

干式双离合自动变速器升档综合控制与仿真分析^{*}

刘振军^{**} 张 宽

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:建立了干式双离合自动变速器(DCT)升档过程系统动力学模型。针对干式双离合器系统的非线性、难以建立精确数学模型等特点,设计了模糊控制器。分析了双离合升档控制过程;制定了干式双离合升档过程控制策略;通过综合控制发动机和离合器压力来完成换挡过程中的动力切换。基于 Matlab/Simulink 软件平台,建立了干式 DCT 传动系统的仿真模型,对升档过程进行了仿真分析;同时为了体现文中控制器的优越性进行了对比仿真。结果表明,该控制方法能满足 DCT 升档过程的要求,控制器的跟踪性能良好,且明显优于常规 PID 控制器。

关键词:双离合自动变速器;干式离合器;模糊控制;升档控制;综合控制

中图分类号:U463.211 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1006-6055.2013.02.021

Upshifting Integrated Control and Simulation of Dry Dual Clutch Transmission^{*}

LIU Zhenjun^{**} ZHANG Kuan

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract: The dynamic model of the upshift process of dry dual clutch transmission is constituted, aiming at attribute of nonlinear and difficult to establish math model of the dry dual clutch transmission(DCT). A fuzzy controller is designed. Dual-clutch upshift control process is analysed. Then the control scheme of upshift process is built. With the control scheme, the transfer of engine torque is completed through a combination of a manipulation of engine control and clutch pressure. Dynamic simulation model of dry DCT powertrain is implemented using the Matlab/Simulink software. The control scheme of upshift process is simulated based on this dynamic model. The simulation results show that the control scheme can meet the needs of upshift process of DCT, and the tracking performance of controller is good.

Key words: dual clutch transmission; dry clutch; fuzzy control; upshift control; integrated control

1 引言

双离合自动变速器(DCT)是一种新型的自动变速器,它将变速器档位按奇、偶数分别布置在与两个离合器所连接的两个输入轴上,通过离合器的交替切换完成换挡过程,实现了动力换挡。

DCT 包括机械系统和控制系统,机械系统除双离合模块外,同步器、齿轮副等和手动变速器类似。双离合是 DCT 的核心部件,分为干式和湿式两种结构型式。其中干式膜片弹簧离合器具有从动部分转动惯量小、结构简单、调整方便、分离彻底、转矩过载保护、效率高、成本相对较低、不需辅助动力等优点。是本文的研究对象。但同时,干式双离合在使用过程中也存在有待解决的问题。

双离合传递扭矩的精确控制是实现 DCT 自动变速汽车起步、换挡品质和自动变速系统动态响应特性的关键。其控制性能的好坏直接影响车辆的舒适性和燃油经济性。在 DCT 换挡控制研究方面, M. Goetz 等^[1]通过发动机控制和离合器压力操作的组合来实现对发动机速度进行闭环控制,进行了 DCT 换挡动力学及其控制的研究,证实了换挡时通过对输出转矩的控制可增加控制的鲁棒性并提供了直接操纵换挡品质的方法。Edgar Bothe 等^[2]和 Mark Buchanan 等^[3]提出了按照预定的发动机转速变化梯度控制离合器到离合器换挡过程中发动机的转速,同时配合离合器控制实现负载平滑过渡。金伦等^[4]将换挡过程分为低档、低档转矩相、惯性相、高档转矩相和高档五个阶段,对升降档的换挡特性进

行了仿真与试验分析。杨伟斌等^[5]分析了换挡过程中离合器的工作特性和离合器接合时刻及转矩变化对换挡品质的影响,对换挡过程动态性能进行了仿真。胡宏伟^[6]应用遗传算法对自动变速系统的换挡过程的双离合器结合控制参数的优化进行了研究。吴光强等^[7]利用线性二次型最优控制理论研究了离合器接合、分离规律,提出了三种改进的 DCT 换挡过程中分离离合器的作动方式,并进行了仿真。

