/(te+t)*(1-n*s/b);
t/h>=a1;
t/h<=b1;
te/h>=a2;
te/h<=b2;
te/t>=a3;
te/t<=b3;
f>=a4;
f<=b4;
s/t>=1;
s/t<=1.2;

end
```

数学中国提供 (www.madio.net)