

文章编号: 1002-0268 (2004) 01-0106-04

汽车湿式离合器模糊控制

高 蔚¹, 郭立书², 张 泰³, 宋咸斌², 韩 旭², 范洪亮²

(1. 上海工程技术大学, 上海 200336; 2. 装甲兵技术学院, 吉林 长春 130117;
3. 青岛建筑工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 提出一种新的控制湿式离合器传递转矩的方法。通过建立湿式离合器的数学模型并利用该模型控制蓄压器活塞的移动速度来控制油缸压力, 进而控制离合器的传递转矩。同时借助模糊控制器设计, 利用模糊控制系统实现离合器平稳结合或分离的目的。台架试验及仿真表明该方法可以使离合器油缸的压力以任意速率升高或下降。

关键词: 湿式离合器; 传递转矩; 模糊控制; 台架试验

中图分类号: U463.211 **文献标识码:** A

Automobile Wet Clutch Fuzzy Control

GAO wei¹, GUO Li-shu², ZHANG Tai³, SONG Xian-bin², HAN Xu², FAN Hong-liang²

(1. Shanghai University of Engineering Technology, Shanghai 200336, China;
2. PLA Technology Academy of Armored Forces, Jilin Changchun 130117, China;
3. Qingdao Institute of Architecture and Engineering, Shandong Qingdao 266033, China)

Abstract: A new method of controlling wet clutch to transmit torque is put forward in this paper. Through establishing mathematic models of the wet clutch and use of the models to control the moving speed of the pressure reservoir piston, the cylinder pressure of clutch is further controlled. Meanwhile by use of the design of the fuzzy controller, the stable engagement and disengagement of clutch are realized. The rig test and computer simulation results show that the clutch cylinder pressure may go up and down at any speed by the control system.

Key words: Wet clutch; Fuzzy control; Transmit torque; Rig test

0 前言

目前汽车所用的离合器均为干式膜片离合器, 膜片弹簧的非线性特性给汽车离合器的高精度自动控制带来很大困难^[1], 并且换挡时动力中断, 不能实现动力换挡。湿式离合器具有传递转矩大, 可通过增加摩擦片数来提高摩擦转矩的特点, 易于实现离合器平稳结合或分离, 因此, 将逐渐应用于机械自动变速器 (AMT)。本文利用模糊控制的方法, 对湿式离合器的传递转矩加以控制, 为 AMT 实现动力换挡打下基础。

1 湿式离合器数学模型的建立

1.1 湿式离合器的工作过程

湿式离合器液压系统的组成如图 1 所示。工作过程可以分为离合器的结合和离合器的分离。本文主要

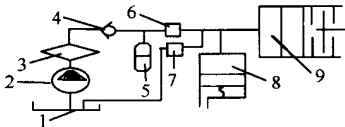


图 1 湿式离合器液压系统

1. 油箱; 2. 油泵; 3. 滤清器; 4. 单向阀; 5. 蓄能器;
6. 结合电磁阀; 7. 分离电磁阀; 8. 蓄压器; 9. 离合器油缸

研究湿式离合器的结合过程,离合器的分离过程与结合相反。离合器的结合过程分为3个阶段。

(1) 结合电磁阀6打开,分离电磁阀7关闭,液压油充满整个管路。此时离合器活塞9在回位弹簧作用下保持在原始位置,离合器处于分离状态。

(2) 结合电磁阀6按一定占空比打开,随着电磁阀打开时间的增加,液压油逐渐充满离合器油缸,油压克服活塞回位弹簧的压力和活塞的移动阻力,活塞向摩擦片方向移动,离合器主、被动摩擦片间隔逐渐消失,离合器仍然不传递摩擦转矩。

(3) 结合电磁阀按模糊控制方法求得的占空比打开,油压克服蓄压器回位弹簧的压力和活塞的移动阻力,蓄压器活塞以某一速度匀速移动,同时油压均匀升高,当离合器主、被动摩擦片转速相等时,结合电磁阀完全打开。此阶段离合器传递的摩擦转矩随着油压均匀提高而均匀提高。当离合器主、被动摩擦片转速相等时,离合器的结合控制过程完毕。