由以上分析可知,在国外对 DCT 的换挡控制研究相对比较成熟,但是在国内对于这方面的研究尚处于初步阶段,且针对干式双离合器进行的研究相对较少。本文通过综合控制发动机节气门和离合器接合速度来实现干式 DCT 升档过程的综合控制。另外,针对 DCT 换挡过程中离合器的非线性、离合器磨损、难以建立精确的数学模型等特点,结合模糊逻辑控制技术,设计了模糊控制器^[8-10],来对升档过程进行控制。

2 DCT 传动系统模型

2.1 DCT 的换挡过程分析

双离合自动变速机构主要包括与离合器、换挡同步器相联接的换挡控制系统和电控系统及变速器^[11]。图 1 为双中间轴式双离合自动变速器的机械结构图。以 1 档升 2 档为例分析 DCT 的换挡过程。车辆在 1 档行驶时,离合器 C1 处于分离状态,不传递动力,由离合器 C2 传递动力。当车辆速度达到 2 档的换挡点时,TCU 控制 2 档同步器提前结合,开始进入换挡程序。离合器 C2 开始分离,同时离合器 C1 开始结合,两个离合器进行传递扭矩的切换,直至离合器 C2 完全分离,离合器 C1 完全结合时换挡过程结束。

2.2 DCT 换挡过程动力学模型

车辆动力传动系统是一个复杂的多质量、多自由度系

^{*} 国家自然科学基金(51075412)资助

E-mail: Liuzj@cqu.edu.cn; Tel: 023-65106506

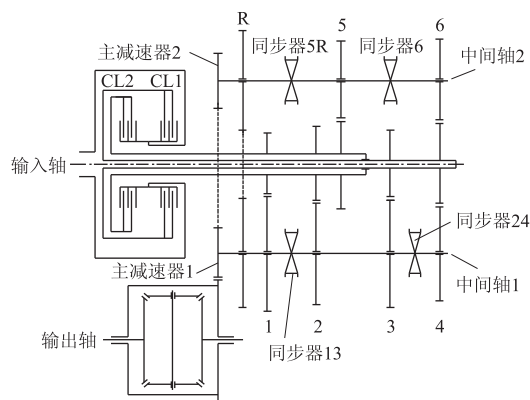


图1 双离合器自动变速器机械结构图

Figure 1 Mechanical structure of DCT

统,在建立其模型前需要对其进行简化。忽略系统的弹性和振动,将其简化为一个离散化的当量系统^[12],得到 DCT 系统动力学模型简图如图 2 所示。相邻两档位的换档过程包括换档前的稳定行驶阶段、换档过程中动态过渡阶段和换档完成后的稳定行驶阶段。

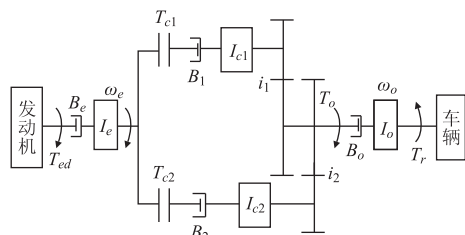


图2 DCT 换档过程动力学模型

Figure 2 Model of DCT shifting process

1)换档前,C1 完全结合,C2 完全分离,此阶段的动力学微分方程为:

$$I_e \dot{\omega}_e = T_{ed} - T_{C1} - B\omega_e \tag{1}$$
$$I_{eq} \dot{\omega}_o = i_1 T_{C1} - T_r/i_0 - B(1 + i_1^2)\omega_o \tag{2}$$
$$I_{eq} = i_1^2 I_{C1} + i_2^2 I_{C2} + I_o \tag{3}$$

其中, I_e 为发动机及离合器主动部分转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; I_o 为输出轴转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; I_{eq} 为变速器输出轴等效转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; I_{c1} 为离合器 C1 从动部分惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; I_{c2} 为离合器 C2 从动部分惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; i_1 为换档前变速器速比; i_2 为换档后变速器速比; i_0 为主减速器传动比; T_r 为车辆的阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; T_{ed} 为发动机动态输出转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; T_{c1} 为离合器 C1 传递转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; T_{c2} 为离合器 C2 传递转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; ω_e 、 ω_o 为发动机、变速器输出轴转速, rad/s ; B 为阻尼。

