

# 基于改进的粒子群优化算法的轮胎参数辨识

宋晓琳, 李红, 郭孔辉

湖南大学; 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082

**摘要** 轮胎是汽车的重要组成部分, 其特性分析是研究汽车动力学的基础, 其模型的精度直接影响整车模型仿真的精度, 多采用粒子群优化算法对轮胎参数进行辨识。参考自然界生物进化现象, 在基本粒子群算法的基础上提出带变异阈值的多种群粒子群算法。该算法采用多个种群同时进化以保证粒子群的多样性, 同时可改善全局收敛的可靠性, 采用变异阈值可避免优化算法陷于局部收敛现象的发生。将该方法应用于轮胎参数辨识, 并与其他优化算法辨识结果进行比较, 该方法结果能够更好地与实验数据吻合, 证明该方法辨识精度高, 在轮胎参数辨识中有较好的应用性。

**关键词** 轮胎; 参数辨识; 多种群; 变异

**中图分类号** TB2

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.09.008

## Parameter Identification of the Tire Model Based on an Improved Partical Swarm Optimization Algorithm

SONG Xiaolin, LI Hong, GUO Konghui

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China

**Abstract** Tire is an important part of the vehicle. The behaviour of the tire is of basic importance to the vehicle dynamics, and plays a vital role in vehicle's performance, so the precision of a tire model affects the simulation reliability of the whole vehicle model. Partical swarm optimization algorithm is used to identify the tire model parameters in this paper. According to the organic evolution in nature, the multi-population with a variation threshold partical swarm optimization algorithm is proposed to keep the population diversity and improve the reliability of holistic convergence. The variation threshold is to avoid the problem of converging to a part-optimum. Comparing the simulation results with the test results, it is shown that the simulation data from the multi-population with a variation threshold partical swarm optimization algorithm would fit the test data better than those from other optimization algorithms, the identification accuracy is slightly higher. The multi-population with variation threshold optimization algorithm has a good application prospect in tire parameter identification.

**Keywords** tire; parameter identification; multi-population; variation

### 0 引言

轮胎是车辆重要的部分, 基本功能主要有: ① 支撑整个车辆; ② 与悬架元件共同作用, 抑制由路面不平引起的振动和冲击; ③ 传递纵向力以实现加速、驱动和制动; ④ 为车辆转向提供侧向力。对车辆仿真模型来说, 轮胎模型是重要部

分之一, 由于轮胎由橡胶、帘布层等合成材料和充气结构构成, 具有高度非线性、可压缩性、各项异性和黏弹性的特点, 其数学模型的建立较为困难<sup>[1]</sup>。2001年, 任光胜<sup>[2]</sup>对轮胎特性曲线进行拟合与优化, 辨识出的参数在一定范围内拟合精度高, 但外延性差。2006年, 郭孔辉等<sup>[3]</sup>对 UniTire 轮胎稳态模型的

收稿日期: 2011-01-02; 修回日期: 2011-02-06

基金项目: 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主研究课题(61075004); 中国高水平汽车自主创新能力建设项目

作者简介: 宋晓琳, 教授, 研究方向为汽车性能动态仿真与控制, 电子信箱: hukingsun@sina.com

联合工况预测能力进行研究,采用 PURE (pure test data prediction) 方法对 UniTire 轮胎模型进行预测,其预测结果与使用全局辨识方法预测结果非常相近,说明了 UniTire 轮胎模型具有高的预测精度。2007 年,韩加蓬等<sup>[4]</sup>提出一种基于遗传算法的 LuGre 轮胎模型参数两步辨识方法,先用 PD 控制辨识出轮胎静态参数,然后用 PID 控制辨识动态参数,在静、动态参数辨识过程中均采用遗传算法作为优化工具,该辨识方法解决了动静参数间耦合对参数辨识的影响,但需要大量实验数据。2007 年,张云清等<sup>[5]</sup>基于遗传算法和数值优化算法提出一种混合优化算法对轮胎模型参数进行辨识,该方法减小了对用户工程经验的依赖,增加了辨识过程的可靠性,但未应用到联合工况下的轮胎模型参数辨识。2010 年,Estebanez 和 Smon<sup>[6]</sup>使用协同进化算法对轮胎参数进行辨识,该方法辨识结果与实验值吻合性好,但对参数初始值较敏感,如果初始值选择不合理辨识效果会变差。轮胎模型化的方式很多,对模型的数据要求、数据输出和精度也不完全相同,此外轮胎的建模精度还直接影响整车动力学建模的精度<sup>[4]</sup>,目前广泛用于操纵稳定性分析轮胎模型为魔术轮胎模型 (MF-tyre)、Fiala 轮胎模型、UA 轮胎模型等。

