

# 离合起步用高速开关阀工作特性 与驱动方法研究

夏晶晶<sup>1,2</sup>

1. 东南大学, 南京, 211189      2. 淮阴工学院, 淮安, 223001

**摘要:**在普通脉宽调制(PWM)信号驱动下,高速开关电磁阀的开启和关闭时间较长,反应慢,影响了高速开关电磁阀的控制性能。为了进一步提高高速开关阀的控制性能,在分析高速开关阀工作特性的基础上,提出了多路混合驱动方法,缩短了高速开关阀的开启和关闭时间,减小了压力控制时的压力波动,改善了高速开关阀的控制性能。在汽车离合器起步控制中,使用该方法很好地改善了汽车的起步性能,发动机转速比较平稳,从动盘转速增加趋势的波动较小。

**关键词:**汽车工程;多路混合驱动;工作特性;高速开关阀;离合起步

**中图分类号:**U463.211

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2012.16.026

## Research on Operating Characteristics and Driving Method of High-speed On-off Valve in Clutch Starting

Xia Jingjing<sup>1,2</sup>

1. Southeast University, Nanjing, 211189

2. Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu, 223001

**Abstract:**In general pulse width modulation (PWM) signal driven, the high-speed on-off solenoid valve opening and closing time are longer, slower reaction, which affected the high-speed on-off solenoid valve control performance. In order to improve the control performance of the high-speed valve, on the basis of the analyses in the operating characteristics of high-speed on-off valve, a multi-hybrid driving method was designed to shorten the opening and closing time, reduce the pressure fluctuations in pressure control to improve the control performance of the valve. In vehicle clutch control, the use of the above method can improve the starting performance, and the engine speed is relatively stable, the driven plate speed increasing trend fluctuation is smaller.

**Key words:**automotive engineering; multi-hybrid driving; operating characteristics; high-speed on-off valve; clutch start

## 0 引言

汽车离合器起步控制不仅需要提高起步过程离合器接合的平顺性,减小冲击,而且要减少离合器滑摩,延长离合器使用寿命,同时要保证发动机稳定运转,减少汽车起步时的废气排放和噪声污染,提高起步的灵敏性。汽车起步的平稳性和离合器滑摩是两个矛盾的指标,如何使这两个指标都能达到令人满意的效果是起步性能控制的关键<sup>[1-2]</sup>。在离合器接合液压控制系统中采用高速开关阀调节离合器的接合正压力,重复精度高、可靠性高,且价格低、抗污染。但是在普通脉宽调制(PWM)信号驱动下,高速开关电磁阀的开启和关闭时间较长,反应慢,影响了高速开关电磁阀的控制性能,因此,本文提出了多路混合驱动方法。

## 1 高速开关阀的工作特性

高速开关阀采用脉冲流量控制方式。阀直接根据一系列脉冲电信号进行开关动作,然后在出口输出一系列的脉冲流,这一系列脉冲流的时间平均被视为控制流量。流体脉冲的形成和调节方法有多种,最常见的是脉宽调制式方法,它是一种利用高分辨率计数器对模拟信号电平进行数字编码的技术,是对模拟电路进行数字控制的一种非常有效的方法。

高速开关阀的工作特性包括静态特性和动态特性两个方面(图1、图2)。静态特性又包括:①空载流量特性,即输出的平均流量与输入信号的脉宽调制率的关系曲线;②负载流量特性,即输出平均流量与负载压力的关系曲线。通常情况下,阀的动态性能是以其频率特性和阶跃特性来衡量的,但是由于脉宽调制型开关阀的频率特性随脉冲调制频率、占空比的不同而变化,故这种方法对

收稿日期:2012-03-20

基金项目:江苏省基础研究计划(自然科学基金)资助项目(BK2011405);江苏省“六大人才高峰”项目(2011-ZBZZ-018)

