

液压混合动力飞机牵引车制动控制系统

赵立军^{1,2,3}, 王 昕^{2,3}, 姜继海^{2,3}

(1. 哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 264209 山东 威海, zhaolijun@hitwh.edu.cn; 2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150080 哈尔滨; 3. 浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 310027 杭州)

摘 要: 为了将液压混合动力技术应用于飞机牵引车,按照飞机牵引车的性能要求,对动力系统的主要参数进行了优化匹配,用数学建模方法对优化结果进行仿真分析;根据再生储能制动需求,设计制动控制系统结构和工作策略;针对受参数扰动影响显著的制动工况,进行双液压蓄能器储能制动配置方式的对比分析,得出最佳工作模式;设计神经网络模糊PID控制器,并在液压混合动力车辆模拟试验台进行性能测试,验证了控制算法的有效性.

关键词: 液压混合动力;飞机牵引车;轮边驱动;神经网络;模糊控制

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)09-0081-05

Study on brake control system of aircraft towing tractor base on hydraulic hybrid

ZHAO Li-jun^{1,2,3}, WANG Xin^{2,3}, JIANG Ji-hai^{2,3}

(1. School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, China, zhaolijun@hitwh.edu.cn; 2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China; 3. The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, 310027 Hangzhou, China)

Abstract: To meet the requirements of aircraft tractor, the main parameters of power system were optimized and the optimized results were analyzed by a mathematical model. The braking control system structure and the working policy were designed according to the requirements of regenerated hydraulic braking system. The dual hydraulic braking style was analyzed with consideration of braking conditions greatly influenced by parameter perturbation, so that the optimal working mode was obtained. The control algorithm was proved to be efficient based on the design of ANN fuzzy PID controller and the performance test on the test-bed simulated the hydraulic hybrid tractor.

Key words: hydraulic hybrid; aircraft tractor; wheel drive; artificial neural network(ANN); fuzzy control

由于服务对象的特殊性和机械电子控制技术的快速发展,飞机牵引车的联机方式,经历了从有杆式(传统式)到无杆式(抱轮)的变革,传动系统经历了机械传动、液力传动、电力传动、液压传动的发展过程^[1]. 日益严峻的能源和环境问题使高性能和环保成为汽车工业的发展方向. 在电动车辆技术的若干难题尚未彻底解决之前,混合动力

成为目前的研究热点之一.

本文将液压混合动力技术应用于飞机牵引车中,在分析其原理和适用性的基础上,匹配系统参数,优选制动储能配置方式. 对系统压力大范围扰动的制动系统控制进行研究,对于液压混合动力技术研究的深入和推广具有重要意义.

1 飞机牵引车液压混合动力系统分析

1.1 系统工作原理简述

液压混合动力是基于二次调节静液传动技术的新型动力系统. 根据系统动力流不同,分为串联式、并联式、混联式和轮边驱动式. 设计飞机牵引

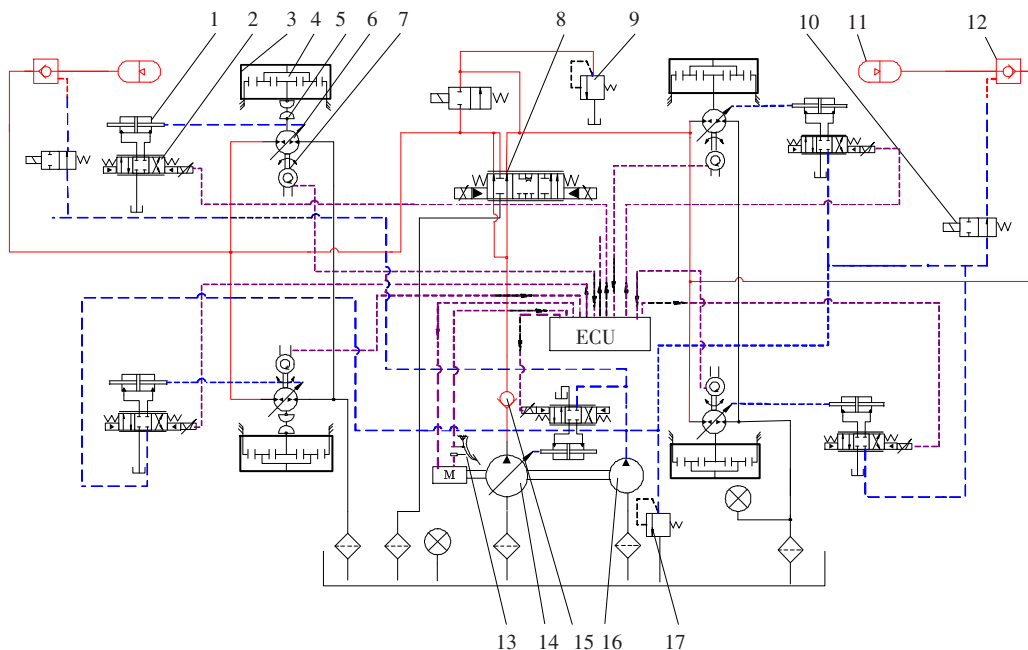
收稿日期: 2010-05-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875054); 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室开放基金资助项目(GZKF-2008003).

