

基于 GMA 的液压高速开关阀特性分析

任小勇^{1 2}

(1. 酒泉职业技术学院 甘肃省太阳能发电系统工程重点实验室,甘肃 酒泉 735000;

2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院,兰州 730050)

摘要: 设计了基于 GMA 的液压高速开关阀,针对所设计的高速开关阀进行了静动态特性研究,建立其数学模型,通过数字仿真表明新型高速开关阀的开关时间为 1.7 ms 和 1.9 ms,空载流量达 20 l/min 以上,并且分析了各参数对高速开关阀的性能影响,得出等效质量越大,阀芯开启上升时间越快,阀芯位移波动现象越严重;黏性阻尼越大,阀芯开启时间越慢,但阀芯位移波动越小;线圈参数对高速开关阀的开关时间影响很大,相同电阻时线圈时间常数越小,则阀芯开关时间越短,反之则越慢。

关键词: 高速开关阀; GMA; PWM

中图分类号: TH47 文献标志码: A 文章编号: 1000-0682(2015)05-0068-06

The performance of hydraulic high-speed on-off valve based on GMA

REN Xiaoyong^{1 2}

(1. Key Laboratory of Solar Power System Engineering of Gansu Province, Jiuquan Vocational and Technical College, Gansu Jiuquan 735000, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: This paper designs the hydraulic high-speed switching valve based on GMA. This paper conducts study on the static and dynamic characteristics of the designed high-speed on-off valve, develops mathematical model. The switching time of the new-type high-speed on-off valve is 1.7 ms and 1.9 ms through digital simulation, no-load flow is above 20 l/min, and analyzes parameters influence on the performance of high-speed on-off valve. It concludes that greater equivalent mass makes the valve core open faster, the valve core displacement has obvious fluctuation. Greater viscous damping makes the valve core open slower, but the valve core displacement has no obvious fluctuation. Coil parameters have great influence on the switching time of the high-speed on-off valve. Under the same resistance, smaller time constant makes the valve core switches a shorter time, larger time constant makes the valve core switches a longer time.

Key words: high-speed on-off valve; GMA; PWM

0 引言

随着电液数字技术的广泛应用,工程领域对高速开关阀提出了新的要求。目前所研制出的高速开关阀的流量和响应速度都难以很好地满足工程需求,而高速开关阀的性能又直接影响到电液数字系统的性能,所以高速开关阀的研究正日益受到国内

外学者的重视。高速开关阀的特性评价包括静态特性和动态特性,静态特性的评价又包括空载流量特性和负载压力特性两个方面,对于一般阀的动态特性常采用阶跃响应特性来评价,但由于高速开关阀采用脉冲宽度调制(Pulse-Width Modulation, PWM)控制,其响应特性随 PWM 信号频率的改变而改变,所以,阀芯开关速度更能反映高速开关阀的实际工作性能,一般也将开关速度做为评价高速开关阀性能的最主要指标。目前所研制的高速开关阀流量普遍偏小,一般小于 20 l/min,且响应速度也比较慢。同时由于高速开关阀的静动态性能直接影响到其组成的电液数字系统的性能,所以对高速开关阀

收稿日期: 2015-01-09

基金项目: 甘肃省科技计划资助项目(1309RTSF043); 甘肃省科技创新平台专项资助项目(144JTCF256)