魔术轮胎模型公式是用三角函数的组合公式拟合轮胎试验数据,用一套形式相同的公式完整地表达轮胎的纵向力、侧向力、回正力矩、翻转力矩,阻力矩以及纵向力、侧向力的联合作用工况,故称“魔术公式”。其一般表达式为

$$Y(x)=D \sin(C \arctan(Bx-E(Bx-\arctan(Bx)))) \quad (1)$$

其中, $Y(x)$ 可以是侧向力,也可以是回正力矩或纵向力,自变量  $x$  可以在不同情况下分别表示轮胎的侧偏角或纵向滑移率,系数  $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  由轮胎的垂直载荷和外倾角确定。

1995 年,Kennedy 和 Eberhart<sup>[7]</sup>受鸟类群体行为建模与仿真研究结果的启发,提出粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)。PSO 算法由于简单、易于实现、设置参数少、无需梯度信息等特点,已广泛应用于非线性规划、同步发电机辨识、车辆路径优化、广告优化、多目标优化等问题,并取得了良好的效果<sup>[8]</sup>。因此,本文采用粒子群算法对 Pacejka'89 轮胎参数进行辨识,并在粒子群基本算法的基础上提出一种新的粒子群算法——带变异阈值的多种群粒子群算法,对轮胎魔术公式参数进行辨识。

## 1 Pacejka'89 轮胎模型

Pacejka'89 轮胎模型认为轮胎力在垂直、侧向方向上是线性的,阻尼为常量,在侧向加速度  $\leq 0.4g$ ,侧偏角  $\leq 5^\circ$  的情况下,对常规轮胎具有很高的拟合精度<sup>[9]</sup>,由于魔术公式基于试验数据,除了在试验范围内精度高外,在极限值以外的一定程度内仍可使用,对有限工况进行外推具有较好的置信度,目前广泛应用于汽车仿真领域。

Pacejka'89 轮胎纵向力计算公式为

$$F_x=D \sin(C \arctan(BX_1-E(BX_1-\arctan(BX_1))))+S_v \quad (2)$$

其中, $X_1$ 为纵向力组合自变量, $X_1=\kappa+S_h$ , $S_h$ 为曲线的水平方向漂移, $S_h=b_9F_z+b_{10}$ , $\kappa$ 为纵向滑移率; $C$ 为曲线形状因子, $C=b_0$ ; $D$ 为颠因子, $D=b_1F_z^2+b_2F_z$ ; $B$ 为刚度因子, $B=BCD/CD$ ; $BCD$ 为纵向力零点处的纵向刚度, $BCD=(b_3F_z^2+b_4F_z)e^{-b_5F_z}$ ; $S_v$ 为曲线的垂直方向漂移, $S_v=0$ ; $E$ 为曲线曲率因子, $E=b_6F_z^2+b_7F_z+b_8$ ; $F_z$ 为垂直载荷; $b_0$ — $b_{10}$ 为待辨识参数。