作者简介: 赵立军(1975—),男,副教授,博士研究生;
姜继海(1957—),男,教授,博士生导师.

车动力系统如图1所示,驱动元件液压泵/马达经轮边减速器与车轮连接,具备四轮/两轮驱动双模式,前轮装备多盘湿式摩擦制动器.在正常行驶时,恒压变量泵在发动机的驱动下,与液压蓄能器共同为系统提供工作压力油,处于恒压网络(CPR);通过调节液压泵/马达的排量实现对输出扭矩和转速控制.在制动工况中,液压泵/马达工

作于液压泵工况,被牵引车的惯性负载拖动,向系统回馈能量并以高压液压油的形式进入液压蓄能器;在牵引车再次起步时,可将此高压液压油输出给液压泵/马达,实现惯性能的回收利用,并可在特定工况下为车辆提供辅助功率,从而降低发动机油耗,减少排放^[2].



1—变量油缸;2—电液伺服阀;3—车轮;4—轮边减速器;5—万向节;6—液压泵/马达;7—转速传感器;8—电磁换向阀;9,17—安全阀;10—开关阀;11—液压蓄能器;12—液控单向阀;13—踏板;14—恒压变量泵;15—单向阀;16—辅助泵

图1 液驱混合动力系统原理图

1.2 采用液压混合动力系统的优越性

大中型飞机牵引车,采用闭式液压泵控液压马达技术是主流传动形式,但由于控制阀节流损失较大,导致系统效率较低,经济性较差.

在(无杆式)飞机牵引车中采用液驱混合动力技术,具有更好的适用条件^[1]:

1) 部件布置方式较自由,便于为联机(夹持—举升)机构空出工作通道.

2) 飞机牵引车连同飞机整体质量大,可更好地发挥液压蓄能器功率密度大的优势;蓄能器的质量因素带来的负面影响相对较小.

3) 牵引飞机起步时,需要具有短时低速大功率驱动,符合液压蓄能器充放能量迅速的特性.

4) 具有实时无级变速特性,可调整发动机尽量工作于最佳燃油经济区,以降低燃油消耗.

2 动力系统参数优化匹配设计

液压混合动力系统的参数优化对车辆性能影响至关重要^[3].采用自适应遗传算法来确定基本遗传算法的交叉率和变异率,保证遗传算法的收敛性;引入模拟退火法思想,通过拉伸目标函数的适

应度,使优秀个体在产生后代时具有明显的优势,加速寻优的过程,实现自适应模拟退火遗传算法^[3-4].

1) 最优保存策略.将本代最优解与历史最优解比较,取其大者取代历史最优解.

2) 自适应选择算子.采用轮赌法进行选择操作,个体选择概率采用了适应度概率和浓度概率的加权和选择机制.

3) 自适应交叉、变异算子采用一致交叉策略.

4) 自适应选择较优解进行模拟退火.将当前解按适应度大小排序,在保留最优个体的基础上,另外选择 $N \times P'$ 个适应度大的较优解进入模拟退火.其中, N 为种群规模.