作者简介: 任小勇(1982),男,甘肃张掖人,硕士,研究方向为电液伺服控制技术、现代控制策略、风力发电机组控制策略。

的静动态性能进行详细分析是十分重要的,还可以找出影响阀性能的主要参数,可以对其进行优化,这对高速开关阀的设计有重要意义。

1 高速开关阀的结构

大流量和高响应的矛盾一直是液压阀设计中的难点,在传统液压阀的结构中要实现大流量势必要增加阀芯通径和行程,这样又会使响应时间变慢。为了使高速开关阀达到以上性能指标,采用超磁致伸缩致动器(Giant Magnetostrictive Actuator, GMA)代替传统比例电磁铁结构来实现电-机械转换,可得到更高的响应速度和输出力,但由于超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material, GMM)的特性输出位移很小,从而限制了阀的流量。所以在设计 GMA 的同时需设计一种新型阀芯结构,以实现大流量高响应。在阀芯结构方面,球阀结构具有密封好、动作灵敏的优点,但同时它的流量较小,阀芯两边压力难以平衡;滑阀结构具有流量大、液动力易补偿等优点,但滑阀结构密封差;而锥阀结构具有密封好、流量大等优点,但液动力较难补偿。由于 GMA 最大的优点就是响应快,输出力大(可达 800 N 以上),为了充分发挥 GMA 的优点,该阀阀芯结构采用锥阀式结构,阀口液动力不予补偿,主要用液动力提供阀芯复位力以提高阀的关闭速度,这样既能发挥 GMA 输出力大的优点,也能使阀具有良好的密封性能,结构如图 1 所示。

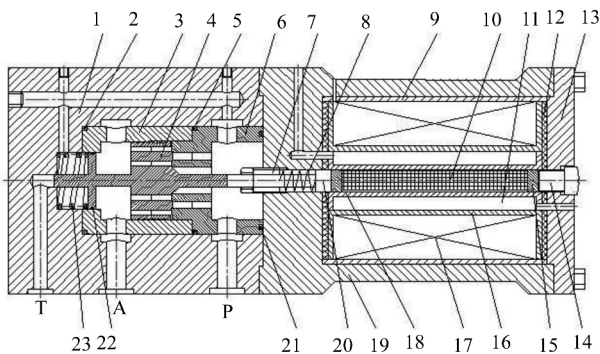


图 1 基于 GMA 的高速开关阀结构示意图

2 PWM 信号下的阀芯运动分析

基于 GMA 的高速开关阀是用 PWM 信号进行控制的,所以 GMA 的激励为直流电,而一般所设计的 GMA 是用交流电驱动,通过增加一个直流线圈产生偏置磁场而消除倍频现象,将 GMA 用于液压高速开关阀采用 PWM 控制则不会产生倍频现象,这样既能减小 GMA 的体积,也能减小因线圈发热

而造成的 GMA 热变形。在采用 PWM 信号调制时,理想的阀芯运动情况应该是和 PWM 波形一致,但由于激励线圈有电流滞后且阀芯开关有运动时间,实际的阀芯位移波形不可能和 PWM 波形一致,必然存在滞后现象。同时,随着 PWM 信号脉宽占空比的变化,阀芯的具体运动情况也是不一样的。

图 2 所示为阀芯对脉宽调制信号做出完全响应时的阀芯位移波形图, x_m 为阀芯完全打开时的位移。通常阀的开关过程用开启时间 t_{on} 和关闭时间 t_{off} 来描述, t_{on} 表示从通电到阀芯全部打开所需时间,其中包括了电流延迟时间和阀芯开启运动时间; t_{off} 表示从断电到阀芯关闭所需的时间,其中包括了阀芯关闭运动时间和电流衰减延迟时间。

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

其中: t_1 为电流增长延迟时间, t_2 为阀芯开启运动时间, t_3 为电流衰减延迟时间, t_4 为阀芯关闭运动时间。

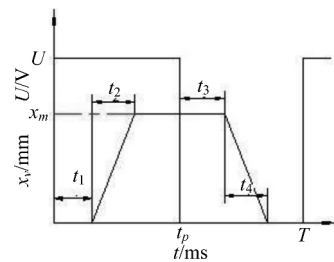


图 2 阀芯位移波形

由图 2 阀芯位移波形和 PWM 信号波形可以看到,阀芯位移波形是脉冲宽度 t_p 的函数(周期 T 不变),由此可得阀芯运动方程为:

- 1) $t_p < t_1$
此时阀芯无位移 $x_v = 0$ (1)
- 2) $t_1 < t_p < t_2$

图 3 虚线所示部分为 $t_1 < t_p < t_2$ 时的阀芯位移波形图,可见阀口没有完全打开,电流增长滞后时间 t_1 和电流衰减滞后时间 t_3 大小并没有变,由于阀口没有完全打开,所以阀芯关闭运动时间变短,在图中用 t_5 表示。