它而言并不适用。高速开关阀的最小开启和闭合时间能够真正反映其动态性能<sup>[3-6]</sup>。

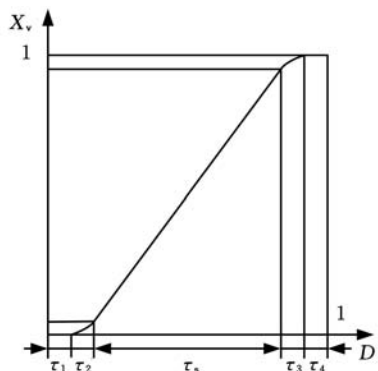


图1 高速开关阀静态特性

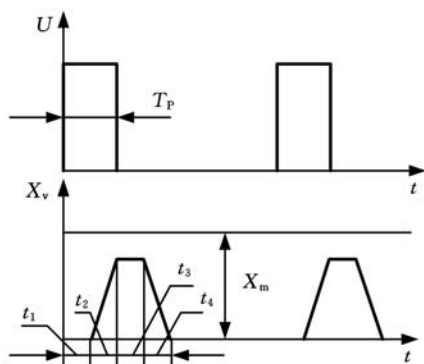


图2 高速开关阀动态特性

高速开关阀阀门全开时工作口的压力—流量方程为

$$q_v = C_d \omega x_m \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_s - p_L)} \quad (1)$$

式中,  $q_v$  为高速开关阀阀门全开时的流量;  $C_d$  为阀的流量特性系数;  $\omega$  为开关阀的面积梯度;  $x_m$  为阀芯最大开口量;  $\rho$  为液压油的质量密度;  $p_s$  为油源压力;  $p_L$  为出口压力。

在一个载波周期内, 不考虑高速开关阀开启和闭合所需时间, 高速开关阀的平均流量为

$$\bar{q}_v = q_v \frac{T_p}{T} = DC_d \omega x_m \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_s - p_L)} \quad (2)$$

式中,  $\bar{q}_v$  为高速开关阀的平均流量;  $T_p$  为脉宽调制的导通时间;  $T$  为脉宽调制的周期;  $D$  为占空比。

对于一个理想的开关阀, 在一个调制周期  $T$  内, 电压波形与阀芯的位移是完全相同的。但受电磁铁响应能力及阀芯运动时间的影响, 实际上阀芯的响应不可能适时地跟随脉宽信号的变化, 而是有一定的时滞, 并且其响应特性还会受到脉冲调制周期(频率)及调制率变化的影响。此时应利用平均开启量来计算通过开关阀的平均流量, 即

$$\bar{q}_v = C_d \omega x_m \bar{X}_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_s - p_L)} \quad (3)$$

$$\bar{X}_v = \frac{\bar{X}_v}{x_m}$$

式中,  $\bar{X}_v$  为阀芯平均位移比;  $\bar{X}_v$  为平均开启量。

平均位移比可以用下式求出:

$$\bar{X}_v = \begin{cases} 0 & 0 \leq D \leq \tau_1 \\ \frac{1}{2\tau_2} (1 + \frac{\tau_1}{\tau_2}) (D - \tau_1)^2 + \frac{\tau_3}{\tau_2} (D - \tau_1) & \tau_1 \leq D \leq \tau_{on} \\ D + \frac{1}{2} (\tau_4 - \tau_2) + (\tau_3 - \tau_1) & \tau_{on} \leq D \leq 1 - \tau_{off} \\ 1 - \frac{1}{2\tau_4} (1 + \frac{\tau_2}{\tau_4}) (1 - \tau_3 - D)^2 - \frac{\tau_1}{\tau_4} (1 - \tau_3 - D) & 1 - \tau_{off} \leq D \leq 1 - \tau_4 \\ 1 & 1 - \tau_4 \leq D \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$t_{on} = t_1 + t_2 \quad t_{off} = t_3 + t_4$$

$$\tau_i = \frac{t_i}{T} \quad i = 1, 2, 3, 4, on, off$$

式中,  $t_{on}$  为高速开关阀开启时间;  $t_1$  为高速开关阀开始开启的滞后时间;  $t_2$  为高速开关阀开启的阀芯运动时间;  $t_{off}$  为高速开关阀关闭时间;  $t_3$  为高速开关阀开始关闭的滞后时间;  $t_4$  为高速开关阀关闭的阀芯运动时间。