Pacejka'89 轮胎侧向力计算公式为

$$F_y=D \sin(C \arctan(BX_1-E(BX_1-\arctan(BX_1))))+S_v \quad (3)$$

其中, $X_1$ 为侧向力计算组合变量, $X_1=\alpha+S_h$ , $\alpha$ 为侧偏角, $S_h=a_9F_z+a_{10}+a_8\gamma$ , $\gamma$ 为车轮外倾角; $C=a_0$ ; $D=a_1F_z^2+a_2F_z$ ; $B=BCD/CD$ ; $BCD$ 为侧向力零点处的侧向刚度, $BCD=a_3 \sin\left[2 \arctan\left(\frac{F_z}{a_4}\right)\right] \cdot (1-a_5|\gamma|)$ ; $S_v=a_{11}F_z\gamma+a_{12}F_z+a_{13}$ ; $E=a_6F_z+a_7$ ; $a_0$ — $a_{13}$ 为待辨识参数。

侧向力计算组合变量公式

$$M_z=D \sin(C \arctan(BX_1-E(BX_1-\arctan(BX_1))))+S_v \quad (4)$$

其中, $X_1$ 为回正力矩计算组合自变量, $X_1=\alpha+S_h$ , $S_h=c_{11}\gamma+c_{12}F_z+c_{13}$ ; $C=c_0$ ; $D=c_1F_z^2+c_2F_z$ ; $B=BCD/CD$ ; $BCD$ 为回正力矩零点处扭转刚度, $BCD=(c_3F_z^2+c_4F_z)(1-c_6|\gamma|)e^{-c_5F_z}$ ; $S_v=\gamma(c_{14}F_z^2+c_{15}F_z)+c_{16}F_z+c_{17}$ ; $E=(c_7F_z^2+c_8F_z+c_9)(1-c_{10}|\gamma|)$ ; $c_0$ — $c_{17}$ 为待辨识参数。

## 2 粒子群算法

粒子群算法模仿鸟类的觅食行为,将问题的搜索空间类比如于鸟类的飞行空间,将每只鸟抽象为一个无质量无体积的粒子,用以表征问题的一个候选解,优化所需要寻找的最优解等同于寻找食物<sup>[8]</sup>。PSO 算法为每个粒子制订了类似于鸟类运动的简单行为规则,从而使整个粒子群的运动表现出鸟类觅食类似的特性用于求解复杂的优化问题。PSO 算法具有记忆微粒最佳位置的能力和微粒间信息共享的机制,与进化算法相比,粒子群算法保留了基于种群的全局搜索策略,采用简单的速度-位移模型,避免了复杂的遗传操作,同时特有的记忆使其可以跟踪当前的搜索,以调整其搜索策略。

### 2.1 基本粒子群算法

PSO 中将优化问题的解看作是  $n$  维搜索空间的一个粒子,每个粒子以一定速度追随当前最优粒子在解空间中飞行,该飞行速度有个体的飞行经验和群体的飞行经验进行动态调整,并且所有粒子都由一个适应度函数评价其优劣。PSO 初始化为一群随机粒子,通过迭代寻找最优解,每次迭代主要通过跟随当前的两个极值更新自己的位置,一是粒子本身所经历的历史最好位置,即个体最优值  $p_i$ ;二是整个种群粒子所经历的历史最好位置,即全局最优值  $p_{g\text{best}}$ 。例如, $n$  维搜索空间中,第  $i$  个粒子的位置和速度分别表示为  $x_i=[x_{i,1},x_{i,2},\dots,x_{i,n}]$  和  $v_i=[v_{i,1},v_{i,2},\dots,v_{i,n}]$ 。通过评价各微粒的目标函数,确定  $t$  时刻每个微粒所经过的最佳位置  $p_i=[p_{i,1},p_{i,2},\dots,p_{i,n}]$  及群体的最佳位置  $p_g$ ,再按照如下公式更新各粒子每一维的速度和位置:

$$v_{ij}(t+1)=\omega v_{ij}(t)+c_1r_1[p_{ij}-x_{ij}(t)]+c_2r_2[p_{g\text{best}}-x_{ij}(t)] \quad (5)$$

$$x_{ij}(t+1)=x_{ij}(t)+v_{ij}(t+1) \quad (6)$$

其中,  $j=1, 2, \dots, n$ ;  $t$  为进化代数;  $\omega$  为惯性权因子;  $c_1, c_2$  为正的加速常数;  $r_1, r_2$  为  $[0, 1]$  内均匀分布的随机数。