2)换档过程中动态过渡阶段,C1 逐渐分离,C2 逐渐结合,动力学微分方程为:

$$I_e \dot{\omega}_e = T_{ed} - T_{C1} - T_{C2} - B\omega_e \tag{4}$$
$$I_{eq} \dot{\omega}_o = i_1 T_{C1} + i_2 T_{C2} - T_r/i_0 - B(1 + i_1^2 + i_2^2)\omega_o \tag{5}$$
$$\frac{\omega_{c1}}{i_1} = \frac{\omega_{c2}}{i_2} = \omega_o \tag{6}$$

3)完成换档后,C1 完全分离,C2 完全结合,此阶段的动力学方程为:

$$I_e \dot{\omega}_e = T_{ed} - T_{C2} - B\omega_e \tag{7}$$

$$I_{eq} \dot{\omega}_o = i_1 T_{C2} - T_r/i_0 - B(1 + i_2^2)\omega_o \tag{8}$$

2.3 发动机模型

发动机模型采用有载动态模型

$$T_{ed} = T_e - \lambda \frac{d\omega_e}{dt} \tag{9}$$

其中, T_{ed} 为发动机动态输出转矩; T_e 为发动机稳态输出转矩; $d\omega_e/dt$ 为发动机曲轴角加速度; λ 为非稳态工况下发动机输出转矩下降系数,对不同发动机而言, λ 是不同的^[13]。发动机稳态转矩特性如图 3 所示。

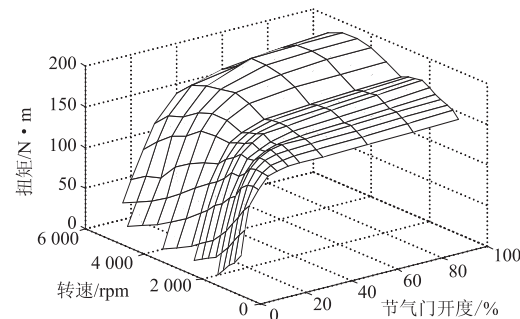


图3 发动机稳态转矩特性

Figure 3 Characteristic of engine static state output torque

2.4 离合器动态摩擦力矩模型

片式摩擦离合器是靠其主动盘和从动盘之间的摩擦来传递发动机扭矩的。因此,离合器传递扭矩的能力取决于其摩擦力矩的大小。离合器的最大摩擦力矩由摩擦面上的压紧力、摩擦力的作用半径、摩擦副材料以及摩擦片的工作面数等决定^[14]。

当离合器处于结合状态时,由系统动力学确定其所传递的转矩,同时其所具备的转矩传递能力为 T_L 。

$$T_L = \mu_s F_n ZR \tag{10}$$

其中, μ_s 为静摩擦因数; Z 为摩擦副数,干式离合器 $Z = 2$; R 是离合器等效半径, $R = 2(R_0^3 - R_1^3) / 3(R_0^2 - R_1^2)$, R_1 和 R_0 是离合器摩擦片的内外半径; F_n 是离合器执行机构对压盘的正压力,取决于离合器压紧力的大小。

静态摩擦力矩计算公式对设计离合器参数、保证离合器的后备功率、估算离合器的滑磨功等方面很有实用价值。但是,该模型不考虑动态摩擦系数,不考虑离合器传递力矩的过渡过程,用静态摩擦力矩代替动态摩擦力矩,与实际情况差异较大^[15],故在双离合器自动变速器控制过程中应用静态模型会影响自动离合器的控制精度。

