

文章编号: 1000-8152(2010)11-1580-05

## 自动变速汽车神经网络三参数换挡策略

陈清洪, 秦大同

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 为了使汽车自动变速器(AMT)换挡能够适应路况与车况变化, 更好地满足汽车换挡平顺性和燃油经济性要求, 提出了AMT汽车神经网络三参数换挡控制. 论文首先给出了神经网络三参数换挡控制原理, 接着给出了神经网络三参数换挡控制算法, 并且叙述了在长安羚羊AMT轿车上进行神经网络三参数换挡仿真与试验的结果. 与神经网络两参数换挡进行的比较表明: 采用神经网络三参数换挡比采用神经网络两参数换挡更加符合驾驶员的换挡经验和习惯, 挡位切换曲面变化平滑, 比传统算法求解换挡规律更简便、易于实现、鲁棒性更强.

**关键词:** 神经网络; 自动控制; 汽车工程; 自动变速器; 三参数换挡

**中图分类号:** TP183, U46 **文献标识码:** A

## Neural-networked three-parameter gear-shift schedule for automated-manual-transmission car

CHEN Qing-hong, QIN Da-tong

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** For the gear-shift of automated manual transmission(AMT) car to accommodate the road conditions and vehicle states, and to provide the smoothness in shifting, we present a neural-networked three-parameter gear-shift control scheme. After an introduction of the control principle of three-parameter gear-shift based on neural network, we present the control algorithm of the neural network, and provide the simulation and test results on ChangAn Lingyang AMT cars. The comparison with the neural-networked two-parameter gear-shift shows that the proposed gear-shift is better conformed to driver's experience or practice and is more smooth for gear-shift surface changes. The gear-shift is also simpler, easier and more robust in operations than the gear-shift controlled by traditional methods.

**Key words:** neural network; automatic control; automotive engineering; automatic transmission; three-parameter shift

### 1 引言(Introduction)

目前, 汽车工程领域几种比较典型的自动变速器是<sup>[1]</sup>: 液力机械式自动变速器(AT), 金属带式无级变速器(CVT), 电控机械式自动变速器(AMT). 电控机械式自动变速器是在传统的手动齿轮式变速器基础上改进的, 它结构简单, 保留了干式离合器与手动变速器的绝大部分总成部件, 只是将其中手动操作系统的换挡杆部分替换为自动控制机构. 它保留了原手动变速器齿轮传动效率高、成本低、结构简单、易制造的长处, 生产继承性好, 改造的投入费用少, 非常适合我国国情.

AMT汽车自动变速器控制的关键技术是换挡规律的制定和离合器控制, 本文主要研究换挡规律这一课题, 即根据驾驶员意图, 车辆的运行状态和道路状况等因素, 按照车辆某些性能参数最优的原则, 确定车辆的最佳挡位. 目前, 挡位决策方法可以分

为两大类: 一类是在选定换挡控制参数之后, 按照某些性能指标最优的方法求解换挡规律; 另一类方法则是利用优秀驾驶员的驾驶经验及领域专家的知识形成的智能换挡. 前者为传统方法, 理论完善, 有一套完整的求解方法, 然而当车辆的实际运行条件与换挡规律求解的设定条件有较大差别时, 其给出的挡位显然不是最优的, 或在某些区域内不是最佳的. 神经网络具有极强的非线性映射能力和泛化能力<sup>[2]</sup>, 甚至可以进行动态训练以适应车况, 路况, 驾驶员特性的变化. 当前比较成熟的是两参数换挡规律(车速、油门开度), 两参数换挡不能反应路面条件, 车辆载荷等外在条件的变化对换挡的影响.