1.2 湿式离合器数学模型的建立^[3]

为了确保液压系统的平稳工作,液压系统必须满足要求

$$\frac{k_1 (\Delta x_1 + l)}{A_1} = \frac{k_2 \Delta x_2}{A_2} \quad (1)$$

式中, k_1 为离合器活塞回位弹簧弹性系数; Δx_1 为离合器活塞回位弹簧初始压缩量; l 为离合器摩擦片总间隙; A_1 为离合器活塞有效工作面积; k_2 为蓄压器活塞回位弹簧弹性系数; Δx_2 为蓄压器活塞回位弹簧初始压缩量; A_2 为蓄压器活塞有效工作面积。

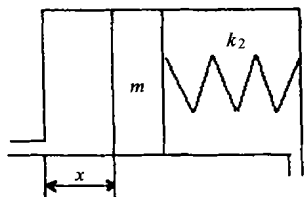


图2 蓄压器结构模型

蓄压器结构如图2所示。若忽略结合电磁阀出口与蓄压器入口之间液压油对液压系统的影响,以及蓄压器活塞与缸壁之间所受阻力为粘性阻力,则有

$$m\ddot{x} = P_h A_2 - k_2 (\Delta x_2 + x) - c\dot{x} \quad (2)$$

式中, m 为蓄压器活塞及附件质量; P_h 为蓄压器活塞所受压力; x 为蓄压器活塞位移; $\dot{x}$ 为蓄压器活塞速度; $\ddot{x}$ 为蓄压器活塞加速度; c 为粘性阻尼系数。

$$m_d \ddot{x} = (P - P_h) A_2 \quad (3)$$

式中, m_d 为蓄压器内液压油质量; P 为离合器油缸(液压管路)压力。

$$m_d = \rho A_2 x \quad (4)$$

式中, ρ 为液压油密度。

由式(2)、(3)和(4)得

$$(m + \rho A_2 x) \ddot{x} = P A_2 - k_2 (\Delta x_2 + x) - c\dot{x} \quad (5)$$

某一时刻通过结合电磁阀的液压油流量等于流入蓄压器的液压油流量,则有

$$C_q k A \sqrt{\frac{2(P_y - P)}{\rho}} = A_2 \dot{x} \quad (6)$$

式中, C_q 为电磁阀流量系数; k 为电磁阀占空比; A 为电磁阀口工作面积; P_y 为油泵输出压力。

离合器摩擦片的压紧力为

$$F = P A_1 - k_1 (\Delta x_1 + l) \quad (7)$$

离合器摩擦片的摩擦转矩为

$$T = \mu F r_{eg} z \quad (8)$$

式中, μ 为摩擦因数; r_{eg} 为摩擦片等效半径; z 为摩擦副数。

$$r_{eg} = \frac{2(R^3 - r^3)}{3(R^2 - r^2)} \quad (9)$$

式中, R 为摩擦片外半径; r 为摩擦片内半径。

作为客观评估汽车起步或换挡过程平顺性的指标,经常使用的冲击度 j 。

$$j = \frac{r_d i_0 i_g}{I_w} \frac{dT}{dt} \quad (10)$$

式中, r_d 为驱动轮半径; i_0 为主减速器传动比; i_g 为变速器传动比; I_w 为驱动轮当量转动惯量。

起步或换挡时,由(10)式不难看出,对某种车辆,冲击度只与变速器传动比和离合器摩擦片的摩擦转矩变化率成正比。又由式(7)、(8)和(9)得,冲击度与离合器油缸压力变化率成正比,因此,要想在起步或换挡过程中把冲击度控制在一定范围内,只要把离合器油缸压力变化率控制在一定范围内即可。

由式(5)得离合器油缸压力变化率

$$\frac{dP}{dt} = \frac{(m + \rho A_2 x) \ddot{x} + \rho A_2 \dot{x} \ddot{x} + c\dot{x} + k_2 x}{A_2} \quad (11)$$