当离合器处于滑摩状态时离合器的传递转矩表示为

$$T_C = \text{sgn}(\omega_e - \omega_c) Z\mu_{ds} F_n R \tag{11}$$

其中, μ_{ds} 为动摩擦因数; ω_e 为离合器的主动片的转速; ω_c 为离合器从动片的转速。

由于摩擦过程中主、从动盘间的相对滑动速度引起摩擦片表面层发热、变形、化学变化和磨损等等,会显著地影响动态摩擦系数。根据试验数据总结,有文献提出了滑动状态下摩擦副之间的狭义动态摩擦系数 μ_{ds} ,即只与摩擦面材料相关的动态摩擦系数 μ_{ds} :

$$\mu_{ds} = a - bu - ae^{-cu} \tag{12}$$

其中, $a \sim c$ 是由材料决定的常数,反映离合器本身固有传递

特性,与载荷无关^[16]。载荷的变化与输入力矩的变化趋势一致,由输入力矩的影响项来体现。

离合器由滑磨到完全接合过渡的动态过程中,动态摩擦力矩是渐变的过程,前期主要取决于正压力,随着转速差 $|\Delta\omega|$ 的减小,逐渐过渡到主要取决于离合器的输入扭矩。因此,在过渡过程中,离合器传递的力矩是正压力与离合器的输入扭矩共同作用的。由此,得出离合器的传递转矩为。

$$T_c = \begin{cases} 0 & F_n = 0 \\ \text{sgn}(\omega_e - \omega_c) Z \mu_{ds} F_n R + \lambda T_e & \Delta\omega \neq 0 \\ T_{cs} & \Delta\omega = 0 \& T_L \geq T_{cs} \\ T_L & \Delta\omega = 0 \& T_L < T_{cs} \end{cases} \quad (13)$$

其中, T_{cs} 为根据系统动力学确定传递的转矩; λT_e 是离合器输入力矩(即发动机的输出力矩)的影响项。

3 DCT 升档过程控制分析

DCT 换挡控制过程是其独特之处,它既与 AMT 的非动力性换挡不同,也和 AT 的动力性换挡有差异。DCT 换挡过程由选换挡操作和离合器操作两个阶段组成,其中,选换挡操作即同步器的操作,是在车速达到换挡点之前完成,而离合器操作则是在车速达到换挡点的时进行。同步器的操作发生在未传递动力的中间轴上,它对换挡过程的动力学特性影响很小。因此,DCT 换挡过程的控制重点在于两个离合器传递动力的切换过程。以 1 档换 2 档为例,整个过程分为三个阶段,如图 4 所示。

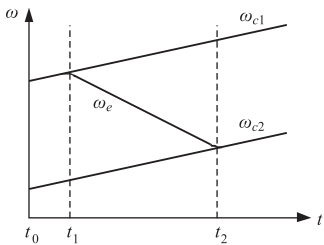


图 4 升档过程示意图

Figure 4 Sketch of upshift process

- 1)第一阶段, $t_0 < t < t_1$ 。本阶段离合器 C1 处于接合状态,要求在离合器 C1 开始进入滑磨状态之前,尽量把 C1 的压紧力 F_1 降为 0,因为当 C1 进入滑磨状态时,由图知 $\omega_e < \omega_{c1}$,若压紧力 F_1 不为 0,则它将产生阻力矩,造成功率的浪费,所以一定要避免这种现象的发生^[17]。此阶段油门要保持不变,调节好压紧力的变化率就可以获得很好的平顺性。
- 2)第二阶段, $t_1 < t < t_2$ 。此阶段 C2 进入了滑磨状态,而 C1 的压紧力已降为 0,这时 C2 所传递的扭矩主要由压紧力 F_2 决定而与发动机的扭矩关系不大,也就是说发动机扭矩的变化对 C2 扭矩影响可以忽略。为了加快换挡速度,在这个阶段应该控制发动机转速降低,文中采用减小节气门开度的方法来实现,C2 继续以某一速度加压。当 C2 两端的转速差小于某一值时,将节气门回复到原来的开度。
- 3)第三阶段, $t > t_2$ 。这时 C2 已经接合,所传递的扭矩与压紧力的关系不大,可以用最大速度将 C2 的压紧力增加到