粒子速度更新由 3 部分构成: 第 1 部分反映粒子当前速度的影响, 联系粒子当前的状态, 起平衡全局和局部搜索的作用; 第 2 部分反映认知模式的影响, 即粒子本身记忆的影响, 使粒子具有全局搜索的能力, 避免陷入局部; 第 3 部分反映社会模式的影响, 即群体信息的影响, 体现粒子间信息共享。在这 3 部分的共同作用下, 粒子根据历史经验并利用共享机制, 不断调整自己的位置寻求问题的最优解。

基本粒子群优化算法的流程如下:

- (1) 随机初始化种群各粒子的位置和速度;
- (2) 评价种群中所有粒子, 将当前各粒子的位置和目标值储存在各粒子的个体历史最优解  $p_i$  中, 并将  $p_i$  中的最优解储存在  $p_g$  中;
- (3) 按照式(5)一式(6)更新各粒子的速度和位置;
- (4) 评价种群中的所有粒子;
- (5) 比较各粒子当前目标值与当前个体历史最优解  $p_i$  目标值, 若当前目标值更优则更新  $p_i$ ;
- (6) 比较当前  $p_i$  与  $p_g$  的目标值, 若存在  $p_i$  的目标值优于  $p_g$  的目标值, 则更新  $p_g$ ;
- (7) 若终止条件满足, 则迭代结束, 否则转步骤(3)。

## 2.2 自适应惯性权值 PSO 算法

基本粒子群算法通用性强, 不依赖于问题信息, 群体搜索具有记忆能力, 保留个体局部和群体全局信息指导搜索<sup>[9]</sup>, 但是在达到局部极小值附近就有可能出现收敛速度慢, 甚至会在极小值点附近振荡。Shi 和 Eberhart 认为<sup>[10]</sup>, 较大的惯性权值有利于跳出局部极小点, 便于全局搜所, 小的惯性权值则有利于对当前搜索区域进行精确局部搜索, 便于算法收敛, 提出自适应惯性权值的 PSO 算法。自适应权值计算表达式如下:

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} + \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})(f - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}} & f \leq f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max} & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $f$  为粒子当前的目标函数值,  $f_{\text{avg}}, f_{\min}$  分别为粒子的平均目标值和最小目标值。

由式(7)可知, 当各粒子的目标值趋于一致或者趋于局部最优时, 惯性权值增加, 而当各粒子的目标值比较分散时, 惯性权值减小。同时目标值优于平均目标的粒子将对应于较小的惯性权值, 使粒子得以保存; 而目标值差于平均目标值的粒子将对应于较大的惯性权值, 使该粒子能够更快地趋向较好的搜索空间。

## 2.3 带变异阈值的多种群 PSO 算法

作为模拟自然界中生物捕食现象的进化算法, 不仅要考虑个体自身状态、认知模式和自身社会模式的影响, 还应考虑个体所受其他社会模式的影响, 即群体间信息的交流与共享。多种群粒子群算法可以理解为采用多个粒子群或者将一

个粒子群分成多个子群, 各种群在各自进化的同时相互共享和交互信息, 各种群不仅利用外界获得信息指导自身的搜索, 而且还把搜索过程中的到的经验与其他种群分享, 从而使整个种群进行进化, 得到最优解。为了模拟鸟类捕食过程中某些个体发生飞行异常现象, 在粒子群算法中引入变异阈值, 即在每代进化的过程中产生一个随机数, 当该随机数超过变异阈值时, 粒子的位置发生变异, 速度及位置更新公式如下。

若随机数小于变异阈值, 则

$$\begin{cases} v_i^k(t+1) = \omega^k v_i^k(t) + c_0^k r_0^k (p_i^k - x_i^k(t)) + \sum_{m=1}^M c_m^k r_m^k (p_g^m - x_i^k(t)) \\ x_i^k(t+1) = v_i^k(t+1) + x_i^k(t) \quad (m \neq k) \end{cases} \quad (8)$$