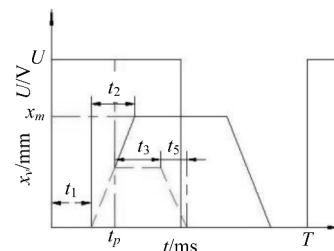


图 3 $t_1 < t_p < t_2$ 时的阀芯位移波形

则此时的阀芯运动方程为:

$$x_v = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{x_m}{t_2}(t - t_1) & t_1 < t \leq t_p \\ \frac{x_m}{t_2}(t_p - t_1) & t_p < t \leq t_p + t_3 \\ \frac{-x_m}{t_2}(t_p - t_1) \frac{t_p + t_3 + t_5 - t}{t_5} & t_p + t_3 < t \leq t_p + t_3 + t_5 \\ 0 & t_p + t_3 + t_5 < t \leq T \end{cases}$$

$$x_v = \begin{cases} \frac{x_m}{t_4}(T - t_p - t_3) & 0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{x_m}{t_4}(T - t_p - t_3) + \frac{x_m}{t_2}(t - t_1) & t_1 < t \leq t_1 + t_5 \\ x_m & t_1 + t_5 < t \leq t_p + t_3 \\ \frac{x_m}{t_4}(t - t_p - t_3) & t_p + t_3 < t \leq T \end{cases}$$

(4)

3) $t_{on} \leq t_p \leq T - t_{off}$

图 4 虚线所示部分为 $t_{on} \leq t_p \leq T - t_{off}$ 时的阀芯位移波形图, 此时阀口完全打开, 图中虚线部分为此时的阀芯位移波形图。

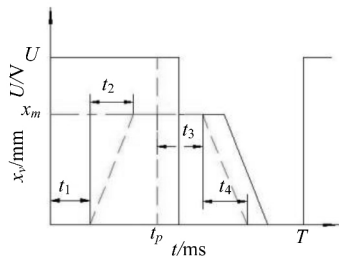


图 4 $t_{on} \leq t_p \leq T - t_{off}$ 时的阀芯位移波形

阀芯运动方程为:

$$x_v = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{x_m}{t_2}(t - t_1) & t_1 < t \leq t_{on} \\ x_m & t_{on} < t \leq t_p + t_3 \\ \frac{-x_m}{t_4}(t_p + t_{off} - t) & t_p + t_3 < t \leq t_p + t_{off} \\ 0 & t_p + t_{off} < t \leq T \end{cases}$$

(3)

4) $T - t_{off} < t_p \leq T$

图 5 虚线所示为 $T - t_{off} < t_p \leq T$ 时的阀芯位移波形图, 此时阀芯不能完全关闭, 从第 2 个周期开始阀芯打开运动时间将小于 t_2 。

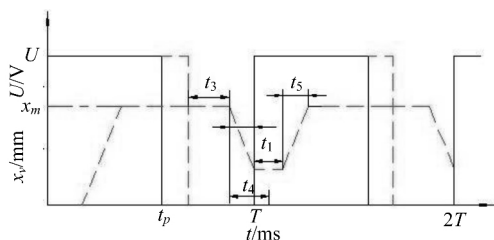


图 5 $T - t_{off} < t_p \leq T$ 时的阀芯位移波形

此时阀芯运动方程为:

该文设计的基于 GMA 的高速开关阀的瞬时流量可表示为:

$$q = \begin{cases} 0 & t = 0 \\ C_d \pi (d_1 + d_2 + d_3) x_v \sin a [1 - \frac{x}{2(d_1 + d_2 + d_3)} \sin 2a] \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} & t_1 < t < t_p + t_3 + t_4 \\ 0 & t_p + t_3 + t_4 \leq t < T \end{cases}$$

(5)

定义:

$$\bar{x}_v = \frac{1}{T} \int_0^T x_v dt$$

(6)

则在一个载波周期内的平均流量为:

$$\bar{q} = C_d \pi (d_1 + d_2 + d_3) \bar{x}_v \sin a [1 - \frac{x}{2(d_1 + d_2 + d_3)} \sin 2a] \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

(7)

由式 (1) ~ 式 (4) 可得出 \bar{x}_v 的表达式为:

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

(8)

其中: $\tau = \frac{t_p}{T}$, $\tau_1 = \frac{t_1}{T}$, $\tau_2 = \frac{t_2}{T}$, $\tau_3 = \frac{t_3}{T}$,

$\tau_4 = \frac{t_4}{T}$, $\tau_{on} = \frac{t_{on}}{T}$, $\tau_{off} = \frac{t_{off}}{T}$

3 高速开关阀特性分析

GMA 由磁场驱动, 它的性能受受力状态和驱动磁场的影响, 磁致伸缩棒的运动特性可用下面式子描述:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_H} + d_{33}H \quad (9)$$

$$B = d_{33}\sigma + \mu_\sigma H \quad (10)$$

式中: ε 为 GMM 棒应变, E_H 为材料在恒定磁场强度下的杨氏模量, d_{33} 为 GMM 棒动态磁致伸缩系数, μ_σ 为恒定应力下的磁导率。

根据克希荷夫定律, 线圈电压方程为:

$$U(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (11)$$

在动态工作时, GMA 位移变化和输出力主要受磁场影响, 磁致伸缩力与磁通相关, 满足下式:

$$F(t) = \Phi_{rod}(t) \frac{1}{d_{33}} \quad (12)$$

磁通方程为:

$$\Phi_{rod}(t) = \frac{Ni(t) + \frac{x(t)}{d_{33}}}{R_m} \quad (13)$$

式中: N 为线圈匝数, x 为 GMA 输出位移, R_m 为磁路磁阻。

$$R_m = \frac{l_{gmm} + 2l_{dc}}{\mu_{gmm}A}$$

其中: l_{dc} 为导磁块长度, μ_{gmm} 为 GMM 棒磁导率。

阀芯力平衡方程为:

$$F(t) - \frac{E_H A}{l} x(t) - (k_1 + k_2) x(t) - C_d \pi (d_1 + d_2 + d_3) x(t) \Delta p \sin 2a - B_f \frac{dx(t)}{dt} - F_1 = m_e \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \quad (14)$$

式(14) 从左边开始第 1 项为 GMA 输出力, 第 2 项为 GMM 棒材料弹性回复力, 第 3 项为复位弹簧和预压弹簧力, 第 4 项为阀口液动力, 第 5 项为阻尼力, 第 6 项为复位弹簧力。

其中: A 为 GMM 棒横截面积, l 为 GMM 棒长度, k_1 为复位弹簧刚度, k_2 为预压弹簧刚度, B_f 为黏性阻尼系数, m_e 为等效质量。

GMM 棒为单端固定, 则等效质量可用下式计算:

$$m_e = \frac{1}{2} m_{gmm} + m_1 + m_2$$

其中: m_{gmm} 为 GMM 棒质量, m_1 为顶杆质量, m_2 为阀

芯质量。

阀芯流量方程为:

$$q(t) = C_d \pi (d_1 + d_2 + d_3) x(t) \sin a \left[1 - \frac{x(t)}{2(d_1 + d_2 + d_3)} \sin 2a \right] \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (15)$$

以上方程完全描述了 GMA 高速开关阀的运动特性, 对式(11) ~ 式(15) 进行拉氏变换, 可得以下方程组:

$$\begin{cases} U(s) = (R + Ls) I(s) \\ F(s) = \Phi_{rod}(s) \frac{1}{d_{33}} \\ \Phi_{rod}(s) = \frac{NI(s) + \frac{X(s)}{d_{33}}}{R_m} \\ F(s) = [m_e s^2 + B_f s + C_d \pi (d_1 + d_2 + d_3) \Delta p \sin 2a + (k_1 + k_2) + \frac{E_H A}{l}] X(s) \\ Q(s) = C_d \pi (d_1 + d_2 + d_3) \sin a \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} X(s) \end{cases} \quad (16)$$

由于阀芯位移与流道直径尺寸相差 3 个数量级, 流量公式在拉氏变换时忽略 $\frac{x(t)}{2(d_1 + d_2 + d_3)}$ 项, 认为其值为 0。