工作压力,换挡过程结束。

4 升档过程控制及性能仿真

为实现快速同步,减小滑磨时间,延长离合器的寿命,减小冲击度,对离合器和发动机进行综合控制^[18]。

离合器的控制一般包含两个问题:一是离合器结合规律的制定,二是控制执行机构执行该接合规律。为了使执行机构(电机)获得良好的动态响应性能,能够更好的执行离合器的接合规律,文中采用模糊控制器作为电机的速度调节器^[19]。

图 5 为离合器执行机构控制系统结构简图。图中采用模糊控制器作为电机的速度调节器,它的输出信号作为电流调节器(PI 控制器)的给定信号,电流调节器的输出信号作为电机脉宽调制转速控制系统(PWM)的输入信号。

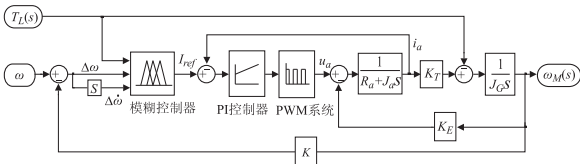


图 5 离合器执行机构控制系统结构简图

Figure 5 Structure diagram of clutch actuator control system

电机速度调节器采用模糊控制器,它将电机目标转速和实际转速偏差 $\Delta\omega$,转速偏差变化率 $\Delta\dot{\omega}$ 及折算到电动机转轴上的负载转矩 T_L 作为输入量,输出量为给定电流信号 I_{ref} 。各变量的语言集如下:

- $\Delta\omega$: {负(N)、零(Z)、正(P)};
- $\Delta\dot{\omega}$: {负大(NB)、负小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正大(PB)};
- T_L : {小(S)、中(M)、大(B)};
- I_{ref} : {负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)}。

模糊控制器控制规则集见表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy logic control rule of actuator controller

$\Delta\omega$	$\Delta\dot{\omega}$	T_L		
		S	M	B
N	NB	NB	NB	NB
	NS	NB	NB	NB
	Z	NB	NB	NB
	PS	NB	NB	NB
	PB	NB	NB	NB
Z	NB	PM	PM	PM
	NS	PS	PS	PM
	Z	Z	PS	PM
	PS	NS	NS	NM
	PB	NM	NM	NM
P	NB	PB	PB	PB
	NS	PB	PB	PB
	Z	PB	PB	PB
	PS	PB	PB	PB
	PB	PB	PB	PB

对 DCT 动力传动系统和离合器执行机构动态性能分析,以某型轿车为研究对象,在 Matlab/Simulink 平台上建立仿真模型,对文中所研究的双离合器自动变速器升档控制进行了仿真分析。

图 6 是 I 档升 II 档的仿真结果。在油门踏板位置为 20% 的情况下,车辆在 I 档运行,当车速达到一定时,档位控制器发出升档指令(此时选换挡执行机构已经完成预选档动作,即 II 档同步器已经结合),离合器执行机构在电子节气门的配合下进行切换,完成 I 档升 II 档的动作。

由于 I 档传动比大于 II 档,车辆在换挡过程中,转矩发生很大变化,给车辆造成较大的冲击,且冲击度有随换挡时间减小而增大的趋势。从图 d 可以看出,车辆冲击度不大于 10 m/s^3 。由图 a 虚线标注部分可以看出,发动机转速对目标转速有很好的跟踪能力,且整个换挡时间只有约 0.76 s。另外,在整个升档过程中因离合器 C1 开始滑摩时其压力已基本为零,所以 C1 的滑摩功很小。

