

单纯形回归寻优法测算压延帘布覆胶厚度的方法

叶智慧 汤 毅 余艾地 李新连

[上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司正泰橡胶厂 200082]

摘要 分析了影响同位素射线测量技术测算压延帘布覆胶厚度的各种因素;进行了经典理论模型 $N = N_0 e^{-\lambda m}$ 、仿真样本模型 $y = f(x, a, b, c, d)$ 和仿真预报模型 $y_i = f(x_i, a, b, c, d)$ 曲线与实测值的比较;介绍了单纯形寻优选点方法。

关键词 胶帘布,覆胶厚度,单纯形,回归寻优,同位素射线测量

压延帘布覆胶厚度的精度主要取决于压延机(采用同位素射线测厚技术)、在线检测 and 控制系统三方面的精度,其中铯-90 β 射线测量系统(数学模型)、控制系统(控制模型)的精度直接关系到压延机能否实现自动控制、自适应控制,能否达到产品的技术指标及能否在合理的原材料消耗下保证最终产品——轮胎的性能。本文简要介绍了用单纯形回归寻优法测算压延帘布覆胶厚度的方法。

1 影响测算压延帘布覆胶厚度的因素

1.1 经典理论模型(同位素射线经典吸收关系式)

同位素射线测量技术从本质上说是利用射线在被测物中通过时会发生衰变的特性。射线衰变的程度与被测物的等效吸收因数,即材料的特性有关,通过综合分析或计算测量值,就可得到被测物厚度。铯-90 β 射线的衰变率定律为

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

由式(1)得

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \lambda < 0 \quad (2)$$

由于

$$t = m = \rho d \quad (3)$$

因此式(2)可变为

$$N = N_0 e^{-\lambda m} \quad \lambda < 0 \quad (4)$$

式中 N ——有被测物时测量输出值;

N_0 ——无被测物时测量输出值;

λ ——衰变常数,即被测物吸收因数;

t ——测试时间,即衰变时间内 β 射线衰减量;

m ——被测物单位面积质量;

ρ ——被测物密度;

d ——被测物厚度。

式(4)为同位素经典吸收关系式,即是计算压延帘布覆胶厚度的经典理论模型。从式(4)可知,射线的衰变率是随 m 的变化而成指数下降的^[1]。但在压延帘布覆胶厚度检测过程中发现,式(4)的计算值与实测值相差较大,如图1所示。

由图1可见,经典理论模型不能完全反映各种规格(每一实测值点表征一种规格)压延帘布覆胶厚度的特征,给生产操作带来很大困难,且无法实现对测试过程的自动控制。

1.2 压延过程的不确定性和不可测性

轮胎的结构不同、用途不同,压延帘布覆胶胶料的配方就不同,因此同位素射线检测系统的检测具有不确定性。

由于帘布的结构、含水率不确定,不同规

作者简介 叶智慧,男,38岁。橡胶制造专业毕业。已发表论文3篇。

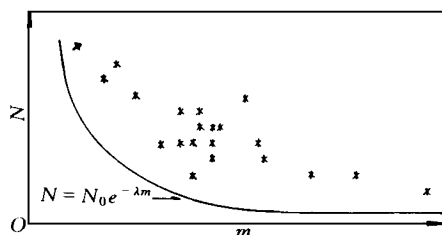


图1 经典理论模型曲线与实测值的比较

* — 实测值

格压延帘布的结构、材料不同,压延后胶帘布的胶-帘布间的填充分布特性不可测,因此胶帘布的压延过程具有不可测性。

1.3 机械结构、分布参数和环境因素

影响压延帘布工艺指标的因素还有压延机的机械结构、分布参数和环境因素等,如辊筒排列方式、辊距调节、辊轴间隙、辊筒形变、机架变形、辊筒温度控制、混炼胶料的温度和环境温度等。这些因素都具有不确定性和不可测性的特点,会对压延帘布覆胶厚度的控制产生一定的影响。