国内外许多学者对换挡规律的制定进行了研究, ZHANG Z Y等人研究了工程车辆模糊换挡<sup>[3~6]</sup>, 王卓等人研究了工程车辆的神经网络换挡技术<sup>[7~9]</sup>, 他们的研究中都考虑了车辆传动系统中的液力变矩

器主, 从动侧的转速, 将其作为换挡依据之一. 然而, AMT汽车传动系统有它自己的特点(没有液力变矩器), 换挡系统对冲击度更加敏感, 因此, 在换挡决策中必须考虑更多因素, 采用传统的两参数换挡就无法满足乘坐舒适性的要求, 同时模糊换挡的移植性相对较差(针对不同对象必须制定相应的模糊换挡规则). 作者在这篇文章中将利用神经网络的万能逼近能力, 强大的泛化能力, 实现AMT汽车的三参数换挡决策, 充分反映驾驶条件变化对换挡的影响. 文中给出了AMT汽车神经网络三参数换挡原理, 学习算法以及仿真与实车试验结果.

## 2 神经网络三参数换挡原理(Principle of neural network three-parameter shift)

通常三参数换挡<sup>[1]</sup>是指根据车速, 油门开度, 加速度3者的值, 确定汽车行驶挡位, 以保证汽车有最佳的燃油经济性或最佳动力性.

神经网络系统原理框图如图1所示: 图中神经网络训练的输入样本为汽车发动机油门开度 $a$ 、汽车速度 $V$ 、加速度 $Ac$ , 输出为此时对应的变速器挡位 $O$ . 样本的获取可以通过实验得到或者通过熟练驾驶员驾驶汽车实车测试得到, 将采集到的各种工况下的油门开度 $a$ 、车速 $V$ 、加速度 $Ac$ 以及对应的挡位 $T$ 存储到存储器中, 作为神经网络换挡控制器的训练样本, 将训练样本输入待训练神经网络系统, 得到此时网络的实际输出 $O$ , 与样本对应的目标输出 $T$ 相比较, 如果误差在允许范围之内, 即完成训练. 否则, 将此误差反向传播, 逐级调整网络各层节点间连接权值, 权值调整后再次用输入样本进行训练, 反复进行, 直到误差小于允许值. 完成训练后就可应用于实际AMT汽车换挡控制.

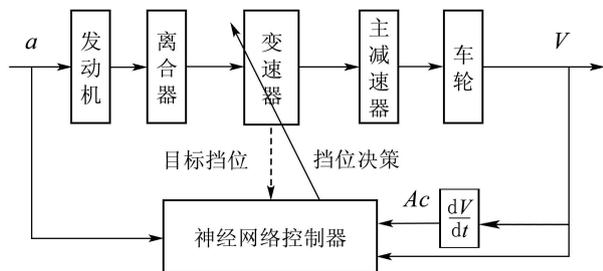


图 1 神经网络三参数换挡控制系统原理图

Fig. 1 Diagram of neural network three-parameter shift control

AMT汽车动力传动系统变速器挡位选择与控制由完成训练的神经网络控制器实现, 神经网络控制器的3个输入分别为: 发动机油门开度 $a$ , 汽车行驶速度 $V$ , 加速度 $Ac$ . 根据神经网络控制器输出调整变速器挡位即挡位决策(如图1中所示).

如果驾驶员对换挡不满意, 可以将神经网络控制

器切换到训练状态, 由驾驶者以手动方式驾驶汽车, 采集各输入参数和对应的挡位存入存储器中, 重新对神经网络换挡控制系统进行训练, 训练完成后再切换到神经网络自动换挡控制. 可见神经网络换挡控制适应能力很强, 还可进行动态训练.

## 3 神经网络三参数换挡算法(Algorithm of neural network three-parameter shift)

### 3.1 神经网络结构(Structure of neural network)

由经验可知, AMT汽车换挡区域是非凸域, 用BP神经网络解决此问题必须要2个隐含层<sup>[2]</sup>, 故神经网络系统采用4层网络: 1个输入层、2个隐含层、1个输出层. 高维输入第1隐含层与第2隐含层节点数的最佳比例3:1, 具体第1隐含层节点的数目先根据经验确定, 然后再根据训练精度和训练速度进行适当调整, 使神经网络系统训练速度快、精度高. AMT汽车神经网络三参数换挡控制器网络结构如图2所示.