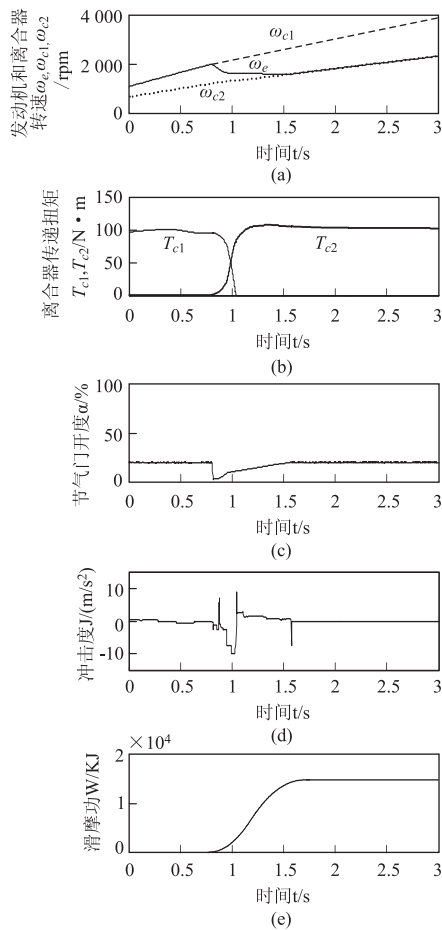


图 6 升档过程仿真结果
Figure 6 Simulation result of upshift process

在升档过程中发动机目标转速是从离合器 C1 的转速降到 C2 的转速。为了使发动机转速迅速降低,在离合器 C1 开始分离的时候,需要减小电子节气门开度,以降低发动机转速;同时接合离合器 C2,加快其转速降低的过程。在此过程中离合器 C1 快速分离,以避免产生扭矩循环,由图 b 可以看

出,离合器 C1 分离的速度要比 C2 接合速度快。

影响换挡时间和换挡平稳性的因素除发动机转速和转矩外,主要是离合器接合速度的快慢。当离合器的接合速度比较小时换挡比较平稳,输出转矩下降也比较少,但换挡时间会增加,滑摩功也会增加;相反,如果离合器接合速度过大,则会造成过大的冲击。

控制器的作用在于消除偏差,使得实际输出与目标值尽可能的接近,实现系统的控制目标。为了体现文中设计的模糊控制器的有效性和优越性,下面对控制器的控制效果进行了比较仿真,如图 7、8 所示。

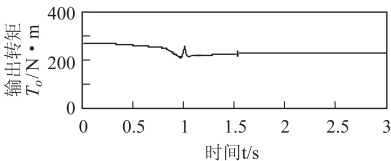


图 7 采用常规 PID 控制器时的输出转矩图
Figure 7 Output torque with PID controller

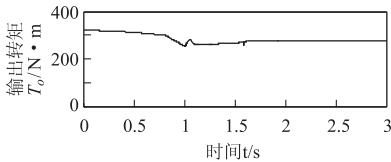


图 8 采用模糊控制器时的输出转矩图
Figure 8 Output torque with fuzzy controller

从仿真对比可以看出,采用常规 PID 控制器时,不但变速器输出转矩超调量大,且在离合器接合瞬间转矩变化较大。文中设计的模糊控制器明显优于常规 PID 控制器。

5 结论

1) 基于双离合器自动变速器的动力学方程,建立了 DCT 换挡过程动力学模型,针对 DCT 系统非线性、大滞后和难以建立精确动力学模型,且离合器参数常常变化的特点,设计了模糊控制器。制定了 DCT 换挡过程的控制策略,通过综合控制发动机节气门和离合器接合速度来完成升档过程离合器切换。

2) 基于 Matlab/Simulink 软件平台和对 DCT 升档过程进行分析,对升档过程进行了仿真研究。结果表明:文中设计的控制方法实现了干式双离合器升档过程中在满足换挡品质的要求下,能够对分离与接合速度进行精确控制,且控制器的跟踪性能良好。