若使(11)式 $\frac{dP}{dt} = \text{定值}$, 则有 $x = \frac{A_2}{k_2} \frac{dP}{dt} = \text{定值}$, 此时 $\dot{x} = \ddot{x} = 0$, 由(5)和(6)式得

$$\frac{\rho}{2} \left(\frac{A_2 \dot{x}}{C_q k A} \right)^2 = P_y - \frac{k_2 (\Delta x_2 + x) + c\dot{x}}{A_2} \quad (12)$$

式(12)中,当变速器传动比和冲击度确定时, x 也已确定,那么根据 x 值就可以确定电磁阀占空比 k ,从而控制离合器油缸压力。

2 模糊控制器设计

模糊控制器由模糊化、模糊推理和解模糊3部分

组成，图 3 为离合器的结合速度模糊控制系统。

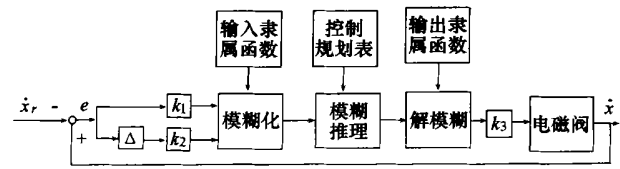


图 3 离合器结合速度模糊控制系统

2 1 模糊化

由变速器传动比和冲击度确定结合速度 3cm/s , $e = x - x_r$, $e \in [-0.3, 0.3]$; $\Delta e = e_{t-1} - e_t$, $\Delta e \in [-0.1, 0.1]$; 由 (12) 式求出对应的 k 值 (记做 k_r), $u \in [0.9k_r, 1.1k_r]$, 将 e 、 Δe 和 u 分别变换到离散论域 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 、 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 和 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 上。表 1、表 2 和表 3 分别定义 e 、 Δe 和 u 的隶属函数表, 其中 P 、 Z 、 N 、 L 、 M 和 S 分别表示正、零、负、大、中和小。

E_i 隶属函数表		表 1													
隶属度		e 的论域													
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	1	2	3	4	5	6
模糊集合	$E_1(\text{PL})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0
	$E_2(\text{PM})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
	$E_3(\text{PS})$	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.7	1.0	0.7	0.1	0	0
	$E_4(\text{PZ})$	0	0	0	0	0	0	0.1	1.0	0.7	0.1	0	0	0	0
	$E_5(\text{NZ})$	0	0	0	0	0	0.7	1.0	0.1	0	0	0	0	0	0
	$E_6(\text{NS})$	0	0	0.1	0.7	1.0	0.7	0.1	0	0	0	0	0	0	0
	$E_7(\text{NM})$	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$E_8(\text{NL})$	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ΔE_i 隶属函数表		表 2													
隶属度		e 的论域													
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
模糊集合	$\Delta E_1(\text{PL})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	
	$\Delta E_2(\text{PM})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.8	0.2	
	$\Delta E_3(\text{PS})$	0	0	0	0	0	0	0	0.8	1.0	0.7	0.2	0	0	
	$\Delta E_4(\text{Z})$	0	0	0	0	0.2	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	
	$\Delta E_5(\text{NS})$	0	0	0.2	0.8	1.0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	
	$\Delta E_6(\text{NM})$	0.2	0.8	1.0	0.8	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$\Delta E_7(\text{NL})$	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

u_i 隶属函数表		表 3													
隶属度		u 的论域													
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
模糊集合	$U_1(\text{PL})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	
	$U_2(\text{PM})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.8	1.0	0.8	0.2	
	$U_3(\text{PS})$	0	0	0	0	0	0	0.1	0.8	1.0	0.8	0.1	0	0	
	$U_4(\text{Z})$	0	0	0	0	0.2	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	
	$U_5(\text{NS})$	0	0	0.2	0.8	1.0	0.8	0.1	0	0	0	0	0	0	
	$U_6(\text{NM})$	0.2	0.8	1.0	0.8	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$U_7(\text{NL})$	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