若随机数不小于变异阈值, 则

$$x_i^k(t+1) = r(x_{\max} - x_{\min}) + x_{\min} \quad (9)$$

其中,  $k$  表示第  $k$  个种群,  $i$  表示第  $i$  个粒子,  $t$  表示进化代数,  $\omega$  表示惯性权因子,  $r_0 - r_m$  为  $[0, 1]$  内的均匀分布函数,  $c_0 - c_m$  为正的加速常数,  $p_i$  为第  $i$  个粒子的历史最佳位置,  $p_g^m$  为第  $m$  个种群的最佳位置,  $x_{\max}, x_{\min}$  为粒子取值范围。

## 3 轮胎参数辨识结果及分析

选用轮胎为某公司生产的 245/40R17 型号轮胎, 实验数据由该公司提供。以仿真值与实验值之差的均方根为目标函数, 采用第 2 节所述 3 种粒子群算法对魔术公式中的参数进行辨识。设定基本粒子群算法种群粒子个数为 40, 参考文献 [11],  $\omega$  为 0.8—1.2 时, PSO 算法有更快的收敛速度,  $\omega \geq 1.2$  时, 算法易陷入局部极限值,  $\omega=1$  时, 加速常数  $c_1=2.05, c_2=2.05$ <sup>[12]</sup>; 自适应惯性权值粒子群算法种群粒子个数为 40, 取  $\omega_{\max}=0.9, \omega_{\min}=0.4$ <sup>[13]</sup>; 带变异阈值的多种群粒子群算法 4 个种群, 每个种群粒子个数为 10,  $\omega=1, c_1=2.05, c_2=2.05$ <sup>[12]</sup>, 变异阈值根据经验选取。3 种优化算法粒子初始位置参考与其型号相似的某一轮胎参数进行初始化, 均进化 50 次, 辨识结果如表 1、图 1—图 3 所示。

由图 1—图 3 可知, 与其他两种算法比较, 带变异阈值的多种群 PSO 算法辨识得到的参数使仿真值与实验值吻合度明显提高。由表 1 可知, 带变异阈值的多种群 PSO 算法使仿真值与实验值差的均方根, 即目标函数值, 很大程度减小, 能有效地避免粒子群算法的早熟现象, 提高了魔术公式参数辨识的精度, 使仿真值更好地逼近实验值。

表 1 目标函数值  
Table 1 Objective function values

目标函数值	基本 PSO	自适应惯性权值 PSO	带变异阈值的多种群 PSO
纵向力	1413.75	1283.22	1074.31
侧偏力	322.15	196.42	142.31
回正力矩	17.21	13.44	11.98

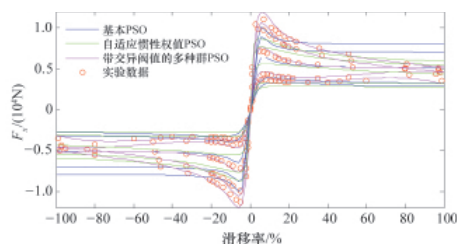


图 1 纵向力辨识结果

Fig. 1 Longitudinal force identification results

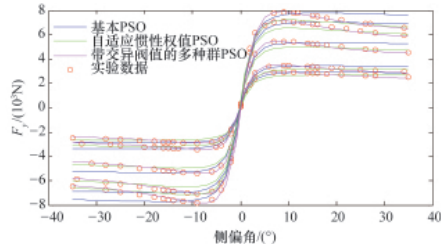


图 2 侧向力辨识结果

Fig. 2 Lateral force identification results

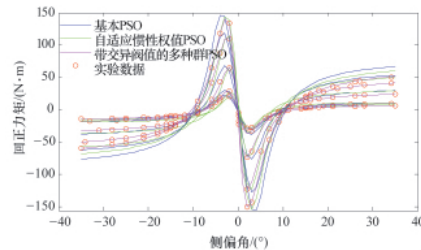


图 3 回正力矩辨识结果

Fig. 3 Aligning torque identification results

#### 4 结论

粒子群算法是基于群体智能理论的演化计算技术,该算法通过群体中粒子间的合作与竞争而产生的群体智能指导优化搜索,具有较强的通用性,在原有的粒子群算法的基础上提出了带变异阈值的多种群粒子群算法。带变异阈值的多种群粒子群算法采用多个种群同时进化,种群之间相互独立又相互联系,保持了种群的多样性和收敛性,通过变异阈值进一步避免了基本粒子群算法的早熟现象降低了陷入局部最优解的概率,相比基本粒子群算法和自适应惯性权值粒子群算法收敛性较好,辨识得到的参数使仿真数据与实验数据更相近,轮胎参数辨识精度有明显提高。