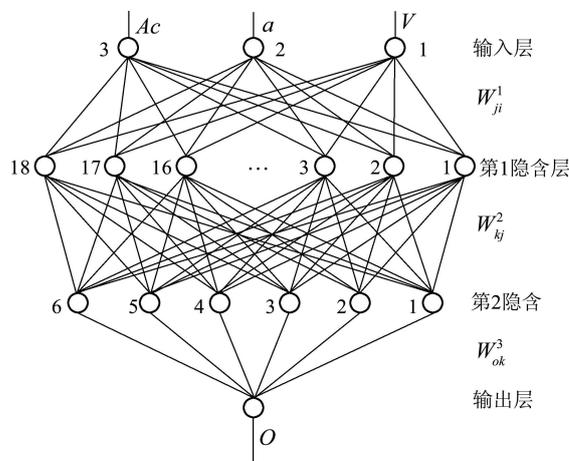


图 2 神经网络三参数换挡网络结构图

Fig. 2 Neural network structure of three-parameter shift

神经网络各层的阿拉伯数字为节点编号, 图中输入量3个: 分别为车速 $V$ 、油门开度 $a$ 、加速度 $Ac$ 、输出量为挡位 $O$ .  $W^1_{ji}$ 为输入层第 $i$ 个节点到第1隐含层第 $j$ 个节点的连接权值;  $W^2_{kj}$ 为第1隐含层第 $j$ 个节点到第2隐含层第 $k$ 个节点的连接权值;  $W^3_{ok}$ 为第2隐含层第 $k$ 个节点到输出层的权值. 第1, 2隐含层神经传递函数为双曲正切S型传递函数, 输出层神经元传递函数为线性传递函数.

### 3.2 前向传递(Feed forward propagation)

前向传递就是样本输入经过神经网络得到实际输出的传递过程.

输入层第 $i$ 个节点的输出为

$$y_i^1 = x_i, i = 1, 2, 3, \tag{1}$$

其中 $x_i$ 为输入, 包括车速 $V$ 、油门开度 $a$ 、加速度 $Ac$ .

第1隐含层第 $j$ 个节点的输出为

$$y_j^2 = f^2\left(\sum_{i=1}^3 w_{ji}^1 y_i^1 - \theta_j^2\right) = f^2(\text{net}_j), \quad (2)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, 18.$$

其中:  $\text{net}_j$  为第1隐含层第  $j$  个节点的输入;  $\theta_j^2$  为第  $j$  个节点的阈值.

第2隐含层第  $k$  个节点的输出为

$$y_k^3 = f^3\left(\sum_{j=1}^{18} w_{kj}^2 y_j^2 - \theta_k^3\right) = f^3(\text{net}_k), \quad (3)$$

$$k = 1, 2, 3, 4, 5, 6.$$

其中:  $\text{net}_k$  为第2隐含层第  $k$  个节点的输入;  $\theta_k^3$  为第  $k$  个节点的阈值.

输出层节点的输出为

$$O = f^4\left(\sum_{k=1}^6 w_{ok}^3 y_k^3 - \theta_o^4\right) = f^4(\text{net}_o), \quad (4)$$

其中:  $\text{net}_o$  为输出节点的输入,  $\theta_o^4$  为输出节点阈值.

### 3.3 误差反传与权值修正(Back-propagation and weight correction)

网络训练过程中, 样本目标输出  $T$  与网络实际输出  $O$  之间的误差超出允许范围, 则逐层递归地计算误差反向传播到网络各层的值, 以便根据反传误差计算结果调节各层节点连接权值和节点阈值.

输出节点误差为

$$E = \frac{1}{2}(T - O)^2. \quad (5)$$

输出误差对第2隐层到输出层权重的导数为

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ok}^3} = -(T - O)f^{4'}(\text{net}_o)y_k^3 = -\delta_{ok}y_k^3. \quad (6)$$

输出误差对第1隐层节点到第2隐层节点权重的导数为

$$\frac{\partial E}{\partial w_{kj}^2} = -\sum_{k=1}^6 \delta_{ok}w_{ok}^3 f^{3'}(\text{net}_k)y_j^2 = -\delta_{kj}y_j^2. \quad (7)$$