2 仿真模型的建立

2.1 仿真样本模型

从压延帘布工艺过程来看,影响其覆胶厚度精度的因素多且具有不确定性和不可测性,因此用纯物理方法来建立测算覆胶厚度的数学模型非常困难。为此采用试验仿真的方法,即选用与胶帘布特性相似的材料作为仿真样本,建立仿真样本模型^[2]:

$$y = f(x, a, b, c, d) \quad (5)$$

式中 x ——自变量,即仿真样本模型压延帘布覆胶厚度;

y ——因变量,即仿真样本模型测量输出信号比值;

a, b, c, d ——仿真样本模型待定因数。

仿真样本模型曲线与实测值的比较见图2。由图2看出,仿真样本模型比经典理论模型更接近实测值。由式(4)可知, λ 为被测物

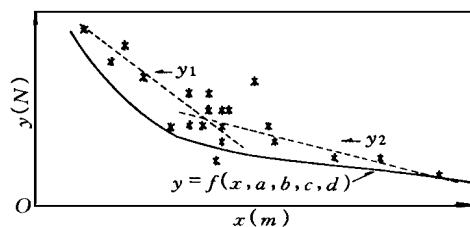


图2 仿真样本模型曲线与实测值散点的比较

注同图1

对锶-90 β 射线的线性吸收因数, λ 的值随着被测物的材质和 β 射线能量的改变而变化,它是三种效应的结果,可用下式表示:

$$\lambda = \tau + \sigma + \kappa \quad (6)$$

式中 τ ——辐射效应;

σ ——吸收效应;

κ ——散射效应。

对于胶帘布这种由多种材料组成的被测物, λ 等效于 μ_m ,即

$$\mu_m = \lambda \sum_{i=1}^n a_i \mu_{mi} \quad (7)$$

式中 μ_m ——胶料、帘布和系统的综合吸收因数;

μ_{mi} ——胶料第 i 种组分吸收因素;

a_i ——胶料第 i 种组分的质量分数。

当 $\sum_{i=1}^n a_i \mu_{mi} = 1$ 时, $\mu_m = \lambda$, 因此

$$N = N_0 e^{-\mu_m m} \quad \mu_m < 0 \quad (8)$$

为克服锶-90 β 射线检测头源强和计算机数据输入标准不同的问题,将式(8)作归一化处理。令

$$y = N / N_0, x = m$$

式(8)可写成

$$y = e^{-\mu_m x} \quad (9)$$

式(9)可表征为指数和形式:

$$y = \sum (y_1 + y_2)$$

$$y = a e^{bx} + c e^{dx} \quad b < 0, d < 0 \quad (10)$$

由式(10)可知,仿真样本模型的 a, b, c 和 d 综合体现了检测过程中胶帘布覆胶厚度的几何规律及胶帘布的物理特性,它们的取

值与 β 射线和检测头之间的几何条件、被测物材质及 β 射线的能量等因素有关。当几何条件与物理条件相对稳定时,仿真样本模型的 a, b, c 和 d 为常数, x 和 y 可测。

从图2还可以看到,仿真静态样本模型与实测值之间因机械条件、材质和环境因素等诸多不确定性存在较大误差。

2.2 仿真预报模型

根据轮胎的产品技术指标,通过对胶帘布的压延全过程、覆胶厚度实测值及相关因素进行综合分析,应用数理统计方法将实测统计数据迭代仿真样本^[3~6],得到了压延帘布覆胶厚度仿真预报模型:

$$y_i = f(x_i, a, b, c, d) \quad b < 0 \quad (11)$$

式中 x_i ——仿真预报模型的压延帘布覆胶厚度;

y_i ——仿真预报模型测量输出信号比值。

通过精确的试验和计算可得到一系列(各种规格产品)的试验数据和计算数据(x_i 和 $y_i, i = 1, 2, 3, \dots$)。图3为仿真预报模型曲线与实测值的比较。

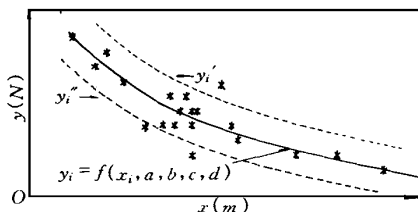


图3 仿真预报模型曲线与实测值的比较

注同图1

改变仿真模型的 a, b, c 和 d ,可使仿真样本模型预测值与实测值的偏差达到极小。根据最小二乘法原理,将仿真模型的 a, b, c 和 d 组合成最优变量 ψ ,得寻优式:

$$\psi(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^n [f(x_i, a, b, c, d) - y_i]^2 \quad (12)$$