根据阀口受控容腔中液压油的压缩效应, 可得阀口流量连续性方程:

$$q_v = q_L + \frac{V}{E} \frac{dp_L}{dt} + C_L p_L \quad (5)$$

式中,  $q_L$  为流向工作装置的流量;  $V$  为高速开关阀出口受控油腔的容积;  $E$  为油液的体积弹性模量;  $C_L$  为泄漏系数。

由牛顿运动定律可得高速开关阀阀芯的动力学平衡方程:

$$f_g - p_{p2} A_p = m_1 \frac{d^2 x_v}{dt^2} + B \frac{dx_v}{dt} + K_{pv} x_v \quad (6)$$

式中,  $f_g$  为电磁力;  $p_{p2}$  为高速开关阀的稳态输出压力;  $A_p$  为阀芯上液力作用面积;  $m_1$  为阀芯质量;  $B$  为阀芯的黏性阻尼系数;  $K_{pv}$  为稳态液动力弹簧刚度。

高速开关阀要完全开启, 则脉冲宽度  $T_p$  至少要持续  $t_{on}$  时间; 要完全关闭, 负脉冲宽度至少要持续  $t_{off}$  时间。因此, 要实现完全的开启关闭响应, 脉冲周期至少应为  $T_c = t_{on} + t_{off}$ 。当周期小于  $T_c$  时, 即当调制频率  $f_1 \leq 1/T_c$  时, 开关阀将无法作出完全响应。定义临界频率为

$$f_c = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} \quad (7)$$

它是表征开关阀动态特性的主要参数, 是高速开关阀能够得到完全响应的最高频率。通常开关阀的工作频率远小于临界频率, 这样可以扩大 PWM 控制的线性区范围, 使被控制量的脉动量降低, 提高液压系统的控制性能。

## 2 多路混合驱动方法

从上述数学模型分析可以看出,在普通脉宽调制信号驱动下,高速开关电磁阀的开启和关闭时间长,反应慢,影响了高速开关电磁阀的控制性能,而且会造成保证响应需要的低频脉宽调制信号和保证系统压力稳定需要的高频脉宽调制信号之间的矛盾<sup>[7]</sup>。

比例电磁铁控制线圈的电压—电流方程为

$$u_o = L \frac{di}{dt} + (R_c + r_p)i + K_b \frac{dx_v}{dt} \quad (8)$$

式中, $u_o$ 为放大器的输出电压; $L$ 为电磁线圈的电感; $i$ 为电磁线圈的电流变化; $R_c$ 为电磁线圈的内阻; $r_p$ 为放大器内阻; $K_b$ 为电磁线圈感应反电动势系数。

比例电磁铁控制电流与电磁力的关系可以表示为

$$f_g = \frac{\mu_0 A}{2l^2} (iN)^2 \quad (9)$$

式中, $\mu_0$ 为真空磁导率; $A$ 为气隙部位垂直于磁力线的面积; $l$ 为气隙长度; $N$ 为线圈匝数。

由式(6)、式(8)、式(9)可以看出,为了缩短高速开关阀的开启和关闭时间,提高高速开关阀的控制性能,电感不能太大,只能通过快速提升线圈电流来获得大的电磁力。但是,阀线圈电流增大后,一方面会造成铁芯深度饱和、线圈温升过高、能耗过大,另一方面,开关阀关断时也会因为大电流的作用而使得关闭时间延长。

为改善高速开关阀的控制性能以及开关特性,本研究在通常的脉宽调制信号的基础上使用了多路混合驱动技术,在需要高速开关阀开启的时刻,施加约1.5~2倍于额定工作电压的加速电压,线圈中的电流以极高的速率增大,使高速开关电磁阀迅速开启,开启电流愈大,其开启时间愈短,开启重复精度愈高,对负载的变化愈不敏感;高速开关电磁阀开启动作基本完成后切换为0.7~0.9倍于额定值的电压,以较小的功耗维持高速开关电磁阀的开启状态,维持电流愈小,其关闭时间愈短。同时在稳定的维持电压基础上叠加幅值为高速开关电磁阀额定工作电压的5%~15%、频率为电磁铁芯无阻尼自然频率1.2~2倍的、波形可以为正弦波或三角波等的颤振信号。在高速开关电磁阀的稳定信号的基础上叠加颤振信号可以使阀芯产生颤振运动,使阀芯与阀套之间的静摩擦力转化成动摩擦力,进一步提高高速开关电磁阀开闭的灵敏度;而且阀芯经常做小幅度的颤振,可以清除阀芯与阀套之间的间隙中堆积起来的杂质,降低高速开关电磁阀发生卡涩的