输出误差对输入层到第1隐含层每个节点权值的导数为

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}^1} = -\sum_{k=1}^6 \sum_{j=1}^{18} \delta_{ok}w_{ok}^3 f^{3'}(\text{net}_k)w_{kj}^2 f^{2'}(\text{net}_j)y_i^1 = -\delta_{ji}y_i^1. \quad (8)$$

采用加入动量项的梯度下降法对神经网络各层连接权值修正, 修正式分别为:

第2隐含层第  $k$  个节点到输出层连接权值

$$w_{ok}^3(n+1) = w_{ok}^3(n) + \eta\delta_{ok}y_k^3 + \alpha(w_{ok}^3(n) - w_{ok}^3(n-1)); \quad (9)$$

第1隐含层第  $j$  个节点到第2隐含层第  $k$  个节点连接权值

$$w_{kj}^2(n+1) = w_{kj}^2(n) + \eta\delta_{kj}y_j^2 + \alpha(w_{kj}^2(n) - w_{kj}^2(n-1)); \quad (10)$$

输入层第  $i$  个节点到第1隐含层第  $j$  个节点连接权值

$$w_{ji}^1(n+1) = w_{ji}^1(n) + \eta\delta_{ji}y_i^1 + \alpha(w_{ji}^1(n) - w_{ji}^1(n-1)), \quad (11)$$

其中:  $n$  为训练次数,  $\eta$  为学习率,  $\alpha$  为动量系数(一般取0.9左右).

采用与连接权值修正相同的算法, 得到各层节点阈值修正式分别为:

输出节点阈值

$$\theta_o^4(n+1) = \theta_o^4(n) + \eta\delta_{ok} + \alpha(\theta_o^4(n) - \theta_o^4(n-1)); \quad (12)$$

第2隐层节点阈值

$$\theta_k^3(n+1) = \theta_k^3(n) + \eta\delta_{kj} + \alpha(\theta_k^3(n) - \theta_k^3(n-1)); \quad (13)$$

第1隐层节点阈值

$$\theta_j^2(n+1) = \theta_j^2(n) + \eta\delta_{ji} + \alpha(\theta_j^2(n) - \theta_j^2(n-1)). \quad (14)$$

分别利用式(9)~(14)修改各层连接权值和各节点阈值, 重复前面的算法对网络进行反复训练, 直到输出误差小于规定值, 结束训练.

## 4 应用(Application)

### 4.1 神经网络训练(Neural network training)

本文以配备5挡AMT变速器的长安羚羊轿车为对象, 运用采集的训练样本对神经网络系统进行训练, 训练过程误差变化如图3所示.

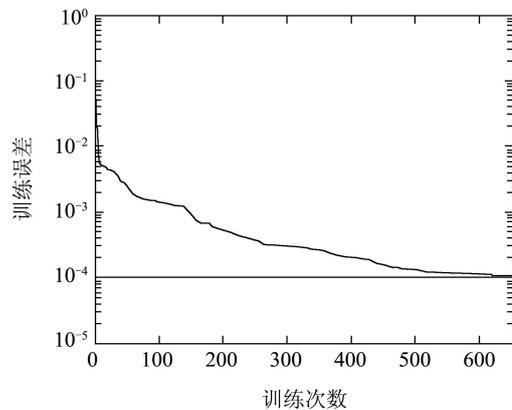


图3 神经网络训练误差变化曲线

Fig. 3 Training error curve of neural network

从训练误差曲线可以看出, 经过约650次左右训练, 误差即已达到规定要求( $10^{-4}$ ), 训练误差变化陡峭, 收敛速度较快, 说明网络设计合理.

### 4.2 仿真(Simulation)

为了检验神经网络控制器用于AMT汽车三参数换挡的效果, 将训练好的神经网络三参数换挡控制器与两参数换挡控制器应用到长安羚羊AMT轿车

上进行经济性换挡仿真, 羚羊AMT轿车主要参数见表1. 三参数换挡与两参数换挡是在车速, 油门开度变化完全相同的情况下进行的, 以便于比较. 仿真结果如图4.