由式(12) 可导出传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{N}{R_m d_{33} (Ls + R) (m_e s^2 + B_f s + C)} \quad (17)$$

$$G_2(s) = \frac{Q(s)}{U(s)} = \frac{NC_d \pi (d_1 + d_2 + d_3) \sin a \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}}{R_m d_{33} (Ls + R) (m_e s^2 + B_f s + C)} \quad (18)$$

其中:

$$C = C_d \pi (d_1 + d_2 + d_3) \Delta p \sin 2a + (k_1 + k_2) + \frac{E_H A}{l} -$$

$$\frac{1}{R_m d_{33}^2}$$

仿真模型如图 6 所示。

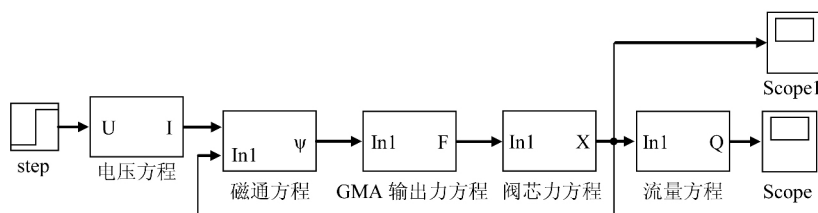


图 6 高速开关阀仿真模型

4 仿真结果分析

由阀芯位移开环传递函数做出 Bode 图如图 7 所示,可以看到系统稳定。仿真参数见表 1。

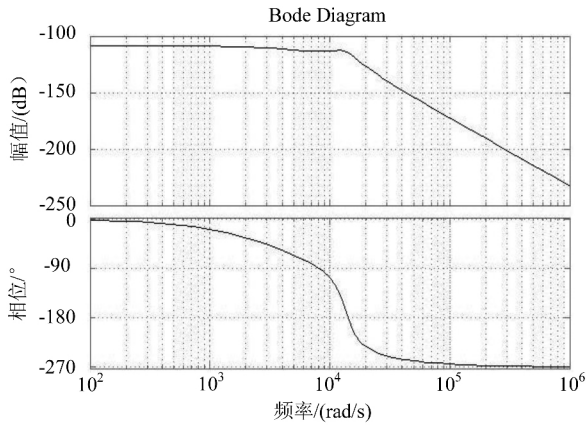


图 7 阀芯位移对数幅频特性曲线

表 1 仿真参数

参数	值
GMM 棒长度 l/mm	75
GMM 棒直径 d/mm	8
线圈电阻 R/Ω	12.13
线圈电感 L/mH	3.54
线圈匝数/匝	1200
磁路磁阻 R_m/H^{-1}	1.3×10^8
压磁系数 $d_{33}/m \cdot A^{-1}$	8×10^{-7}
GMM 棒质量 m_{gmm}/kg	0.035
顶杆质量 m_1/kg	0.045
阀芯质量 m_2/kg	0.065
黏性阻尼系数 $B_f/Ns \cdot m^{-1}$	680
阀芯通流直径 d_1/mm	5.5
阀芯通流直径 d_2/mm	8.5
阀芯通流直径 d_3/mm	11.5
阀芯半锥角 α	45°
磁致伸缩杨氏模量 $E_H/N \cdot m^{-2}$	3×10^{10}
复位弹簧刚度 $k_1/N \cdot mm^{-1}$	25
预压弹簧刚度 $k_2/N \cdot mm^{-1}$	20
磁致伸缩材料密度 $\rho/g \cdot mm^{-3}$	9.25
导磁块长度 l_{dc}/mm	4
GMM 棒磁导率 $\mu_{gmm}/H \cdot m^{-1}$	$4\pi \times 10^{-6}$