#### 参考文献 (References)

- [1] 陈军. MSC. ADAMS 技术与工程分析实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.  
Chen Jun. MSC. ADAMS technology and engineering analysis [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008.
- [2] 任光胜. 用 Magic Formula 对轮胎特性曲线的拟合与优化 [J]. 重庆大学学报, 2001, 24(3): 22-24.  
Ren Guangsheng. *Journal of Chongqing University*, 2001, 24(3): 22-24.
- [3] 郭孔辉, 袁忠诚, 卢荡. UniTire 轮胎稳态模型的联合工况预测能力研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(6): 565-568.  
Guo Konghui, Yuan Zhongcheng, Lu Dang. *Automotive Engineering*, 2006, 28(6): 565-568.
- [4] 韩加蓬, 王艳阳. 基于遗传算法的 LuGre 轮胎模型参数辨识研究[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(18): 72-76.  
Han Jiapeng, Wang Yanyang. *Mathematics in Practice and Theory*, 2007,

37(18): 72-76.

- [5] 张云清, 陈伟, 陈立平, 等. Magic Formula 轮胎模型参数辨识的一种混合优化算法[J]. 汽车工程, 2007, 29(3): 250-253.  
Zhang Yunqing, Chen Wei, Chen Liping, et al. *Automotive Engineering*, 2007, 29(3): 250-253.
- [6] Cabrera J A, Ortiz A. A coevolutionary algorithm for tyre model parameters identification [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, 41(5): 749-763.
- [7] Kennedy, Eberhart R C, Shi Y. *Swarm intelligence* [M]. San Francisco: Morgan Kaufman Publishers, 2001.
- [8] 王凌, 刘波. 微粒群优化与调度算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.  
Wang Ling, Liu Bo. *Particle swarm optimization and scheduling algorithms*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [9] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.  
Wang Ling. *Application of the intelligent optimization algorithms* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [10] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer [C]. *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Anchorage, USA, May 4-9, 1998.
- [11] 梁军. 粒子群算法在最优化问题中的研究 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2008.  
Liang Jun. *Study of particle swarm optimization algorithm on optimization problem*[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2008.
- [12] Grabowski J, Wodecki M. A very fast tabu search algorithm for job shop problem: Vol 30, Part II [M]. *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, 2005.
- [13] Shi Y, Eberhart R C. Empirical study of particle swarm optimization[C]// *Proceeding of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1999: 1945-1950.

(责任编辑 刘志远)

### 国际著名检索系统 VINITI 2011 年收录《科技导报》

近日,经俄罗斯全俄科学技术信息研究所(VINITI)专家评估,《科技导报》被国际权威检索系统俄罗斯《文摘杂志》VINITI 数据库正式收录。之前导报已被美国 CA、CSA、Ulrich,英国 SA/INSPEC、CABI,波兰 IC 收录。

VINITI 编辑出版的《文摘杂志》(PK/AJ)创刊于 1953 年,由 VINITI 编辑出版。《文摘杂志》分综合、单卷和分册 3 种类型,收录世界上 130 多个国家和地区 66 种文字出版的 2.2 万余种期刊,6 千多种连续出版物,1 万余种图书,15 万件发明证书和专利及会议录、科技报告、标准等。收录内容涉及自然科学、应用科学和工业经济等,年报道量 10 多万条,对期刊的评估和考核非常严格。其年报道量约 130 万条,是世界上引用出版物最多、报道量最大的权威文摘刊物。

《科技导报》编辑部