概率。本文中使用的多路混合驱动方法如图3所示。

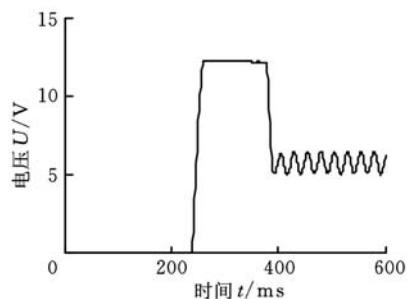
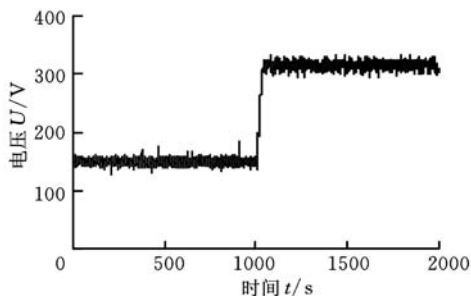
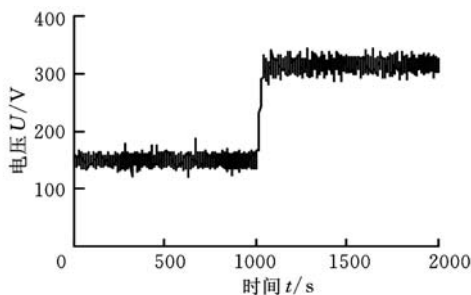


图3 多路混合驱动方法示意图

在高速开关阀进行压力控制时,将多路混合驱动方法(信号频率50Hz)与常规PWM驱动方法(信号频率为30Hz)进行比较,图4a、图4b分别表示使用常规PWM驱动方法与多路混合驱动方法,占空比为0.2和0.4时的控制压力波动情况;图5a、图5b分别表示使用常规PWM驱动方法与多路混合驱动方法,控制压力随驱动PWM信号的占空比变化情况。



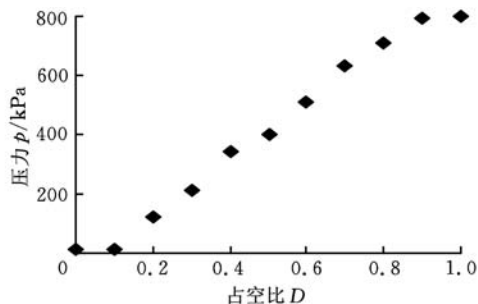
(a) 常规 PWM 驱动方法



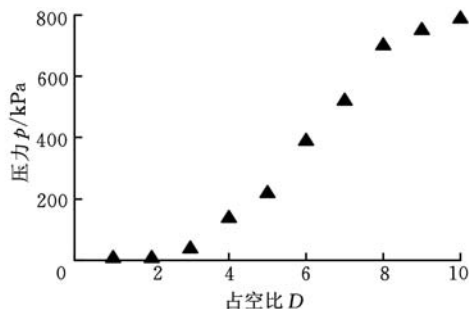
(b) 多路混合驱动方法

图4 控制压力波动情况

通过分析实验数据,从图4可以看出,在高速开关阀进行压力控制时,由于使用多路混合驱动方法缩短了阀门开启和关闭时间,使得信号频率得以提高,常规PWM驱动方法压力波动最大为49kPa,压力从150kPa上升到315kPa需要6.8ms;多路混合驱动方法压力波动最大为28kPa,压力从150kPa升到315kPa需要5.2ms,减小了液压控制时的压力波动,提高了压力的调节速度。从图5可以看出,多路混合驱动方法提