5) 突变操作.鉴于传统遗传算法容易出现早熟收敛现象,将进化过程分为渐进和突变2个不同阶段,在突变阶段引入突变操作.

6) 适应度动态拉伸操作.

目标函数的确定:制动能量的回收能力,动力性能,汽车油耗和整车价格的增加.采用权重系数变换法将多目标综合为单一的优化目标.

利用 MATLAB 进行参数优化.设定种群规模

为 100,交叉率 0.85,变异率 0.005. 牵引车机组的性能指标及基因极限设定参数如表 1. 参数优化

结果经圆整后,如表 2.

表 1 牵引车机组的基因极限和权重系数

机组参数				基因极限				权重系数	
机组整体质量/kg	主减速比(前/后)	牵引最高车速/(km·h ⁻¹)	车轮半径/m	液压蓄能器容积/L	最高工作压力/MPa	蓄能器充气压力/MPa	系统恒定压力/MPa	液压泵/马达排量/(mL·r ⁻¹)	
162 000	60/40	10	0.506	(20~80)×2	40	10~27	18~35	71~125	0.2/0.5/0.2/0.1

表 2 优化后的动力系统参数

液压蓄能器容积/L	最高工作压力/MPa	液压蓄能器充气压力/MPa	系统恒定压力/MPa	液压泵/马达排量(前/后)/(mL·r ⁻¹)
40×2	40	14.2	20.25	71/125

3 飞机牵引车制动控制策略

3.1 车辆控制器及制动控制模型

整车控制器根据行驶工况、车辆状态和驾驶员的要求,决定驱动/制动力在发动机、液压蓄能器、液压泵/马达和摩擦制动器间的分配和传递^[5-7]. 主要构成如图 2 所示.

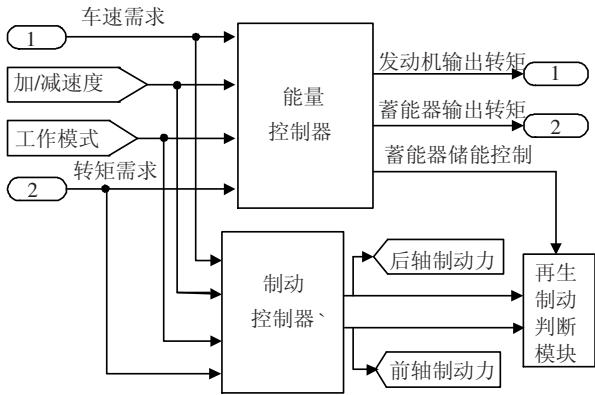


图 2 整车控制器模型框图

3.2 液压再生制动控制策略

根据飞机牵引车的牵引/顶推实际工况,液压混合动力系统采用以再生制动为主,摩擦制动为辅(补足)的复合制动策略. 制动策略主要考虑如下指标:足够的制动效能,稳定性、平顺性要求,制动动能高效回收^[7-8]. 基本控制策略如图 3 所示.

4 液压蓄能器储能制动配置方式分析

4.1 摩擦制动介入的情况分析

经过理论分析和数学建模仿真研究发现,在液压储能制动过程中,摩擦制动介入有两种情况:

- 1) 液压蓄能器内压力已达到设定最大值,液压泵/马达达到满排量,仍不能满足制动力矩需求;
- 2) 液压泵马达已达到最大排量,仍不能满足制动力矩需求,即当前工作压力较低.

4.2 液压蓄能器储能制动的多种配置方案

为追求制动能量的回收率,应尽量避免摩擦

制动介入. 在结构和液压原理上可行的驱动/制动方案汇总如表 3 所示.