2 2 模糊推理

表 4 为根据经验确定的模糊控制规则表。

模糊控制规则表		表 4							
u		e							
		NL	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PL
Δe	PL	PL	PM	NM	NM	NM	NL	×	×
	PM	PL	PM	NM	NM	NM	NS	NS	×
	PS	PL	PM	NS	NS	NS	NS	NM	NL
	Z	PL	PM	PS	Z	Z	NS	NM	NL
	NS	PL	PM	PS	PS	PS	PS	NM	NL
	NM	×	PL	PS	PS	PM	PM	NM	NL
	NL	×	×	PL	PM	PM	PM	NM	NL

2 3 模糊判决

模糊控制规则集可以表示为一个模糊关系矩阵 R :

$$R = \bigcup_{i,j,k} (E_i \times \Delta E_j) \times U_k \tag{13}$$

$$U = (E \times \Delta E) \circ R \tag{14}$$

表 5 为根据 (13)、(14) 式确定的模糊控制查询表, 根据查询结果对电磁阀占空比 k 加以修正, 控制离合器油缸压力变化率, 进而控制离合器的摩擦转矩, 实现离合器平稳结合的目的。

模糊控制查询表		表 5															
u		e															
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6		
Δe	-6	6	5	6	5	3	3	3	3	2	1	0	0	0	0		
	-5	5	5	5	5	3	3	3	3	2	1	0	0	0	0		
	-4	6	5	6	5	3	3	3	3	2	1	0	0	0	0		
	-3	5	5	5	5	4	4	4	4	2	0	-1	-1	-1	-1		
	-2	6	5	6	5	3	3	1	1	0	0	-2	-3	-3	-3		
	-1	6	5	6	5	3	3	1	0	0	-2	-5	-3	-3	-3		
	0	6	5	6	5	3	1	0	0	-1	-3	-5	-6	-5	-6		
	1	0	3	3	2	0	0	0	-1	-3	-3	-5	-6	-5	-6		
	2	0	3	3	1	0	0	-1	-1	-3	-3	-5	-6	-5	-6		
	3	0	1	1	0	0	0	-1	-1	-2	-2	-5	-5	-5	-5		
	4	0	0	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-3	-5	-6	-5	-6		
	5	0	0	0	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-5	-5	-5	-5		
	6	0	0	0	-1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-5	-6	-6	-6		

3 试验结果

为了验证湿式离合器液压控制系统的有效性, 进行了离合器结合油压升高控制的仿真和实际应用试验, 当根据冲击度确定的蓄压器活塞速度为 30mm/s 时, 电磁阀占空比变化如图 4 所示, 随着时间或位移的增加电磁阀占空比不断提高。离合器油缸压力变化如图 5 所示, 图中实线表示实测油缸油压随着时间或位移的增加而线性地增加的情况; 图中虚线表示仿真模型输出值随着时间或位移的增加而线性地增加的情况, 二者非常吻合。这表明离合器的数学模型准确, 控制方法适当。(下转第 113 页)

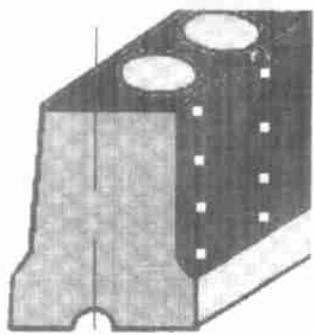


图 6 FMS 测点贴片布置

根据磁带记录器记录的机体应变响应，通过计算机数据处理程序，可以得到测点的主应力和主方向等。

表 1 为机械应力本文理论结果、试验结果与文献 [6] 有限元解的对比值与相对误差。

结果对比分析				表 1	
序号	本文解	文献 [6] 有限元解	实验结果	相对误差 ×100%	相对误差 ×100%
1	264.65	248.45	281.62	10.1	4.3
2	349.87	357.89	351.20	2.4	1.6
3	452.49	426.90	479.07	8.2	2.4
4	583.94	544.82	589.63	5.9	1.2
5	679.70	656.39	695.26	2.8	3.2
6	730.53	766.73	757.52	3.9	2.5
7	842.60	867.88	850.56	2.7	1.9
8	923.67	974.06	934.82	10.5	1.4
9	1035.73	1082.32	1054.52	1.8	1.7