(a)常规 PWM 驱动方法



(b)多路混合驱动方法

图 5 控制压力随占空比变化情况

高了控制压力与驱动 PWM 信号的占空比之间关系的线性度,改善了系统的控制性能。

### 3 汽车离合器的起步控制

本文提出的多路混合驱动方法已经在一款装有无级变速器汽车的湿式自动离合器控制中得到应用,具体情况如下:在离合器起步控制过程中,以驾驶员的起步意图(油门开度以及开度变化率)确定高速开关电磁阀的驱动 PWM 信号的占空比变化率的基本值,同时考虑发动机恒速控制的原则,根据油门开度确定发动机目标转速,通过发动机目标转速和实际转速的差值实时修正控制信号<sup>[8-9]</sup>,如图 6 所示。

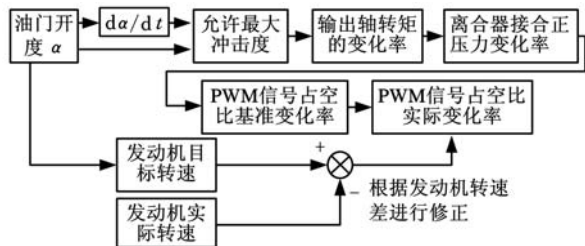


图 6 离合起步控制策略框图

首先根据驾驶员的起步意图(油门开度以及开度变化率)模糊控制得出与油门开度以及开度变化率相对应的驾驶员愿意承受的最大冲击度  $j_{max}$ ,以便在冲击度的约束范围内以较快速度接合,滑磨时间短,滑磨功小<sup>[1,10]</sup>。

然后运用冲击度近似计算公式,推算出速度增长阶段相对应的最大离合器传递转矩变化率。

汽车的冲击度用加速度的变化率来表示,即

$$j = \frac{d^2 v_a}{dt^2} \approx \frac{r i_0 i_{cvt}}{I_r} \frac{dT_c}{dt} \quad (10)$$

式中,  $v_a$  为车速;  $T_c$  为离合器传递转矩;  $r$  为驱动轮滚动半径;  $i_0$  为变速器输出轴至驱动轮的传动比;  $i_{cvt}$  为无级变速器的传动比;  $I_r$  为与变速器输出轴刚性连接的整车惯量转换至输出轴的当量惯量。

离合器传递转矩变化率与离合器的接合正压力变化率有直接关系,即

$$\frac{dT_c}{dt} = \mu r_{eg} z \frac{dF}{dt} \quad (11)$$

式中,  $\mu$  为摩擦因数;  $F$  为离合器摩擦片的压紧力;  $z$  为摩擦片数;  $r_{eg}$  为摩擦片等效半径。

通过调节高速开关电磁阀的驱动 PWM 信号的占空比变化率,可实现离合器摩擦片的压紧力  $F$  的变化率在合理的范围内,即

$$\frac{dF}{dt} = A_2 \frac{dp}{dt} = k_1 A_2 \frac{dD}{dt} \quad (12)$$

式中,  $k_1$  为油压与占空比之间的比例系数,由实验得出;  $p$  为离合器油缸中油液压力。

在离合器起步控制中,分别使用多路混合驱动方法与常规 PWM 驱动方法来驱动高速开关阀,进行实车实验,实验数据如图 7 所示。

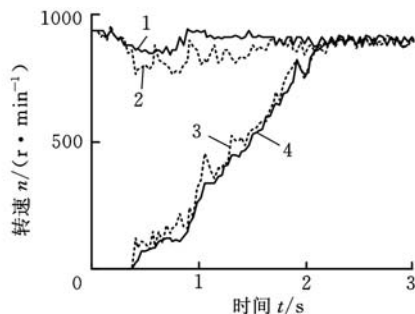


图 7 离合起步控制情况

图 7 中,曲线 1 表示使用多路混合驱动方法时发动机转速变化情况,曲线 2 表示使用常规 PWM 驱动方法时发动机转速变化情况,曲线 3 表示使用常规 PWM 驱动方法时离合器从动部分转速变化情况,曲线 4 表示使用多路混合驱动方法时离合器从动部分转速变化情况。从图 7 可以看出,以 20Hz 频率进行实验数据采样,使用常规 PWM 驱动方法,发动机转速最大波动为 86r/min,离合器从动部分转速最大波动为 120r/min;而使用多路混合驱动方法,发动机转速最大波动为 52r/min,离合器从动部分转速最大波动为 94r/min。实验结果可以说明,使用多路混合驱动方法提高了汽车离合起步的控制性能,发动机转速更加平稳;从动盘转速增大趋势的波动较小,汽车起步更加柔和。