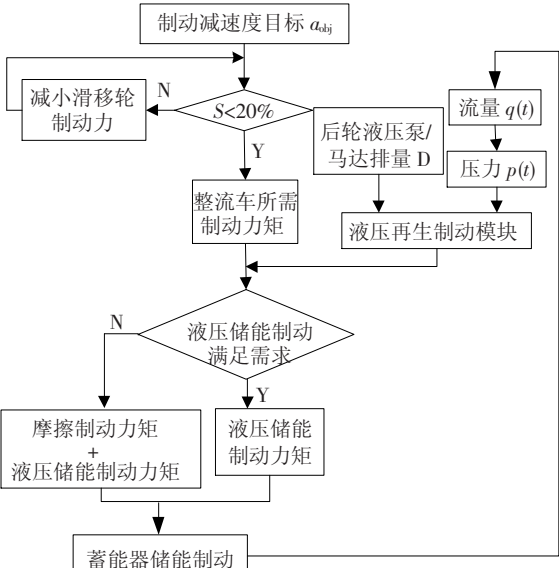


图 3 液压再生制动基本控制策略

表 3 制动策略及具体方案

编号	工况及制动方案特点
A1	两轮驱动/制动,(前后轴)两蓄能器合二为一一储能制动.
A2	两轮驱动/制动,两蓄能器先一后二储能制动.
A3/B3	两轮驱动,四轮制动,两蓄能器合二为一一储能制动.
A4/B4	两轮驱动,四轮制动,两蓄能器先一后二储能制动.
A5/B5	两轮驱动,四轮制动,两蓄能器各自储能制动及放能驱动.
A6/B6	四轮驱动/制动,两蓄能器合二为一一储能制动.

4.3 液压蓄能器储能制动配置方案的对比分析

减少摩擦制动的介入,采用以下两种方案来解决:

- 1) 前/后轴液压蓄能器先后储能制动,以提高系统压力升高速度;
- 2) 采用四轮制动与驱动策略,以降低液压泵/马达排量需求.

在 MATLAB/Simulink 环境下进行制动系统建模,进行设定制动工况下的仿真分析. 储能制动

时压力变化和摩擦制动转矩对比如图 4、5 所示。

由仿真分析结果可知：

- 1) 两液压蓄能器先后二模式储能制动,使制动时系统压力的升高速度最快,是优选方案；
- 2) 采用四轮制动将制动力合理分配到前后轮,可以充分利用液压泵/马达的储能制动能力。