3) 为了体现文中设计的模糊控制器的有效性和优越性,做了相应的对比仿真,结果表明:所设计的模糊控制器明显优于常规 PID 控制器。

参考文献

[1] GOETZ M, LEVESLEY M C, CROLLA D A. Dynamics and Control of Gearshifts on Twin-Clutch Transmission [J]. DRIVE SYSTEM TECHNIQUE, 2006, 20 (3): 37-48.
[2] EDGAR BOTHE P, UWE HINRICHSSEN B, AXEL SCHAMSCHA L. Method for controlling the shifting of an automated twin-clutch trans-

(下转第 254 页)

伤,这使起着还原活化作用和提高血清 SOD 活性;具有抗氧化作用;血清 MDA 含量降低^[7]。本实验结果可见,D-半乳糖处理的动物,学习记忆能力明显下降,抗氧化能力降低,糖基化产物增多,处于高氧化应激状态,并伴有脑内 Ach 含量降低和 Ach-E 活力增加的现象,说明 D-半乳糖诱致的学习记忆障碍与高氧化应激反应和脑内胆碱能活动降低有关。荔枝核提取物具有抗氧化应激作用^[4],我们在前文已经报道了其提高抗氧化能力的作用。本实验结果可见,荔枝核提取物明显缩短模型动物的定向航行潜伏期及增加穿越站台次数,表明具有改善智障动物的学习和记忆状态。同时,明显抑制体内糖基化产物的生成,抑制脑内 NOS 的活性,减少 NO 的生成,减少此类氧化应激物质对脑神经细胞的损伤。

综上所述,我们应用血清药理学方法在动物体内证实了荔枝核提取物对 D-半乳糖诱致动物的学习记忆损伤有一定的保护作用,并且初步判定荔枝核提取物是通阻断 D-半乳糖诱致动物的学习记忆损伤;其作用主要与减少体内糖基化反应和减少脑内氧化应激损伤有关。