求出最优变量 $\psi(a, b, c, d)$ 为最小值的

a, b, c 和 d 值,代入式(10)就得到与实际情况最接近的吸收曲线函数关系式。

每一实测值点表征一种规格的产品,且均为统计平均值,因此其自身存在着一定误差;仿真预报模型是根据实测统计值迭代仿真样本模型得来的,而仿真样本模型自身也存在误差,其计算值与实测值之间存在差异,因此为确保仿真预报模型准确,就必须对仿真预报模型进行量值的变换(寻优)处理。

2.3 仿真预报模型预报和控制 y 值

2.3.1 预报 y 值

由式(12)对 y_i 进行方差分析后,不需要假定 x_i 和 y_i 之间的相关关系,就可以求解仿真预报模型,由 x_i 和 y_i 精确计算出 y 值。由于 x_i 和 y_i 之间并不存在确定的函数关系,因此对于一特定的 x_i 值,并不一定有一特定的 y_i 值与之对应, y_i 值还因其它随机因素作用的变化而变化。但是这种变化是遵循一定规律的。

一般来说,对于服从正态分布的变量(固定工艺操作条件的生产数据)的平均值 $x = x_i$ 时,由式(11)算得的 y_i 值的方差可用剩余方差来估算。根据正态分布的性质,对于固定的 $x = x_i$, y 的取值范围以 y_i 为中心而对称分布,越接近 y_i ,取值机会越多;越远离 y_i ,取值机会就减少。 y_i 与剩余标准方差 S 之间有下列关系:

$$y_i = \pm 0.5 S \text{ 的区间约占 } 40\%$$

$$y_i = \pm 1 S \text{ 的区间约占 } 60\%$$

$$y_i = \pm 2 S \text{ 的区间约占 } 90\%$$

$$y_i = \pm 3 S \text{ 的区间约占 } 98\%$$

也就是说, S 越小,仿真预报模型求解的 y_i 值就越精确,因此可把 S 作为仿真预报模型精度的标志。对式(12)曲线作两条等差平行线(如图3所示),即

$$y_i' = -2Sf(x_i', a, b, c, d) \quad (13)$$

$$y_i'' = +2Sf(x_i'', a, b, c, d) \quad (14)$$

由图3看出,有90%的实测值散点落在

这两条平行线的范围内。这一结论当然也适用于 n 个观测点。

2.3.2 控制 y 值

从表面上看, y 值的控制与预报是两个不同的问题,但两者在本质上是密切相关的。在压延帘布生产过程中,控制系统是根据目标值与实测值之差对压延帘布覆胶厚度进行控制的,因此控制系统环境的干扰或自身的偏差会使实测值较大地偏离目标值,因而仿真预报模型的精确性直接关系到系统能否实现自动化控制问题。由此可见, s 是一个非常重要的量,它是回归方程是否有效的极其重要的标志。

3 单纯形法寻优选点

3.1 基本思想

单纯形法是求多维变量目标函数 $J(x)$ 无约束极小值的直接搜索方法,它是一种经验方法。单纯形法搜索极小值点的基本思想和梯度法(最速下降寻优,共扼梯度法寻优)不同,它不是沿着某一个方向进行搜索,而是计算 n 维空间的 $(n+1)$ 个点所构成的单纯形顶点 $J(x)$ 值,并对它们进行比较,判断 $J(x)$ 变化趋势,丢掉最坏点,取新的顶点再构成新的单纯形,逐步迭代,逐步逼近极小值^[7~11]。

例如,图4中 $J(x) = 4$, $J(x) = 6$ 和 $J(x) = 8$ 曲线为等值线,先以1,2和3点构成三角形,计算三个顶点的 $J(x)$ 值,比较三者大小。设1点的 $J(x_1)$ 值最大,在此三点中为最坏点,故将1点丢掉。显然与1点对面的4点的 $J(x_4)$ 值可能较小,因此取1点对面的4点,与原来2和3点构成新的三角形,计算新三角形顶点的 $J(x)$ 值,并比较。若2点的 $J(x_2)$ 值为最大,丢掉该点,再在其对面取5点,构成新的三角形,依此直至求得极小点为止。