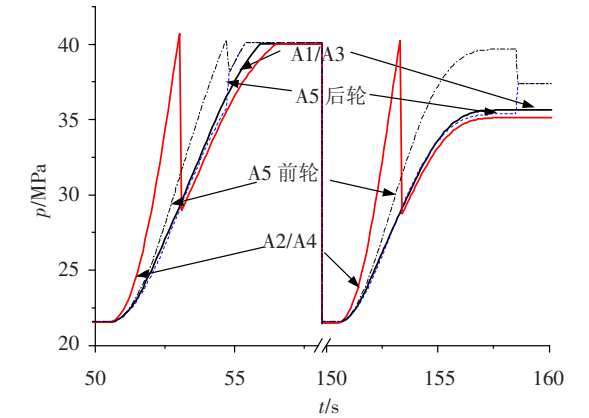


图 4 不同配置的制动系统压力变化

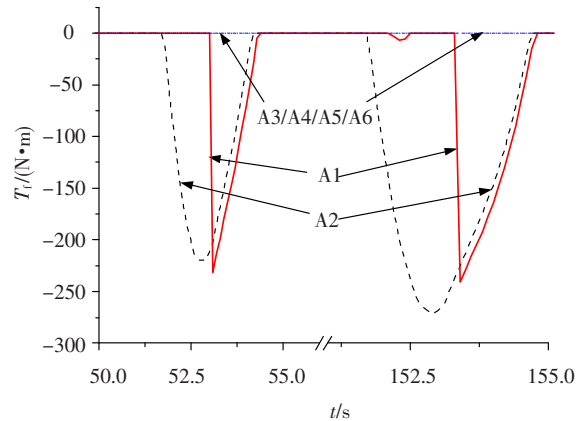


图 5 不同配置方式的摩擦制动转矩

5 制动控制系统建模及仿真分析

5.1 制动控制系统结构设计

飞机牵引车制动系统包括液压储能制动和前轮多盘湿式摩擦制动器制动. 飞机牵引车液压储能制动控制系统的结构原理如图 6 所示。

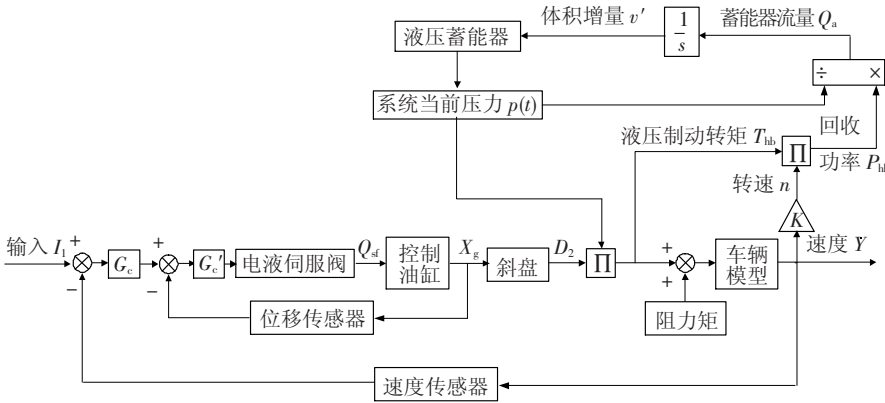


图 6 飞机牵引车制动控制系统结构原理模型

5.2 神经网络模糊控制器设计

控制器采用二维结构,考虑制动时压力大范围参数扰动以及系统效率的非线性,将偏差变化率作为输入,采用 BP 神经网络和 T-S 模糊推理相结合的算法,根据调节 PID 控制参数所得的试验数据进行训练. 神经网络模糊控制的相关算法如表 4 所示。

表 4 神经模糊控制的算法设定	
项目内容	类型
输入隶属度函数类型	gaussmf
输出隶属度函数类型	linear
“与”算法	prod
“或”算法	probor
清晰化方法	wtaver
FIS 生成法	Sub. clustering
FIS 训练法	hybrid

对构造的初始 FIS 进行训练,建立 Sugeno 型 FIS 的模糊规则. 整理后得到输出函数的表达式：

$$u_1 = 978.9e - 6386ec + 1564,$$

$$u_2 = -3.671e + 19.67ec - 1036,$$

$$u_3 = 1493e - 7426ec + 1344,$$

$$u_4 = -2383e + 13730ec + 1516.$$

5.3 制动控制性能试验研究

试验系统主要参数如表 5 所示,硬件构成和信号关系如图 7 所示。

为验证制动控制系统的性能,利用 C++ Builder 与 MATLAB 混合编写工控机控制程序. 试验时,为对比转速跟踪性能,将试验台飞轮转速稳定于 500 r/min 后,目标转速陡降至 0;为对比能量回收特性,将飞轮转速稳定在 1 000 r/min 后,目标转速降为 0,之后利用液压蓄能器储能制动后,再释放以驱动飞轮转动,以模拟液压混合动力车辆能量再利用过程. 试验结果如图 8、9 所示。

表 5 试验台主要参数

参数	液压泵/马达 排量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{rad}^{-1}$)	电液伺服阀 流量增益/ ($\text{m}^3 \cdot (\text{A} \cdot \text{s})^{-1}$)	变量油缸 最大位移/ m	传动系统 总惯量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	阻尼系数/ ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$)	变量油缸 活塞有效 面积/ m^2	恒压网络 压力/ MPa
标称值	40	3.33×10^{-6}	0.014	3.4	0.15	1.85×10^{-3}	7