图 8 为输入 PWM 信号时的阀芯位移波形图, 阀芯开启时间约 1.7 ms, 阀芯关闭时间约 1.9 ms。

则高速开关阀的临界频率:

$$f_c = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = 278 \text{ Hz}$$

图 9 为不同脉宽占空比时的阀芯位移波形图, 可以看到当 $\tau = 10\%$ 时阀芯还没有完全打开便开始

关闭, 当 $\tau = 50\%$ 时阀芯可完全打开, 当 $\tau = 90\%$ 时阀芯不能完全关闭。

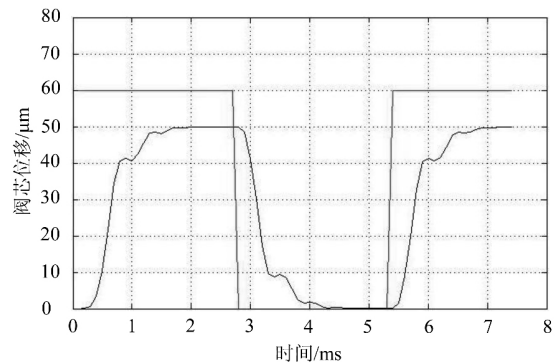


图 8 PWM 信号下的阀芯位移波形

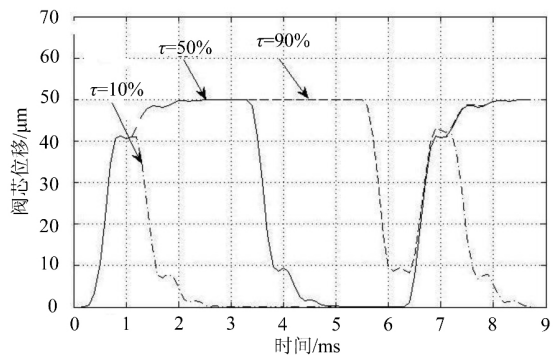


图 9 不同脉宽占空比时的阀芯位移波形

图 10 为阀芯在不同等效质量下的单位阶跃响应曲线, 可以看到增大等效质量可有效提高阀芯运动时间 $m = 0.3 \text{ kg}$ 时阀芯的响应时间约 0.8 ms。但同时超调量也较大, 阀芯波动严重。造成这种现象的原因在于, GMM 棒从零伸长的瞬间其输出力是最大的, 这个力会对阀芯及顶杆造成很大的冲击力, 从而阀芯获得很大的惯性力。这样, 虽然阀芯运动时间缩短了, 但同样造成了较严重的阀芯位移波动现象。由图中 $m = 0.12 \text{ kg}$ 时的曲线可以看到, 此时由于等效质量小, 阀芯惯性力不足以连续克服黏性阻尼力及复位弹簧力, 所以曲线无超调, 但 GMM 棒瞬时输出力造成的冲击现象仍然使阀芯位移有波动。

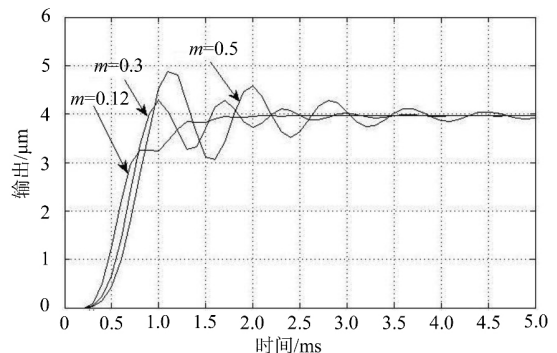


图 10 不同等效质量时的单位阶跃响应

图 11 为不同黏性阻尼时的阀芯单位阶跃响应曲线,可以看到随着黏性阻尼的增大,输出曲线变得光滑,也就是阀芯波动变小了。这是由于黏性阻尼力可抑制阀芯的微小波动,虽然增大阻尼可以减小阀芯波动,但阀芯响应时间也会随之变慢。

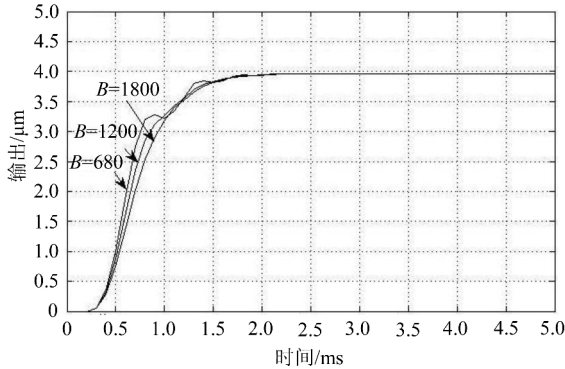


图 11 不同黏性阻尼时的单位阶跃响应

图 12 为不同线圈电感时的单位阶跃响应曲线,可以看到随着线圈电感的减小,阀芯响应时间得到显著提升。L=1 mH 时响应时间约 0.6 ms,这主要是由线圈的时间常数 $\tau = \frac{L}{R}$ 造成的, τ 值越小,则响应时间越快,但同样超调量也会增大。在高速开关阀的设计中,线圈的电阻和电感值对阀的性能有较大的影响。