从表 1 中可以看出，相对误差均小于 17.3%，理论值与计算值的变化趋势是相同的，对于机体这样的复杂结构来说，说明分层理论计算值是可靠的。

4 结论

建立了 FMS 发动机机体的分层精化理论模型，采用半解析广义双重傅立叶级数方法^[7]对复杂复合结构

进行计算，其精度较高，结算准确，特别是对自然边界条件和本构方程的解算。在计算过程中，我们发现分层有饱和值，对于本结构来说 12 层理论饱和值，分层值超过饱和值，计算量增大，而计算精度和实际效率并没有实际提高。并且针对不同的具体结构，FMS 分层饱和值也不同。

FMS 发动机机体最大应力值低于该机体的抗拉强度，亦即用 FMS 制造车辆用发动机机体是可行的。机体的应力值较低，有强度裕量，可进一步减轻机体质量的潜力。横向剪切变形产生的附加挠度，不但取决于跨厚比，而且还与刚度比成比例；在进行结构的应力、变形、稳定和振动等问题的分析计算时，考虑横向剪切的影响比各向同性板具有更为重要的意义。应用于工程实际中，可采用对横向剪切应变或剪切应力沿板厚度方向的分布形式作出假定，由此对剪切刚度进行近似估算。

参考文献:

[1] 张志民. 复合材料结构力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993: 427—448

[2] 李永, 宋健, 张志民. 梯度功能力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 80—86

[3] Burais N, Foggia A, Nicolas A, Pascal JP, Sabonnadiere JC. Numerical Solution of Eddy Current Problems Including Moving Conducting Parts [J]. IEEE Trans on Magnetics 1984, 20 (5): 1995

[4] Muramatsu K, Nakata T, Takahashi N, Fujiwara K. Comparison of Coordinate Systems for Eddy Current Analysis in Moving Conductors [J]. IEEE Trans on Magnetics 1992, 28 (2): 1186

[5] Hardy MSA, Cebon D. An Investigation of Anti-lock Braking Strategies for Heavy Goods Vehicles [J]. Proc Instn Mech Engrs 1995, 209: 263

[6] Weng G J. A Theory of Particle-reinforced Plasticity [J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1988, 55 (3): 126—135

[7] 李永, 宋健, 张志民. 梯度功能材料结构的广义当量反对称弯曲理论 [J], 中国科学 (E 辑), 2002, 32 (4): 433—441

(上接第 108 页)

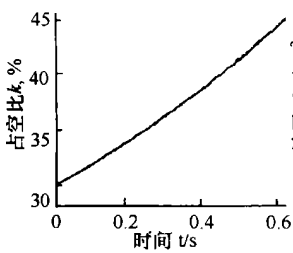


图 4 电磁阀占空比变化过程

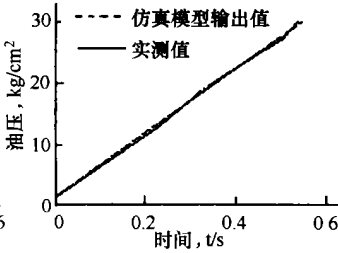


图 5 离合器油缸压力变化过程

4 结论

本文对湿式离合器的工作过程加以分析，并且建立了湿式离合器的数学模型，利用模糊控制的方法，对湿式离合器的传递转矩加以控制。试验表明离合器的数学模型准确，控制方法适当，为 AMT 实现动力换挡打下技术基础。

参考文献:

[1] 习纲. 膜片弹簧离合器的非线性控制 [J]. 机械工程学报, 2000 (9).

[2] 张俊智. 机械式自动变速器离合器控制规律的研究 [J]. 机械工程学报, 1999 (6).