## 4 结束语

对于高速开关阀的控制,本文在通常的脉宽调制信号的基础上使用多路混合驱动方法,缩短了阀门的开启和关闭时间,解决了保证响应需要的脉宽调制信号低频需求和保证系统压力稳定需要的脉宽调制信号高频需求之间的矛盾,改善了高速开关阀的控制性能。在汽车离合器起步控制中,对高速开关阀使用多路混合驱动方法提高了汽车的起步性能。

## 参考文献:

- [1] 曹桂军,葛安林,郑磊. 电控机械式自动变速器换挡过程中离合器的接合控制[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 234-238.
- [2] 李永军,陈树星,崔勇. 机械式自动变速器起步过程综合控制[J]. 汽车工程, 2003, 25(2): 178-181.
- [3] 石延平,刘成文,张永忠. 一种大流量高速开关阀的研究与设计[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 195-198.
- [4] 岑顺锋,吴张永,王娟,等. 基于高速开关阀的数字式变量泵研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(6): 671-

675.

- [5] 向忠,陶国良,谢建蔚,等. 气动高速开关阀动态压力特性仿真与试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(5): 845-860.
- [6] 何谦. 基于高速开关阀的液压同步控制系统设计与研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2008.
- [7] 贺娟,袁颂岳. 基于 DSP 的高速开关阀控液缸位置控制系统研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(24): 2929-2931.
- [8] Luigi G, Francesco V. Optimal Control of Dry Clutch Engagement[J]. SAE Paper 2000-01-0837.
- [9] Pettersson M, Nielson L. Gear Shifting by Engine Control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(3): 495-507.
- [10] 夏晶晶,何仁,张涌,等. 基于分段控制的 CVT 湿式离合器起步控制策略[J]. 公路交通科技, 2008, 25(12): 180-183.

(编辑 陈 勇)

作者简介:夏晶晶,男,1974 年生。东南大学机械工程学院博士后研究人员,淮阴工学院交通工程学院副教授。主要研究方向为汽车机电一体化。发表论文 20 余篇。

## 《中国机械工程》第四届编委会

(同项之内按姓氏笔划排序)

荣誉委员:朱森第 何光远 宋天虎 李培根 陆燕荪 周 济 谢友柏 路甬祥 潘际銮  
 主 任:柳百成  
 副 主 任:卢秉恒 刘 飞 朱 荻 张彦敏 郭东明 谭建荣  
 委 员:丁 汉 马世宁 孔祥东 王 雪 王 煜 王立鼎 王庆丰 王成勇 王时龙  
 王国彪 王益群 邓宗全 冯培恩 包起帆 卢秉恒 史铁林 宁汝新 刘 飞  
 刘 强 华 林 孙守迁 孙林岩 朱 荻 祁国宁 齐二石 张义民 张定华  
 张宪民 张彦敏 李 杰 李大勇 李元元 李圣怡 李光耀 杨 合 杨华勇  
 杨叔子 汪劲松 邵新宇 陆 辛 陈 新 陈万诚 陈子辰 陈文哲 陈学东  
 陈定方 陈超志 周仲荣 周佑启 周祖德 孟永钢 易 红 林忠钦 苑世剑  
 范大鹏 郑 力 姚振强 姜澄宇 柳百成 段吉安 胡正寰 赵 继 赵 韩  
 赵国群 钟 掘 钟志华 倪 军 唐晓青 宾鸿赞 徐西鹏 涂善东 秦大同  
 聂 宏 袁巨龙 贾振元 郭万林 郭孔辉 郭东明 曹秉刚 黄 田 温熙森  
 董仕节 雷源忠 熊有伦 谭建荣