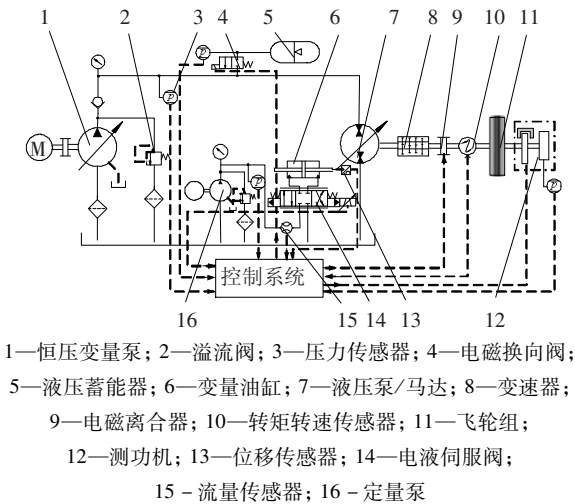


图 7 液压混合动力车辆模拟试验台构成

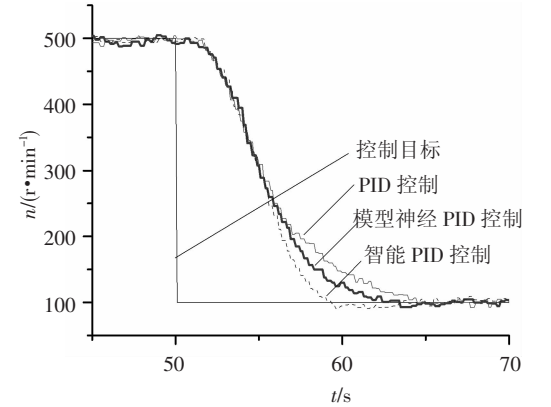


图 8 制动速度跟踪特性试验结果

由试验结果可以看出,在驱动控制试验中,模糊神经 PID 控制的速度跟踪特性综合最优,有效地抑制了超调并具有良好的响应;在制动能量回收试验中,模糊神经 PID 控制系统制动响应快,能量回收量大(表现为飞轮较快地达到更高转速),能量损耗少,控制效果良好,智能 PID 次之。

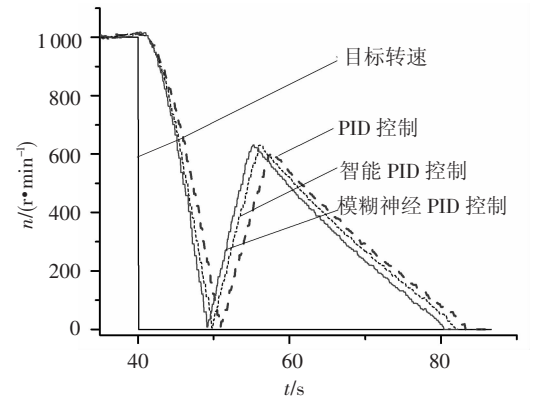


图 9 制动能量回收试验结果

6 结束语

- 1)在飞机牵引车中应用基于液压混合动力的轮边驱动技术,具有很好的适用条件,并且是可行的。
- 2)采用自适应模拟退火遗传算法完成了混合动力系统的参数匹配优化。
- 3)以系统压力升高速度更快,更好地利用液压泵/马达提供再生制动转矩,减小摩擦制动力介入为目标,经过对比分析不同的液压蓄能器配置和工作模式,得出了综合最优的方案。
- 4)设计了神经网络模糊制动控制算法,并经过试验验证了算法合理有效。

参考文献:

[1] 赵立军,刘涛,姜继海. 飞机牵引车结构及动力传动系统的发展[J]. 起重运输机械, 2009 (8): 5-8.

[2] SUN Hui, JIANG Jihai, WANG Xin. Optimal torque management strategy for a parallel hydraulic hybrid vehicle[J]. International Journal of Automotive Technology, 2007, 8(6): 791-798.

[3] 吴光强,陈慧勇. 基于遗传算法的混合动力汽车参数多目标优化[J]. 汽车工程, 2009,31(1): 60-64.

[4] CIAN L Z. Hydrodynamic transmission parameters optimization[J]. SAE Paper, 770557:3-9.

[5] WANG Zhancheng, LI Weimin. Optimization of seriee hybrid electric vehicle operational parameters simulated annealing algorithm[C]//2007 IEEE International Conference on Control andAutomation. Guangzhou, China; [s. n.], 2007:1536-1541.

[6] HUANG Bufu, WANG Zhancheng, XU Yengsheng. Multi-objective genetic algorithm for hybrid electric vehicle parameter optimization proceeding[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China; [s. n.], 2006:5177-5182.

[7] SUN Hui, JIANG Ji-hai, WANG Xin. Parameters matching and control method for hydraulic hybrid vehicle with secondary regulation technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2009, 22 (1): 57-63.

[8] 孙辉,姜继海,王昕. 静液传动混合动力车辆再生制动策略研究[J]. 东北大学学报, 2008, 6(29): 248-252.