参考文献

- [1] BIESELS G J, VANDER H L P, KAMAL A, et al. Ageing and diabetes: implications of brain function [J]. *European Journal of Pharmacology*, 2002, 441 (1-2): 1-14.
- [2] PLASCHKE K. Aspects of ageing in chronic cerebral oligoemia. Mechanisms of degeneration and compensation in rat models [J]. *Neural Transm*, 2005, 112 (3): 393-413.
- [3]. DEI R, TAKEDA A, NIWA H, et al. Lipid peroxidation and advanced glycation end products in the brain in normal aging and in Alzheimer's disease [J]. *Acta Neuropathol (Berl)*, 2002, 104 (2): 113-22.
- [4] 潘竞锵, 刘惠纯, 刘广南, 等. 荔枝核降血糖、调血脂和抗氧化的实验研究 [J]. *广东药学*, 1999, 9 (1): 47-50.
- [5] 罗焕敏, 姚志彬, 陈以慈, 当归芍药散改良方对老年性痴呆鼠空间学习记忆力的影响 [J]. *中国老年学杂志*, 1995, 25 (5): 283-5.
- [6] REBAI O, DJEBLI N E, Chronic Exposure to Aluminum Chloride in Mice Exploratory Behaviors and Spatial Learning [J]. *Advances in Biological Research* 2008, 2 (1-2): 26-33.
- [7] 肖柳英, 潘竞锵, 饶卫农, 等. 荔枝核颗粒对小鼠肝损伤保护作用的实验研究 [J]. *中华中医药杂志 (原中国中医药学报)*, 2005, 20 (1): 42.
- [8] 张熠, 顾振纶, 蒋小岗. 夏天无总碱提取物对痴呆大鼠脑内 5-HT 和 DA 含量的影响 [J]. *苏州大学学报 (医学版)*, 2004, 24 (2): 136-138.
- [9] 潘竞锵, 谭海荣, 李博萍, 等. 中药对 D-半乳糖诱导病理模型作用的研究进展 [J]. *广东药学*, 2001, 11 (5): 1-5.
- [10] 潘玲, 冯全生, 八味丸方药对代谢综合症患者治疗效应的临床观察 [J]. *四川生理科学杂志*, 2005, 27 (2): 78-82.
- [11] HO S C, LIU J H, WU R Y. Establishment of the mimetic aging effect in mice caused by galactose [J]. *Biogerontology*, 2003, 4: 15-18.
- [12] Li W B, WEI F, FAN M, et al. Mimetic brain aging effect induced by D-galactose in mice [J]. *Zhongguo Yiyao Gongye Zazhi. Toxicol*, 1995a, 9: 93-95.
- [13] DOMINGUES L J, BARBAGALLO M, JACOB S J, et al. Bisoprolol and captopril effects on insulin receptor tyrosine kinase activity in essential hypertension [J]. *American Journal of Hypertens*, 1997, 10 (1): 1 349-1 355.
- (上接第 237 页)
- mission; US, 7048672 [P/OL]. 2006-05-23. [http://www. engineeringvillage. com/controller/servlet/Controller? SEARCHID = d1e7c212f5d82fe6bM562eprod2data2&CID = quickSearchDetailedFormat & DOCINDEX = 1 & database = 49157 & format = quickSearchDetailedFormat](http://www.engineeringvillage.com/controller/servlet/Controller?SEARCHID=d1e7c212f5d82fe6bM562eprod2data2&CID=quickSearchDetailedFormat&DOCINDEX=1&database=49157&format=quickSearchDetailedFormat).
- [3] BUCHANAN MARK, LEMON RUSSELL, KOENIG MELISSA. Method of controlling a dual clutch transmission; US, 6819997 [P/OL]. [http://www. engineeringvillage. com/controller/servlet/Controller? SEARCHID = 13e15f712f5dc05ed4M57ddprod2data1 & CID = quickSearchDetailedFormat & DOCINDEX = 1 & database = 49157 & format = quickSearchDetailedFormat](http://www. engineeringvillage. com/controller/servlet/Controller?SEARCHID=13e15f712f5dc05ed4M57ddprod2data1&CID=quickSearchDetailedFormat&DOCINDEX=1&database=49157&format=quickSearchDetailedFormat).
- [4] 金伦, 程秀生, 孙俐, 等. 双离合自动变速器仿真研究 [J]. *汽车技术*, 2005 (8): 4-7.
- [5] 杨伟斌, 吴光强, 秦大同. 双离合式自动变速器传动系统的建模及换挡特性 [J]. *机械工程学报*, 2007, 43 (7): 118-194.
- [6] 胡宏伟. 湿式自动离合器结合过程特性的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [7] 吴光强, 张德明. 基于最优控制理论的 DCT 离合器升档作动方式的研究 [J]. *汽车工程*, 2009, 31 (31): 258-261.
- [8] 李焕松. 关于汽车动力传动系统自动操纵系统的研究 [D]. 长春: 吉林工业大学, 1994.
- [9] 窦振中. 模糊逻辑控制技术及其应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.
- [10] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [11] 牛铭奎, 葛安林, 等. 双离合式自动变速器简介 [J]. *汽车工艺与材料*, 2002 (12): 36-38.
- [12] 邵忍平. 机械系统动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [13] POWELL B K, COOK J A. Nonlinear Low Frequency Phenomenological Engine Modeling and Analysis. Proc [J]. ACC, 1987: 332-340.
- [14] 徐石安, 肖德炳, 刘惟信. 离合器 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1981.
- [15] 王玉海, 宋健, 李兴坤. 离合器动态过程建模与仿真 [J]. *公路交通科技*, 2004, 21 (10): 121-125.
- [16] 温诗铸. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [17] 葛威. DCT 换挡过程的动力学分析与仿真研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [18] GOETZ M, LEVESLEY M C, CROLLA D A. Dynamics and control of gearshifts on twin-clutch transmissions [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D (Journal of Automobile Engineering)*, 2005, 219 (D8): 951-963.
- [19] 叶明, 秦大同, 刘振军. 直流伺服电机驱动的自动离合器控制 [J]. *机械设计与研究*, 2003, 19 (2): 35-37.