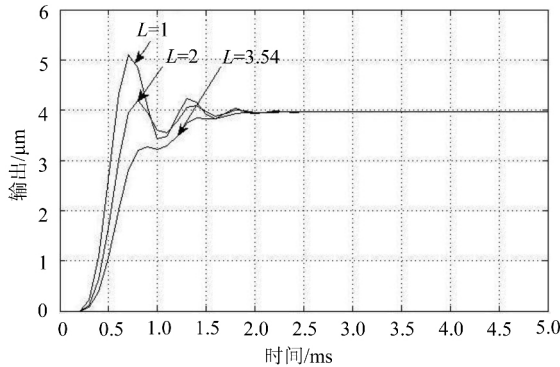


图 12 不同电感时的单位阶跃响应

图 13 为空载 ($\Delta p = 20$ MPa)、周期 $T = 6$ ms 时不同脉宽比下的流量曲线,脉宽占空比从 1% ~ 99% 所对应的平均流量分别为: 0.203 3 l/min、1.266 l/min、2.705 l/min、11.11 l/min、20.65 l/min、22.06 l/min。可见随着脉宽占空比的增大,平均流量也随着增大。当周期 $T = 4$ ms 时脉宽占空比从 1% ~ 99% 所对应的平均流量分别为: 0.188 1 l/min、1.092 l/min、2.47 l/min、11.13 l/min、19.93 l/min、21.14 l/min。调制周期从 6 ms 到 4 ms 变化时平均输出流量变化并不大。