表 1 长安羚羊AMT轿车主要参数表

Table 1 Key parameter of ChangAn Lingyang AMT car

功率/ kW	怠速转速/ rad/min	车轮半径/ mm	变速器及主减速器速比						
			1挡	2挡	3挡	4挡	5挡	倒挡	主减速器
63	800	274	3.416	1.894	1.28	0.914	0.757	3.272	3.272

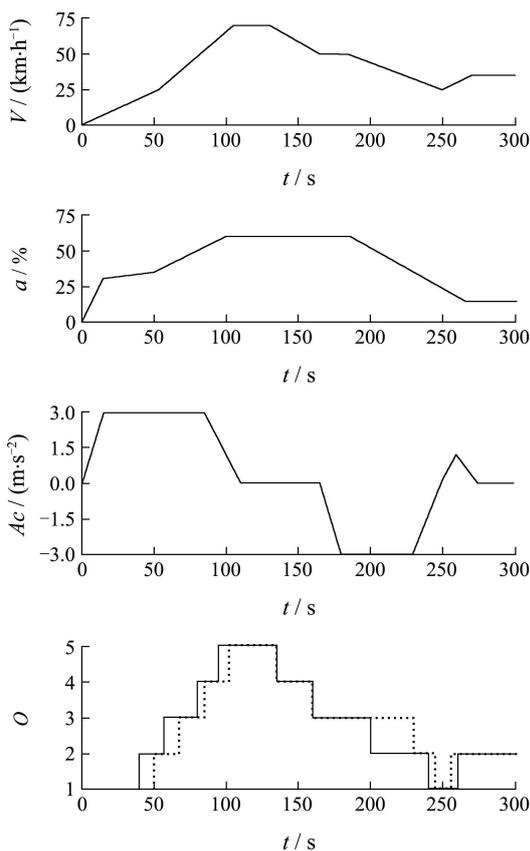


图 4 AMT汽车神经网络换挡仿真

Fig. 4 Shift simulation of neural network AMT car

图4中虚线为神经网络两参数换挡仿真结果, 实线为三参数换挡仿真结果. 从图4仿真对比可以看到, 在前100 s加速过程中, 三参数换挡由于考虑了反映路面等外环境变化对换挡的影响的加速度因素, 三参数换挡升档车速普遍比两参数换挡低, 使动力传动系统有更好的燃油经济性; 在降挡的5挡降4挡、4挡降3挡时, 降挡车速完全相同, 因为此时加速度为0, 相当于两参数换挡; 其它降挡过程由于加速度为负, 三参数换挡降挡车速比两参数降挡车速高, 能够更好地适应路面阻力增大的特点, 使汽车具有更好的燃油经济性和适应环境

的能力.

### 4.3 实车测试(Vehicle testing)

为了检验神经网络三参数换挡实际效果, 在山地重型二级道路对换挡控制进行了测试, 测试结果如图5所示. 也在同样的路段, 以同样的操作条件进行了两参数换挡试车测试, 以便于与三参数神经网络换挡进行比较, 两参数换挡试车测试结果如图6所示.