这种方法是否收敛以及收敛速度快慢与初始单纯形构成和新的单纯形选取有关。

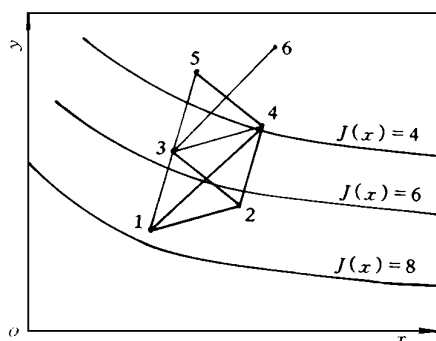


图4 单纯形法寻优过程

3.2 初始单纯形构成

图4所示的 $J(x)$ 为二元函数,单纯形为三角形,即取三个点为顶点,且不在一条线上。若 $J(x)$ 为 n 维函数,则单纯形应该取 $(n+1)$ 个点 $(X_0, X_1, \dots, X_i, \dots, X_n)$ 构成单纯形,并且保证向量 $X_1 - X_0, X_2 - X_0, \dots, X_i - X_0, \dots, X_n - X_0$ 为线性独立,可以按一定规律取不同边长。但为简便起见,也可以取正单纯形,即单纯形各顶点之距离相等。也就是说,若选定 X_0 点,则 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ 可由下式确定:

$$X_i = X_0 + h e_i \quad (15)$$

式中 h ——步长;

e_i ——第 i 个坐标单位向量。

3.3 单纯形新顶点取法

图5为新顶点取在被丢掉的对面的方法。先找出余下两点 G 和 L 的重心 F 点,将丢掉点 H 对重心 F 点的反射点 R 取为新的顶点。设 X_H, X_G 和 X_L 分别为 H, G 和 L 三个点的坐标,则 G 和 L 两点的重心 F 点的数

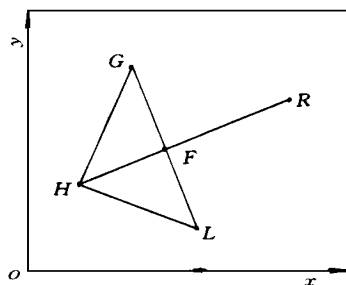


图5 单纯形新顶点的确定

学表达式为

$$X_F = (X_G + X_L) / 2 \quad (16)$$

因此反射点(即新点顶点) R 的坐标为

$$X_R = 2X_F - X_H \quad (17)$$

对于 n 维变量,假设当前 H 点的 $J(x_H)$ 值最大,即为最坏点,应该丢掉该点; L 点的 $J(x_L)$ 值最小,即最好点; G 为次坏点。丢掉 H 点后的重心 F 点的坐标为

$$X_F = (\sum_{i=1}^n X_i - X_H) / n \quad (18)$$

式中 X_i 为第 i 个顶点的坐标,有 n 个分量。

反射点 R 坐标为

$$X_R = 2X_F - X_H \quad (19)$$

3.4 单纯形加速

为了更快地搜索到极小值,还有单纯形新点扩张、新点压缩和单纯形缩边等方法。

3.4.1 新点扩张

设最坏点 H 的反射点为 R ,若 R 点的 $J(x_R)$ 值小于当前最好点 L 的 $J(x_L)$ 值,即 $J(x_R) < J(x_L)$,则说明沿 FR 方向搜索是正确的。为加速搜索速度,可把新点沿 FR 方向扩展到 E 点:

$$X_E = X_H + \alpha(X_F - X_H) \quad (20)$$

式中 α 为扩张系数,大于1。

求出 X_E 后,就进行扩张效果的检验。如果 $J(x_E) < J(x_R)$,表明沿 HR 方向是不利的,则新的顶点取 R ,如图6所示。

3.4.2 新点压缩

如果反射点 R 的 $J(x_R)$ 值比当前次坏点 G 的 $J(x_G)$ 值大,即若 $J(x_R) > J(x_G)$,就表明沿 FR 方向扩展得太远,可以试着将反射点压缩到 Z 点,如图7所示, Z 点坐标为

$$X_Z = X_H + \beta(X_R - X_H) \quad (21)$$

式中 β 为压缩系数,取值范围为 $0.5 \sim 1$ 。

若 $J(x_R) > J(x_H)$,即若反射点比最坏点还要差,则应该压缩到 Z 点:

$$X_{Z'} = X_R + \beta(X_H - X_R) \quad (22)$$

要注意的是 β 不能取 0.5 ,否则压缩后的点 $Z(Z')$ 将与重心重合,会降低单纯形维

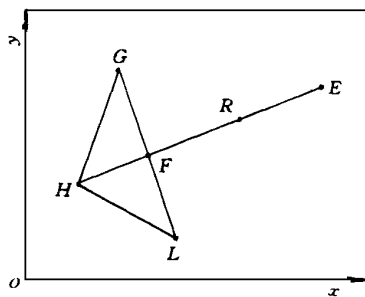


图6 单纯形新点的扩张

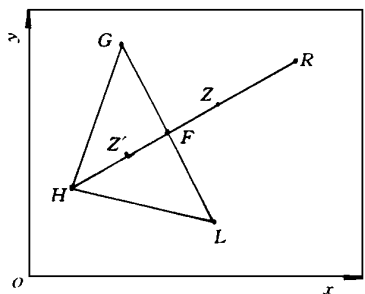


图7 单纯形新点的压缩

数,使搜索失败。

3.4.3 单纯形缩边

如果 HR 上 H 点的 $J(x_H)$ 值最小,就表明向 HR 反射是不对的。为有效地搜索,应把原单纯形 HGL 缩成 $H'G'L'$,如图8所示,这即为单纯缩边。其数学表达式为

$$X_{H'} = (X_H + X_L) / 2 \quad (23)$$

$$X_{G'} = (X_G + X_L) / 2 \quad (24)$$

4 加权系数

生产中有个别规格的产品偏离寻优模型,为此对这些产品实施了加权处理,即对这些产品建立如下模型:

$$y_i = n_i f(x_i, a, b, c, d) \quad (25)$$

式中 n_i 为加权系数。

加权处理可使检测、生产工艺控制、最终产品质量控制与生产工艺技术指标和实际操作过程变量的量纲结合起来,为实际生产提供了直观、简便的方法,从而为新品种和新规

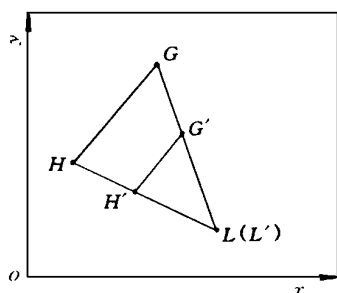


图8 单纯形缩边

格产品试制提供良好的大生产环境和准确的生产工艺指标,缩短了试制产品在大生产现场的投产适应周期。

5 结语

用单纯形回归寻优法测算压延帘布覆胶厚度,为主要以经验为主导的橡胶制造业提供了一条用理论指导实践的好方法。但目前这一成熟技术在国内橡胶行业的应用还很不理想,究其原因,有以下几方面:

(1) 压延产品设计指标与现场工艺指标间有一相关的量化过程,随着产品结构、材料特性、分布参数、环境因素和配方等条件的不同,工艺指标会相应变化,从而要求检测、控制系统有一个比较灵活的检测、控制策略。

(2) 这一检测、控制技术的成熟和完善经历了一个由实践到理论再到实践的技术回归过程,因此对其数学模型、控制模型的建立,还必须根据实际工况条件来实现。

(3) 与在塑料、造纸业中的应用相比,同位素放射线测量技术在橡胶工业中的应用具

有不确定性,数学模型、控制模型的建立是一个由设计到成品全过程的系统综合问题。

致谢 本文的撰写得到清华大学核能技术设计研究院张朝宗、郭志平教授,青岛化工学院高分子材料加工机械研究所吕柏源教授,机械电子工业部上海工业自动化仪表研究所蒋开元高级工程师的帮助,在此表示衷心的感谢!

参考文献

- 1 郭志平,安福林,苗齐田,等. 新技术研究与应用论文集 (2) —— γ 反射橡胶测厚仪. 北京:原子能出版社,1983. 135~143
- 2 戈登 G 著. 系统仿真. 杨金标译. 北京:冶金工业出版社,1982. 299~320
- 3 林宏谕. Excel 函数与宏实用详解. 北京:学苑出版社,1993. 56~89
- 4 冯士雍. 回归分析法. 北京:科学出版社,1985. 5~117
- 5 黄俊钦. 静、动态数学模型的实用建模方法. 北京:机械工业出版社,1988. 79~136
- 6 李国平. 数学模型与工业自动控制 第1卷 总论与模型的建立. 武汉:湖北人民出版社,1978. 274~279
- 7 席少霖,赵凤治. 最优化计算方法. 上海:上海科技出版社,1983. 204~241
- 8 蔡宣三. 最优化与最优控制. 北京:清华大学出版社,1982. 76~297
- 9 刘兴良. 最优控制及应用. 北京:科学出版社,1990. 167~173
- 10 关肇直. 极值控制与极大值原理. 北京:科学出版社,1980. 100~150
- 11 布赖森 A E,何毓琦. 应用最优控制. 北京:国防工业出版社,1982. 325~474