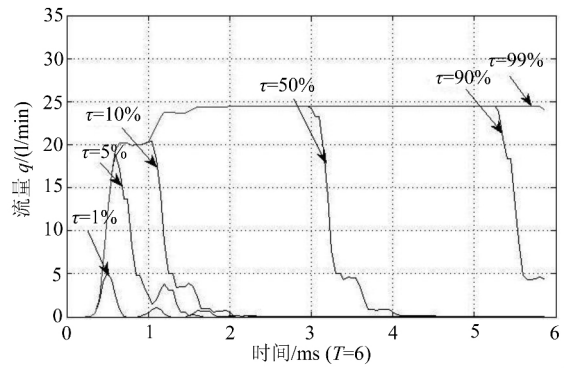


图 13 不同脉宽占空比时的流量曲线

图 14 为周期 $T = 4$ ms 时不同脉宽占空比下的负载压力 - 流量曲线,平均流量随负载压力的增大而减小,随脉宽占空比的增大而上移。

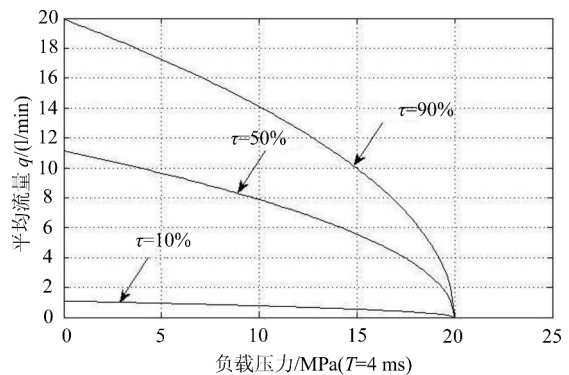


图 14 不同脉宽占空比下的负载压力 - 平均流量曲线

5 结论

通过分析 PWM 信号下的阀芯运动情况,得出改变脉宽占空比就可实现阀芯开度的变化控制。其次建立了高速开关阀的数学模型并导出了传递函数,仿真结果显示设计的新型高速开关阀的开关时间为 1.7 ms 和 1.9 ms,空载流量达 20 l/min 以上。同时,分析了各参数对高速开关阀的性能影响,得出等效质量和黏性阻尼对 GMA 高速开关阀的开关时间及阀芯波动现象有较大影响。等效质量越大,阀芯开启上升时间越快,同时阀芯位移波动现象越严重;黏性阻尼越大,阀芯开启时间越慢,但阀芯位移波动越小;线圈参数对高速开关阀的开关时间影响很大,相同电阻时线圈时间常数 $\tau = \frac{L}{R}$ 越小,则阀芯开关时间越短,反之则越慢。

参考文献:

- [1] 丁凡,姚健娣,笪靖. 高速开关阀的研究现状[J]. 中国机械工程学报, 2011, 9(3): 351 - 357.
- [2] 张延羽,张国贤. 高速开关电磁阀的性能分析及优化研究[J]. 机床与液压, 2006(9): 139 - 142.

(下转第 116 页)

```

        //delay1ms( 500 );
    }
}
void disp_count() //数据显示
{ display [12] = ( zs/1000 + '0' ); //转换转速
的千位
display [13] = ( zs/100% 10 + '0' ); //转换转速
的百位
display [14] = ( zs/10% 10 + '0' ); //转换转速
的十位
display [15] = ( zs% 10 + '0' ); //转换转速的
个位
}
void init_LCM( void) //初始设定函数( 8 位传
输模式)
{ write_inst( 0x01 ); //清除显示屏
delay1ms( 15 );
write_inst( 0x38 ); //设定两列
write_inst( 0x0f ); //开启显示功能
write_inst( 0x06 ); //设定输入模式
}
void write_inst( char inst) //写入指令函数
{ RS = 0;
RW = 0;
en = 1;
LCDP = inst;
en = 0; check_BF( );
}
void write_char( int shuju) //写入数据函数
{ RS = 1; RW = 0;
en = 1;
LCDP = shuju;
en = 0; check_BF( );
}
void check_BF( void) //检查忙碌函数
{ char i , x = 0x80;
while( x&0x80)

```

```

{
RS = 0; RW = 1;
en = 1;
x = LCDP;
en = 0;
for( i = 0; i < 10; i + + );
}
}
void delay1ms( int x) //延时函数
{
int i , j;
for( i = 1; i < x; i + + )
for( j = 1; j < 120; j + + );
}
}

```

2 结论

该文给出了利用光电传感器测量电机转速的方法,克服了传统测量方法的不足。所设计的光电式转速表具有测量速度快、测量精度高、灵敏度高的优点,不但可应用于一般的机电控制过程中的转速测量,也可应用于要求高精度的转速测量中。

参考文献:

- [1] 梁森,王侃负. 自动检测与转换技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] 王元庆. 新型传感器原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 张福学. 传感器应用及其电路精选 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [4] 阮智利,黄杭美. 自动检测与转换技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [5] 谢维成,杨加国. 单片机原理与应用及 C51 程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [6] 张义和,王敏男. 例说 51 单片机 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [7] 严天峰. 单片机应用系统设计与仿真调试 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [8] 谭浩强. C 程序设计 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 1999.

(上接第 73 页)

- [3] D T Branson , D N Johnston , D G Tilley. Piezoelectric Actuation in a High Bandwidth Valve [J]. Taylor & Francis ,2010(34) : 1794 - 1802.
- [4] 王传礼,丁凡,张凯军. 基于超磁致伸缩转换器的流体控制阀及其技术 [J]. 农业机械学报, 2003, 34(5) : 164 - 167.
- [5] 张德虎,朱建公. 芯套双动高速开关阀的设计与液动力分析 [J]. 西南科技大学学报, 2006, 21(3) : 65 - 70.
- [6] SEILLY A H. Colenoid actuators - further development is in extremely fast acting solenoids [J]. SAE Preprints , 1981(810462) : 1 - 12.
- [7] 周福章,李力千,刘志玮. 高速开关阀的设计与研究 [J]. 机械工程学报, 1998, 34(5) : 1 - 7.
- [8] 石延平,刘成文. 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.