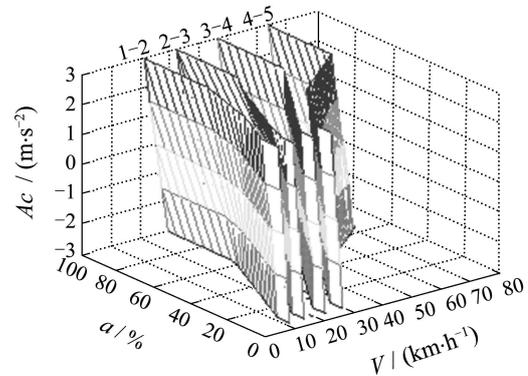


图 5 神经网络三参数经济性换挡测试

Fig. 5 Three-parameter economy shift test in neural network

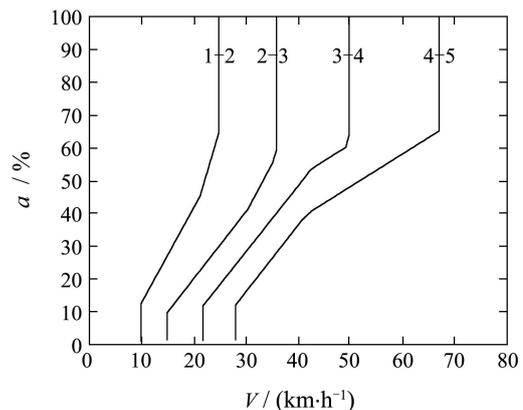


图 6 神经网络两参数经济性换挡测试

Fig. 6 Two-parameter economy shift test in neural network

测试结果图可以看到: 在同一加速度时油门开度越大, 挡位切换点车速越高; 在同一油门开度时

加速度越大,挡位切换车速越低;随着油门开度,加速度的不同,挡位切换车速不同;挡位切换曲面变化平缓.从图6可以看到,与神经网络三参数换挡相比,它只相当于三参数时在加速度为0这种情况的换挡,不能充分反应路况,车况等环境变化对换挡决策的影响.因此,神经网络三参数换挡比两参数换挡更能满足人们对汽车驾驶的经济性和低排放的要求,更能适应环境变化对汽车驾驶行为的影响,换挡控制器鲁棒性更强.

## 5 结论(Conclusion)

AMT汽车神经网络三参数换挡充分考虑了驾驶员意图和环境变化对汽车换挡的影响,挡位切换曲面变化平滑;与两参数换挡相比,适应能力更强,具有更好的动力性和燃油经济性.神经网络成功应用于AMT汽车三参数换挡控制,扩展了神经网络在汽车工程领域的应用,对神经网络应用于汽车工程的其它方面具有一定的借鉴意义,对汽车智能化做出了有益的探索.

## 参考文献(References):

- [1] 黄宗益. 现代轿车自动变速器原理和设计[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.  
(HUANG Zongyi. *Principle and Design of the Modern Automatic Transmission Cars*[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006.)
- [2] 袁曾任. 人工神经网络及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.  
(YUAN Cengren. *Artificial Neural Network and Application*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.)
- [3] ZHANG Z Y, ZHAO D X, BEISUN. Study on fuzzy automatic transmission strategy of vehicles[C] // *Proceedings of IEEE International Cybernetics and Intelligent Systems*. Piscataway: IEEE, 2008, 9: 1359 – 1363.
- [4] YI J, WANG X L, HU Y J, et al. Fuzzy control and simulation on automatic transmission of tracked vehicle in complicated driving conditions[C] // *Proceedings of IEEE International Vehicular Electronics and Safety*. Piscataway: IEEE, 2006, 11: 259 – 264.
- [5] YI J, WANG X L, HU Y J, et al. Modelling and simulation of a fuzzy controller of automatic transmission of a tracked vehicle in complicated driving conditions[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2007, 221(10): 1259 – 1272.
- [6] MASHADI B, KAZEMKHANI A, BAGHAEI LAKEH R. An automatic gear-shifting strategy for manual transmissions[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2007, 221(5): 757 – 768.
- [7] 王学峰, 许纯新, 孔德文, 等. 工程机械FNN换挡控制系统的改进[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 1 – 4.  
(WANG Xuefeng, XU Chunxin, KONG Dewen, et al. Improvement of FNN automatic gear-shifting control system for construction machinery[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, 35(2): 1 – 4.)
- [8] 王卓, 赵丁选. 工程车辆自动变速器换挡的神经网络控制系统[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(3): 274 – 277.  
(WANG Zhuo, ZHAO Dingxuan. Neural network control system of engineering vehicle automatic shift[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2002, 36(3): 274 – 277.)
- [9] 戴群亮, 张帮成, 赵丁选. 工程车辆并行自适应神经网络自动换挡控制[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 34 – 36.  
(DAI Qunliang, ZHANG Bangcheng, ZHAO Dingxuan. Parallel self-adaptive neural network control for engineering vehicle automatic shift[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(9): 34 – 36.)

## 作者简介:

**陈清洪** (1967—), 男, 博士研究生, 研究方向为车辆动力传动及综合控制、智能控制、信号检测与处理等, E-mail: chen1997achen@sina.com.cn;

**秦大同** (1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事混合动力电动汽车、车辆动力传动及综合控制、机电传动及控制等研究, E-mail: dtqin@cqu.edu.cn.