收稿日期 1997-11-13

Determination for Coat Gauge of Calendered Cord by Simple Shape Regression Optimization

Ye Zhihui, Tang Yi, Yu Aidi and Li Xinlian

[Shanghai Tire and Rubber (Group) Co., Ltd. 200082]

Abstract The effective factors on the determination for the coat gauge of calendered cord by

isotopic-ray measurement were analysed; the curves from the classical theoretic model $N = N_0 e^{-\lambda_m}$, the simulating sample model $y = f(x, a, b, c, d)$ and the simulating predictive model $y_i = f(x_i, a, b, c, d)$ were compared with the measured values; and the simple shape regression optimization was described.

Keywords calendered cord, coat gauge, simple shape, regression optimization, isotopic-ray measurement

高档子午线轮胎关键原材料 和装备有待开发

专家认为,高档子午线轮胎关键原材料与装备应加紧开发。资料显示,到 2000 年,我国子午线轮胎产量将达到 3 000 万套,其中高档子午线轮胎约占 30%。“九五”期间还要新增 12 条子午线轮胎生产线,新增生产能力 2 000 万套,总投资需 150 亿元,外汇 15 亿美元。上述装备及关键原材料国产化将使产品价格比国外同类产品低 $1/3 \sim 1/2$, 大大降低成本,节省外汇,社会效益和经济效益显著。

子午线轮胎在全世界轮胎产量中占绝对优势。在西欧国家为 100%, 美国为 90% 以上, 日本 87% 以上, 发展较晚的韩国也达到了 80%。随着汽车工业与公路事业的发展, 对轮胎性能提出了更高的要求, 研究开发的高档子午线轮胎成为世界各大轮胎公司强有力的竞争手段。

高档子午线轮胎主要指无内胎、低断面和高速度级别轮胎。以轿车轮胎为例, 其速度级别由普通的 S 级 ($180 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) 发展到 H 级 ($210 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)、V 级 ($240 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), 断面结构从普通“80”和“70”系列降低至“65”和“60”以下系列。高档子午线轮胎在发达国家中已占子午线轮胎总产量的 40% 左右, 并呈不断上升趋势。

由于高档子午线轮胎断面结构趋向扁平化, 可大大提高汽车行驶中的稳定性和安全性。采用无内胎结构, 除装卸轮胎方便外, 还具有质量小、温升高、修补简便的优点, 从而

明显减小轮胎的滚动阻力, 降低能耗和噪声, 大大提高轮胎的使用寿命。

我国子午线轮胎经“六五”至“八五”的发展, 1996 年产量为 937 万套, 占轮胎总产量的 15%, 其中有引进的 11 条生产线和十几个在引进技术消化吸收基础上开发的国产化子午线轮胎生产企业。根据“九五”发展规划的要求, 我国将新增子午线轮胎 2 000 万套生产能力, 子午线轮胎产量将占轮胎总产量的 35%。高档子午线轮胎国内虽有开发, 但尚未形成工业化规模。“九五”期间国家和科技攻关项目注重高速、低滚动阻力子午线轮胎的开发, 其大量的新型原材料和工艺装备急需配套开发。“八五”期间这方面工作取得一定进展, 在部分原材料和工艺装备开发方面, 特别是单机开发满足了部分工艺过程的要求, 但仍有一些原材料和装备依赖进口。

我国生产的奥迪、桑塔纳改型轿车等中高档车均要求配高档子午线轮胎, 但目前有的靠进口。原材料和装备的配套开发将大大促进我国高档子午线轮胎生产的发展。

(摘自《中国化工报》, 1998-02-12)

亚太地区的轮胎产量 亿条

项目	1996 年	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年
亚太地区	1.14	1.25	1.38	1.52	1.66
日本	1.67	1.64	1.62	1.60	1.60
合计	2.81	2.89	3.00	3.12	3.26

(相泰摘自《1997 年世界
炭黑会议文集》)